

Monografia de Graduação

Projeto e construção de dinamômetro triaxial com múltiplos elementos elásticos

Maria Augusta de Menezes Lourenço

Natal, julho de 2018



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

Projeto e construção de dinamômetro triaxial com múltiplos elementos elásticos

MARIA AUGUSTA DE MENEZES LOURENÇO

Monografia de Graduação apresentada ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo 14 (PRH ANP - 14) na Universidade Federal do Rio Grande do Norte como documento de conclusão do projeto de pesquisa, orientado pelo Prof. Dr. Adilson José de Oliveira.

Natal, julho de 2018

Dedico aos meus pais, minha irmã, demais familiares e amigos, que me incentivaram e estiveram sempre ao meu lado.

Agradecimentos

A realização dessa monografia só foi possível devido ao suporte técnico, intelectual, emocional e físico de profissionais, familiares e amigos que tiveram influência direta e indireta no processo de desenvolvimento desta pesquisa. Portanto, aos envolvidos, direciono meus sinceros agradecimentos.

Agradeço a Deus pela minha vida, por ter me concedido saúde e inteligência, me permitindo viver este momento e concluir mais uma etapa da minha formação profissional.

Aos meus pais, minha irmã e demais familiares, aqueles que são meus pilares e exemplos, que me ensinaram desde criança o valor e a importância da educação, do esforço e da dedicação para alcançar os meus objetivos.

Ao Prof. Dr. Adilson José de Oliveira, meu orientador, que confiou e acreditou em mim para a realização deste trabalho, que esteve sempre ao meu lado e que me incentiva a cada dia a ir além. Obrigada pela paciência, confiança, companheirismo, dedicação e esforço. A ele, expresso minha amizade e gratidão.

A todos que fazem o Laboratório de Manufatura, no qual fui acolhida e desenvolvi esta pesquisa. Aos funcionários Elmar Damasceno, Francisco Chavier, Francisco Luiz da Silva, João Maria A. Frazão e José de Jesus. Aos docentes, aqui representados pelo Prof. Dr. Adilson José de Oliveira, Prof. Dr. Anderson Clayton Alves de Melo, Prof. Dr. Lucio Ângelo de Oliveira Fontes e Prof. Dr. Márcio Valério de Araújo. Aos companheiros de laboratório, em especial Kandice Ribeiro, Kaciê Trindade, Jonas Medeiros, Clemenson da Costa, Marcos Vinicyus de Araújo, Diego Porto, Dávila Moreira, Gabriel Nogueira, Gabriel Lima e Matheus Fernandes.

Ao Laboratório de Metrologia, pela parceria e suporte ao desenvolvimento do projeto. Aos técnicos e docentes, aqui representados na figura do Prof. Me. Luiz Pedro de Araújo e do Prof. Me. Igor Lopes de Andrade.

Agradeço ao Laboratório de Metais e Ensaio Mecânicos pela solicitude e disponibilidade, no qual foram realizados os ensaios e testes finais deste projeto.

À UFRN, por me fornecer suporte físico e intelectual, possibilitando crescimento profissional e pessoal. Sobretudo, aos alunos, técnicos e professores que fazem a Engenharia Mecânica e o Bacharelado em Ciências e Tecnologia.

À Agência Nacional do Petróleo pelo Programa de Recursos Humanos. Em especial, ao Núcleo de Ensino e Pesquisa em Petróleo e Gás (NUPEG), que através do PRH ANP-14, apoiou financeiramente o desenvolvimento deste trabalho.

Se você pensa que pode ou se pensa que não pode, de qualquer forma, você está certo.

Henry Ford

Resumo

A cadeia produtiva do petróleo e gás natural abrange vários processos, como exploração, extração, refino, transporte e comercialização. Esta cadeia tem sido alvo de grandes progressos, principalmente devido ao avanço na exploração do pré-sal no litoral brasileiro. Contudo, para esse crescimento é necessária a otimização dos processos petrolíferos com o incremento do conhecimento das variáveis envolvidas. A análise dos carregamentos (estáticos e dinâmicos) em de estruturas, equipamentos e instalações é um dos casos críticos. O conhecimento dos corretos carregamentos proporciona o adequado dimensionamento mecânico, prevenindo acidentes, os quais podem envolver centenas de vítimas. Esses carregamentos podem ser medidos com o auxílio de células de carga (dispositivos para medição de força). Uma das formas de se obter esse resultado é medir as deformações apresentadas em um elemento sujeito ao carregamento. A medição é realizada com extensômetros (transdutores capazes de medir pequenas deformações) e relaciona-se a deformação e a força. Esta pesquisa propõe desenvolver uma célula de carga triaxial com múltiplos elementos elásticos, baseada em extensômetros, com base retangular, para medição componentes de força ortogonais (força resultante de até 5 kN em cada eixo). Os elementos elásticos do dispositivo e os transdutores configurados em Ponte de Wheatstone completa (uma para cada direção) permitem, juntamente com os módulos de aquisição e computadores, a determinação da direção, sentido e módulo da força resultante. O projeto está dividido em seis etapas: o projeto conceitual e análises de engenharia da célula de carga, a manufatura dos componentes, análise dimensional, instrumentação (colagem e soldagem dos transdutores), elaboração de programas de aquisição e processamento de dados, calibração e testes funcionais. Esse projeto permite a obtenção de parâmetros como a taxa de variação da força, magnitude e frequência em diferentes processos da cadeia produtiva do petróleo e gás natural. Além disso, essa tecnologia pode ser expandida para outras áreas, como vasos de pressão, reservatórios e colunas de perfuração.

Palavras-chave: força. Célula de carga. Extensômetros. Petróleo. Carregamentos.

Abstract

The oil and gas supply chain includes several processes, such as exploration, extraction, refining, transportation and marketing and it has received heavy investments, mainly due to the exploration of the Brazilian pre-salt layer hydrocarbon resources. However, for this growth, it has been necessary to optimize the processes based on knowledge of the variables involved. The load analysis (statics and dynamics) in structures, equipment and installations is one of the critical issues. The knowledge about the reliable loads provides suitable mechanical dimensioning, prevent accidents, which can involve hundreds of people. Experimentally, these loads can be measured with the assistance of load cells (force measurement devices) and one possible manner to obtain this result is to measure the deformations in an element that undergoes loading. The measurement is carried out by strain gages (transducers able to measure small deformations) and relating the deformation and the applied force. The objective of this work is the development a triaxial load cell with four sensing elements, based in strain gages, between rectangular bases, to measure orthogonal force components (until 5 kN on each axis). The transducers configured in complete Wheatstone Bridge (one for each direction) allow, together with the acquisition modules and software, the determination of the resultant force vector. The project was divided into seven stages: conceptual design and engineering analyzes, manufacturing of components, dimensional analyses, bonding and welding of transducers, development of acquisition programs, calibration and, finally, functional tests. The developed load cell allows to obtain parameters such as the rate of force variation, magnitude and frequency in different processes of the oil and gas production chain. In addition, this technology can be expanded to other areas such as pressure vessels, oil chambers and drill strings.

Key words: force. Load cell. Strain gages. Oil. Loads.

Lista de Figuras

Figura 1 - Sistema de medição acoplado à ferramenta.....	16
Figura 2 - Sistema de medição para comparação.....	17
Figura 3 - Sinais de medição de força.....	18
Figura 4 - Componentes do dinamômetro de Totis et al. (2014).....	19
Figura 5 – Dinamômetros Kistler 9272 e Delta Dyn (desenvolvido).....	21
Figura 6 – Teste de usinagem: fresamento.....	22
Figura 7– Dinamômetro com quatro anéis octogonais como elementos elásticos....	23
Figura 8 – Anel octogonal com indicação de posicionamento dos transdutores.....	24
Figura 9 – Esquema de montagem dos elementos.....	26
Figura 10 – Detalhamento do elemento elástico.....	27
Figura 11 – Distribuição dos elementos do dinamômetro.....	28
Figura 12 – Detalhamento do elemento elástico.....	29
Figura 13 – Desenho do sistema de mecânica.....	31
Figura 14 – Detalhamento do elemento elástico.....	31
Figura 15 – Modelo do dinamômetro rotacional integrado à porta-ferramenta.....	34
Figura 16 – Forças medidas para velocidade de corte de 375 m/min.....	35
Figura 17 – Detalhamento do elemento elástico (a) e três componentes principais do dinamômetro (b).....	37
Figura 18 - Componentes de força de usinagem no ensaio em Y com profundidade axial de 1,0 mm em corte concordante.....	39
Figura 19– Força resultante de usinagem no ensaio em Y com profundidade axial de 1,0 mm em corte concordante.....	40
Figura 20 – Módulos NI 9215 (a) e NI 9237 (b).....	43
Figura 21- Cadeia completa do sistema de aquisição de sinal.....	43
Figura 22 – Interface para análise do sinal de força (a) e diagrama de blocos (b)....	45
Figura 23 – Sala de máquinas CNC/Laboratório de Manufatura UFRN.....	49
Figura 24 – Bancada para o processo de colagem.....	51
Figura 25 – Remoção parcial da fita para aplicação da cola Z70.....	52
Figura 26 – Bancada para o processo de soldagem.....	53
Figura 27 – NI 9949 conectado ao NI 9237 por cabo RJ50 (a) e detalhe do NI 9237 (b).....	54
Figura 28 – Esquema do sistema de aquisição e processamento de dados.....	55

