

PAULO ROBERTO PEREIRA PINTO FILHO

**Projeto e Construção de Dispositivo para Medição de Forças de
Usinagem em Processo de Furação**

São Paulo

2007

PAULO ROBERTO PEREIRA PINTO FILHO

**Projeto e Construção de Dispositivo para Medição de Forças de
Usinagem em Processo de Furação**

**Monografia de Trabalho de
Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade
de São Paulo para a obtenção do
título de Graduação em Engenharia
Mecânica com ênfase em Automação
e Controle**

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**Orientadora: Professora Doutora
Izabel Fernanda Machado**

**São Paulo
2007**

FICHA CATALOGRÁFICA

Filho, Paulo Roberto Pereira Pinto

Projeto e Construção de Dispositivo para Medição de Forças de Usinagem
em Processo de Furação /

Paulo Roberto Pereira Pinto Filho. – São Paulo, 2007.

Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia
Mecatrônica.

1. Engenharia 2. Engenharia Mecânica 3. Instrumentação

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a Armando Pereira Pinto, um grande homem,
com um grande coração que, de tão grande, inspira seus netos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e aos meus irmãos, por sempre me guiarem, apoiarem e torcerem pelo meu sucesso.

A Henrique Augusto Belizário Sanches, colega de faculdade, colega de iniciação científica e grande amigo, que em muito colaborou na realização desse e de outros trabalhos.

A minha orientadora Professora Doutora Izabel Fernanda Machado pelo apoio, não só nesse projeto, mas também em tantos outros que foram conquistados nos últimos anos, e por confiar na capacidade dos seus alunos.

Ao Sr. Francisco dos Reis Faustino e Jovinilo Oliveira dos Santos pelo auxílio na parte experimental, e por sempre se mostrarem dispostos a cooperar com os alunos de trabalho de formatura e de iniciação científica.

A Aços Villares Sidenor S.A pelo apoio (projeto CONSTRUMEC (FINEP-FIPT-Aços Villares S.A, Processo no 01.04.087.00), à FAPESP pelo apoio no que se refere a boa parte dos equipamentos utilizados (processo 03/05490-4), ao Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da Escola Politécnica da USP, à Iscar do Brasil S.A., pelas ferramentas de corte.

RESUMO

A busca pela otimização nas linhas industriais de fabricação nos tem levado ao estudo dos processos de usinagem e ao desenvolvimento de sistemas que nos permitam quantificar parâmetros fundamentais a esses processos. Tais parâmetros são medidas de força de corte, vibrações, temperatura. Busca-se, então, relacioná-los com o comportamento mecânico do material usinado, de modo a aumentar a eficiência do processo de fabricação, sem que isso acarrete em maiores custos (relacionados a desgaste das ferramentas) ou perda da qualidade na superfície da peça usinada. Em especial, um método importante por ser eficiente, de simples montagem e de baixo custo é a medição de forças de corte através de dispositivos equipados com sensores do tipo extensômetros. Os objetivos deste trabalho são projetar, instrumentar, calibrar e testar um dispositivo equipado com extensômetros, para uso em furadeiras industriais. Esse dispositivo é então ligado a um sistema de aquisição, de forma a avaliar as forças resultantes do processo de furação em corpos-de-prova de um aço utilizado em construção mecânica; como fruto desse trabalho, buscasse desenvolver uma metodologia de ensaios que visa aprimorar o conceito de usinabilidade, relacionando-o com parâmetros que permitam avaliá-lo, e relacioná-lo de forma mais precisa com as propriedades mecânicas e com a microestrutura do material usinado.

ABSTRACT

The industrial assembly lines optimization guides us to the machining process and the development of systems that allow us to quantify fundamental parameters to these processes. Examples of these parameters are cutting forces, vibration, temperature. These concepts characterize the mechanical behavior of the material, so that the assembly process can be improved in terms of efficiency at low cost. One solution is the measurement of the cutting forces through extensometers equipped devices. The main objectives of this work are: project, manufacture, instrument, calibrate and test a dynamometer for drilling operations. This device is connected to an acquisition system hence, the drilling forces in a steel cylinder can be measured. As a potential work, this data can be used to develop a method to incorporate these efforts to researches involving machinability of materials.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Forças de usinagem resultantes do processo de furação.....	13
Figura 2 - Variação de comprimento com uma força P.....	14
Figura 3 – Eixo principal do extensômetro (eixo preto) e eixo transversal (eixo cinza)..	15
Figura 4 - Circuito da Ponte de “Wheatstone” com resistores [6].....	16
Tabela 1 – Composição química padrão para dispositivo ABNT 1100 (% em massa)...	18
Tabela 2 - Composição química padrão para calibração do Aço ABNT 1045 (% em massa). Balanço corresponde ao Fe.....	18
Figura 5 - Desenho 3D em CAD do dispositivo.....	19
Figura 6 – Dinamômetro para Furação, em seu formato final.....	20
Figura 7 – Esquema de posição dos extensômetros colados na parede do dispositivo.	21
Figura 8 – Detalhe do dispositivo: seta vermelha mostra a solda; seta azul mostra o extensômetro colado.....	24
Figura 9 - Detalhe do Dispositivo, mostrando os parafusos de fixação.....	25
Figura 9 – Esquema dos equipamentos utilizados para a calibração.....	25
Figura 10 – Gráfico de Calibração do dispositivo de furação.....	26
Figura 11 – Sistema de Aquisição.....	27
Figura 12 – Ensaio 1 do dispositivo com fixação do corpo-de-prova por chavetas.....	29
Figura 13 – Ensaio 2 do dispositivo com fixação do corpo-de-prova por chavetas.....	30
Figura 14 – Ensaio 1 do dispositivo com fixação do corpo-de-prova por parafusos.....	31
Figura 15 – Ensaio 2 do dispositivo com fixação do corpo-de-prova por parafusos.....	32

