

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PADRÃO DE TORQUE PARA
CALIBRAÇÃO DE TORQUÍMETROS EM TRÊS FAIXAS DE MEDIÇÃO**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

como parte dos requisitos para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALEXANDRO BARRETO DANTAS

Natal, Setembro de 2007

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE PADRÃO DE TORQUE PARA
CALIBRAÇÃO DE TORQUÍMETROS EM TRÊS FAIXAS DE
MEDIÇÃO**

ALEXANDRO BARRETO DANTAS

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luciano Bet – Orientador – UFRN

Prof. Dr. André Roberto de Sousa – Avaliador Externo – CEFET – SC

Prof. Dr. José Alberto de Araújo – Avaliador Interno – UFRN

Prof. Ph.D. José Daniel Diniz Melo – Avaliador Interno – UFRN

Prof. MSc. Luiz Pedro de Araújo – Membro Convidado

Prof. Dr. Walter Link – Membro Convidado

“As grandes idéias são aquelas nas quais a única coisa que nos surpreende é que não nos tivesse ocorrido antes.”

Noel Clarasó, escritor espanhol

**Aos meus pais e irmãos
que sempre acreditaram
no meu sucesso
e torceram muito por mim.**

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Luciano Bet, que sempre se mostrou solícito e não mediu esforços para me ajudar nos vários momentos em que precisei de auxílio.

Ao Prof. Walter Link, idealizador do projeto e grande mentor que muito me ajudou a desenvolvê-lo. Sua participação foi fundamental e imprescindível para a existência deste trabalho.

Ao Prof. Luiz Pedro de Araújo pelo grande incentivo, empenho e colaboração no desenvolvimento deste projeto.

A toda a equipe do LabMetrol que tanto torceu, se empenhou e contribuiu para a conclusão de meu mestrado: Cláudio, Dabney, Élber, Fabrício, Felipe, Henrique, Jean, Mariana, Raiff, Rita, Sérgio e Tanaka. A todos os amigos que estão ou estiveram por lá, o meu muito obrigado e a certeza que jamais esquecerei tudo o que fizeram por mim.

A Ayrles e Rodrigo pela grande ajuda na realização dos ensaios e contribuição na pesquisa.

A toda minha família, tios, tias, primos, primas e “agregados”, sem distinção, pelo incentivo e apoio que sempre deram.

A meus amigos Assis, Daniel, Fernando, Francisco das Chagas, Gustavo, Hugo, Jander, Leonardo, Marcos e tantos outros que, perto ou longe, sempre me apoiaram e torceram por mim.

Ao Laboratório de Metrologia da UFRN – LabMetrol, que custeou todo o projeto e, desde o tempo da graduação, abriu suas portas e me acolheu com todo carinho.

À EMIC Equipamentos e Sistemas de Ensaios Ltda., pela doação da célula de carga utilizada no equipamento.

À Global Indústria e Comércio Ltda., na pessoa de seu proprietário, Eng. Habib, pela confecção das peças e acessórios integrantes do padrão desenvolvido e cessão de torquímetros para a execução de ensaios.

À BONOR Ind. de Botões do Nordeste S.A, que através de seu gerente de ferramentaria, Sr. Sérgio Demeda, assegurou a usinagem por eletroerosão de componentes do padrão.

À Nordeste Rolamentos Ltda., que através de seu proprietário, Sr. Antônio Domingos, realizou a doação dos dois rolamentos de agulha utilizados no equipamento.

À Hanover Brasil Ltda., em especial ao Eng. Ricardo Castilhos e o Supervisor de Manutenção José Jurandir, pela concessão de torquímetros para a realização de ensaios.

Aos Professores José Alberto e José Daniel, pela participação nas bancas de qualificação e defesa, onde geraram importantes contribuições para o melhoramento deste trabalho.

Ao Professor André Roberto de Sousa, pela contribuição e participação na banca examinadora deste trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, pela oportunidade para realização deste mestrado e ao seu Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM, na pessoa de seu Coordenador, Prof. Rubens Maribondo, pela assessoria e paciência.

E a todos que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Medições.....	18
2.2	Metrologia - a ciência da medição.....	19
2.2.1	Metrologia - histórico	20
2.2.2	Metrologia – requisito para a qualidade	24
2.3	Calibração	24
2.4	Incerteza de medição	29
2.4.1	Incerteza padrão.....	32
2.4.1.1	Incerteza padrão Tipo A.....	32
2.4.1.2	Incerteza padrão Tipo B	33
2.4.2	Distribuição de probabilidade.....	34
2.4.2.1	Distribuição normal (N)	34
2.4.2.2	Distribuição retangular (R).....	35
2.4.2.3	Distribuição triangular (T)	35
2.4.2.4	Outras distribuições.....	36
2.4.3	Incerteza padrão combinada	36
2.4.4	Incerteza padrão expandida	37
2.5	Metrologia em torque.....	40
2.5.1	Juntas mecânicas.....	40
2.5.2	Conceitos básicos sobre torque.....	41
2.5.3	Importância da medição de torque.....	42
2.5.4	Torquímetros.....	43
2.5.4.1	Torquímetro de indicação tipo relógio	44
2.5.4.2	Torquímetro de indicação digital (torquímetros eletrônicos).....	45
2.5.4.3	Torquímetro de indicação tipo vareta.....	45
2.5.4.4	Torquímetro de estalo.....	46
2.5.4.5	Torquímetro de quebra	47
2.5.4.6	Torquímetro de estalo/quebra não ajustável.....	48
2.5.4.7	Torquímetro limitador de torque	48
2.5.4.8	Seleção do torquímetro apropriado	49

2.5.5	Calibração de torquímetros.....	50
2.5.5.1	Calibradores primários	50
2.5.5.2	Calibradores analógicos	52
2.5.5.3	Calibração de torquímetros pelo sistema direto	52
2.5.5.4	Calibração de torquímetros por meio de transdutores.....	53
2.5.6	Expressão da incerteza de medição em metrologia de torque	55
3	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	59
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	74
4.1	Calibração do sistema	74
4.1.1	Problemas observados na calibração do sistema	79
4.2	Calibração de torquímetros.....	82
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	84
5.1	Resultados obtidos na calibração do sistema.....	84
5.2	Resultados obtidos na calibração de torquímetros.....	89
5.2.1	Resultados obtidos na calibração de torquímetros utilizando a segunda faixa nominal do padrão de torque	89
5.2.2	Resultados obtidos na calibração de torquímetros utilizando a terceira faixa nominal do padrão de torque	91
6	CONCLUSÕES.....	94
	REFERÊNCIAS	96
	APÊNDICE A – Projeto em AutoCAD do calibrador de torquímetros	102
	APÊNDICE B – Resumo de normas para calibração de torquímetros.....	106
	APÊNDICE C – Procedimento para calibração de células de carga utilizando o sistema de aquisição de dados Spider8 e software catmanEasy.....	114
	APÊNDICE D – Algumas definições do Vocabulário Internacional de Metrologia – VIM .	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição de probabilidade normal	34
Figura 2: Distribuição de probabilidade retangular	35
Figura 3: Distribuição de probabilidade triangular	36
Figura 4: Tensão gerada pela aplicação de torque	43
Figura 5: Torquímetro de indicação tipo relógio	44
Figura 6: Torquímetro de indicação digital	45
Figura 7: Torquímetro de indicação tipo vareta	45
Figura 8: Torquímetro de vareta em “T”	46
Figura 9: Torquímetro de estalo	47
Figura 10: Torquímetro de quebra	48
Figura 11: Torquímetro limitador de torque	49
Figura 12: Padrão primário de torque	51
Figura 13: Calibrador analógico de torquímetros	52
Figura 14: Calibração de torquímetro pelo sistema direto	53
Figura 15: Calibração de torquímetros por meio de transdutores	54
Figura 16: Detalhe de estrutura da mesa de calibração	55
Figura 17: Primeira opção de projeto	60
Figura 18: Segunda opção de projeto	61
Figura 19: Detalhe do inserto de encaixe de um torquímetro	62
Figura 20: Esquema funcional do calibrador de torquímetros	63
Figura 21: Maquete em isopor do calibrador de torquímetros	64
Figura 22: Croquis da versão final do calibrador de torquímetros	65
Figura 23: Detalhe da ligação manipulador-fuso de esferas-plataforma elevatória	66
Figura 24: Detalhe da barra de força da plataforma elevatória	66
Figura 25: Calibração de torquímetro nos sentidos horário e anti-horário	67
Figura 26: Deslocamento exequível da torre de força	67
Figura 27: Mecanismo para transmissão de torque	68
Figura 28: Transmissores de torque	69
Figura 29: Detalhe dos elementos de transmissão de torque	70
Figura 30: Rolamento de agulhas	71
Figura 31: Sistema de aquisição de dados	72
Figura 32: Dispositivo para calibração do sistema	75
Figura 33: Medição do comprimento do dispositivo de calibração	76
Figura 34: Calibração do padrão de torque	78

Figura 35: Pequena lacuna entre o parafuso de contato e o braço de alavanca	80
Figura 36: Nova configuração de fixação da célula de carga.....	81
Figura 37: Curva de erros para a segunda faixa nominal.....	85
Figura 38: Curva de erros para a terceira faixa nominal	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de abrangência k para diferentes graus de liberdade v_{eff}	39
Tabela 2 – Relações entre as unidades de torque mais utilizadas	42
Tabela 3 – Contribuições dos elementos de incerteza em metrologia de torque.....	56
Tabela 4 – Principais fontes de incerteza em um sistema primário de calibração de torque.....	57
Tabela 5 – Planilha de incerteza do comprimento do dispositivo de calibração	77
Tabela 6 – Características dos torquímetros utilizados nas calibrações realizadas com o padrão de torque desenvolvido	82
Tabela 7 – Dados referentes à calibração da segunda faixa nominal do calibrador.....	84
Tabela 8 – Planilha de incerteza do torque aplicado na segunda faixa nominal.....	86
Tabela 9 – Dados referentes à calibração da terceira faixa nominal do calibrador.....	87
Tabela 10 – Planilha de incerteza do torque aplicado na terceira faixa nominal.....	88
Tabela 11 – Comparação entre métodos de calibração do Torquímetro A na segunda faixa.....	89
Tabela 12 – Comparação entre métodos de calibração do Torquímetro B na segunda faixa.....	90
Tabela 13 – Comparação entre métodos de calibração do Torquímetro C na segunda faixa.....	90
Tabela 14 – Comparação entre métodos de calibração do Torquímetro D na segunda faixa.....	90
Tabela 15 – Comparação entre métodos de calibração do Torquímetro A na terceira faixa.....	91
Tabela 16 – Comparação entre métodos de calibração do Torquímetro B na terceira faixa.....	91
Tabela 17 – Comparação entre métodos de calibração do Torquímetro D na terceira faixa.....	91
Tabela 18 – Comparação entre os resultados de calibração do torquímetro A na segunda e terceira faixas	92
Tabela 19 – Comparação entre os resultados de calibração do Torquímetro B na segunda e terceira faixas	93
Tabela 20 – Comparação entre os resultados de calibração do Torquímetro D na segunda e terceira faixas	93

SÍMBOLOS

X_i	Grandeza de entrada
x_i	Melhor estimativa disponível do valor da grandeza de entrada
n	Número de medições independentes
q_1, q_2, \dots, q_n	Valores medidos em uma série de medições
\bar{q}	Média aritmética dos valores medidos
$s(q)$	Desvio padrão experimental dos valores medidos
$u(x_i)$	Incerteza padrão
ν	Número de graus de liberdade
a	intervalo de variabilidade da grandeza de entrada
$u_c(y)$	Incerteza padrão combinada
$u_i(y)$	Contribuição de cada fonte para a incerteza combinada
c_i	Coefficiente de sensibilidade
k	Fator de abrangência
U	Incerteza padrão expandida
ν_{eff}	Grau de liberdade efetivo
Y	Estimativa de saída
$u(y)$	Incerteza padrão da estimativa de saída
ν_i	Graus de liberdade efetivo da contribuição da incerteza padrão
T	Torque
F	Força
d	Distância
b'	Repetitividade em posição de montagem inalterada
b	Reprodutibilidade em diferentes posições de montagem
fa	Erro de interpolação
r	Resolução
X_j	Valores medidos em posições de montagem diferentes
X_a	Valores medidos a partir da curva de interpolação
M_k	Torque aplicado na calibração
u_{tcm}	Incerteza da máquina de calibração de torque
m	Massa
g	Aceleração da gravidade
U_P	Incerteza do padrão (extraída de certificado)
u_P	Incerteza do padrão (valor estimado)
σ	Máximo desvio padrão das medições efetuadas
r_P	Resolução do padrão
u_{ap}	Incerteza do apalpador do padrão
α	Coefficiente de dilatação térmica
L	Comprimento medido
MBP	Média dos braços do padrão
U_L	Incerteza devido ao comprimento das barras do dispositivo de calibração
T_{max}	Torque máximo aplicado
u_M	Incerteza devido às massa aplicadas
g_l	Aceleração da gravidade local
g_n	Aceleração da gravidade normal
u_g	Incerteza devido à aceleração da gravidade
T_2	Torque obtido a partir do braço do padrão para a segunda faixa nominal
T_{2F}	Torque corrigido para a segunda faixa nominal
T_3	Torque obtido a partir do braço do padrão para a terceira faixa nominal
T_{3F}	Torque corrigido para a terceira faixa nominal
ΔT_{SD}	Variação entre os valores nominais de torque e os obtidos nas calibrações pelo sistema direto
ΔT_{PD}	Variação entre os valores nominais de torque e os obtidos nas calibrações com o padrão desenvolvido

RESUMO

O constante desenvolvimento dos instrumentos e equipamentos utilizados para aplicação e medição de torque na indústria em geral, incluindo suas técnicas de uso e instrumentação cada vez mais exatas e abrangentes, qualifica a metrologia em torque como uma das áreas da engenharia mecânica em maior desenvolvimento tecnológico e com crescente demanda em serviços de calibração. Existe uma diversidade de calibradores de torquímetros disponível no mercado, atendendo diferentes faixas de torque e utilizando princípios de funcionamento diversos, estes calibradores atendem às exigências das normas de qualidade e confiabilidade. Entretanto, atualmente não há a opção de um padrão de torque que atenda, com baixo custo, a calibração de torquímetros em várias faixas utilizando-se apenas um padrão. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e avaliação de um padrão de torque cuja concepção permita a calibração de torquímetros em três faixas nominais distintas através de um instrumento com um único padrão, propiciando redução de custos e tempo de execução, além de disponibilizar maior confiabilidade na qualificação final dos instrumentos medidores de torque. Para um adequado atendimento da demanda na calibração de torquímetros, é necessário que laboratórios de calibração e ensaios possuam uma coleção de padrões de torque, cada qual apto a atender uma única faixa nominal, o que se torna oneroso. O desenvolvimento do padrão de torque mostrou-se viável técnica e economicamente, possibilitando a calibração de torquímetros em diferentes faixas nominais através de um único sistema de medição versátil, eficiente e de simples operação.

ABSTRACT

The continuous development of instruments and equipment used as tools or torque measurement in the industry is demanding more accurate techniques in the use of this kind instrumentation, including development of metrological characteristics in torque measurement. The same happens with the needs in calibration services. There is a diversity of methods of hand torque tools in the market with different measuring range but without complaining with technical standards in terms of requirements of quality and reliability. However, actually there is no choice of a torque measuring standard that fulfills, with low cost, the needs for the calibration of hand torque tools in a large number of ranges. The objective of this thesis is to show the development and evaluation of a torque measuring standard device with a conception to allow the calibration of hand torque tools with three levels of torque with an single instrument, promoting reduction of costs and time in the calibration, also offering reliability for the evaluation of torque measuring instrument. To attend the demand in the calibration of hand torque tools it is necessary that the calibration laboratories have a big collection of torque measuring standards, to fulfills the needs of the costumer, what is very costly. The development of this type of torque measuring standard revealed a viable technique and economically making possible the calibration of hand torque tools in different nominal ranges through a single measurement system versatile, efficient and of easy operation.

.

1. INTRODUÇÃO

A metrologia tem suas origens na antiguidade, inicialmente utilizada nas trocas de produtos, no comércio, para resolver questões de heranças, na cobrança de impostos e tributos, entre outras aplicações, tendo sempre freqüente relação com a moeda, pois, para cunhá-la devia ser utilizada uma quantidade certa de metais preciosos. Uma prova da longínqua preocupação com medições é a pirâmide de Gizeh, construída pelos egípcios por volta de 4800 a.C., com blocos de pedras com base de 1200 mm, cuja diferença dos lados do bloco é inferior a 15 mm, o que corresponde a um erro de ortogonalidade de doze minutos. Inicialmente, o homem procurou definir dimensões usando como referência o seu próprio corpo. Assim surgiram várias unidades de medida como o cúbito¹, o pé e a jarda (OLIVEIRA, P., 2006).

A Bíblia faz freqüentes referências às medidas, em geral na forma de um dever de “não possuir ou usar dois pesos e duas medidas”. Hoje este conceito é normalmente associado à justiça, que inclusive utiliza o símbolo metrológico da balança. Desde a antiguidade, a justiça e a metrologia estão associadas no sentido de que o uso correto das medições é uma forma de justiça. Nas mitologias antigas os deuses da metrologia são freqüentemente os mesmos que os da justiça (MOSCATI, 2005).

Durante o processamento industrial, as atividades de controle e otimização de processos através de ensaios e calibrações necessitam de resultados de medições confiáveis para garantir qualidade, segurança, respeito ao meio ambiente, evitar retrabalhos e, conseqüentemente, desperdício (MACHADO et al, 2003).

As imperfeições naturais durante a realização de medições levam à impossibilidade de se conhecer com absoluta certeza o valor verdadeiro de uma grandeza: Toda medição gera uma incerteza (SCHMID; MARTÍNEZ, 2004).

É muito freqüente a apresentação de resultados de medição sem a devida atenção quanto à evidência da sua rastreabilidade, confiabilidade metrológica e incerteza. A ausência integrada destas qualidades de um resultado compromete bastante qualquer tipo de conclusão fundamentada nestes resultados de medição (COUTO et al., 2002).

¹Padrão de comprimento utilizado pela civilização grega por volta de 500a.C., definido como a distância do cotovelo à ponta do indicador e media cerca de 523 mm.

A calibração de instrumentos de medição de torque, mesmo com estes sendo amplamente utilizados em relevantes indústrias, tem recebido menor atenção do que a calibração de outros tipos de instrumentos. O número de laboratórios que oferecem serviços de calibração para esta grandeza é limitado e a situação específica para a calibração de torque ainda pode ser considerada deficitária (BOCHESE, L.; BOCHESE, A. 2001).

O método de calibração de torquímetro com transdutores é o mais utilizado. Os sistemas de calibração baseados neste princípio utilizam, em sua grande maioria, transdutores de torque como elemento sensor para o torque aplicado.

Transdutores do torque são dispositivos de custo relativamente elevado e que trabalham dentro de uma determinada faixa nominal específica. Para que sistemas de calibração de torquímetro que utilizam transdutores de torque possam satisfazer uma ampla gama de torquímetro com diversas faixas nominais, é necessária a permuta destes sensores de acordo com o torquímetro a ser calibrado.

O projeto desenvolvido e apresentado neste trabalho propõe um padrão de torque para calibração de torquímetro em três faixas nominais utilizando um único transdutor de força do tipo célula de carga como elemento sensor. De custo significativamente inferior ao de um transdutor de torque - algo em torno de um terço - a célula de carga também oferece a possibilidade de, apenas alterando sua posição no sistema, variar as faixas de torque a serem geradas.

Atualmente, apesar da variedade de calibradores existentes, não há a opção de um padrão de torque que atenda a calibração de torquímetro em várias faixas utilizando-se apenas um único transdutor de força, fornecendo uma calibração rápida, barata, confiável e eficaz.

Esta nova concepção de padrão de torque permitirá a calibração de torquímetro com significativa redução de custos e tempo de execução, além de disponibilizar maior confiabilidade na qualificação final dos instrumentos medidores de torque, por meio da melhor quantificação das fontes de erro consideradas no cálculo de incerteza.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um padrão de torque cuja concepção permita a calibração de torquímetro até 2000 N.m, com incerteza de $\pm 0,05\%$, através de um único instrumento capaz de realizar calibrações nos sentido horário e anti-horário e operar em três faixas nominais, possibilitando redução de custos, tempo de execução, além de assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos.

No capítulo 2 deste trabalho é apresentada uma ampla revisão bibliográfica trazendo um histórico sobre metrologia e fazendo referência a conceitos de medições, incerteza de medição, calibração e metrologia em torque. No capítulo 3 são expostos detalhes do desenvolvimento do projeto do padrão de torque desenvolvido. Os procedimentos experimentais para a calibração do sistema e de torquímetros são abordado no capítulo 4, enquanto que os resultados e discussões referentes a estes procedimentos são tratados no capítulo 5. Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas deste trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros. Como informações complementares, no Apêndice A é exibido o projeto em AutoCAD do calibrador de torquímetros, no Apêndice B é apresentado um resumo de normas para calibração de torquímetros, no Apêndice C é transcrito o procedimento para calibração de células de carga utilizando o sistema de aquisição de dados Spider8 e software catmanEasy e no apêndice D estão agrupadas algumas definições extraídas do Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia – VIM.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Medições

Medir é uma forma de descrever o mundo. As grandes descobertas científicas, as grandes teorias clássicas foram, e ainda são, formuladas a partir de observações experimentais. Uma boa teoria é aquela que se verifica na prática. A descrição das quantidades envolvidas em cada fenômeno se dá através da medição (GONÇALVES JÚNIOR, 2002).

Medir é comparar uma grandeza com uma outra, de mesma natureza, tomada como padrão. De acordo com Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia – VIM (ver Apêndice D), medição é o conjunto de operações que tem por objetivo determinar o valor de uma grandeza. Grandeza é o atributo físico de um corpo que pode ser qualitativamente distinguido e quantitativamente determinado.

Para determinar o valor numérico de uma grandeza, é necessário que se disponha de uma outra grandeza de mesma natureza, definida e adotada por convenção, para fazer a comparação com a primeira, ou seja, uma unidade de medição. Definida a unidade de medição, faz-se necessário estabelecer um padrão metrológico desta unidade. Um padrão metrológico é definido como uma medida materializada, instrumento de medição, material de referência ou sistema de medição destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza para servir como referência. Em resumo, um padrão metrológico é um instrumento de medir ou uma medida materializada destinado a reproduzir uma unidade de medir para servir como referência. O padrão (de qualquer grandeza) reconhecido como tendo a mais alta qualidade metrológica e cujo valor é aceito sem referência a outro padrão, é chamado de padrão primário. Um padrão cujo valor é estabelecido pela comparação direta com o padrão primário é chamado padrão secundário, e assim sucessivamente, criando uma cadeia de padrões onde um padrão de maior qualidade metrológica é usado como referência para o de menor qualidade metrológica. Pode-se, por exemplo, a partir de um padrão de trabalho, percorrer toda a cadeia de rastreabilidade desse padrão, chegando ao padrão primário (IPEM-SP, 2006).

Medir não é uma ação recente na história da humanidade. Desde a antiguidade, o homem sempre sentiu a necessidade de medir, fosse para definir seu espaço, o objeto que teceu, o bloco de pedra que talhou, ou ainda, a mercadoria que estivesse sendo transacionada (OLIVEIRA, P., 2006).

A existência de múltiplas unidades de medida, definidas sem qualquer critério científico, trazia dificuldades consideráveis ao comércio. O desenvolvimento industrial acarretou em pressões mundiais por mais qualidade, levando estes dois últimos séculos a uma acelerada evolução do nível tecnológico e da linguagem, transformando a prática da medição em uma ciência - a metrologia (CAMARGO, 2004).

A medição continua presente no desenvolvimento tecnológico. É através da medição do desempenho de um sistema que se avalia e realimenta o seu aperfeiçoamento. A qualidade, a segurança, o controle de um elemento ou processo é sempre assegurada através de uma operação de medição (GONÇALVES JÚNIOR, 2002).

Atualmente, os padrões de competitividade mundial impõem a qualidade como diferencial entre as empresas, exigindo atualização contínua dos processos produtivos. Assim, a associação entre qualidade e normalização passa a ser uma constante. Comprar um produto confiável significa adquirir um de qualidade, isto é, algo que atenda uma especificação. Em outras palavras, produto que foi feito segundo normas de produção e controle adequados. E é nesse processo de controle que deve estar implícita a rastreabilidade das medições, ou seja, que o processo de medição esteja relacionado a padrões nacional e/ou internacional através de uma cadeia contínua de medições. Nessa cadeia deve constar a incerteza em cada nível (ISO-GUM, 2003).

2.2 Metrologia - a ciência da medição

Metrologia, palavra de origem grega (metron: medida; logos: ciência), é definida como a “ciência da medição”, e tem como foco principal prover confiabilidade, credibilidade, universalidade e qualidade às medidas. Como as medições estão presentes, direta ou indiretamente, em praticamente todos os processos de tomada de decisão, a abrangência da metrologia é imensa, envolvendo a indústria, o comércio, a saúde e o meio ambiente, para citar apenas algumas áreas (LONGO, 2005).

Metrologia é a ciência que abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos a medições, constituindo-se em um importante instrumento para o desenvolvimento das atividades econômicas, científicas e tecnológicas. Uma base científica forte e confiável e um sistema de medição harmonizado são indispensáveis para prover a eficiência na produção e no comércio de bens e serviços que atendam às necessidades da sociedade (MCT, 2006).

A metrologia é uma ciência que condiciona as demais. Suas leis se aplicam a todas as disciplinas, logo, é uma superciência. Mas para alcançar os seus fins, ela deve dispor de informes de todas as ciências e sua evolução está estreitamente ligada àqueles oriundos da experimentação, é, portanto, uma interciência (ARAÚJO, 2004).

2.2.1 Metrologia - histórico

A idéia de um sistema coerente e universal de medidas, baseado em grandezas físicas invariantes, é relativamente recente do ponto de vista da história das ciências. Sua difusão no mundo industrial moderno representa uma radical transformação nas relações entre o homem e o mundo. De fato, para o mundo econômico pré-moderno, marcado pela preponderância das atividades agrícolas e pelo comércio local, a virtude de um sistema de medidas residia em sua compreensão imediata e em suas divisões computacionais simples (DIAS, 1998).

Sob o impressionante número de pesos e medidas em uso até o início do século XIX, observa-se a existência de sistemas de medidas específicos para cada tipo de atividade econômica e mesmo para cada região geográfica. Mesmo com as autoridades políticas procurando garantir e manter padrões oficiais de medidas, a capacidade de uniformização dificilmente ultrapassava as fronteiras da cidade em que estava sediada ou da região econômica em que predominava (DIAS, 1998).

No contexto cultural do Ocidente europeu surgiu o primeiro esforço de conversão das medidas e para o estabelecimento de suas equivalências. A partir do Renascimento podem ser registradas duas direções distintas. A primeira é a discussão relativa aos pesos, medidas e valores monetários empregados nos textos da antiguidade clássica e nas Sagradas Escrituras, conduzida pelos círculos intelectuais e humanistas. Como, pelo menos em termos vocabulares, as medidas empregadas à época eram semelhantes às registradas nos textos antigos - onças, libras, marcos, siclos, minas, etc. - o problema a ser investigado era sua correlação exata, fundamental para a compreensão do passado e para a interpretação da Bíblia (DIAS, 1998).

O problema da equivalência de pesos e medidas, contudo, não se restringia a estudos históricos. Com a expansão do comércio internacional, além da questão do câmbio, desponta a dificuldade em lidar com as inúmeras unidades de medida em que eram expressas as mercadorias comercializadas em dezenas de portos no Mediterrâneo, no Oceano Índico e na América. Entretanto, o substrato que daria origem à primeira formulação de um sistema

universal de medidas e a possibilidade de seu emprego generalizado pela sociedade surgiu com a associação entre os projetos de uniformização do uso de pesos e medidas, formulados pelas monarquias européias, e as formas nascentes da comunidade científica (DIAS, 1998).

As monarquias absolutistas já haviam sentido, em termos bastante práticos, os efeitos positivos da simples conversão de medidas, com padrões fixos e constantes, na construção de armamentos e de navios de guerra. Contudo, o esforço que obtinha rápido resultado na padronização da dimensão das armas e outros equipamentos bélicos, esgotava-se em vão na padronização das medidas de uso agrícola e comercial, com as mais desagradáveis conseqüências para o tesouro real (DIAS, 1998).

Por outra parte, o progresso da ciência experimental já exigia o estabelecimento de uma linguagem comum como condição básica para o intercâmbio de resultados e descobertas. No contexto específico da história francesa, esta associação daria origem às técnicas científicas que tornariam realidade o sistema métrico decimal e mostraria o caminho político para seu estabelecimento e difusão (DIAS, 1998).

Foi neste contexto específico que se publicou a primeira exposição sistemática de um sistema de medidas composto por uma base numérica decimal, pela fixação do inter-relacionamento das unidades de massa e comprimento e pelo estabelecimento de seus valores em acordo com constantes físicas. Em 1670, o abade Gabriel Mouton, vigário da igreja de São Paulo, criou um sistema cuja unidade básica seria constituída por uma fração da circunferência da Terra. A partir desta unidade básica, Mouton deduziu um conjunto de medidas lineares, sujeitas a relações decimais. A fração do meridiano terrestre, porém, não foi a única opção considerada. A utilização do pêndulo foi proposta como unidade fundamental, em 1671, pelo matemático Jean Picard, que, ao examinar as antigas toesas² em uso na França, propôs associar seu valor à medida da extensão do pêndulo que bate 1 segundo em Paris. Entretanto, àquela altura, tanto o problema prático da medição dos meridianos terrestres, como alterações na oscilação do pêndulo provocadas por variações na gravidade terrestre já haviam se tornado obstáculos concretos na configuração do sistema de medidas, uma vez que as sociedades científicas estavam longe de dispor dos meios para a condução das rigorosas medições (DIAS, 1998).

² No sistema criado por Mouton, a unidade básica seria o milliare, equivalente ao comprimento de um arco de 1 minuto da circunferência máxima da Terra. As demais unidades seriam a centuria, a decuria, a virga, a virgula, a decima, a centesima e a milésima. A virga e a virgula corresponderiam às frações 1/1.000 e 1/10.000 do milliare respectivamente, e seriam equivalentes à toesa e ao pé.

Assim, a primeira ligação concreta entre as discussões científicas e os recursos governamentais seria constituída quando, em seus esforços de unificação dos padrões de medidas, o governo francês resolveu patrocinar o trabalho de definição da equivalência das medidas tradicionais com constantes físicas, através de estudos que dariam origem ao padrão de ferro da toesa de Paris, chamada então toesa do Peru, que deveria ser utilizada, a partir de maio de 1766, como padrão a ser reproduzido e enviado às províncias francesas. Entretanto, mais este esforço de uniformização foi inviabilizado pela resistência de comerciantes e senhores feudais, que temiam a interferência real na determinação de suas rendas e contavam com o conservadorismo da própria população (DIAS, 1998).

Em 4 de agosto de 1789, os privilégios e rendas feudais, assim como os sistemas de pesos e medidas a eles associados, foram suprimidos de um só golpe. Em maio de 1790, para preencher o vazio legal criado, foi encaminhada à Assembléia Nacional uma nova legislação metrológica estabelecendo como base do sistema universal de medidas o comprimento do pêndulo que bate à latitude de 45°. Entretanto, este sistema foi considerado insatisfatório e a fração do meridiano terrestre voltou a ocupar sua posição de medida fundamental. Decidiu-se então tomar por base o meridiano de Dunquerque, na França, até Barcelona, cuja medição já havia sido anteriormente realizada, necessitando apenas de verificação (DIAS, 1998).