Figura 29 – Esquema de funcionamento da ponte completa de Wheatstone	56
Figura 30 – Fluxograma de execução	57
Figura 31 – Modelagem do dinamômetro	58
Figura 32– Aplicação dos requisitos de projeto	59
Figura 33 - Dimensões críticas do projeto dos elementos elásticos	61
Figura 34 – Malha gerada automaticamente no modo Simulate do software CREO Parametric 4.0	62
Figura 35 – Condições de contorno utilizadas em “Y” (a) e em “Z” (b).....	62
Figura 36 – Parâmetros e diagnóstico.....	64
Figura 37 – Resultados das simulações de tensão, deslocamento e deformação específica para 1,25 kN no eixo “Z” negativo, respectivamente	65
Figura 38 – Resultados das simulações de tensão, deslocamento e deformação específica para 1,25 kN no eixo “Y” positivo, respectivamente	65
Figura 39– Operações de manufatura no primeiro lado dos elementos elásticos	67
Figura 40 – Elementos elásticos usinados em simulação CAM (a) e no centro de usinagem (b)	68
Figura 41 – Operações de manufatura no segundo lado do elemento elástico	69
Figura 42 – Elemento elástico usinado em ambos os lados	70
Figura 43– Resultado da medição da seção de colagem do elemento elástico	71
Figura 44 – Operações de manufatura do primeiro lado da base inferior	72
Figura 45 – Base inferior (primeiro lado) usinado em simulação CAM (a) e no centro de usinagem (b)	73
Figura 46 – Operações de manufatura do segundo lado da base inferior.....	73
Figura 47 – Base inferior (segundo lado) usinada no centro de usinagem	74
Figura 48 – Operações de manufatura do primeiro lado da base superior	75
Figura 49 - Base superior (primeiro lado) usinada simulação CAM	76
Figura 50 – Operações de manufatura do segundo lado da base superior.....	77
Figura 51 – Base superior (segundo lado) usinada no centro de usinagem	78
Figura 52 – Montagem do dinamômetro	79
Figura 53 – Medição de rugosidades após lixamento na superfície de colagem	80
Figura 54 – Extensômetros colado sobre elemento elástico	81
Figura 55 – Extensômetros colado, soldado e protegido sobre elemento elástico....	82
Figura 56 – Distribuição dos cabos no dinamômetro.	83
Figura 57 – Ligação dos extensômetros em ponte de Wheatstone nos eixos Z (a), X (b) e Y (c).	85

Figura 58 – Sequência de equipamentos para aquisição e processamento de dados para um eixo.....	85
Figura 59 – Parâmetros do programa de aquisição	86
Figura 60 – Ensaio de calibração do eixo Z	87
Figura 61 – Resultados de tensão à aplicação de carga.....	88
Figura 62 – Ajuste da escala de medição nas configurações de aquisição do módulo NI 9237.....	89

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Configurações de aquisição de dados.....	42
Tabela 2 – Softwares de aquisição e processamento de dados	44
Tabela 3 – Equipamentos e materiais utilizados	50
Tabela 4 – Medições críticas dos elementos elásticos.....	71
Tabela 5– Mapeamento das fiações dos extensômetros	84

Sumário

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. Dinamometria para Usinagem	15
2.1.1. Dinamômetros baseados em cristais piezoresistivos e múltiplos transdutores	16
2.1.2. Dinamômetros baseados em extensômetros e com múltiplos elementos elásticos.....	23
2.1.3. Dinamômetros baseados em extensômetros e com único elemento elástico.....	33
2.2. Aquisição e processamento de sinais	41
2.2.1. Aquisição de dados	41
2.2.2. Processamento de dados	44
3. METODOLOGIA	46
3.1. Projeto do dinamômetro e especificação dos extensômetros	46
3.2. Análises de Engenharia	47
3.3. Manufatura e análise dimensional	48
3.4. Instrumentação	49
3.4.1. Colagem e soldagem dos extensômetros.....	50
3.4.2. Sistema de aquisição e processamento de dados.....	53
3.5. Calibração estática	55
3.6. Testes funcionais	56
3.7. Fluxograma de execução	56
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1. Projeto conceitual do dinamômetro e especificação dos extensômetros	58
4.2. Análises de Engenharia	61
4.3. Manufatura e análise dimensional	66
4.4. Instrumentação	79
4.4.1. Colagem e soldagem dos extensômetros.....	79
4.4.2. Sistema de aquisição e processamento de dados.....	82
4.5. Calibração estática	87
4.6. Testes funcionais	89

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
REFERÊNCIAS.....	93
APÊNDICE A – DESENHOS TÉCNICOS.....	95
APÊNDICE B – PROGRAMAS DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS.....	99
APÊNDICE C – DADOS DE CALIBRAÇÃO.....	101
ANEXO A – DADOS DO EXTENSÔMETRO.....	103

1. INTRODUÇÃO

A importância dos dinamômetros é primária em trabalhos experimentais nas diversas áreas do conhecimento em que a informação das forças seja fundamental. Exemplos típicos são máquinas-ferramentas e motores de combustão interna. Existem diferentes tipos de dinamômetros, os quais permitem medir forças em até três direções e/ou entender a força resultante (DEVRIES, 2011). Como a geometria do dinamômetro é projetada para cada caso, permite-se uma ampla faixa de modelos e tamanhos, tempo de resposta, sensibilidade, utilização de único ou múltiplos elementos de deformação (conhecidos como elementos elásticos).

A análise de força está presente nos diferentes processos industriais inseridos em uma cadeia produtiva do petróleo e gás, como exploração, extração, refino, transporte e comercialização. Sendo esse ramo industrial motivo de grandes investimentos e movimentações econômicas, sua otimização e melhoria é o alvo deste trabalho. O grau de exatidão requerido por essa aplicação suscita o melhor conhecimento dos parâmetros envolvidos nos processos, abrangendo atividades de dimensionamento e construção das instalações para o escoamento, armazenamento e transferência da produção de petróleo e gás da respectiva área (SILVA e FILHO, 2005). Isso se torna possível através da análise das variáveis envolvidas, em especial a análise de forças as quais os equipamentos e instrumentos utilizados são submetidos, sendo o entendimento destas forças fundamental para o aprimoramento e para a melhoria dos processos industriais do ramo do petróleo.

Os dinamômetros, ou células de carga, são dispositivos para medir força, sejam elas estáticas ou dinâmicas. Uma das formas de se obter este resultado é através da medição de deformações apresentadas em um elemento sujeito ao carregamento. Relaciona-se a deformação e a força, permitindo sua obtenção de maneira indireta. Isso se concretiza com a utilização de extensômetros, transdutores capazes de medir pequenas deformações.

Este trabalho se propõe a desenvolver um dinamômetro baseado em extensômetros, com base retangular, para medição de componentes tridimensionais de força (componente de força de até 5 kN) para elementos prismáticos. Múltiplos elementos elásticos presentes no interior do dispositivo e os transdutores configurados em Ponte de Wheatstone completa (uma para cada direção) permitem,

juntamente com os módulos de aquisição e computador, a coleta dos dados almejados.

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

a) Projeto conceitual e análises de engenharia do sistema mecânico do dinamômetro, com múltiplos elementos elásticos, para medição de força entre 100 N a 5 kN em três componentes ortogonais;

b) Manufatura dos componentes, inspeção e montagem do dinamômetro;

c) Instrumentação (colagem e soldagem dos extensômetros);

d) Aquisição e processamento de dados com base na plataforma National Instruments (NI);

e) Calibração estática do sistema;

f) Realização de ensaios funcionais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica aborda o assunto dinamometria e abrange duas grandes áreas: a primeira delas visa analisar o que tem sido desenvolvido na área de projeto, construção e aplicações de dinamômetros, os modelos/tipos projetados nos últimos 15 anos, bem como calibração e testes funcionais; a segunda compreende a aquisição e tratamento de dados, utilizando softwares para conversão analógica/digital e algoritmos de processamento. O foco dos trabalhos de referência é em modelos voltados para a usinagem e a relevância desta abordagem é apresentada no tópico 2.1.

