

Monografia de Graduação

Construção de Dinamômetro para avaliação de carregamentos na manufatura de componentes para a Indústria do Petróleo

Kandice Suane Barros Ribeiro

Natal, setembro de 2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CONSTRUÇÃO DE DINAMÔMETRO PARA
AVALIAÇÃO DE CARREGAMENTOS NA
MANUFATURA DE COMPONENTES PARA A
INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

KANDICE SUANE BARROS RIBEIRO

Prof. Dr. Adilson José de Oliveira

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Orientador

Prof. Dr. Walter Link

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Co-orientador

NATAL, 5 de setembro de 2014

Resumo

A manufatura dos componentes com a utilização de operações de usinagem para atribuir as formas, as dimensões, as tolerâncias e as texturas aos elementos desenvolvidos impõe grandes desafios ao planejamento de produção. A usinagem de materiais diretamente relacionados à indústria do petróleo necessita da compreensão das forças envolvidas para promover o correto dimensionamento dos sistemas e, conseqüentemente, a redução de custos de produção. Dessa forma, o entendimento das forças envolvidas no processo de usinagem é fundamental no meio de indústrias, por ser de grande valia para prevenção e/ou acompanhamento do desempenho do processo. Nesta perspectiva, neste estudo, um dinamômetro à base de extensômetros, capaz de medir três componentes de força durante operações de usinagem foi projetado e construído. Para leitura e armazenamento de dados de força e um sistema de aquisição de dados foi especificado. Sinais de força foram capturados e processados usando um computador pessoal e de programas para aquisição desenvolvidos. O dinamômetro foi desenvolvido principalmente para operações de fresamento, mas pode ser usado para medir força de usinagem durante quase todas as operações (torneamento, fresamento, furação, etc). Testes de calibração foram realizados e os resultados mostraram que o dinamômetro é eficaz na indicação de componentes de força de usinagem.

Palavras-chave: dinamômetro, força de usinagem, extensômetros, aquisição de dados

Abstrakt

Die Fertigung von Komponenten mit dem Einsatz von Bearbeitungsvorgängen, um die Formen, Abmessungen, Toleranzen und Texturen entwickelt Elemente zuweisen stellt hohe Herausforderungen an die Produktion. Die Bearbeitung von Materialien direkt an Öl- und Gasindustrie betreffen, erfordert ein Verständnis der beteiligten richtige Dimensionierung der Systeme zu fördern und damit die Produktionskosten zu reduzieren. So, das Verständnis der im Bearbeitungsprozess beteiligten Kräfte ist entscheidend in der Industrie, von großem Wert für die Prävention und Überwachung von Prozess oder Leistung. In dieser Perspektive hat eine DMS-Basis Dynamometer zum Messen von drei Kraftkomponenten während Bearbeitungsprozess konzipiert und gebaut. Um zu lesen, zu analysieren und speichern die Kraft Daten automatisch auf einem Computer bei der Metallschneiden, war ein Datenerfassungssystem auch verbunden mit dem Leistungsprüfstand entwickelt. Die Leistungsprüfstand wurde zunächst für Fräsarbeiten entwickelt, es kann auch verwendet werden, fuer die Schnittkräfte messung fast alle Bearbeitungen. Kalibrierungstests wurden geführt, und die Ergebnisse haben gezeigt, dass das Dynamometer verlässlich verwendet werden kann, um Schneidkräfte zu messen.

Stichworte: Leistungsprüfstand, Schnittkräfte, DMS, Datenerfassung

Abstract

The manufacture of components with the use of machining operations to assign the shapes, dimensions, tolerances and textures to developed elements imposes great challenges to production. The machining of materials directly related to oil and gas industry requires an understanding of the loads involved to promote correct dimensioning of the systems and, consequently, to reduce production costs. Thus, understanding the forces involved in the machining process is critical in industries, to be of great value for prevention and or monitoring of process performance. In this perspective, a strain gauge based dynamometer for measuring three-force components during machining process has been designed and constructed. In order to read, analyse and save the force data automatically on a computer during metal cutting, a data acquisition system was also connected to the developed dynamometer. Although the dynamometer was firstly developed for milling operations, it can be used to measure cutting forces during nearly all machining operations. Calibration tests were performed and the results has shown that the dynamometer could be used reliably to measure cutting forces.

Keywords: dynamometer, cutting forces, strain gauges, data acquisition

Agradecimentos

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que junto com a comissão gestora PHR14 contribuiu financeiramente para a realização deste projeto.

Lista de Figuras

Figura 1 – Componentes da força de usinagem no fresamento	5
Figura 2 – Força de corte principal em função do tempo para: $a_e=65$, $a_p=1,7$ mm, $f_z=0,12$ mm, $v=157$ m/min e $n=4$	7
Figura 3 - Força de usinagem em função do tempo para parâmetros de usinagem	8
Figura 4 – Componentes da força de corte em função do tempo para parâmetros de usinagem de $a_p=10$ mm, $f_z=6$ mm, $n=17$ e $v_r=6000$ rpm (a) e $v_r=18000$ rpm (b)	9
Figura 5 – Disposição do dinamômetro para realização de testes experimentais	12
Figura 6 - Desenho esquemático do elemento elástico do dinamômetro (a)	13
Figura 7 – Projeções ortogonais do dinamômetro (a) e do elemento elástico (b)	14
Figura 8 – Dinamômetro de dois meio-aneis octagonais	15
Figura 9 – Elemento elástico do dinamômetro extensométrico resistivo (a) e conjunto final (b)	16
Figura 10 – Extensômetro uniaxial (a), biaxial (b) e triaxial (c)	19
Figura 11 – Ponte de Wheatstone para resistências R1, R2, R3 e R4	20
Figura 12 – Esquema de ligação de $\frac{1}{4}$ de ponte	21
Figura 13 – Aplicação de $\frac{1}{2}$ ponte sem carregamento (a) e com carregamento (b)	22
Figura 14 – Ligação em configuração de ponte completa	22
Figura 15 – Cadeia completa do sistema de aquisição de sinal	26
Figura 16 – Centro de usinagem ROMI D600	29
Figura 17 – Adesivo de teflon e cola para extensômetros Z70	31
Figura 18 – Estação de solda	32
Figura 19 – Elementos modulares e sistema de aquisição	33

Figura 20 – Sistema de suporte de massas para calibração nas configurações X e Y	34
Figura 21 – Montagem do dinamômetro na mesa de calibração para ensaios na configurações X ou Y	35
Figura 22 – Teste de nivelamento	36
Figura 23 – Bancada de calibração	37
Figura 24 – Fluxograma de execução	38
Figura 25 – Projeto do dinamômetro	39
Figura 26 – Distribuição dos extensômetros no elemento elástico	40
Figura 27 - Análise de tensões de Von Mises (a) e da magnitude de deformação (b) no elemento elástico através do Método dos Elementos Finitos com carregamento de 1000 N no eixo X	41
Figura 28 – Extensômetros HBM LY13-3/350	42
Figura 29 – Usinagem da base superior (a), elemento elástico (b) e base inferior (c)	43
Figura 30 – Dinamômetro uniaxial	45
Figura 31 – Materiais utilizados na colagem e soldagem dos extensômetros	46
Figura 32 – Extensômetros e elemento elástico final	47
Figura 33 – Conector do módulo para extensômetros NI 9237	47
Figura 34 – Módulo de aquisição NI 9237	48
Figura 35 – Interface desenvolvida para análise do sinal de força (a) e diagrama de blocos (b)	49
Figura 36 – Curva de calibração do eixo X	50
Figura 37 – Simulação com o método dos Elementos Finitos com carregamento de 294,2 N no eixo X	51

Figura 38 – Curva de calibração do eixo Y	52
Figura 39 – Curva de influência de carregamentos em Y na componente X da força de usinagem	53
Figura 40 – Curva de calibração do eixo Z	54
Figura 41 – Simulação com o método dos Elementos Finitos com carregamento de 294,2 N no eixo Z	55
Figura 42 – Diagrama de blocos do programa de pós-processamento de dados	67

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Dados da calibração dos eixos X, Y e Z.....	69
--	----

Sumário

Resumo	ii
Abstrakt.....	iii
Abstract.....	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	viii
Sumário	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo geral	3
1.2 Objetivos específicos	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 Força de Usinagem.....	4
2.1.1 Análise experimental das componentes da Força de Usinagem	7
2.1.2 Simulação das componentes da Força de Usinagem.....	9
2.2 Dinamometria para Usinagem.....	11
2.3 Transdutores de força	17
2.3.1 Extensômetro	18
2.4 Ponte de Wheatstone.....	20
2.5 Aquisição de dados, estudo e condicionamento do sinal	23
3 METODOLOGIA	27
3.1 Projeto do dinamômetro e definição de extensômetros	27
3.2 Manufatura e análise dimensional.....	28
3.3 Instrumentação	29
3.4 Calibração estática.....	33
3.5 Fluxograma de execução	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39

4.1 Projeto do dinamômetro e definição de extensômetros	39
4.2 Manufatura e análise dimensional.....	42
4.3 Instrumentação	44
4.3.1 Ensaio preliminar de colagem e soldagem de extensômetros.....	44
4.3.2 Aplicação no dinamômetro	45
4.3.3 Sistema de aquisição e processamento de dados	47
4.4 Calibração Estática	50
5 CONCLUSÃO	56
6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	57
7 REFERÊNCIAS	58
ANEXO I – PROJETO DO DINAMÔMETRO	62
ANEXO II – PROGRAMAS DE AQUISIÇÃO	66
ANEXO III – DADOS DE CALIBRAÇÃO.....	68

1 INTRODUÇÃO

O petróleo, um dos recursos naturais de formação mais antiga, tem grande importância desde 1859, quando teve início o processo de extração, nos Estados Unidos. Com a expansão da utilização dos motores movidos a diesel, a indústria petrolífera apresentou grande crescimento em termos tanto de extração quanto de valor agregado ao petróleo. Desde então, tem-se novos desenvolvimentos a essa cadeia em função de recursos direcionados para linhas de pesquisa voltadas para áreas fundamentais tanto para extração quanto para mapeamento e tratamento. Nesta perspectiva, o desenvolvimento da área de manufatura é fundamental para construção dos diferentes componentes existentes nas plataformas e bases terrestres voltadas a extração do fluido, dentre outras aplicações e, por isso, possui grande relevância para o desenvolvimento do setor de petróleo (THOMAS *et al.* 2001).

Normalmente, os componentes críticos para extração - tais como brocas de perfuração - necessitam ser construídos em materiais com elevada dureza, resistência à abrasão e relativa tenacidade com o objetivo de suportar os carregamentos envolvidos durante a operação em campo. Neste sentido, a manufatura dos componentes utiliza operações de usinagem para atribuir formas ao produto final. A construção de componentes mecânicos para indústria do petróleo, bem como componentes que possuam aplicações específicas e que necessitem de reprodução e precisão em sua forma geométrica ou com acabamento específico, impõe muitos desafios à manufatura – os quais são melhor analisados quando se tem conhecimento das forças envolvidas durante o processo de manufatura (KORKUT, 2003).

Não obstante, a compreensão do(s) carregamento(s) envolvido(s) em um processo, de acordo com Klocke (2011), é uma das variáveis que melhor descreve qualquer processo de manufatura. Dessa forma, o desenvolvimento de equipamentos capazes de monitorar essa variável durante o processo de manufatura, principalmente de componente com elevada resistência à abrasão, é extremamente importante para avaliar tanto a qualidade e geometria da superfície de corte e a dinâmica do processo de fabricação.

Ademais, com o acompanhamento da força empregada no processo de usinagem pode-se estimar tanto o tempo útil das ferramentas quanto a qualidade da peça final. É importante enfatizar que estas avaliações dependem de uma série de fatores, tais como tipo de sensores, rigidez do sistema, nível de ruído no sinal, entre outros. Dentre os sensores e sistemas de sensoriamento envolvidos no monitoramento da força de usinagem, tem-se dinamômetros,

acelerômetros, sensores baseados em emissões acústicas, etc. (TORTIS e SORTINO, 2011; YALDIZ e ÜNSAÇAR, 2006).

A utilização de células de carga triaxiais (dinamômetros) é a solução mais empregada na avaliação de carregamentos dinâmicos na manufatura de componentes. Neste caso, dois sensores são mais utilizados para viabilizar essa avaliação: extensômetros e cristais piezoresistivos. No primeiro caso, os sensores são baseados no princípio piezoresistivo, em que uma alteração na grandeza de entrada (deformação, no caso) causa uma variação na resistência elétrica do material. No segundo caso, o princípio de funcionamento se baseia no fato de que concentração de cargas elétricas são alteradas, em certos materiais (como o quartzo), quando submetidas à tensão mecânica (SHAW, 2005).

Na literatura são encontrados diversos sistemas para análise de forças na usinagem e, em função da facilidade de construção, a utilização de dinamômetros baseados em extensômetros é preponderante. Além disso, permite-se uma ampla faixa de modelos e tamanhos, os quais podem se adaptar às necessidades de cada processo, e uma técnica que pode ser facilmente extrapolada para outros processos – como a conformação mecânica e metalurgia do pó. Com o conhecimento dos carregamentos envolvidos, todo processo de manufatura pode ser otimizado.

Dessa forma, este projeto tem como objetivo o desenvolvimento de um dinamômetro com base em extensômetros e o desenvolvimento de um sistema de aquisição e processamento de dados para a medição de componentes tridimensionais de forças envolvidas em processos de usinagem. O dinamômetro, por sua vez, terá como características sensibilidade às componentes de força no sistema cartesiano tridimensional e a resposta adequada para possibilitar o monitoramento durante o processo de fabricação, bem como atenderá a características próprias as quais possibilitam a segurança do valor indicado durante a aquisição dos dados – rigidez, sensibilidade e precisão.

Assim, o desenvolvimento dessa pesquisa é de grande importância diante do constante crescimento da indústria de petróleo e a relevância da análise de forças durante o processo de usinagem. Além disso, a tecnologia desenvolvida com este aparato experimental pode ser facilmente extrapolada para muitos sistemas em que a análise de carregamentos é necessária. E, esse estudo contribuirá para a difusão do conhecimento científico de métodos de construção e análise dos dados emitidos pelo sensor de força e do aperfeiçoamento de técnicas de fabricação mecânica.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é a construção de um dinamômetro à base de extensômetros resistivos para medição de força de usinagem, em conjunto com um sistema de aquisição e processamento de dados.

1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral desta pesquisa, os seguintes objetivos específicos são necessários:

- Projeto de um dinamômetro para medição de forças em três componentes ortogonais;
- Manufatura dos componentes e montagem do dinamômetro;
- Definições técnicas para o manuseio e colagem de extensômetros;
- Definição de um sistema de aquisição e processamento de dados com base na plataforma National Instruments (NI);
- Calibração estática do sistema.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A compreensão dos fatores relacionados à construção do dinamômetro está fundamentada em quatro pilares: (a) o estudo dos esforços envolvidos; (b) a determinação da melhor geometria do dinamômetro; (c) a escolha dos sensores adequados; e (d) a aquisição e processamento dos sinais. O primeiro passo é entender a magnitude dos carregamentos envolvidos no processo. Em seguida, a determinação da melhor geometria faz-se necessário a fim de garantir um efetivo desempenho do equipamento, juntamente com a determinação do sensor. Por fim, a aquisição e o processamento dos sinais será apresentada como método de armazenamento e análise dos resultados obtidos.

2.1 Força de Usinagem

Conhecer a força envolvida no processo de usinagem, de acordo com Klocke (2011), é a variável que melhor pode descrever qualquer processo de manufatura. Segundo Ribeiro, Abrão e Sales (2006), o conhecimento a respeito das força de usinagem é de fundamental importância para determinação da qualidade geométrica e dimensional da superfície usinada, visto que suas componentes podem induzir deflexões nas ferramentas. Ainda, o estudo da força de usinagem também possibilita correlacionar o processo com o desgaste sofrido pelas ferramentas.

Além de permitir um maior controle sobre a capacidade real do processo, a otimização de gastos com energia e os próprios custos de produção, o entendimento de forças envolvidas no processo de usinagem tem sido estudado e se mostrado fundamental no meio de indústrias, para ajuste dos parâmetros de usinagem visando o controle sobre a potência exigida da máquina (KLOCKE, 2011). Não obstante, para indústrias no ramo de manufatura de componentes envolvidos no processamento, refino e outras áreas ligadas à produção de petróleo, este estudo é de grande valia para prevenção e acompanhamento do desempenho global do processo. Neste tópico, alguns conceitos básicos para determinação das componentes de força envolvidas no processo dinâmico de fresamento serão abordados, bem como métodos para determinação dessa força.

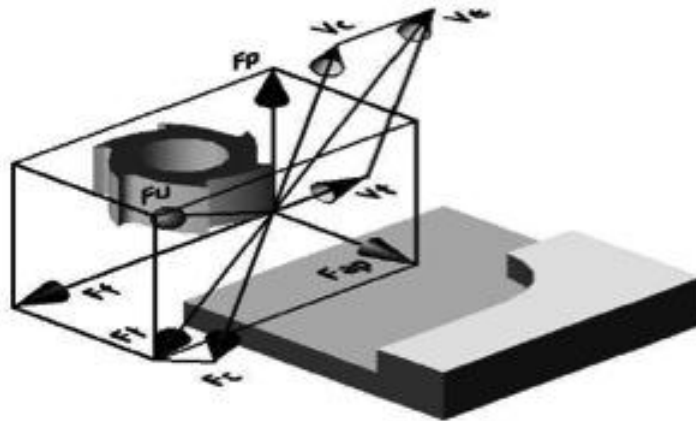
Durante o processo, a Força de Usinagem (F_u), é estudada através de suas três componentes básicas: a Força de Corte (F_c), a Força de Avanço (F_f), e a Força Passiva (F_p). Fatores como a geometria da ferramenta, as condições de usinagem e o tipo de material que se

deseja usinar afetam diretamente a força necessária, de acordo com os parâmetros de usinagem. A força de corte (plano de trabalho) pode ser estimada em função da área superficial do cavaco (A) e da pressão específica de corte (k_s) como mostra a Equação 1 (Shabana 2008).

$$F_c = k_s A \quad (1)$$

A Força Total de Usinagem é decomposta em duas componentes pertencentes ao plano de trabalho, a força ativa (F_t) e a força passiva. A força de corte – projeção da força de usinagem na direção de corte – e a força de avanço, a qual pode ser definida como sendo a componente da força de usinagem na direção do avanço. A força de apoio é a componente resultante da força de usinagem sobre a direção perpendicular à direção de avanço, no plano de trabalho. A disposição espacial das componentes da força de usinagem acima descrita se dá conforme o esquema mostrado na Figura 1 (Ribeiro, Abrão e Sales, 2006).

Figura 1 – Componentes da força de usinagem no fresamento



Fonte: Ribeiro, Abrão e Sales (2006)

Conhecidas as componentes da força de usinagem, durante o processo de fresamento, pode-se observar as seguintes formulações matemáticas que relacionam a força total envolvida, as forças de apoio, de avanço e de corte:

$$F_t = F_{ap} + F_c + F_f \quad (2)$$

$$F_u = \sqrt{F_p^2 + F_t^2} \quad (3)$$

Com base nas Equações (1) e (2), a força de usinagem pode ser estimada uma vez diante do conhecimento das condições de usinagem. A variação de parâmetros, como a velocidade de corte, a profundidade de usinagem e a presença ou não do fluido de corte são fatores principais que faz com que haja variação da força de corte e, conseqüentemente, da qualidade da superfície de peças de usinagem. Essa força resultante também depende do desgaste da ferramenta de forma que esse recurso tem sido usado como referência indireta à medição e monitoramento de desgaste da ferramenta, para manter a qualidade da superfície desejada (SHABANA, 2008).

Ou ainda, segundo Altintas (2000):

$$F_u = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (4)$$

Onde F_x , F_y e F_z são as componentes da força de usinagem nos eixos ortogonais x, y e z do plano cartesiano.

Nesta perspectiva, a força é estimada e, na maioria das vezes, utilizada para se determinar a potência da máquina-ferramenta, bem como para controle do processo e seleção das ferramentas envolvidas no processo, tendo em vista o desgaste sofrido por elas e assim seu tempo de vida útil. Há duas formas básicas que possibilitam a obtenção de uma indicação: através de simulações e por meio de testes experimentais. Essa última é o caso da determinação, em tempo real, de forças envolvidas a partir da utilização de dinamômetro.

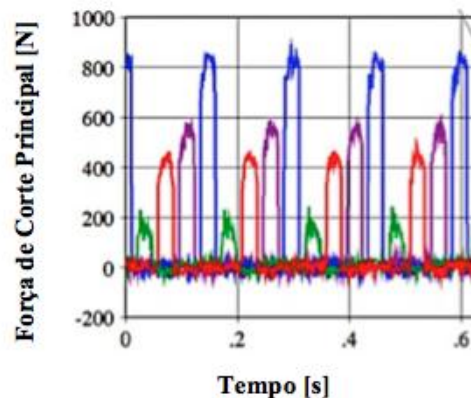
Com objetivo de evidenciar a magnitude da força de usinagem, esta revisão analisa alguns trabalhos acadêmicos, os quais serão expostos e discutidos nos dois diferentes ponto de vista da determinação das componentes de força de usinagem. A seguir, os trabalhos que serão estudados foram fundamentados em estudos e desenvolvimentos experimentais e aplicados na usinagem de diferentes materiais, a partir do emprego de distintos parâmetros de usinagem. E, posteriormente, uma análise desses mesmos trabalhos será feita através da simulação das componentes da força de usinagem conforme programas específicos disponíveis nos sites de fabricantes de ferramentas.

2.1.1 Análise experimental das componentes da Força de Usinagem

A análise das componentes da força de usinagem envolvidas na manufatura de componentes, como já discutido anteriormente, possui também relação direta com as propriedades mecânicas e a microestrutura do material usinado que se submete ao processo. Neste item, trabalhos que possuem o objetivo a medição experimental de forças envolvidas durante o processo de usinagem de materiais com diferentes dureza e propriedades à usinagem com diferentes parâmetros serão analisados a fim de fundamentar o dimensionamento do dinamômetro a ser desenvolvido.