LISTA DE SÍMBOLOS

R	Resistência elétrica
L	Comprimento do fio condutor
A	Área da seção transversal do condutor
ρ	Resistividade do material condutor
S	Sensibilidade
VXY	Voltagem entre os pontos X e Y
ν	Coefficiente de Poisson
Mt	Momento Torçor
C1, x1 e y1	Constantes tabeladas da equação do Momento Torçor
D	Diâmetro em mm
f	Avanço em mm/volta

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE SÍMBOLOS

1 Introdução.....	10
2 Objetivos.....	12
3 Revisão Teórica.....	13
3.1 Furação.....	14
3.2 Extensômetros.....	15
3.3 Ponte de Wheatstone.....	16
4 Materiais e Métodos.....	18
4.1 Projeto do dispositivo.....	18
4.1.1 Descrição do Dispositivo.....	18
4.1.2 Cálculo das Dimensões.....	20
4.2 Construção do dispositivo.....	21
4.3 Instrumentação.....	21
4.4 Calibração.....	24
5 Resultados e Discussões.....	26
5.1 Resultados da Calibração.....	26
5.2 Ensaio.....	27
6 Conclusão e Trabalhos Futuros.....	28
7 Referências Bibliográficas.....	29
Anexos.....	30
Anexo 1 Tabela de Dados do Ensaio.....	30
Anexo 2 Gráficos Resultantes do Ensaio.....	31
Anexo 3 Relatório de Erros e Possíveis Soluções.....	33

1 Introdução

A instrumentação é a aplicação de instrumentos de medida para o monitoramento, sensoriamento e medição de grandezas [1]. Atrás dessa definição, tem-se a aplicação de diversas áreas da Engenharia, como a Mecatrônica (eletrônica; sistemas de controle), a Mecânica (estudo da cinemática, dinâmica, teoria de vibrações, outras grandezas mecânicas), a Química (materiais e seu comportamento a diversos ambientes) e a Estrutural (teoria de resistência de materiais).

Dividem-se as aplicações da engenharia de medição em duas categorias: a de medição em Engenharia Experimental, relacionada à aquisição de informação, e medição em sistemas de monitoração e controle [2].

A Engenharia Experimental tem a aquisição de informação como uso para os processos de medição. A Engenharia de Medição pode ser subdividida em três grupos: pesquisa, desenvolvimento e teste de desempenho. A pesquisa refere-se a descoberta de novos conceitos, enquanto desenvolvimento refere-se ao aprimoramento dos conceitos descobertos, de modo a torná-los utilizáveis pela humanidade. O teste de desempenho é feito após o desenvolvimento, de modo a comprovar a qualidade do produto final [2].

A medição em sistemas de monitoração e controle está relacionada com o controle de sistemas dinâmicos. Esses sistemas usam sensores para coletar dados relacionados aos processos e alimentar os dispositivos de controle, de modo a tornar o sistema estável [1].

Nos processos de usinagem, a instrumentação assume papel importante quando se deseja aperfeiçoar a fabricação de peças metálicas, já que são muitas as variáveis do processo: velocidade de corte, velocidade de avanço, profundidade de corte, material da peça, material da ferramenta, geometria da ferramenta, condições da máquina de

usinagem e vibração. Portanto, deve-se saber como instrumentar o sistema de modo a adquirir as informações que se deseja.

Nesse trabalho, desenvolveu-se um sistema que adquirisse as forças de usinagem no processo de furação de um corpo-de-prova de aço. Com isso, busca-se estimar um parâmetro que quantifique a usinabilidade do material.

2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são: projetar, instrumentar e calibrar um dispositivo munido de extensômetros, para ser usado em furadeiras industriais. Esse dispositivo estará ligado a um sistema para aquisição dos dados, de forma a avaliar as forças resultantes da furação em corpos-de-prova de um aço utilizado em construção mecânica.

3 Revisão Teórica

3.1 Furação

O processo de furação é um dos processos mais utilizados na indústria manufatureira, uma vez que a maioria das peças fabricadas passa por esse processo [3]. Nas indústrias automotivas, o maior tempo gasto na fabricação é justamente em processos de furação. Porém, esses processos sofreram poucos avanços comparativamente com outros processos de fabricação. O fator limitante foi o diâmetro requerido para os furos é a alta velocidade de rotação. Tal velocidade não podia ser alcançada com as furadeiras convencionais; porém, com os tornos CNC chegando facilmente a 6000 rpm, aumentou-se o ritmo de desenvolvimento das brocas e dos tratamentos térmicos nas peças para otimizar esse processo [3].

As forças resultantes do processo de furação são o momento torçor - M_t , resultante do movimento de rotação da broca sobre a peça, e a força de penetração - F_p , resultante da velocidade de avanço da máquina [4]. Na **figura 1** é apresentado um esquema que mostra as duas componentes da força de usinagem:

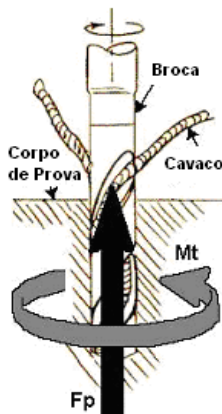


Figura 1 – Forças de usinagem resultantes do processo de furação.

3.2 Extensômetros

Extensômetros (“*strain gage*”) são sensores utilizados para a medição de deformação em superfícies. São resistências elétricas, cuja deformação da estrutura acompanha uma variação proporcional no valor dessa resistência. Esses sensores têm utilidade tanto para a análise da tensão em máquinas e estruturas, quanto como transdutores para medidas de força, pressão, torque, deslocamento, entre outras aplicações [2].