A Academia de Ciências de Paris, responsável pela elaboração deste novo sistema de medidas, nomeou comissões de cientistas incumbidas de estudar os problemas e estabelecer os passos concretos a tomar. As realidades práticas, contudo, não podiam aguardar a conclusão dos trabalhos científicos e, em março de 1792, o governo francês pediria providências para uma rápida conclusão dos trabalhos ou que se providenciasse uma tábua provisória de medidas, tendo em vista a necessidade de facilitar a livre circulação de mercadorias no reino e para evitar os distúrbios que já se registravam em função do vácuo metrológico gerado pela supressão dos privilégios feudais em 1789. Com isso, em 29 de maio de 1793 foi estabelecido o metro provisório de 36 polegadas e 11,44 linhas bem como a escala decimal para seus múltiplos e submúltiplos. O valor do metro foi atingido a partir do cálculo da décima milionésima parte do quarto do meridiano. Quanto à nomenclatura definitiva hesitou-se ainda entre uma que se denominou metódica - incorporando os atuais nomes das medidas métricas - e outra simplificada, incluindo os nomes das antigas medidas (DIAS, 1998).

A medição dos meridianos foi retomada e, em 1799, foram elaborados os relatórios finais definindo o comprimento do metro como 3 pés e 11,296 linhas. Baseando-se neste

comprimento foram construídos 12 metros de ferro e dois de platina. Com as devidas certificações, o metro de ferro nº. 2 foi considerado ideal e escolhido como comparador dos demais, sendo depositado nos Arquivos de França. Foi esse metro transformado em barra de platina que passou a ser denominado metro dos arquivos (DIAS, 1998).

Em 1872 foi iniciada avaliação dos padrões dos arquivos franceses, chegando-se à constatação de que o padrão do metro tinha sido seriamente degradado pelo uso constante e pela pressão imprimida pelos rudimentares comparadores. Suas dimensões, porém, não haviam sido alteradas, e a adoção internacional do sistema métrico poderia se sustentar nos valores então estabelecidos. O material do novo padrão deveria ser uma liga de 90% de platina e 10% de irídio, conhecida por sua homogeneidade, inalterabilidade, dureza e rigidez e o lingote para a fabricação seria obtido em uma única fusão. As barras padrão teriam 102 cm e seção transversal em forma de X. Foram também definidos os tipos de instrumento para a comparação e para o traçado das marcas no padrão. Assim, o metro foi redefinido como “a distância entre os dois extremos da barra de platina depositada nos Arquivos da França e apoiada nos pontos de mínima flexão na temperatura de zero grau Celsius”. Escolheu-se a temperatura de zero grau Celsius por ser, na época, a mais facilmente obtida com o gelo fundente (DIAS, 1998).

A definição do metro baseada no protótipo internacional em platina iridiada, em vigor desde 1889, foi substituída em 1960 por uma outra definição baseada no comprimento de onda de uma radiação do criptônio 86, com a finalidade de aumentar a exatidão da realização do metro. Essa última definição foi substituída em 1983 pela seguinte: “O metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de $1/299.792.458$ de segundo” (INMETRO, 2003).

A consolidação do Bureau Internacional de Pesos e Medidas/BIPM, simbolizada pela entrega dos trinta padrões do metro e do quilograma aos países signatários da Convenção do Metro, entre 1875 e 1889, representou o ponto final no processo de organização do sistema métrico. Uma vez concretizada a utopia iluminista da unificação dos sistemas de pesos e medidas, baseados em fenômenos físicos invariantes, a metrologia começava a apresentar seus frutos prometidos como instrumento da física experimental e como elemento imprescindível no campo industrial. Já na virada do século XIX, esta associação ultrapassaria fronteiras jamais imaginadas pelos defensores do sistema métrico (DIAS, 1998).

2.2.2 Metrologia - requisito para qualidade

A metrologia pode ser vista como a ciência que provê a técnica capaz de permitir a quantificação das grandezas físicas e químicas, tornando-as imbuídas de significado e permitindo correlacionar números com certo senso de exatidão a características de produtos, processos e serviços, o que fornece uma base técnica para o exercício e a prática da qualidade. Nesse contexto, essa ciência torna-se uma pré-condição indispensável à decodificação do conhecimento e sua transformação em produtos e serviços de qualidade (QUEIROZ, 2005).

Com a evolução da ciência e da tecnologia, produtos se tornam mais complexos e a qualidade se assenta em critérios cada vez mais objetivos e técnicos. Paralelamente, com cada vez mais freqüência, fabricantes são clamados a mostrar a qualidade de seus produtos e serviços por meio de certificação de conformidade aos requisitos técnicos (REGAZZI, 2006).

Intimamente correlacionadas, metrologia e qualidade constituem-se em poderosos instrumentos de transformação da infra-estrutura tecnológica de países e organizações e são ferramentas indispensáveis à melhoria de produtos e serviços que concorrem em mercados competitivos. Com forte impacto econômico e social, a prática da metrologia induz a uma drástica redução nos índices de desperdício e retrabalho, gerando na sociedade uma cultura voltada para a qualidade, para a construção da cidadania, para a prática e defesa dos direitos do consumidor e melhoria da qualidade de vida (PUC-RIO, 2006).

A metrologia é a base da normalização e, como tal, o controle metrológico, através de calibrações de padrões e dos sistemas de medições, tornou-se, já há algum tempo, uma exigência para a comercialização de produtos e serviços entre países. As exigências são caracterizadas em normas técnicas bem definidas e devem ser seguidas nos mínimos detalhes em conjunto com as normas de gerenciamento e de capacitação de fornecedores (REGAZZI, 2006).

2.3 Calibração

Os resultados de medições são utilizados como parâmetro para questões como, estudos científicos e tecnológicos, estimativas financeiras para projetos, verificação do atendimento a limites especificados em legislações ou normas, em comparações para reconhecimento mútuo entre laboratórios, na comercialização de produtos, em apoio a decisões judiciais e médicas entre outros (COUTO et al., 2002).

Por melhores que sejam as características de um sistema de medição, este sempre apresentará erros, seja por fatores internos, seja por ação das grandezas de influência externas. A perfeita caracterização das incertezas associadas a estes erros é de grande importância para que o resultado da medição possa ser estimado de maneira segura. Embora, em alguns casos, os erros de um sistema de medição possam ser analítica ou numericamente estimados, na prática são utilizados procedimentos experimentais quase que exclusivamente (GONÇALVES JÚNIOR, 2002).

Para comparar resultados de medições, seja com requisitos especificados ou com outros resultados é de suma importância respeitar as questões relacionadas à metrologia. Além da rastreabilidade, é necessário estabelecer o grau de incerteza desta medição estimada com um determinado grau de confiança (MACHADO et al., 2003).

Fica bem clara a necessidade de conhecimento teórico dos controles e das técnicas de medição, aliada a uma razoável percepção de fatores de influência (temperatura ambiente, umidade relativa do ar, conhecimento do profissional, dentre outros) e obtenção de resultados confiáveis. Uma vez que os resultados das medições são afetados por fatores de influência, é preciso determinar o quanto estes foram afetados, ou seja, definir a incerteza de medição (QUEIROZ, 2005).

Através do procedimento experimental denominado calibração é possível correlacionar os valores indicados pelo sistema de medição e sua correspondência com a grandeza sendo medida (GONÇALVES JÚNIOR, 2002).

A calibração é um procedimento experimental através do qual são estabelecidas, sob condições específicas, as relações entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões (INMETRO, 2005b).

O serviço de calibração de instrumentos de medição existe para garantir que os resultados de suas medições sejam referenciados a padrões de hierarquia mais elevada, reconhecidos nacional ou internacionalmente, rastreados ao Sistema Internacional de Unidades (SI). Dito de maneira simples, calibrar é comparar um instrumento de medir ou uma medida materializada com um padrão de mesma natureza. A calibração é uma das operações fundamentais da metrologia e deve ser realizada por técnicos capacitados e experientes, utilizando padrões e equipamentos adequados, em ambiente controlado, segundo procedimentos e métodos

definidos e compatíveis com os instrumentos e padrões que se pretende calibrar (QUEIROZ, 2005).

O resultado da calibração permite estabelecer os valores dos mensurandos, determinar as correções a serem feitas ou determinar outras propriedades ou efeitos de grandezas de influência. Através da calibração, pode-se estabelecer um paralelo entre os resultados da medição executadas em um dado processo às suas respectivas definições no SI ou às referências nacionais ou internacionais (rastreadibilidade). Neste contexto, fica evidenciada a importância do adequado controle metrológico dos equipamentos e instrumentos no âmbito do Sistema da Qualidade de qualquer atividade cujos resultados das medições afetem direta ou indiretamente a qualidade do produto, processo ou serviço (SARAIVA; COUTINHO, 2006).

Algumas vezes utiliza-se o termo verificação ao invés de calibração, o que pode gerar alguma dúvida quanto à adequação de tal uso. Na realidade, os dois procedimentos de controle são similares. No caso de um instrumento, tanto a calibração quanto a verificação envolvem a comparação entre indicações do instrumento e as que deveria indicar quando da medição de um padrão materializado. Em ambos os casos, as condições de repetitividade devem ser respeitadas (LINK, 2000).

Há, porém, algumas diferenças entre os dois tipos de controle, por exemplo, as condições ambientais para a calibração são mais rigorosas que as necessárias para uma verificação. Por outro lado, o resultado da calibração deve incluir sempre a correção dos erros sistemáticos e a incerteza do resultado. A verificação pode se limitar à comprovação de que o erro de indicação, em um dado ponto, é inferior à tolerância para uma dada classe de exatidão, ou que o instrumento está mantendo sua “calibração” (LINK, 2000).

Outra diferença é que uma verificação pode incluir o exame de outras características metrológicas, como por exemplo, durabilidade, o que não é objeto de análise em uma calibração. Em suma, pode se dizer que a calibração é uma forma de verificação, mas o inverso não é verdade (LINK, 2000).

Equipamentos e padrões de medição devem ser calibrados a intervalos periódicos, estabelecidos e mantidos para garantir exatidão e confiabilidade aceitáveis, onde confiabilidade é definida como a probabilidade que o padrão de medição manter-se-á dentro da tolerância através do intervalo estabelecido. Intervalos deverão ser reduzidos ou poderão ser ampliados quando os resultados de calibrações prévias indicam que tais ações são adequadas para assegurar o nível de confiabilidade aceitável. Tradicionalmente, a

periodicidade de calibração tem sido estabelecida por métodos informais ou práticos de estimação, normalmente fixos. O estabelecimento de intervalos a partir da teoria da confiabilidade aporta uma série de modelos de inferência estatística. Genericamente falando, um intervalo ótimo de calibração é aquele que maximiza a periodicidade, minimizando os custos de calibração e de perdas por interrupção, sem afetar a confiabilidade do produto, sistema, processo ou ação associada à unidade a ser calibrada. Sob o ponto de vista prático, a calibração periódica não previne a ocorrência de uso de equipamentos fora de tolerância, uma vez que é virtualmente impossível prever o período de tempo no qual haverá a transição de um item da condição "dentro das especificações" para "fora das especificações". Na prática, tem se buscado encontrar um intervalo de tempo entre calibrações que mantenha a percentagem de itens em uso em um nível aceitável de confiança que assegure sua opção dentro das especificações ou tolerâncias (SARAIVA, COUTINHO, 2006).

A periodicidade com que os instrumentos de medição devem ser submetidos à recalibração está vinculada a vários fatores intrínsecos ao seu projeto (características construtivas) e, também, da sua forma de utilização, como por exemplo: tempo de utilização, sistema e método de medição, pessoal responsável pela guarda e manutenção do padrão, condição ambiental e de montagem, hierarquia de rastreabilidade, entre outras (REGAZZI, 2005).

A prática da recalibração é essencial para se manter a confiabilidade nas medições realizadas garantindo uma maior segurança nos resultados obtidos e um melhor controle do processo dentro de níveis de tolerância especificados (limites de especificação) para os serviços determinados. É através de comparações com padrões de referência de ordem mais alta que se evidencia o controle de padrões de trabalho, medidores, instrumentos e equipamentos para posterior medição de características de processo e produto. Verifica-se, deste modo, se os elementos estão fora de tolerância ou, caso haja necessidade, devam ser retirados de operação para uma calibração completa (REGAZZI, 2005).

A escolha do padrão depende de aspectos metrológicos, técnicos e econômicos. Deve-se estabelecer onde esse padrão será utilizado; definir, em princípio, um intervalo de recalibração baseado em experiências anteriores ou recomendações do fabricante; estabelecer a forma de manuseio, armazenagem e o pessoal responsável pela garantia da exatidão do padrão (REGAZZI, 2005).

Devem-se tomar alguns cuidados com relação aos padrões, tais como:

- ✓ restringir a calibração e verificação de padrões de menor ordem, seguindo uma hierarquia prescrita, ou instrumentos regularmente utilizados. Esse padrão não deve ser usado para medições rotineiras;
- ✓ o uso do padrão deve ser restringido a pessoas autorizadas e qualificadas. Se, por algum motivo, muitas pessoas utilizam o mesmo padrão, designar uma delas para ser responsável pelo mesmo;
- ✓ os padrões, exceto aqueles designados como viajante, devem ser guardados em lugar e ambiente adequado com as devidas descrições e procedimentos de medição;
- ✓ devem-se checar regularmente as condições do padrão e, se possível, a variação em relação ao certificado. Este procedimento deve estar presente no programa de recalibração/reverificação determinado pela organização;
- ✓ quando alterações nas características do padrão forem verificadas, retirá-lo de operação para ser submetido à recalibração ou reverificação, ou ainda isolá-lo;
- ✓ registros de uso e controle do padrão devem ser arquivados;
- ✓ o uso do padrão deve estar de acordo com a hierarquia e campo de aplicação especificados. Esta forma de classificar o padrão é estabelecida, entre outras, pela razão entre a exatidão do padrão a outros de menor ordem ou a instrumentos de medida que estejam sendo recalibrados ou reverificados por este padrão (REGAZZI, 2005).

Sendo o padrão de referência a ponta da pirâmide de rastreabilidade do laboratório, qualquer desvio significativo da sua característica metrológica afetará todos os sistemas de medição calibrados a partir do mesmo, numa ordem crescente de erros que atingirá a base da pirâmide formada pelos equipamentos e medidores, comprometendo, desta forma, o resultado das medições realizadas (REGAZZI, 2005).

Para um sistema de calibração e ensaio, é a determinação da periodicidade temporal entre calibrações sucessivas dos padrões de referência e dos instrumentos de medição que garantem a eficácia do mesmo, propiciando um maior controle das incertezas e, conseqüentemente, melhor estimativa do valor verdadeiro da grandeza que se pretende medir (REGAZZI, 2005).

2.4 Incerteza de medição

O resultado de uma medição séria deve exprimir o grau de confiança a que é depositado pelo experimentador. Como é impossível obter uma indicação exata, os erros prováveis envolvidos devem sempre ser informados através de um parâmetro denominado incerteza. Existem diversos procedimentos e técnicas com as quais é possível determinar o nível de confiança de um resultado. Porém, bom senso e ceticismo são características adicionais indispensáveis a quem se dispõe a medir. A regra é "duvidar sempre, até que se prove o contrário" (GONÇALVES JÚNIOR, 2002).

Uma medição perfeita, isto é, sem erros, só pode existir se um sistema de medição perfeito existir e a grandeza sob medição (denominada mensurando) tiver um valor único, perfeitamente definido e estável. Apenas neste caso ideal o resultado de uma medição pode ser expresso por um número e uma unidade de medição apenas (GONÇALVES JÚNIOR, 2002).

Sabe-se que não existem sistemas de medição perfeitos, suas dimensões, forma geométrica, material, propriedades elétricas, ópticas, pneumáticas, etc., não correspondem exatamente à ideal. As leis e princípios físicos que regem o funcionamento de alguns sistemas de medição nem sempre são perfeitamente lineares como uma análise simplista poderia supor. A existência de desgaste e deterioração de partes agrava ainda mais esta condição. Perturbações externas, como, por exemplo, as condições ambientais, podem provocar erros, alterando diretamente o sistema de medição ou agindo sobre o mensurando, fazendo com que o comportamento deste sistema se afaste ainda mais do ideal. Variações de temperatura, vibrações ambientais, a existência de campos eletromagnéticos, umidade do ar excessiva, diferentes pressões atmosféricas podem, em maior ou menor grau, afetar o sistema de medição, introduzindo erros nas suas indicações. O operador e a técnica de operação empregada podem também afetar a medição. O uso de força de medição irregular ou excessiva, vícios de má utilização ou sistemas de medição inadequados, podem levar a erros imprevisíveis. A forma, tamanho ou faixa de medição do sistema pode não ser a mais indicada para aquela aplicação (GONÇALVES JÚNIOR, 2002).

Na prática estes diferentes elementos que afetam a resposta de um sistema de medição aparecem superpostos. Ao se utilizar de um sistema de medição para determinar o resultado de uma medição é necessário conhecer e considerar a faixa provável dentro da qual se situam estes efeitos indesejáveis, ou seja, sua incerteza, bem como levar em conta as variações do

próprio mensurando. Portanto, o resultado de uma medição não deve ser composto de apenas um número e uma unidade, mas de uma faixa de valores e a unidade. Em qualquer ponto dentro desta faixa deve situar-se o valor verdadeiro associado ao mensurando (GONÇALVES JÚNIOR, 2002).

Incerteza de medição é o parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentadamente atribuídos a um mensurando (INMETRO, 2005b).

No uso geral, a palavra incerteza está relacionada ao conceito geral de dúvida, no entanto, incerteza de medição não implica em dúvida quanto à validade de uma medição, pelo contrário, o conhecimento da incerteza de medição implica numa maior confiança na validade do resultado de uma medição (EURACHEM/CITAC, 2000).

Para estimar adequadamente a correção e as incertezas envolvidas em uma operação de medição é necessário caracterizar perfeitamente o processo de medição. Deve ser considerado tudo que pode influenciar no resultado da medição. Por exemplo: além do próprio sistema de medição e seus eventuais acessórios, o procedimento como as medições são efetuadas e os dados são tratados, a definição do mensurando e os princípios de medição envolvidos, a ação de grandezas de influência sobre o sistema de medição e/ou sobre o mensurando e a ação do operador, para citar os mais importantes. Cada um desses elementos acrescenta uma componente de incerteza ao resultado da medição e devem ser convenientemente considerados e combinados para que se obtenha uma estimativa realista da incerteza do processo de medição (GONÇALVES JÚNIOR, 2002).

Para identificar as várias fontes de incertezas que agem sobre um processo de medição é necessário conhecer muito bem este processo. O próximo passo é fazer uma análise crítica, procurando identificar tudo que pode trazer influências sobre o resultado da medição. Normalmente as fontes de incertezas estão contidas nos meios e métodos de medição, no ambiente e na definição do mensurando. Por meios de medição entendem-se, além do próprio sistema de medição, acessórios, dispositivos e módulos complementares, o operador deve também ser incluído. O método de medição refere-se ao procedimento segundo o qual a medição é efetuada, por exemplo, o número de medições repetitivas, a forma de repetir, a maneira de zerar um sistema de medição, o sentido de medição, o tempo entre medições, etc. Os fatores relacionados ao ambiente referem-se principalmente à influência da temperatura sobre o sistema de medição e sobre o mensurando, porém, outros fatores como variações da tensão da rede elétrica, alterações de umidade relativa do ar e pressão atmosférica podem

também ser significantes. A definição do mensurando pode afetar o resultado da medição: por exemplo, se a sua definição não for clara ou exata ou mesmo se o mensurando for variável, o resultado da medição será afetado. A medição da temperatura no interior de um refrigerador (variável), o diâmetro de um eixo com geometria imperfeita (varia de ponto para ponto), a distância entre duas cidades (marcos não muito bem definidos), são exemplos de situações onde o mensurando não está bem definido (GONÇALVES JÚNIOR, 2002).

Erros de anotação ou de leitura de dados podem introduzir erros desconhecidos com valores significativos no resultado da medição. Erros grandes podem ser facilmente identificados revendo-se os dados, erros pequenos podem ficar mascarados e se confundirem com variações de natureza aleatória (LINK, 1999).

Para que a influência de cada fonte de incerteza seja corretamente considerada é necessário caracterizar as respectivas componentes aleatórias e, quando for o caso, sistemáticas que estas trazem sobre o processo de medição (GONÇALVES JÚNIOR, 2002).

Se fossem perfeitamente determinadas, as influências dos efeitos sistemáticos poderiam ser exatamente compensadas por sua correção. Entretanto, como o valor da correção nunca pode ser perfeitamente conhecido, a correção dos efeitos sistemáticos não pode ser perfeita, o que dá origem a uma incerteza residual. No conjunto, as diversas componentes de incerteza, residuais ou não, devem ser levadas em conta e combinadas para que a incerteza expandida seja corretamente estimada (GONÇALVES JÚNIOR, 2002).

A metodologia mais eficiente para avaliar e calcular a incerteza do resultado de uma medição deve ser generalista, pois deve ser apropriada a qualquer tipo de medição de qualquer grandeza e independente dos tipos de dados de entrada das medições. A grandeza utilizada na apresentação da incerteza deve ser:

- ✓ consistente – pois deve ser função dos componentes que participam de seu cálculo, mas independente da maneira que se agrupam ou decompõem os seus componentes;
- ✓ transferível – pois a incerteza deve permitir o seu uso no cálculo de um outro resultado em que ela é um dos componentes (LINK, 2000).

2.4.1 Incerteza padrão

A incerteza padrão é uma medida relacionada aos erros aleatórios trazidos pela fonte de incerteza. A incerteza de medição associada às estimativas de entrada é avaliada de acordo com os métodos de avaliação do Tipo A ou do Tipo B. A avaliação do tipo A da incerteza padrão é o método de avaliação da incerteza pela análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a incerteza padrão é o desvio padrão experimental da média que se obtêm de um procedimento de cálculo da média aritmética ou de uma análise de regressão adequada. A avaliação do tipo B da incerteza padrão é o método de avaliação da incerteza por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a avaliação da incerteza padrão é baseada em algum outro conhecimento científico (EA, 1999).

2.4.1.1 Incerteza padrão Tipo A

A avaliação do Tipo A da incerteza padrão pode ser aplicada quando tenham sido feitas várias observações independentes para a grandeza de entrada X_i sob as mesmas condições de medição. Caso haja suficiente resolução no processo de medição haverá uma dispersão ou espalhamento observável nos valores obtidos (EA, 1999).

Se X_i é determinada por n medições independentes, resultando em valores q_1, q_2, \dots, q_n , a melhor estimativa disponível, x_i , do valor esperado desta grandeza é a média aritmética ou média \bar{q} :

$$x_i = \bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (2.4.1)$$

A dispersão dos resultados das medições q_1, q_2, \dots, q_n para a grandeza de entrada X_i é expressa por seu desvio padrão experimental:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad (2.4.2)$$

A incerteza padrão $u(x_i)$ de X_i é obtida finalmente mediante o cálculo do desvio padrão experimental da média:

$$u(x_i) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad (2.4.3)$$

Não se pode dar uma recomendação geral para o número ideal de repetições n , uma vez que este depende das condições e exigências de cada medição específica (SCHMID; MARTÍNEZ, 2004).

Denota-se por ν o número de graus de liberdade associado à determinação da incerteza padrão. O número de graus de liberdade (ν) é calculado como o número de dados usados para estimar o desvio padrão experimental (n) menos um, isto é: $\nu = n - 1$ (GONÇALVES JÚNIOR, 2002).

2.4.1.2 Incerteza padrão Tipo B

A avaliação do Tipo B da incerteza padrão é a avaliação da incerteza associada com uma estimativa x_i de uma grandeza de entrada X_i feita por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações. A incerteza padrão $u(x_i)$ é avaliada pelo julgamento científico baseado em todas as informações disponíveis sobre a possível variabilidade de X_i . Valores pertencentes a esta categoria podem ser obtidos a partir de:

- ✓ dados de medições;
- ✓ experiência ou conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos relevantes;
- ✓ especificações do fabricante;
- ✓ dados provenientes de calibração e de outros certificados;
- ✓ incertezas atribuídas a dados de referência provenientes de manuais ou publicações (EA, 1999).

O uso adequado da informação disponível para uma avaliação do Tipo B da incerteza padrão de medição exige discernimento baseado na experiência e conhecimento geral, sendo essa uma habilidade que pode ser aprendida com a prática. Uma avaliação do Tipo B da

incerteza padrão bem fundamentada pode ser tão confiável quanto uma avaliação do Tipo A, especialmente em uma situação de medição em que a avaliação do Tipo A é baseada somente em um número comparativamente pequeno de observações estatisticamente independentes (EA, 1999).

2.4.2 Distribuição de probabilidade

A quantificação de uma fonte de incerteza inclui a fixação de um valor e a determinação da distribuição a qual se refere este valor. As distribuições mais comuns são a normal, retangular e triangular (SCHMID; MARTÍNEZ, 2004).

2.4.2.1 Distribuição normal (*N*)

Os resultados de uma medição repetida afetada por grandezas de influência que variam aleatoriamente geralmente seguem, com boa aproximação, uma distribuição normal. Em particular, a distribuição da média de uma série de medições repetidas se aproxima a uma normal independentemente da distribuição das leituras individuais. Também a incerteza indicada em certificados de calibração se refere geralmente a uma distribuição normal, como a mostrada na Figura 1 (SCHMID; MARTÍNEZ, 2004).

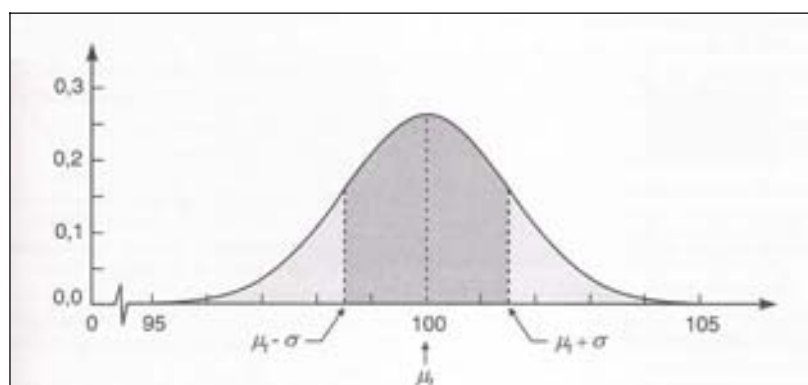


Figura 1: Distribuição de probabilidade normal (ISO-GUM, 2003).

Para distribuições normais, o valor do divisor utilizado para converter o valor conhecido na incerteza padronizada geralmente é unitário no caso da avaliação de incerteza tipo “A”, ou

coincide com o fator de abrangência utilizado na fonte de informação quando a avaliação tipo “B” é considerada (ISO-GUM, 2003).

2.4.2.2 Distribuição retangular (R)

Em uma distribuição retangular, cada valor em um intervalo dado tem a mesma probabilidade, ou seja, a função de densidade de probabilidade é constante neste intervalo. Exemplos típicos são a resolução de um instrumento digital e a informação técnica sobre tolerâncias de um instrumento. Em geral, quando se conhece apenas os limites superior e inferior do intervalo de variabilidade da grandeza de entrada, o mais seguro é considerar uma distribuição retangular, conforme ilustrado na Figura 2 (SCHMID; MARTÍNEZ, 2004).

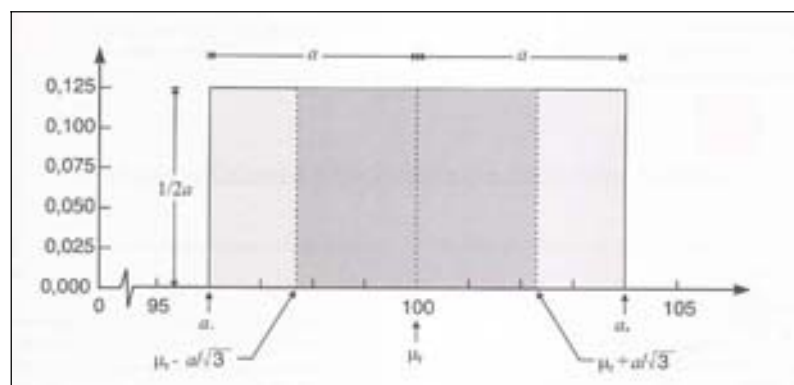


Figura 2: Distribuição de probabilidade retangular (ISO-GUM, 2003).

A incerteza padrão baseada na distribuição retangular é dada por:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.4.4)$$

2.4.2.3 Distribuição triangular (T)

Se além do conhecimento dos limites superior e inferior há evidência de que a probabilidade é mais alta para valores no centro do intervalo e se reduz próximo aos limites,

pode ser mais adequado basear a estimação da incerteza em uma distribuição triangular, representada pela Figura 3 (SCHMID; MARTÍNEZ, 2004).

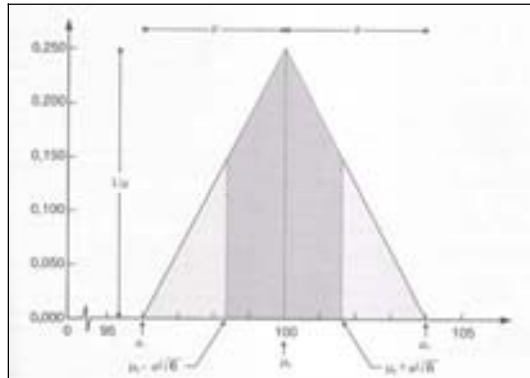


Figura 3: Distribuição de probabilidade triangular (ISO-GUM, 2003).

A incerteza padrão baseada na distribuição triangular é dada por:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (2.4.5)$$

2.4.2.4 Outras distribuições

Podem-se encontrar também distribuições em “U”, na qual os extremos do intervalo apresentam os valores com probabilidade máxima, tipicamente quando existem comportamentos oscilatórios subjacentes (SCHMID; MARTÍNEZ, 2004).

2.4.3 Incerteza padrão combinada

O resultado da combinação das contribuições de todas as fontes é denominado incerteza padrão combinada $u_c(y)$ (SCHMID; MARTÍNEZ, 2004).

A contribuição $u_i(y)$ de cada fonte para a incerteza combinada depende da incerteza padrão $u(x_i)$ da própria fonte e do impacto da fonte sobre o mensurando. Determina-se $u_i(y)$ através do produto de $u(x_i)$ e seu coeficiente de sensibilidade c_i :

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i) \quad (2.4.6)$$

onde c_i é o coeficiente de sensibilidade associado com a estimativa de entrada x_i , isto é, a derivada parcial da função modelo f com relação à variável X_i avaliada para as estimativas de entrada x_i (EA, 1999).

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \Big|_{X_i = x_1 \dots X_N = x_N} \quad (2.4.7)$$

O coeficiente de sensibilidade descreve o quanto a estimativa de saída y é influenciada por variações da estimativa de entrada x_i . Ele pode ser avaliado a partir da função modelo f , pela equação (2.4.7), ou usando métodos numéricos (EA, 1999).

Enquanto que $u(x_i)$ é sempre positiva, a contribuição $u_i(y)$ de acordo com a equação (2.4.6) é positiva ou negativa, dependendo do sinal do coeficiente de sensibilidade c_i (EA, 1999).