Andersson e Andersson (2011) utilizaram um centro de usinagem com potência de 18 kW para usinar uma peça-teste de Aço AISI 5120. A máxima rotação no eixo árvore era de 7500 rpm e o diâmetro da ferramenta era de 120 mm. Durante os testes iniciais a força de corte foi acompanhada por um dinamômetro piezoelétrico. Os ensaios revelaram uma relação diretamente proporcional entre a força de corte e a espessura do cavaco. Um dos experimentos realizados teve como parâmetro profundidade axial de usinagem de $a_p = 1,7$ mm, $f_z = 0,12$ mm e velocidade de corte de $v_c = 157$ m/min, profundidade radial de usinagem de $a_e = 65$ mm e número de dentes $n = 4$, atingiu uma força de corte máxima de, aproximadamente, 850 N, como mostrado na Figura 2.

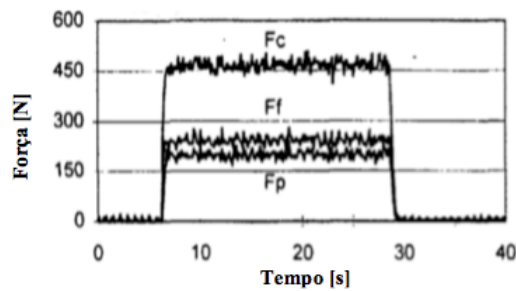
Figura 2 – Força de corte principal em função do tempo para: $a_e=65$, $a_p=1,7$ mm, $f_z=0,12$ mm, $v=157$ m/min e $n=4$



Fonte: Andersson e Andersson (2011)

Santochi *et al.* (1997), utilizando um dinamômetro à base de extensômetros, verificaram as componentes da força de usinagem envolvidas no torneamento. O material usinado foi o aço AISI 1015 e a usinagem utilizou os seguintes parâmetros: $v_c=160$ m/min, $f=0,2$ mm/rev e $a_p=1$ mm. O resultado obtido das componentes de força indicada com esse desenvolvimento está disposto na Figura 3.

Figura 3 - Força de usinagem em função do tempo para parâmetros de usinagem de $f=0.2$ mm/rev, $a_p=1$ mm, $v_c=160$ m/min



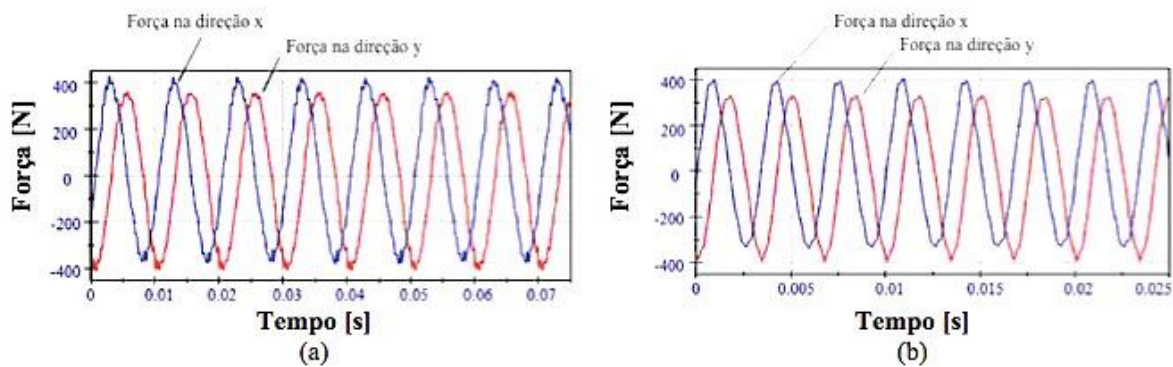
Fonte: Santochi *et al.* (1997)

De acordo com a figura 3, diante dos parâmetros utilizados na usinagem desse aço obteve-se, aproximadamente, uma média de 455 N, 230 N e 180 N para força de corte, força de avanço e força passiva, respectivamente. Assim, com base na Equação (4), determina-se uma força de usinagem de 540 N.

Klocke *et al.* (2012) montaram um sistema para aquisição RCD (Dinamômetro Rotativo) de alta velocidade montado em um centro de usinagem de cinco eixos com máxima rotação no eixo-árvore de 18000 rpm. A peça usinada teve como material uma liga a base de níquel (Inconel 718) e foram utilizados os seguintes parâmetros de $a_p=10$ mm, $n=17$, $f_z=6$ mm e utilizou dois parâmetros de rotação do eixo-árvore: no primeiro ensaio $v_r=6000$ rpm e no segundo $v_r=18000$ rpm. O autor não fornece o diâmetro da ferramenta utilizada no ensaio.

Os resultados obtidos durante ensaios estão dispostos na Figura 4, que mostra comportamento das componentes da força de corte na direção x e y. O sinal negativo associado ao sinal indicado pelo dinamômetro indica a mudança de sentido da componente da força, ou seja, uma variação no sentido do esforço empregado ao material durante o processo de manufatura realizado. Assim, observa-se indicação de força numa faixa de 0,8 kN.

Figura 4 – Componentes da força de corte em função do tempo para parâmetros de usinagem de $a_p=10$ mm, $f_z=6$ mm, $n=17$ e $v_r=6000$ rpm (a) e $v_r=18000$ rpm (b)



Fonte: Adaptado de Klocke *et al.* (2012)

Alternativamente aos modelos que fazem uso de dinamômetros para o monitoramento de forças, Margarido (2011) projetou um banco de aquisição de dados experimentais para medir a força de corte através da medição do torque de usinagem. O controle dos torques envolvidos na usinagem se deu com a utilização de servomotores de 2,4 Nm de torque e o sensor utilizado foi o MKDC-5 com capacidade máxima de medição de 5 kNm.

Na literatura são encontrados diversos sistemas para análise de forças na usinagem e, em função da facilidade de construção, a utilização de dinamômetros baseados em extensômetros é preponderante. Além disso, pode-se desenvolver esse instrumento numa ampla faixa de modelos e tamanhos, os quais são adaptados às necessidades de cada processo. Com base na literatura, típicos carregamentos em processo de fresamento para materiais de diferentes dureza são inferiores a 1 kN.

Contudo, no tópico a seguir os trabalhos apresentados neste item serão discutidos e analisados com base em simulações de força e potência. As simulações foram realizadas em programas disponíveis em sites de fabricante de ferramentas para usinagem.

2.1.2 Simulação das componentes da Força de Usinagem

A simulação de componentes de força de usinagem envolvidas durante a manufatura de uma peça tem grande importância não só para a escolha da ferramenta de corte, mas como também para a otimização dos gastos de processo. Uma análise fundamentada em simulações, realizadas em softwares e calculadoras diante dos parâmetros de usinagem apresentados nos experimentos evidenciados nos trabalhos expostos no item anterior, será efetuada objetivando a

confirmação, ou não, dos dados obtidos experimentalmente e o conhecimento da potência envolvida no processo aplicado.

Anderson e Anderson (2011) usinaram uma corpo de prova de Aço AISI 5120 com os seguintes parâmetros de $v_c=157$ m/min, $a_p=1,7$ mm, $a_e=65$ mm, $f_z=0,12$ mm e número de dentes de $n=4$, e obtiveram resultado de força de corte máxima de 850 N. Resultados obtidos com simulação de força de corte, utilizando o simulador Kennametal (2013), mostraram valores para força de corte tangencial de 242,3 N, torque na ferramenta de 15,14 Nmm, quando eficiência de transmissão da máquina-ferramenta no processo é considerada máxima e igual a 0,8, e uma utilização de potência de 0,72 kW.

Diante disso, nota-se a diferença entre as forças obtidas via simulação e de forma experimental e ainda, a quantidade mínima de potencia utilizada diante da disponível pela máquina para o processo. Este parâmetro poderia ser incrementado com o aumento da velocidade imposta a fim de otimizar o processo em relação à energia e tempo de operação (KENNAMETAL, 2013).

Santochi *et al.* (1997) verificaram as componentes da força de corte envolvidas no torneamento de uma peça teste de aço AISI 1015 com parâmetros de $v=160$ m/min, $f=0,2$ mm/rev e $a_p=1$ mm. O resultado obtido das componentes de força indicada com esse desenvolvimento, disposto no item anterior, foi de, aproximadamente, 455 N, 230 N e 180 N para força de corte, de avanço e passiva, respectivamente. Adotou-se, para simulação, um diâmetro de 50 mm. Utilizando o software disponível para cálculo Iscar (2013), obteve-se o valor de potência de 1,1 kW e força de corte de 416 N - o que comprova a faixa média de força medida pelo dinamômetro desenvolvido pelos autores e potência exigida da máquina durante o processo.

Klocke *et al.* (2012), mediram as forças envolvidas durante o processo de manufatura de uma peça de Inconel 718 (350 HB) utilizando parâmetros de $a_p=10$ mm, $n=17$, $f_z=0,018$ mm a duas velocidades distintas: $v_{r1}=6000$ rpm e $v_{r2}=18000$ rpm. Os resultados obtidos durante ensaios mostraram uma força numa faixa de 800 N. Simulando a força de usinagem de acordo com os parâmetros acima descritos, observou-se que a máxima força tangencial por inserto indicada foi de 2082 N e a potência exigida para realização deste processo foi e 21,21 kW - para simulação em material Inconel 800 (Iscar, 2013).

Sendo assim, analisando-se a simulação realizada em softwares específicos de fornecedores de ferramenta e, comparando os resultados obtidos com os expostos nos artigos estudados, percebe-se uma tendência à discrepância entre os parâmetros e os dados de força máxima envolvida no processo. Ainda, a utilização mínima da potência da máquina-ferramenta diante da potência total que pode ser fornecida. Diante disso, processos e instrumentos pra

determinação de força de usinagem têm sido estudados. No tópico a seguir, modelos de dinamômetros serão apresentados.

2.2 Dinamometria para Usinagem

Para os processos de usinagem, o estudo de fatores que estão diretamente ou indiretamente relacionados com a qualidade final da peça, bem como o gasto envolvido durante o processo (energético, ferramental, fluidos, etc.), são de suma importância tanto para entender o processo como para ter controle sobre ele. Uma das formas de se obter esse conhecimento, e todos outros fatores já mencionados, é a determinação e análise das componentes da força de usinagem utilizando dispositivos, por exemplo, dinamômetro – elemento capaz de indicar valores para forças envolvidas em um determinado material a partir da variação de uma grandeza de entrada (deformação).

Os dinamômetros, em geral, são formados por sensores ou transdutores capazes de medir as componentes da força de usinagem a partir de deformação de um elemento mecânico. O monitoramento desses dados se dá por meio de um sistema de aquisição ligado a uma interface de processamento de dados. O projeto conceitual empregado ao instrumento e o posicionamento relativo entre os sensores são fatores determinantes para a eficácia do dinamômetro desenvolvido durante a usinagem, como evidenciado por Cook, Loewen e Shaw (1954) apud Korkut (2003).

Segundo Rossi (2008), as três características mais relevantes para o projeto de um dinamômetro são rigidez, sensibilidade e precisão. A primeira é definida de forma que os dinamômetros devam possuir rigidez o suficiente para que a geometria de corte não seja influenciada pelas deformações durante o processo de usinagem. Além disso, deve-se prever a frequência natural do dinamômetro deve ser superior a 4 vezes maior do que a frequência do sinal de excitação da máquina-ferramenta. Shaw (2005) afirmou que, para fins de análise, qualquer dinamômetro pode ser modelado através de um sistema massa-mola.

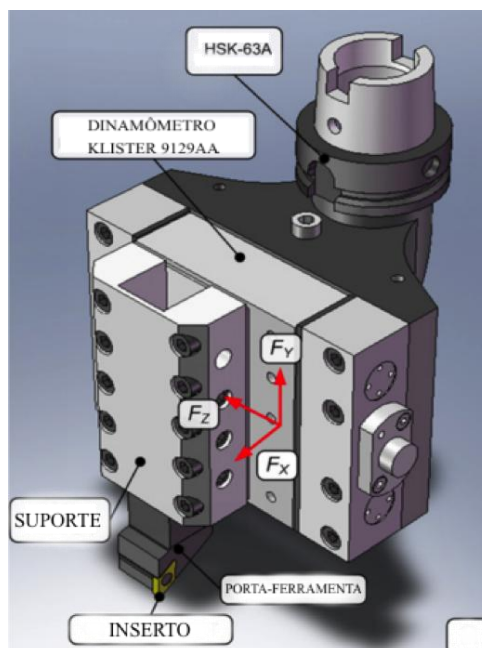
A segunda característica, a sensibilidade, é descrita por Rossi (2008) como a capacidade do instrumento desenvolvido de indicar valores com, pelo menos, 1% de fundo de escala. Por exemplo, um extensômetro é capaz de ler deformações de $1\mu\text{m}/\text{m}$ (Dally, 1978 apud Rossi, 2008). E, quanto à precisão, o esse autor ainda afirma que, todo e qualquer dinamômetro deve realizar medições com precisão mínima de 1%. Há também alguns dispositivos que vêm tendo grande importância na medição de pequenas deformações nos dinamômetros, segundo Shaw

(2005) os quais são: células de pressão hidráulica; dispositivos pneumáticos; dispositivos ópticos; e cristais piezoelétricos.

Andrade (2014), com objetivo de entender o comportamento da força de usinagem no fresamento de roscas internas em aço AISI 4340 temperado e revenido utilizou um dinamômetro piezoresistivo Kistler 9257BA do Laboratório para Processos Avançados e Sustentabilidade do Núcleo de Manufatura Avançada da EESC-USP, em São Carlos (SP-Brasil). Usinando a uma velocidade de corte de 80 m/min e uma ferramenta de aresta única no sentido axial e radial, mediu componentes de força de 17, 3 e 5 N nas direções x, y e z, respectivamente – o que indicou uma força de usinagem de 18 N (ALTINTAS, 2000).

Tortis e Sortino (2011) adaptaram um dinamômetro comercial para medição de forças em três dimensões em operações por torneamento. O dispositivo utilizado foi baseado em sensores do tipo piezoelétrico montado a um anel ligado a uma haste de ferramenta, o qual permite a mudança da pastilha sem alterar na posição dos sensores, conforme mostrado na Figura 5. Esse tipo de sensor foi testado em condições de usinagem e os resultados medidos foram comparados com os modelos matemáticos teóricos. Os dados evidenciam a capacidade do dinamômetro desenvolvido de transmitir sinais de rápidas variações durante o processo dinâmico de usinagem, medindo forças nos eixos ortogonais x, y e z de, 300 N, 100 N e 400 N, respectivamente.

Figura 5 – Disposição do dinamômetro para realização de testes experimentais

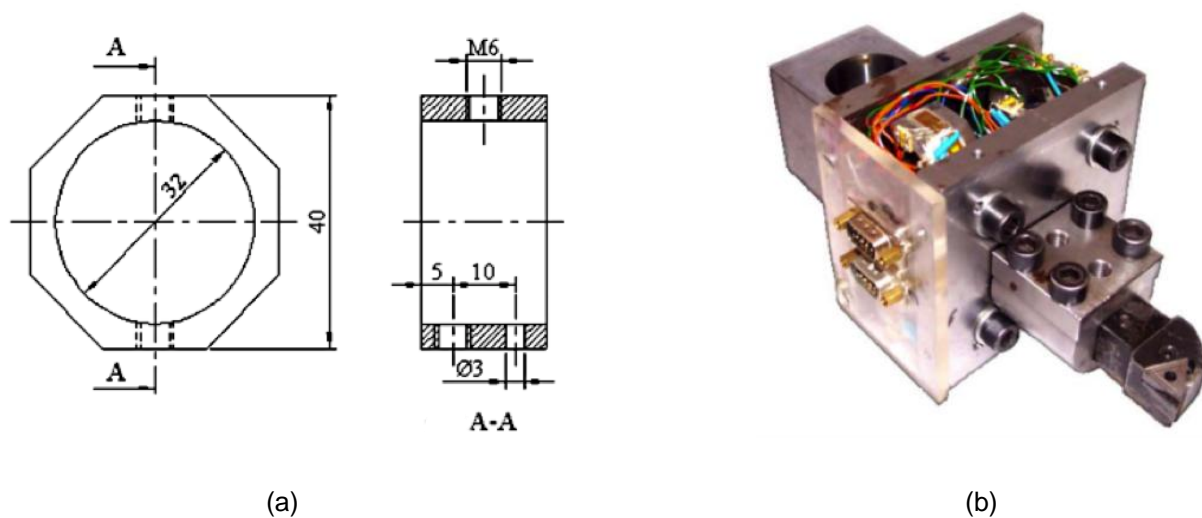


Fonte: Tortis e Sortino (2011)

Yaldız e Ünsaçar (2006) desenvolveram um dinamômetro para medição de força de usinagem em três componentes e que foi testado durante o processo de torneamento e

dimensionado para permitir medição de componentes de força de até 3500 ± 5 N. O dinamômetro era composto por placas (100x100x12 mm) interligadas por quatro anéis octogonais. A orientação dos anéis octogonais – rotacionados 90° dos anéis adjacentes e localizados nas extremidades da placa onde a concentração de tensões possuem máximo valor – e as localizações dos extensômetros foi determinada para maximizar a sensibilidade e minimizar a sensibilidade cruzada. As dimensões adotadas para o anel foram 20 mm, 16 mm e 4 mm para comprimento, raio e espessura. O desenho do anel e o dinamômetro desenvolvido são apresentados na Figura 6.

Figura 6 - Desenho esquemático do elemento elástico do dinamômetro (a)
e imagem do dinamômetro desenvolvido (b)



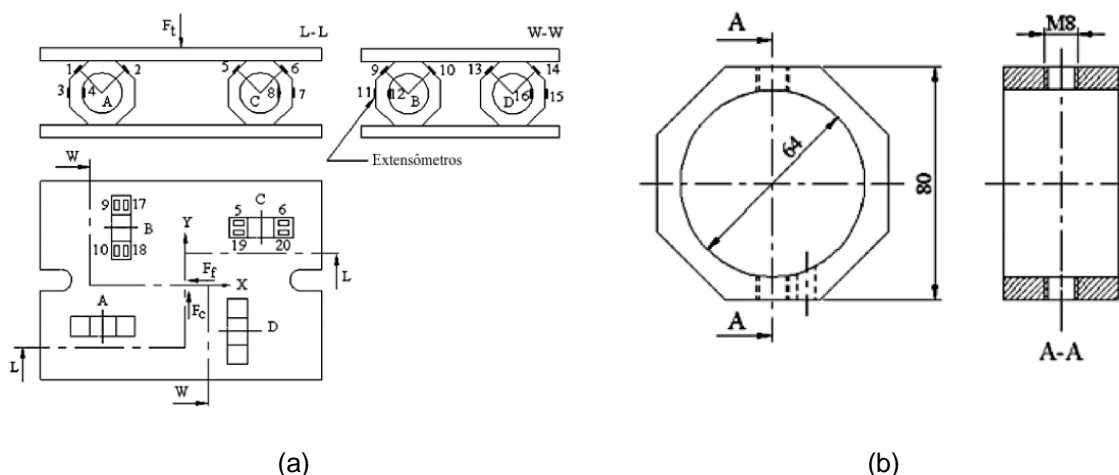
Fonte: Yaldiz e Ünsaçar (2006)

Com relação ao projeto mencionado na Figura 6, Ito *et al.* (1980) apud Yaldiz e Ünsaçar (2006), afirmaram que o anel octogonal é substancialmente mais rígido do que o anel circular quando a razão entre sua espessura e seu raio é menor ou igual a 0,05. Os anéis do dinamômetro desenvolvido por Yaldiz e Ünsaçar (2006) foram construídos usando o aço AISI 4140. Dois pinos e parafusos M5 foram utilizados para travamento e fixação, respectivamente, entre placas e anéis octogonais, ou seja, impedindo movimentos que poderiam causar sensibilidade cruzada durante as medições. Os valores de sensibilidade cruzada do dinamômetro atingiram uma faixa de 0,17% - 0,92%, o que indicou a confiabilidade na medida de força de usinagem, executada pelo dinamômetro, para análise de carregamentos em processos de torneamento.

Yaldiz *et al.* (2007) projetaram e construíram um dinamômetro – para indicação de força de usinagem, e de torque capaz de medir até 5 kN com sensibilidade do sistema de ± 5 N. O dinamômetro possuiu como elemento elástico anéis octogonais e esses estão dispostos nas

placas do dinamômetro conforme esquema mostrado na Figura 7. Os resultados obtidos indicaram que, diante dos diferentes testes realizados com diferentes parâmetros de usinagem, o dinamômetro pode ser utilizado efetivamente para medição de força não somente em processos de fresamento, mas também em outros processos de usinagem.

Figura 7 – Projeções ortogonais do dinamômetro (a) e do elemento elástico (b)

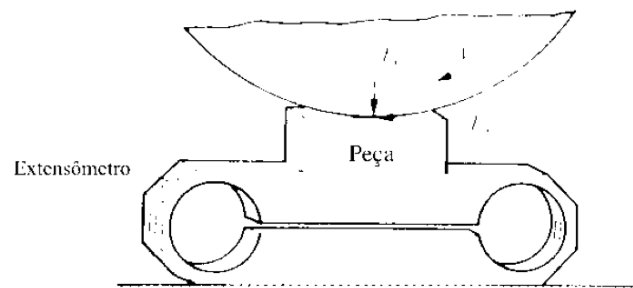


Fonte: Yaldiz et. al (2007)

Os dois últimos projetos de dinamômetro apresentados acima utilizam da configuração de anéis com superfície externa em forma de octaedro e, possuem algumas outras características em comum, como a preocupação com o estudo da frequência do sistema, do dimensionamento dos elementos de ligação placa-anel octagonal, etc. Porém, existem também alguns aspectos nos quais os dois projetos diferem que são, principalmente: aplicação do instrumento em diferentes processos de usinagem – torneamento e fresamento –; carga máxima suportada, a qual no primeiro é de 3500 N e no segundo de 5 kN.; o próprio dimensionamento dos elementos, no qual para o segundo projeto, os elementos praticamente possuem dimensões duas vezes maiores em relação ao primeiro; e, por fim, o tipo de sensor utilizado nos projetos – tópico que será melhor comentado no próximo item.