O extensômetro tem como princípio de funcionamento a variação do seu valor de resistência elétrica conforme a sua rede de fios é alongada ou comprimida, da mesma maneira que a superfície à qual está fixado comprime-se ou alonga-se [5]. Tal afirmação pode ser constatada pela equação 1 [1], que é representada na **figura 2**:

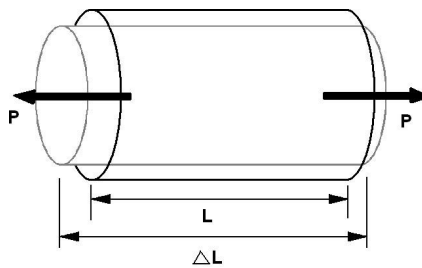


Figura 2 - Variação de comprimento com uma força P.

$$R = \rho L / A \quad (1)$$

onde R: em ôhms

L: em m

A: em m²

ρ: em ohms* m² / m

Mostra-se por diferenciação dessa equação 2 e rearranjo matemático [1] (que não é o escopo desse trabalho) que:

$$dR / R = d\rho / \rho + dL / L * (1 + 2\nu) \quad (2)$$

Determina-se que a variação da resistência é diretamente proporcional à variação do comprimento, já que o coeficiente de Poisson e a resistividade do material são constantes.

A sensibilidade (“*gage fator*”) à deformação é o termo usado para caracterizar a variação da resistência de um condutor em relação à variação do seu comprimento, sendo definida por “S”, conforme a equação 3 [1]:

$$S = (\Delta R / R) / (\Delta L / L) = (1+2\nu) + (dp / \rho) / (dL / L) \quad (3)$$

Portanto, a sensibilidade é definida por dois fatores: a variação das dimensões do condutor (L), da área (2v) e da variação da resistência específica (dp / ρ). É também através desse fator que se define o extensômetro que melhor ajuste ao caso [1].

O eixo principal de um extensômetro é a direção na qual o medidor é mais sensível à deformação, isto é, a direção na qual a variação de resistência para uma determinada deformação é maior. Recomenda-se utilizar o extensômetro de modo que o seu eixo principal esteja alinhado com o campo de tensões, de modo a conseguir melhor uso do sensor [8] como é apresentado na **figura 3**.

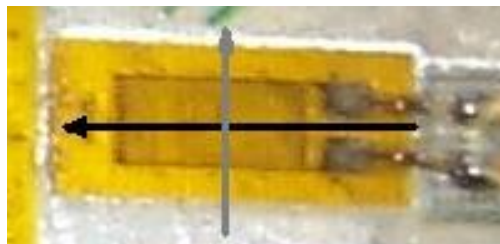


Figura 3 – Eixo principal do extensômetro (eixo preto) e eixo transversal (eixo cinza).

3.3 Ponte de “Wheatstone”

Extensômetros arranados em Ponte de “Wheatstone” tem seu esquema apresentado na **figura 4**. Esse arranjo mede com exatidão as pequenas variações no valor das resistências, pela diferença de potencial na saída da ponte, já que ela se desequilibra.

O circuito apresentado na **figura 4** é utilizado para medir as variações de resistência através da variação da tensão.

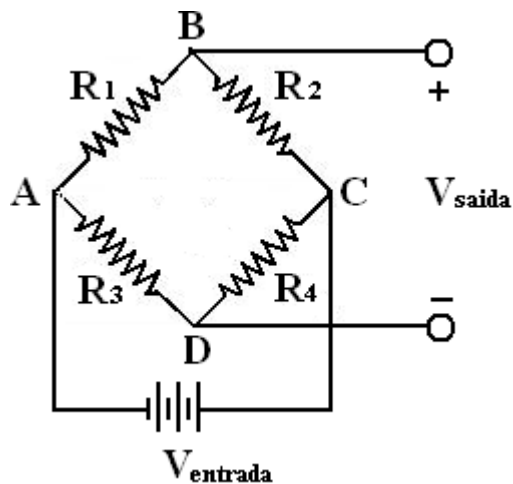


Figura 4 - Circuito da Ponte de “Wheatstone” com resistores [6].

Inicialmente, se a ponte está balanceada, ao aplicarmos uma voltagem entre os pontos A e C (entrada), não será registrada diferença de potencial entre os pontos B e D (saída). Entretanto, mudanças no valor das resistências irão causar desbalanço na ponte, e a voltagem de saída será proporcional a esse desbalanço. Para exemplificar o fenômeno, trocaremos a resistência fixa R_1 da **figura 4** por uma resistência variável, seguindo o raciocínio utilizado por Considine [1]. A voltagem V_{AB} relativa à resistência R_1 é dada por:

$$V_{AB} = R_1 / (R_1 + R_2) \text{ volts} \quad (4)$$

De maneira similar, temos que a queda de voltagem em R4 é dada por

$$V_{AD} = R_4 / (R_1 + R_2) \text{ volts} \quad (5)$$

A voltagem de saída, então, pode ser determinada pela voltagem entre os pontos B e D, V_{BD} , que é dada por:

$$V_{saída} = V_{BD} = V_{AB} - V_{AD} \quad (6)$$

Substituindo a equação 3 e 4 na equação 5 e ordenando os termos temos que:

$$V_{saída} = R_1 / (R_1 + R_2) - R_4 / (R_1 + R_2)$$

$$V_{saída} = (R_1 R_3 - R_2 R_4) / (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) \quad (7)$$

Qualquer mudança no valor da resistência R1 tira a ponte do equilíbrio conforme mostra a equação 8.

$$V_{saída} = ((R_1 + \Delta R_1) R_3 - R_2 R_4) / ((R_1 + \Delta R_1) + R_2)(R_3 + R_4) \quad (8)$$

4 Materiais e Métodos

Na construção do corpo do dispositivo, utilizou-se uma liga de alumínio comercial, cuja composição está tabelada abaixo:

Tabela 1 – Composição química padrão para dispositivo ABNT 1100 (% em massa)

Alumínio				
%C	%Al	%Cu	%Mn	%Si
-	99,00	Max 0,2	Max 0,05	1,0

Para teste do dispositivo, preparou-se um ensaio com dez corpos-de-prova de aço 1045, com a seguinte composição química:

Tabela 2 - Composição química padrão para calibração do Aço ABNT 1045 (% em massa). Balanço corresponde ao Fe.

Aço									
%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%Al
0,465	0,24	0,72	0,03	0,026	0,19	0,12	0,03	0,16	0,023

4.1 Projeto do Dispositivo

4.1.1 Descrição do Dispositivo

O dispositivo projetado tem um corpo cilíndrico de diâmetro 50mm por 60 mm de altura, com um furo de 40mm de diâmetro e 50mm de altura. Esse cilindro está sobre uma base também cilíndrica, de 200 mm de diâmetro por 20mm de altura. O material utilizado para a construção do dispositivo foi alumínio. A representação esquemática é apresentada na **figura 5**.