De posse do valor de cada coeficiente de sensibilidade, é possível determinar a incerteza padrão combinada pela seguinte equação:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum c_i^2 \cdot u^2(x_i)} \quad (2.4.8)$$

ou

$$u_c(y) = \sqrt{\sum u_i^2(y)} \quad (2.4.9)$$

2.4.4 Incerteza padrão expandida

A incerteza padrão combinada, estimada através da equação (2.4.9), corresponde ao desvio padrão resultante da ação combinada das várias fontes de incertezas consideradas. Em aplicações nas áreas da engenharia é comum trabalhar com níveis de confiança de 95%. Para atingir este nível de confiança, a incerteza padrão combinada (u_c), que corresponde a apenas

um desvio padrão, deve ser multiplicada por um coeficiente numérico, o coeficiente de Student. Este coeficiente, denominado de fator de abrangência, é representado pelo símbolo “ k ” (GONÇALVES JÚNIOR, 2002).

Logo, a incerteza padrão expandida é dada por:

$$U = k \cdot u_c \quad (2.4.10)$$

Nos casos em que uma distribuição normal (Gaussiana) possa ser atribuída ao mensurando e a incerteza padrão associada à estimativa de saída tenha suficiente contabilidade, o fator de abrangência padronizado $k = 2$ deve ser utilizado. A incerteza expandida atribuída corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. Estas condições são satisfeitas na maioria dos casos de serviços de calibração. A contabilidade da incerteza padrão atribuída à estimativa de saída é determinada por seu grau de liberdade efetivo ν_{eff} (EA, 1999).

Se uma dessas condições (normalidade ou contabilidade suficiente) não for satisfeita, o fator de abrangência padronizado $k = 2$ pode fornecer uma incerteza expandida que corresponde a uma probabilidade de abrangência menor que 95%. Nestes casos, para assegurar que seja declarado um valor de incerteza expandida correspondente à mesma probabilidade de abrangência que no caso normal, outros procedimentos devem ser seguidos. O uso de aproximadamente a mesma probabilidade de abrangência é essencial sempre que dois resultados de medição da mesma grandeza possam ser comparados, por exemplo, quando se analisam os resultados de uma comparação interlaboratorial ou se avalia conformidade com uma especificação (EA, 1999).

Para estimar o valor de um fator de abrangência k correspondente a uma probabilidade de abrangência especificada, é necessário que seja levada em conta a contabilidade da incerteza padrão $u(y)$ da estimativa de saída y . Isto implica considerar o quão bem $u(y)$ estima o desvio padrão associado ao resultado da medição. Para uma estimativa do desvio padrão de uma distribuição normal, os graus de liberdade desta estimativa, que depende do tamanho da amostra na qual ela está baseada, é uma medida da contabilidade. Analogamente, uma medida adequada da contabilidade da incerteza padrão associada a uma estimativa de saída é seu grau de liberdade efetivo ν_{eff} que é aproximado por uma combinação apropriada dos graus de liberdade efetivos das diferentes contribuições da incerteza $u_i(y)$ (EA, 1999).

O procedimento para o cálculo de um fator de abrangência apropriado k , quando as condições do teorema do limite central são satisfeitas, compreende os três seguintes passos:

- ✓ obter uma incerteza padrão associada à estimativa de saída;
- ✓ estimar os graus de liberdade efetivos ν_{eff} da incerteza padrão $u(y)$ associada à estimativa de saída y a partir da fórmula de Welch-Satterhwaite:

$$\nu_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (2.4.11)$$

onde os $u_i(y)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) definidos na equação (2.4.6), são as contribuições para a incerteza padrão associada à estimativa de saída y , resultante da incerteza padrão associada à estimativa de entrada x_i , que se admite sejam mutuamente independentes estatisticamente, e ν_i são os graus de liberdade efetivo da contribuição da incerteza padrão³ $u(x_i)$;

- ✓ obter o fator de abrangência k através da Tabela 1, baseada na distribuição-t avaliada para uma probabilidade de abrangência de 95,45%. Se ν_{eff} não for inteiro, o que é usualmente o caso, truncar ν_{eff} para o próximo menor inteiro (EA, 1999).

Tabela 1: Fatores de abrangência k para diferentes graus de liberdade ν_{eff} .

ν_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

³ Para uma incerteza padrão $u(\bar{q})$ obtida de uma avaliação do Tipo A, os graus de liberdade são dados por $\nu_i = n-1$. É mais problemático associar graus de liberdade com uma incerteza padrão $u(x_i)$ obtida pela avaliação do Tipo B. Entretanto, é uma prática comum efetuar tais avaliações de maneira a assegurar que qualquer sub-estimativa seja evitada. Se, por exemplo, os limites inferior e superior são estabelecidos, eles são usualmente escolhidos de tal forma que a probabilidade da grandeza em questão cair fora desses limites é de fato extremamente pequena. Sob a hipótese de que esta prática seja seguida, os graus de liberdade da incerteza padrão $u(x_i)$ obtidos de uma avaliação do Tipo B podem ser tomados como sendo $\nu_i \rightarrow \infty$.

2.5 Metrologia em torque

Na Revolução Industrial o homem começou a produzir máquinas e equipamentos em larga escala. A partir deste momento, a evolução tecnológica e um mercado cada vez mais competitivo levaram à necessidade de reduzir gastos e ganhar em eficiência e exatidão. Começaram então a aparecer mecanismos e máquinas com resistência calculada para o seu funcionamento, barateando o custo de sua fabricação e diminuindo o desperdício de materiais. Esta tecnologia começou então a ser aplicada na montagem e manutenção de estruturas. Assim, foi necessário controlar a força a ser aplicada aos elementos roscados de maneira a não danificá-los e nem rompê-los. Esta força aplicada é calculada através da grandeza torque (INMETRO, 2005a).

O constante desenvolvimento dos instrumentos e equipamentos utilizados para aplicação e medição de torque na indústria em geral, incluindo suas técnicas de uso e instrumentação, cada vez mais exatas e abrangentes, qualifica a metrologia em torque como uma das áreas da engenharia mecânica em maior desenvolvimento tecnológico e com crescente demanda em serviços de calibração (OLIVEIRA, R. et al., 2003).

2.5.1 Juntas mecânicas

Uma junta mecânica rosqueada oferece a vantagem de desmontagem rápida para inspeção ou reparo de componentes; fixadores podem ser reutilizados. Inspeções e reparos podem ser efetuados no campo com um mínimo de ferramentas (CARLSONS, 2006).

A qualidade mais importante da junta é a sua resistência às cargas de trabalho (tração, compressão, cisalhamento e vibração). Essas cargas, que tendem a provocar a soltura dos componentes da junta, devem ser absorvidas pela força de fixação induzida na junta durante a sua montagem. A força de fixação deve ser maior do que a soma das cargas de trabalho que agem sobre a mesma (CARLSONS, 2006).

Na prática ocorre uma gradual perda da força de fixação em quase todas as juntas roscadas porque as faces da junta em contato aos poucos sofrem um “nivelamento” das irregularidades de superfície que diminui a força de fixação existente (CARLSONS, 2006).

Na montagem de uma junta com múltiplos fixadores encontra-se um problema de relaxamento peculiar: enquanto um fixador é apertado, um outro fixador, já instalado, perde a

sua força de fixação porque a mudança das condições de tensão na junta provoca um relaxamento localizado. Para diminuir este inconveniente executa-se o aperto dos fixadores numa seqüência cruzada, ou num padrão espiral. Um outro procedimento é apertar os fixadores em vários “passos” (ex.: 30% - 70% - 100% do torque especificado), mantendo o padrão de seqüência cruzada ou espiral (CARLSONS, 2006).

A prática de aperto em vários “passos” ou “passadas” ajuda a eliminar uma das causas do baixo aproveitamento de torque para gerar tensão e força de fixação no fixador e na junta, pois apertos repetidos reduzem a fricção entre partes contactantes. Este procedimento muitas vezes é utilizado na montagem de juntas críticas (CARLSONS, 2006).

Outra informação importante é que não se deve retorquear parafusos que já receberam torque angular, porque existe uma faixa de trabalho do material do parafuso que mantém os componentes no aperto desejado. Excedida essa faixa, não se garantirá mais o aperto, uma vez que o parafuso passa para o regime de escoamento e, por consequência, não mais será mantido o torque necessário para a perfeita vedação das juntas e dos demais componentes do conjunto. Esse é um dos motivos que determinam um limite máximo para o comprimento dos parafusos, um máximo número de sua reutilização e a não-utilização de parafusos velhos e novos simultaneamente na mesma junta mecânica (SABÓ, 2002).

Como na montagem de uma junta roscada há muitas variáveis, tais como: lubrificação, grau de dureza de faces contactantes, acabamento de superfície, fricção, etc., que afetam a força de fixação obtida, existe o perigo que uma parcela, maior que a planejada, da força gerada durante o aperto seja absorvida por estes fatores de difícil quantificação (CARLSONS, 2006).

Quando uma junta é considerada crítica para o bom funcionamento do produto, utiliza-se o processo “torque e ângulo”, onde a especificação, além de indicar um torque de aperto, exige a posterior rotação do fixador por um determinado ângulo, procedimento este que levará o fixador próximo a sua região de escoamento, garantindo assim que foi gerada força de fixação suficiente para resistir a todas as cargas de trabalho (CARLSONS, 2006).

2.5.2 Conceitos básicos sobre torque

Torque ou momento de uma força é uma grandeza física derivada da força (F) aplicada a um corpo, a uma distância (d) perpendicular a um eixo desse corpo, de tal modo que seja

produzida uma rotação em torno desse eixo. O símbolo T é empregado para representá-lo sendo específico para momento de movimento ou torsional (INMETRO, 2005a).

A unidade de torque do Sistema Internacional (SI) é o newton metro ($N.m$). Como existem instrumentos de medição que fornecem valores de torque em outros sistemas é necessária uma tabela de conversão. Na Tabela 2 estão expostas as relações mais usualmente encontradas (INMETRO, 2005a).

Tabela 2: Relações entre as unidades de torque mais utilizadas.

1 N.m	= 0,10197 kgf.m
1 N.m	= 0,73756 lbf.pé
1 lbf.m	= 1,3558 N.m
1 kgf.m	= 9,80665 N.m

2.5.3 Importância da medição de torque

Os resultados dos estudos e do controle da grandeza torque são de extrema importância para a segurança e confiabilidade de produtos e sistemas. Aplicações críticas de torque, como nas indústrias automotiva, aeronáutica e naval, demandam grande exatidão e coeficientes de segurança baixos segundo especificações de desenho, projeto e montagem relativas aos torques a serem aplicados (INMETRO, 2005a).

Em juntas em geral, a confiabilidade das mesmas depende da capacidade do parafuso de fixar as peças. A fixação adequada destes previne desde o movimento relativo entre as peças das juntas até o não vazamento de fluidos, no caso de juntas vedadas. Quando um parafuso é apertado, a haste e a rosca sustentam uma tensão direta devido ao fato deste estar sendo tracionado. Medir esta tensão, ou a capacidade de fixação de um parafuso é difícil, principalmente em condições de montagem em campo. Assim esta força de fixação deve ser controlada indiretamente regulando-se o torque aplicado. Na Figura 4 está representada a aplicação de um torque no sentido horário na porca/parafuso que fixará as duas partes com uma tensão axial que manterá as peças firmemente unidas. Em juntas onde os parafusos foram apertados abaixo do requerido em projeto, existe a possibilidade de os carregamentos não serem distribuídos corretamente pela estrutura solicitada, ou até mesmo de uma força não ser transmitida corretamente, levando o mecanismo ao seu uso excessivo e a rupturas por fadigas devido às folgas. Por outro lado, montagens torqueadas acima do valor previsto em projeto podem causar problemas e rupturas se estes valores se assumirem acima da capacidade do parafuso e da rosca (INMETRO, 2005a).

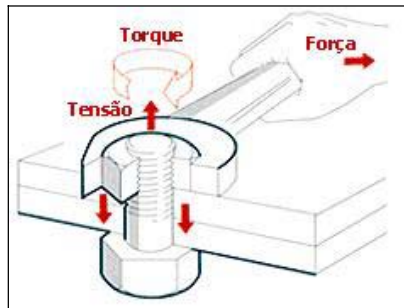


Figura 4: Tensão gerada pela aplicação de torque (TORKFORT, 2005).

É importante destacar o constante desenvolvimento da engenharia de materiais, trazendo ao mercado e às indústrias possibilidades novas para produção e montagem; materiais estes que detêm características próprias de resistência e capacidade, e conseqüentemente requerem maior exatidão nas suas condições de montagem e manipulação (INMETRO, 2005a).

Para acompanhar este desenvolvimento no que diz respeito ao torque, normas foram adaptadas e criadas, novos instrumentos desenvolvidos e antigos instrumentos aperfeiçoados. Torquímetros passaram de analógicos a digitais, calibradores e técnicas de calibração foram aperfeiçoados (INMETRO, 2005a).

2.5.4 Torquímetros

O torquímetro é um instrumento de aplicação e verificação de torque. Torquímetros são ferramentas utilizadas para aplicar momento torsor em porcas e parafusos a partir de uma especificação estabelecida no projeto. Através do uso de torquímetros pode-se alcançar o exato momento de torção desejado. A escolha correta da ferramenta para aperto significa segurança, rapidez, facilidade e qualidade para o trabalho. Cada torquímetro é desenvolvido para atender uma diferente aplicação (GEDORE, 2005).

Nos últimos anos, tem se difundido muito a necessidade da utilização de torquímetros para controle e aplicação de torque em elementos de fixação em todos os segmentos produtivos, principalmente em pontos sensíveis, onde o aperto inadequado pode causar danos ao equipamento ou ao produto final (GEDORE, 2006a).

Devem-se tomar alguns cuidados especiais com os torquímetros, como guardá-los em local adequado, longe de umidade e demais ferramentas. Se o equipamento sofrer quedas, deve-se avaliar se não ocorreu nenhuma avaria grave externa ou se nenhuma peça interna se

soltou. A limpeza do torquímetro deve ser apenas externa. Não se deve colocar óleos ou graxas nos orifícios do torquímetro, pois isso pode modificar o torque aplicado. A limpeza interna é feita quando o torquímetro é enviado para calibração na fábrica ou em um laboratório qualificado a fazer este serviço (GEDORE, 2006a).

2.5.4.1 Torquímetro de indicação tipo relógio

Estes torquímetros são utilizados em situações de torque mais exato, uma vez que possui uma apurada resolução. Não é muito aconselhado a trabalhos em série, pois a medição, embora mais exata, também é mais lenta do que em torquímetros de estalo, por exemplo (INMETRO, 2005a).

Na Figura 5 é exibido um torquímetro de indicação do tipo relógio, esta espécie de torquímetro apresenta algumas variantes como modelos com ponteiros de arraste, e modelos onde um sinal luminoso ou sonoro (através de fones de ouvido) é acionado avisando ao operador que o torque desejado foi atingido e que a aplicação de força deve cessar (INMETRO, 2005a).



Figura 5: Torquímetro de indicação tipo relógio (TORKFORT, 2006).

Uma desvantagem, não só deste, mas de outros torquímetros indicadores, é o fato de não limitarem os movimentos do operador, ou seja, existe o risco de aplicação de sobrecarga. A leitura de torquímetros de relógio deve ser feita perpendicularmente ao mostrador, a fim de evitar erros de paralaxe. Deve-se manter sempre o visor com as melhores condições de visibilidade e conseqüente melhor condição de leitura (INMETRO, 2005a).

2.5.4.2 Torquímetro de indicação digital (torquímetros eletrônicos)

Esta variedade, exemplificada na Figura 6, é a evolução dos torquímetros de indicação. Com o implemento da eletrônica em mostradores digitais, elimina-se o erro de paralaxe, além de implementar novas capacidades ao torquímetro, como por exemplo, o armazenamento de medições, melhor resolução, medição do ângulo de torção e alguns cálculos estatísticos rápidos (INMETRO, 2005a).



Figura 6: Torquímetro de indicação digital (CRANE, 2006).

2.5.4.3 Torquímetro de indicação tipo vareta

Possui funcionamento simples, onde a barra de flexão (corpo rígido do torquímetro) sofre a deformação durante a aplicação do torque e a leitura é feita por uma vareta que tem uma de suas extremidades fixada ao ponto de aplicação do torque e a outra extremidade livre para mostrar a defasagem conseqüente do torque. Por ter suas peças muito expostas, este tipo de torquímetro, indicado na Figura 7, requer um cuidado maior de manuseio e conservação após uso, pois uma deformação da vareta ou da escala de indicação pode causar problemas na indicação (INMETRO, 2005a).



Figura 7: Torquímetro de indicação tipo vareta (TORKFORT, 2006b).

Uma variante deste modelo é o torquímetro de vareta em "T", muito utilizado em aplicações em locais de difícil acesso. Constitui de uma barra de flexão presa a uma escala com vareta fixa ao ponto central de uma barra de garra dupla para aplicação de torque, como mostrado na Figura 8 (INMETRO, 2005a).

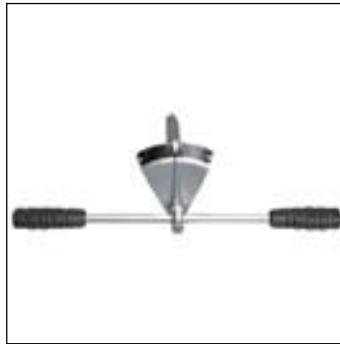


Figura 8: Torquímetro de vareta em “T” (GEDORE, 2006c).

2.5.4.4 Torquímetro de estalo

Mais indicado para medições em série, este tipo de torquímetro consiste de um sistema interno de mini alavancas e uma mola, através da qual o torque pode ser ajustado. São torquímetros de boa exatidão, porém exigem do operador uma série de cuidados. Em torquímetros de estalo, como o exibido na Figura 9, quando o torque programado é atingido, o operador ouvirá um "click", sinalizando o desarme do torquímetro, acompanhado de um movimento de aproximadamente 3° . Após este deslocamento angular, se o torquímetro continuar a ser carregado, ocorrerá uma sobrecarga do torque programado. Assim, o procedimento correto é, após o click, o operador retirar a força do instrumento e assim reiniciá-lo (INMETRO, 2005a).



Figura 9: Torquímetro de estalo (GEDORE, 2006b).

Neste tipo de torquímetro, quando se utilizam cabeças intercambiáveis, é necessário o cuidado para a aplicação da força exatamente no centro do punho, caso contrário, podem ocorrer diferenças nas leituras de torque. O ajuste do torque é feito por uma manivela acoplada à extremidade do torquímetro (INMETRO, 2005a).

2.5.4.5 Torquímetro de quebra

Quando o torque programado é atingido, os torquímetros de quebra dobram em um ponto perto da cabeça, ocasionando um deslocamento angular de 20°. Após este movimento o torquímetro é automaticamente reiniciado e está pronto para a próxima aplicação quando o corpo volta para a posição alinhada. Como este movimento é de 20°, é mais difícil de acontecer a sobrecarga pelo operador do que nos torquímetros de estalo, onde este deslocamento é de 3°. Sua cabeça com catraca facilita o uso em locais de pouco espaço para movimentação. O ajuste do torque a ser aplicado é feito pela rotação do punho e indicação na escala. Na Figura 10 é apresentado um torquímetro de quebra (INMETRO, 2005a).



Figura 10: Torquímetro de quebra (INSTEMAQ, 2006).

As escalas deste tipo de torquímetro podem ser de visor, muitas vezes se utilizando do efeito lupa para facilitar a leitura, ou com marcações feitas no próprio corpo do torquímetro, onde conforme o punho vai sendo girado também se movimenta no sentido do corpo (INMETRO, 2005a).

2.5.4.6 Torquímetro de estalo/quebra não ajustável

Estes são torquímetros cujo ajuste de torque já vem de fábrica. São utilizados no chão de fábrica para apertos seriados. A cabeça em catraca facilita o manuseio em locais de pouco espaço. Este tipo de torquímetro possui boa exatidão pois seu mecanismo interno, por não sofrer constantes ajustes, tem um movimento mais homogêneo das peças, prolongando sua vida (INMETRO, 2005a).

2.5.4.7 Torquímetro limitador de torque

Também chamados de torquímetros de giro livre, são geralmente de aplicação para torques baixos. Quando o valor de torque pré-estabelecido é atingido, um mecanismo cessa a aplicação de torque e faz com que o torquímetro gire livremente de modo que o não seja excedido, impossibilitando a sobrecarga. O ponto de aplicação da força independe para a geração do torque. Podem ser axiais ou de braço, na Figura 11 está ilustrado um torquímetro limitador de torque axial (INMETRO, 2005a).

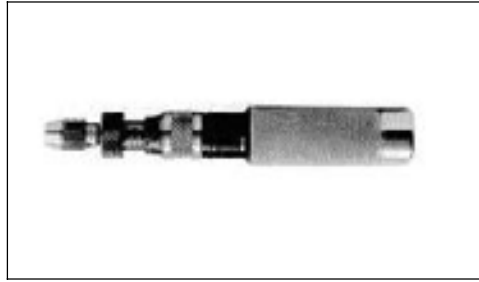


Figura 11: Torquímetro limitador de torque (CARLSONS, 2005).

O princípio de funcionamento deste tipo de torquímetro se dá por um mecanismo composto por uma roda dentada e uma esfera pressionada sobre esta roda. Esta força aplicada sobre a esfera é realizada por uma mola através da qual se faz o ajuste do torque desejado. Atendem apenas um sentido de aplicação de torque (INMETRO, 2005a).

2.5.4.8 Seleção do torquímetro apropriado

- ✓ Torquímetros de indicação – mais utilizados em laboratórios de metrologia e por departamentos de inspeção. Assegura qualidade a conferência de torques. Utilizados para aplicação de torque após o aperto por apertadeiras de alta velocidade. Ferramenta primária para alto grau de exatidão;
- ✓ Torquímetros de ajuste – Utilizado principalmente na linha de produção onde, por questões diversas, o torque deve ser aplicado rapidamente assim como a mudança do torque. Perdem um pouco em exatidão em se comparado aos torquímetros de indicação;
- ✓ Torquímetros de torque pré-ajustado – Linha de produção e operações de manutenção onde o operador deve somente aplicar o torque (INMETRO, 2005a).

É importante destacar que a escolha do torquímetro deve respeitar as especificações de projeto para o aperto em questão. Isto é, o resultado proveniente da calibração do torquímetro apontará a sua qualificação ou desqualificação para o aperto (INMETRO, 2005a).

2.5.5 Calibração de torquímetros

A calibração de instrumentos de medição de torque, mesmo com estes sendo amplamente utilizados em relevantes indústrias como a automobilística, da aviação e construção civil, tem recebido menor atenção do que a calibração de outros tipos de instrumentos. O número de laboratórios que oferecem serviços de calibração para esta grandeza é limitado e, a exceção de laboratórios de alguns fabricantes de veículos que desenvolveram seus próprios sistemas para medir torque, a situação específica para a calibração de torque, embora em constante desenvolvimento, ainda pode ser considerada deficitária (BOCHESE, L.; BOCHESE, A., 2001).

Existe uma diversidade de calibradores de torquímetros disponível no mercado. Atendendo diferentes faixas de torque e utilizando princípios de funcionamento diversos, esses calibradores atendem a contento as exigências das normas de qualidade e confiabilidade (AGUIAR et al., 2003).

2.5.5.1 Calibradores primários

No que diz respeito a calibradores primários, a alternativa mais óbvia é a aplicação da definição de torque ($F \cdot d$). Esses padrões se materializam em sistemas compostos por um braço de alavanca de comprimento conhecido, suporte para massas e pontos de encaixe do instrumento a ser calibrado. Seu princípio de funcionamento é a geração de um torque conhecido através do produto de uma força aplicada, gerada pela ação da gravidade em um conjunto de pesos padrão, e a distância conhecida no braço de aplicação. A aplicação de massas pode ser tanto manual, quanto automática (INMETRO, 2005a).

O Padrão Primário de Torque, presente nos Institutos Nacionais de Metrologia e utilizado na calibração de transdutores de torque de referência, é constituído da máquina de aplicação direta de torque com elementos componentes especiais, conforme o ilustrado na Figura 12 (INMETRO, 2005a).



Figura 12: Padrão primário de torque (PUSA; SACHS, 2006).

Em um sistema de padronização primária de torque alguns elementos são essenciais para que a máquina de aplicação direta de carga atinja um determinado nível de confiabilidade para este tipo de sistema:

- ✓ estrutura rígida - resistência aos esforços de reação aos torques aplicados ao transdutor;
- ✓ conexão braço/eixo do transdutor - o elemento deve minimizar ao máximo o atrito durante a transmissão do torque ao transdutor em calibração;
- ✓ braço para ambos sentidos: além de facilitar a mudança na aplicação de carga nos sentidos horário e anti-horário, o lado que não está sendo utilizado trabalha como contrapeso para o lado em calibração;
- ✓ sistema de compensação do braço - compensa a deformação do transdutor retornando o braço à posição horizontal. Um sistema para aplicação do contra-torque pode ser utilizado ou a própria forma do braço em curva no ponto de aplicação da força;
- ✓ partes para instalação e alinhamento do transdutor - flanges de diâmetros variados, conexões rígidas e flexíveis, extensões e redutores;
- ✓ sistema para estabilização da carga - a máquina de aplicação direta de torque deve ter a garantia da estabilidade da carga aplicada. O controle da temperatura, a ausência de corrente de ar e o amortecimento na aplicação do torque (efeito

pêndulo) são alguns dos sistemas necessários durante uma calibração (INMETRO, 2005a).

2.5.5.2 Calibradores analógicos

Estes calibradores, embora ainda muito utilizados, estão aos poucos sendo substituídos por calibradores digitais com transdutores. Seu funcionamento é praticamente o mesmo do torquímetro indicador de relógio e é utilizado apenas em torquímetros de exatidão inferior ao deste. Muito utilizado no ajuste do torque nominal de torquímetros de estalo e giro livre, já que possui ponteiro de arraste no mostrador. Os calibradores analógicos funcionam nos sentidos horário e anti-horário, um exemplo deste tipo de calibrador é apresentado na Figura 13 (INMETRO, 2005a).



Figura 13: Calibrador analógico de torquímetros (GEDORE.DE, 2005).

2.5.5.3 Calibração de torquímetros pelo sistema direto

Um dos métodos mais simples para calibração de torquímetros, consiste na aplicação de forças diretamente ao cabo do torquímetro. Este método de calibração, mostrado na Figura 14, acarreta erros sobretudo devido ao não conhecimento exato da distância de aplicação da força.



Figura 14: Calibração de torquímetro pelo sistema direto.

2.5.5.4 Calibração de torquímetros por meio de transdutores

Princípio mais utilizado na calibração de torquímetros. Como a leitura é digital, esta pode ser armazenada ou ser transmitida a um computador ou impressora para tratamento dos dados em tempo real. A aplicação da força sobre o sistema pode ser manual ou através de um atuador que automaticamente aplica a força ao braço do torquímetro, ou diretamente no eixo do transdutor com o braço do torquímetro fixo. Por este sistema automatizado, é possível controlar a velocidade de aplicação do torque. Na Figura 15 estão mostrados alguns exemplos de calibradores de torquímetros que utilizam transdutores para leitura do torque aplicado (INMETRO, 2005a).



Figura 15: Calibração de torquímetros por meio de transdutores (INTERTURBINE, 2005; PRORE, 2005; STURTEVANT, 2005; NORBAR, 2005; TOHNICH, 2005; MOUNTZ, 2005).

A estrutura da "mesa de calibração" e o ponto de apoio (nivelamento) do torquímetro devem ser bem projetados a fim de atenuar as solicitações parasitárias como forças cortantes e momentos fletores. Da mesma forma, esta estrutura deve sustentar o torque aplicado aos instrumentos durante o tempo para aquisição das leituras. Na Figura 16 é apresentada a

estrutura de uma mesa de calibração de um sistema de calibração de torquímetros por meio de transdutores (INMETRO, 2005a).



Figura 16: Detalhe de estrutura da mesa de calibração (AKOTORQUE, 2006).

2.5.6 Expressão da incerteza de medição em metrologia de torque

Para a Grandeza Torque, a identificação das fontes de incerteza depende basicamente:

- ✓ Características do instrumento em calibração (resolução, analógico/digital, torque puro/alavanca);
- ✓ sistema de calibração (primário/secundário, vertical/horizontal, alinhamento, acoplamentos);
- ✓ padrão utilizado (incerteza, faixa de utilização);
- ✓ norma de calibração (INMETRO, 2005a).

O cálculo de incerteza apresentado a seguir se baseia no documento EA-4/02 (European Co-operation Accreditation - Expression of Uncertainty in Calibration), adaptado para a grandeza torque no documento EA-10/14 (EA Guidelines on the Calibration of Static Torque Measuring Devices). Estes documentos estabelecem a metodologia de cálculo da incerteza de medição em calibração seguindo a filosofia preconizada no Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (ISO GUM). Na Tabela 3 estão expostas as contribuições dos elementos para a incerteza de medição em torque.

Tabela 3: Contribuições dos elementos de incerteza em metrologia de torque.

Grandeza	Avaliação da incerteza padrão	Incerteza padrão absoluta em N.m	Incerteza padrão relativa em %
Repetitividade em posição de montagem inalterada b'	Tipo A	$u_{b'} = \frac{b'}{\sqrt{2}}$	$w_{b'} = \frac{b'}{\sqrt{2}} \cdot \frac{100}{\bar{X}}$
Reprodutibilidade em diferentes posições de montagem b	Tipo A	$u_b = \frac{b}{\sqrt{n}}$	$w_b = \frac{b}{\sqrt{2}} \cdot \frac{100}{\bar{X}}$
Erro de interpolação f_a	Tipo A com distribuição retangular	$u_{f_a} = \frac{ f_a }{\sqrt{6}}$	$w_{f_a} = \frac{ f_a }{\sqrt{6}} \cdot \frac{100}{X_a}$
Resolução r	Tipo B com distribuição retangular	$u_r = \frac{r}{\sqrt{12}}$	$w_r = \frac{r}{\sqrt{12}} \cdot \frac{100}{M_k}$
Torque de referência	Tipo B	u_{tcm}	w_{tcm}

Onde,

$$b' = |X_1 - X_2| \quad (2.5.1)$$

$$b = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2.5.2)$$

$$f_a = (\bar{X} - X_a) \quad (2.5.3)$$

Sendo que b' são valores medidos na mesma posição de montagem; X_j , valores medidos em posições de montagem diferentes, X_a , valores medidos a partir da curva de interpolação e M_k , torque aplicado na calibração;

Incerteza padrão combinada (u):

$$u^2(\bar{X}) = (u_{tcm}^2 + u_{b'}^2 + u_b^2 + u_r^2 + u_{f_a}^2) \quad (2.5.4)$$

Incerteza expandida (U):

$$U = k \cdot u(\bar{X}) \quad (2.5.5)$$

Outra maneira de cálculo para a incerteza de medição seria através do Desvio Padrão como única fonte de incerteza do Tipo A. A Tabela 4 identifica as principais fontes de incerteza a serem consideradas neste sistema de calibração em torque utilizando um padrão primário (massa + gravidade + distância).

Tabela 4: Principais fontes de incerteza em um sistema primário de calibração de torque.