2.1. Dinamometria para Usinagem

A importância dos dinamômetros é primária em trabalhos experimentais nas diversas áreas do conhecimento em que a informação da força seja fundamental. Existem diferentes tipos de dinamômetros, os quais permitem medir forças em até três direções e/ou entender a força resultante (DEVRIES, 2011). Entre esses estão inclusos os modelos rotacionais e estacionários. A análise de força é necessária a diferentes processos industriais e o grau de exatidão requerido por determinadas aplicações suscita o melhor conhecimento dos parâmetros envolvidos nos processos.

Uma das formas de se obter os dados de força é através da medição de deformações apresentadas em um elemento sujeito ao carregamento. Relaciona-se a deformação e a força, permitindo sua obtenção de maneira indireta. Os transdutores mais utilizados para viabilizar essa avaliação são os cristais piezoresistivos e os extensômetros. No primeiro caso, o funcionamento se baseia no fato de que a concentração de cargas elétricas é alterada, em certos materiais (como o quartzo), quando submetido à tensão mecânica (HOFFMAN, 2014). No segundo caso, uma alteração na grandeza de entrada (deformação) causa uma variação na resistência elétrica do material. Esse último conceito foi o escolhido em razão da facilidade de manuseio, da utilização, da difusão e disponibilidade do conhecimento nesse ramo.

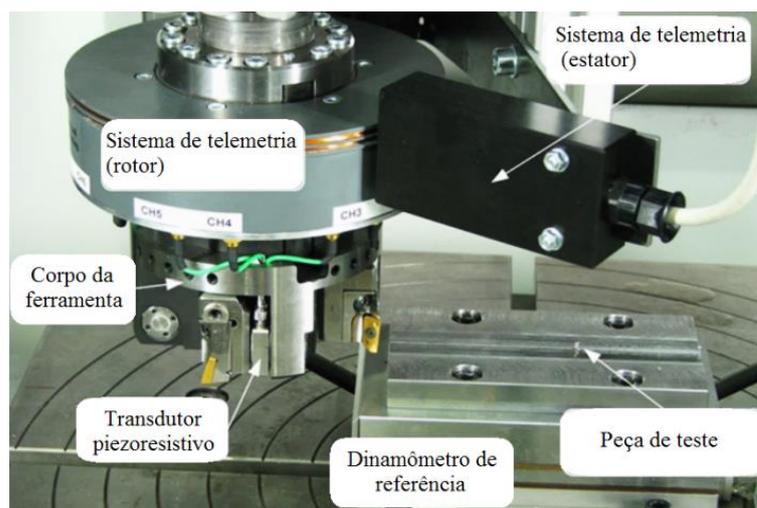
Os trabalhos de referência tratam de modelos voltados para a usinagem, pela facilidade de realização de testes, possibilidade de alteração de parâmetros envolvidos no processo e a disponibilidade de equipamentos.

Dinamômetros com cristais piezoelétricos são apresentados no tópico 2.1.1, para efeito de comparação e por sua relevância e similaridade com os modelos baseados em extensômetros no tocante a aplicação e ensaios funcionais.

2.1.1.1. Dinamômetros baseados em cristais piezoresistivos e múltiplos transdutores

Totis et al. (2010) projetaram e construíram um dinamômetro rotativo para medição de componentes de forças em operações de fresamento baseado em cristais piezoresistivos Kistler 9251A. Esse dinamômetro contou com um sistema de transmissão de dados por telemetria que permitia a transmissão a uma distância de até 15 mm entre as antenas e o receptor. A Figura 1 mostra o sistema de medição acoplado à ferramenta de usinagem.

Figura 1 - Sistema de medição acoplado à ferramenta



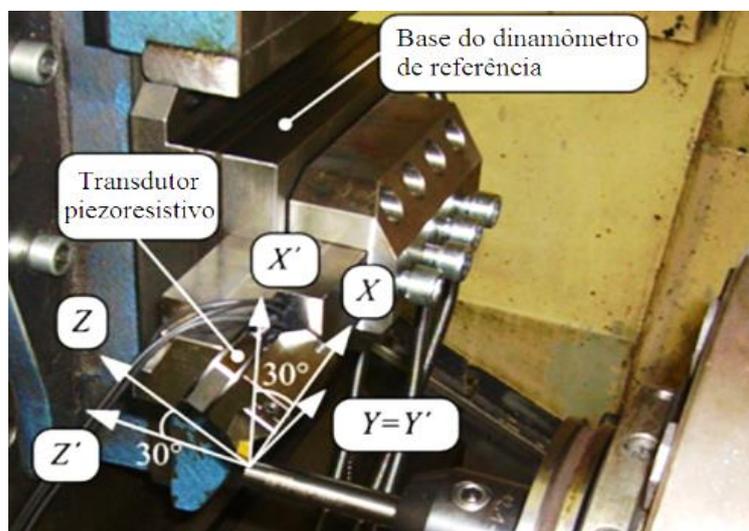
Fonte: adaptado de Totis et al. (2010)

Conforme pode ser notado na Figura 1, os transdutores foram posicionados por trás da aresta de corte, fixado por meio de parafuso com a devida pré-carga. O diâmetro do corpo da ferramenta não foi especificado. O sistema de transmissão de dados por telemetria encontra-se na parte superior, logo abaixo do eixo-árvore do centro de usinagem.

Na Figura 2 pode-se notar o dinamômetro Kistler 9257B (referência) e o transdutor piezoresistivo (parte do sistema do novo dinamômetro contendo uma das arestas de corte e um transdutor). Essa separação de partes do dinamômetro

desenvolvido foi feita para realizar a calibração e testes funcionais, possibilitando que fossem aplicados carregamentos em cada um dos quatro transdutores.

Figura 2 - Sistema de medição para comparação



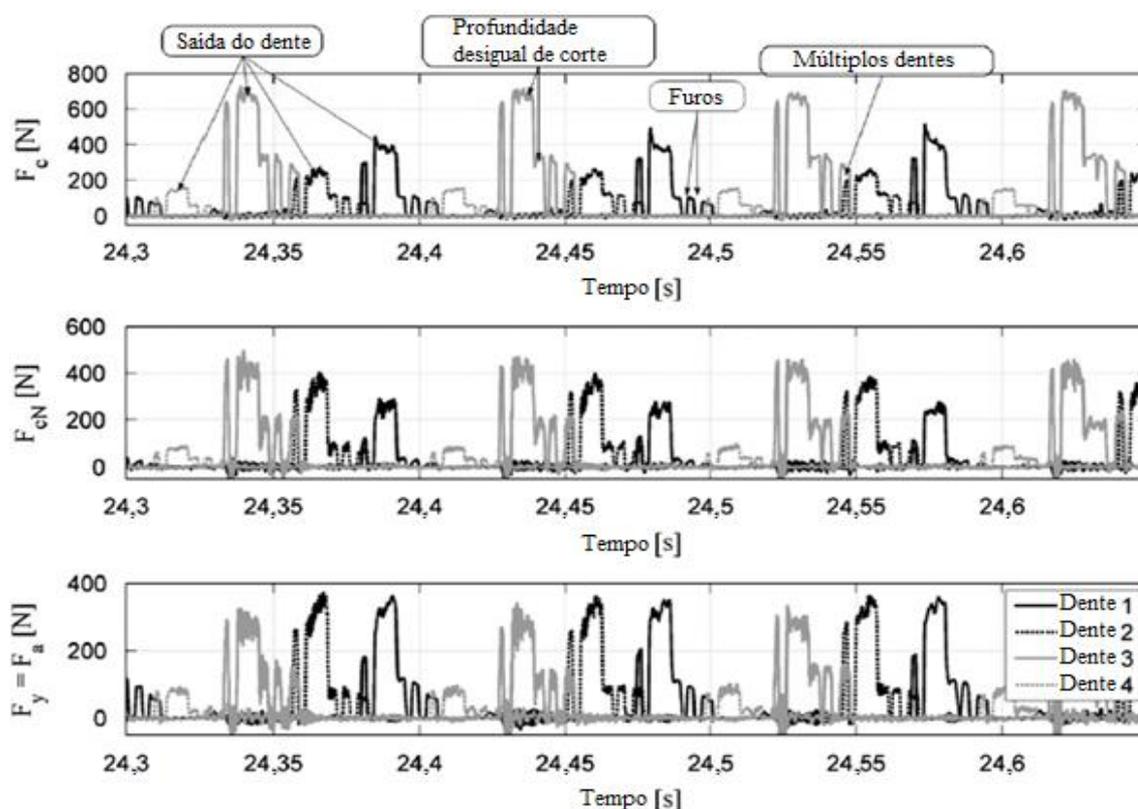
Fonte: adaptado de Totis et al. (2010)