Foram feitos três chanfros passantes de 30mm de comprimento e 5mm de largura na base. Os chanfros têm a função de fixar o dispositivo na mesa da furadeira. A

fixação deve ser feita com parafusos de 5mm de diâmetro. Os chanfros estão alinhados radialmente com o cilindro, e estão a 120° um em relação ao outro. Os motivos dessa geometria estão relacionados com a homogeneização das tensões resultantes, o que será explicado mais a diante.

A fixação do corpo-de-prova no dispositivo tem grande importância na garantia de precisão nas medições. Como o que será medido é a tensão resultante das forças de usinagem do corpo-de-prova sobre o dispositivo, deve-se garantir que não haja escorregamento do corpo-de-prova. Além disso, deve-se garantir que essas forças sejam transmitidas de maneira homogênea, para que o campo de tensões também se comporte homogeneamente.

Foi feita uma primeira avaliação para a fixação dos corpos-de-prova. Nessa avaliação estudou-se o uso de braçadeiras de aço. Essas, porém, se mostraram ineficazes, já que não conseguiram comprimir o alumínio o suficiente para que o corpo-de-prova não escorregasse. Analisou-se então o uso de chavetas. A vantagem é que não há escorregamento após o início do processo. Porém, a região de contato entre as chavetas e o corpo de prova é muito pequena, o que pode gerar tensões não homogêneas. Para minimizar esse efeito, utilizaram-se oito chavetas simétricas. Foram feitos oito rasgos passantes nas paredes do cilindro superior para a passagem das chavetas, como mostra **figura 5**.

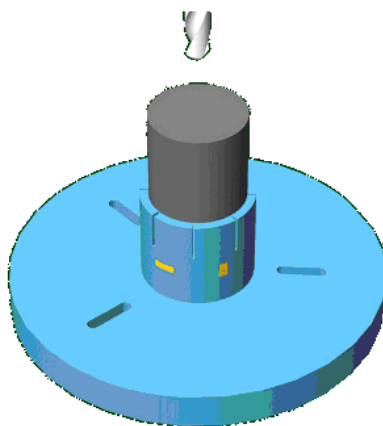


Figura 5 - Desenho 3D em CAD do dispositivo

Porém, as chavetas não apresentaram uma fixação adequada, conforme visto em resultados de ensaios realizados com esse sistema. Partiu-se então para uma outra solução, agora baseada no uso de quatro parafusos simétricos. Foi usinada também uma camisa de alumínio para ajudar no suporte aos parafusos.

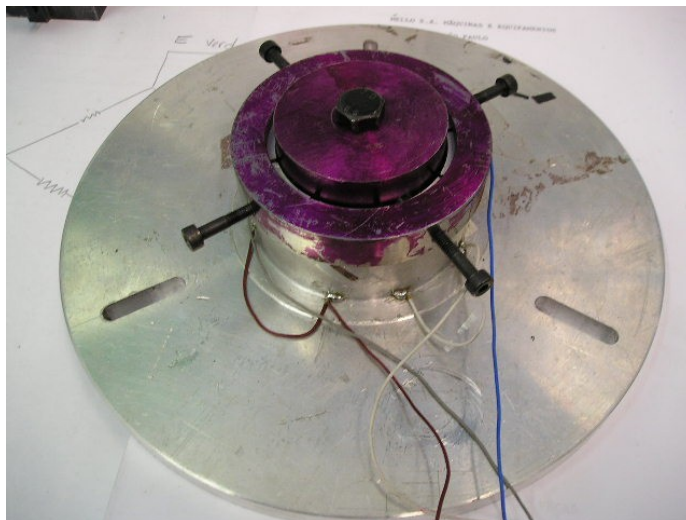


Figura 6 – Dinamômetro para Furação, em seu formato final.

4.1.2. Cálculo das Dimensões

Para o dimensionamento da base do dispositivo, utilizaram-se dados teóricos para determinar as forças de usinagem resultantes do processo de furação. Para tal, utilizou-se a fórmula de Kronenberg [3] para a determinação do Momento Torçor (em kgf*mm) na furação sem pré-furo.

$$M_t = C_1 * D^{x_1} * f^{y_1} \quad (9)$$

onde D: em mm

f: em mm/volta

Obteve-se o valor de 9,335 Nm para o momento torçor. Utilizou-se os dados do aço ABNT 1055, broca de 5mm de diâmetro, avanço de 2 mm/volta. Utilizou-se a teoria de estado duplo de tensão em um cilindro, conforme a teoria de resistência dos materiais. Selecionou-se como material o alumínio, pela sua baixa rigidez e baixa densidade (em comparação com outros materiais metálicos, como o ferro e os aços),

qualidades que permitem amplificar as deformações na superfície do material e o transporte do dispositivo.

4.2 Construção do Dispositivo

O dispositivo foi torneado a partir de um cilindro maciço de alumínio. Depois que se torneou as paredes externas, passou-se para a fabricação do suporte para o corpo-de-prova, através do torneamento da parede interna do cilindro superior. Em seguida, foram feitos os chanfros passantes na base, para a fixação na mesa da furadeira, e então os rasgos passantes no suporte da peça, para as chavetas. Uma vez que esse sistema de fixação do corpo-de-prova se mostrou pouco eficaz, fez-se uma camisa de alumínio furada em quatro pontos, e quatro parafusos são então usados para fazer a fixação do cilindro de aço no dispositivo.

4.3 Instrumentação

Os sensores foram arranjados na forma de ponte de “Wheatstone”. Os valores das resistências são os mesmos. Devido a disposição dos extensômetros, a variação do comprimento se alternou: as resistências R1 e R3 foram alongadas, e as resistências R2 e R4 foram comprimidas, conforme mostra a figura 6 e as equações de 10 a 13. O momento em preto, na parte superior da figura, é o Momento Torçor, resultante da ação da broca sobre o corpo-de-prova; o momento reativo ao momento torçor está representado em cinza, na parte inferior da figura. Em vermelho, temos a linha de simetria.