<i>Ponto i</i>	Y_i (N.m)					
Fontes de incerteza X_i	Estimativa x_i	Incerteza padronizada $u(x_i)$	Distribuição / fator divisor (d)	Coefficiente de sensibilidade C_i	Contribuição p/ incerteza $U_i(y)$	Grau de liberdade ν_i, ν_{eff}
Massa	X_i (kg)	u (massas) (kg)	normal	C_{massa}	u (massas) · C_{massa}	Infinito
Braço		u (trena) (m)	normal	$C_{braço}$	u (massas) · C_{massa}	Infinito
Gravidade		u (gravidade) (m/s ²)	normal	$C_{gravidade}$	u (grav.) · $C_{gravidade}$	Infinito
Mensurando		DesvPad / \sqrt{n} (N.m)	normal	1,0	u (mensurando)	ν_i
Resol. do Mensurando		Resol / $\sqrt{3}$ ou $\sqrt{6}$ (N.m)	retangular dig. triangular anal.	1,0	u (resolução)	Infinito
$u(y)$			k		u (total)	ν_{eff}
$U(y)$			Segundo Tabela 1		$U = k \cdot u$	

Para a determinação dos respectivos coeficientes de sensibilidade, do modelo teórico de torque temos que:

$$T = m \cdot d \cdot g \quad (2.5.6)$$

logo, os coeficientes de sensibilidade são assim calculados:

$$C_{massa} = \frac{\partial T}{\partial m} = d \cdot g \quad (2.5.7)$$

$$C_{\text{braço}} = \frac{\partial T}{\partial d} = m \cdot g \quad (2.5.8)$$

$$C_{\text{gravidade}} = \frac{\partial T}{\partial g} = d \cdot m \quad (2.5.9)$$

A coluna “Contribuição p/ incerteza $U_i(y)$ ” transforma as incertezas em unidades de torque N.m.

Quando se trata de um instrumento cuja indicação se realiza em unidades de torque, mas que não do Sistema Internacional de Unidades (N.m), o coeficiente de sensibilidade será o fator de conversão (por exemplo: 9,80665 para transformar kgf.m \rightarrow N.m).

3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O desenvolvimento do projeto visa atender os requisitos da norma ABNT NBR 12240:2000: Materiais metálicos - Calibração e classificação de instrumentos medidores de torque (ver Apêndice B). Para tanto, foram estudados princípios básicos de força e torque, instrumentos e métodos utilizados na medição destas grandezas, avaliação de incerteza bem como diversas técnicas e procedimentos de calibração de instrumentos de medição de torque. Objetivou-se aqui a realização de um estudo comparativo, que permitisse a confecção de um sistema tecnicamente viável e economicamente vantajoso em relação aos existentes no mercado.

A literatura trata sobretudo de calibradores de torquímetro que utilizam transdutores de torque, sendo escassas as referências à calibração de torquímetros por meio de células de carga. Um modelo para calibração de torquímetros utilizando um transdutor de força do tipo célula de carga como elemento sensor foi proposto por Santana (2003), entretanto, a opção sugerida não previa a variação de faixa nominal, tampouco a calibração nos sentidos horário e anti-horário.

O requisito fundamental foi a confecção de um sistema que admitisse o posicionamento de uma célula de carga em diferentes pontos de fixação, proporcionando múltiplas faixas de calibração. Outra condição preestabelecida foi a capacidade de realizar calibrações de torquímetros nos sentidos horário e anti-horário. Definido os requisitos básicos do sistema partiu-se para um estudo para a definição do leiaute que apresentasse a configuração mais favorável tecnicamente.

O modelo apresentado na Figura 17 representa a primeira opção de projeto avaliada. O sistema denominado torre de força desloca-se longitudinalmente e transversalmente para adaptar-se ao torquímetro a ser calibrado. A torre de força produz a força sobre o torquímetro que por sua vez desloca o braço de alavanca comprimindo a célula de carga. A célula de carga é fixada em uma chapa intermediária localizada sobre a base e pode ser posicionada em quatro pontos distintos, permitindo a geração de igual número de faixas nominais no sistema. Esta configuração foi descartada devido às dificuldades apresentadas para a aplicação da força sobre o torquímetro, montagem e desmontagem da célula de carga além de exigir todo um deslocamento do sistema da torre de força para a calibração nos sentidos horário e anti-horário.

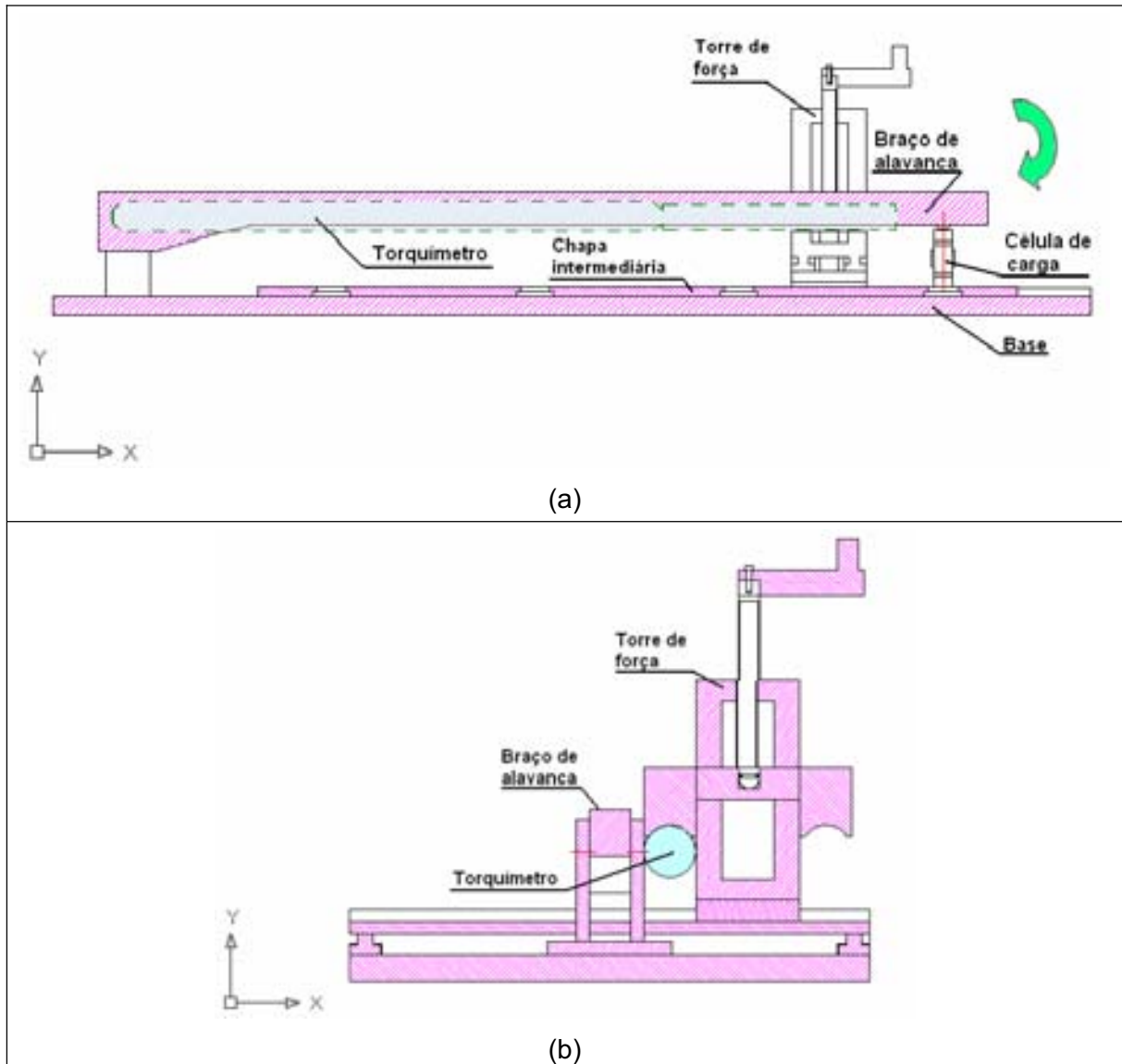


Figura 17: Primeira opção de projeto.

Novas opções foram analisadas e definiu-se uma segunda configuração. Na figura 18 é mostrado um croquis da segunda opção de leiaute analisada. Neste caso, a torre de força, que pode deslocar-se longitudinalmente sobre duas guias para adequar-se ao comprimento do torquímetro, aplica a força sobre o instrumento nos sentido negativo do eixo Y, fazendo com que o braço de alavanca comprima a célula de carga.

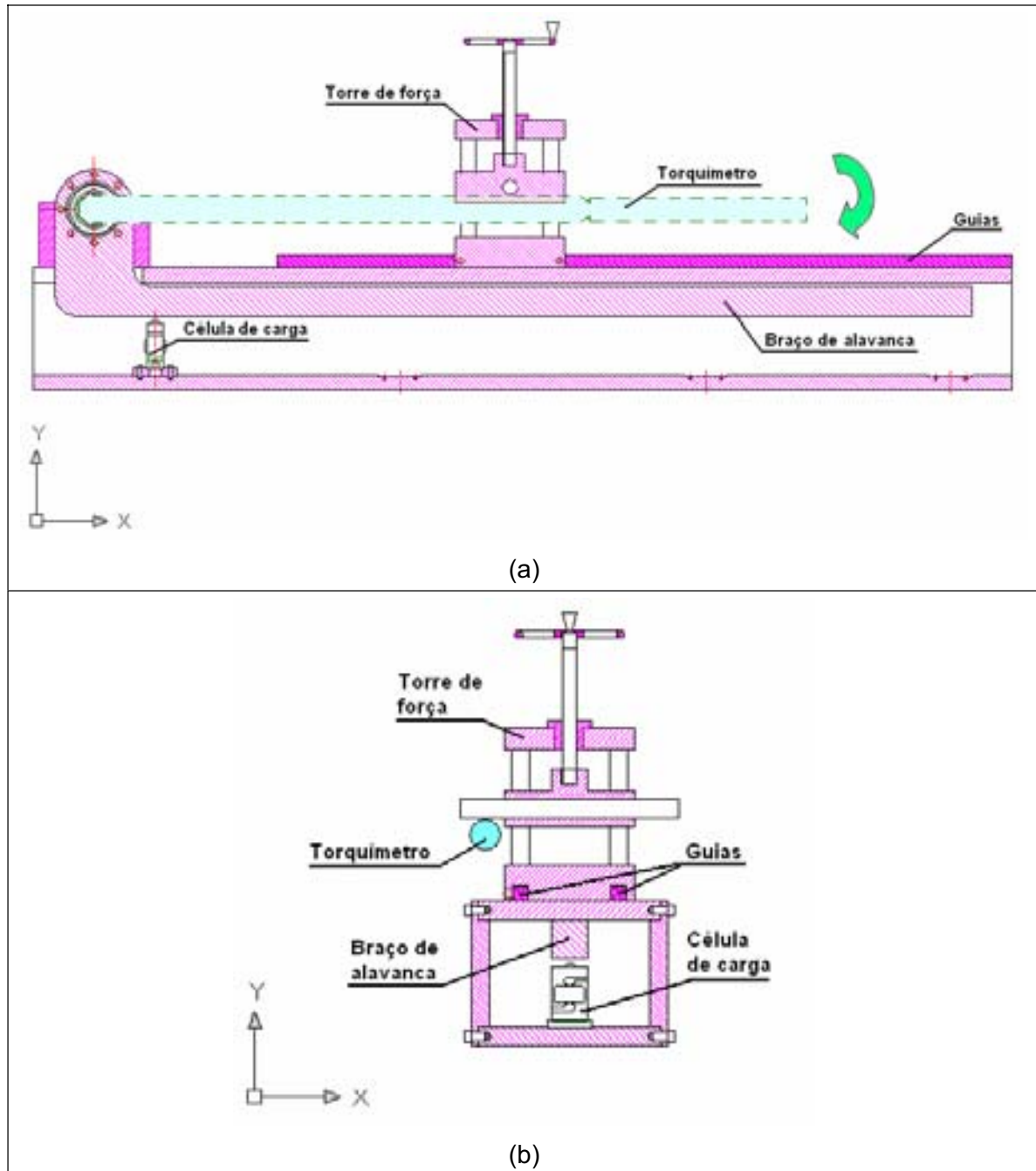


Figura 18: Segunda opção de projeto.

A rejeição desta proposta deu-se, sobretudo, pela geração de uma força de reação das guias sobre a torre de força atuando no sentido positivo do eixo Y, provocando uma tendência de deslocamento desta conforme fossem aplicadas cargas sobre o torquímetro. Outra desvantagem desta configuração foi a possibilidade de o peso próprio do torquímetro gerar uma força atuante sobre o braço de alavanca e, conseqüentemente, induzir erros de leitura na célula de carga.

O aperfeiçoamento das variantes anteriores possibilitou a concepção de uma versão final que atendesse a contento os objetivos iniciais.

O projeto desenvolvido baseia-se no método de transmissão de força aplicando-se o princípio da alavanca. O inserto de encaixe do torquímetro (Figura 19) é conectado ao braço de alavanca do calibrador enquanto que o cabo do torquímetro está ligado ao dispositivo que promoverá um movimento vertical no sentido positivo do eixo Y, denominado torre de força, como ilustrado na Figura 20. Na medida em que o cabo do torquímetro é deslocado para cima, um torque é aplicado no inserto de encaixe, provocando uma tendência de movimento de rotação no braço de alavanca do calibrador.

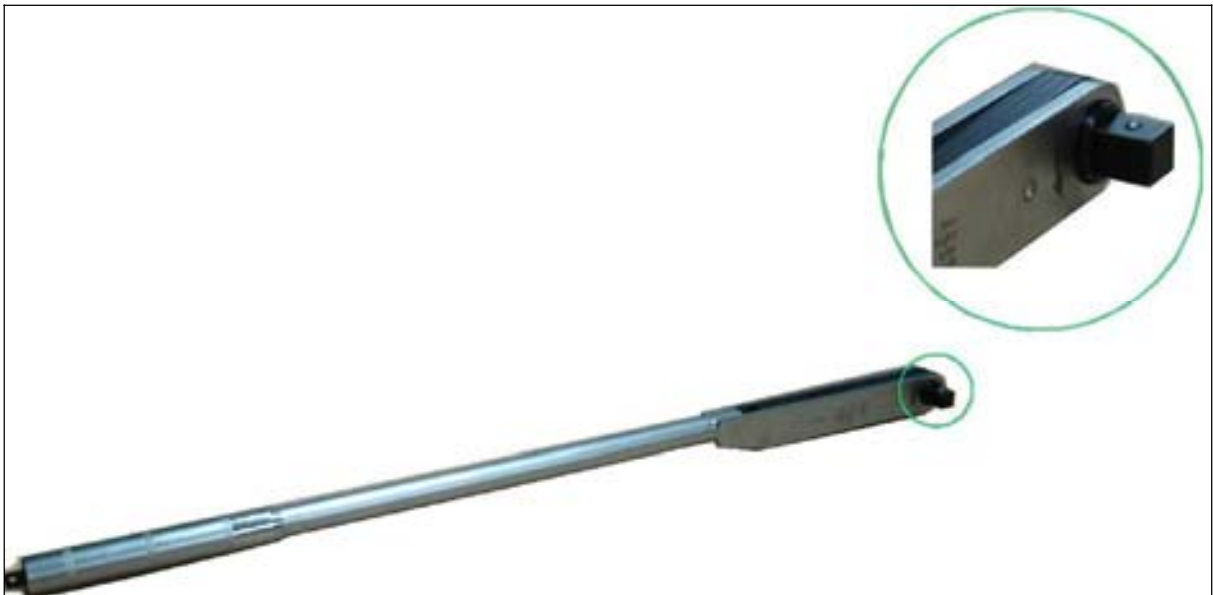


Figura 19: Detalhe do inserto de encaixe de um torquímetro.

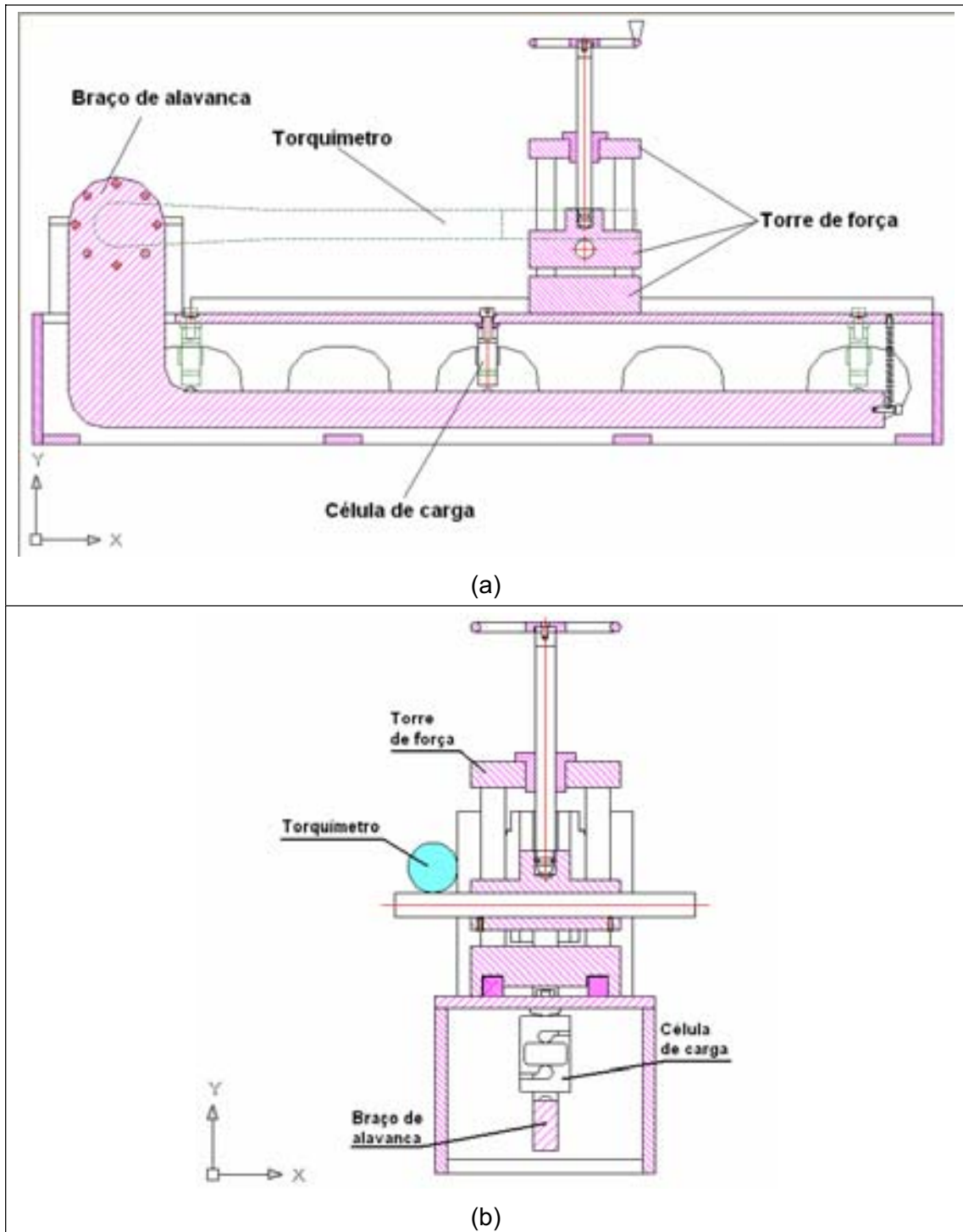


Figura 20: Esquema funcional do calibrador de torquímetros.

Como o deslocamento da alavanca é limitado por uma célula de carga EMIC, modelo SV, com capacidade de 2 kN, a tendência de movimento provocada pelo deslocamento do torquímetro causará uma força de compressão sobre esta célula. A posição da célula de carga é variável, podendo ocupar três posições predefinidas. De acordo com o torque a ser aplicado, define-se a posição da célula de carga para que a força atuante sobre ela esteja dentro da faixa

de utilização recomendada para instrumentos medidores de força, ou seja, a partir dos 10% iniciais da faixa nominal, independente do torque aplicado ao sistema. O conhecimento da força e da distância de aplicação desta em relação ao eixo de rotação do braço de alavanca são os requisitos necessários para a determinação da faixa de utilização do sistema. A variação do ponto de fixação da célula de carga permitirá gerar três faixas de calibração: 20 N.m a 200 N.m, 100 N.m a 1000 N.m e 200 N.m a 2000 N.m. Apesar de os limites superior da primeira faixa e o inferior da terceira coincidirem, a faixa central foi criada para atender calibrações com valores intermediários de torque de modo a evitar situações em que a calibração tivesse início em uma faixa e necessitasse ser concluída em outra, exigindo com isso a alteração do posicionamento da célula de carga no sistema.

Definido o princípio básico de funcionamento do padrão de torque, partiu-se para a etapa do desenvolvimento do projeto. O desenho foi elaborado no software AutoCAD[®] 2006 e após extensas discussões de detalhes construtivos e dimensionamento de componentes chegou-se a uma primeira versão. Baseando-se nesta primeira versão do projeto, foi preparada uma maquete em tamanho real construída em isopor e apresentada na Figura 21.

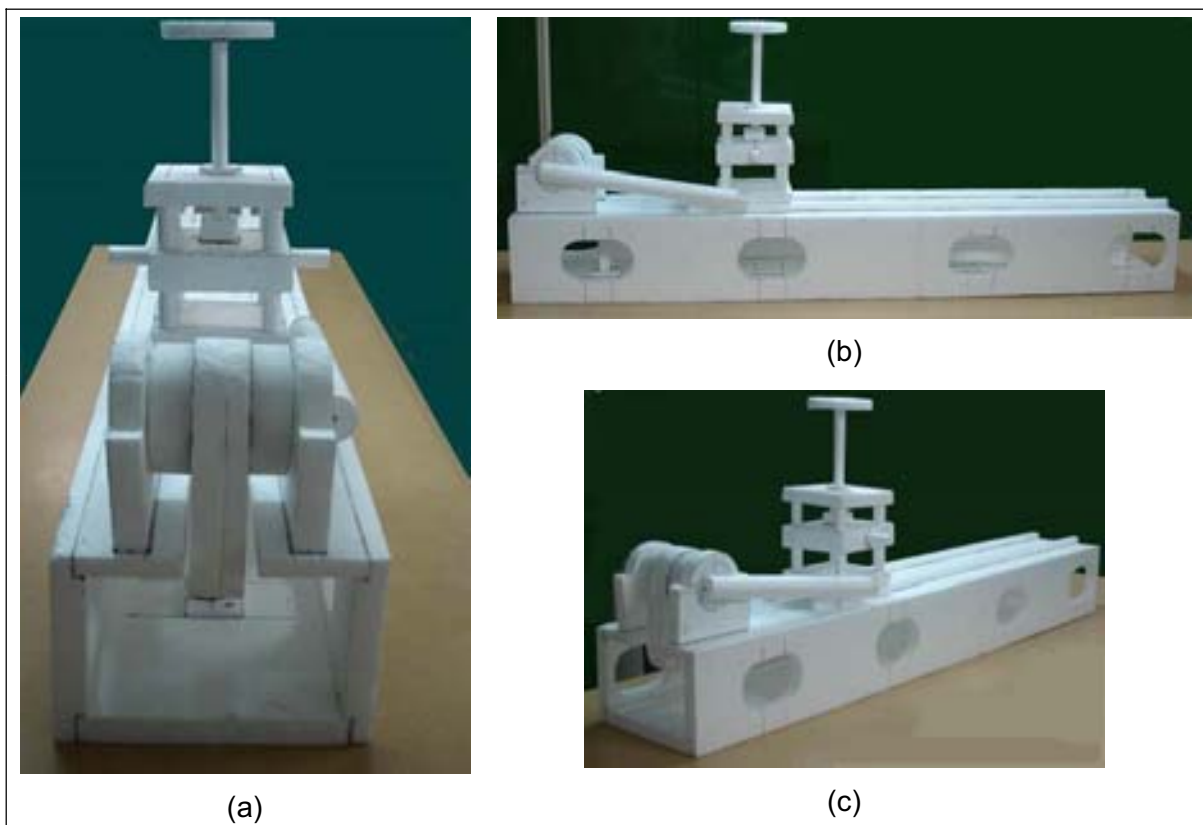


Figura 21: Maquete em isopor do calibrador de torquímetros.

A construção desta maquete possibilitou a revisão de alguns pontos do projeto bem como o redimensionamento de componentes com o intuito de aliviar o peso do sistema e reduzir a quantidade do material necessário à fabricação, minimizando, desta forma, os custos do projeto sem prejudicar a funcionalidade nem a eficiência do mesmo.

Rediscutido o projeto, foi elaborada sua versão final cujo desenho desenvolvido em AutoCAD encontra-se no Apêndice A. Na Figura 22 são exibidos croquis com a configuração final do calibrador de torquímetros.

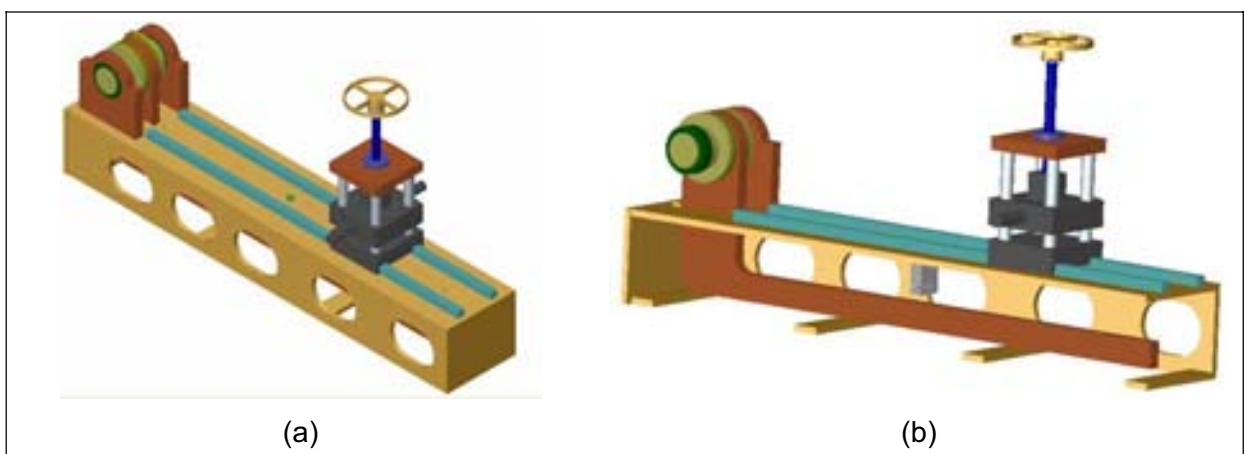


Figura 22: Croquis da versão final do calibrador de torquímetros.

Inicialmente, a configuração do projeto previa a calibração de torquímetros em quatro escalas, 20 N.m a 500 N.m, 500 N.m a 1000 N.m, 1000 N.m a 1500 N.m e 1500 N.m a 2000 N.m. Contudo, constatou-se que a utilização de três faixas de torque (20 a 200, 100 a 1000 e 200 a 2000) N.m, atenderia a contento as exigências de calibração.

Para não exigir grandes esforços do operador, a força aplicada para elevar o cabo do torquímetro e gerar torque sobre o sistema é transmitida através de um fuso de esferas recirculantes conectado à plataforma elevatória da torre de força que é o elemento responsável pelo deslocamento vertical do cabo do torquímetro. A outra extremidade do fuso de esferas é acoplada a um manípulo por meio do qual será feita a aplicação da força. Um detalhe da conexão manípulo-fuso de esferas-plataforma elevatória é mostrado na Figura 23.

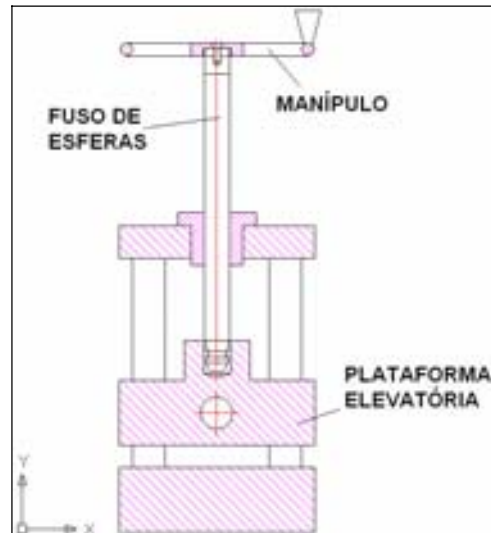


Figura 23: Detalhe da ligação manípulo-fuso de esferas-plataforma elevatória.

A plataforma elevatória proporciona a elevação do cabo do torquímetro através de uma barra redonda de aço inox com 25 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento, denominada barra de força, sobre a qual o cabo do torquímetro é posicionado. Esta barra de força foi projetada de tal modo que possibilite a calibração de torquímetros nos sentidos horário e anti-horário, bastando para isso o remanejamento do torquímetro entre os dois mancais do sistema. Na Figura 24 é exibido o detalhe da barra de força, enquanto que na Figura 25 é mostrada a calibração de um torquímetro nos sentidos horário e anti-horário.

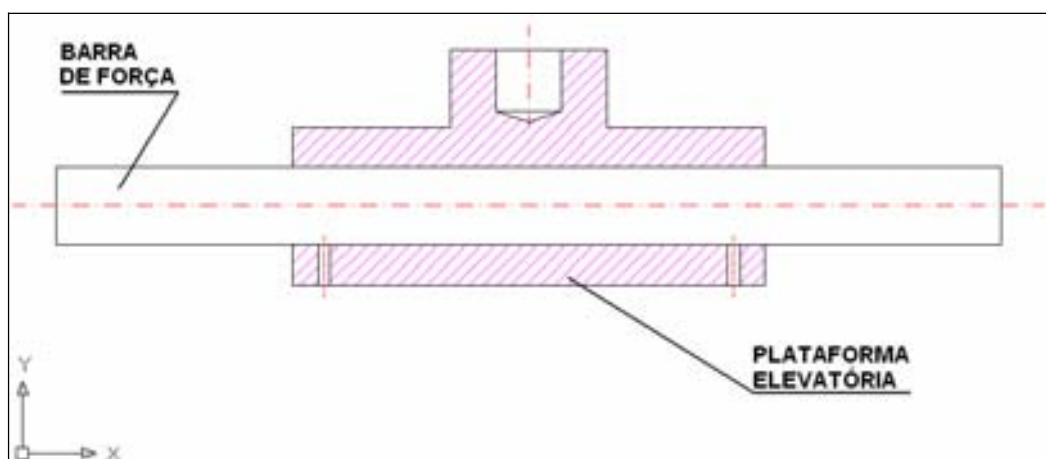


Figura 24: Detalhe da barra de força da plataforma elevatória.

