

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM DINAMÔMETRO PARA MEDIR O TORQUE DINÂMICO DE UM EIXO ROTATIVO

Oscar de Bortoli Vieira (Universidade de Passo Fundo) E-mail: 100589@upf.br
Leandro Doró Tagliari (Universidade de Passo Fundo) E-mail: leandrotagliari@upf.br
Guilherme Regner Nava (Universidade de Passo Fundo) E-mail: 142726@upf.br
Cristian Bícigo (Universidade de Passo Fundo) E-mail: 127525@upf.br
Leonardo Castilhos de Oliveira (Universidade de Passo Fundo) E-mail: 138283@upf.br

Resumo: Este trabalho consiste em desenvolver o projeto e a construção de um dinamômetro para ser acoplado no eixo árvore de um centro de usinagem vertical. O dinamômetro a ser desenvolvido deve ser capaz de monitorar parâmetros de processo, objetivando o mensuramento do torque dinâmico. Para o funcionamento do dinamômetro, uma deformação deve ser analisada. Neste caso, a deformação é dada por uma mola calibrada. Sua deformação e variações na velocidade de rotação serão captadas por sensores infravermelhos e, como utiliza um método sem contato na medição e transmissão, acaba tornando-se menos sensível a vibrações. Manter uma boa fixação e evitar vibrações são fatores importantes dentro do projeto, então o estudo sobre rolamentos, ajustes e tolerâncias se faz necessário. Outro fator importante a ser considerado são os materiais específicos de cada componente, visando evitar excesso de peso e baixar o custo, sem comprometer a aquisição de dados. Com o respectivo projeto pretende-se suprir uma necessidade do laboratório de usinagem de medição de esforços, além do conhecimento técnico que será adquirido, tanto da parte mecânica como da parte eletrônica, durante seu desenvolvimento, aquisição e interpretação de informações.

Palavras-chave: Dinamômetros; Torque dinâmico; Torque rotativo.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A DYNAMOMETER TO MEASURE THE DYNAMIC TORQUE OF A ROTARY AXIS

Abstract: This work consists of developing the design and construction of a dynamometer to be coupled to the shaft of a vertical machining center. The dynamometer to be developed must be able to monitor process parameters, aiming the measurement of dynamic torque. For the operation of the dynamometer, a deformation must be analyzed. In this case, the deformation is given by a calibrated spring. Its deformation and variations in rotational speed will be captured by infrared sensors and, as it uses a non-contact method in measurement and transmission, it becomes less sensitive to vibrations. Maintaining good clamping and avoiding vibrations are important factors within the design, so the study of bearings, adjustments and tolerances becomes necessary. Another important factor to consider is the specific materials of each component, in order to avoid overweight and lower the cost, without compromising the acquisition of data. With the respective project, it is intended to meet a need of the laboratory of measurement of efforts, in addition to the technical knowledge that will be acquired, both mechanically and electronically, during its development, acquisition and interpretation of information.

Keywords: Dynamometers; Dynamic torque; Rotary torque.

1. Introdução

A busca por aperfeiçoar os métodos de processo e fabricação exige cada vez mais estudo, pois o mercado está tornando-se mais competitivo. Novos dispositivos estão sendo desenvolvidos ou aperfeiçoados para controlar melhor os parâmetros de fabricação, a fim de aproveitar melhor o tempo e mão de obra. Uma característica comum em várias empresas são processos que acabam sendo mais custosos quando produzidos na própria empresa do que os mesmos terceirizados, o ideal é identificar o

problema, mas para calcular este custo é necessário dados que não são encontrados com facilidade. Este é o objetivo deste projeto, desenvolver um equipamento que forneça as informações adicionais sobre o processo.

O foco deste trabalho é desenvolver o projeto e a construção de um dinamômetro capaz de medir o torque dinâmico em um eixo rotativo do centro de usinagem vertical V-400, durante um processo de furação. O aparelho foi projetado para ficar posicionado entre a broca utilizada na furação e o eixo árvore do centro de usinagem. O dinamômetro pode ter outras funções além do cálculo de custos de usinagem, pode também ser utilizado em estudos de métodos de usinagem, desenvolvimento de novas ferramentas de furação e futuros estudos.