Shaw (2005) mostra outras alternativas geométricas para o projeto do elemento elástico no projeto de um dinamômetro. Uma delas está fundamentada na construção de um conjunto de geometria conforme mostrado na Figura 8. Esse modelo é comumente usinado em alumínio – devido às suas características de ser um elemento de alta sensibilidade, de pouca massa e com elevada frequência natural. O autor ainda sugere que este dinamômetro seja utilizado em uma faixa de força de 0,45 – 445 N diante de operações de retificação, e de 8,9 – 8910 N em operações como a de fresamento.

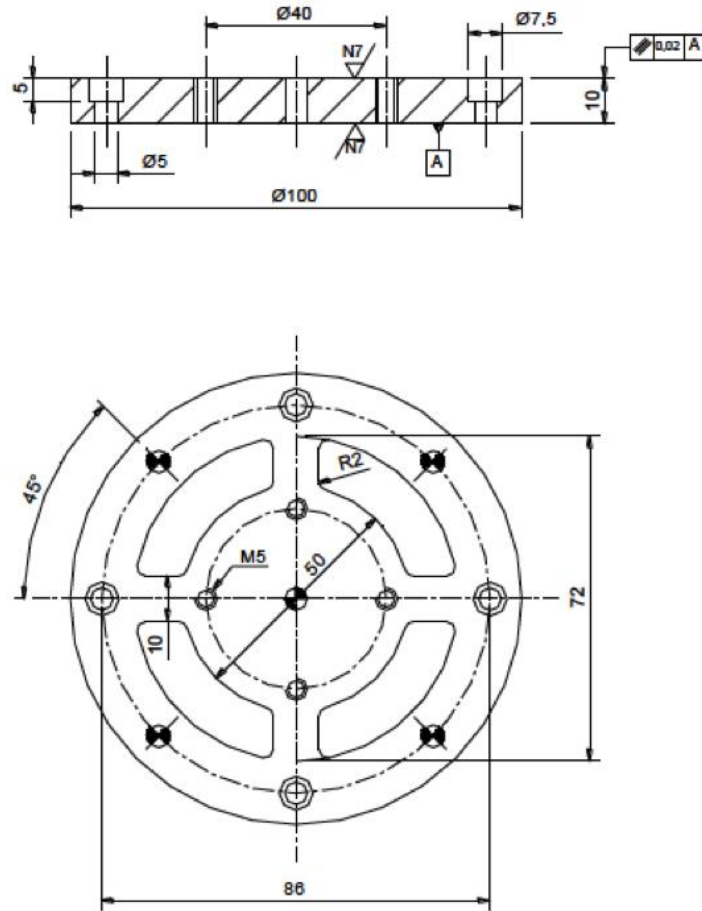
Figura 8 – Dinamômetro de dois meio-aneis octagonais



Fonte: Shaw (2005)

Roger (2013) desenvolveu um dinamômetro extensométrico resistivo triaxial para operação de fresamento. O instrumento foi projetado para indicar componentes ortogonais da força de usinagem de até 2 kN. Esse dinamômetro foi composto por três partes as quais foram denominadas de base inferior e base superior (aço AISI 4140) e elemento elástico (alumínio 7075), sem realização de tratamento térmico nos elementos de base. Como elementos de fixação e travamento utilizaram-se pinos de $\varnothing 5$ mm e parafusos M5 e M8, respectivamente. A Figura 9 mostra o desenho do componente elástico e representação esquemática do dinamômetro final.

Figura 9 – Elemento elástico do dinamômetro extensométrico resistivo (a) e conjunto final (b)



(a)



(b)

Fonte: Roger (2013)

Schmitz *et al.* (2009) conceberam um dinamômetro à base de cristais piezoelétricos configurado para medir vibrações de alta frequência e, assim, obter dados de forças triaxiais durante processo de micro-fresamento. O dinamômetro foi desenvolvido para processos realizados a altas velocidades e baixas magnitudes de força com precisão a alta frequência. O

dispositivo de detecção de vibração acoplado ao dinamômetro inclui pelo menos um acelerômetro capaz de medir vibrações com uma frequência inferior a 10 kHz, que se correlaciona com uma força inferior a 2 N, dependendo da forma de acoplamento. O modelo desenvolvido apresenta semelhança física ao apresentado no projeto de Roger (2013).

Nesta perspectiva, os trabalhos estudados utilizam desta técnica de construção para análise das forças três sistemas básicos: adaptação de dinamômetros comerciais, desenvolvimento de dinamômetros que possuem como elemento elásticos anéis octagonais e dinamômetros circulares. Usualmente, os elementos elásticos são construídos em alumínio e, os elementos estruturais em aço liga de maior dureza em relação ao material empregado no elemento elástico.

Contudo, para que a indicação do dinamômetro seja eficiente, a escolha correta dos sensores ou transdutores é crucial. Mais do que um tipo de sensor está disponível para aplicação em dinamômetros e, desses modelos, vários são aplicáveis a diferentes projetos de acordo com suas características. Por isso, a compreensão das características de cada um desses elementos é importante quando se tem como objetivo o desenvolvimento de um dinamômetro. Uma descrição a respeito dos transdutores de força e suas particularidades será apresentada no item próximo item.

2.3 Transdutores de força

Após a definição da geometria adequada do dinamômetro, é fundamental conhecer qual elemento será apropriado para indicação de força durante a usinagem. Uma das principais formas de medir, em tempo real, o valor de força de usinagem está no projeto de dinamômetros baseados em extensômetros ou em cristais piezoresistivos. A medição do sinal torna-se cada vez mais efetiva e precisa a medida que a distância entre o sensor e o processo de usinagem é reduzida. (YALDIZ, ÜNSAÇAR, 2006; KLOCKE, 2011).

Cristais piezoresistivos, segundo Shaw (2005), são amplamente utilizados em dinamômetros para aplicação na usinagem, uma vez que os dinamômetros à base desses cristais podem ser projetados para trabalhar a maiores frequências naturais de vibração em relação a de extensômetros. No projeto de Tortis e Sortino (2011), descrito no item 2.2, houve a utilização de sensores de cristais piezoelétricos em um anel ligado a uma haste de ferramenta, o qual permitia a mudança da pastilha sem alterar na posição dos sensores. A comparação dos resultados com

outros estudos realizados confirmou a capacidade do transdutor utilizado em transmitir sinais de rápidas variações durante a usinagem.

Na literatura são encontrados diversos sensores e/ou transdutores para análise de forças na usinagem. Em função da facilidade de construção, montagem e do menor custo, quando comparado aos dinamômetros a base de cristais piezoresistivos, a utilização de dinamômetros associados a extensômetros é preponderante. Tendo em vista a vantagem econômica do extensômetro e a aplicabilidade numa ampla faixa de modelos e tamanhos de dinamômetros, esse transdutor será abordado no item posterior.

2.3.1 Extensômetro

O extensômetro elétrico de resistência é um transdutor de deformação que está fundamentado no princípio de que a deformação de sua grade elétrica influenciará em sua resistência, seguindo os princípios da segunda Lei de Ohm (Hoffmann, 2014). Esse transdutor pode ser utilizado em vários segmentos e processos industriais para medição de pressão, tensão, força, etc. Segundo Shaw (2005), extensômetros são capazes de indicar deformação na ordem de 10^{-6} m. As vantagens encontradas, de acordo com Barreto Junior (2013), estão presentes na precisão da medida, no baixo custo, na linearidade, na instalação e na adequação ao meio, visto que pode ser imerso em água, ar e gás corrosivo diante de uma proteção.

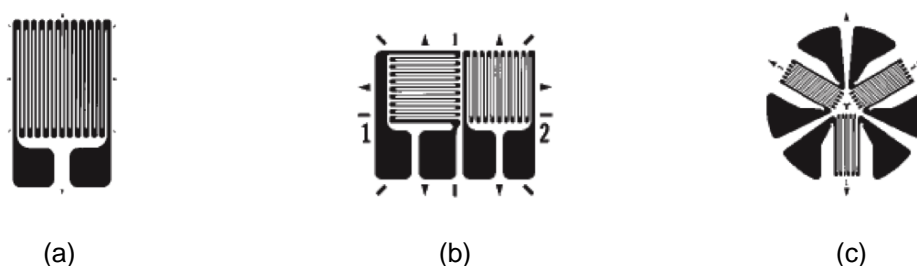
Segundo Rossi (2008), as principais características para especificar tecnicamente um extensômetro são: constante do extensômetro (GF) – que varia entre 1,75-3,50 (SHAW, 2005) –, o comprimento da grade de medição (geralmente de 3, 5, 10, 15 ou 20 mm) e a resistência nominal, que pode variar numa faixa de 60 – 1000 Ω . Observou-se, através de uma revisão de literatura que, os extensômetros mais utilizados eram os de resistência nominal igual a 120 Ω ou 350 Ω (ROGER, 2013; YALDIZ e ÜNSAÇAR, 2006).

De acordo com Shaw (2005), a constante do extensômetro tem como objetivo indicar a sensibilidade do transdutor e é matematicamente definida de acordo com a Equação 5, onde GF é o valor de constante do extensômetro, R a resistência nominal, l o comprimento do fio resistivo e ΔR e Δl suas respectivas variações.

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} \tag{5}$$

Outros fatores importantes para seleção do extensômetro são: combinações de parâmetros de compatibilidade com o meio e de condições de funcionamento, vida útil, estabilidade, resistência em processos cíclicos, temperatura máxima suportada, distensão e comportamento sob diferentes condições de ambiente para que haja uma melhor representação de variações de carregamento durante o processo dinâmico de usinagem. Os extensômetros são dispostos em três formas básicas diferentes as quais os possibilitam medir de forma uniaxial, biaxial ou triaxial, como disposto na Figura 10 (SHAW,2005; ROSSI, 2008).

Figura 10 – Extensômetro uniaxial (a), biaxial (b) e triaxial (c)



Fonte: Rossi (2008)

No dinamômetro desenvolvido por Yaldız e Ünsaçar (2006), extensômetros de tipo HBM LY 11 6/120 (uniaxial, comprimento de grelha de 11 mm e largura de 6 mm e resistência nominal de 120 Ω) foram dispostos em cada um dos anéis octogonais (quatro por anel), de maneira sistemática e conectados entre si através de Ponte de Wheatstone. A orientação dos anéis octogonais – rotacionados 90° dos anéis adjacentes e localizados nas extremidades da placa onde a concentração de tensões possuem máximo valor – e as localizações dos extensômetros foi determinada para maximizar a sensibilidade e minimizar a sensibilidade cruzada. Conforme mencionado no item 2.2, este sistema permitiu a análise de carregamentos de até 3500 N.

Yaldiz *et al.* (2007) utilizou no projeto de um dinamômetro – para indicação de força e torque – extensômetros e acelerômetro de cristais piezoelétricos. Os transdutores foram colados para efetivar a indicação a medida que haja deformação desses elementos e sua localização e orientação foram estudadas a fim de permitir uma máxima sensibilidade linear combinada com uma mínima sensibilidade cruzada sob deformação. A medição bi e triaxial pode ser dada a partir de extensômetros do tipo roseta, contudo, a utilização desses sensores não tem sido evidenciada no estudo bibliográfico realizado, sendo notória a preferência pelos sensores uniaxiais para aplicações em dinamômetros (ROGER, 2013; YALDIZ e ÜNSAÇAR, 2006).

Para este projeto, como o objetivo a ser alcançado é a construção de um dinamômetro para medição da força de usinagem em três componentes ortogonais, extensômetros de tipo uniaxial serão utilizados nas três direções do eixo de medição. Contudo, para que o dado de

deformação sofrida pelo extensômetro seja indicado em termos de tensão, faz-se necessário conexão elétrica. Desta forma, tipos de conexão entre extensômetros serão abordados no item 2.4.

2.4 Ponte de Wheatstone

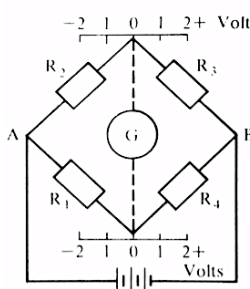
A resistência dos extensômetros num processo dinâmico, como o de fresamento, pode mudar de forma infinitesimal em frações de segundos devido à variação de carregamentos aplicados à peça. Nessa perspectiva, a ligação elétrica entre os sensores e a medição da variação da resistência é de fundamental importância para o entendimento das forças envolvidas no processo. De acordo com Shaw (2005), a variação na resistência de extensômetros é na ordem de 0.5% e, essa ordem de grandeza, a ponte de Wheatstone é capaz de indicar.

Diante disso, para medir a variação do sistema de acordo com a aplicação do carregamento, utiliza-se ponte de Wheatstone – capaz de medir, com precisão, pequenas mudanças na resistência. Esse circuito indica a tensão medida pelo grau de desequilíbrio através da utilização de um voltímetro de precisão no centro da ponte, que proporciona indicação linear do desequilíbrio (SHAW, 2005; KUPHALDT, 2006). Como condição de equilíbrio, os elementos do circuito devem satisfazer a Equação (6):

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \tag{6}$$

Onde R1, R2, R3 e R4 estão configurados na ponte de acordo com a Figura 11.

Figura 11 – Ponte de Wheatstone para resistências R1, R2, R3 e R4

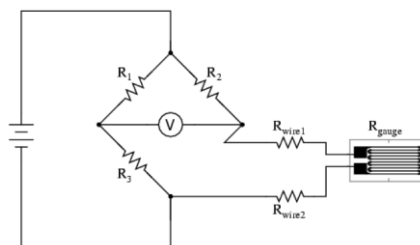


Fonte: Shaw (1984)

Para aplicação direta na dinamometria baseada em extensômetros de resistência elétrica há, basicamente, três tipos possíveis de ligação. Essas ligações podem possuir como elementos quatro, dois ou um extensômetro, dando origem à terminologia de ponte completa, meia ponte ou ¼ de ponte, respectivamente (ROSSI, 2008; KORKUT, 2003).

A configuração de ¼ de ponte o método no qual um extensômetro é utilizado para medição de deformação em um ponto, direção. Desta forma, a ponte é composta por um extensômetro e três resistores de resistência fixa e igual à resistência nominal do sensor. Essa configuração é utilizada quando o tempo de operação é curto e a mudança de temperatura do ambiente e do objeto no qual o extensômetro está fixado é desprezível (Yokogama Electric Works, 1986). A Figura 12 apresenta um esquema de ¼ de ponte.

Figura 12 – Esquema de ligação de ¼ de ponte

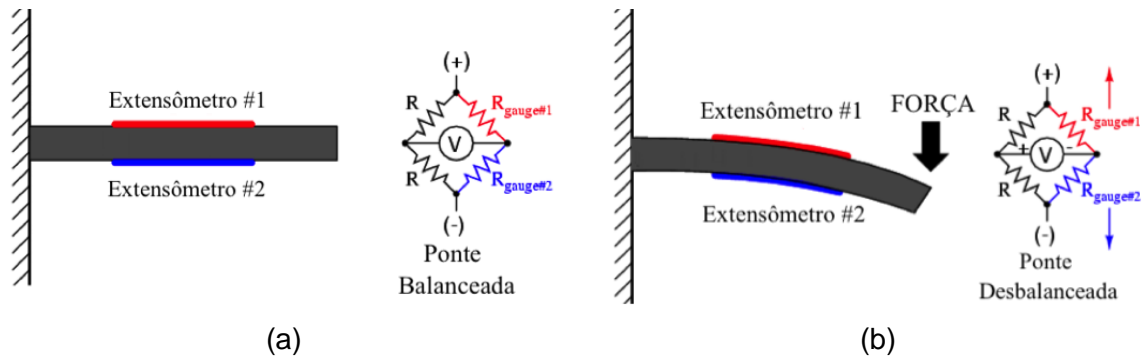


Fonte: Kuphaldt (2006)

A resistência do extensômetro (R_{gauge}), juntamente com as resistências dos fios R_{wire1} e R_{wire2} contribuem para o aumento da resistência de ¼ da ponte e, conseqüentemente, para uma indicação incorreta da tensão. Embora seja uma configuração relativamente simples, não foram encontrados evidências de utilização efetiva dessa disposição de ligação na construção de dinamômetros para indicação de força de usinagem em todo o período de revisão bibliográfica realidado (ROGER, 2013; YALDIZ *et al.*, 2007).

A segunda configuração, a de meia ponte, possibilita que dois extensômetros ligados em série sejam expostos à tensão, de forma a tornar o sistema duas vezes mais sensível quanto ao carregamento empregado e a tensão lançada na indicação (YOKOGAMA, 1986). Na Figura 13, o esquema de ligação dos elementos da ponte indica como os extensômetros geralmente são dispostos – em situações opostas de deformação (comprimido ou estendido) e possibilitam aumentar ou reduzir a resistência, em mesma proporção.

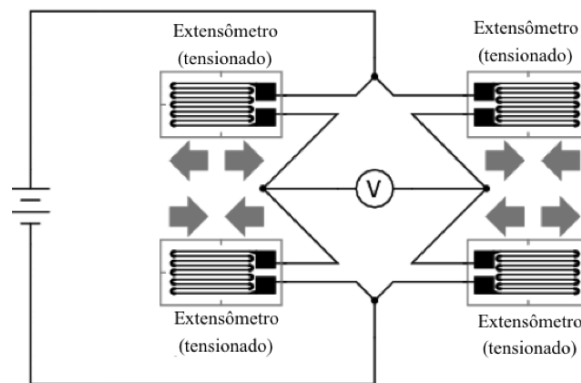
Figura 13 – Aplicação de ½ ponte sem carregamento (a) e com carregamento (b)



Fonte: Kuphaldt (2006)

Por fim, quando se é necessário ou se deseja uma característica de linearidade ao circuito – que não é encontrada em nenhuma das outras configurações –, segundo Kuphaldt (2006), pode-se utilizar de uma configuração de ponte completa, esquematizada na Figura 14. Essa configuração utiliza quatro extensômetros de mesma características diferentemente posicionados para a medição de deformação em uma única direção. A sensibilidade do sistema é quatro vezes maior do que a configuração de ¼ de ponte e duas vezes maior em relação à configuração de meia ponte. E, segundo Yokogama (1986), é geralmente utilizada quando se deseja obter um sistema com elevada sensibilidade à variação de força, torque, deformação.

Figura 14 – Ligação em configuração de ponte completa



Fonte: Kuphaldt (2006)

Como discutido, ambas as configurações de meia ponte e ponte completa – que possui vantagem sobre a ¼ de ponte – viabilizam uma maior sensibilidade em relação à observada no circuito de ¼ ponte. No tocante às unidades de medida, a tensão de saída da ponte é dada em mV de desequilíbrio por V de excitação. O desequilíbrio, por sua vez, é causado pela força – tipicamente em N.

Os trabalhos desenvolvidos por Yaldiz e Ünsaçar (2006), Roger (2013), Yaldiz *et al.* (2007) e Shaw (2005) apresentaram a ponte completa como forma de ligação. E, não obstante, na

literatura, esse tipo de ligação é a mais relatada em experimentos de desenvolvimento e projetos de dinamômetros voltados à indicação de componentes da força de usinagem.

Diante do exposto, para indicação da magnitude das componentes de força de usinagem, a ligação elétrica mais viável para a célula de carga triaxial proposta neste projeto seria a de pontes completas para cada direção x, y e z. Ainda, a ponte poderá ser dada em duas diferentes configurações, a construída fisicamente via circuito impresso ou a ponte digital – que será abordada no tópico a seguir, juntamente com os princípios e fundamentos da aquisição de dados e tratamento de sinal.

2.5 Aquisição de dados, estudo e condicionamento do sinal

Quando há a necessidade de compreensão em tempo real do comportamento mecânico de equipamentos, usualmente, transdutores e sistemas de aquisição de dados são utilizados. Como principais componentes necessários para a aquisição existem os sensores/transdutores, o condicionador de sinais – que é composto por filtros, amplificadores, entre outros – e o próprio sistema para aquisição (software e hardware). Diante disso, será abordado neste tópico, um estudo dos tipos de sinais, sua amplificação, ruídos, filtros e processamento digital envolvidos na construção da célula de carga.

Os sinais, segundo Lathi (2007), são um conjunto de dados ou informações que podem, ou não, variar com o tempo e que são emitidos, geralmente, por algum sensor ou transdutor após algum estímulo. O processamento de sinais, de acordo com Rangarao e Mallik (2005), é o pré-requisito para a análise e compreensão dos sinais, que podem ser classificados em contínuos ou discretos, analógicos ou digitais, periódicos ou não-periódicos, determinísticos ou probabilísticos e de energia ou de potência (Marques, 2010).

A classificação entre analógico ou digital está relacionada diretamente à natureza da amplitude do sinal: caso o sinal não possua limite de amplitude, é dito analógico; do contrário, os sinais digitais possuem um limite finito de valores para amplitude. O sinal analógico pode ser extraído de leituras de temperatura, deformação, vibração, posição dadas por sensores específicos fazendo se conhecer seu nível, forma e frequência (Lathi, 2007).

De acordo com Noceti Filho (2013), todo sinal emitido, independente da natureza de sua fonte tem, em seu dados, uma parcela ruído. O estudo do ruído tem importância, em grande maioria dos casos, para o conhecimento das formas de se obter o sinal desejado com menor

influência de ruído (Rangarao e Mallik, 2005). Na eletrônica, conexões elétricas, cabos e pontos de solda são pontos específicos que contribuem para o aumento de ruído no sinal, fazendo com que uma das formas de reduzir esses pontos de ruído seja a aplicação de ponte de Wheatstone digital.