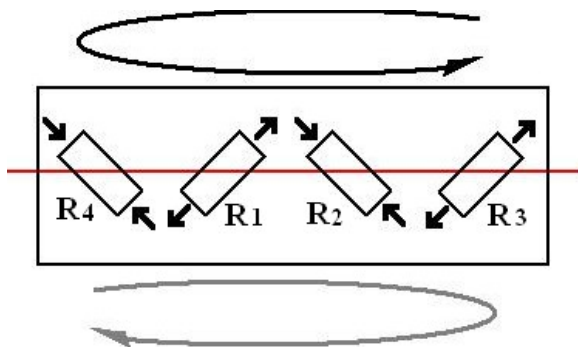


Figura 7 – Esquema de posição dos extensômetros colados na parede do dispositivo.

$$R1 = R1 + \Delta R1 = R + \Delta R \quad (10)$$

$$R2 = R2 - \Delta R2 = R - \Delta R \quad (11)$$

$$R3 = R3 + \Delta R3 = R + \Delta R \quad (12)$$

$$R4 = R4 - \Delta R4 = R - \Delta R \quad (13)$$

Substituindo as equações de 10 a 13 na equação 7 tem-se que:

$$V_{saída} = ((R+\Delta R)(R+\Delta R) - (R-\Delta R)(R-\Delta R)) / ((R+\Delta R) + (R-\Delta R))((R+\Delta R) + (R-\Delta R))$$

$$V_{saída} = \Delta R/R \quad (14)$$

Ou seja, o arranjo é equivalente ao caso de um único extensômetro deformando (ver equação 3).

Depois de determinada a posição dos sensores, começou-se o processo de instrumentação com o estudo das técnicas de colagem de extensômetros. Desenvolveu-se uma seqüência de tarefas, e então se separaram os materiais a serem utilizados.

Os materiais utilizados foram uma pinça de aço, lixa de granulação média (grana 300), tesoura, gaze, álcool etílico líquido, morsa, fita adesiva transparente, adesivo instantâneo (LOCTITE 496, 33938 IDH 268696), extensômetros com compensação de temperatura (KYOWA tipo KFG-5-120-C1-11, lote número Y31655, GAGE FACTOR $2,11 \pm 1,0\%$), folhas de plástico antiaderente (que acompanhavam os extensômetros), conectores e o corpo do dispositivo.

Iniciou-se o processo prendendo o corpo do dispositivo na morsa e lixando os locais onde seriam fixados os sensores. As paredes devem ser lixadas para retirar quaisquer impurezas superficiais, além de tornar a superfície mais rugosa, e, portanto, mais propícia para o procedimento de colagem. Utilizou-se uma lixa de grana 300. Experiências realizadas com lixas de granulação mais alta (grana 600) se mostraram ineficazes, pois na etapa seguinte, de utilização do adesivo, a mesma não penetrou nas ranhuras por serem muito finas, e o sensor não permanecia colado. Usando granulação mais baixa, percebeu-se que a colagem se mostrou muito mais eficiente.

Após toda a superfície ter sido devidamente lixada, limpou-se com álcool e gaze, com auxílio da pinça de aço. O corpo do dispositivo foi então levado para ser marcado no riscador da oficina. Mediu-se e riscou-se cuidadosamente a altura de fixação dos sensores, e depois a posição relativa entre eles, que foi de 45°.

A etapa seguinte foi de limpeza da área a ser colado o extensômetro. Utilizaram-se as gazes umedecidas com álcool que, com a ajuda da pinça, era passada somente uma vez, e sempre no mesmo sentido, no local de colagem, de modo a retirar quaisquer impurezas, como resquícios de grãos soltos do processo de lixamento, óleo da mesa do riscador, gordura, pó do ambiente, para então ser aplicada a cola e o extensômetro.

Em seguida, prepararam-se os extensômetros para a colagem. Cuidadosamente, os sensores foram manuseados utilizando uma pinça de aço, através dos seus fios, e nunca pela fita (onde se encontra a malha de resistência). Fixou-se na fita adesiva pela malha, de modo que os fios ficassem para fora da fita. Posicionava-se o sensor a ser colado, e fixava-o na parede do dispositivo. Então, coloca-se entre os fios e a parede uma outra fita adesiva, de modo a impedir que a cola vazasse para os fios, o que poderia atrapalhar o seu manuseio posteriormente.

Aplicou-se uma única gota de adesivo sob a fita do extensômetro, e, com a ajuda do plástico antiaderente, fez-se pressão, deslizando no sentido fios-fita, parando o movimento quando estivesse sobre o sensor, e permanecendo a pressão por aproximadamente 90 segundos. Após esse período, retirou-se o plástico antiaderente. Com cuidado, tentava-se deslocar o sensor do lugar para confirmar a sua boa fixação.

Deve-se observar as pontas da fita: qualquer indício de alguma ponta estar solta, ou então a presença de bolhas pode indicar má fixação. Se isso acontecer, deve-se retirar o extensômetro, e realizar novamente todos os passos descritos. Não se recomenda reutilizar os extensômetros que se soltaram.

Após a colagem dos sensores, deve-se retirar a fita adesiva entre os fios e o corpo do dispositivo, para a colagem dos conectores. Eles devem ser posicionados com a ajuda da pinça e da fita adesiva, seguindo o procedimento de colagem de extensômetro descrito. Tomou-se cuidado para não permitir que os fios entrassem em contato com o corpo metálico, de modo a evitar curto-circuito. Utilizou-se dois conectores por extensômetro: um para cada fio. Na **figura 7**, abaixo, mostra-se em detalhe os extensômetros colados e soldados.