Os dinamômetros encontrados no mercado além de um valor muito elevado, também possuem limitações que incapacitam a utilização do mesmo, como o modo de fixação e a forma de coleta de dados. Assim a alternativa foi construir um equipamento específico, com baixo custo, além de garantir que o mesmo desenvolva a função definida neste projeto.

2. Metodologia

O método de abordagem é dividido em dois itens muito distintos: qualitativos e quantitativos. O método utilizado neste trabalho é a pesquisa quantitativa que segundo Polit et al. (2004) tem como base o pensamento positivista lógico. Enfatiza a lógica e as características mensuráveis da experiência humana. Esta modalidade prioriza a objetividade na coleta e na análise dos dados além de usar procedimentos estruturados e instrumentos formais para a coleta dos dados. Em síntese de acordo com Fonseca (2002) a pesquisa quantitativa recorre à linguagem matemática para definir as causas de um fenômeno.

De acordo com Gil (2007) com base nos objetivos, pode-se classificar as pesquisas em três grupos:

- a) Pesquisa exploratória;
- b) Pesquisa explicativa;
- c) Pesquisa descritiva.

O tipo de pesquisa utilizado no trabalho é a explicativa, visto que segundo Gil (2007) este tipo de pesquisa visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Pesquisas explicativas podem ser classificadas como experimentais.

Partindo para a metodologia de procedimentos, pode-se citar vários tipos de pesquisas:

- 1) Pesquisa experimental;
- 2) Pesquisa bibliográfica;
- 3) Pesquisa documental;
- 4) Pesquisa de campo;
- 5) Pesquisa de levantamento;
- 6) Estudo de caso;
- 7) Pesquisa participante;
- 8) Pesquisa ação.

Este projeto tem caráter experimental, pois de acordo com Gil (2007) a pesquisa experimental baseia-se em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que são capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

O projeto do dinamômetro foi desenvolvido para medir o torque no processo de furação. Este equipamento foi desenvolvido para ser adaptado no centro de usinagem Romi Polaris V400. Na primeira etapa do projeto foram analisadas as soluções existentes no mercado e então aplicado a técnica de projeto conceitual, onde foi obtido o esboço da concepção do projeto. Foi aplicada a técnica do *brainstorming*, indicada por Norton, após utiliza-se a metodologia de Pahl e Beitz. Finalizou-se o projeto conceitual, gerou-se a ideia de projeto definitivo, detalhou-se os desenhos com dimensões e tolerâncias de fabricação. Na etapa final, construiu-se o protótipo do equipamento e posteriormente deverá ser realizado testes de funcionamento.

2.1. Centro de Usinagem

A máquina a ser implementada com o dinamômetro, será um centro de usinagem vertical Romi Polaris V400, tendo este um curso de trabalho de 700x420x600, com uma dimensão de mesa de 400x900 e altura máxima de trabalho de 350 milímetros. A ferramenta de trabalho pode atingir a rotação máxima de 6 mil rotações por minuto.



Figura 1: Centro de Usinagem Romi Polaris V400

2.2. Desenvolvimento

Neste capítulo as etapas de desenvolvimento do projeto serão demonstradas e explicadas. A primeira etapa sugerida anteriormente foi estudo sobre os produtos existentes no mercado.