Porém, quando se amplifica um sinal, o ruído associado a ele também é amplificado e, nem sempre, encontra-se casos em que a razão sinal-ruído é alta, o que prejudicaria a informação transmitida. Ou seja, uma vez que se a presença de ruído em um sinal é mínima, esse sinal pode ser amplificado por uma série de amplificadores ou até mesmo filtros de alto ganho possibilitando a detecção de informações que, inicialmente, possuíam baixa energia (Noceti Filho, 2013).

Dentre os autores estudados durante a elaboração desta revisão bibliográfica nenhum apresentou dados satisfatórios quanto à caracterização do ruído presente no sinal adquirido, citando apenas os processos e equipamentos utilizados para o processamento e condicionamento. Porém, conhecendo um pouco da natureza do ruído, o estudo de filtros para redução desta característica no sinal é de extrema importância.

Os filtros são os elementos que rejeitam o ruído do sinal dentro de uma determinada faixa de frequência, atenuando-os a uma frequência de corte a uma determinada taxa. Embora a utilização de cabos blindados ou trançados diminuam a interferência de ruído, o sinal emitido por qualquer sensor e/ou transdutor sempre apresentará alguma parcela de ruído (National Instruments, 2012).

Diante disso, para facilitar o emprego nas diversas situações, os filtros são classificados de acordo com a sua faixa de frequência. Os mais utilizados no tratamento do sinal são os seguintes:

- Filtro Passa-Baixa: atenua as frequências acima da frequência de corte;
- Filtro Passa-Alta: atenua as frequências abaixo da frequência de corte;
- Filtro Passa-Faixa: deixa passar somente as frequências compreendidas numa faixa pré-estabelecida em um determinado intervalo;
- Filtro Rejeita-Faixa: bloqueia as frequências compreendidas numa determinada faixa;
- Filtro Passa-Tudo: não atenua o sinal, apenas incrementa defasagem positiva ou negativa.

Os filtros podem ser atribuídos ao processamento do sinal a partir de softwares como LabVIEW e Matlab. Os principais filtros utilizados são os de tipo passa-baixa, passa-alta, passa-faixa, rejeita-faixa, sendo disponibilizados outros tipos de filtros para diferentes aplicações de acordo com The Matworks (2014). Segundo National Instruments (2012), um filtro passa baixa é

utilizado para bloquear ruídos de altas frequências em medições elétricas como de uma tensão de frequência de 60 Hz.

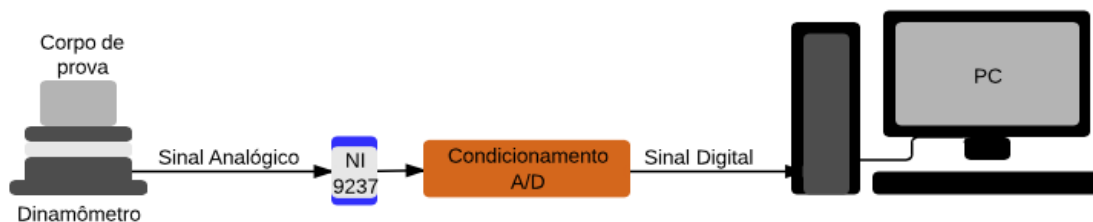
Araújo (2004) fez uso da amplificação do sinal elétrico de saída do dinamômetro. A sensibilidade do dinamômetro piezoelétrico utilizado foi de 7,81 N para F_x , 7,91 N para F_y e 3,73 N para F_z . O fator de amplificação foi igualmente regulado no amplificador de sinais, de acordo com a faixa de amplitude da força coletada, para 100 vezes.

No estudo realizado por Andersson e Andersson (2011), o sinal de saída dos circuitos de ponte de Wheatstone foi filtrado, amplificado e digitalizado por um dispositivo de processamento dos sinais. Pós condicionamento, o sinal, ainda analógico, foi encaminhado para um conversor Analógico-Digital de 8 canais com capacidade de resolução de 12 bits e um fundo de escala de tensão de saída de 0 – 10 V, no qual ele passaria a ter características digitais e assim poder ser analisado de forma mais efetiva. A taxa de amostragem máxima utilizada foi de 12 kHz e o sistema de alimentação foi composto por duas baterias de 9 V, podendo ter sido também alimentado por um gerador de corrente contínua.

Com o intuito de medir e registrar a força de usinagem, Gunay *et al.* (2006) utilizaram de um amplificador – para elevar as tensões de saída da ponte de Wheatstone (amplificar o sinal) –, um sistema de condicionador de sinais (filtros) e um conversor de sinal analógico para digital, PCL-812PG I/O Card. Para interface e aquisição, os autores utilizaram como software o Genie. Informações sobre tensão máxima de saída, de alimentação e mais detalhes sobre o tipo de sinal tratado não foram expostas no artigo. Porém, de acordo com o estudo realizado e com o processo de tratamento de sinal realizado pelos autores, pode-se caracterizar o sinal de saída da ponte como sinal analógico e de baixa energia, uma vez que necessita de amplificadores e de conversor.

Karabay (2007), por sua vez, conectou a saída dos dois circuitos de ponte de Wheatstone completa, utilizado em seu dinamômetro, a seis canais de um amplificador de sinal de tipo KWS/6T-5 e também a um registador de gravação contínua a fim de ter dado das flutuações da força de usinagem. Para a leitura e o armazenamento de dados, um sistema de aquisição de dados foi conectado ao dinamômetro construído via software e hardware. Contudo, não obstante dos demais autores já apresentados neste tópico, o sistema utilizado foi constituído de três amplificadores separados (AMP), conversor analógico-digital (ADC) e um computador. Um esquema do processo realizado desde a saída de sinal do extensômetro até a parte final da aquisição é mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Cadeia completa do sistema de aquisição de sinal



Fonte: Adaptado de Karabay (2007)

Andrade (2014) adquiriu o sinal das três componentes de força de usinagem através de um módulo de aquisição BCN-2110 da National Instruments acoplado a uma unidade de controle Kistler 5233 A e a um microcomputador a uma taxa de 1 kHz. Os sinais foram pós-processados com a implementação de um filtro passa-baixa a 60 Hz utilizando o LabVIEW (v.11).

Margarido (2011) utilizou o módulo de aquisição de dados de usinagem USB-6009, com 14 bits de resolução, da National Instruments para controle em tempo real da força envolvida no processo de retificação de cerâmica. O servomotor e o sensor de torque da bancada de ensaio foram controlados via software LabVIEW pela interface National Instruments.

Araújo (2004), a partir da utilização de um dinamômetro Kistler modelo 9257A coletou os sinais de força triaxialmente a uma taxa de 10 kHz e, como módulo para aquisição de dados e utilizou a programação em LabVIEW. O sinal foi convertido através de uma placa analógica-digital e a frequência de amostragem foi definida considerando-se a rotação da ferramenta e o número de dentes da fresa.

Diante do estudo bibliográfico realizado, pode-se esperar que o sinal emitido por este sensor durante o processo dinâmico de medição em uma célula de carga seja um sinal discreto e que pode ter amostragem adquirida a diferentes taxas conforme descreve Marques (2010). Quanto à natureza de amplitude de sinal, esse sinal apresentará características analógicas e, para permitir a análise efetiva dos dados, terá de passar por condicionadores e conversores de sinal (Rangarao e Mallik, 2005). Quanto ao tratamento do sinal e taxa de amostragem, pôde-se perceber a predominante utilização de filtros passa-baixa a 60 Hz, programação em LabVIEW e taxas de aquisição de 1, 10 e 12 kHz.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve as definições e os requisitos para construção do dinamômetro como geometria, materiais, sistema de fixação à mesa das máquinas-ferramentas e ao corpo-de-prova; bem como os requisitos para escolha do tipo adequado de extensômetro, sistema de aquisição, processamento e calibração estática do conjunto. Os temas serão abordados seguindo a seguinte ordem: projeto do dinamômetro e definição de extensômetros, manufatura e análise dimensional, aquisição e processamento de dados, instrumentação, calibração estática e, por fim, o fluxograma de execução.

3.1 Projeto do dinamômetro e definição de extensômetros

Para o desenvolvimento de um dinamômetro triaxial à base de extensômetros, o qual indicará a força envolvida em processos de usinagem, a fundamentação teórica indicou os seguintes requisitos:

- Indicação de magnitudes de força na ordem de 1 kN em componentes de três direções ortogonais;
- Utilizar um componente com módulo de elasticidade três vezes menor do que o do material dos demais componentes de forma a concentrar as deformações do sistema;
- Apresentar frequência natural do conjunto superior a 2,5 kHz – devido a frequência de operação da máquina-ferramenta e à prevenção de fenômenos físicos que venham a interferir no sinal de saída do dinamômetro;
- Geometria compacta e simétrica;
- Apresentar espaço para o acesso à fiação elétrica que conectará o sistema de aquisição aos transdutores;
- Espaço adequado para fixação dos extensômetros;
- Possuir sistema de fixação compatível com a mesa da máquina-ferramenta;
- Apresentar um sistema de fixação ao corpo de prova de acordo com a Série de Renard.

Outro ponto importante é a definição dos transdutores a serem utilizados. E, para atender aos requisitos do projeto, os extensômetros devem possuir:

- Máxima tensão de alimentação de 10 V;

- Dimensões inferiores a 6 mm;
- Resistência nominal superior a 300 Ω ;
- Sensibilidade menor ou igual a 1 %.

Os requisitos apresentados, tanto para definição dos extensômetros quanto para o desenvolvimento do projeto – em termos de dimensões e geometria – foram fundamentados no projeto desenvolvido por Roger (2013). A máxima tensão de alimentação é baseada no limite do módulo de aquisição previamente existente no Laboratório de Manufatura da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), o qual será utilizado para o funcionamento do dinamômetro. A resistência nominal superior a 300 Ω possui relação direta à magnitude do sinal de desequilíbrio da ponte e sensibilidade a 1%, que possibilitará indicação de forças de magnitude inferior a 10 N – o que é estritamente pertinente tendo em vista níveis de força medida por Andrade (2014).

Objetivando-se a determinação dos estados de tensão e deformação do elemento elástico do dinamômetro sob carregamento, o Método dos Elementos Finitos foi aplicado. O software utilizado para essa simulação foi o PTC CREO Parametric 2.0 (Versão Estudantil) disponível no Laboratório de Manufatura da UFRN.

3.2 Manufatura e análise dimensional

A manufatura dos componentes necessários para configuração do dinamômetro desenvolvido neste projeto foram realizados no Centro de Usinagem CNC Romi D600 (Figura 16). A máquina está alocada no Laboratório de Manufatura da UFRN. O painel de controle da máquina opera com linguagem ISO e os programas de usinagem foram desenvolvidos via interface CAM.

Figura 16 – Centro de usinagem ROMI D600



Fonte: Elaborada pelo autor

A inspeção de medidas não-críticas do elemento elástico e das bases superior e inferior do dinamômetro serão realizadas de acordo com as normas de tolerância geral NBR ISO 2768-f. Para análise dimensional estavam disponíveis os seguintes instrumentos:

- Micrômetro externo Mitutoyo 0-25 mm, com resolução de 0,001 mm;
- Micrômetro externo Mitutoyo 25-50 mm, com resolução de 0,001 mm;
- Micrômetro externo digital Mitutoyo 75-100 mm, com resolução de 0,001 mm;
- Micrômetro de profundidade Mitutoyo 0-25 mm, com resolução de 0,01 mm;
- Paquímetro Mitutoyo 0-150 mm, com resolução de 0,01 mm;
- Paquímetro Mitutoyo 0-300 mm, com resolução de 0,01 mm;
- Relógio apalpador Mitutoyo, com resolução de 0,01 mm;
- Rugosímetro portátil Taylor Hobson Precision.

Os instrumentos referenciados possuem certificado de calibração e estão alocados no Laboratório de Metrologia e no Laboratório de Manufatura da UFRN.

3.3 Instrumentação

Para a instrumentação, colagem e soldagem dos extensômetros os seguintes equipamentos e materiais foram necessários:

- Lixas d'água com granulometria de 180 e 240;
- Luva de Látex, pinça e tesoura;
- Acetona PA;
- Fita de poliamida ou Fita Kapton;
- Máscara e óculos para proteção;
- Cola para extensômetros e adesivo para revestimento superficial;
- Adesivo de teflon;
- Extensômetros e cabos;
- Fio de solda 0,3 mm;
- Estação de solda com controle de temperatura;
- Ponteiras de solda intercambiáveis.

Os equipamentos e materiais apresentados neste item serão descritos à medida que o método de instrumentação for sendo apresentado. E, antes de discorrer sobre as etapas do processo, que podem ser claramente divididas em limpeza da superfície, colagem do extensômetro, soldagem e sistema de aquisição de dados, enfatiza-se os cuidados na preparação do procedimento.

Primeiramente, uma limpeza da superfície na qual o extensômetro será aderido deve ser realizada a fim de permitir que não haja impureza entre os transdutores e a superfície durante todo o processo de colagem. Cuidados como o manuseio dos extensômetros, através de pinças, a utilização de luvas de látex e produtos para limpeza, materiais analiticamente puros, como a acetona, devem ser tomados (HBM, 2013).

O início da preparação consiste na determinação da granulometria do conjunto de lixas necessárias para a superfície, que varia de acordo com o estado do material. De acordo com Micro-Measurement (2011), a superfície final na qual os transdutores serão aderidos devem apresentar rugosidade entre 0,4 e 1,6 $\mu\text{m Ra}$. E, ainda, segundo HBM (2013), lixas de granulometria de 180 ou 240 devem ser utilizadas imediatamente antes da limpeza a fim de aumentar a aderência da cola à superfície metálica.

A adesão do extensômetro e a cura da cola entre a superfície do material e o transdutor dá-se a partir da aplicação de uma pressão local por, aproximadamente, 3 minutos. Por meio de um adesivo de teflon e luvas, a cola – produto altamente tóxico ao corpo humano – não deve entrar em contato com o usuário (HBM, 2013). Óculos de proteção e máscara também possuem

uso recomendado como EPI durante a colagem diante da evaporação de produtos químicos. Para esta etapa do processo, a cola HBM Z70, representada na Figura 17, e o adesivo de teflon foram utilizados.

Figura 17 – Adesivo de teflon e cola para extensômetros Z70



Fonte: Elaborada pelo autor

Após o processo de colagem do extensômetro à superfície metálica, a conexão dos transdutores faz-se necessária através da soldagem dos terminais. Nesta etapa do processo deve-se ter o devido cuidado e habilidade com as ferramentas, materiais e técnicas para assegurar uma conexão que torne a medição da tensão precisa.

Segundo Hoffmann (2014), a utilização de uma temperatura controlada ou uma estação de solda de baixa tensão e temperatura ajustável para a ponta do ferro de solda é importante. Ainda segundo o mesmo autor, a utilização de um ferro de solda não regulamentado (conectado diretamente à rede elétrica) torna o processo de soldagem mais difícil devido à tendência a oxidação da ponteira e vaporização instantânea do fluxo de solda.

Assim, a temperatura deve ser ajustada de forma a acomodar os diferentes pontos de fusão dos elementos da solda. Levando em consideração esses fatores, uma temperatura entre 230 e 270 °C, de acordo com Hoffmann (2014), é a ideal na soldagem de terminais de transdutores como os extensômetros. A estação de solda que será utilizada nesta etapa é a de modelo HAKO 474 e as ponteiros são as fornecidas pela própria empresa. A estação de solda encontra-se alocada no Laboratório de Robótica da Escola de Ciência e Tecnologia da UFRN e é indicada na Figura 18.

Figura 18 – Estação de solda



Fonte: Elaborada pelo autor

Ademais, para aplicações de dinamômetro em processos nos quais há presença de fluidos de corte, a proteção da superfície do extensômetro, após a colagem e soldagem dos terminais elétricos, faz-se necessário. Esse recobrimento pode ser dado pela aplicação de adesivos líquidos específicos para proteção de extensômetros, como o PU140. Esse adesivo deve ser aplicado sobre o extensômetro, os pontos de solda e o início do cabo ao final de cada processo de soldagem – como recomendado pelo fabricante – e foi adquirido pelo Laboratório de Manufatura da UFRN.

Todavia, para o desenvolvimento da medição e/ou controle dos dados, alguns equipamentos já se encontravam disponíveis, tais quais o chassi NI CompactDAQ, os módulos para aquisição de temperatura (NI 9201), aceleração e microfone (NI 9234) e tensão (NI 9215) da National Instruments, um microcomputador e o software de projeto gráfico NI LabVIEW (v.11). Assim, duas alternativas poderiam ter sido adotadas para a conexão entre os transdutores e a plataforma de aquisição:

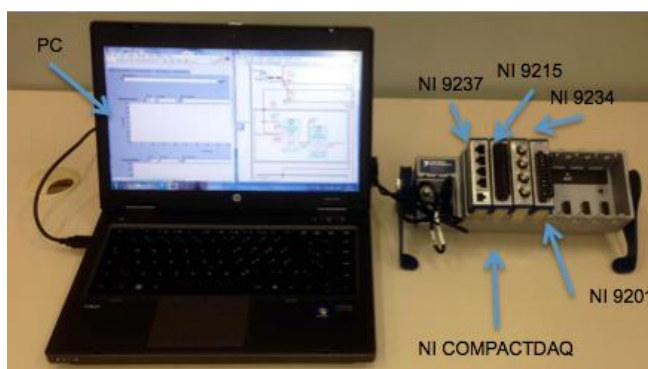
- projeto e construção de três circuitos de pontes de Wheatstone em placa de circuito impresso e aquisição da tensão de desequilíbrio através do módulo de tensão; ou
- compra de módulo de aquisição para extensômetros NI 9237 (National Instruments), conectores e cabos RJ50.

O primeiro sistema, que consiste na utilização de uma ponte de Wheatstone física, possui como principal vantagem a econômica e a otimização de espaço. Contudo, dependendo do método de manufatura, a placa de circuito impresso poderá incrementar ao sistema grandes fontes de ruído, como discutido no item 2.5 – além de não ser versátil quanto a configuração da ponte. O segundo sistema, por sua vez, apresenta como vantagem da programável construção digital da ponte de Wheatstone em duas configurações possíveis: $\frac{1}{2}$ e ponte completa.

Assim, além da versatilidade que essa característica oferece, o módulo de ponte é responsável por todo o condicionamento de sinais necessários para a alimentação e aquisição do sistema. E, sendo o elemento de ligação entre o chassi e os quatro canais, possibilita a formulação de até quatro pontes de Wheatstone simultaneamente – podendo ou não apresentar configurações diferentes para cada uma. O investimento inicial com a aquisição do módulo, dos cabos e conectores seria justificado pela vida útil do equipamento.

O elemento de ligação entre o computador e o módulo utilizado foi o chassi NI CompactDAQ, que é responsável pela transmissão do sinal de saída do módulo até o software de aquisição via porta USB 2.0. O computador, o chassis e os módulos para aquisição encontram-se na Figura 19.

Figura 19 – Elementos modulares e sistema de aquisição



Fonte: Elaborada pelo autor

3.4 Calibração estática

A calibração do dinamômetro tem como principal objetivo correlacionar o valor de tensão de saída da ponte com a carga aplicada. Essa correlação é necessária para o funcionamento do sistema de aquisição de dados de força, uma vez que o sinal de tensão emitido será convertido em sinal de força de acordo com a equação determinada a partir dos dados da calibração. Com esta finalidade, neste item, será apresentado o método utilizado para a determinação das curvas de calibração do dinamômetro. As curvas foram geradas a partir de ajuste polinomial do 3º grau, por ser o ajuste mais comum utilizado em calibrações de células de carga. Para a realização dos ensaios de calibração, foi desenvolvido um sistema de calibração estática composto dos seguintes elementos:

- Suporte vertical: elemento estrutural utilizado como suporte para o dinamômetro nos ensaios de calibração de X, Y e Z. É uma base da furadeira de bancada modelo FGC-16 de marca Ferrari – a qual possibilita inclinações de até 90° em relação à horizontal para calibração nas direções X e Y;
- Flange: componente mecânico que se conecta à base superior do dinamômetro em um diâmetro de 62 mm e à haste (descrita a seguir);
- Haste: componente mecânico constituído em aço que será utilizado como guia e suporte das massas para os ensaios de calibração para os eixos X e Y. Em conjunto com a flange forma o sistema de suporte às massas;
- Chassis NI CompactDAQ e módulo para aquisição NI9237: elementos responsáveis pela aquisição da informação dos extensômetros e processamento de sinais;
- Microcomputador (PC): elemento que apresentará a interface gráfica e de programação para os ensaios de calibração e de aquisição de dados.
- Massas: conjunto de massas de 5 kg (alocadas no Laboratório de Metrologia da UFRN).

Todos os ensaios de calibração estática foram realizados no Laboratório de Manufatura da UFRN.

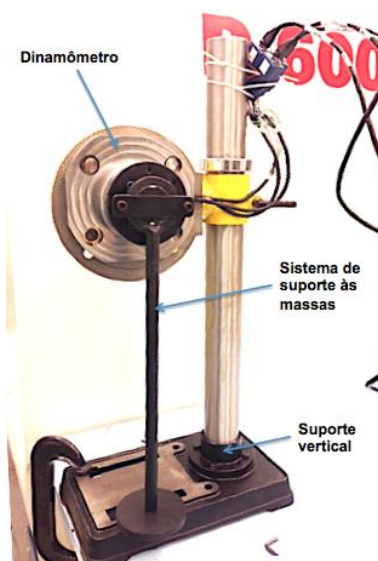
Para a fixação do dinamômetro ao suporte vertical foram utilizados parafusos. O sistema de suporte das cargas foi dado através da base superior, a qual acoplou-se a uma haste de aço que sustentará as massas. A flange, por sua vez, foi montada na base superior do dinamômetro com quatro parafusos M6x1,0 em um diâmetro de 62, mm para configurações de ensaios de calibração dos eixos X e Y. Nessa flange montou-se a haste, a qual possui comprimento de 380 mm, em função do limite do curso da cremalheira do suporte vertical e a base da mesa. Detalhes do sistema de suporte de massas são apresentados na Figura 20. A configuração do ensaio de calibração nos eixos X e Y são representada na Figura 21.