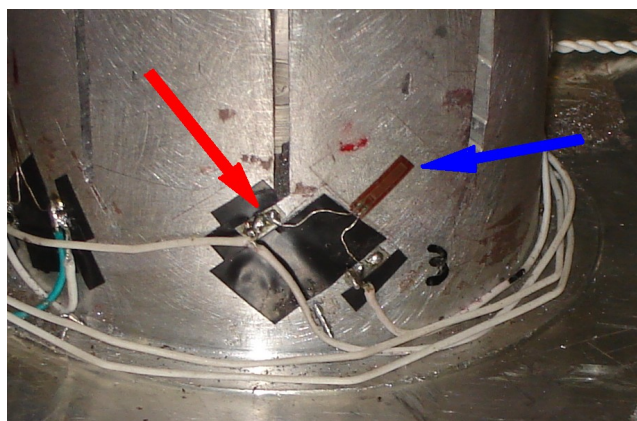


Figura 8 – Detalhe do dispositivo: seta vermelha mostra a solda; seta azul mostra o extensômetro colado.

Assim que essas etapas foram concluídas, passou-se para a soldagem dos fios. Foi utilizado um ferro de solda de temperatura ajustável e de ponta de solda fina. Os cabos utilizados são cabos blindados PEKON MANGA 26 AWG, de 5 pares de fios.

4.4 Calibração

Para a calibração usinou-se um corpo-de-calibração, um cilindro de aço de 60mm de altura e 50mm de diâmetro, com quatro furos rosqueados e equipado com um

parafuso sextavado. Fixou-se esse aparato no dispositivo através de quatro parafusos, como pode ser visto na **figura 8**.

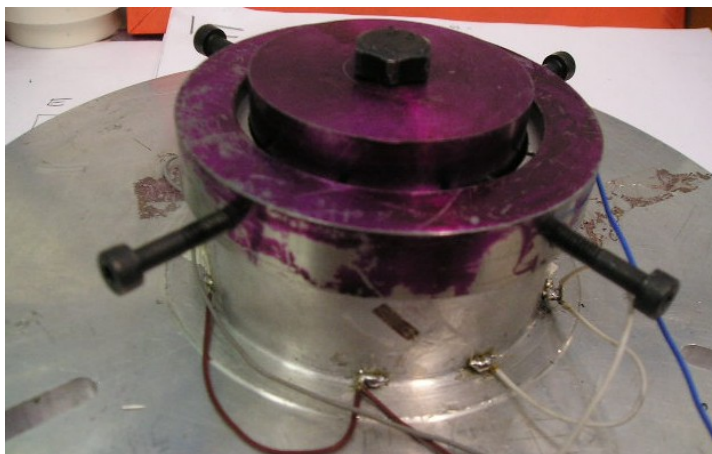


Figura 9 - Detalhe do Dispositivo, mostrando os parafusos de fixação.

Fez-se a calibração na LMO (Laboratório de Máquinas Operatrizes) do Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da EPUSP. Utilizou-se um divisor para fabricação de engrenagens, onde foi fixado o dispositivo. O conjunto foi fixado na mesa com a ajuda de sargentos. Com o dispositivo ligado à placa de aquisição, aplicou-se momentos de torção com um torquímetro graduado como mostra o esquema da figura 9, cuja numeração indica: 1. torquímetro analógico graduado; 2. divisor fixado sobre a mesa; 3. dispositivo fixado no divisor. Os sinais foram aqisitados conforme uma escala crescente de valores. Os resultados foram alocados em um gráfico.

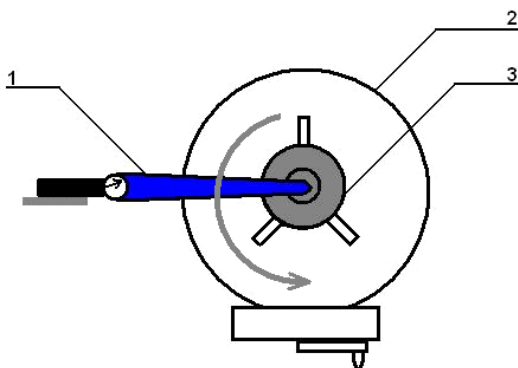


Figura 9 – Esquema dos equipamentos utilizados para a calibração.

5 Resultados e Discussões

5.1 Resultados da calibração

O gráfico obtido da calibração do dispositivo foi montado no programa Open Office 2.0, e está mostrado abaixo. Para a sua montagem, foi relacionado o valor da tensão promovida pelo torquímetro na superfície da base de alumínio nos extensômetros, e o valor de torção, mostrado no mostrador analógico do torquímetro. Iniciou-se com o valor de 3 N.m, e seguiu-se de unidade em unidade até o valor de 10 N.m, como se pode verificar na **figura 10**.

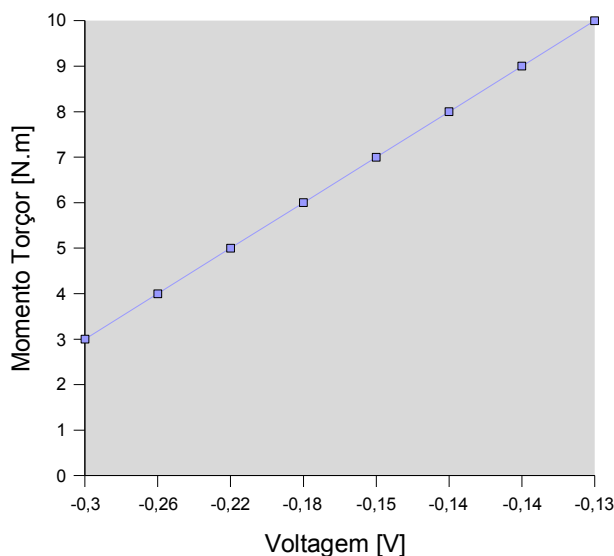


Figura 10 – Gráfico de Calibração do dispositivo de furação.

Pôde-se verificar a linearidade e proporcionalidade entre as duas variáveis, fator de correlação 0,945. Os dados da calibração (envolvendo o ganho – k) foram então arquivados, para serem carregados nos próximos ensaios.