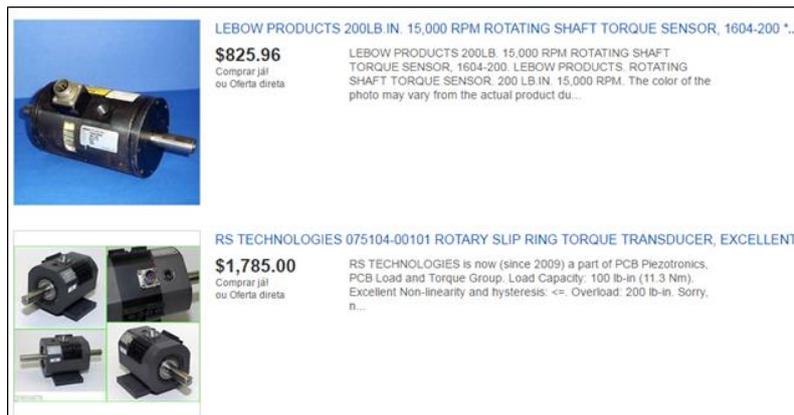


Figura 2: Dinamômetros comerciais

Dentre os produtos mostrados na Figura 18, o primeiro não atende os requisitos básicos, pois não tem saída de movimento. A maioria dos produtos encontrados no mercado não atendem requisitos para o funcionamento do mesmo. Poucos encontrados como o segundo item da lista, atendem as características básicas, mas possuem outros problemas, como tamanho e peso, o maior problema acaba sendo os preços, custando entre 2 a 6 mil reais. O preço do produto da imagem em reais esta aproximadamente R\$6.227,00.

Para aprimorar o modelo é necessário partir da metodologia estudada de Pahl e Beitz onde o primeiro passo no desenvolvimento conceitual é a criação da linha mestre de requisitos, Quadro 1, onde constarão dados sobre o futuro modelo desejado.

Característica Principal	Características Principal	Desejada/ Exigida	Requisito
Geometria	Altura	E	Máximo 200 mm
	Diâmetro (carcaça)	E	Máximo 200 mm
	Diâmetro (eixo)	D	15 mm
Forças	Torque máximo	D	10 N.m
Material	Eixo	D	Material disponível
	Carcaça	D	Material disponível
	Mola	D	Aço Mola
	Guia deslizante	D	Nylon
	Outros componentes	D	Aço 1020 ou terceirozido
Sinal	Leitor de posição	D	Óptico
Produção	Usinagem	D	Eixo, Carcaça
	Montagem	E	Manual
	Manutenção	E	Manual

Quadro 1: Dados do modelo desejado

Prosseguindo com o desenvolvimento conceitual, é preciso elaborar a função global do conjunto e suas sub-funções. Na figura 20 é possível observar que o objetivo principal é medir o torque necessário em processo de furação. Tendo como entrada, uma carga de torque (E) que é fornecida pela rotação da furadeira ou centro de usinagem, este atua sobre a ferramenta protótipo, que resiste ao esforço sofrendo uma deformação elástica (E e S deformação). As sub-funções possibilitam visualizar o procedimento detalhado para alcançar a função global.

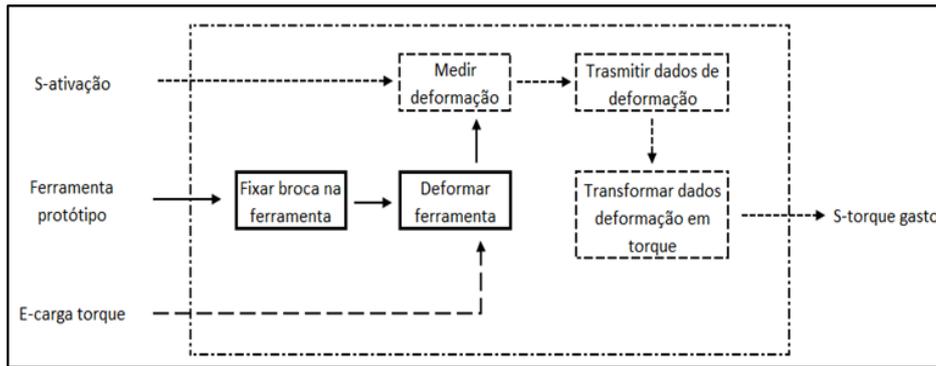
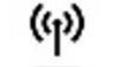


Figura 3: Estrutura de sub-funções

O eixo árvore do centro de usinagem vertical será o responsável por transmitir força ao sistema em forma de carga de torque (E), quando o processo de furação for efetuado, a resistência do material produzirá uma deformação na ferramenta protótipo, esta deformação será medida e os dados serão transmitidos para um equipamento externo que os transformará em parâmetros de torque, cumprindo a função global.