Figura 20 – Sistema de suporte de massas para calibração nas configurações X e Y



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 21 – Montagem do dinamômetro na mesa de calibração para ensaios na configurações X ou Y



Fonte: Elaborada pelo autor

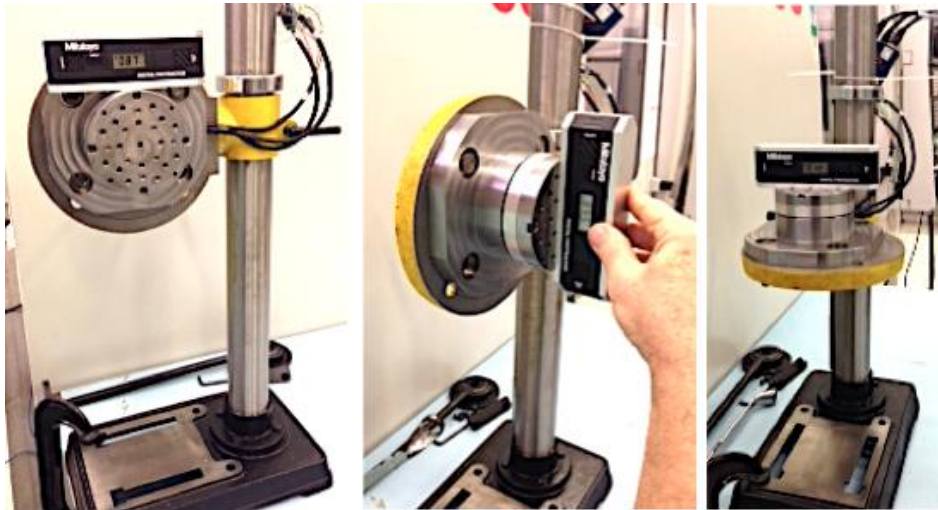
O sistema para cada uma dos ensaios de calibração passou, inicialmente, por uma pré-carga afim da minimização de efeitos nos elementos que poderiam causar histerese. Para cada eixo foi gerada uma curva de calibração, apresentadas e discutidas no item 4.4 deste trabalho. A seguir, serão detalhados os procedimentos adotados na calibração estática dos eixos de medição X e Y, e Z, do dinamômetro.

O dinamômetro então, acoplado à mesa do suporte, foi posicionado de acordo com o eixo de calibração. Duas configurações de mesa foram necessárias:

- X e Y: mesa rotacionada em 90° em relação à horizontal e dinamômetro disposto verticalmente (como apresentado na Figura 21); e
- Z: mesa posicionada a 0° em relação à horizontal e dinamômetro disposto horizontalmente.

O dinamômetro foi nivelado no início de cada ensaio de calibração com a utilização do nível eletrônico Digital Protractor de marca Mitutoyo, conforme apresentado na Figura 22. Para configurações de calibração X e Y, o nivelamento foi verificado em relação à horizontal e à vertical, ambos com tolerância de $5'$. Para a configuração de calibração Z, verificou-se apenas o nivelamento em relação à horizontal, adotando-se o mesmo nível de tolerância. O valor de $5'$ adotado teve como referência a incerteza do instrumento na casa de décimo de minutos e a um erro de cosseno aceitável à medida (influência menor que 1%).

Figura 22 – Teste de nivelamento



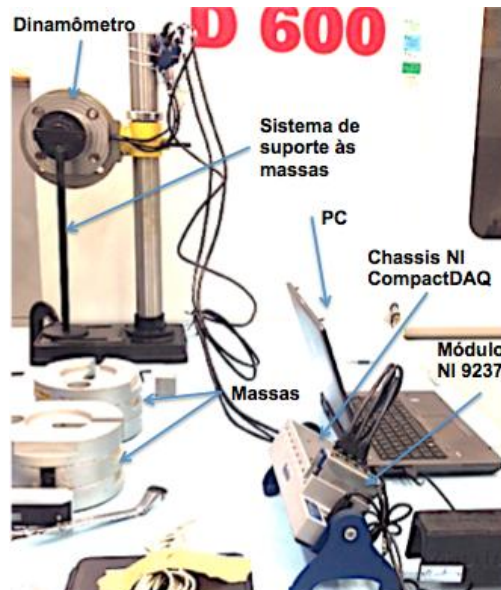
Fonte: Elaborada pelo autor

A aplicação de carregamentos de tração, direcionados radialmente ao dinamômetro, promoveu a indicação do valor de excitação da ponte em mV, indicada pelo programa de calibração utilizado. O valor de gravidade utilizado no processo foi de $g = 9,7811 \text{ m/s}^2$, influenciado pela altitude e latitude, determinado pelo Laboratório de Metrologia da UFRN, no NTI.

Para a calibração do eixo Z, não foi necessário a utilização do suporte de massas. O dinamômetro foi posto na posição vertical e as massas foram então centralizadas na base superior do dinamômetro. A calibração consistiu na aplicação direta de cargas conhecidas de compressão para a determinação da correlação entre a carga aplicada e a tensão de saída da célula.

A ligação dos cabos dos extensômetros aos conectores foi feita de acordo com National Instruments (2014) e o cabo do conector foi acoplado ao módulo de ponte digital NI 9237 através dos canais Ch 0; Ch1 e Ch2, para as configurações de ensaio X, Y e Z. A montagem do sistema final é apresentada na Figura 23.

Figura 23 – Bancada de calibração



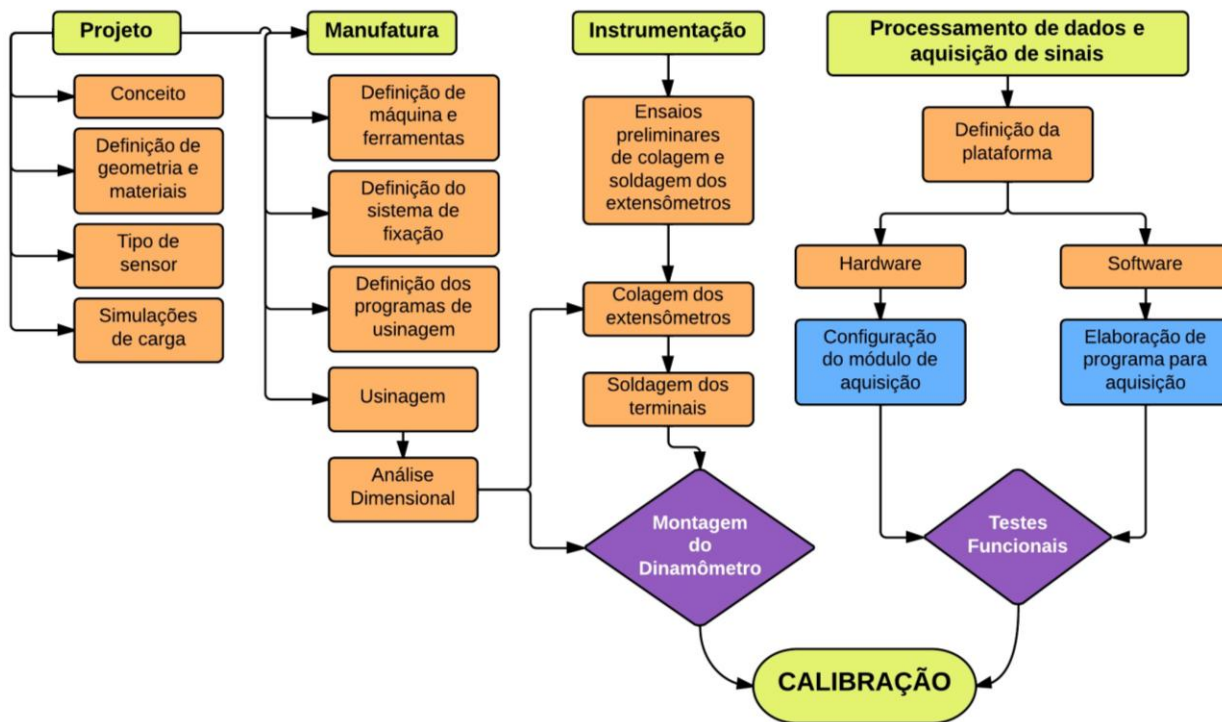
Fonte: Elaborada pelo autor

Tendo em vista a geração de uma curva de calibração, um programa para calibração foi desenvolvido (ver Anexo II) em plataforma LabVIEW vs. 2011. Neste programa, dois pontos de excitação foram determinados para cada valor de carga aplicada, e um gráfico de calibração foi gerado ao final do processo. Cada ensaio realizado foi composto por duas séries de carregamento seguido de descarregamento com uma carga máxima de 294,20 N e mínima de 0 N.

3.5 Fluxograma de execução

A Figura 24 apresenta o fluxograma das etapas desenvolvidas nessa pesquisa.

Figura 24 – Fluxograma de execução



Fonte: Elaborada pelo autor

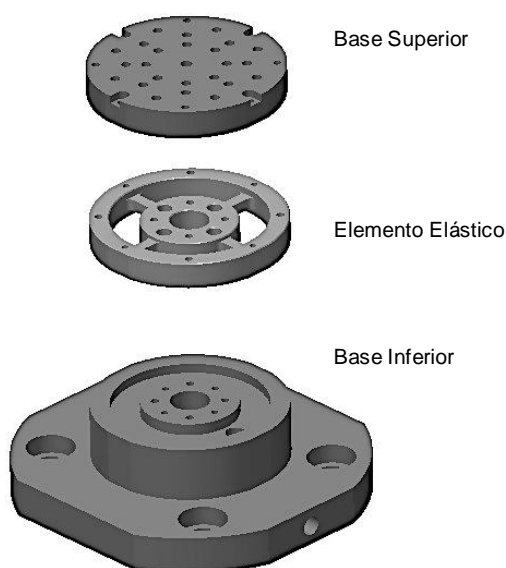
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo descreve os resultados obtidos no projeto e na construção do dinamômetro referentes ao dimensionamento, à escolha de materiais, ao sistema de fixação à mesa das máquinas-ferramenta e ao corpo-de-prova; a escolha dos extensômetros adequados, sistema de aquisição, processamento e desenvolvimento da calibração estática do conjunto; bem como testes-piloto de calibração serão abordados. Os tópicos são apresentados na mesma sequência descrita no capítulo Metodologia, de forma a facilitar a compreensão.

4.1 Projeto do dinamômetro e definição de extensômetros

O projeto do dinamômetro foi elaborado baseado nos requisitos definidos no item 3.1. A Figura 25 representa uma ilustração do conjunto do dinamômetro composto por três componentes básicos.

Figura 25 – Projeto do dinamômetro



Fonte: Elaborada pelo autor

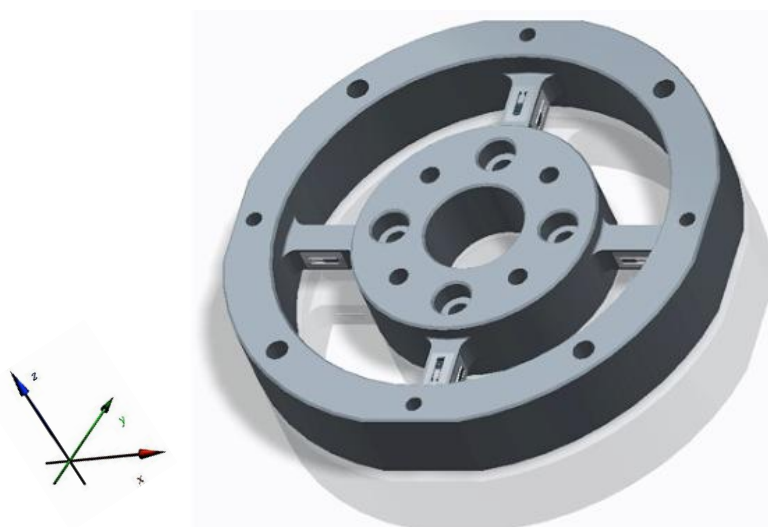
Todavia, diferentemente do dinamômetro desenvolvido por Roger (2013), o proposto por esta pesquisa terá como material das bases inferior e superior o aço AISI 4340 e, para o elemento

elástico, o alumínio 7075-T6 – de forma a concentrar as deformações do sistema nesse componente. Outro ponto relevante é que um sistema de compensação de temperatura foi agregado às conexões entre os sensores.

Contudo, a principal diferença entre esses dois projetos está na configuração da fixação do elemento elástico dos dinamômetros desenvolvidos. No caso do projeto de Roger (2013), como indicado na Figura 9, a fixação do elemento superior no dinamômetro se dá através de ligação no núcleo do elemento elástico e, por conseguinte, a fixação à base pelo anel externo do componente – enquanto que, no presente projeto, o sistema de fixação encontra-se invertido, como mostrado no Anexo I. Tal diferença de fixação proporciona ao projeto desenvolvido neste trabalho uma melhor transmissão de esforços de deformação ao braço do elemento elástico uma vez que o núcleo do componente encontra-se fixo à base do conjunto e o anel externo fixado à base superior apresentando menor rigidez diante da geometria projetada.

Diante disso, com o objetivo da indicação da força transmitida ao elemento elástico durante carregamento, 12 extensômetros uniaxiais foram utilizados de forma a permitir a medição da deformação em três direções ortogonais do dinamômetro, como mostrado na Figura 26.

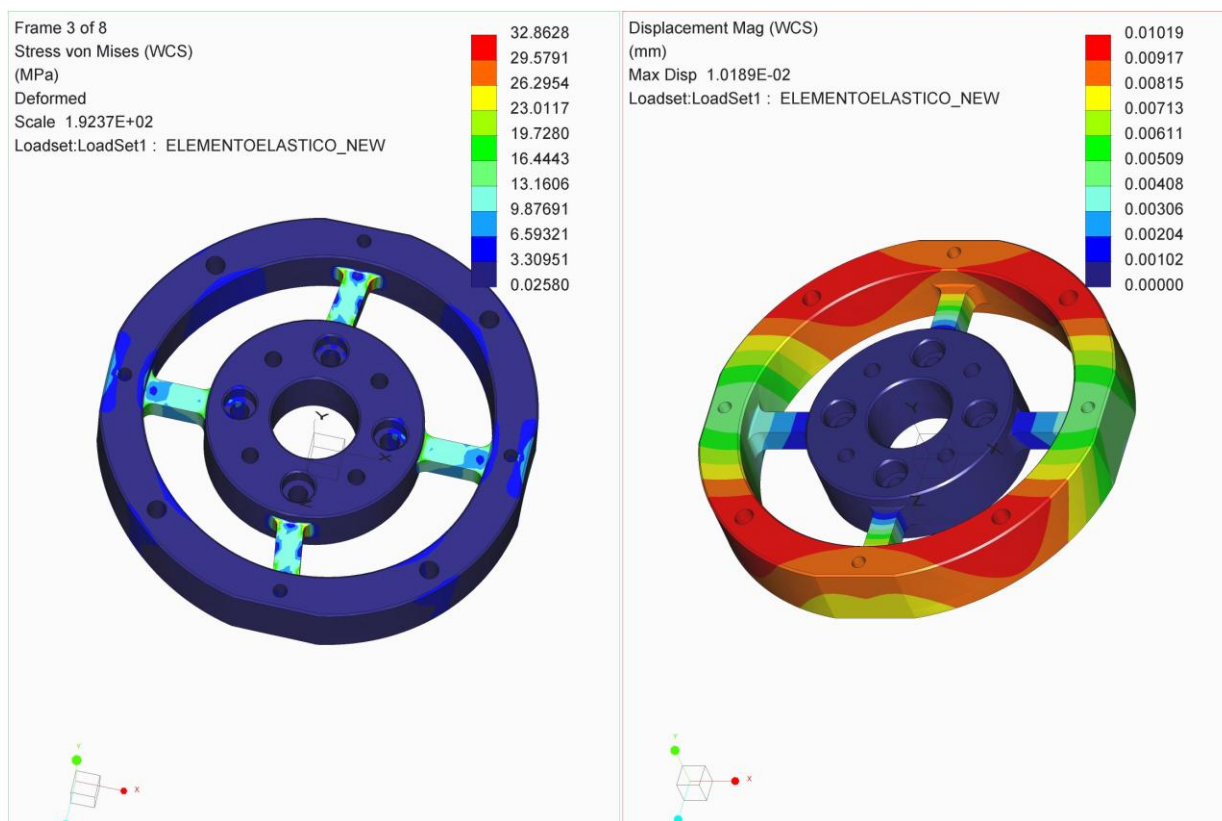
Figura 26 – Distribuição dos extensômetros no elemento elástico



Fonte: Elaborada pelo autor

A localização dos transdutores foram determinadas diante do resultado das simulações de carregamento com o Método dos Elementos Finitos. O resultado dos estados de tensão e deformação do elemento elástico do dinamômetro sob carregamento é apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Análise de tensões de Von Mises (a) e da magnitude de deformação (b) no elemento elástico através do Método dos Elementos Finitos com carregamento de 1000 N no eixo X



(a)

(b)

Fonte: Elaborada pelo autor

A partir das análises da Figura 27, pode-se observar a presença de uma tensão máxima de 32,86 MPa no corpo do elemento elástico. Essa tensão, por sua vez, representa 8,83% da tensão máxima admissível do material – que é de 372 MPa de acordo com MATWEB (2014) –, ou seja, o elemento durante o carregamento sofre apenas deformações no regime elástico.

Ainda, tensões entre 9,9 e 13,2 MPa são induzidas pelo carregamento na região central dos quatro braços que ligam o diâmetro externo ao interno do elemento elástico. A tensão observada é proveniente de esforços de tração e de compressão – na direção do carregamento – e de flexão, no eixo Y – ortogonal à aplicação do carregamento de simulação. Embora haja um esforço de flexão nos braços ortogonais à direção do carregamento devido à geometria do elemento, não há sinal em Y decorrente desse carregamento uma vez que não há desequilíbrio na ponte, ou seja, todos os quatro extensômetros sofrem a mesma deformação.

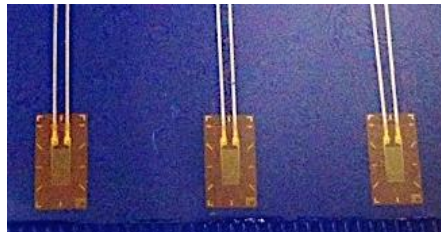
Ademais, observam-se duas faixas distintas de deformação elástica para esta análise: uma na direção X (esforços de tração e compressão) e outra na direção Y (esforços de flexão). As deformações simuladas para este carregamento foram máximas de 3,06 μm e de 6,11 μm – respectivamente para os eixos X e Y. Isso permite ao sistema de extensômetros uma medição

com confiança – visto que os transdutores são sensível à deformações de 1 μm segundo Shaw (2005).

Assim, os extensômetros foram dispostos em configuração de ponte completa e distribuídos em três conjuntos, sendo eles: um na direção X, um na direção Y e um na direção Z. O transdutor adotado para o projeto foi o extensômetro de referência HBM LY13-3/350 (ver Figura 28), o qual apresenta as seguintes características de acordo com o fabricante:

- Resistência nominal: $350 \Omega \pm 0.35 \%$;
- Dimensões do grade de medição: 3 mm x 1.5 mm;
- Tensão de excitação máxima permitida: 7 V;
- Constante do extensômetro (GF): $1,98 \pm 1.0\%$;
- Sensibilidade: -0.8%.

Figura 28 – Extensômetros HBM LY13-3/350



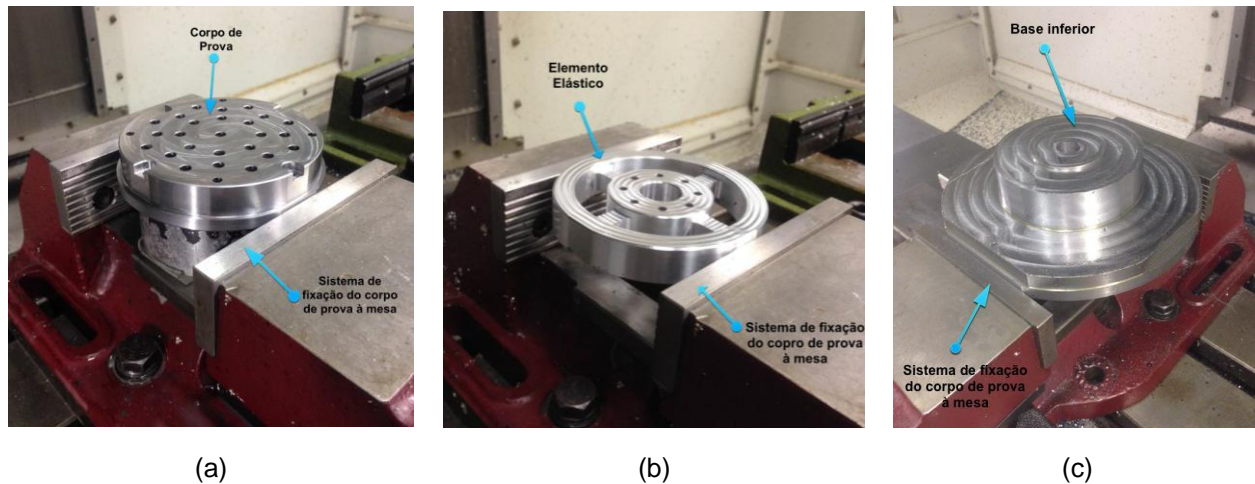
Fonte: Elaborada pelo autor

O extensômetro em questão foi selecionado por atender aos requisitos de projeto evidenciados no item 3.1 e por apresentar relação custo-benefício favorável.

4.2 Manufatura e análise dimensional

A Figura 29 apresenta a usinagem dos elementos de base superior, elemento elástico e base inferior, respectivamente.