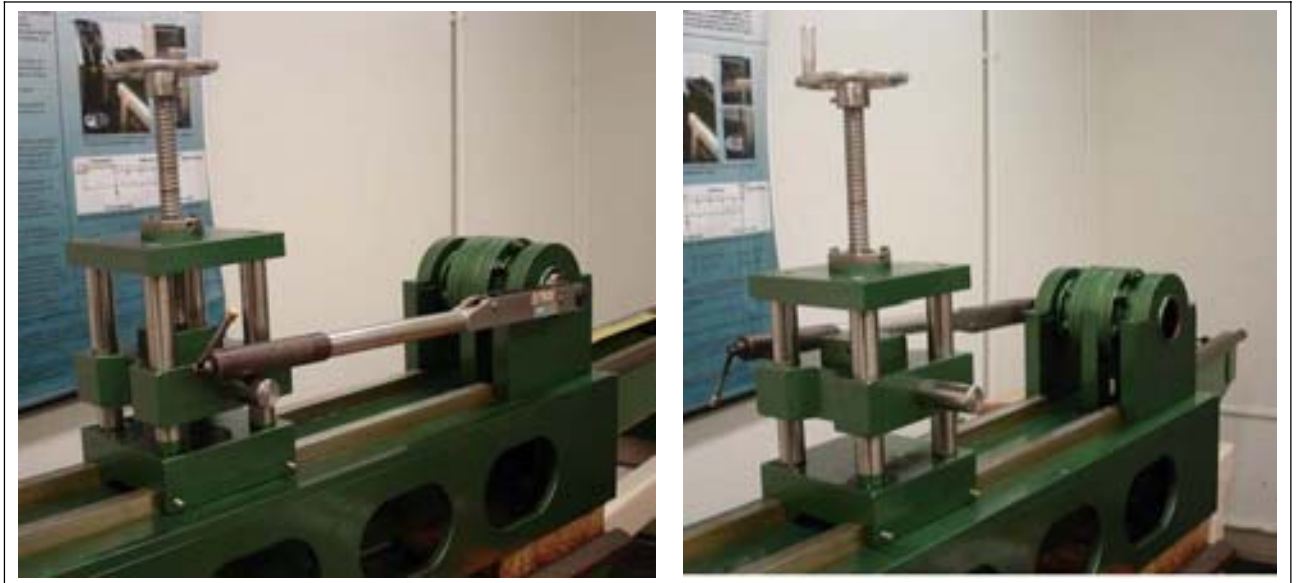


Figura 25: Calibração de torquímetro nos sentidos horário e anti-horário.

Para se ajustar ao comprimento do torquímetro a ser calibrado, a torre de força pode deslocar-se longitudinalmente através de duas guias e ser fixada no ponto desejado, como visto na Figura 26.

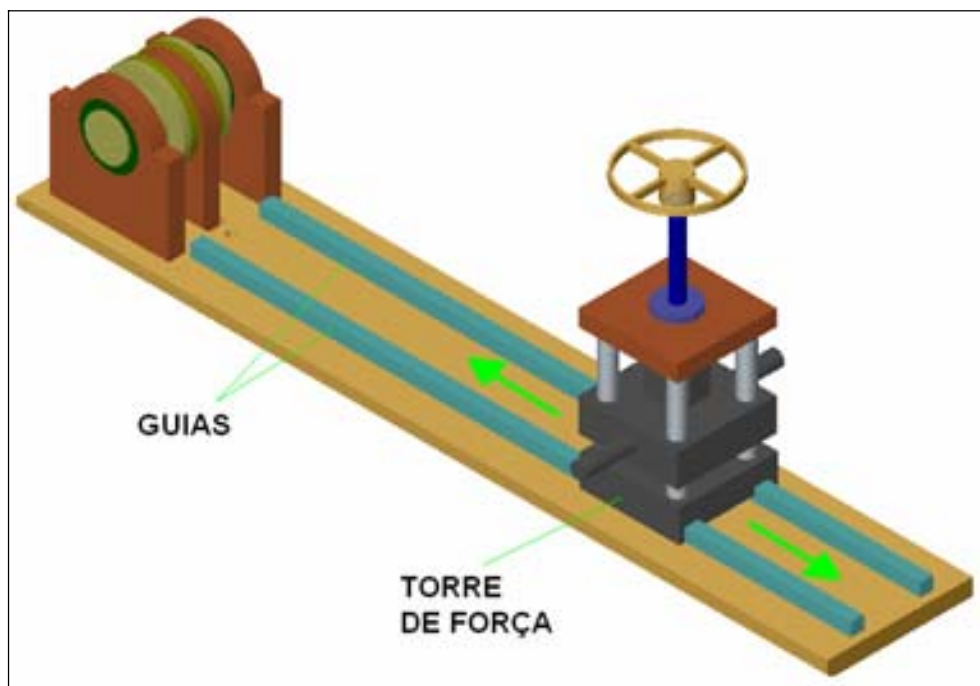


Figura 26: Deslocamento exequível da torre de força.

Os insertos de encaixe ou “quadrados de encaixe” dos torquímetro têm uma dimensão padrão definida que varia de acordo com a faixa nominal do instrumento. As dimensões nominais mais comuns de quadrados de encaixe dos torquímetro comerciais são $\frac{1}{2}$ ”, $\frac{3}{4}$ ” e 1”. A conexão entre o torquímetro e o braço de alavanca é feita por um componente denominado transmissor de torque, no qual o inserto de encaixe do torquímetro é inserido e o torque aplicado é transmitido ao braço de alavanca através de estrias existentes neste transmissor de torque e nas luvas fixadas em ambas as faces do braço de alavanca, como mostrado na Figura 27.

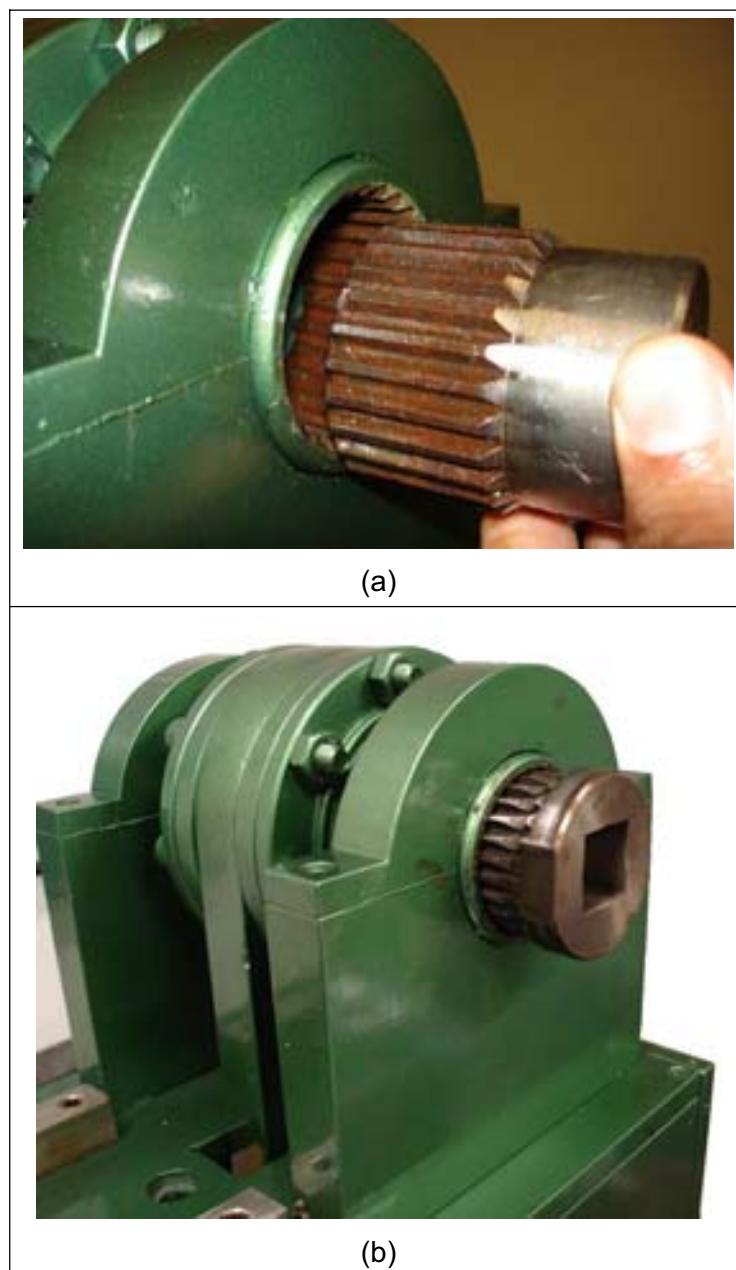


Figura 27: Mecanismo para transmissão de torque.

Para atender às dimensões mais usuais de insertos de encaixe foram confeccionados dois transmissores de torque em cujas extremidades foram usinadas, por processo de eletroerosão, furos quadrados que se adequam a estas dimensões. Estes transmissores de torque podem ser utilizados em ambas as extremidades permitindo a calibração de torquímetros nos sentidos horário e anti-horário. As 26 estrias existentes neste dispositivo permitem o posicionamento de torquímetros no sistema com variação angular de aproximadamente 14 graus entre cada posição. Na Figura 28 são apresentados os desenhos dos transmissores de torque.

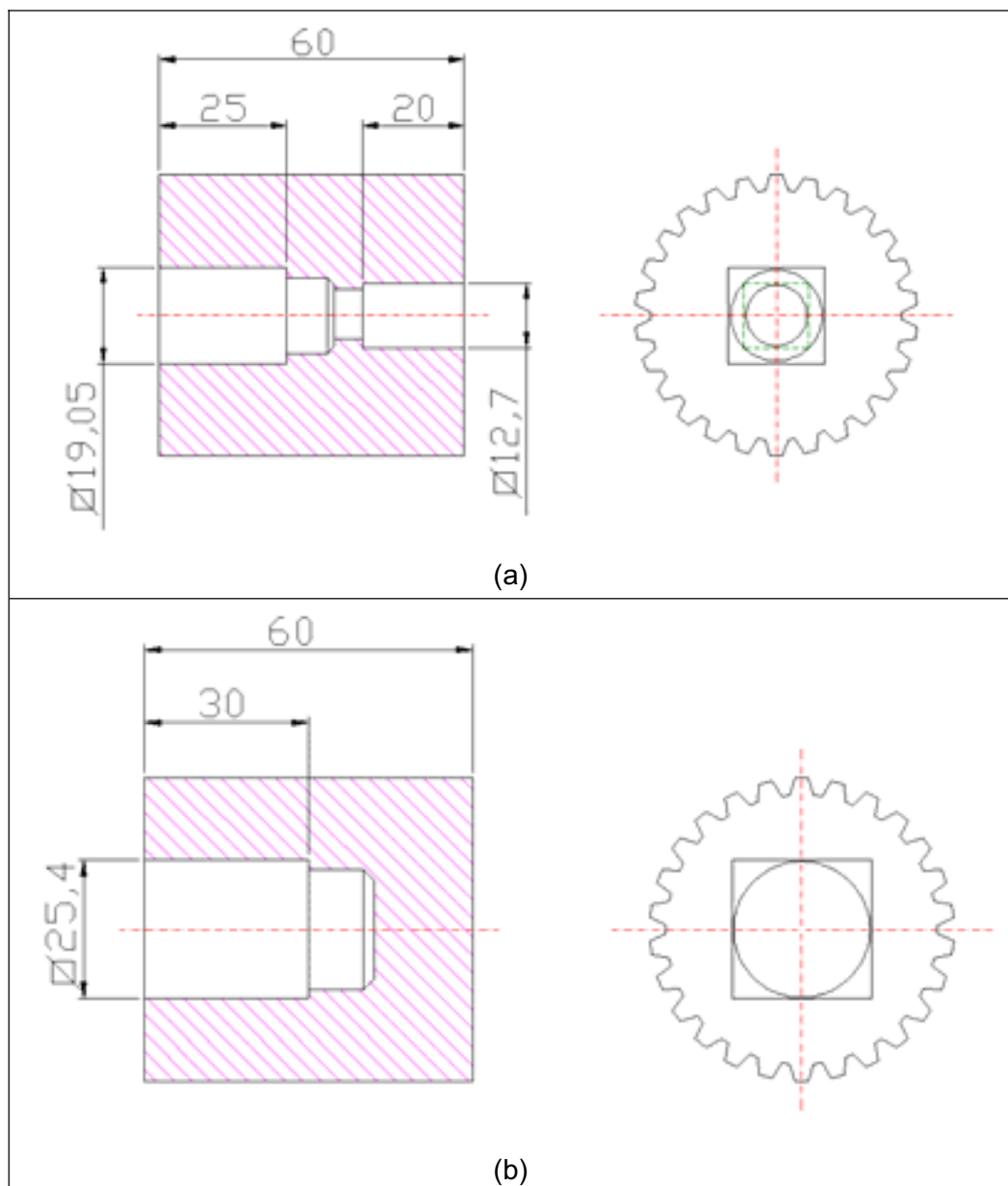


Figura 28: Transmissores de torque.

A utilização de luvas estriadas foi uma solução funcional e de baixo custo para a transmissão de torque. Inicialmente, cogitou-se efetuar essa transmissão por intermédio de chavetas, entretanto, a necessidade de usinagens aprimoradas para a constituição dos rasgos e o uso de chavetas com elevadas dimensões para resistir aos altos valores de torque aplicados na utilização da capacidade máxima do calibrador (2000 N.m), tornou restritivo a utilização deste elemento. Os dois pares de eixo/luva estriados utilizados são partes integrantes de um eixo diferencial de caminhão Mercedes Benz, modelo 2219, portanto, com elevada resistência à torção, e, por serem componentes usados, foram adquiridos a custos reduzidos, mas com a seção a ser utilizada em perfeitas condições. As luvas são aparafusadas no braço de alavanca e giram sobre um par de mancais de rolamento, como visto na Figura 29.

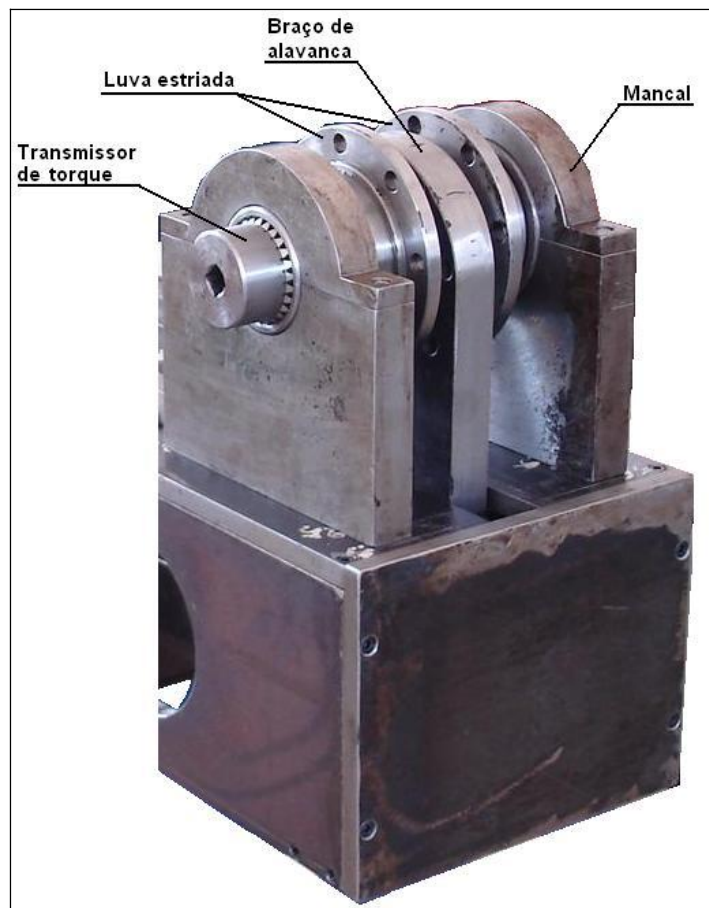


Figura 29: Detalhe dos elementos de transmissão de torque.

O dimensionamento do diâmetro interno dos rolamentos utilizados foi restringido pelas dimensões da luva estriada, onde se optou pelo diâmetro padronizado imediatamente inferior ao desta, provocando o mínimo de usinagem neste elemento. Como a carga aplicada será

puramente radial, optou-se pela utilização de rolamentos de rolos de agulhas, Figura 30. Esta opção deveu-se também ao fato de os rolamentos de agulhas serem de construção compacta, ocupando pequeno espaço na montagem. Além disto, este tipo de rolamento permite uma distribuição ideal da carga sobre as diferentes agulhas, garantindo uma elevada capacidade de carga do rolamento devido às pequenas diferenças nos diâmetros dos elementos rolantes. O rolamento especificado foi o NKI 65/25, que possui capacidade de carga dinâmica de 52,8 kN, portanto bem acima do necessário (2 kN, para o limite superior em cada uma das faixas), e dimensões compatíveis com os componentes disponíveis.

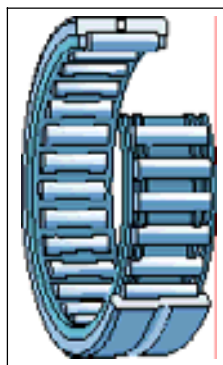


Figura 30: Rolamento de agulhas (SKF, 2007).

O efeito do peso próprio do braço de alavanca sobre o sistema é anulado com a adição de uma mola helicoidal convenientemente instalada em sua extremidade. A rigidez da mola mostrou-se compatível com os níveis de esforço solicitados, não tendo sido necessária sua determinação através de ensaios mecânicos, uma vez que o deslocamento deste elemento é mínimo, da ordem de um décimo de milímetro, e seu efeito é desprezível, não causando influência à funcionalidade do sistema.

O registro da força aplicada à célula de carga, e conseqüentemente, o torque aplicado ao sistema, é efetuado pelo sistema de aquisição de dados Spider8 fabricado pela empresa alemã HBM, conectado a um computador notebook. O Spider8 utiliza o software catmanEasy[®] como interface para transmissão dos dados coletados da célula para o computador, onde podem ser dispostos, interpretados e apresentados do modo mais conveniente ao usuário. O sistema de aquisição de dados utilizado em calibrações de torquímetros através deste padrão de torque é mostrado na Figura 31.

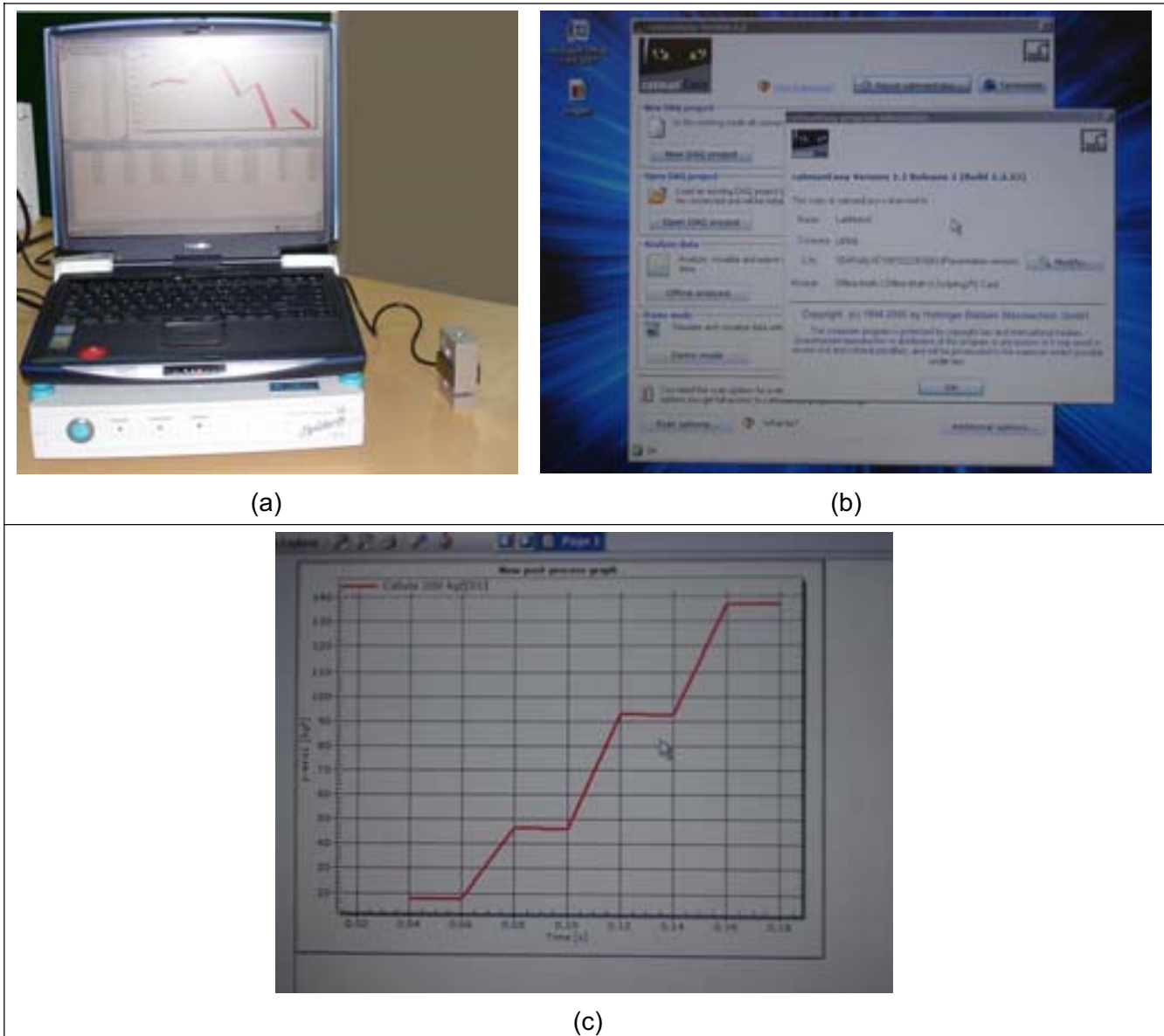


Figura 31: Sistema de aquisição de dados.

Finalizada a etapa de construção do equipamento, realizou-se a avaliação do sistema com relação a seu nível de exatidão e incerteza. Nesta fase, foi executada uma calibração prévia em cada faixa nominal do equipamento, onde foram utilizados pesos padrão para produzir forças de magnitudes conhecidas sobre o sistema, utilizando-se alavancas padrão de comprimentos definidos, dando origem a torques pré-determinados. A força correspondente aplicada à célula de carga é registrada, gerando um banco de dados com informações de torque aplicado ao sistema versus força medida pela célula de carga, estas informações convertem-se na curva de calibração do sistema, tornando-o apto a determinar de maneira satisfatória valores de torques aplicados dentro do campo de utilização de cada faixa nominal. Finalmente, o padrão de torque foi submetido a uma bateria de ensaios de calibração de

torquímetros de diversos tipos e com faixas de medição distintas, permitindo demonstrar a viabilidade da calibração de torquímetros em diferentes escalas por meio do sistema desenvolvido.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Calibração do sistema

Para executar a calibração do sistema, projetou-se um dispositivo que permitisse a aplicação de torques conhecidos para posterior correlação com a força registrada pela célula de carga, permitindo determinar uma constante de conversão entre as grandezas força e torque.

O mecanismo projetado constitui-se de duas barras de aço montadas paralelamente, onde cada uma possui um quadrado acoplado ($\frac{3}{4}$ " e 1", respectivamente) para permitir seu encaixe no transmissor de torque compatível. Próximo à extremidade de cada barra, a uma distância nominal de 1 m em relação ao centro do quadrado, existe um orifício para montagem de um eixo com um suporte para aplicação de pesos padrão. Para garantir que o quadrado de encaixe, através do qual é feita a montagem do dispositivo no calibrador, coincidissem com o centro de massa das barras, foi utilizado um sistema de contrapesos montado na extremidade esquerda das barras, garantindo o equilíbrio do mecanismo antes da aplicação de cargas. Na Figura 32 é apresentado o mecanismo de calibração construído.

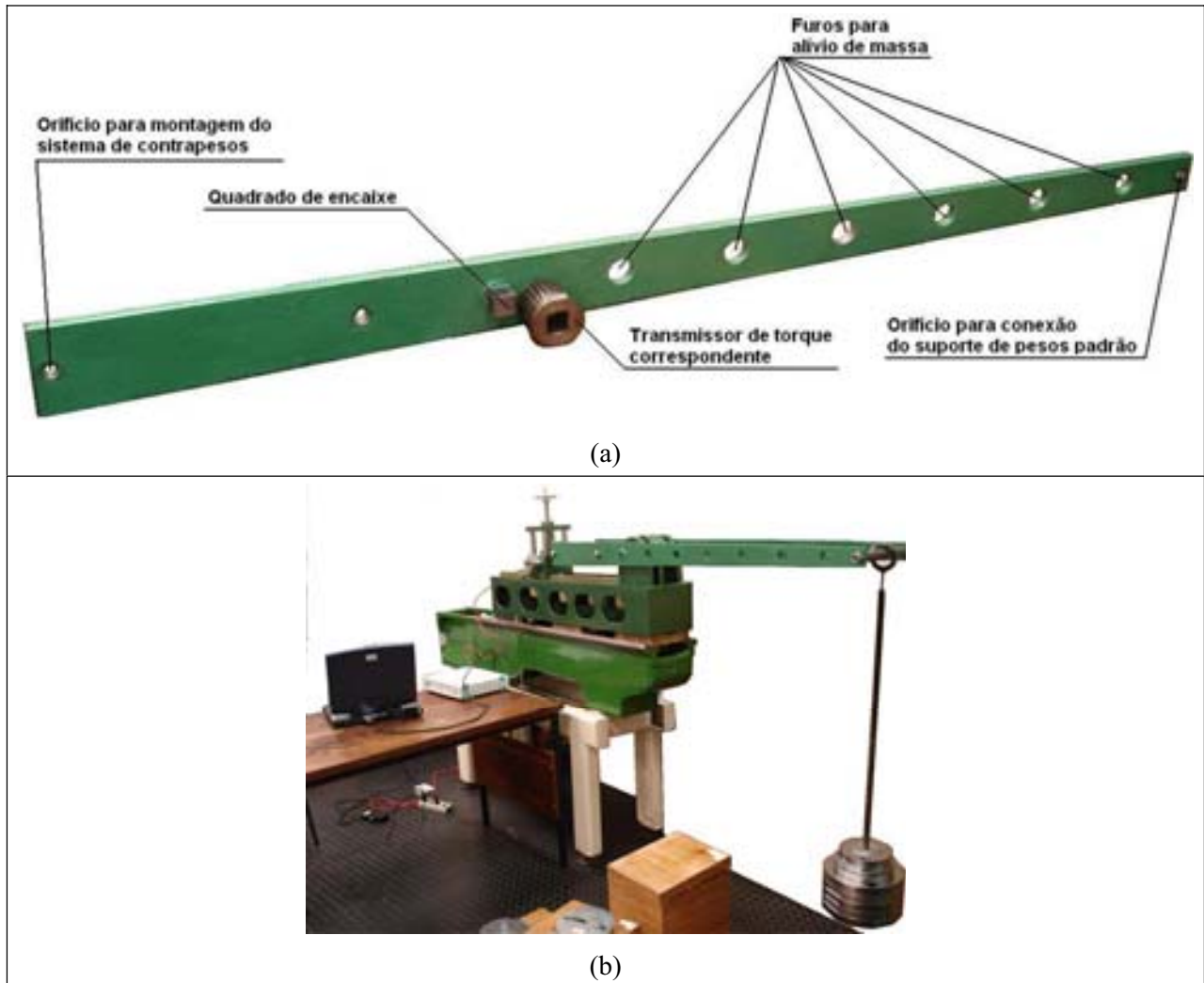


Figura 32: Dispositivo para calibração do sistema.

Utilizando-se uma máquina de medição tridimensional por coordenadas Mitutoyo, modelo QM Measure 353, foram realizadas medições do comprimento das alavancas para determinar a distância compreendida entre o centro do quadrado de encaixe e o eixo de aplicação de força. Como o comprimento a ser determinado excedia a capacidade da máquina utilizada nas medições, determinou-se a distância do centro do quadrado de encaixe ao centro de um dos furos existentes para alívio de massa e deste para o centro do orifício para o eixo do suporte de pesos padrão. Nas medições, os efeitos de possíveis desalinhamentos entre os furos e o quadrado de encaixe não foram considerados, uma vez que sua influência seria desprezível devido à magnitude do comprimento das barras em relação aos desalinhamentos. Na Figura 33 é mostrada a medição do comprimento do dispositivo de calibração do sistema.

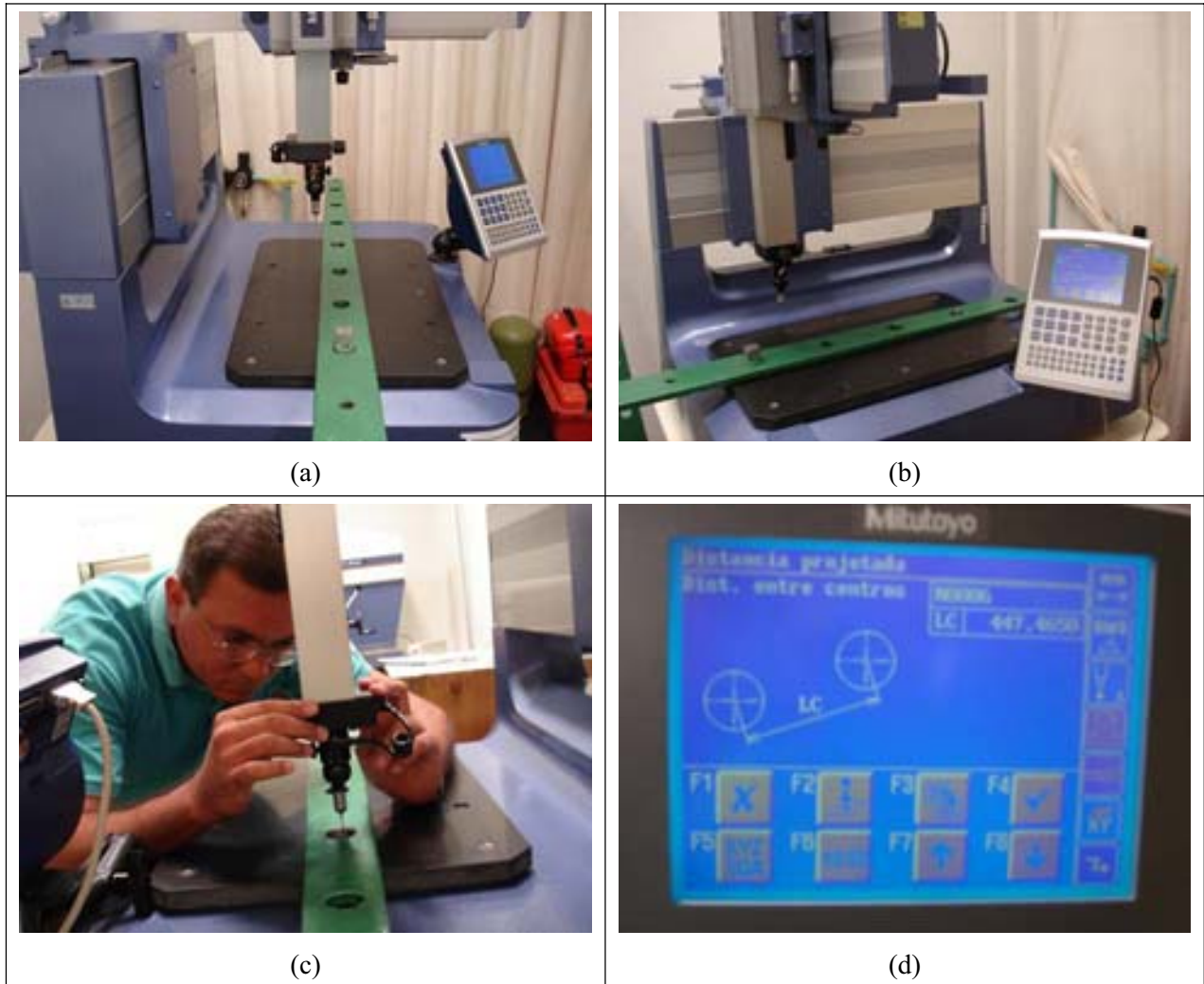


Figura 33: Medição do comprimento do dispositivo de calibração.