O próximo passo segundo Pahl e Beitz é construir uma estrutura de funcionalidade, Quadro 2, onde cada sub função apresenta as soluções disponíveis, baseando-se principalmente na viabilidade construtiva.

Solução	1	2	3	4
Subfunção				
Fixação da broca à ferramenta	 Mandril	 Engate Rápido		
Componente a absorver a deformação	 Mola helicoidal	 Mola arrame quadrado	 Mola de tração	 Mola de torção
Equipamento para medir a deformação	 Sensor optico			
Trasmitir dados de deformação	 Sinal de radio	 Wi-Fi		
Trasformar dados de deformação em torque	 Software	 Tabela escalonada		

Quadro 2: Estrutura de funcionalidade

Com as devidas soluções encontradas é importante avaliar cada solução e sua capacidade de realizar a função desejada.

O Quadro 3 apresenta pesos e notas para cada sub função e a solução possível, este modelo é adaptado da metodologia de Pahl e Beitz.

AVALIAÇÃO DE FUNCIONALIDADE					
Solução subfunção	1	2	3	4	PARAMETROS AVALIATIVOS
FIXAÇÃO DA BROCA	3	3			Custo
	2	3			Capacidade Mecânica
	3	4			Facilidade em acoplar ao projeto
	2	4			Velocidade de utilização
	4	4			Disponibilidade de mercado
	14	18			TOTAL
COMPONENTES A ABSORVER A DEFORMAÇÃO	4	2	4	4	Custo
	2	4	3	2	Capacidade Mecânica
	3	4	1	0	Facilidade em acoplar ao projeto
	4	4	3	2	Facilidade de manutenção
	4	2	4	2	Disponibilidade de mercado
	17	16	15	10	TOTAL
TRAMISOR DE DADOS	3	2			Custo
	4	3			Facilidade em acoplar ao projeto
	4	4			Velocidade de utilização
	4	3			Disponibilidade de mercado
	15	12			TOTAL
TRASFORMAR DADOS EM TORQUE	3	3			Custo
	4	2			Facilidade de utilização
	3	3			Facilidade em acoplar ao projeto
	4	2			Velocidade de utilização
	3	4			Facilidade de criação
	17	14			TOTAL
LEGENDA	0	INSATISFATÓRIO			*OBS:A solução com maior nota final é a melhor opção para cada sub função.
	1	SOLUÇÃO AINDA SUSENTÁVEL			
	2	SUFICIENTE			
	3	BOA			
	4	MUITO BOA (IDEAL)			

Quadro 3: Pesos de cada sub-função

Para fixação da broca, o engate rápido teve maior nota em “capacidade mecânica” devido ao fato de ter menor problema de desgaste em seu mecanismo de fixação, além disso recebeu maior nota pela praticidade de não precisar chave para fixar a ferramenta, ganhando ponto em “facilidade de acoplar ao projeto”. Por sua rapidez de fixação e troca de ferramenta teve melhor pontuação de “velocidade de utilização”, sendo a escolhida por seus vários pontos positivos.

Durante a escolha da mola quase todas as opções tinham pontos positivos, entretanto os pontos determinantes foram o “custo” e a “disponibilidade no mercado”. O projeto do sistema com uma mola helicoidal não exclui a segunda opção de arame quadrado, mas no presente trabalho a helicoidal se mostrou mais viável, devido a disponibilidade de diversas opções, podendo atender determinadas mudanças no projeto.

Na forma de transmissão de dados o sinal de rádio teve a melhor pontuação, por ser utilizada há mais tempo é bem difundida e mais simples de aplicar, mas em muitos casos está sendo substituída pela *Wi-fi*.

A tabela escalonada pode ser utilizada em vários processos, mas possui problemas em adaptar os dados arrecadados e pouca praticidade em mostrar os resultados de forma simples e prática. O software teve a maior pontuação devido a sua praticidade, mas o uso de tabela ainda pode ser utilizado para obter algum dado específico.