Os ensaios devem ser feitos dentro da faixa linear da calibração; após o valor de aproximadamente 10 N.m, a curva de calibração rapidamente se torna não-linear.

5.2 Ensaio

Foram feitas duas séries de ensaios com o dispositivo – uma série com o sistema de fixação do corpo-de-prova com o uso de chavetas, e a segunda série com o uso de parafusos. A figura 11 mostra o sistema de aquisição. O anexo 1 apresenta os parâmetros de ensaios, o anexo 2 os resultados desses ensaios e o anexo 3 alguns problemas que podem ocorrer nos ensaios e suas possíveis soluções.

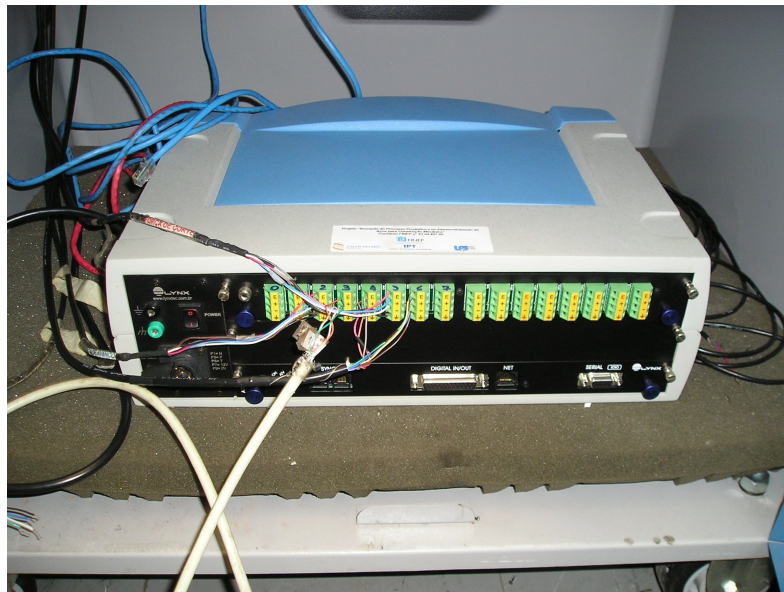


Figura 11 – Sistema de Aquisição.

6 Conclusão e Trabalhos Futuros

O dispositivo teve seus princípios básicos de funcionamento comprovados pela Curva de Calibração, que se demonstrou satisfatoriamente linear (em torno de 94,5% de linearidade).

Os primeiros ensaios se mostraram pouco confiáveis, devido à alta oscilação do sinal obtido. Porém, com o sistema de fixação do corpo-de-prova por parafusos, a oscilação diminuiu drasticamente, e resultados mais confiáveis puderam ser obtidos.

Assim que atestada a eficácia do dispositivo para Momento de Torção, através de comparação dos resultados dos ensaios sendo comparados com os dados teóricos, pode-se realizar testes com os mais diversos parâmetros de ensaio – velocidade de avanço, diâmetro da broca, material da broca, material do corpo-de-prova e diferentes tratamentos térmicos do mesmo. Inclusive há a possibilidade de serem adicionados novos extensômetros para a medição da Força de Penetração.

7 Referências Bibliográficas

- [1] HASLAM, J. A.; SUMMERS, G. R.; WILLIAMS, D. , Engineering instrumentation and control, Edward Arnold Publishers, 1981, Inglaterra.
- [2] WHEELER, A. J.; GANJI, R. A., Introduction to Engineering Experimentation, Prentice Hall, 1996, Estados Unidos da América.
- [3] DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L., Tecnologia de Usinagem dos Materiais, Artliber Editora, 4ª edição, 2003, Brasil.
- [4] FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo. Edgard Blücher Ltda. 1977.
- [5] FARIAS, M. C. M. Extensometria. Trabalho de PMC-5003 – Instrumentação e Análise de Medidas de Grandezas Mecânicas. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2000.
- [6] GUIMARÃES, A.R. Sistema para a medição das componentes da força de usinagem em operações de torneamento. Trabalho de Formatura. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2000.
- [7] Metals Handbook - Machining. USA. ASM, vol 16, 1989.
- [8] DIMLA E. DINLA SR.; Lister, P.M. On-line metal cutting tool condition monitoring. I: Force and vibration analysis. International Journal of Machine Tools & Manufacturing. Vol. 40, pp. 739-768, 2000.

Anexo 1

Tabela de Dados dos Ensaio

Parâmetro de ensaio do dispositivo com fixação por chavetas:

- Dimensão do Corpo de Prova: Altura 50mm Diâmetro 45mm
- Broca 5mm
- Velocidade de Avanço: 200 rpm

Parâmetros de ensaio do dispositivo com fixação por parafusos:

- Dimensão do Corpo de Prova: Altura 30mm Diâmetro 45mm
- Broca 5mm
- Velocidade de Avanço: 1100 rpm

Anexo 2

Gráficos Resultantes dos Ensaios

Dispositivo com Chavetas:

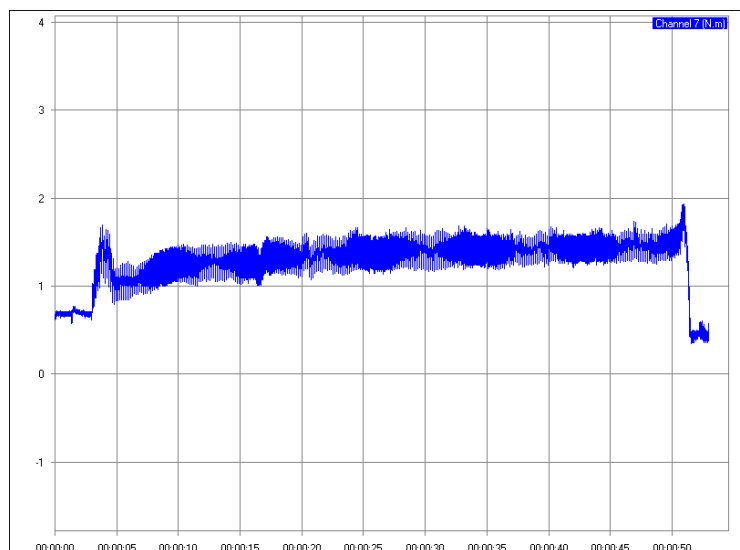


Figura 12 – Ensaio 1 do dispositivo com fixação do corpo-de-prova por chavetas.