Figura 29 – Usinagem da base superior (a), elemento elástico (b) e base inferior (c)



(a)

(b)

(c)

Fonte: Elaborada pelo autor

Durante o processo de fabricação, pôde-se observar que a manufatura não se constitui apenas da programação em linguagem ISO – e sim, do conjunto material-máquina. As operações, constituídas de etapas menores – denominadas operações elementares –, são de mesma importância para o conjunto final. Como exemplo dessas operações, pode-se citar o corte do material e desbaste, fixação do corpo-de-prova à mesa da máquina-ferramenta, referenciamento dos eixos coordenados da máquina em relação à superfície do corpo de prova, inspeção de medidas durante o processo, utilização ou não de fluido de corte, programação dos parâmetros de usinagem a serem utilizados e a inspeção de medidas – que se foi realizada em conjunto com a manufatura.

Dentre as etapas citadas, três se destacaram no decorrer dos três processos: o referenciamento, a programação via software CAM e a inspeção de medidas. A primeira consiste no processo que se dá após a fixação do corpo-de-prova à mesa da máquina-ferramenta e é responsável por indicar ao controlador do CNC as coordenadas e referência do corpo de prova. Baseado nessas coordenadas, toda a manufatura ocorre e, a cada mudança de posição relativa do corpo de prova à mesa da máquina-ferramenta, um novo referenciamento necessitará ser realizado.

A programação em linguagem CNC foi trabalhada via interface gráfica CAM e constitui da etapa mais importante na manufatura de elementos. Durante este processo, os parâmetros de usinagem foram definidos de acordo com especificações do catálogo de ferramentas (SANDVIK, 2011) e tipos de entradas – em rampa, helicoidal – e de corte – concordante ou discordante –, foram utilizados.

E, por fim, observou-se a importância da inspeção de medidas durante todo o processo de manufatura. A inspeção durante a manufatura foi realizada no Laboratório de Manufatura –

onde se encontra o centro de usinagem CNC ROMI D600 – e, a inspeção final foi realizada no Laboratório de Metrologia da UFRN.

4.3 Instrumentação

Tendo em vista os cuidados previstos no item 3.3, os pontos críticos da instrumentação deste projeto consistem nas técnicas de colagem e soldagem dos extensômetros. Neste sentido, antes da colagem em definitivo dos transdutores, peças-piloto foram desenvolvidas e utilizadas objetivando o desenvolvimento dessas competências e habilidades. Uma descrição dos ensaios preliminares, da aplicação no dinamômetro e do sistema de aquisição é apresentado e discutido a seguir.

4.3.1 Ensaio preliminar de colagem e soldagem de extensômetros

Pra ensaio preliminar de colagem e soldagem de extensômetros, utilizou-se um corpo de Alumínio da série 7000 que apresentou formato de barra retangular de dimensões de seção transversal de 12x21 mm e comprimento de 80 mm e dois extensômetros. O corpo-de-prova passou pela etapa de lixamento com lixas de granulometria de até 1200 para a remoção de qualquer contaminação da superfície (camada de óxido, tinta, etc.), e, posteriormente, fez-se a marcação do posicionamento do transdutor com caneta esferográfica. A passagem das lixas sobre a superfície metálica foi realizada em trajetórias aleatórias para melhor adesão da cola à superfície.

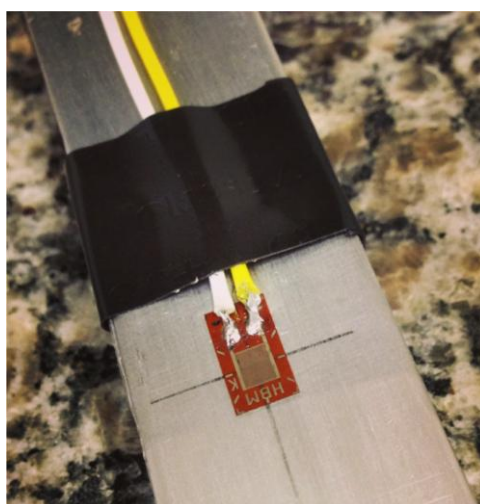
Nessa etapa, dois agentes de limpeza foram testados: álcool etílico (92%) através de um banho ultrassônico; e acetona (PA) juntamente a papel celulose foram utilizados para a limpeza da superfície. Contudo, vale ressaltar que a utilização da acetona na limpeza final da superfície, de acordo com HBM (2013), é recomendada devido à afinidade desse reagente com os componentes químicos da cola. Cada folha de papel celulose teve contato com a área de colagem uma única vez.

O posicionamento do extensômetro com a ajuda de uma fita e a aplicação da cola não induziram grandes dificuldades neste corpo de prova. Porém, quando se tem área de colagem reduzida, a utilização desse método tradicional de colagem e alinhamento tornam-se críticas fazendo-se necessário algumas adaptações. Alterações foram feitas e serão apresentadas no

próximo subitem. Após fixação do extensômetro à superfície, os cabos de ligação foram dispostos e temporariamente fixados com ajuda de uma fita isolante.

Essa prévia fixação possui extrema importância no processo de soldagem e só deverá ser retirada para a passagem do agente protetor da superfície pós soldagem e da limpeza dos seus resíduos. Com isso, o extensômetro foi submetido à soldagem e, posteriormente, a superfície foi limpa e coberta pelo adesivo HBM PU140. A Figura 30 ilustra a etapa final do processo antes da aplicação do adesivo protetor. O sistema foi disposto em situação semelhante a apresentada na Figura 13 do item 2.4.

Figura 30 – Dinamômetro uniaxial



Fonte: Elaborada pelo autor

Assim, esse ensaio foi fundamental no desenvolvimento de técnicas necessárias para as primeiras etapas do processo de construção de um dinamômetro e no diagnóstico de possíveis dificuldades. A partir dele pôde-se aprimorar e adaptar métodos de preparação de superfície, colagem e soldagem de extensômetros. Diante disso, a aplicação dos procedimentos discutidos no elemento elástico do dinamômetro será apresentado em detalhes no próximo tópico.

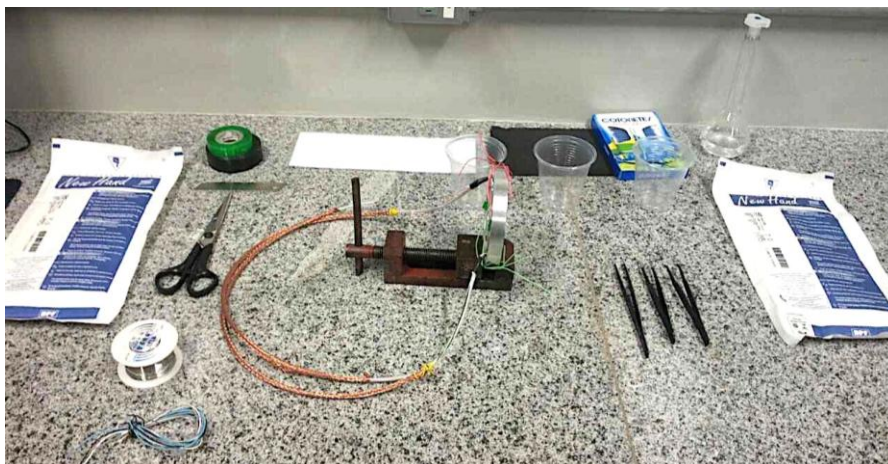
4.3.2 Aplicação no dinamômetro

Para a colagem e soldagem definitiva dos transdutores no elemento elástico, o procedimento descrito no item 3.4 foi adaptado às particularidades de geometria encontradas nesse componente.

Antes de iniciar o procedimento de limpeza da superfície de colagem, a rugosidade do componente usinado foi medida através do Rugosímetro portátil Taylor Hobson Precision. Esse instrumento indicou um valor de 0,4 Ra – o que permitiu que o processo de lixamento na

superfície fosse restrito apenas ao momento imediatamente antes da realização da limpeza e aplicação da cola. A lixa utilizada teve granulometria 220 e movimentos aleatórios durante o processo de lixamento foram adotados a fim de evitar a uniformidade na direção das ranhuras. Os materiais utilizados nesse processo, e descritos na metodologia, podem ser observados na Figura 31.

Figura 31 – Materiais utilizados na colagem e soldagem dos extensômetros



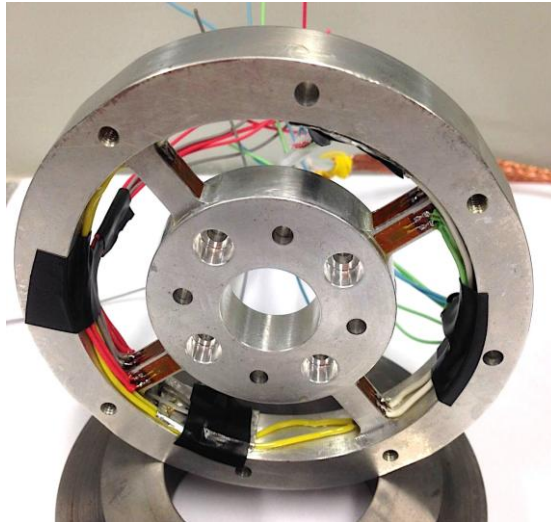
Fonte: Elaborada pelo autor

Em seguida, a superfície de todo o braço do elemento elástico passou pela etapa de limpeza. Papel celulose e acetona foram utilizados e manuseados com auxílio de um conjunto de pinças. Após a primeira retirada de resíduos do local, um único sentido foi adotado para passagem do papel celulose – o qual foi trocado a cada limpeza. A marcação da superfície não foi adotada neste procedimento devido às dimensões do braço do elemento elástico.

A cola foi aplicada e distribuída uniformemente na área de colagem com auxílio da fita de nylon. O extensômetro foi posicionado e alinhado para, em seguida, ser coberto por um adesivo de teflon e sofrer uma pressão durante, aproximadamente, 2 minutos. Na colagem dos extensômetros das direções X e Y, a utilização da pinça como elemento de aplicação de pressão foi fundamental – devido aos arredondamentos na ligação entre o braço e os diâmetros externos e internos.

Em seguida, o extensômetro foi submetido à soldagem. A temperatura da ponteira do ferro de solda adotada foi de 250 °C e utilizou-se um fio de solda Weilin de diâmetro de 0,3 mm e com 1,2% de fluxo como elemento de solda. A fixação dos cabos próximo ao local de solda foi importante nesse processo. Os resíduos do fluxo de solda foram retirados após o término da soldagem e a superfície foi coberta pelo adesivo HBM PU140. A Figura 32 ilustra o conjunto final após a o fim do processo de colagem e soldagem dos 12 extensômetros que compõem a célula de carga.

Figura 32 – Extensômetros e elemento elástico final



Fonte: Elaborada pelo autor

4.3.3 Sistema de aquisição e processamento de dados

Para completar a etapa de instrumentação, um sistema de aquisição e processamento de dados foi adotado. Diante dos equipamentos disponíveis no Laboratório de Manufatura da UFRN e das vantagens sobre a utilização da ponte de Wheatstone física, o hardware utilizado na aquisição dos dados do dinamômetro foi composto por:

- um computador;
- um chassi NI CompactDAQ;
- um elemento modular de referência NI 9237;
- 4 conectores e cabos RJ50.

Os conectores foram os elementos responsáveis pela ligação entre os canais do módulo e os cabos ligados aos terminais dos extensômetros. Esses conectores são próprios para o cada canal do módulo a ser utilizado e estão representados na Figura 33.

Figura 33 – Conector do módulo para extensômetros NI 9237



Fonte: Elaborada pelo autor

O módulo de ponte (ver Figura 34), por sua vez, foi responsável por todo o condicionamento de sinais necessário para a alimentação e aquisição de dados. Ele consiste no elemento de ligação entre o chassi e os quatro canais simultâneos; apresenta resolução de 24 bits, entradas analógicas de $25,00 \pm 0,038$ mV/V e taxa máxima de amostragem de 50 kS/s. O NI 9237 foi responsável pela realização da configuração programável de meia ponte e ponte completa com excitação interna de até 10 V.

Figura 34 – Módulo de aquisição NI 9237

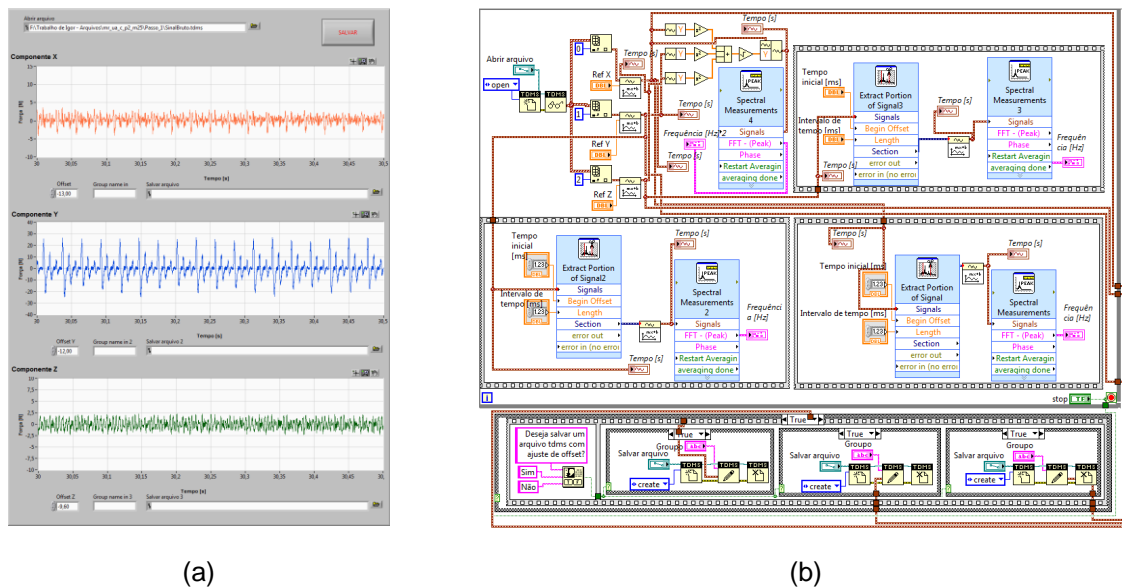


Fonte: Elaborada pelo autor

Ademais, esse elemento possui isolamento de 60 VCC e proteção contra transientes de até 1000 Vrms, que, segundo o manual do fabricante, torna-o menos susceptível à presença do ruído comum. Como diferencial para a aplicação diretamente a elementos que necessitem de configurações de ponte de Wheatstone, o módulo apresenta funções de ajuste de zero (offset), calibração de shunt e a detecção remota, necessitando apenas de um elemento de ligação com os transdutores: os conectores de referência RJ50.

Para criação do programa de aquisição de dados, o software de projeto gráfico de sistemas, NI LabVIEW versão 2011 foi utilizado e a interface apresentada na Figura 35 foi desenvolvida.

Figura 35 – Interface desenvolvida para análise do sinal de força (a) e diagrama de blocos (b)



(a)

(b)

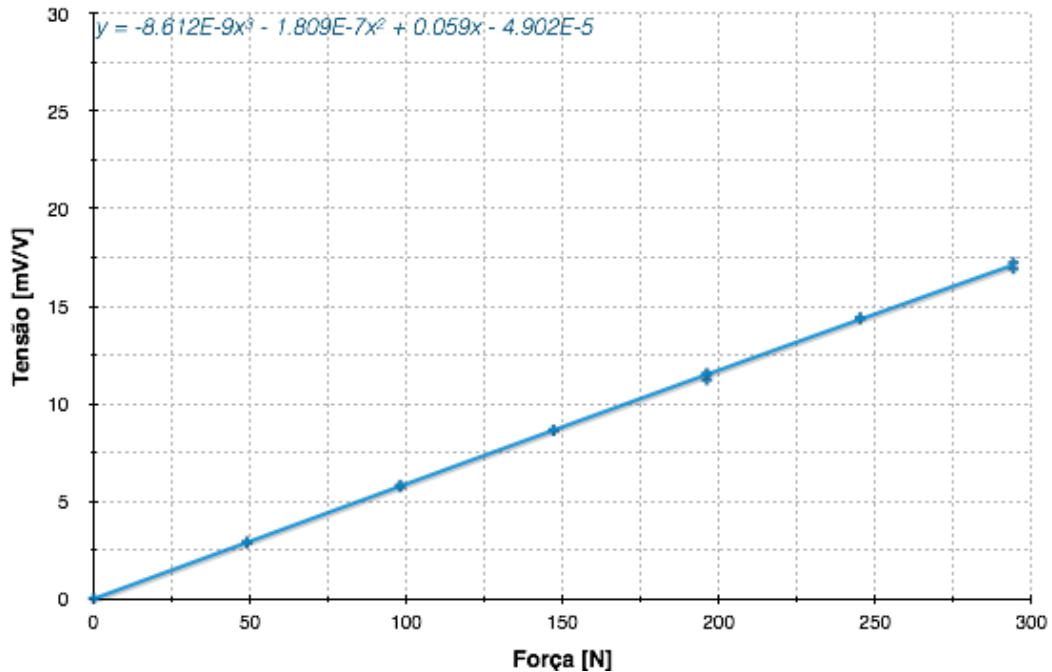
Fonte: Elaborada pelo autor

Esse programa possibilita a leitura de arquivo em formato “.tdms”, a apresentação dos dados e tratamento de sinal. O sinal apresentado foi resultado de um ensaio de força realizado por Andrade (2014) e foi utilizado unicamente neste documento para efeito de ilustração e demonstração do software. Programas que possibilitam o armazenamento de dados do dinamômetro, tratamentos de sinais, aplicação de filtros, análise de FFT (Fast Fourier Transform) e cálculo de força de usinagem também foram desenvolvidos.

4.4 Calibração Estática

A Figura 36 mostra o resultado de calibração para o eixo X do dinamômetro.

Figura 36 – Curva de calibração do eixo X

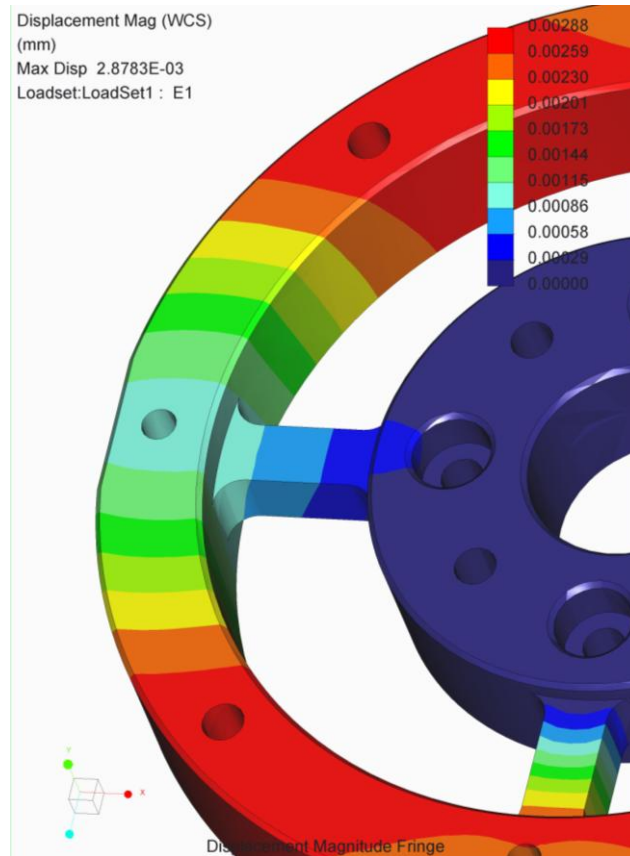


Fonte: Elaborada pelo autor

A curva polinomial de 3º grau indicada na Figura 36 evidencia a baixa influência dos termos de segunda e terceira ordem, o que favorece o caráter linear no primeiro trecho da curva. O trecho linear era previamente esperado devido aos resultados das simulações de elementos finito realizadas. As simulações indicaram a permanência no regime elástico durante carregamento de 1000 N – aproximadamente três vezes maior do que o máximo utilizado nesse processo de calibração.

Como o valor máximo aplicado no ensaio de calibração foi diferente do simulado previamente devido às limitações de carregamentos e da bancada de calibração, uma nova simulação com o método dos Elementos Finitos foi realizada. O carregamento utilizado foi distribuído e constante no valor de 294,2 N e a simulação foi polinomial de máxima ordem 7 e processada em múltiplos-passos, com fator de convergência de 10%. O resultado da simulação é apresentado na Figura 37.

Figura 37 – Simulação com o método dos Elementos Finitos com carregamento de 294,2 N no eixo X



Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 37 pode-se perceber a predominância da cor azul celeste na região central do braço onde os extensômetros estão localizados e, assim, uma máxima deformação local de 0,86 μm .

Para efeito de comparação entre o resultado obtido experimentalmente e o esperado através de simulação com o método dos Elementos Finitos, o valor de deformação associado à calibração pode ser determinado. De acordo com National Instruments (2013), e com base na teoria da extensometria e da ponte de Wheatstone, pode-se relacionar a tensão de saída (V_0) e a tensão de excitação da ponte (V_{EX}) com a constante do extensômetro (GF) e a magnitude de deformação (ε) como mostra a Equação (7).