Com os resultados obtidos, calculou-se a média aritmética do comprimento das duas barras. A medição do dispositivo indicou um comprimento médio final de $(1001,08 \pm 0,04)$ mm, que, em conjunto com a utilização de pesos padrão, permite a determinação do torque aplicado ao sistema. O cálculo da incerteza do comprimento das barras é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Planilha de incerteza do comprimento do dispositivo de calibração.

Grandeza	Incerteza Padrão (unidade)	Distribuição de probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza padrão combinada (mm)	Graus de Liberdade
Padrão - P	$U_P/1000/2$ (mm)	N	1	0,0010	Infinito
Mensurando - M	σ/\sqrt{n} (mm)	N	1	0,0182	n-1
Resolução - P	$r_P/2/\sqrt{3}$ (mm)	R	$1 \cdot \sqrt{2}$	0,0004	Infinito
Apalpador	$U_{ap}/\sqrt{3}$ (mm)	R	1	0,0012	Infinito
Afastamento de 20°C	$1/\sqrt{3}$ (°C)	R	$L \cdot \alpha/10$	0,0006	Infinito
Diferença de temperatura entre P e M	$0,5/\sqrt{3}$ (°C)	R	$L \cdot \alpha$	0,0032	Infinito
			$k = 2,2$	$u_c = 0,0186$	$v_{eff} = 10$
				U = 0,0414	

Onde, U_P : Incerteza do Padrão, no caso a máquina de medição por coordenadas, fornecida pelo certificado de calibração = $1,2 + (0,8 \cdot L)/1000 \mu\text{m}$ e L : comprimento medido em $\text{mm} = 1000$;

σ : Máximo desvio padrão das medições efetuadas = 0,0577 mm;

n : Número de medições efetuadas = 10;

r_P : Resolução do padrão = 0,001 mm;

u_{ap} : Incerteza do apalpador do padrão = 0,002 mm;

α : Coeficiente de dilatação térmica do aço = $1,1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

O coeficiente de sensibilidade da resolução do padrão foi multiplicado por $\sqrt{2}$ pelo fato de o comprimento de alavanca ter sido medido em duas etapas linearmente dependentes. A contribuição do afastamento de 20 °C para a incerteza deve-se ao não conhecimento do valor exato do coeficiente de dilatação térmica do aço, tendo sido admitido um erro de 10% deste valor. Os cálculos foram feitos levando-se em consideração um nível de confiança de aproximadamente 95%.

De posse dos resultados da medição da barra e conhecendo-se o valor de cada um dos pesos padrão aplicados, foi realizada a calibração do padrão de torque. Através do sistema de aquisição de dados Spider8, conectado a um computador notebook Toshiba, com processador PENTIUM 4 de 2.4 GHz e 512 MB de memória RAM, determinou-se a correlação do torque aplicado com a

força registrada, especificando um fator de conversão, expresso em metro, denominado braço do padrão. Em cada faixa nominal, o comprimento do mecanismo de calibração foi corrigido devido ao ângulo formado pelas barras e a horizontal, e esta correção foi efetuada medindo-se as alturas, em relação ao solo, tanto do centro do quadrado de encaixe quanto do eixo de aplicação da força, antes e depois da aplicação da carga total. Esta operação foi realizada para cada uma das três faixas nominais, definindo-se seu respectivo fator de conversão. Na Figura 34 é ilustrada a calibração do sistema.



Figura 34: Calibração do padrão de torque.

O procedimento da calibração consistiu na aplicação de pesos padrão em um suporte apropriado para este fim até que a força registrada na célula de carga correspondesse aos valores previamente estabelecidos de 20 kgf, 50 kgf, 100 kgf e 150 kgf (196,1 N, 490,3 N, 980,7 N e 1471,0 N). Estes valores foram escolhidos por englobarem quase que a totalidade da faixa nominal da célula de carga, tomando-se o cuidado de realizar leituras acima de 10% da faixa nominal, conforme recomendado pela norma NBR 8197:2002 - Materiais metálicos - Calibração de instrumentos de medição de força de uso geral. A calibração foi limitada a 150 kgf uma vez que o calibrador apresentou uma tendência de tombamento devido ao momento gerado pela aplicação de elevadas cargas sobre o suporte. Na calibração de torquímetro este problema não ocorrerá, uma vez que, apesar de o cabo do torquímetro ser posicionado na mesma direção, ficará em sentido oposto ao do mecanismo de calibração. Foram feitas ainda verificações pontuais de indicações no fundo de escala da célula, como os resultados não apresentaram

discrepâncias com os demais, o método de calibração foi considerado satisfatório. Os pesos padrão utilizados foram discos de massa conhecida que, associados ao valor da aceleração da gravidade local⁴, geravam a força atuante sobre o sistema.

Todas as operações realizadas com o software catmanEasy seguiram o Procedimento para calibração de células de carga utilizando o sistema de aquisição de dados Spider8 e software catmanEasy (ver apêndice C), com uma taxa de aquisição de dados de 50 Hz. Inicialmente realizou-se a calibração da célula de carga, que foi colocada em série com uma célula de carga padrão com certificado de calibração rastreado à RBC – Rede Brasileira de Calibração. Nesta operação, foram aplicadas duas forças conhecidas e a indicação destes valores, bem como os sinais elétricos correspondentes, foram registrados no catmanEasy. Após isso, foram feitas diversas aplicações de forças conhecidas e, como os resultados obtidos pelo software apresentaram uma variação desprezível em relação a estes valores, a calibração foi considerada concluída.

A calibração do sistema foi realizada por meio da aquisição pontual de dados, descrita no procedimento apresentado no Apêndice C. Foram feitos dois registros da força aplicada em cada ponto predefinido, para, posteriormente, extrair-se a média destes valores. Antes da aplicação das cargas, a indicação de força pela célula de carga era zerada e, para eliminar os possíveis efeitos de oscilação do sistema, foram feitos dois registros da força indicada pela célula, definindo o zero do sistema que posteriormente será subtraído dos valores adquiridos. Em seguida, utilizando-se pesos padrão, foram aplicadas as cargas predeterminadas e armazenados os respectivos valores indicados na célula, procurando assegurar-se a maior estabilidade possível do suporte que recebia os discos de massa.

4.1.1 Problemas observados na calibração do sistema

Os resultados iniciais dos ensaios para a calibração do sistema não foram considerados satisfatórios. Os valores referentes ao braço do padrão apresentavam grandes variações de um ponto para outro, evidenciando uma não reprodutibilidade dos resultados. Também foi observada uma tendência à redução do valor de força registrado pela célula de carga, na medida em que os ensaios eram executados. Outro efeito observado foi a não constância da força indicada, uma vez

⁴ Aceleração da gravidade local determinada pelo Observatório Nacional, de acordo com relatório ON/DGE 005/97.

que, após a aplicação da carga e estabilização do sistema, era percebido um acréscimo gradual do valor de força indicado na medida em que o tempo de medição era estendido.

Foram feitas modificações tais como, remontagens do sistema e limpeza dos rolamentos, que melhoraram o desempenho do padrão de torque, mas não foram suficientes para eliminar os efeitos indesejados. Outras medidas como substituição da célula de carga e do sistema de aquisição de dados, retirada da mola e utilização de uma única barra no dispositivo de calibração foram adotadas sem apresentar alterações significativas nos resultados obtidos.

Finalmente, foi percebido um pequeno espaçamento entre o parafuso que fornece a superfície de contato com a célula e o braço de alavanca sobre o qual está localizado. Na Figura 35 é mostrada a localização do parafuso e a pequena fresta observada, a qual não fornecia ao elemento rigidez adequada, permitindo sua deformação e, como consequência, a alteração dos resultados.

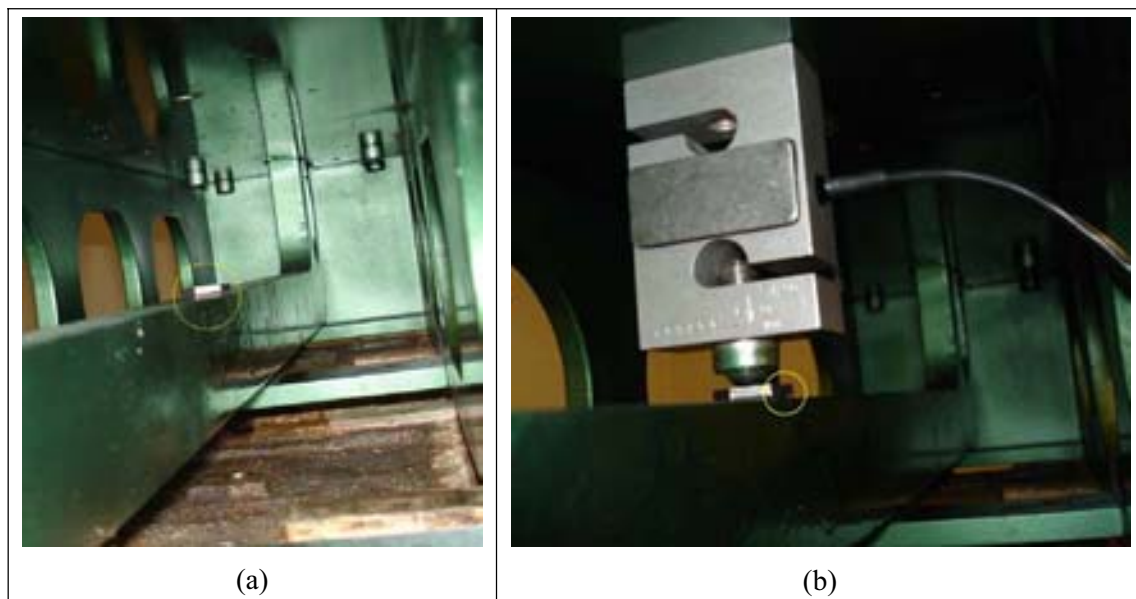


Figura 35: Pequena lacuna entre o parafuso de contato e o braço de alavanca.

Identificada essa possível fonte de erro, foi sugerida uma nova posição para a montagem da célula de carga no sistema. Como visto na Figura 35 (b), a célula era inicialmente fixada na chapa superior do calibrador, fazendo uso de um parafuso com uma esfera fixa, localizado em sua extremidade inferior, para realizar o contato com o braço de alavanca. Dessa forma, o contato era realizado através da superfície do parafuso fixado no braço de alavanca.

Na nova configuração de montagem, mostrada na Figura 36, a célula é fixada no braço de alavanca e em sua extremidade superior é inserida uma esfera e um suporte para fazer o contato com a superfície superior interna. Este suporte é composto por superfícies planas e paralelas, sendo que em sua extremidade inferior existe um furo cego côncavo para garantir o melhor assentamento da esfera.

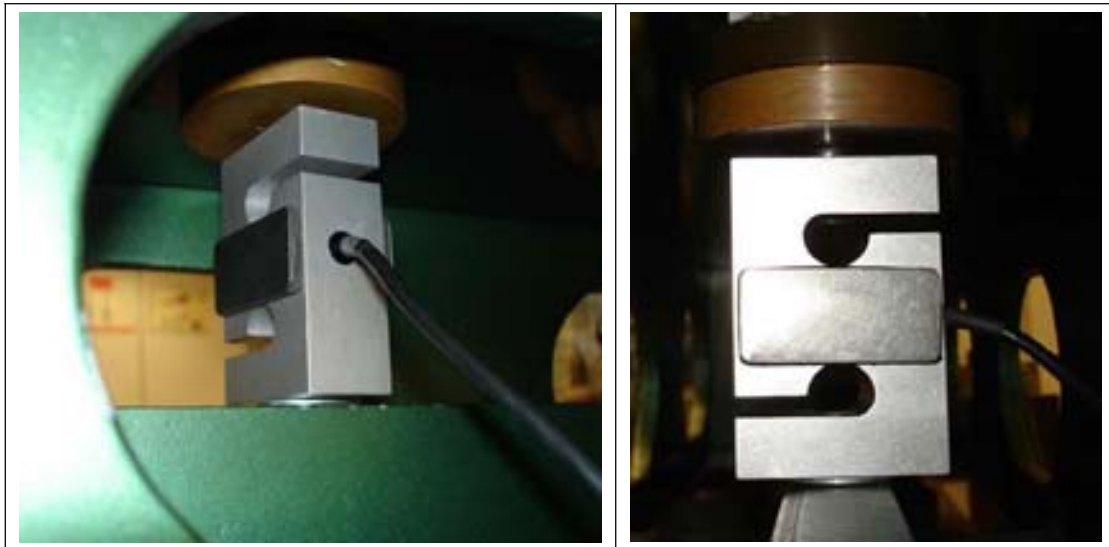


Figura 36: Nova configuração de fixação da célula de carga.

Esta formatação não permitiu a fixação da célula para realizar calibrações na primeira faixa nominal, entretanto, apresentou os melhores resultados de todos os ensaios realizados, reduzindo significativamente os efeitos indesejados que, até então, desaprovavam o padrão. Para a avaliação deste método de calibração, em cada faixa nominal executável foram realizados três conjuntos de ensaios, cada um com três séries de repetições e com cada série contemplando os quatro pontos predefinidos, 20 kgf, 50 kgf, 100 kgf e 150 kgf, além do zero.

O objetivo da calibração do sistema era gerar uma constante de comprimento, o braço do padrão, para a segunda e terceira faixas de medição propostas. Entretanto, ao contrário do esperado, o braço do padrão calculado apresentou variações de um ponto para outro, dentro da mesma faixa nominal. Com os dados preliminares de torque aplicado e a correspondente força registrada pela célula de carga, obtidos durante os ensaios realizados, utilizou-se de uma curva de erros para corrigir o torque calculado a partir da média dos braços do padrão. Logo, o valor final de torque calculado pelo braço médio deverá ser corrigido através desta curva de erros.

4.2 Calibração de torquímetros

Para avaliar o padrão de torque desenvolvido, foi realizada uma série de calibrações de instrumentos medidores de torque nas duas faixas nominais consideradas. Para tanto, foram utilizados torquímetros de indicação tipo relógio e torquímetros de estalo. Em cada torquímetro considerado, foi realizada uma comparação entre os valores de torque obtidos na calibração pelo sistema direto (aplicação de forças no cabo do equipamento) e os calculados pela aplicação das equações de conversão, utilizando as forças registradas pela célula de carga. Para cada método de calibração foi executada uma seqüência de três séries de medições e em cada série foi executado um carregamento crescente até se atingir os valores nominais de torque indicados no torquímetro. As características dos torquímetros utilizados nos ensaios de calibração são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Características dos torquímetros utilizados nas calibrações realizadas com o padrão de torque desenvolvido.

Identificação do torquímetro	Tipo	Faixa Nominal	Valor de uma divisão	Fabricante	Modelo
Torquímetro A	Estalo	520 a 1000 N.m	10 N.m	GEDORE	DX
Torquímetro B	Estalo	140 a 760 N.m	10 N.m	GEDORE	DR
Torquímetro C	Estalo	80 a 360 N.m	10 N.m	GEDORE	CD
Torquímetro D	Relógio	0 a 80 kgf.m (0 a 784,5 N.m)	2 kgf.m (19,6 N.m)	GEDORE	RL 600

O procedimento para calibração de torquímetros de indicação de relógio é análogo ao utilizado na calibração do sistema, ou seja, foi feita a aquisição pontual dos valores de forças referentes ao torque indicado. Em cada ponto, eram registrados dois valores de força para, posteriormente, obter-se a média aritmética destes valores que, por sua vez, era subtraída da média dos dois valores registrados antes da aplicação de carga ao sistema, de modo a excluir as interferências de oscilações do sinal elétrico da célula de carga. Os dados obtidos nos ensaios foram agrupados em uma planilha do software Microsoft Office Excel, onde foram feitos os cálculos necessários para a determinação dos valores finais de torque. Para torquímetros de estalo, o procedimento adotado foi a aquisição contínua dos valores de força indicados pela célula de carga. Neste caso, uma vez atingido o torque programado no torquímetro, cessava-se a captura de dados e exportavam-se os dados obtidos para o Excel, onde o valor máximo observado durante o ensaio era obtido e convertido em torque. Todos os ensaios foram realizados

com a aquisição de dados a uma taxa de 50 Hz e configurada para modo “nibble mode”, conforme Apêndice C.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Resultados obtidos na calibração do sistema

Os resultados obtidos na calibração do sistema nas duas faixas nominais permitidas pela configuração de montagem são apresentados a seguir. Para a obtenção dos dados, para cada faixa nominal foi realizada uma seqüência de dez ensaios. O procedimento de cada ensaio consistiu na aplicação de torques e medições das respectivas forças indicadas na célula de carga nos pontos predefinidos. Na Tabela 7 estão registrados os dados referentes à segunda faixa nominal.

Tabela 7: Dados referentes à calibração da segunda faixa nominal do calibrador.

Pontos	Torque aplicado (kgf.m)	Força Média Registrada pela célula de carga (kgf)	Desvio padrão das forças registradas (kgf)	Braço do padrão (m)	Torque calculado – T_2 (kgf.m)
1	9,874 (96,83 N.m)	18,912 (185,5 N)	0,301 (2,95 N)	0,5221	9,931 (97,39 N.m)
2	24,831 (243,51 N.m)	47,927 (470,0 N)	0,577 (5,66 N)	0,5181	25,167 (246,81 N.m)
3	49,795 (488,32 N.m)	94,796 (929,6 N)	0,389 (3,91 N)	0,5253	49,780 (488,17 N.m)
4	74,752 (733,01 N.m)	139,715 (1370,1 N)	0,340 (3,33 N)	0,5350	73,368 (719,49 N.m)
Média	-	-	-	0,5251	-

A coluna “Torque calculado – T_2 ” exibe os valores de torque obtidos pela multiplicação entre a os valores de força registrados pela célula de carga e a média dos braços do padrão. Para corrigir estes valores, foi criada uma curva de erros, mostrada na Figura 37, onde, considerando erros de $\pm 0,2\%$ em relação ao torque calculado. Os dados foram plotados na forma de um gráfico, através do qual foi possível criar uma linha de tendência e gerar uma equação de correção do torque calculado para a segunda faixa nominal do calibrador de torquímetros.

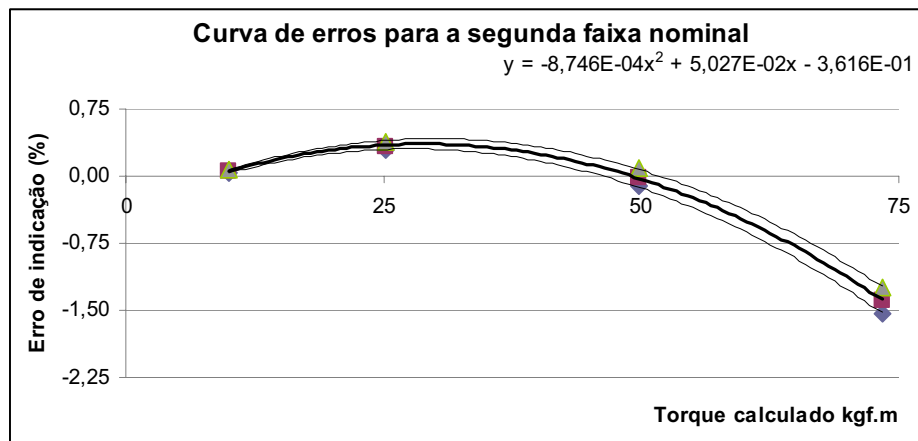


Figura 37: Curva de erros para a segunda faixa nominal.

Portanto, para a segunda faixa nominal do padrão de torque desenvolvido, o valor final do torque (T_{2F}) será obtido pela seguinte equação:

$$T_{2F} = T_2 - (-8,746 \times 10^{-4} * T_2^2 + 5,027 \times 10^{-2} * T_2 - 3,616 \times 10^{-1}) \quad (5.1.1)$$

Onde, T_2 é o resultado da multiplicação entre a média dos braços do padrão calculados e o valor de força indicado pela célula de carga (F_{ind}):

$$T_2 = 0,5251 * F_{ind} \quad (5.1.2)$$

A equação (5.1.1) é expressa em unidade de torque, no caso quilograma-força metro (kgf.m), uma vez que a célula de carga foi calibrada em quilograma-força (kgf) e os resultados de suas indicações de força são expressas nesta unidade.

Para garantir a confiabilidade dos resultados, a incerteza referente ao torque calculado para a segunda faixa nominal foi estimada. Na Tabela 8 é apresentada a planilha utilizada para o cálculo da incerteza do torque aplicado ao sistema. Constatou-se que, para a segunda faixa nominal, a equação de conversão fornece uma incerteza de $\pm 0,2\%$ em relação ao limite superior da faixa.

Tabela 8: Planilha de incerteza do torque aplicado na segunda faixa nominal.

Grandeza	Incerteza Padrão (unidade)	Distribuição de probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza padrão combinada (kgf.m)	Graus de Liberdade
Padrão - P	$u_P/\text{raiz}(3)$ (kgf)	R	MBP	0,0424	Infinito
Mensurando - M	σ/\sqrt{n} (kgf)	N	MBP	0,0957	n-1
Resolução - P	$r_P/2/\sqrt{3}$ (kgf)	R	MBP	0,0076	Infinito
Comprimento da barra	$U_L/2$ (m)	N	T_{\max}/MBP	0,0028	Infinito
Massas utilizadas	$u_M/2/\sqrt{3}$ (kg)	R	$g_l * \text{MBP}/g_n$	0,0008	Infinito
Aceleração da gravidade	$u_g/\sqrt{3}$ (m/s ²)	R	T_{\max}/g_l	0,00004	Infinito
			$k = 2,2$	$u_c = 0,105$	$v_{\text{eff}} = 13$
				U = ±0,23 (± 2,22 N.m)	

Onde, u_P : Incerteza do Padrão, no caso a célula de carga = $\pm 0,1\%$; a força máxima registrada foi de 139,72 kgf, logo $u_P = 0,001 * 139,72 = 0,140$ kgf;

MBP: Média do braço do padrão = 0,5251 m;

σ : Máximo desvio padrão das forças registradas = 0,577 kgf;

n: Número de medições efetuadas = 10;

r_P : Resolução do padrão = 0,05 kgf;

U_L : Incerteza devido ao comprimento das barras do dispositivo de calibração = $\pm 0,04$ mm = 0,00004 m;

T_{\max} : Torque máximo aplicado = 74,8 kgf.m;

u_M : Incerteza devido às massa aplicadas = $\pm 0,005$ kg;

g_l : Aceleração da gravidade local = 9,78109 m/s²;

g_n : Aceleração da gravidade normal = 9,80665 m/s²;

u_g : Incerteza devido à aceleração da gravidade = $\pm 0,00001$ m/s².

Para a terceira faixa nominal do calibrador, a mesma seqüência foi realizada para determinar sua curva de erros e respectiva equação de correção e a incerteza dos valores de torque

calculados. Na Tabela 9 são apresentados os dados referentes à obtenção do braço do padrão, na Figura 38 é mostrada a curva de erros, admitindo-se um erro de $\pm 0,2\%$ em relação ao torque calculado, e na Tabela 10 é apresentada a planilha utilizada para o cálculo da incerteza do torque aplicado ao sistema. Constatou-se que, para a terceira faixa nominal, a equação de conversão fornece uma incerteza de $\pm 0,2\%$ em relação ao limite superior da faixa.

Tabela 9: Dados referentes à calibração da terceira faixa nominal do calibrador.

Pontos	Torque aplicado (kgf.m)	Força Média Registrada pela célula de carga (kgf)	Desvio padrão das forças registradas (kgf)	Braço do padrão (m)	Torque calculado – T_3 (kgf.m)
1	19,935 (195,50 N.m)	19,863 (194,8 N)	0,093 (0,91 N)	1,0036	20,273 (198,81 N.m)
2	49,878 (489,13 N.m)	49,208 (482,6 N)	0,208 (2,04 N)	1,0136	50,225 (492,54 N.m)
3	99,493 (975,69 N.m)	96,936 (950,6 N)	0,287 (2,81 N)	1,0264	98,939 (970,26 N.m)
4	149,417 (1465,28 N.m)	143,806 (1410,3 N)	0,480 (4,71 N)	1,0390	146,777 (1439,39 N.m)
Média	-	-	-	1,0207	-

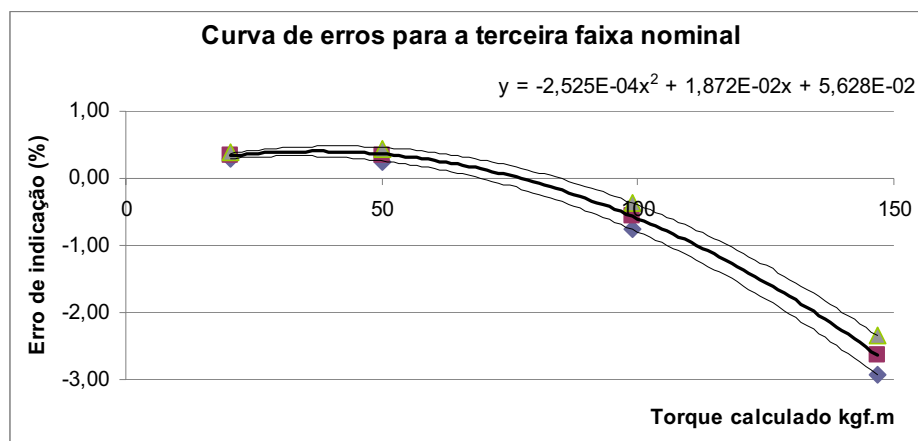


Figura 38: Curva de erros para a terceira faixa nominal.

Para calibrações na terceira faixa nominal do padrão de torque, o valor final do torque (T_{3F}) será obtido pela seguinte equação:

$$T_{3F} = T_3 - (-2,525 \times 10^{-4} * T_3^2 + 1,872 \times 10^{-2} * T_3 + 5,628 \times 10^{-2}) \quad (5.1.3)$$

Onde, T_3 é o resultado da multiplicação entre a média dos braços do padrão calculados e o valor de força indicado pela célula de carga (F_{ind}):

$$T_3 = 1,0207 * F_{ind} \quad (5.1.4)$$

Tabela 10: Planilha de incerteza do torque aplicado na terceira faixa nominal.

Grandeza	Incerteza Padrão (unidade)	Distribuição de probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza padrão combinada (kgf.m)	Graus de Liberdade
Padrão - P	$u_P/\text{raiz}(3)$ (kgf)	R	MBP	0,0847	Infinito
Mensurando - M	σ/\sqrt{n} (kgf.m)	N	1	0,1549	n-1
Resolução - P	$r_P/2/\sqrt{3}$ (kgf)	R	MBP	0,0147	Infinito
Comprimento da barra	$U_L/2$ (m)	N	T_{\max}/MBP	0,0029	Infinito
Massas utilizadas	$u_M/2/\sqrt{3}$ (kg)	R	$g_l * \text{MBP}/g_n$	0,0015	Infinito
Aceleração da gravidade	$u_g/\sqrt{3}$ (m/s ²)	R	T_{\max}/g_l	0,0001	Infinito
			$k = 2,1$	$u_c = 0,177$	$v_{\text{eff}} = 15$
				$U = \pm 0,38$ ($\pm 3,70 \text{ N.m}$)	

Onde, u_P : Incerteza do Padrão, no caso a célula de carga = $\pm 0,1\%$; a força máxima registrada foi de 143,81 kgf, logo, $u_P = 0,001 * 143,81 = 0,144$ kgf;

MBP: Média do braço do padrão = 1,0207 m;

σ : Máximo desvio padrão das forças registradas = 0,480 kgf;

n: Número de medições efetuadas = 10;

r_P : Resolução do padrão = 0,05 kgf;

U_L : Incerteza devido ao comprimento das barras do dispositivo de calibração = $\pm 0,04$ mm = 0,00004 m;

T_{\max} : Torque máximo aplicado = 149,4 kgf.m;

u_M : Incerteza devido às massa aplicadas = $\pm 0,005$ kg;

g_l : Aceleração da gravidade local = 9,78109 m/s²;

g_n : Aceleração da gravidade normal = 9,80665 m/s²;

u_g : Incerteza devido à aceleração da gravidade = $\pm 0,00001$ m/s².

5.2 Resultados obtidos na calibração de torquímetros

Os resultados das calibrações de torquímetros realizadas no padrão de torque estão agrupados por faixa nominal e são apresentados a seguir.

5.2.1 Resultados obtidos na calibração de torquímetros utilizando a segunda faixa nominal do padrão de torque

Os resultados da comparação entre os dois métodos de calibração de torquímetros são apresentados a seguir. Nas Tabelas 11, 12, 13 e 14 são agrupados os dados referentes aos torquímetros A, B, C e D, respectivamente. A coluna ΔT_{SD} representa a variação entre os valores nominais de torque e os encontrados pelo sistema direto, a coluna ΔT_{PD} estabelece a variação entre os valores nominais e os obtidos pelo padrão desenvolvido, já a coluna “Variação entre os métodos” compara os valores obtidos nos dois processos de calibração e, em termos percentuais, apresenta a diferença auferida.

Tabela 11: Comparação entre métodos de calibração do Torquímetro A na segunda faixa.

Torque Nominal (N.m)	Torque – sistema direto (N.m)	ΔT_{SD} (%)	Torque – Padrão desenvolvido (N.m)	ΔT_{PD} (%)	Variação entre os métodos (%)
600	577,5	-3,7	564,2	-6,0	-2,3
700	679,5	-2,9	670,6	-4,2	-1,3
800	775,7	-3,0	763,7	-4,5	-1,6
900	878,4	-2,4	863,6	-4,0	-1,7
1000	976,5	-2,4	981,3	-1,9	0,5

Tabela 12: Comparação entre métodos de calibração do Torquímetro B na segunda faixa.

Torque Nominal (N.m)	Torque – sistema direto (N.m)	ΔT_{SD} (%)	Torque – Padrão desenvolvido (N.m)	ΔT_{PD} (%)	Varição entre os métodos (%)
200	203,0	1,5	195,3	-2,4	-3,8
300	312,4	4,1	293,9	-2,0	-5,9
400	378,1	-5,5	403,9	1,0	6,8
500	479,0	-4,2	508,6	1,7	6,2
600	581,5	-3,1	621,7	3,6	6,9
700	714,9	2,1	728,2	4,0	1,9

Tabela 13: Comparação entre métodos de calibração do Torquímetro C na segunda faixa.

Torque Nominal (N.m)	Torque – sistema direto (N.m)	ΔT_{SD} (%)	Torque – Padrão desenvolvido (N.m)	ΔT_{PD} (%)	Varição entre os métodos (%)
150	113,9	-24,1	98,4	-34,4	-13,6
200	193,9	-3,1	175,4	-12,3	-9,5
250	272,6	9,0	250,8	0,3	-8,0
300	328,5	9,5	327,7	9,2	-0,2
350	420,8	20,2	406,1	16,0	-3,5

Tabela 14: Comparação entre métodos de calibração do Torquímetro D na segunda faixa.