De acordo com a representação da Figura 2, a calibração estática foi realizada aplicando-se força de compressão no dinamômetro contra uma viga flexível fixada ao eixo, uma direção de cada vez. Para os eixos X' e Z' a faixa de carregamento aplicada foi de 0 a 2 kN, enquanto que para o eixo Y' foram aplicados até 1 kN. Nesse eixo, os autores ressaltam que valores de força acima de 900 N foram evitados para preservar a orientação do sensor e a pré-carga aplicada. Obtiveram-se erros menores que 3% ao longo do eixo X e erros menores que 6,6% nos eixos Y e Z. A sensibilidade cruzada foi estimada através de uma matriz, sendo esta um fator multiplicativo que correlacionava os valores de força aplicados e os medidos. Quanto mais próxima essa matriz estava perto de uma matriz identidade, mais precisa era a medição. Obtiveram-se indicadores menores ou iguais a 3% em X, Y e Z, sendo desconsiderados pelos autores. Não foram realizadas simulações de carregamentos computacionais.

Testes de pulso foram realizados excitando-se o sistema com o martelo de impacto Kistler 9722A2000 e uma análise modal mostrou que o sistema é prejudicado por frequências entre 500 Hz e 1 kHz. Baixas frequências de ressonância foram desconsideradas, pois, segundo os autores, há uma compensação por meio do posicionamento dos transdutores (TOTIS, 2010).

Testes de usinagem foram realizados com a fabricação de um componente em forma de engrenagem (Aço DIN 16MnCr, diâmetro de 202 mm, 16 dentes, módulo não especificado) em um torno Gildemeister NEF 660 e apresentaram erros menores do que os da calibração estática. Os parâmetros de usinagem foram: velocidade de corte (v_c) de 100, 200 e 300 m/min; avanço por dente (f_z) de 0,1; 0,2; e 0,3 mm; profundidade de corte (a_p) de 1, 2 e 3 mm. Para complementar, o dinamômetro foi fixado à mesa de um centro de usinagem Hermle C800U, no qual foram realizados testes de pulso-padrão, de pulso rotacional ($v_c = 300$ m/min) e de usinagem, com o auxílio do transdutor de pressão SOLARTRON LVDT AX/1/S e do acelerômetro Kistler 8792A500. A Figura 3 expõe os sinais de força medidos pelo dinamômetro desenvolvido.

Figura 3 - Sinais de medição de força



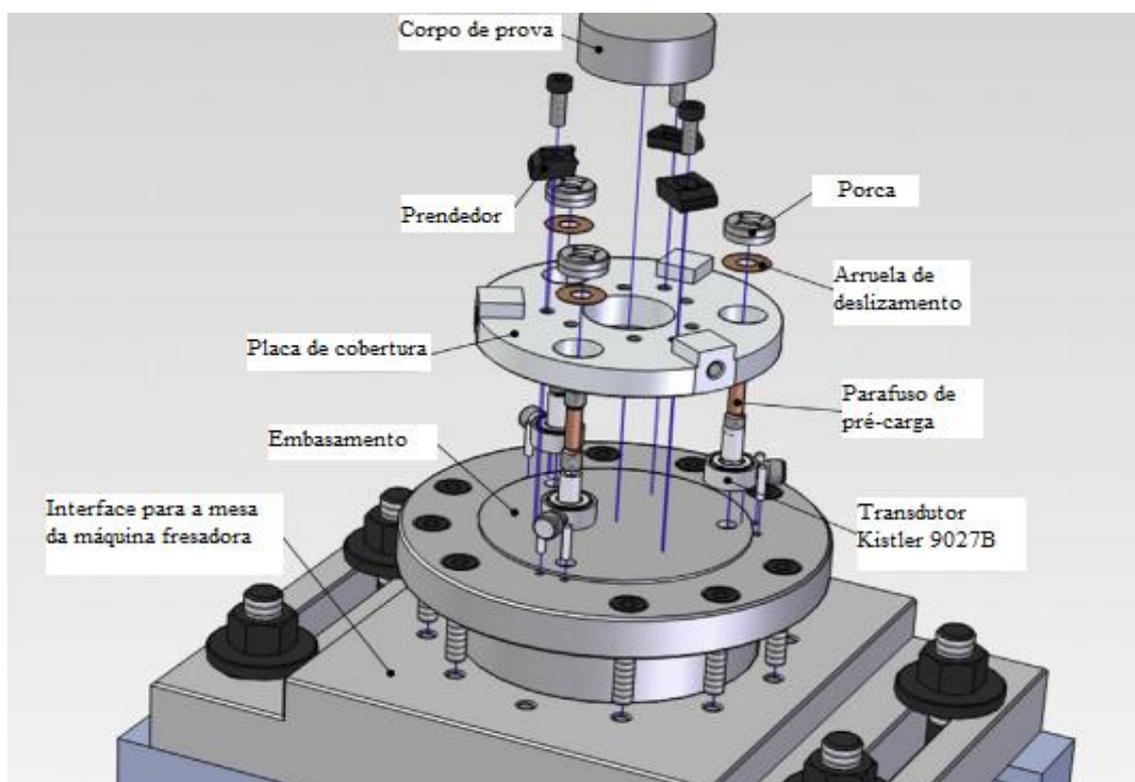
Fonte: adaptado de Totis et al. (2010)

Conforme pode ser verificado na *Figura 3*, as ações da ferramenta durante o corte provocam variações nos valores de força, como saídas de dentes de corte, profundidades desiguais e arestas cortando simultaneamente, associadas a cada eixo e dente. Compreender essas variações proporciona o entendimento e

detalhamento do processo de fresamento, permitindo seu melhor estudo e aprimoramento. O dinamômetro desenvolvido e o de referência (modelo comercial Kistler 9257B), que podem ser visualizados nas Figura 1 e Figura 2, apresentaram valores médios de força iguais, para os três eixos. Entretanto, o novo dinamômetro apresentou menor sensibilidade a ruído na leitura do sinal. Os valores de força apresentados na *Figura 3* encontram-se dentro da faixa de atuação do dinamômetro projetado na presente monografia, corroborando para a validade e aplicabilidade do projeto em execução.

Em um segundo projeto, Totis et al. (2014) criaram um dinamômetro baseado em células de carga triaxial piezoresistivas Kistler 9016B4, dispostas em configuração triangular, para medição de forças tridimensionais (de 1 a 2 kN) e torque (até 35 Nm em operações de fresamento). Realizou-se simulações pelo método dos elementos finitos e os cálculos foram suportados pelo software COSMOSWorks integrado ao SolidWorks. Cálculos analíticos com sistema massa-mola-amortecedor também foram realizados. A Figura 4 mostra os componentes do dinamômetro.

Figura 4 - Componentes do dinamômetro de Totis et al. (2014)



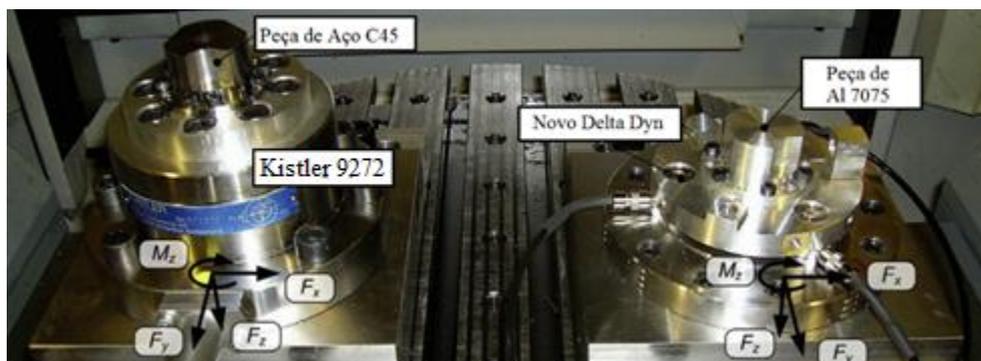
Fonte: adaptado de Totis et al. (2014)

Conforme pode ser notado na Figura 4, as fixações dos componentes são realizadas por meio de parafusos. Pode-se se visualizar as placas base e de cobertura que, respectivamente, dão suporte e protegem os transdutores. Realizou-se uma análise das frequências naturais e seus modos de vibração. Os autores destacaram que o projeto pode ser otimizado com a redução da massa da plataforma acima dos transdutores, pois o efeito de vibração devido a primeira frequência natural é quase desprezível. As frequências de largura de banda ficaram acima de 2,5 kHz e as frequências de ressonância ficaram abaixo de 2 kHz, não afetando significativamente a frequência de resposta do instrumento.