Com a tabela montada e as soluções avaliadas conforme conhecimento do projetista, o resultado pode ser expresso como uma linha de combinação conforme figura 3, onde estão demonstradas as funções e soluções com os melhores resultados para cumprir a função global.

Solução	1	2	3	4
Subfunção				
Fixação da broca à ferramenta	 Mandrill	 Engate Rápido		
Componente a absorver a deformação	 Mola helicoidal	 Mola arrame quadrado	 Mola de tração	 Mola de torção
Equipamento para medir a deformação	 Sensor optico			
Trasmitir dados de deformação	 Sinal de radio	 WI-FI		
Transformar dados de deformação em torque	 Software	 Tabela escalonada		

Figura 4: Soluções avaliadas

As decisões tomadas para este projeto vão guiar o projetista. As melhores alternativas foram escolhidas levando em consideração os requisitos para funcionamento do equipamento, mas algumas escolhas podem, em algum novo projeto ou função depois do projeto, serem alteradas, possibilitando adaptá-lo para outras cargas ou alterações de funcionamento. Mas essas alterações devem ser avaliadas antes de executadas.

Norton (2010) afirma que um importante passo para o projeto é a criação de um esboço da ideia bruta, sem acabamentos e detalhes, apenas para entender o funcionamento básico do equipamento para posteriormente realizar o desenvolvimento do modelo. Usando as ideias dos esboços à mão livre, um esboço da ideia bruta foi modelado no software *SolidWorks*, para melhor compreensão do funcionamento, conforme figura 4.

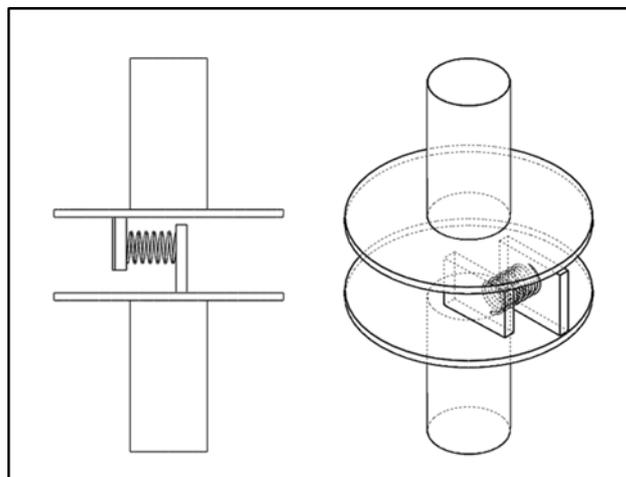


Figura 5: Esboço do dinamômetro

Com as devidas soluções encontradas no capítulo anterior o primeiro passo é apresentar o modelo desenvolvido com as características necessárias para atender as necessidades propostas, utilizando o software *Solidworks* para a modelagem das peças e montagem. Na figura 5 pode-se visualizar externamente o projeto modelado.