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = \varepsilon GF \quad (7)$$

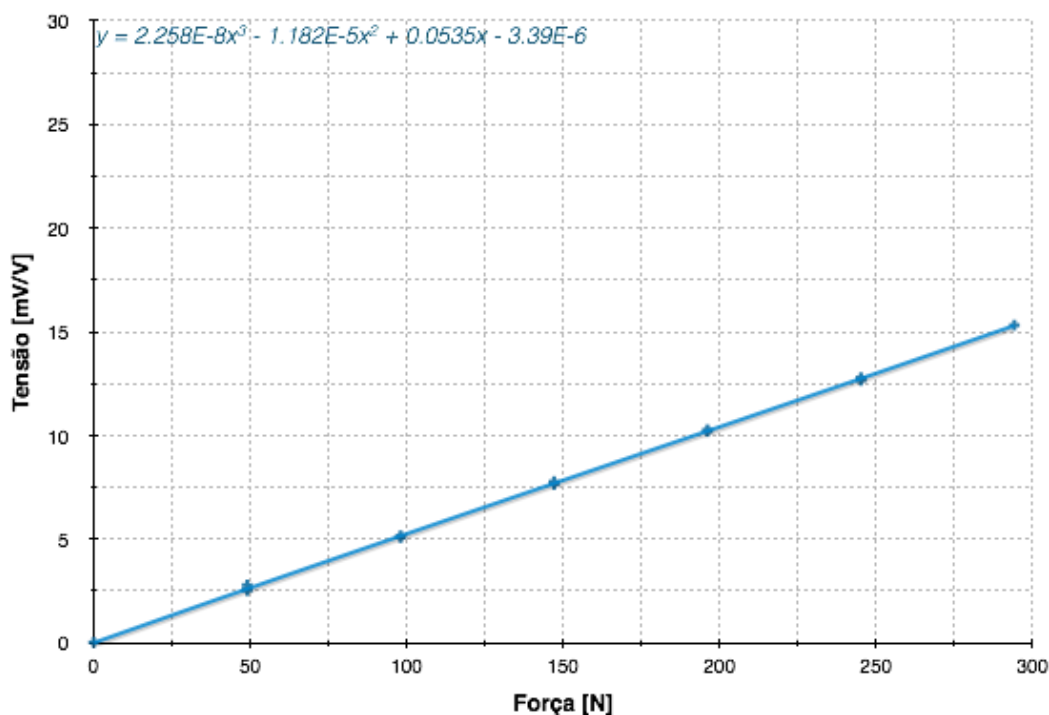
Diante dos dados de calibração, para a máxima carga aplicada obteve-se um valor de $V_0 = 16,38 \text{ mV}$. Assim, sabendo que $V_{EX} = 10 \text{ V}$ e que a constante dos extensômetros utilizados é de $GF = 1,98 \pm 1,0\%$, tem-se que o valor da magnitude de deformação alcançado na calibração com

carregamento de 294,2 N foi de $\varepsilon = 0,87 \mu m$. Portanto, pode-se afirmar que o valor experimental da calibração é condizente com a magnitude de deformação indicada através da simulação, apresentando uma diferença relativa de 1,15%.

Agora, tendo em vista o valor de magnitude de deformação de $\varepsilon = 3,06 \mu m$ indicado pela simulação para carregamentos de 1000 N na direção X e apresentado na Figura 27, e utilizando a curva de calibração do eixo X para uma extrapolação em $x = 1000$ N, obteve-se um valor de excitação de $V_0 = 50,21$ mV, teoricamente. Utilizando dos mesmos procedimentos e valores das constantes de GF e V_{EX} , obtém-se que $\varepsilon = 2,54 \mu m$. Esse resultado indica que, para valores mais elevados de carregamento, a lei de calibração começa a sofrer influência dos termos de segunda e terceira ordem fazendo com que seu caráter linear começa seja alterado. A diferença relativa entre os valores de teóricos e experimentais apresentada foi de 17%.

Para o eixo Y, os resultados de calibração indicaram a seguinte curva (ver Figura 38).

Figura 38 – Curva de calibração do eixo Y



Fonte: Elaborada pelo autor

Na curva de calibração do eixo Y, pode-se perceber a semelhança com a curva do eixo X em relação a seu caráter linear para valores de força menor do que 300 N. Os motivos que justificam a baixa influência dos termos de segunda e terceira ordem da lei de calibração são os mesmos já apresentados para o eixo X. Isso se deve predominantemente à geometria do componente e sua simetria radial, por destinar aos transdutores o mesmo esforço e a mesma resistência ao deslocamento.

Por isso, os resultados obtidos dos ensaios de calibração e a sensibilidade ao carregamento foram semelhantes às apresentadas no eixo X – o que já era previsto diante da literatura e da geometria do dinamômetro. As variações de valores entre os ensaios de calibração X e Y podem ser explicados pela interferência dos cabos e sistema de ligação elétrica no sinal emitido (ruído) e por diferenças que podem ter ocorrido durante a manufatura do elemento elástico.

Ainda, a simulação da magnitude de deformação para o eixo Y apresenta mesmos valores da simulação realizada para o eixo X, e por isso, não será apresentado em detalhes uma análise comparativa da deformação teórica e experimental.

Com o intuito de verificar a influência do carregamentos em Y no sinal emitido por X, um ensaio foi realizado e apresentado na Figura 39. O gráfico indica um “offset” de 35,546 mV/V, que é referente a massa dos componentes utilizados na calibração e uma taxa de crescimento de, aproximadamente, 0,34%. Essa taxa é desprezível em relação aos valores de tensão obtidos no eixo X devido a carregamentos no próprio eixo e pode, facilmente, ser desconsiderada.

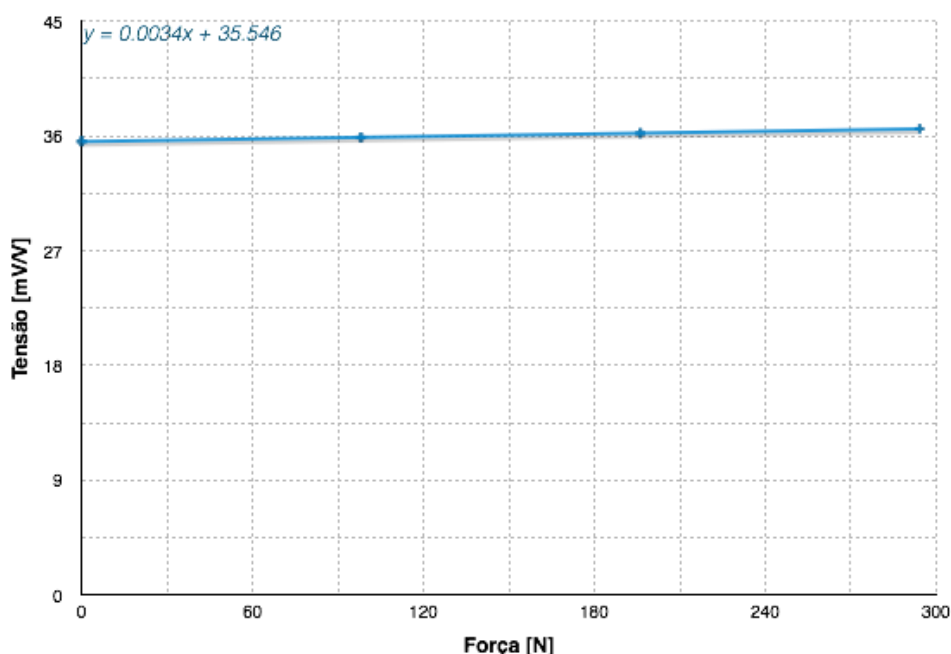


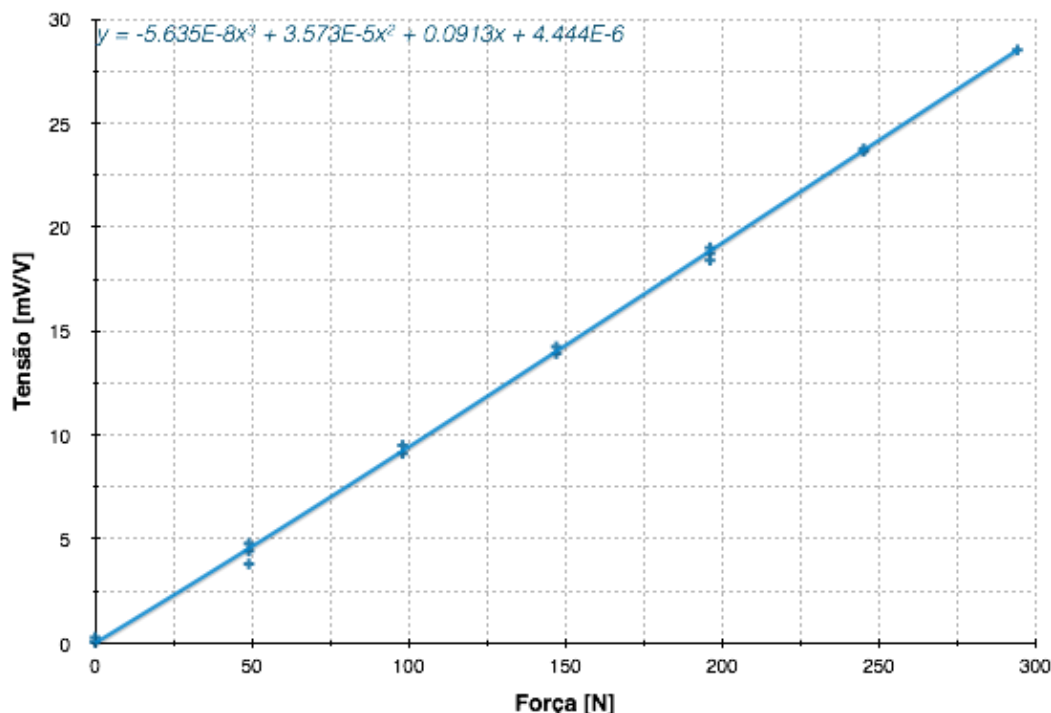
Figura 39 – Curva de influência de carregamentos em Y na componente X da força de usinagem

Fonte: Elaborada pelo autor

A curva polinomial de 3º grau obtida do ensaio de calibração estática do eixo Z – apresentada na Figura 40 – confirma, mais uma vez, a baixa influência dos termos de segunda e terceira ordem no comportamento da curva. Esse fato favorece uma relação linear entre tensão e

carregamento para valores de força menores do que 300 N e é suportado pelo regime elástico, no qual a deformação ocorre.

Figura 40 – Curva de calibração do eixo Z

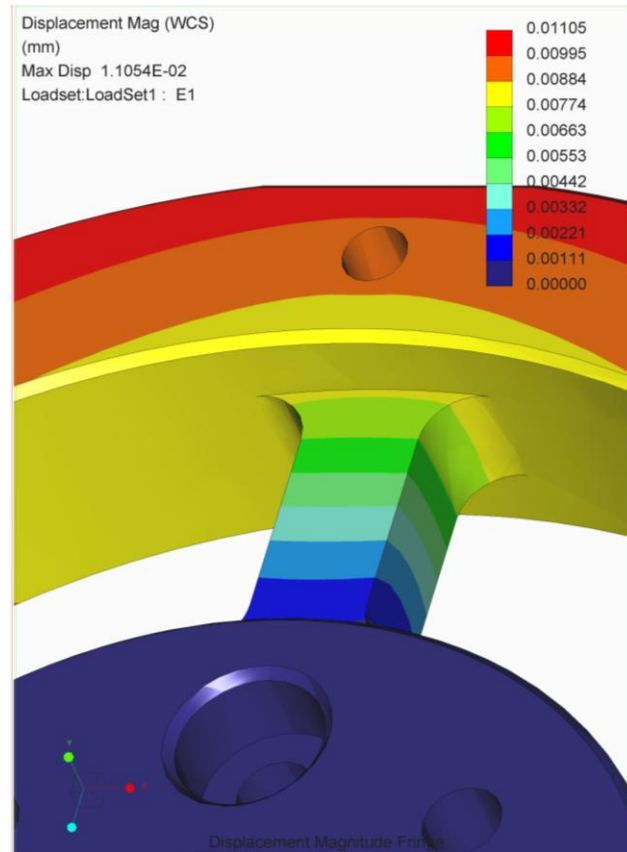


Fonte: Elaborada pelo autor

Ainda de acordo com a Figura 40, pode-se perceber que há uma maior sensibilidade na medição do que a observada para os outros dois eixos. Tal observação é dada a partir do valor da taxa de crescimento da curva, que para o eixo Z é de 9,13% enquanto que a dos eixos X e Y é de 5,9 e 5,35%, respectivamente. Isso é consequência da geometria, uma vez que nenhum elemento (braço) impõe resistência à deformação dos braços em que os transdutores estão localizados – como ocorre quando há um carregamento em X e os braços de Y fornecem uma resistência à deformação em X.

Agora, tendo em vista a comparação entre dados teóricos e experimentais, simulação de carregamento de compressão no eixo Z de 294,2 N, através do método dos Elementos Finitos, foi realizada e está apresentada na Figura 41. Os parâmetros de simulação foram os mesmos utilizados na simulação da deformação descrita na Figura 37.

Figura 41 – Simulação com o método dos Elementos Finitos com carregamento de 294,2 N no eixo Z



Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 41 pode-se perceber uma faixa de cores que vai do azul celeste ao verde bebê na região em que a grade de medição do extensômetro está localizada. Assim, observa-se uma deformação local máxima de $5,53 \mu\text{m}$.

Diante dos dados de calibração, para a máxima carga aplicada obteve-se um valor de $V_0 = 117,91 \text{ mV}$. Assim, sabendo que $V_{EX} = 10 \text{ V}$ e que a constante dos extensômetros utilizados é de $GF = 1,98 \pm 1,0\%$, tem-se que o valor da magnitude de deformação alcançado na calibração com carregamento de 294,2 N, de acordo com a Equação (7) foi de $\varepsilon = 5,96 \mu\text{m}$. Portanto, pode-se afirmar que o valor experimental da calibração é condizente com a magnitude de deformação indicada através da simulação, apresentando uma diferença relativa de 7,7%, aproximadamente.

Todos os dados obtidos durante a calibração estão presentes no Anexo III.

5 CONCLUSÃO

Do ponto de vista experimental, diante dos resultados obtidos e descritos neste trabalho, pode-se concluir que:

- O projeto do dinamômetro atendeu aos requisitos almejados;
- Análises com o método dos Elementos Finitos confirmou uma maior sensibilidade à aplicação dos esforços no local em que os extensômetros foram colados;
- A técnica utilizada no processo de colagem e soldagem dos extensômetros mostrou-se adequada;
- O desenvolvimento de programas para aquisição e processamento de dados no LabVIEW mostrou-se adequado às necessidades;
- Utilização de uma bancada de calibração estática para calibração dos três eixos de medição do dinamômetro;
- A calibração dos três eixos de medição indicou correlações lineares entre força e a tensão de saída do dinamômetro na faixa de 0 a 300 N e que os resultados obtidos da magnitude de deformação foram condizentes com as simulações de Elementos Finitos realizadas;
- O posicionamento de pinos e parafusos no projeto interfere na tensão local do elemento elástico, influenciando assim o sinal de saída da ponte. Assim, a localização dos parafusos deve ser em áreas mais distantes da região de medição.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações para trabalhos futuros pode-se destacar:

- Adição da análise de torque utilizando os mesmos transdutores, alterando apenas as ligações da ponte;
- Desenvolvimento de outros modelos de dinamômetro diante da viabilidade de construção e exploração de técnicas aplicadas a extensômetros e cristais piezoresistivos;
- Inverter posicionamento de pinos e parafusos, de forma a diminuir a influência do torque aplicado ao parafuso no sinal da célula de carga;
- Utilização de ponte de circuito impresso e ligação interna ao dinamômetro de forma a otimizar o espaço dos cabos e possibilitar aquisição através de um módulo de tensão;
- Estudo mais elaborado de condicionamento de sinal e aplicação de filtros mais específicos e atenuadores de sinal;
- Desenvolvimento de bancada de calibração dinâmica-estática;
- Extrapolação do conhecimento para outras áreas com o desafio da aquisição do sinal de força via wireless e estudo aplicado à dinâmica do movimento.

7 REFERÊNCIAS

ALTINTAS, Y. **Manufacturing Automation**. 1. Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. P.283

ANDERSSON, C. e ANDERSSON, M., 2011. **International Journal of Machine Tools & Manufacture Experimental studies of cutting force variation in face milling**. , 51, pp.67–76.

ANDRADE, I. L. de. “**OTIMIZAÇÃO DO FRESAMENTO DE ROSCAS INTERNAS POR INTERPOLAÇÃO HELICOIDAL.**” *Dissertação de Mestrado*. Natal, Rio Grande do Norte: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Fevereiro de 2014.

ARAUJO, A. C. M. de. “**Modelo mecânico de força de usinagem no fresamento de roscas.**” *Tese de Doutorado*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 9 de Novembro de 2004.

BARRETO JUNIOR, E. (2013, August 5). Manual prático - Extensometria. Acesso em 5 de agosto de 2013, <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAARQAK/extensometria-manual-pratico>>

COOK, N. H., LOEWEN, E. G., SHAW, M. C. Machine-tool dynamometers. **Am. March**. (1954)

DALLY, J. W. **Experimental Stress Analysis** – McGraw-Hill, 1978.

GUNAY, M., SEKER, U. e SUR, G., 2006. Design and construction of a dynamometer to evaluate the influence of cutting tool rake angle on cutting forces. **Materials & Design**, 27(10), pp.1097–1101.

HBM. **Instructions for Use - Rapid Adhesive Z70**. HBM. Hottinger Baldwin Messtechnik. 2013. <http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/a1653.pdf> (acesso em 1 de Julho de 2014).

HOFFMAN, K. **An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges**. HBM, 2014.

ISCAR (2013). Calculadora. Acesso em 20 de novembro de 2013, de ISCAR: <<http://mpwr.iscar.com/machiningpwr/machiningpower.wgx?vwginstance=2331dfd8e1634ceab58f0664165fcfde>>

ITO S., SAKAI S., ISHIKAWA M., **Bull. Jpn. Soc. Prec. Eng.** (1980) 14–25.

KARABAY, S., 2007. Analysis of drill dynamometer with octagonal ring type transducers for monitoring of cutting forces in drilling and allied process. **Materials & Design**, 28(2), pp.673–685.

KENNAMETAL (2013). Calculadora. Acesso em 20 de novembro de 2013, de KENNAMETAL: <<http://www.kennametal.com/kennametal/pt/resources/calculators/face-milling/force-torque-and-power.html>>

KIM, J. D., KIM, D. S. Development of a combined-type tool dynamometer with a piezo-film accelerometer for an ultraprecision lathe, **Journal of Material Processing Technology**, 71 (1997) 360-366.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: cutting**. Kindle ed. Berlin: Springer, 2011.

KLOCKE, F. et al., 2012. New Concepts of Force Measurement Systems for Specific Machining Processes in Aeronautic Industry. **Procedia CIRP**, 1, pp.552–557.

KORKUT, I. A dynamometer design and its construction for milling operation, **Mater. Design** 24 (2003) 631-637.

KUPHALDT, T. R. (2006, August 18). Lessons in Electric Circuits. Acesso em 23 de julho de 2013, de All About Circuits: <<http://www.allaboutcircuits.com/pdf/DC.pdf>>

LATHI, B. P. (2007). **Sinais e Sistemas Lineares** (Vol. II). São Paulo, São Paulo, Brasil: BOOKMAN.

MARGARIDO, A. “**Estudo da influência da força de corte da usinagem a verde nas propriedades mecânicas de cerâmicas sinterizadas.**” *Dissertação de Mestrado*. São Carlos, São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 2011.

MARQUES, J. S. (01 de janeiro de 2010). Institute for Systems and Robotics - Lisbon. Acesso em 17 de 12 de 2013, disponível em Institute for Systems and Robotics: <http://users.isr.ist.utl.pt/~jsm/teaching/ss/1_Sinais.pdf>

Matweb. *ASM Aerospace Specification Metals Inc.*
<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075T6> (acesso em 15 de July de 2014).

Micro-Measurement. **Surface Preparation for Strain Gage Bonding**. *Micro-Measurement*. 19 de Dezembro de 2011. http://www.vishaypg.com/docs/11129/11129_b1.pdf (acesso em 1 de Julho de 2014).

National Instruments. (18 de julho de 2012). O que é condicionamento de sinal. Acesso em 09 de janeiro de 2014, disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/10630/pt/>

National Instruments. (09 de Janeiro de 2013). *Medindo distensão com Strain Gauges*. Acesso em 29 de Agosto de 2014, disponível em National Instruments, Inc.: ni.com

NOTECCI FILHO, S. (01 de 01 de 2013). ETELJ. Acesso em 17 de 12 de 2013, disponível em etelj: <<http://www.etelj.com.br/etelj/artigos/151280402b0bc1accfaea913d6301caf.pdf>>

RANGARAO, K. V., MALLIK, R. K. (2005). **Digital Signal Processing - A practitioner's Approach**. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.

RIBEIRO, J. L., ABRÃO, A. M., & SALES, W. F. Forças de usinagem no fresamento de aços para matrizes. **16º POSMEC**, 1-10, 2006.

ROGER, Alessandro. **Projeto do dinamômetro**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <Kandice Suane Barros Ribeiro> em 27 de abril de 2013.

ROSSI, Guilherme Cruz. “**Estudo das Forças de Corte no Processo de Fresamento de Bordas de Chapas Utilizadas para a Fabricação de Tubos de Aço com Costura**”. 2008. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SANTOCHI, M. et al., 1997. A Sensor-Integrated Tool for Cutting Force Monitoring. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 46(1), pp.49–52.

SANDVIK. **Ferramentas Rotativas - Fresamento**. Acesso em 02 de agosto de 2014, disponível em: < http://www.sandvik.coromant.com/_layouts/15/tibp/downloadshandler.ashx?url=http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/pt-pt/rotating/rot_d.pdf&file Name=Ferramentas%20Rotativas%20-%20Fresamento>

SCHMITZ, T. L., GREGORY, S. D., JOHN, C. Z. e DAVID, C. B. **Flexure-based dynamometer for determining cutting force**. Gainesville, FL (US) Patente US 7,536,924 B2. 9 de May de 2009.

SHABANA, A. a., 2008. Forces and Stresses. In **Forces and stresses in metal cutting**. pp. 103–130.

SHAW, Milton C. **Metal Cutting Principles**. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005.

THOMAS, J. E., TRIGGIA, A. A., CORREIA, C. A., et al. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 1 ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.