A calibração estática foi efetuada colocando-se massas conhecidas sobre um componente fixado ao equipamento, uma direção por vez. As características estáticas e dinâmicas foram comparadas com dois dinamômetros comerciais: Kistler 9272 e Kistler 9256C1. Nessa comparação encontrou-se que os erros relativos estáticos abaixo de 1,5%, ligeiramente maiores do que os dos dinamômetros de referência citados, respectivamente 1% e 0,5%. Entretanto, segundo os autores, os erros estáticos foram significativamente reduzidos na usinagem. A interferência de medição entre os eixos foi estimada através de uma matriz, como um fator multiplicativo que correlacionava os valores de força aplicados e os medidos. Do mesmo modo que o projeto anterior (TOTIS, 2010), quanto mais próxima essa matriz estava de uma matriz identidade, maior era a precisão obtida. Essa interferência é aceitável desde que não exceda 2%, segundo os autores.

No tocante a calibração dinâmica, esta foi efetuada utilizando-se um martelo de impacto Dytran 5800B4 (sensibilidade de 2,41 mV/N) conectado a um amplificador Kistler 5134B. Usou-se corpos de prova com mesma geometria, como indicado na figura 4, sendo uma de liga de alumínio 7075 (68 g) e outra de aço C45 (190 g). Frequências de ressonância abaixo de 3 kHz foram inerentes do próprio sistema. Entretanto ressonâncias acima de 4 kHz foram atribuídas ao comportamento dinâmico do subsistema de alumínio em frente as células de carga. Essas frequências foram condizentes com as estimadas pelo método dos elementos finitos. A Figura 5 apresenta o dinamômetro Kistler 9272 de referência e o desenvolvido.

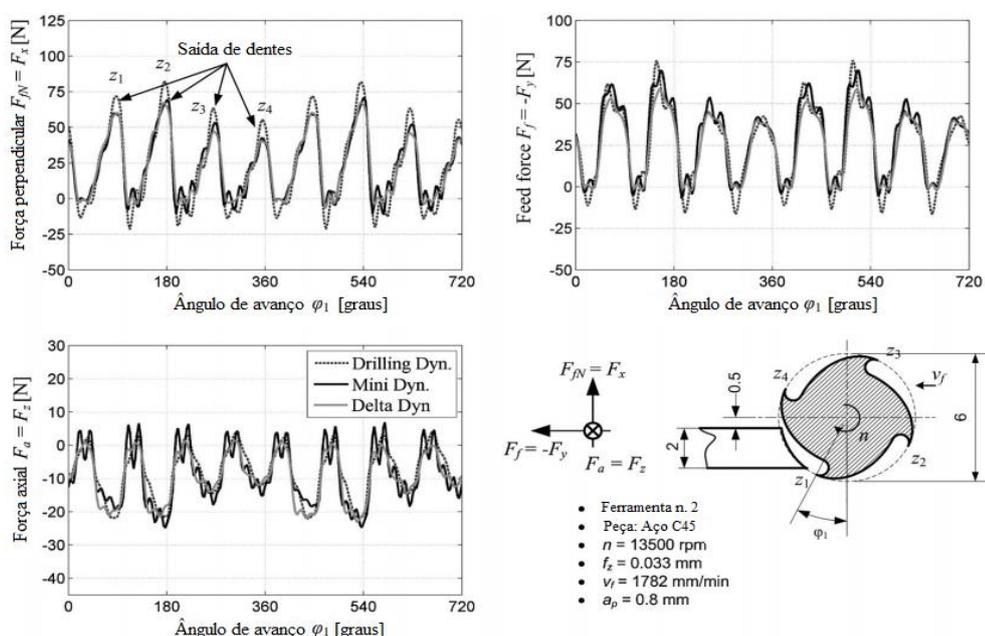
Figura 5 – Dinamômetros Kistler 9272 e Delta Dyn (desenvolvido)



Fonte: adaptado de Totis et al. (2014)

Em relação aos materiais, a liga de alumínio Al 7075 foi escolhida para a placa superior por promover uma rigidez aceitável e um comportamento dinâmico adequado (TOTIS, 2014). Os componentes e ensaios foram realizados com o auxílio de um centro de usinagem CNC 5-eixos Chiron FZ15S. No tocante aos parâmetros de usinagem, o dinamômetro foi projetado para medições com ferramentas de diâmetro entre 0,5 a 20 mm, velocidade de corte de 50 a 1000 m/min e quantidade de arestas de corte de 2 a 6. Nos testes de usinagem foram utilizadas as ferramentas 1, 2 e 3, respectivamente: SANDVIK R216.32 16025 AP20A H10F, SANDVIK R216.34 06050 AK13P 1620, SANDVIK R840-0330-50-A1A 1220. Foram realizados 26 testes, variando-se as ferramentas e os parâmetros de corte. Um desses testes está exposto na Figura 6.

Figura 6 – Teste de usinagem: fresamento



Fonte: adaptado de Totis et al. (2014)

A Figura 6 permite a comparação entre o dinamômetro construído e os dois comerciais. Percebe-se que os valores médios de força apresentados são os mesmos e as curvas mostraram comportamentos semelhantes, sendo os resultados considerados satisfatórios. Vale ressaltar e a influência significativa da saída dos dentes, principalmente no eixos X e Y, causando picos.

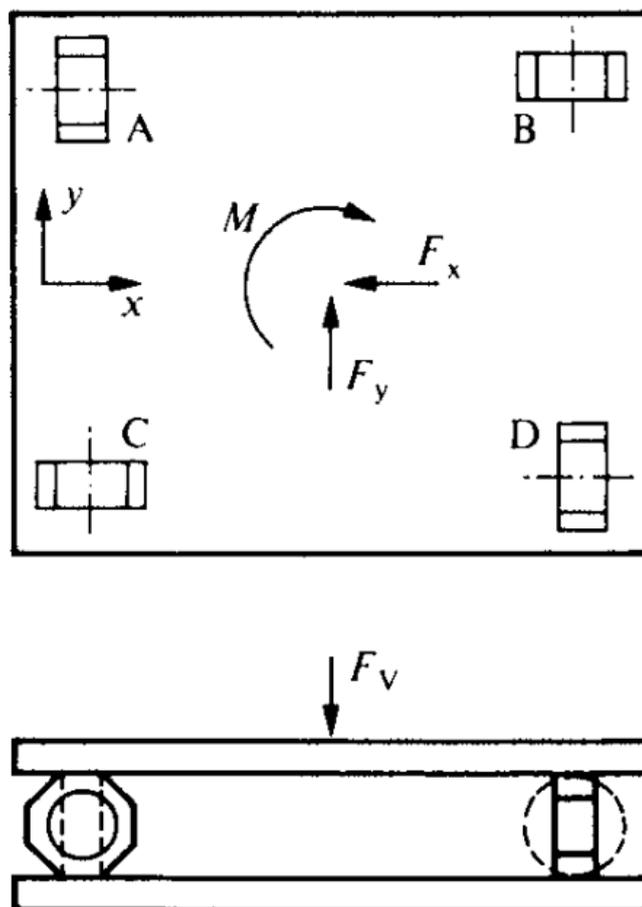
Os artigos de Totis et al. (2010) e Totis et al. (2014) apresentam algumas divergências. O segundo (2014) fornece um aprofundamento maior que o primeiro na modelagem físico-matemática do sistema, bem como realiza testes variados com diversos parâmetros, materiais e dinamômetros, aumentando assim a confiabilidade do projeto e possibilitando a repetição de testes por outros pesquisadores, pois foram disponibilizados parâmetros e informações para isso. Essas informações não foram tão explícitas no trabalho de Totis et al. (2010), em que dois tipos de máquinas foram utilizadas em testes de usinagem, o diâmetro do corpo da ferramenta não foi especificado e não foram apresentadas simulações computacionais.

No item 2.1.2 serão abordados tipos de dinamômetros baseados em extensômetros contendo múltiplos elementos elásticos. O modelo em desenvolvimento nesse projeto pertence a essa classificação.