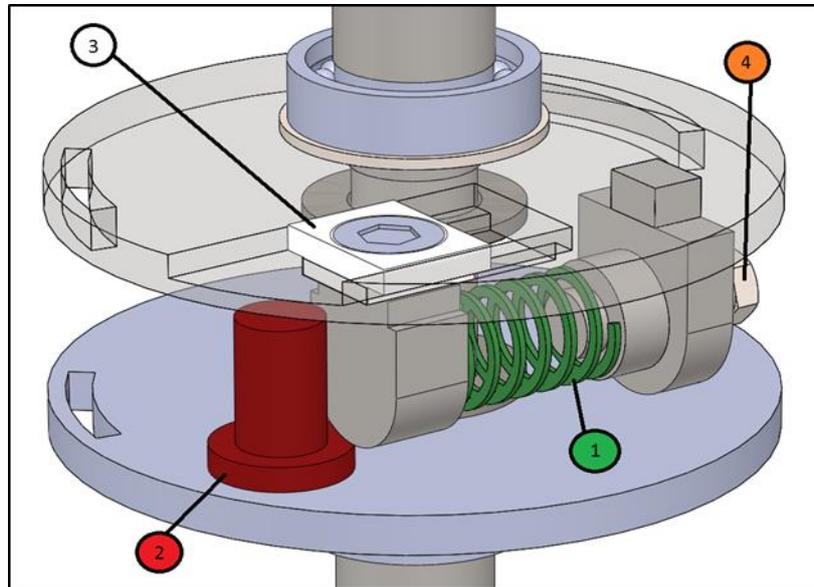


Figura 6: Modelo projetado

Considerando que o percurso projetado no equipamento é para uma mola de 25 milímetros, mas somente 40% da mesma deve ser deformada durante o processo normal do equipamento, garantindo assim uma alta vida útil para mola, mantendo longe da deformação plástica.

A deformação da mola será a referência para descobrir o torque utilizado durante a furação, mas como a visualização dessa deformação é indisponível, serão utilizados sensores ópticos para definir o ângulo de torção dos discos internos do dispositivo, através de fendas capazes de deixar passar certa quantidade de luz, dentro um determinado ângulo, quando a mola não está sofrendo esforço, está totalmente aberta e a fenda está com seu ângulo completo, quanto maior a deformação da mola, na mesma escala, será menor o ângulo de luz recebido no receptor óptico. Na Figura 31 podem-se ver os discos com as fendas de passagem de luz, as fendas de mesmo tamanho e localizadas na parte inferior da imagem. Para a medição não ter problema graças a variação de velocidade durante a furação, outra fenda foi aberta na parte superior, esta deve manter sempre o mesmo tamanho de feixe de luz, então o rasgo no disco superior (A) segue o mesmo caminho, mas é prolongado, para o deslocamento do disco não obstruir a passagem de luz por esta fenda e assim possibilitar a medição da rotação do equipamento.

3. Resultados

Os requisitos exigidos e desejados vistos no início do projeto são comparados com o projeto concluído, possibilitando analisá-los.

Característica Principal	Características Principal	Desejada/ Exigida	Requisito	Parâmetros de projeto
Geometria	Altura	E	Máximo 250 mm	186 mm

Custos de construção do protótipo			
Operação	Tempo (h)	Preço/hora	Total
Torno	9	R\$ 65,00	R\$ 585,00
Fresa	3	R\$ 75,00	R\$ 225,00
Bancada	3	R\$ 45,00	R\$ 135,00
Material	Peso (kg)	Valor/kg (médio)	Total
Aço 1020	3,027	R\$ 3,50	R\$ 10,59
Componentes terceirizados	Preço (uni)	Quantidade	Total
Discos (laser)	R\$ 26,41	2	R\$ 52,82
Rolamentos (15x24x5)	R\$ 35,00	2	R\$ 70,00
Rolamentos (15x28x7)	R\$ 48,00	2	R\$ 96,00
Parafusos Allen M8	R\$ 1,60	6	R\$ 9,60
Parafusos Allen M6	R\$ 1,00	2	R\$ 2,00
Arruelas (M8)	R\$ 0,20	12	R\$ 2,40
Porcas (M8)	R\$ 0,60	6	R\$ 3,60
Porcas (14)	R\$ 2,00	2	R\$ 4,00
Preço final			R\$ 1.196,01

Tabela 1: Custo do equipamento projetado

Com a construção do equipamento feita dentro da Universidade de Passo Fundo, os preços deste equipamento foram calculados com base nos preços do mercado e estimando os preços como terceirização de serviço, aumentando o custo de fabricação real. O mandril terá o custo de R\$30,00.

Os componentes eletrônicos e a mão de obra que seria gasta para desenvolver o equipamento, estão estimados em R\$1.940,00, totalizando em R\$3.166,01 como o custo total de fabricação do dinamômetro.

O custo total do equipamento está em torno de R\$3.166,01, quando comparado com o equipamento no mercado que está em torno de R\$6.227,00, pode-se ver uma redução de aproximadamente 49,16% do valor inicial. Os custos do protótipo foram extremamente baixos em comparação com os encontrados no mercado, conforme mostrado, confirmando a viabilidade do equipamento.