Torque Nominal (kgf.m)	Torque – sistema direto (kgf.m)	ΔT_{SD} (%)	Torque – Padrão desenvolvido (kgf.m)	ΔT_{PD} (%)	Varição entre os métodos (%)
20 (196,1 N.m)	20,20 (198,1 N.m)	1,0	20,15 (197,6 N.m)	0,7	-0,3
30 (294,2 N.m)	27,24 (267,2 N.m)	-9,2	29,89 (293,1 N.m)	-0,4	9,7
40 (392,3 N.m)	37,17 (364,5)	-7,1	40,11 (393,4 N.m)	0,3	7,9
50 (490,3 N.m)	48,00 (470,7 N.m)	-4,0	50,64 (496,6 N.m)	1,3	5,5
60 (588,4 N.m)	58,72 (575,9 N.m)	-2,1	61,47 (602,8 N.m)	2,4	4,7
70 (686,5 N.m)	70,46 (690,9 N.m)	0,7	72,52 (711,2 N.m)	3,6	2,9
80 (784,5 N.m)	81,91 (803,2 N.m)	2,4	83,55 (819,4 N.m)	4,4	2,0

5.2.2 Resultados obtidos na calibração de torquímetros utilizando a terceira faixa nominal do padrão de torque

Os resultados da comparação entre os dois métodos de calibração de torquímetros são apresentados a seguir. Nas Tabelas 15, 16 e 17 são agrupados os dados referentes aos torquímetros A, B e D, respectivamente.

Tabela 15: Comparação entre métodos de calibração do Torquímetro A na terceira faixa.

Torque Nominal (N.m)	Torque – sistema direto (N.m)	ΔT_{SD} (%)	Torque – Padrão desenvolvido (N.m)	ΔT_{PD} (%)	Varição entre os métodos (%)
600	577,5	-3,7	574,6	-4,2	-0,5
700	679,5	-2,9	673,1	-3,8	-0,9
800	775,7	-3,0	773,7	-3,3	-0,3
900	878,4	-2,4	873,8	-2,9	-0,5
1000	976,5	-2,4	979,5	-2,0	0,3

Tabela 16: Comparação entre métodos de calibração do Torquímetro B na terceira faixa.

Torque Nominal (N.m)	Torque – sistema direto (N.m)	ΔT_{SD} (%)	Torque – Padrão desenvolvido (N.m)	ΔT_{PD} (%)	Varição entre os métodos (%)
200	203,0	1,5	187,2	-6,4	-7,8
300	312,4	4,1	291,5	-2,8	-6,7
400	378,1	-5,5	390,3	-2,4	3,2
500	479,0	-4,2	499,1	-0,2	4,2
600	581,5	-3,1	601,7	0,3	3,5
700	714,9	2,1	714,0	2,0	-0,1

Tabela 17: Comparação entre métodos de calibração do Torquímetro D na terceira faixa.

Torque Nominal (kgf.m)	Torque – sistema direto (kgf.m)	ΔT_{SD} (%)	Torque – Padrão desenvolvido (kgf.m)	ΔT_{PD} (%)	Varição entre os métodos (%)
20 (196,1 N.m)	20,20 (198,1 N.m)	1,0	19,94 (195,5 N.m)	-0,3	-1,3
30 (294,2 N.m)	27,24 (267,2 N.m)	-9,2	29,79 (292,2 N.m)	-0,7	9,3
40 (392,3 N.m)	37,17 (364,5)	-7,1	39,98 (392,0 N.m)	-0,1	7,5
50 (490,3 N.m)	48,00 (470,7 N.m)	-4,0	50,20 (492,3 N.m)	0,4	4,6
60 (588,4 N.m)	58,72 (575,9 N.m)	-2,1	60,98 (598,0 N.m)	1,6	3,8
70 (686,5 N.m)	70,46 (690,9 N.m)	0,7	71,90 (705,1 N.m)	2,7	2,1
80 (784,5 N.m)	81,91 (803,2 N.m)	2,4	82,96 (813,5 N.m)	3,7	1,3

Para a segunda faixa nominal do padrão de torque desenvolvido, os resultados do Torquímetro A foram os que apresentaram menor discrepância entre os valores de torque obtidos na calibração pelo sistema direto e os calculados pelo braço do padrão após sua devida correção. Com relação aos valores nominais de torque, as maiores convergências foram observadas nas calibrações efetuadas no Torquímetro D. A exceção do Torquímetro C, os valores de torque obtidos pelo padrão apresentaram relativa equivalência aos valores nominais. A elevada discordância dos valores de torque obtidos para o Torquímetro C foi detectada nos dois métodos de calibração avaliados, o que comprova tratar-se de um vício do instrumento, eliminando-se a hipótese de falhas da metodologia utilizada.

Para a terceira faixa nominal do padrão de torque, os ensaios com o Torquímetro A foram os que apresentaram os resultados mais congruentes entre os métodos de calibração. Nesta faixa também ficou constatado que, em relação aos valores nominais de torque, as menores variações foram observadas nas calibrações efetuadas no Torquímetro D. Novamente os valores de torque obtidos pelo padrão apresentaram relativa equivalência aos valores nominais. De maneira geral, a terceira faixa nominal do calibrador apresentou resultados significativamente melhores que a segunda.

Apesar de não haver uma perfeita correspondência com os valores nominais, na maioria dos casos, os valores de torque obtidos pelo padrão desenvolvido revelam maior compatibilidade que os valores encontrados nas calibrações realizadas pelo sistema direto.

Nas Tabelas 18, 19 e 20 são feitas comparações entre os valores de torque calculados na segunda e terceira faixas do padrão de torque para os torquímetros A, B e D, respectivamente.

Tabela 18: Comparação entre os resultados de calibração do torquímetro A na segunda e terceira faixas.

Torque Nominal (N.m)	T _{2F} : Torque – 2 ^a faixa do Padrão desenvolvido (N.m)	T _{3F} : Torque – 3 ^a faixa do Padrão desenvolvido (N.m)	ΔT (%)
600	564,2	574,6	1,8
700	670,6	673,1	0,4
800	763,7	773,7	1,3
900	863,6	873,8	1,2
1000	981,3	979,5	-0,2

Tabela 19: Comparação entre os resultados de calibração do torquímetro B na segunda e terceira faixas.

Torque Nominal (N.m)	T _{2F} : Torque – 2ª faixa do Padrão desenvolvido (N.m)	T _{3F} : Torque – 3ª faixa do Padrão desenvolvido (N.m)	ΔT (%)
200	195,3	187,2	-4,1
300	293,9	291,5	-0,8
400	403,9	390,3	-3,4
500	508,6	499,1	-1,9
600	621,7	601,7	-3,2
700	728,2	714,0	-2,0

Tabela 20: Comparação entre os resultados de calibração do torquímetro D na segunda e terceira faixas.

Torque Nominal (kgf.m)	T _{2F} : Torque – 2ª faixa do Padrão desenvolvido (N.m)	T _{3F} : Torque – 3ª faixa do Padrão desenvolvido (N.m)	ΔT (%)
20 (196,1 N.m)	20,20 (198,1 N.m)	19,94 (195,5 N.m)	-1,0
30 (294,2 N.m)	27,24 (267,2 N.m)	29,79 (292,2 N.m)	-0,3
40 (392,3 N.m)	37,17 (364,5)	39,98 (392,0 N.m)	-0,3
50 (490,3 N.m)	48,00 (470,7 N.m)	50,20 (492,3 N.m)	-0,9
60 (588,4 N.m)	58,72 (575,9 N.m)	60,98 (598,0 N.m)	-0,8
70 (686,5 N.m)	70,46 (690,9 N.m)	71,90 (705,1 N.m)	-0,9
80 (784,5 N.m)	81,91 (803,2 N.m)	82,96 (813,5 N.m)	-0,7

As comparações entre os valores de torque obtidos pelas duas faixas mostraram que, não existe uma dispersão significativa de valores quando o mesmo torquímetro é calibrado nas diferentes faixas do calibrador de torquímetros, evidenciando a reprodutibilidade do padrão.

6. CONCLUSÕES

Finalizadas todas as etapas de elaboração e aperfeiçoamento de projeto, construção, montagem e avaliação do equipamento, o desenvolvimento deste padrão de torque apresentou as vantagens previstas ao possibilitar calibrações de torquímetros nos sentidos horário e anti-horário, atendendo a faixas de torque distintas, com menor tempo de execução e sem a necessidade de grandes esforços do operador como na calibração pelo sistema direto, por exemplo. Apesar de alguns resultados não terem apresentado o grau de concordância esperado, está evidenciado que, com alguns ajustes, o equipamento é capaz de atingir o nível de exatidão proposto e realizar calibrações com os reduzidos valores de incertezas previstos originalmente.

Mesmo insuficientes para ofuscar as grandes vantagens técnicas impetradas neste projeto, o padrão de torque desenvolvido apresentou determinadas limitações e alguns resultados não compatíveis com os previstos originalmente nas etapas de concepção do equipamento. A principal restrição observada foi a impossibilidade de operar nas três faixas nominais previstas devido a alteração da configuração de montagem da célula de carga no sistema. A impossibilidade do posicionamento da célula para a utilização da primeira faixa nominal restringiu a calibração de torquímetros às faixas de 100 N.m a 1000 N.m e de 200 N.m a 2000 N.m, entretanto, as faixas nominais praticáveis possibilitam a calibração de uma vasta série de torquímetros, de variados tipos e faixas de indicação, que demandam por este tipo de serviço.

A discordância apresentada entre os valores de torque obtidos nas calibrações pelo sistema direto e pelo padrão de torque é resultado da influência de algumas fontes de erros existentes no equipamento. Prováveis desalinhamentos existentes na montagem do sistema estão entre as fontes de erros capazes de interferir nos resultados obtidos. Embora realizada com todo refinamento disponível, podem ter ocorrido erros de usinagem não compatíveis com a construção de um padrão metrológico. Estes erros podem gerar um comportamento inadequado do sistema, sobretudo com relação ao posicionamento dos mancais de rolamento, o assentamento dos rolamentos de rolos de agulha sobre os mancais e sobre os eixos (luvas estriadas) e a conexão destas luvas com o braço de alavanca.

Outro fator que contribui para justificar os resultados inconsistentes é o fato de a força exercida na célula de carga ser resultado de um movimento de rotação do braço de alavanca. Devido a este movimento rotacional, a força exercida pelo braço de alavanca ao comprimir a célula não é totalmente perpendicular a esta, e sim tangente ao arco que descreve a trajetória do

braço, o que pode originar uma interferência nos sinais captados pelos extensômetros da célula ao medir sua deformação, este efeito, conhecido como crosstalk, pode acarretar erros de indicação na célula de carga. Devido a sua distância do eixo de giro do braço de alavanca, a terceira faixa nominal receberá menos influência de crosstalk que a segunda, o que explica a maior conformidade de seus resultados.

A utilização de outras alternativas de tecnologia de rolamentos e de mancais e a obtenção de melhor qualidade de usinagem representam iniciativas capazes de melhorar o desempenho do sistema como um todo e proporcionar importantes acréscimos na eficácia do calibrador de torquímetros. O redimensionamento de componentes é suficiente para permitir o posicionamento da célula de carga de modo a tornar possível a utilização da primeira faixa nominal do equipamento e atender integralmente as faixas de torquímetros pretendidas.

Para construir integralmente um padrão de torque como o apresentado neste trabalho, incluindo os dispositivos para calibração do sistema, são necessários recursos próximos a US\$ 14.000 enquanto que um sistema equivalente que se utiliza de transdutores de torque não é encontrado comercialmente em cotações inferiores a US\$ 30.000.

Comprovou-se, portanto, que o aperfeiçoamento deste projeto é perfeitamente viável e recomendável, uma vez que o padrão de torque desenvolvido apresenta grandes vantagens técnicas e comerciais, facilidade de operação, versatilidade, eficiência e, mesmo carente de adequações, já demonstrou resultados promissores no tocante à calibração de torquímetros e potencial para satisfazer, de modo pleno, os demais atributos requeridos.

As sugestões para trabalhos futuros resultam da correção dos fatores negativos observados e anulação das fontes de erros identificadas. Entre as alternativas a serem examinadas, constam a avaliação do desempenho do sistema com a utilização de outras opções de células de carga, tecnologias de rolamentos e de mancais, o redimensionamento de componentes de modo a permitir a fixação da célula de carga em posição que torne possível a utilização da primeira faixa nominal do equipamento e a utilização de melhor qualidade de usinagem, obtendo componentes com maior refinamento e controle geométrico e dimensional mais rigoroso.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, J. C.; SANTANA, M. A.; DINIZ, A. C. G. C. Comparação entre métodos de calibração de torquímetros baseado nas incertezas de medição. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METROLOGIA, 3., 2003, Recife. **Anais**. Recife: Sociedade Brasileira de Metrologia – SBM, 2003. p. 1-2.

AKOTORQUE. TSD 1025 Motorized Rotary Actuator. Disponível em <<http://www.akotorque.com/html/hc2.html>>. Acesso em: 20 junho 2006.

ARAÚJO, L. P. Construção de Máquinas, 2004, Natal, **Notas de Aula**, Natal, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2004.

BOCHESE, L. G.; BOCHESE, A. **Measurement uncertainty in torque calibration**. [S.l.: s.n.]. [2001?].

CAMARGO, C. Expressão do resultado de medição. **Revista SINERGIA**, São Paulo, v. 5, n. 2, 2004.

CARLSONS. Torquímetros. Disponível em <http://www.carlsons.com.br/m_novidades_torque.htm>. Acesso em: 28 setembro 2006.

COUTO, P. R. G.; OLIVEIRA, J. S.; CINELLI, L. R. Algumas considerações sobre as metodologias de cálculo da estimativa da incerteza de medição no ISO GUM 95. In: METROSUL, 3., 2002, Curitiba. **Anais**. Curitiba: Rede Paranaense de Metrologia e Ensaio, 2002. p. 1-2.

CRANE. Digital Torque Wrench - DTW. Disponível em <<http://www.crane-electronics.com/index.php?option=content&task=view&id=66&Itemid=89>>. Acesso em: 11 maio 2006.

DIAS, J. L. M. **Medida, normalização e qualidade**: Aspectos da história da metrologia no Brasil. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1998. 292 p.

EURACHEM/CITAC. **Quantifying uncertainty in analytical measurement**. 2 ed. [S.l.], 2000.

EA - EUROPEAN CO-OPERATION FOR ACCREDITACION. **EA-4/02: Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration**. [S.l.], 1999.

GEDORE. **Catálogo: Torquímetros: uma especialidade Gedore**, São Paulo, 2005.

GEDORE. Torquímetros: DREMOMETER-B. Disponível em <http://www.gedore.com.br/exibe_produtos_sql.asp?item=650>. Acesso em: 15 março 2006.

GEDORE. Torquímetros: Torquímetro Tipo T. Disponível em <http://www.gedore.com.br/exibe_produtos_sql.asp?item=625>. Acesso em: 15 março 2006.

GEDORE. Uso correto: Cuidados com os Torquímetros. Disponível em <<http://www.gedore.com.br/usocorreto.asp#>>. Acesso em: 15 março 2006.

GEDORE.DE. Products: Dremotest. Disponível em <http://www.gedore.de/en/produkte/ausgabe.html?pm_id=56815&pcon_list=56833,56692,56696,56815>. Acesso em: 20 setembro 2005.

GONÇALVES JÚNIOR, A. A. **Metrologia: Parte 1**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002. 132 p.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Curso de metrologia de torque: Calibração e Normas Técnicas**. Duque de Caxias: INMETRO/Dimci/Dimel, 2005. 42 p.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Sistema internacional de unidades**. 8 ed. Rio de Janeiro, 2003. 116 p.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia**. 4 ed. Rio de Janeiro, 2005. 75 p.

INSTEMAQ. Produtos: TBN - PR Torquímetro de "quebra" sem escala. Disponível em <http://www.instemaq.com.br/pag_detalhe.asp?codp=822>. Acesso em: 17 março 2006.

INTERTURBINE. Inspection and Calibration Service. Disponível em <<http://www.itlogistics.de/wDeutsch/services/inspection-and-calibration-service.php?navid=30&PHPSESSID=7ac1b1977802ea8f53474deb5659d535>>. Acesso em: 07 novembro 2005.

IPEM-SP. Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo. Conceitos básicos sobre medição. Disponível em <<http://www.ipem.sp.gov.br/5mt/medir.asp?vpro=abe>>. Acesso em: 12 julho 2006.

ISO-GUM. **Guia para a expressão da incerteza de medição**. Rio de Janeiro: ABNT; Brasília: INMETRO, 2003. 120p.

LINK, W. **Metrologia mecânica**: Expressão da Incerteza de Medição. 2. ed. São Paulo: INMETRO – IPT – Mitutoyo, 1999. 174 p.

LINK, W. **Tópicos avançados da metrologia mecânica**: Confiabilidade metrológica e suas aplicações. 1. ed. São Paulo: INMETRO – IPT – Mitutoyo – SBM – EMIC, 2000. 263 p.

LONGO, W. P. Programa Mobilizador em Metrologia. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO 3ª CNCTI, 3. 2005, Brasília, **Seminário preparatório**, Brasília, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2005. p. 119.

MACHADO, S. C. et al. Estimativa de cálculo de incerteza de edição para o ensaio de destilação de óleo diesel automotivo pelo método ASTM D 86 - 02 com destilador manual. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METROLOGIA, 3., 2003, Recife. **Anais**. Recife: Sociedade Brasileira de Metrologia – SBM, 2003. p. 1-2.

- MCT. Ministério da Ciência e Tecnologia. Metrologia. Disponível em <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/7866.html>>. Acesso em: 15 julho 2006.
- MOSCATI, G. As bases científicas da metrologia e vice-versa. In: Encontro para a Qualidade de Laboratórios – ENQUALAB, 5., 2005, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Rede Metrológica do Estado de São Paulo, 2005. p. 1-4.
- MOUNTZ. ETP Torque tester. Disponível em <http://www.eturque.com/html/etp_torque_tester.htm>. Acesso em: 11 outubro 2005.
- NORBAR. Products: Torque Wrench Loader - TWL1500. Disponível em <http://www.norbar.com/products_description.php&category_multid=3&range_multid=95&id=10965>. Acesso em: 10 outubro 2005.
- OLIVEIRA, P. R. C. Metrologia. Disponível em <<http://br.geocities.com/prcoliveira2000/metrologia.html>>. Acesso em: 21 setembro 2006.
- OLIVEIRA, R. S.; FREITAS, L. C. C; CRUZ, J. A. P. Interpretação e aplicação das normas NBR 12240 e ISO 6789 na calibração de instrumentos de medição de torque. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METROLOGIA, 3., 2003, Recife. **Anais**. Recife: Sociedade Brasileira de Metrologia – SBM, 2003. p. 1-2.
- PRORE. Settaggio di chiavi dinamometriche. Disponível em <<http://prore.dyndns.biz/pag/Content.aspx?ViewLink=12>>. Acesso em: 10 outubro 2005.
- PUC-RIO. Mestrado em metrologia. Disponível em <<http://www.metrologia.etc.puc-rio.br/metrologia.html>>. Acesso em: 12 julho 2006.
- PUSA, A.; SACHS, M. Torque calibration devices from 0,1 N·m up to 20 kN·m. In: IMEKO WORLD CONGRESS, 18., 2006, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: International Measurement Confederation, 2006. p. 3.
- QUEIROZ, M. A. Metrologia: um retorno muito além do financeiro. **Metrologia & Instrumentação**, São Paulo, ano 4, n. 36, junho/julho 2005.

REGAZZI, R. D. Capacitação Produtiva E Tecnológica. **Isegnet**. Disponível em <<http://www.isegnet.com.br/3artigo.asp?id=21>>. Acesso em: 15 julho 2006.

REGAZZI, R. D. Periodicidade de calibração e custos envolvidos. **Isegnet**. Disponível em <<http://www.isegnet.com.br/3artigo.asp?id=25>>. Acesso em: 11 julho 2005.

SABÓ. **Caderninho SABÓ: As 220 melhores Dicas Certas**, São Paulo, 2002.

SANTANA, M. A. **Projeto de um Calibrador de Torquímetros para o Laboratório de Metrologia Dinâmica do ENM**. Relatório de Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

SARAIVA, C. P.; COUTINHO, M. A. O. O que, quando, como e onde calibrar equipamentos. **Metrologia & Instrumentação**, São Paulo, ano 5, n. 42, junho/julho 2006.

SCHMID, W. A.; MARTÍNEZ, R. J. L. **Guía para estimar la incertidumbre de la medición**. 1 ed. Rev. El Marqués: CENAM, 2004.

SKF. Produtos: Rolamentos de rolos de agulhas. Disponível em <http://www.skf.com/portal/skf/home/products?paf_dm=shared&maincatalogue=1&lang=pt&newlink=1_5_21>. Acesso em: 19 fevereiro 2007.

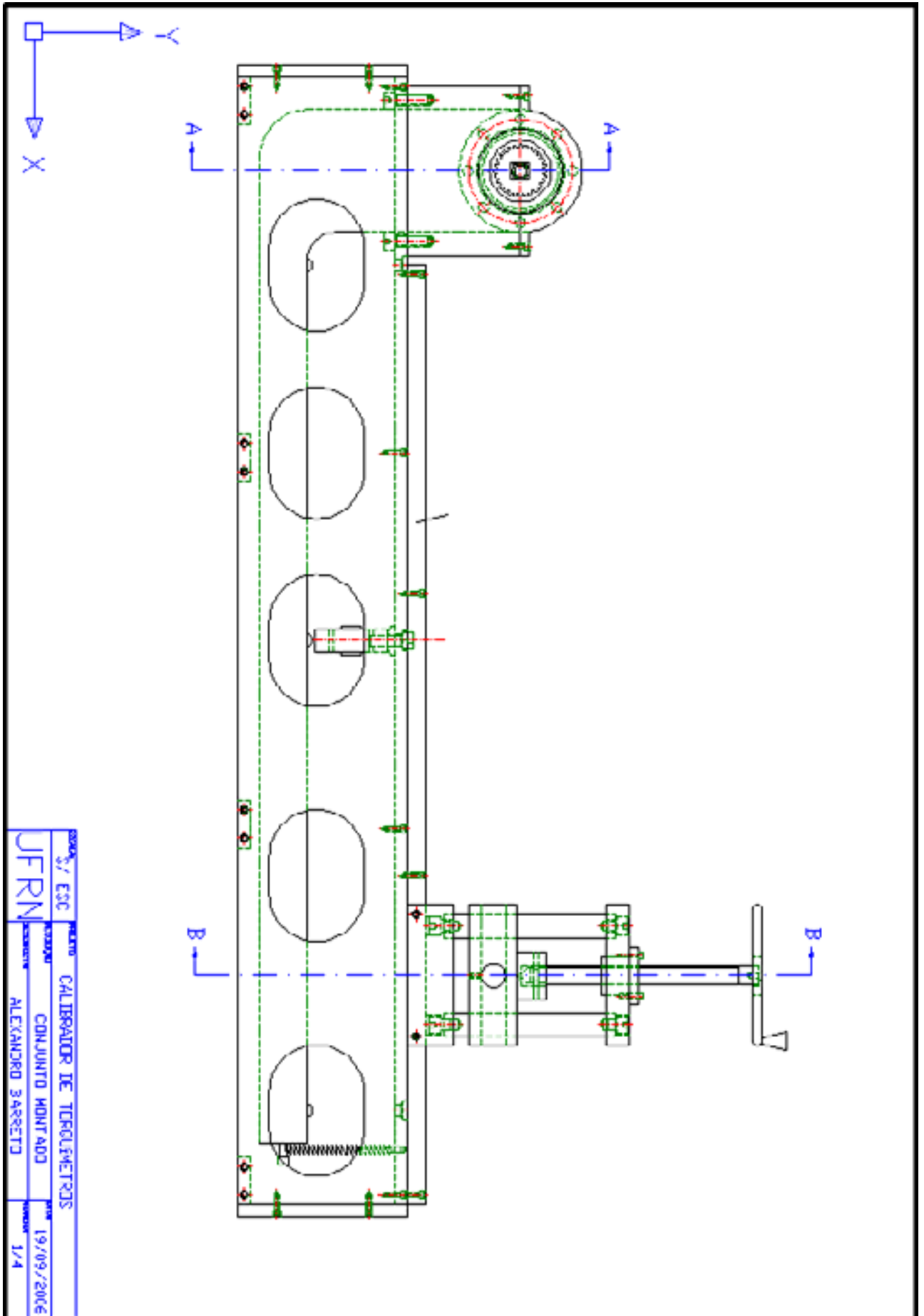
STURTEVANT. Mechanical Loaders. Disponível em <<http://www.srtorque.com/tmmechload.html>>. Acesso em: 10 outubro 2005.

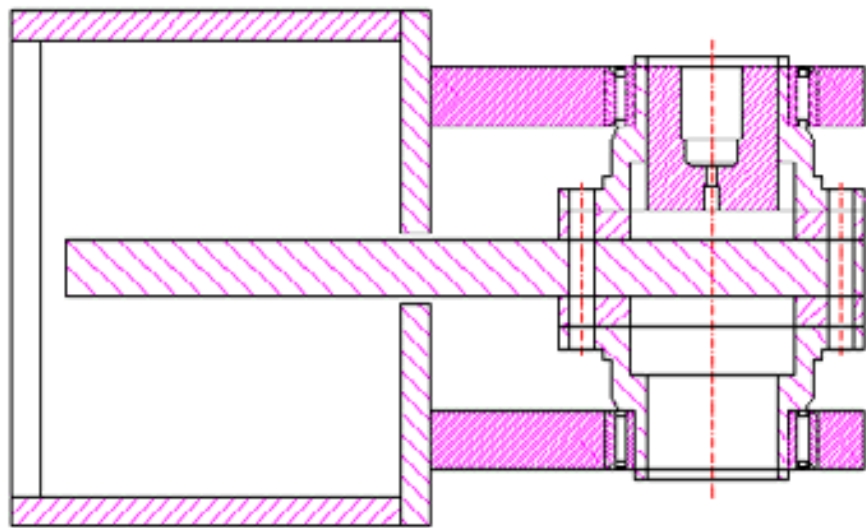
TOHNICHI. Torque Measuring Instruments. Disponível em <<http://www.tohnichi.com/products3.asp>>. Acesso em: 11 outubro 2005.

TORKFORT. Informe Técnico: O que é torque? Disponível em <http://www.torkfort.com.br/informe_03.htm>. Acesso em: 20 junho 2005.

TORKFORT. Torquímetro tipo relógio. Disponível em <http://www.torkfort.com.br/produto_TRC35.htm>. Acesso em: 16 março 2006.

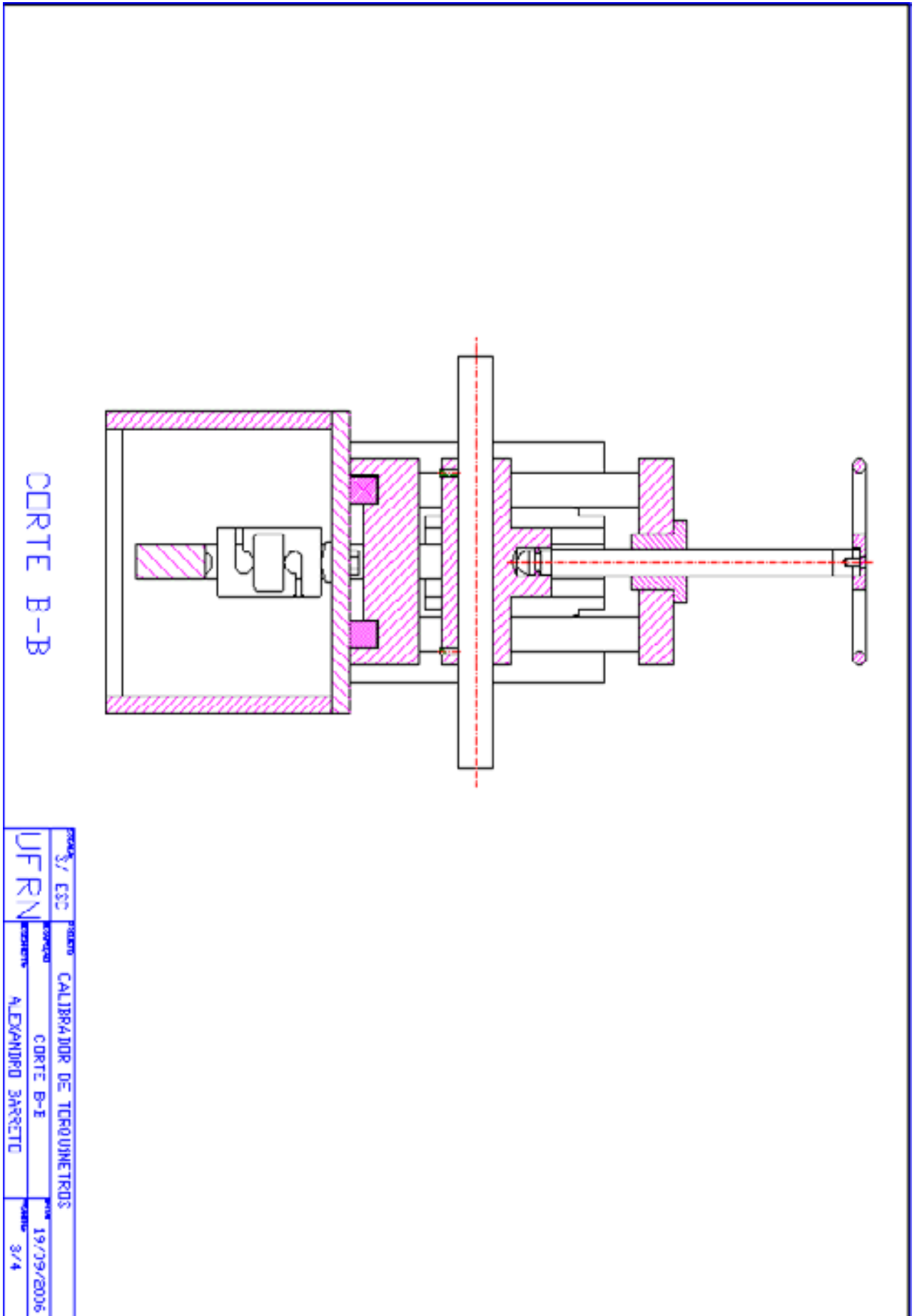
TORKFORT. Torquímetro tipo vareta. Disponível em <http://www.torkfort.com.br/produto_TVN60.htm>. Acesso em: 16 março 2006.