2.1.2. Dinamômetros baseados em extensômetros e com múltiplos elementos elásticos

Shaw (2005) abordou de forma sintética, porém relevante, vários modelos de dinamômetros e seus princípios de funcionamento. Em especial destaque para este trabalho, foi apresentado um dinamômetro com quatro elementos elásticos em formato de anéis octogonais fixados entre duas placas, baseado em extensômetros. Esse é capaz de medir componentes de forças triaxiais ortogonais e no processo de usinagem por fresamento, com faixa de atuação de 22,24 N a 22,24 kN. A Figura 7 apresenta o elemento elástico do dinamômetro proposto.

Figura 7– Dinamômetro com quatro anéis octogonais como elementos elásticos

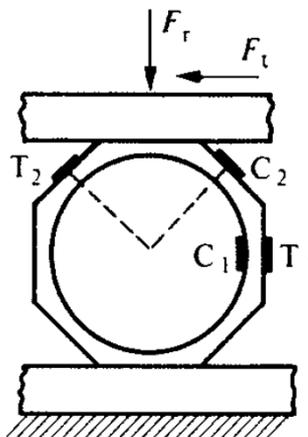


Fonte: adaptado de Shaw (2005)

De acordo com a Figura 7, o instrumento é capaz de medir forças em X e Y com os anéis A e D e forças na vertical com os quatro anéis. O momento em torno do eixo vertical (M) é mensurado pelos anéis A e B. A Figura 8 apresenta com mais

detalhes o anel octogonal utilizado como elemento elástico e a indicação do posicionamento dos extensômetros.

Figura 8 – Anel octogonal com indicação de posicionamento dos transdutores



Fonte: adaptado de Shaw (2005)

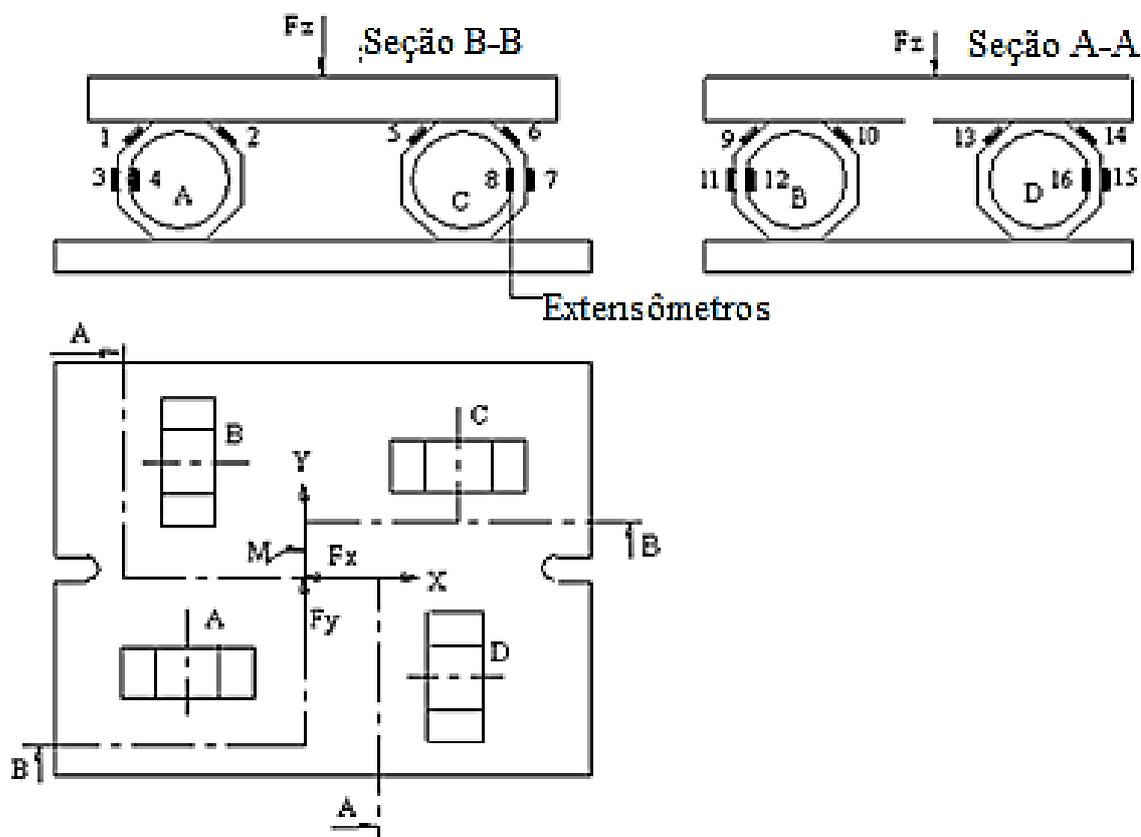
As ligas de alumínio são um material adequado para a confecção dos anéis octogonais, mostrados na Figura 8, uma vez que não sofre corrosão tão facilmente como o aço, é de baixa densidade comparado aos metais, facilmente usinado e tem excelente condutividade térmica (Shaw, 2005). Esses, segundo o autor, são geralmente montados por parafusos que se estendem através de furos nas superfícies superior e inferior. Entretanto, a fixação apenas por meio de parafusos pode acarretar possíveis folgas, prejudicando a calibração e correto funcionamento do instrumento. A utilização de pinos para complementar a fixação seria indicada.

Segundo Shaw (2005), a simetria do anel permite caminhos paralelos para o fluxo de calor, de modo que pontos equivalentes em lados opostos do mesmo anel estejam à mesma temperatura. Isto permite que o fluxo de calor devido ao gradiente de temperatura na vizinhança do dinamômetro fosse eliminado ligando os transdutores em circuito de ponte de Wheatstone completa. Contudo, o calor liberado no processo de usinagem é concentrado no ponto instantâneo de corte durante a movimentação da ferramenta, sendo este transmitido para o componente e para o dinamômetro, de modo que assumir que os transdutores de um anel estão sujeitos a mesma temperatura não é factível. Mas, uma vez que o circuito elétrico em ponte de Wheatstone completa é formado por extensômetros situados em posições diferentes do instrumento e com possíveis temperaturas distintas, o valor medido é naturalmente compensado pelo circuito.

O trabalho de Shaw (2005), com versão anterior datada de 1984, apresenta variados modelos de dinamômetros, não abordando seus processos construtivos, testes e resultados. Apesar de não detalhá-los, as instruções fornecidas são relevantes e têm inspirado pesquisadores ao longo das últimas décadas, como foi o caso de Saglam e Unuvar (2001), Yaldiz et al. (2007) e Rossi (2008), em análise na presente revisão.

Saglam e Unuvar (2001) projetaram e construíram um dinamômetro baseado em extensômetros para medição de carregamentos em operações de fresamento, tomando por referência o trabalho de Shaw (2005), com primeira edição de 1984. Os transdutores possuíam resistência de 350Ω (modelo e fabricante não especificados) e foram associados em ponte de Wheatstone completa, pois, segundo os autores, isto promove elevada sensibilidade e compensação de temperatura. Para o dimensionamento foram realizados cálculos analíticos (não houve simulações computacionais) considerando valores de carregamentos radiais e tangenciais, respectivamente, 8 kN e 3 kN. A fonte de obtenção desses parâmetros não foi citada pelos autores. Em relação à escolha do material para o elemento elástico, uma liga de alumínio foi tida como apropriada por apresentar maior resistência à corrosão do que a maioria dos aços, baixa densidade, ser facilmente usinado, ter excelente condutividade térmica e baixo coeficiente de expansão térmica. O tipo da liga de alumínio e o material utilizado para os demais componentes não foram especificados pelos autores. A Figura 9 apresenta o esquema de montagem dos elementos do dinamômetro.

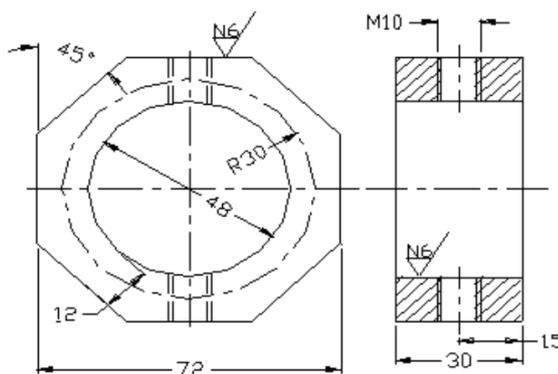
Figura 9 – Esquema de montagem dos elementos



Fonte: adaptado de Saglam e Unuvar (2001)

Conforme ilustrado na Figura 9, os elementos sensíveis à carga possuíam o formato de anéis octogonais e foram fixados entre duas placas rígidas (dimensões não especificadas). A lateral entre as placas foi revestida com material plástico transparente. Os posicionamentos dos transdutores foram numerados (1-16) na Figura 9 nas seções A-A e B-B. A Figura 10 apresenta o detalhamento do elemento elástico.