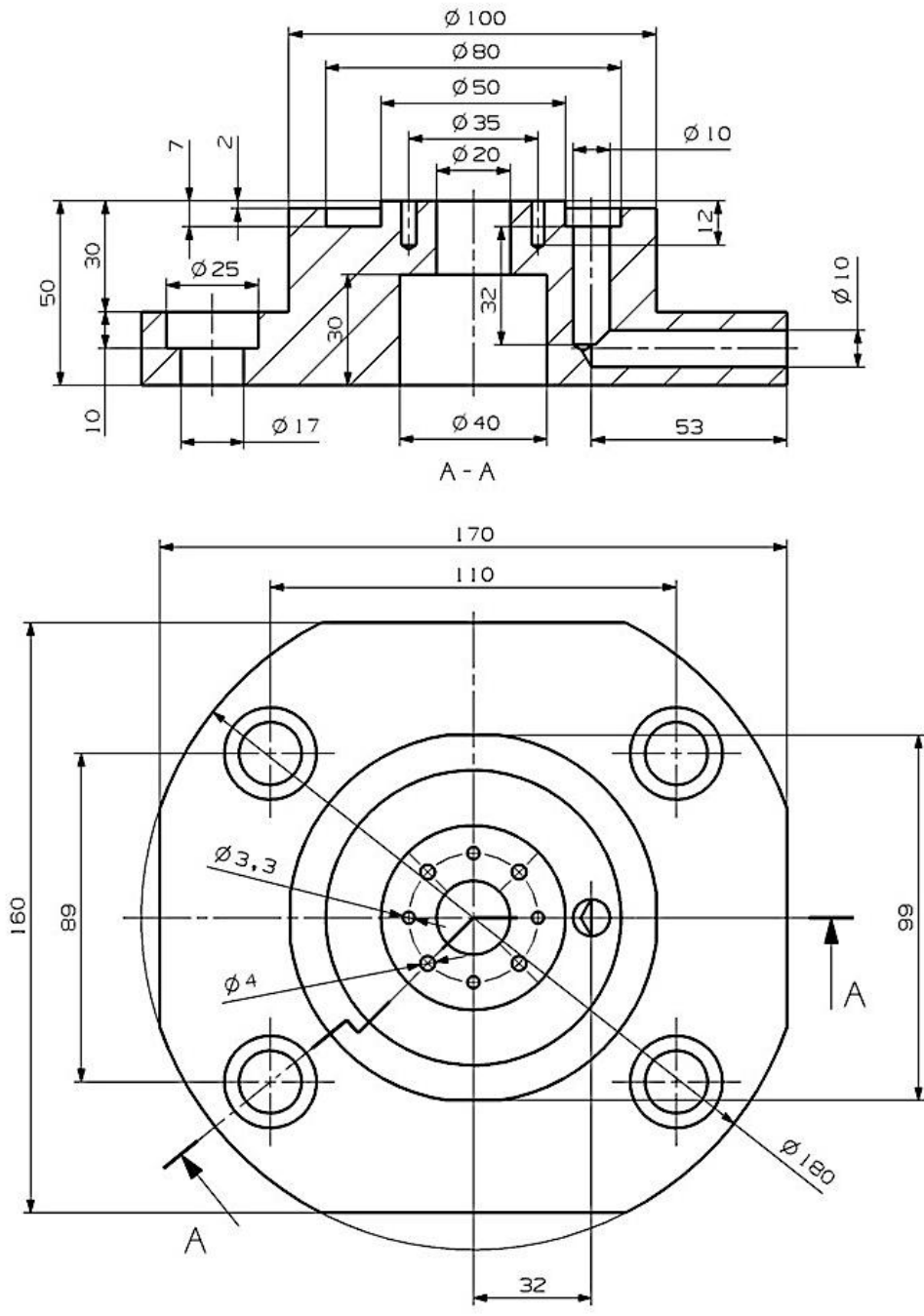
TORTIS, G., SORTINO, M. Development of a modular dynamometer for triaxial cutting force measurement in turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 51 (2011) 34-42.

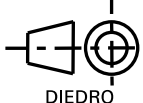
YALDIZ, S., ÜNSAÇAR, F. A dynamometer design for measurement the cutting forces on turning. **Measurement** 39 (2006) 80-89.

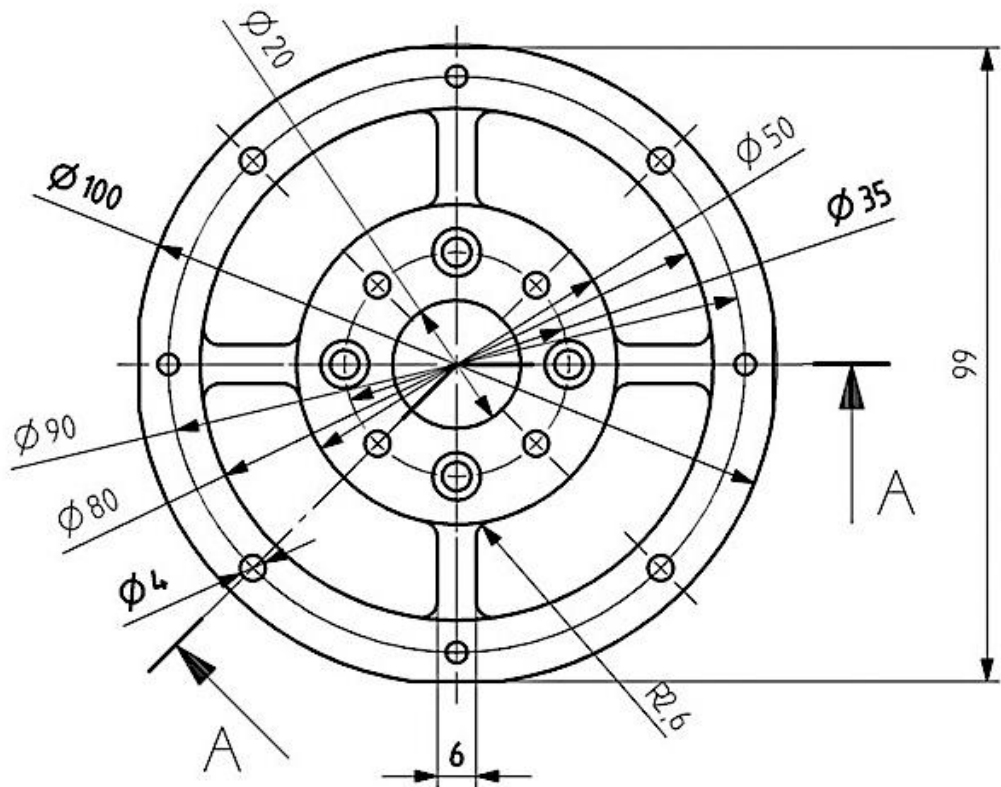
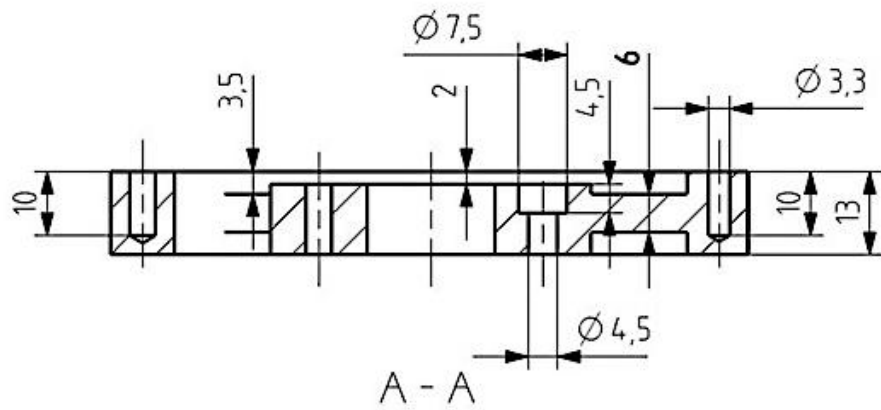
YALDIZ, S.; ÜNSAÇAR, F.; SAĞLAM, H.; IŞIK, H. Design, development and testing of a four-component milling dynamometer for the measurement of cutting force and torque. **Mechanical Systems and Signal Processing** 21 (2007) 1499-1511.

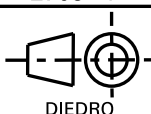
Yokogama Eletric Works, LTD. **Instruction Manual for TYPE 3126 Strain Amplifier**. São Paulo, São Paulo: Dinateste Indústria e Comércio LTDA, 01 de 10 de 1986.

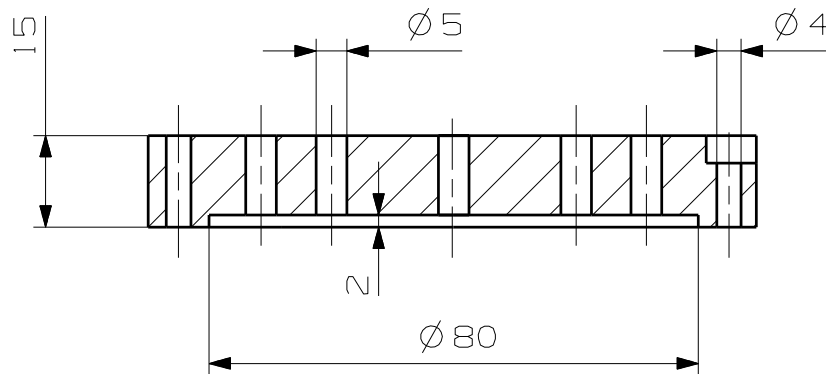
ANEXO I – PROJETO DO DINAMÔMETRO



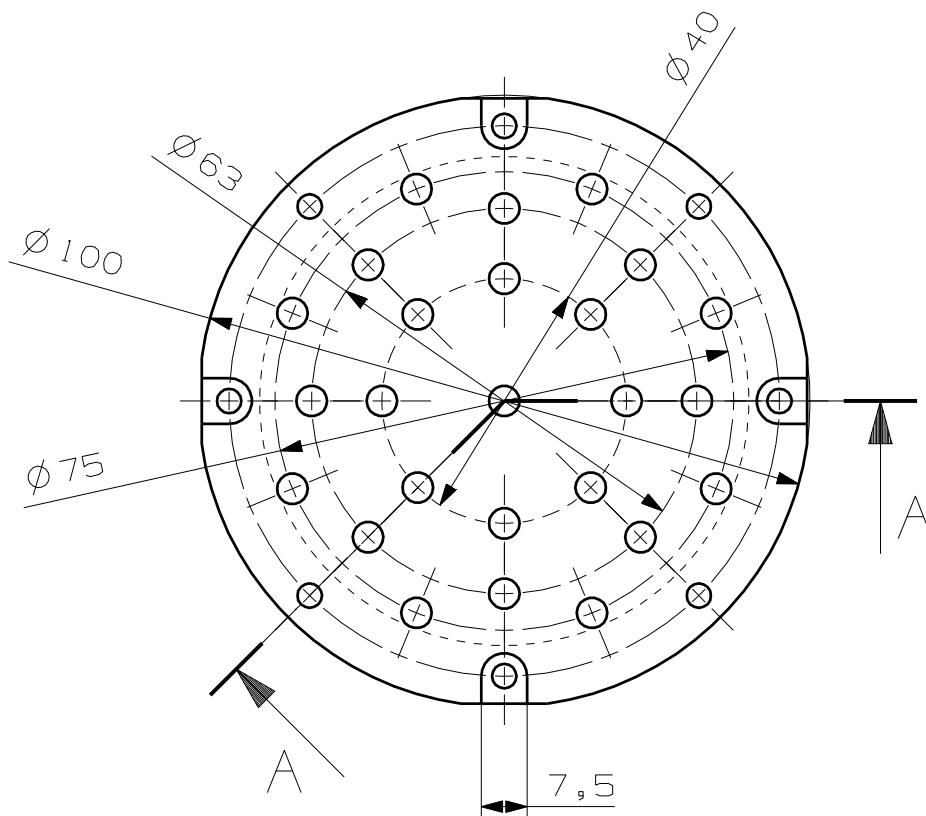
01	01	Base Inferior	Aço AISI 4340	--
ITEM	QTDE.	DENOMINAÇÃO	MATERIAL - DIM. EM BRUTO	REFERÊNCIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE				DIMENSÕES EM: mm
TOL. GERAL NBR ISO 2768 - f	TÍTULO Projeto - Dinamômetro		FOLHA 01/03	REVISÃO --
 DIEDRO	RESPONSÁVEL	Kandice Suane Barros Ribeiro	ESCALA 2:1	Nº DO DESENHO 01/2014
	LOCAL E DATA	Natal, 5 de setembro de 2014		
	DISCIPLINA			




01	01	Elemento Elástico	Alumínio 7075 T6	--
ITEM	QTDE.	DENOMINAÇÃO	MATERIAL - DIM. EM BRUTO	REFERÊNCIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE				DIMENSÕES EM: mm
TOL. GERAL NBR ISO 2768 - f	TÍTULO Projeto - Dinamômetro		FOLHA 02/03	REVISÃO --
 DIEDRO	RESPONSÁVEL	Kandice Suane Barros Ribeiro	ESCALA 1:1	Nº DO DESENHO 02/2014
	LOCAL E DATA	Natal, 5 de setembro de 2014		
	DISCIPLINA			



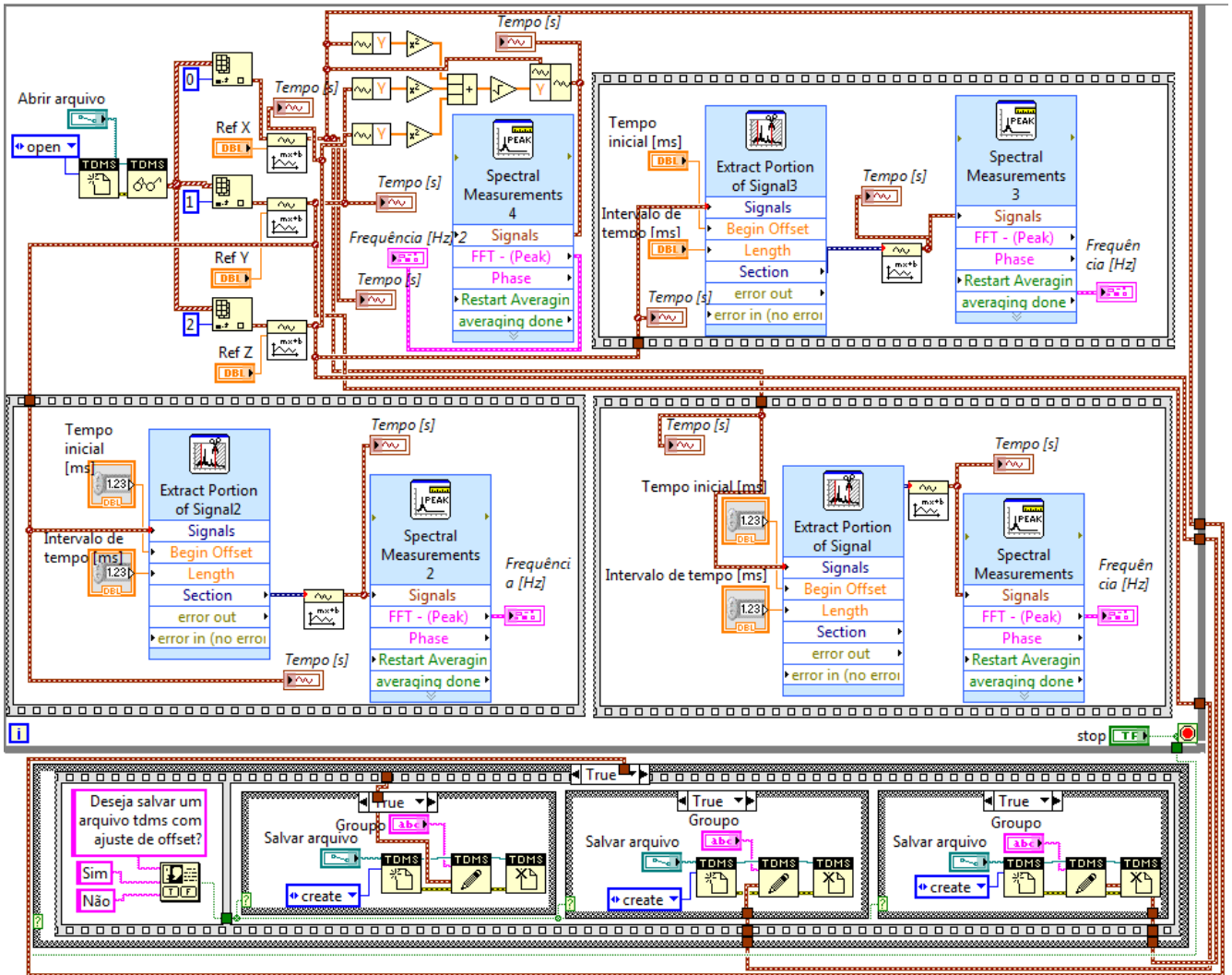
A - A



01	01	Base Superior	Aço AISI 4340	--
ITEM	QTDE.	DENOMINAÇÃO	MATERIAL - DIM. EM BRUTO	REFERÊNCIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE				DIMENSÕES EM: mm
TOL. GERAL NBR ISO 2768 - f	TÍTULO Projeto - Dinamômetro		FOLHA 03/03	REVISÃO --
 DIEDRO	RESPONSÁVEL	Kandice Suane Barros Ribeiro	ESCALA 1:1	Nº DO DESENHO 03/2014
	LOCAL E DATA	Natal, 5 de setembro de 2014		
	DISCIPLINA			

ANEXO II – PROGRAMAS DE AQUISIÇÃO

Figura 42 – Diagrama de blocos do programa de pós-processamento de dados



Fonte: Elaborada pelo Autor

ANEXO III – DADOS DE CALIBRAÇÃO

Tabela 1 – Dados da calibração dos eixos X, Y e Z

Ensaio X	Força [N]	Tensão 1 [mV]	Tensão 2 [mV]	Tensão [mV]	Ensaio Y	Força [N]	Tensão 1 [mV]	Tensão 2 [mV]	Tensão [mV]	Ensaio Z	Força [N]	Tensão 1 [mV]	Tensão 2 [mV]	Tensão [mV]
	0	33.5419	33.6554	33.5986		0	25.6012	25.5453	25.5732		0	89.9708	89.3006	89.6357
	0	33.5408	33.6539	33.5974		0	25.6014	25.5390	25.5702		0	88.9638	89.3043	89.1341
	49.0333	30.6319	30.7383	30.6851		49.0333	28.1863	28.0900	28.1382		49.0333	93.5879	92.7458	93.1668
	49.0333	30.6288	30.7443	30.6865		49.0333	28.1799	28.1275	28.1537		49.0333	93.5964	93.9722	93.7843
	98.0665	27.7576	27.8204	27.7890		98.0665	30.7269	30.7030	30.7150		98.0665	98.2666	98.6894	98.4780
	98.0665	27.7616	27.8517	27.8066		98.0665	30.7393	30.6943	30.7168		98.0665	98.2927	98.7155	98.5041
	147.0998	24.9392	24.9672	24.9532		147.0998	33.2878	33.2564	33.2721		147.0998	103.0641	103.4836	103.2738
	147.0998	24.9116	24.9775	24.9445		147.0998	33.3847	33.2542	33.3194		147.0998	103.0728	103.4965	103.2846
	196.1330	22.0191	22.7735	22.3963		196.1330	35.8320	35.8084	35.8202		196.1330	107.8596	107.6720	107.7658
	196.1330	22.0192	22.1263	22.0728		196.1330	35.8407	35.7989	35.8198		196.1330	107.8947	108.3013	108.0980
	245.1663	19.1126	19.4239	19.2683		245.1663	38.0545	38.3444	38.1994		245.1663	112.7244	113.2780	113.0012
	245.1663	19.2969	19.2478	19.2724		245.1663	38.3149	38.3397	38.3273		245.1663	112.7239	113.2664	112.9952
	294.1995	16.2994	17.0949	16.6972		294.1995	40.8430	40.8793	40.8612		294.1995	117.5929	118.1597	117.8763
	294.1995	16.3107	16.4507	16.3807		294.1995	40.8021	40.8601	40.8311		294.1995	117.6743	118.1592	117.9168
	245.1663	19.1009	19.3042	19.2025		245.1663	38.2565	38.3059	38.2812		245.1663	112.9063	113.3415	113.1239
	245.1663	19.1929	19.2844	19.2386		245.1663	38.2625	38.3059	38.2842		245.1663	112.9044	113.3505	113.1274
	196.1330	22.0555	22.1399	22.0977		196.1330	35.7062	35.7641	35.7352		196.1330	108.1460	108.5941	108.3701
	196.1330	22.0657	22.1547	22.1102		196.1330	35.6941	35.7641	35.7291		196.1330	108.1406	108.5859	108.3632
	147.0998	24.9781	25.0200	24.9991		147.0998	33.1477	33.2087	33.1782		147.0998	103.4228	103.7984	103.6106
	147.0998	24.9834	25.0187	25.0011		147.0998	33.1580	33.2123	33.1852		147.0998	103.4265	103.7890	103.6078
	98.0665	27.8793	27.8689	27.8741		98.0665	30.5787	30.6513	30.6150		98.0665	98.7203	99.0237	98.8720
	98.0665	27.8827	27.8700	27.8764		98.0665	30.5920	30.6515	30.6218		98.0665	98.7112	99.0110	98.8611
	49.0333	30.7442	30.7526	30.7484		49.0333	28.5787	28.0927	28.3357		49.0333	94.0227	94.2742	94.1484
	49.0333	30.7357	30.7455	30.7406		49.0333	28.0333	28.0970	28.0652		49.0333	94.0227	94.2669	94.1448
	0	33.6411	33.6515	33.6463		0	25.4742	25.5367	25.5054		0	89.3405	89.5117	89.4261
	0	33.6411	33.6515	33.6463		0	25.4742	25.5367	25.5054		0	89.3311	89.5117	89.4214

Fonte: Elaborada pelo autor