Referências

- BALBINOT, A., Brusamarello V.J., **Instrumentação e Fundamentação de Medidas**. 2º ed. Arte e Ideia. Rio de Janeiro, 2007
- BORGES, A.N. **Caracterização de escovas de grafite e avaliação do seu desempenho em função da microestrutura**. Dissertação de Mestrado: Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Natal – RN, 2007
- BORGES, J.C.S.; LIMA FILHO, A.C.; BELO, F. A. **Sensor Hall effect on analyses Mechanical Stress**. Journal of Mechanics Engineering and Automation. v.5, p.19-25, 2015. ISSN: 2159-5275. doi: 10.17265/2159-5275/2015.01.003.
- BRITO, R. M. **Sistema eletro-eletrônico para medição direta de torque em dispositivos girantes utilizando extensômetros de resistência elétrica**. 1994. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1994
- BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**. Vol 1. 3º ed. São Paulo: Blucher, 2012
- CHEONG, Y.D., KIM, J.W., OH, S.H., LEE, C.W., 1999, “**Analysis and Development of the Angular Twist Type Torque-meter**”, Composite Structures, Vol. 47, pp. 457-462.
- DEVITTE, Willian. **Desenvolvimento de um Sistema para medir o conjugado de um motor de indução**. Trabalho de conclusão de curso, Engenharia de Controle e Automação. UNIVATES, Lajeado,

2013.

EBAY Acesso: <http://www.ebay.com/bhp/torque-sensor>. Página acessada em: 03 de outubro de 2016.

FIGLIOLA, R.; BEASLEY, D.; 2011, **Theory and design for the mechanical measurements**, 5th ed. Portland: John Wiley & Sons, 605 p. Danvers, USA, 2011. ISBN: 978-0470547410

FRADEN, Jacob. **Handbook of Modern Sensors**. Physics, Designs and Applications. 3 ed, Springer – Verlag New York, Inc., 2004. ISBN 0-387-00750-4

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GRANTE, **Apostila de Extensometria** Acesso: <http://grante.ufsc.br/download/Extensometria/SG-Apostila.pdf>, Grupo de Análise e Projeto Mecânico, UFSC. Página acessada em: 13 de setembro de 2016.

LIMA FILHO, A. C.; Belo, F. A.; Santos, J L. S.; Anjos E. G. de. **Self-Powered Telemetric Torque Meter**, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, v. 133, p. 1-7, 2011.

LIMA, T. **Ponte de Wheatstone** Acesso: <http://www.embarcados.com.br/ponte-de-wheatstone/>. Página acessada em: 03 de outubro de 2016.

NASCIMENTO, N. et al. “**Torquímetro para motores ultra-sônicos**”. In: CONEM 2000. Natal-RN, 2000

NORTON, R. L.; **Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos**. Porto Alegre: AMGH Ed. LTDA, 2010

OLIVEIRA, José Sérgio de. **Avaliação experimental e teórica do torque no laminador de chapas grossas da USIMINAS**. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. UFMG. Belo Horizonte, 2010.

PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang; FELDHUSEN, Jörg; GROTE, H. Karl. **Projeto na Engenharia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

POLIT, D. F.; BECK, C. T.; HUNGLER, B. P. **Fundamentos de pesquisa em enfermagem: métodos, avaliação e utilização**. Trad. De Ana Thorell. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

POLIMOLD. **Catálogo de molas** Acesso: <http://www.polimold.com.br/downloads/molas/molas.pdf>. Página acessada em: 01 de novembro de 2016.

THAL, S. W. **Development of a Hydraulic Dynamometer**. Illinois Institute of Technology, 1917, p.1-10.

VERNON, PE. (1989). **The nature-nurture problem in creativity**. Handbook of Creativity, p.93-110. New York: Plenum Publishing Corp.

WASSERMANN, J., et al., “**Wireless Data Transfer System for Rotating Machinery – Very Robust Against Electromagnetic Interference**”, 1st International Conference on Sensing Technology, Palmerston North, New Zealand, pp. 651-647. Nov 21-23, 2005