Figura 10 – Detalhamento do elemento elástico



Fonte: adaptado de Saglam e Unuvar (2001)

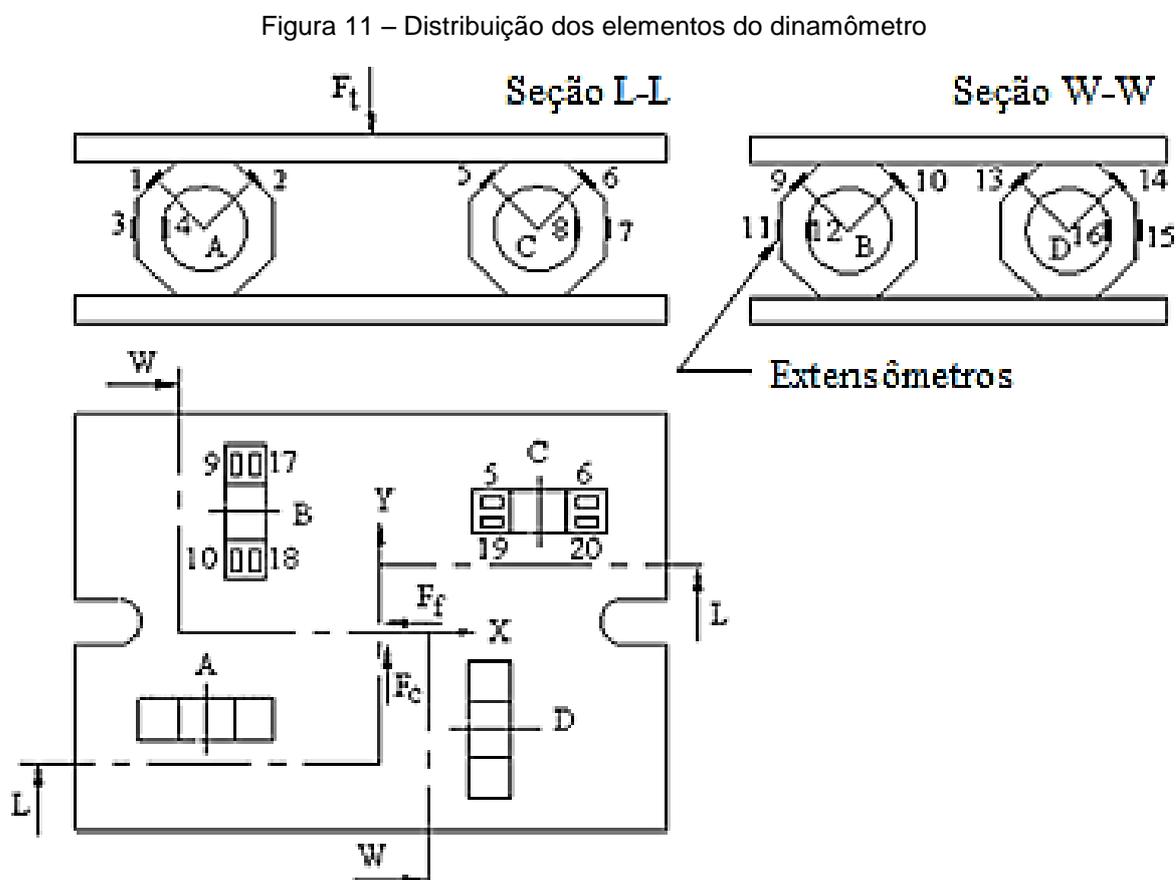
Como apresentado na Figura 10, a fixação entre esses componentes foi feita apenas com parafusos, o que não é recomendado uma vez que esses poderiam sofrer rotação e gerar folgas, prejudicando a calibração.

A calibração estática foi realizada no intervalo de 0 a 2 kN com aplicação de carregamentos conhecidos, apesar deste dispositivo ter sido projetado para até 8 kN. A calibração dinâmica, dados e parâmetros de usinagem e testes de validação não foram realizados ou fornecidos. Este é outro ponto negativo, uma vez que esses testes mostrariam o comportamento do dispositivo, comprovando ou não o seu funcionamento. Erros de sensibilidade cruzada, segundo os autores, foram pequenos (valores não foram citados), podendo ser desconsiderados.

O trabalho de Saglam e Unuvar (2001) não apresenta detalhamentos de como o dinamômetro foi construído, como por exemplo a não especificação dos materiais utilizados e da fonte de obtenção dos carregamentos de dimensionamento. Entretanto, esse serviu como base para o trabalho de Rossi (2008), o qual também será abordado pela presente revisão, fazendo-se assim necessário para a melhor compreensão.

Yaldiz et al. (2007) elaboraram um dinamômetro com múltiplos elementos elásticos capaz de medir valores de força de corte e torque no processo de usinagem por fresamento. Esses elementos foram em forma de anéis octogonais (Aço AISI 4140) seguindo o posicionamento representado na *Figura 11*, situados entre placas de material mais rígido (material não especificado pelos autores). Utilizou-se vinte extensômetros HBM LY 41-10/350 (configurados em ponte de Wheatstone) e

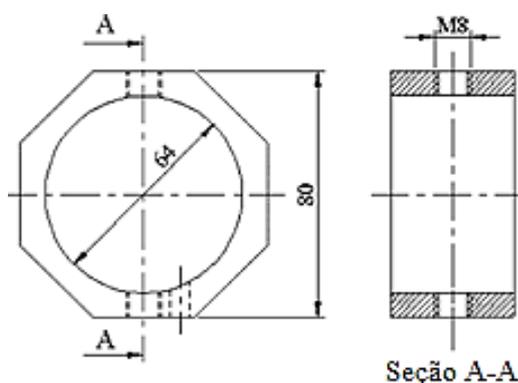
um acelerômetro piezoelétrico. A Figura 11 mostra a distribuição dos elementos do dinamômetro.



Fonte: adaptado de Yaldiz et al. (2007)

Na Figura 11 pode-se observar a disposição dos elementos elásticos entre as duas placas (superior: 245x270x25 mm e inferior 245x300x25 mm). A lateral entre as placas foi revestida com material plástico transparente com espessura de 5 mm para proteger os extensômetros do contato com cavacos quentes e fluidos de corte. A Figura 12 apresenta o detalhamento do elemento elástico.

Figura 12 – Detalhamento do elemento elástico



Fonte: adaptado de Yaldiz et al. (2007).

Como indicado na Figura 12, a fixação dos elementos elásticos utilizou-se de pinos de 6 mm de diâmetros e parafusos M8. Pinos foram usados para impedir a movimentação devido às possíveis folgas, o que seria prejudicial para a calibração e sensibilidade cruzada do dispositivo.