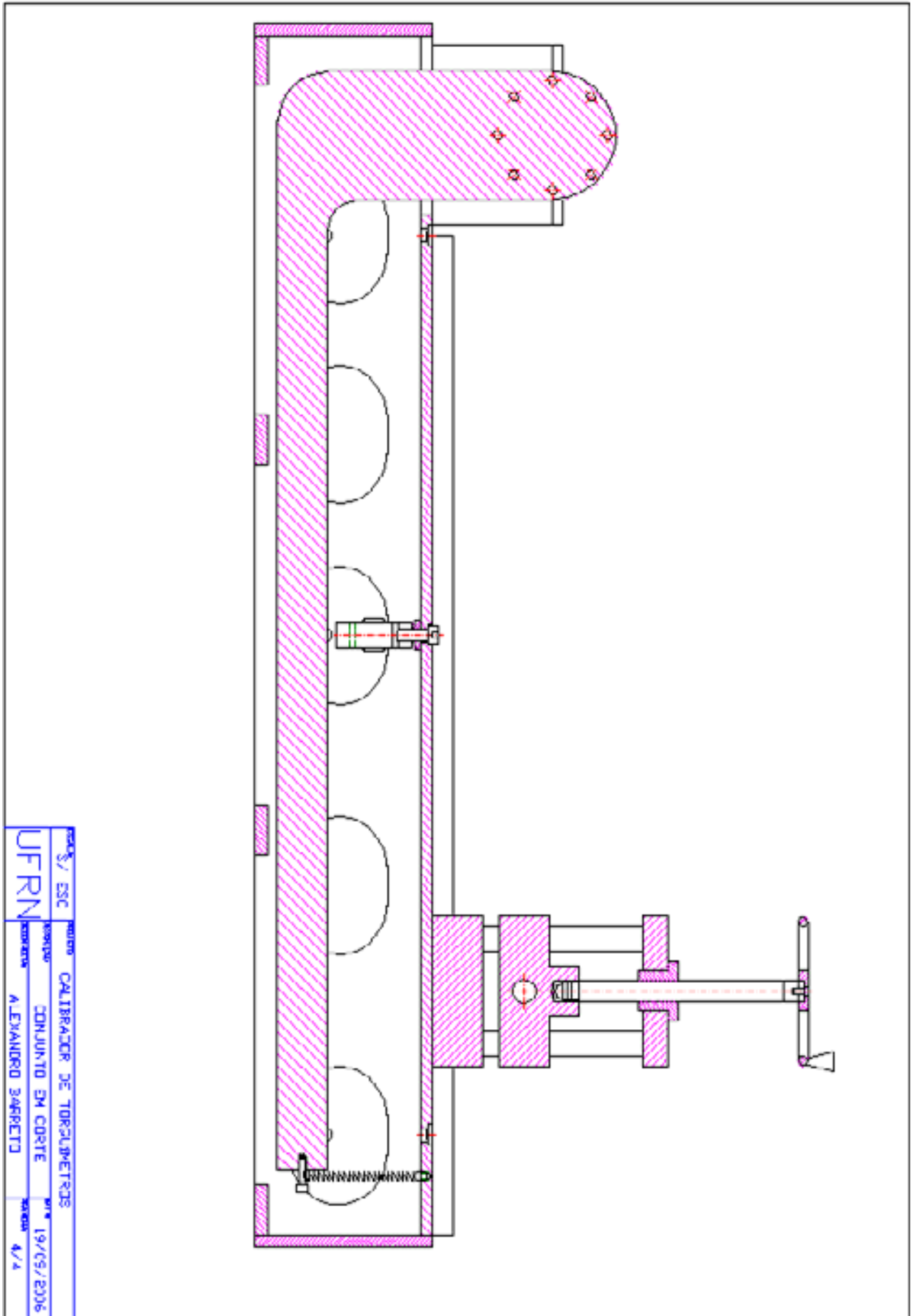




CORTE A-A

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO	ESCOLA DE ENGENHARIA	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS	DISCIPLINA DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
3º	ESD	CALIBRADOR DE TORQUÍMETROS	
AUTOR		ALEXANDRO BARRETTI	
TÍTULO		CORTE A-A	
DATA		19/09/2005	
VERSÃO		2/4	





Resumo de normas para a calibração de torquímetros

No estudo da Grandeza Torque, um foco importante é a diversidade de instrumentos e sistemas existentes para a realização de medições desta grandeza. No âmbito da metrologia, são necessárias a elaboração e adaptação de normas e procedimentos de calibração para estes diversos instrumentos, no intuito de prover maior confiabilidade na qualificação destes. Para tal, a avaliação e classificação apresentadas nas normas devem ser compatíveis com as características de funcionamento, aplicação final e posição na cadeia de rastreabilidade em metrologia de torque destes instrumentos (OLIVEIRA, R. et al., 2003).

A seguir, um resumo das principais normas técnicas referentes à calibração de torquímetros.

NBR 12240:2000 - Materiais metálicos - Calibração e classificação de instrumentos de medição de torque

Descreve o método de calibração, o cálculo dos resultados, a classificação do instrumento e as informações a serem colocadas no certificado. A seguir, o resumo do procedimento recomendado pela Norma para a calibração de torquímetros.

Ajustar o instrumento de medição de torque em uma posição tal que seja possível movimentá-lo, por exemplo, giro de 90° entre séries.

Na utilização de braço de alavanca, deve-se garantir o alinhamento no eixo axial.

Em calibração com transdutores de referência, o alinhamento entre os eixos axiais dos instrumentos deve ser garantido a fim de evitar mais de um “eixo de trabalho”.

Em calibrações por peso-morto, deve-se garantir que o eixo axial do braço está o mais aproximado possível da posição horizontal. Se isto não for verificado, o comprimento estabelecido para a aplicação de torque por massas não estará sendo respeitado, o que acarreta falhas no cálculo.

Se o instrumento de medição de torque for elétrico, conectar o transdutor e demais componentes, devidamente identificados, usando os cabos associados. Esperar o aquecimento e estabilização do circuito por um período previsto pelo fabricante ou, na falta de um manual, esperar por 15 minutos.

Fazer a medição da temperatura ambiente o mais próximo possível do sistema. As leituras devem ser registradas no início e no final das séries. A faixa de temperatura para calibração é de 18°C a 28°C, não devendo a temperatura variar mais de $\pm 1^\circ\text{C}$.

Fazer verificações e possíveis ajustes no dispositivo indicador do torque, segundo o manual do fabricante. Selecionar a unidade de medição (N.m, divisões, V, mV/V, etc.).

Antes de qualquer calibração, aplicar ao instrumento, já devidamente conectado, uma força adicional de valor entre 8% e 12% acima do torque máximo do instrumento por três vezes. Manter esta força por 1,5 minutos.

Registrar as leituras em torque zero antes de cada série, esperando não menos de 30 segundos após remoção do último torque aplicado.

Antes e depois da primeira das três forças adicionais, ignorar a mudança da leitura do indicador em zero. Após esta, expressar a máxima variação da leitura do indicador em zero produzida pela aplicação das duas forças adicionais como percentual das médias das leituras indicadas, obtida a partir de três aplicações do torque máximo do instrumento. Este valor deve ser comparado aos da coluna “erro relativo de zero” na tabela final de classificação da Norma, servindo, portanto como item pré-classificatório.

Após estes procedimentos preliminares, aplicar uma força adicional no instrumento de medição de torque com o torque máximo no sentido de aplicação de força apropriado.

Realizar a calibração em no mínimo cinco pontos cobrindo a faixa de 20% a 100% em intervalos aproximadamente espaçados.

Independente do sentido de calibração, crescente ou decrescente, os pontos devem ser os mesmos.

A Norma cita que a calibração abaixo de 20%, nos pontos de 10%, 5% e 2% da faixa nominal, pode ser realizada desde que a nova faixa determinada respeite o limite mínimo de calibração para a faixa.

Após remoção da força adicional do Torque máximo, tarar a leitura para zero, se possível, e registrar a leitura.

Aplicar duas séries de medição de torques crescentes, seguidas por torques decrescentes, se apropriado, no sentido horário ou anti-horário, como requerido para o instrumento.

Após a segunda série e das leituras devidamente registradas, desmontar e remontar o instrumento de medição de torque obedecendo aos alinhamentos e conexões já explicados anteriormente.

Aplicar um carregamento de torque máximo do instrumento e então aplicar a última série de medições.

Se a calibração do instrumento for solicitada nos sentidos horário e anti-horário, realizar primeiro as três séries de sentido horário, e depois as três de sentido anti-horário.

As leituras para cada aplicação de torque devem ser feitas após 30 s de estabilização de todo o equipamento e montagem.

As leituras de torque zero devem ser registradas antes e depois de cada série de medição. Obedecer ao período de 30 s, a contar a partir da remoção do torque, para a realização desta leitura.

Antes de cada série de medição o indicador poderá ser tarado.

A Norma não cita nada sobre a velocidade de aplicação dos torques, apenas diz que isto deve ser feito da maneira mais uniforme possível de uma série para outra, conservando um comportamento comum para os pontos.

A NBR 12240:2000 também estabelece os parâmetros para a classificação de torquímetros como visto na seqüência.

Os valores para máxima incerteza admissível dos torques calibrados, para a determinação das diferentes classificações do instrumento, não devem exceder os seguintes valores da Tabela A1.

Tabela A1: Incerteza da calibração de torque.

Incerteza máxima admissível na calibração de torque* %	Classe do instrumento de medição
± 0,02	0,1
± 0,04	0,2
± 0,10	0,5
± 0,20	1,0
± 0,40	2,0
± 1,00	5,0

* Usando um fator de abrangência de $k=2$ para um nível de confiança de aproximadamente 95%

Todas as grandezas utilizadas, tais como massa, comprimento, aceleração, temperatura, etc., devem ter rastreabilidade a padrões nacionais ou internacionais.

Embora também esta seja considerada pela Norma como pré-classificação, é importante lembrar que, para o levantamento da incerteza, além dos erros sistemáticos, o erro de dispersão (desvio padrão) também deve ser considerado. A Norma não determina a incerteza máxima do padrão para cada classe.

Uma classificação preliminar deve ocorrer levando em consideração o erro de zero encontrado na aplicação das forças adicionais. Os valores de referência para esta pré-classificação estão na coluna “erro máximo relativo de zero” da tabela de classificação final da Norma.

Os valores dos erros de cada torque aplicado, calculados para cada parâmetro classificado, não devem exceder os valores determinados na tabela de classificação final.

A classificação cessará na aplicação do primeiro torque onde o limite para a classificação pré-estabelecida for excedido.

A mínima faixa de medição para uma classificação deve ser de 20% a 100% do torque máximo.

Se estiver em conformidade com os itens anteriores, em relação a todos os parâmetros selecionados para os quais a classificação está sendo solicitada, a classificação deve então ser julgada satisfatória. Caso contrário, uma classe inferior, que se ajuste aos parâmetros da calibração deve ser encontrada.

Se forem aplicados torques abaixo de 20% do torque máximo, e os parâmetros calculados para estes pontos atenderem aos itens anteriores, a faixa de medição de classificação pode ser estendida e mantida.

Se for necessário que a faixa seja estendida, e os pontos inferiores não atendem a classificação da faixa anterior, a nova classificação para toda a faixa atenderá os parâmetros de uma classe inferior que se ajuste aos pontos onde a faixa foi estendida.

A Norma não diz como qualificar um instrumento que não atenda nenhuma das classes. É adequado, nesta situação, identificar o instrumento como “Sem classe” na faixa correspondente.

A Tabela A2 é uma reprodução da tabela de classificação final da NBR 12240:2000.

Tabela A2: Critério para classificação dos instrumentos de medição de torque.

Classe	Erro máximo admissível do instrumento de medição de torque (%)					
	Erro relativo de repetitividade R_1	Erro relativo de reprodutibilidade R_2	Erro relativo de interpolação E_{it}	Erro relativo de zero E_z	Erro relativo de reversibilidade E_h	Erro relativo de indicação E_i
0,1	0,05	0,10	$\pm 0,05$	$\pm 0,02$	0,125	$\pm 0,05$
0,2	0,10	0,20	$\pm 0,10$	$\pm 0,04$	0,250	$\pm 0,10$
0,5	0,25	0,50	$\pm 0,25$	$\pm 0,10$	0,625	$\pm 0,25$
1,0	0,50	1,00	$\pm 0,50$	$\pm 0,20$	1,250	$\pm 0,50$
2,0	1,00	2,00	$\pm 1,00$	$\pm 0,40$	2,500	$\pm 1,00$
5,0	2,50	5,00	$\pm 2,50$	$\pm 1,00$	6,250	$\pm 2,50$

***ISO 6789:2003 - Ferramentas para roscas e parafusos –
Torquímetros – Exigências e métodos de teste para teste de
conformidade de projeto, qualidade e procedimento de calibração.***

Especifica as exigências e descreve os métodos de teste de torquímetros. Não existe para esta Norma uma tradução oficial ou uma norma equivalente em português.

A ISO 6789:2003 estabelece uma “pré-classificação” do torquímetro com a função apenas de dividi-los em grupos, de acordo com seu princípio de funcionamento, e não de qualificá-los, como se segue.

- ✓ Tipo I: Torquímetros de indicação
 - Classe A: Chave com barra de torção ou flexão,
 - Classe B: Chave com carcaça fixa com escala ou relógio indicador;
 - Classe C: Chave com carcaça fixa e medição eletrônica;
 - Classe D: Chave axial, com escala ou relógio indicador;
 - Classe E: Chave axial e medição eletrônica.

- ✓ 16.2. Tipo II: Torquímetros com limitador de torque
 - Classe A: Chave ajustável com escala;
 - Classe B: Chave para ajuste fixo;
 - Classe C: Chave ajustável, sem escala;
 - Classe D: Chave axial, ajustável com escala;
 - Classe E: Chave axial, para ajuste fixo;

- Classe F: Chave axial, ajustável sem escala;
- Classe G: Chave com barra de torção ajustável com escala.

O máximo desvio entre o valor lido no instrumento e o valor simultâneo lido no padrão para torquímetros do tipo I é:

- ✓ Classes A e D: $\pm 6\%$
- ✓ Classes B, C e E: $\pm 6\%$ (≤ 10 N.m)
 $\pm 4\%$ (> 10 N.m)

Com relação aos torquímetros tipo II, o máximo desvio entre o valor ajustado no torquímetro (Classe A, D e G) ou o valor nominal (Classes B e E) e o valor indicado no padrão será:

- ✓ Classes A e B: $\pm 6\%$ (≤ 10 N.m)
 $\pm 4\%$ (> 10 N.m)
- ✓ Classes D, E e G: $\pm 6\%$

Para as classes C e F, o valor de torque nominal será dado pela média de 10 leituras:

- ✓ Classes C: $\pm 6\%$ (≤ 10 N.m)
 $\pm 4\%$ (> 10 N.m)
- ✓ Classes F: $\pm 6\%$

Os requisitos e testes, de acordo com esta Norma internacional, se aplicam a uma faixa de medição fixa que cobre de 20% até 100% do torque máximo do torquímetro.

A ISO 6789:2003 estabelece ainda que todos os torquímetros a serem testados devam ser solicitados uma vez em cada direção de operação a um valor de 125% do torque máximo (ou do torque nominal, para torquímetros tipo II classes B e E). Isto não se aplica a torquímetros limitadores de torque. Após este teste o torquímetro deve apresentar resultados ainda dentro da faixa especificada e não apresentar nenhuma avaria.

A norma determina que todo torquímetro a ser testado deva sofrer carregamentos a sua máxima capacidade (ou do torque nominal, para torquímetros tipo II classes B e E) num total de 5000 ciclos em cada direção de operação, numa razão entre 10 e 20 ciclos por minuto. Após este teste o torquímetro deve apresentar resultados ainda dentro da faixa especificada não apresentar nenhuma avaria.

A Norma discorre também sobre a recalibração do instrumento, onde define que o procedimento será o mesmo da calibração e que o intervalo entre estas recalibrações será conforme pré-estabelecido em procedimento de manutenção e qualidade de instrumentos do próprio usuário. No entanto, na falta deste procedimento, sugere uma recalibração em intervalos de 12 meses, ou aproximadamente 5000 ciclos de uso do instrumento, ou após uma sobrecarga, reparo ou uso incorreto.

A ISO 6789:2003 sugere o seguinte procedimento para calibração de torquímetros, aqui transcrito de maneira resumida.

A temperatura, após estabilização dos instrumentos, deve estar entre 18°C e $28^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, com umidade relativa máxima de 90%, e deve ser documentada.

Para torquímetros tipo I com escala, a leitura deve ser feita perpendicularmente ao mostrador. Para torquímetros tipo I, antes da calibração, deve ser aplicada uma pré-carga. Para torquímetros de ajuste, cinco carregamentos sem registro das medições devem ser realizados na direção de operação na capacidade máxima ou no torque nominal.

Os torquímetros devem ser carregados no equipamento de teste (padrão) com forças incrementais até indicarem o valor do torque calibrado ou até “desarmarem”. O incremento de força acima de 80% do valor do torque que está sendo calibrado deve ser aplicado lentamente durante um período de 0,5 até 4 segundos, de acordo com o valor de torque, ao menos que venha especificado, de alguma forma, pelo fabricante do instrumento.

Se para torquímetros do tipo I o carregamento foi realizado acima do torque a ser medido, a calibração deve recomeçar. Torquímetros do tipo II devem ser ajustados para o respectivo valor de calibração, começando de um valor mais baixo.

Os pontos da faixa de medição a serem testados serão os de 20%, 60% e 100% do valor de torque máximo. Se o valor de 20% não está marcado na escala, o próximo valor abaixo deste deve ser adotado como primeiro ponto de calibração.

Para torquímetros tipo II, classes B e E, o ponto de calibração será o valor nominal de torque do instrumento.

O número de carregamentos para cada classe de torquímetros está identificado a seguir:

- ✓ Tipo I, todas as classes: 5 vezes sucessivas em cada ponto de medição;
- ✓ Tipo II, classes A, D e G: 5 vezes sucessivas em cada ponto de medição;
- ✓ Tipo II, classes B e E: 5 vezes sucessivas no valor nominal;
- ✓ Tipo II, classes C e F: 10 vezes sucessivas em cada ponto de medição.

EA-10/14 - Calibração de dispositivos de medição de torque

Este guia traz os procedimentos de calibração e classificação final do instrumento. Metodologia muito parecida com a Norma NBR 12240:2000, porém com alguns conceitos teóricos e exemplo de modelo para cálculo da incerteza de medição. Traz ainda um exemplo de calibração e expressão dos resultados (INMETRO, 2005a).

Documentos DIN e DKD

Normas e documentos elaborados pelo DKD (órgão alemão para normalização) e pela DIN onde são descritos procedimentos de calibração aplicáveis de acordo com o propósito de uso do equipamento:

- ✓ DIN 51309: Calibração estática de transdutores de torque de referência (sem alavancas);
- ✓ DKD-R 3-7: Calibração estática de torquímetros de referência;
- ✓ DKD-R 3-8: Calibração estática de sistemas calibradores de referência (INMETRO, 2005a).

ISO 336, ISO 1703, ISO 1711, ISO 1174

São normas dedicadas à identificação e orientação de utilização para objetos adjacentes às montagens de calibração, utilização de torquímetros, fabricação de soquetes, e outras ferramentas que tenham no torque seu princípio de funcionamento (INMETRO, 2005a).

Procedimento para calibração de células de carga utilizando o sistema de aquisição de dados Spider8 e software catmanEasy

OBJETIVO: Relatar passo a passo o procedimento necessário à calibração de transdutores de força por meio do sistema de aquisição de dados Spider8 e software catmanEasy, produzidos pela empresa alemã HBM.

INICIAR O PROGRAMA

Uma vez instalado o software catmanEasy no computador, iniciar o programa dando um duplo clique no ícone **“catmanEasy (English)”** localizado na área de trabalho ou clicando no **“Menu Iniciar”** do Windows, clicar em **“Todos os programas”**, em seguida clicar em **“HBM”** e na seqüência em **“catmanEasy (English)”** e finalmente em **“catmanEasy”**.

TELA INICIAL DO PROGRAMA

Ao se pressionar o botão **“Scan options”**, abre a janela **“Configure device scan”**, na opção **“Ports to scan”** habilitar apenas a porta de impressora **“Printer port (LPT1)”**. Ainda em **“Configure device scan”**, se a aquisição de dados for feita a taxas superiores a 600 Hz (como no caso de ensaios de impacto, por exemplo), selecionar o modo **“Byte-Mode”** na opção **“Spider8 operating mode for printer port”**, para taxas inferiores a 600 Hz, utilizar **“Nibble-Mode”**.

INICIAR NOVO PROJETO

Com os sensores conectados ao Spider8 e este ligado e conectado ao computador, clicar no botão **“New DAQ project”**. Aparecerá a tela **“Channel settings”**.

DEFINIR E CONFIGURAR SENSORES

Para escolher o sensor a ser utilizado, clicar com o botão direito do mouse sobre a linha correspondente ao canal do Spider ao qual o sensor está conectado e escolher a opção: **“Sensor” - “Sensor list...”**. No canto direito da tela aparecerá a lista de sensores, onde na parte superior aparecem os grupos de sensores e na inferior os tipos de sensores existentes em cada grupo. Para a utilização de célula de carga como sensor, escolher o grupo **“Strain gage transducers”** e a opção **“SG fullbridge sensor”**. Obs: Se a célula de carga for fabricada pela HBM, escolher o grupo **“HBM transducers”** e, neste, o subgrupo que o transdutor mais se adequar, **“Force transducers”** para células de carga, por exemplo.

Identificado o sensor, deve-se escolhê-lo com um duplo clique do mouse sobre ele ou arrastando e soltando sobre a coluna **“Sensor”** da planilha **“Channel settings”**, de acordo com o canal do Spider ao qual está conectado.

Pode-se renomear o canal com um duplo clique na coluna **“Channel name”** ou clicando com o botão direito do mouse e escolhendo a opção **“Rename”**.

Para calibrar o sensor, clicar com o botão direito sobre a linha correspondente ao canal em que está conectado e escolher a opção: **“Sensor” - “Sensor adaptation”**. Na opção **“Set 1st point of input characteristics”**, digitar a unidade desejada (kg, kgf, N) no segundo campo de **“Physical value”**, feito isso, deve-se garantir que, com exceção de suportes e/ou acessórios cujos valores não serão considerados nos ensaios, nenhuma carga está agindo sobre a célula e efetuar a leitura do zero clicando em **“Measure”**. Agora, na opção **“Set 2nd point of input characteristics”** deve-se digitar o valor da sensibilidade da célula em mV/V no campo **“Electrical value”** e em seguida o valor do fundo de escala da célula no campo **“Physical value”**. Finalmente, digita-se o valor do fundo de escala da célula no campo **“Physical range”** e clica-se no botão **“OK”**. Esta operação também pode ser executada com o registro da aplicação de duas forças conhecidas, onde a primeira carga é aplicada, clica-se em **“Measure”** para obter o valor do sinal elétrico correspondente e digita-se o valor conhecido da força em **“Physical value”**, este processo deve ser repetido para a definição do segundo ponto calibrado. Digita-se o valor do fundo de escala da célula no campo **“Physical range”** e clica-se no botão **“OK”**.

Salvar o projeto clicando em **“File”** e depois em **“Save DAQ Project”** na barra de ferramentas principal do catmanEasy.

Para fazer a leitura atual da célula deve-se dar um duplo clique na coluna **“Status/Reading”** ou habilitar a função **“Live signal display on/off”** clicando no oitavo botão da barra de ferramentas da planilha **“Channel settings”**.

CONFIGURAR A AQUISIÇÃO DE DADOS

Clicar em **“Configure DAQ jobs”** localizado logo acima da planilha **“Channel settings”**. Na aba **“General”**, escolher a frequência de aquisição de dados em **“Sample rates”**. Escolhe-se a frequência mais adequada para os ensaios a serem realizados. Recomenda-se utilizar 1200 Hz para ensaios de impacto e 50 Hz para os demais casos. Ainda em **“General”**, habilitar a opção **“Automatic zero balancing”** em **“DAQ start”**. Em **“Data storage”** escolhe-se o tipo de coleta de dados na opção **“Storage mode”**. Para uma medição contínua, deve-se optar por **“Keep all data”**, e, no caso de uma medição pontual selecionar a opção **“Manual control”**. Na aba **“Channel activation”** desativar os canais que não estão sendo utilizados clicando sobre eles na primeira coluna, alterando-os de **“Active”** para **“Inactive”**. Confirmar as alterações clicando em **“Accept settings”**.

ZERANDO OS CANAIS

Para zerar os canais utilizados, habilitar a função **“Live signal display on/off”**, clicar sobre o canal desejado e, em seguida, clicar no botão **“zero selected channels”**, localizado na barra de ferramentas da planilha **“Channel settings”**.

AQUISIÇÃO DE DADOS

Clicar em **“Visualization”** na barra de ferramentas principal do catmanEasy e escolher uma opção como **“New digital indicator”** ou **“New real-time graph”**, por exemplo. Para uma medição contínua, após tudo preparado para o início do ensaio, clicar em **“Start DAQ job”** localizado ao lado da planilha **“Configure DAQ jobs”** para iniciar a aquisição de dados. Para uma medição pontual, ao clicar em **“Start DAQ job”**, abrirá a janela **“Manual store control”**, para capturar o ponto desejado, clicar no botão **“single point storage”**

localizado nesta janela, o ponto é registrado e a leitura continua sendo feita para que novos pontos possam ou não ser armazenados.

Ao final do ensaio, clicar em **“Stop DAQ job”**. Abrirá a janela **“Data storage”** e, caso os resultados do ensaio tenham sido satisfatórios, salvar os dados clicando em **“Store data now”**.

VISUALIZAÇÃO DOS DADOS ADQUIRIDOS

Clicar em **“Analyze data”**, localizado ao lado de **“Stop DAQ”**. Abrirá a janela **“Analyze data”**, clicar em **“OK”**.

Aparecerá uma nova tela e a janela **“Test explorer”**. Clicar em **“Visualization”** na barra de ferramentas principal do catmanEasy e escolher a opção **“New post-process graph”**.

Arrastar o canal utilizado no ensaio da janela **“Test explorer”** para o eixo Y do gráfico.

EXPORTAR OS DADOS ADQUIRIDOS PARA O EXCEL

Clicar em **“Export tests”** na barra de ferramentas da janela **“Test explorer”** (quarto botão, cujo ícone é o desenho de um disquete). Arrastar somente o canal utilizado para a coluna da direita, apagando os demais existentes nesta coluna.

Na opção **“File format”** escolher **“MS Excel (max. 65535 values per channel)”** e clicar no botão **“Export...”**.

OBSERVAÇÕES

Durante a aquisição de dados, aparece a indicação **“Real-time lag = 0 s”** no canto inferior direito. Este é o tempo de defasagem entre a aquisição de dados do Spider e a transferência de dados para o computador. Se este tempo aumentar, pode haver interrupção da medição com uma mensagem **“Buffer overflow”**, significando que o computador está muito lento e não consegue acompanhar a medição do Spider8.

AJUSTE (DE UM INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO): Operação destinada a fazer com que um instrumento de medição tenha desempenho compatível com o seu uso.

AMPLITUDE DA FAIXA NOMINAL: Diferença, em módulo, entre os dois limites de uma faixa nominal.

CALIBRAÇÃO: Conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões.

CLASSE DE EXATIDÃO: Classe de instrumentos de medição que satisfazem a certas exigências metrológicas destinadas a conservar os erros dentro de limites especificados.

CONSTANTE DE UM INSTRUMENTO: Fator pelo qual a indicação direta de um instrumento de medição deve ser multiplicada para obter-se o valor indicado do mensurando ou de uma grandeza utilizada no cálculo do valor do mensurando.

DIVISÃO DE ESCALA: Parte de uma escala compreendida entre duas marcas sucessivas quaisquer.

ERRO (DE MEDIÇÃO): Resultado de uma medição menos o valor verdadeiro do mensurando.

ERRO (DE INDICAÇÃO) DE UM INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO: Indicação de um instrumento de medição menos um valor verdadeiro da grandeza de entrada correspondente.

ESCALA (DE UM INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO): Conjunto ordenado de marcas, associado a qualquer numeração, que faz parte de um dispositivo mostrador de um instrumento de medição.

ESTABILIDADE: Aptidão de um instrumento de medição em conservar constantes suas características metrológicas ao longo do tempo.

EXATIDÃO DE UM INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO: Aptidão de um instrumento de medição para dar respostas próximas a um valor verdadeiro.

EXATIDÃO DE MEDIÇÃO: Grau de concordância entre o resultado de uma medição e um valor verdadeiro do mensurando.

FAIXA DE INDICAÇÃO: Conjunto de valores limitados pelas indicações extremas.

FAIXA DE MEDIÇÃO: Conjunto de valores de um mensurando para o qual se admite que o erro de um instrumento de medição mantém-se dentro dos limites especificados.

FAIXA NOMINAL: Faixa de indicação que se pode obter em uma posição específica dos controles de um instrumento de medição.

GRANDEZA: Atributo de um fenômeno, corpo ou substância que pode ser qualitativamente distinguido e quantitativamente determinado.

INCERTEZA DE MEDIÇÃO: Parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentadamente atribuídos a um mensurando.

INDICAÇÃO (DE UM INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO): Valor de uma grandeza fornecido por um instrumento de medição

INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO: Dispositivo utilizado para uma medição, sozinho ou em conjunto com dispositivo(s) complementar(es).

MEDIÇÃO: Conjunto de operações que tem por objetivo determinar um valor de uma grandeza.

MENSURANDO: Objeto da medição. Grandeza específica submetida à medição.

MÉTODO DE MEDIÇÃO: Seqüência lógica de operações, descritas genericamente, usadas na execução das medições.

METROLOGIA: Ciência da medição

PADRÃO: Medida materializada, instrumento de medição, material de referência ou sistema de medição destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza para servir como referência.

PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO: Base científica de uma medição.

PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO: Conjunto de operações, descritas especificamente, usadas na execução de medições particulares, de acordo com um dado método.

RASTREABILIDADE: Propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas, geralmente a padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas.

REPETITIVIDADE (DE RESULTADOS DE MEDIÇÕES): Grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição.

REPETITIVIDADE (DE UM INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO): Aptidão de um instrumento de medição em fornecer indicações muito próximas, em repetidas aplicações do mesmo mensurando, sob as mesmas condições de medição.

REPRODUTIBILIDADE (DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO): Grau de concordância entre os resultados das medições de um mesmo mensurando efetuadas sob condições variadas de medição.

RESULTADO DE UMA MEDIÇÃO: Valor atribuído a um mensurando obtido por medição.

SENSIBILIDADE: Variação da resposta de um instrumento de medição dividida pela correspondente variação do estímulo.

SENSOR: Elemento de um instrumento de medição ou de uma cadeia de medição que é diretamente afetado pelo mensurando.

SISTEMA DE MEDIÇÃO: Conjunto completo de instrumentos de medição e outros equipamentos acoplados para executar uma medição específica.

SISTEMA DE UNIDADES (DE MEDIDA): Conjunto das unidades de base e unidades derivadas, definido de acordo com regras específicas, para um dado sistema de grandezas.

SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES - SI: Sistema coerente de unidades adotado e recomendado pela Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM).

TEMPO DE RESPOSTA: Intervalo de tempo entre o instante em que um estímulo é submetido a uma variação brusca e o instante em que a resposta atinge e permanece dentro de limites especificados em torno do seu valor final estável.

TENDÊNCIA (DE UM INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO): Erro sistemático da indicação de um instrumento de medição.

UNIDADE (DE MEDIDA): Grandeza específica, definida e adotada por convenção, com a qual outras grandezas de mesma natureza são comparadas para expressar suas magnitudes em relação àquela grandeza.

VALOR (DE UMA GRANDEZA): Expressão quantitativa de uma grandeza específica, geralmente sob a forma de uma unidade de medida multiplicada por um número.

VALOR DE UMA DIVISÃO: Diferença entre os valores da escala correspondentes a duas marcas sucessivas.

VALOR NOMINAL: Valor arredondado ou aproximado de uma característica de um instrumento de medição que auxilia na sua utilização.

VALOR VERDADEIRO (DE UMA GRANDEZA): Valor consistente com a definição de uma dada grandeza específica.

VALOR VERDADEIRO CONVENCIONAL (DE UMA GRANDEZA): Valor atribuído a uma grandeza específica e aceito, às vezes por convenção, como tendo uma incerteza apropriada para uma dada finalidade.