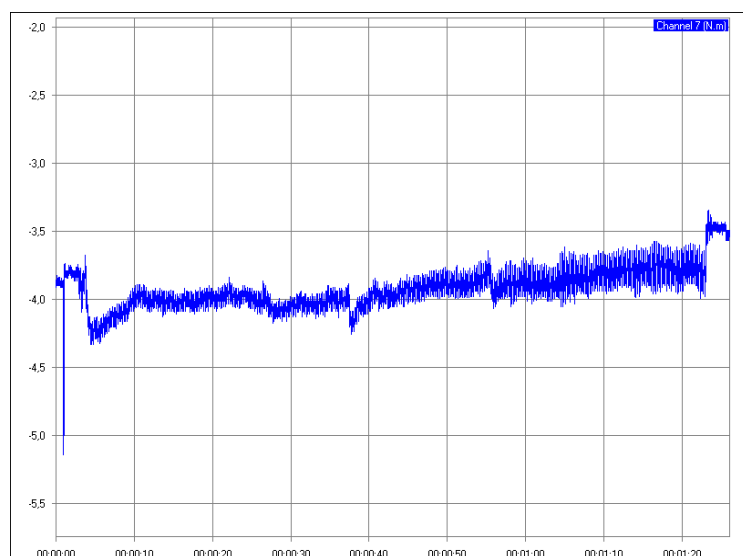


Figura 13 – Ensaio 2 do dispositivo com fixação do corpo-de-prova por chavetas.

Dispositivo com Parafusos

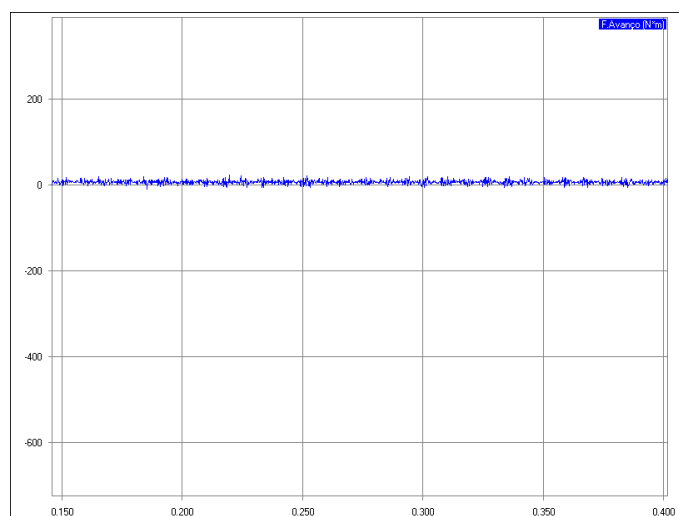


Figura 14 – Ensaio 1 do dispositivo com fixação do corpo-de-prova por parafusos.

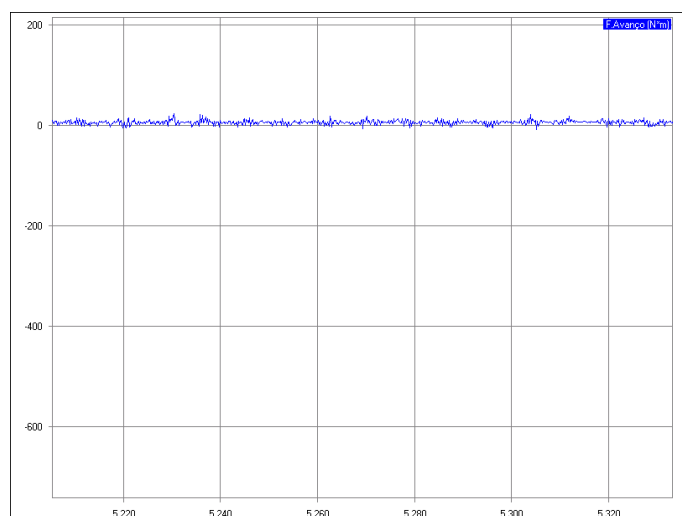


Figura 15 – Ensaio 2 do dispositivo com fixação do corpo-de-prova por parafusos.

Anexo 3

Relatório de Erros e Possíveis Soluções

Recomendação: Antes de checar esse relatório, sempre verificar todas as configurações do Sistema de Aquisição de Dados e realizar a configuração correta da porta que será usada dependendo do tipo de sensor que será utilizado. Deve-se sempre ler o manual de instruções e configuração da placa, que vem junto com o aparelho, e seguir todas as suas recomendações rigorosamente.

- *O dispositivo, quando conectado, apresenta-se saturado, com valor de voltagem muito elevado.*

Deve-se checar a conexão dos terminais do cabo do dispositivo na porta do sistema de aquisição. Caso não se resolva, deve-se checar as configurações de hardware dentro da placa, relativo a porta que está sendo utilizada e se a configuração das chaves corresponde a da ponte de “Wheatstone”.

- *A voltagem está oscilando muito.*

Trata-se provavelmente de um problema de isolamento. O dispositivo deve ser operado aterrado, e isolado da mesa de furação, de modo a minimizar a interferência de campos elétricos, magnéticos, correntes que possam interferir com o circuito de extensômetros.

- *O dispositivo não responde a torques aplicados no corpo-de-prova.*

Muito provavelmente o circuito está em curto. Deve-se verificar se os fios estão isolados e afastados da superfície metálica do dispositivo. Um caso mais raro que pode acontecer é do extensômetro ter sido danificado de alguma forma, perdendo as suas características elétricas, e assim a sua sensibilidade. Deve-se tomar muito cuidado com os fios do dispositivo, afim de não forçar os cabos, o que pode romper as soldas e, no pior caso, descolar ou romper algum extensômetro, impossibilitando o seu uso.