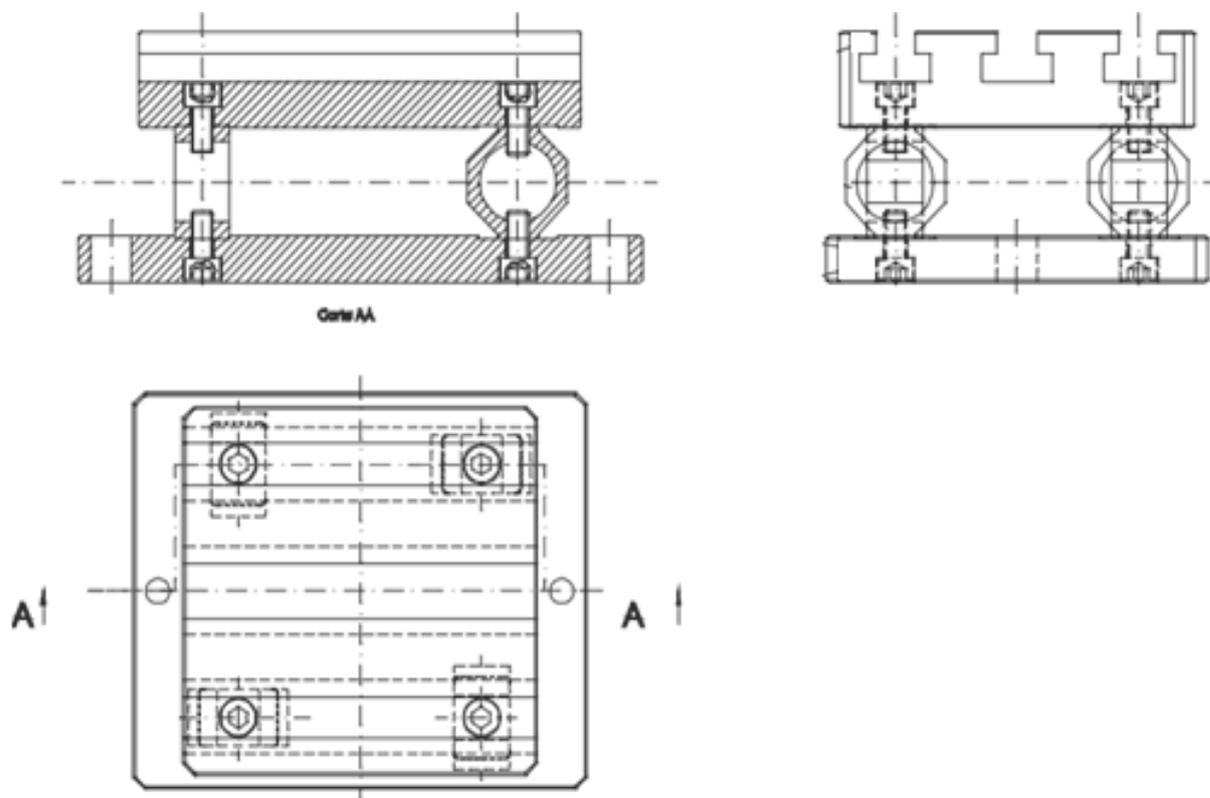
As similaridades entre as Figura 9, Figura 11 e as Figura 10 e Figura 12 são notórias, uma vez que ambos os trabalhos de Saglam e Unuvar (2001) e Yaldiz et al. (2007) possuem como referência Shaw (2005). Entretanto, vale ressaltar as diferenças e melhorias que foram efetuadas no trabalho de Yaldiz et al. (2007), no qual foram acrescentados quatro extensômetros e os pinos na fixação. Esses transdutores a mais (números 17-20 na Figura 11) foram configurados em ponte de Wheatstone para a medição de torque em operações de furação.

O dimensionamento foi feito analiticamente considerando um carregamento máximo de 5 kN em cada direção (a fonte desse valor não foi especificada) e não foram realizadas simulações computacionais. Na calibração estática aplicaram-se carregamentos até o valor máximo dimensionado com intervalos de 50 N. As tensões de saída (milivolt) foram gravadas para cada intervalo, possibilitando a obtenção da curva de calibração. O dinamômetro foi deixado em repouso por 5 min antes de cada teste de calibração. As medições foram repetidas três vezes e valores muito próximos (não mencionados) foram obtidos. A determinação da frequência natural e seus harmônicos foi realizada com um martelo de impacto (não especificado) e os dados foram medidos com o analisador de vibrações (Commtest Instrument vb3000), para permitir fossem mais altos que as de excitação do sistema para não interferirem na medição. Foram realizadas medidas para X, Y e Z, respectivamente, as frequências de 1,20; 1,05 e 1,50 kHz (Yaldiz et al., 2007).

Os erros lineares de cada eixo, apresentados por Yaldiz et al. (2007), encontraram-se na faixa de 1,2 a 1,4%, sendo aceitáveis, segundo os autores. Em relação à sensibilidade cruzada, estes ficaram entre 0,6 e 1,7%, interpretados como desprezíveis. Já para o teste de excentricidade com distância de 50 mm em relação ao centro, a variação foi de 0,13 e 0,18%. No teste de desempenho, o instrumento apresentou 0,15% de erro para diferentes parâmetros e mostrou-se apto a fazer medições não apenas em fresamento, mas também nos processos de torneamento, retificação e conformação. Vale frisar que os parâmetros de usinagem em seus respectivos processos não foram fornecidos, impossibilitando a reprodução e a conferência dos testes realizados.

Rossi (2008) construiu um dinamômetro com múltiplos elementos elásticos baseado no modelo construído por Saglam e Unuvar (2001). Segundo o autor, a simetria da célula de carga gera caminhos paralelos de transferência de calor implicando que os elementos estejam submetidos à mesma temperatura, de modo que o efeito de variação de temperatura sobre a medição é naturalmente compensado. Entretanto, os extensômetros estão sob diferentes temperaturas, mas esse efeito é naturalmente compensado pela própria distribuição geométrica dos transdutores associados em ponte de Wheatstone completa. A Figura 13 apresenta o desenho do sistema mecânico.

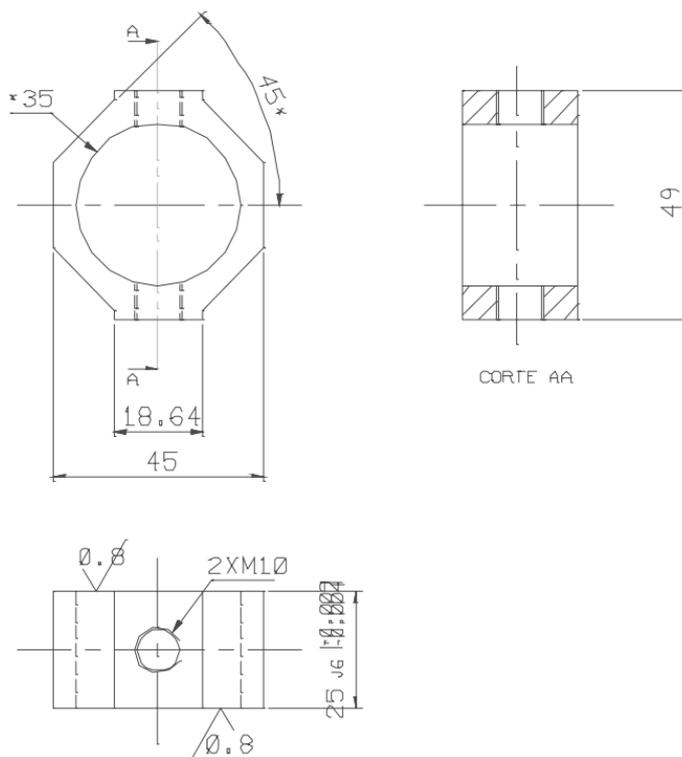
Figura 13 – Desenho do sistema de mecânico



Fonte: Adaptado de Rossi (2008)

Como se pode notar na Figura 13, o projeto é semelhante aos apresentados por Yaldiz et al. (2007), Shaw (2005) e Saglam e Unuvar (2001). A Figura 13 destaca a disposição dos anéis octogonais entre as placas, bem como a fixação por parafusos e os sulcos para o acoplamento do componente a ser usinado. Em relação as dimensões, a placa inferior apresentou 255x127x20 mm e a superior 200x160x42 mm. O detalhamento do elemento elástico pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14 – Detalhamento do elemento elástico



Fonte: Rossi (2008)

Pode-se observar na Figura 14 as dimensões do elemento elástico, seu formato e entidades. Nota-se a presença de roscas nas extremidades do elemento, uma vez que a fixação se dá por meio de parafusos, de forma similar ao que foi feito por Saglam e Unuvar (2001). Entretanto, Rossi não atentou para a possibilidade de rotação do elemento, de modo que era necessário a adição de pinos na fixação para o travamento desse grau de liberdade. O material utilizado foi o Aço ABNT 4340 para todos os componentes. O autor não especifica a fonte dos valores de carregamento utilizados para o dimensionamento do dinamômetro e a resistência nominal dos transdutores utilizados. O trabalho apenas relata que os transdutores são unidirecionais e do fabricante Excelsensor. A calibração foi realizada de forma estática (cargas de 500 N a 2 kN) em 10 pontos diferentes, não havendo calibração dinâmica e simulações computacionais.

Foi realizada uma aplicação prática do dinamômetro através de um estudo de caso na TenarisConfab, empresa de tubos de aço com costura para exploração e transporte de óleo e gás. Esse fez uso de uma fresadora com rotação de 5000 rpm e velocidade máxima de avanço de 1250 mm/min com uma ferramenta Coromil290,

R290-080027-12M 268539, ângulo de posição de 90°, diâmetro de 80 mm e com 6 pastilhas de metal duro Sandvik Coromant R290-12T308M-PM. O objetivo do estudo era analisar a influência de parâmetros de usinagem (velocidade de avanço, avanço por dente e profundidade radial de usinagem), de forma isolada e combinada, nos valores de carregamento sofridos por meio de regressão múltipla, com a finalidade de reduzir o tempo de ciclo do equipamento Fresadora de Bordas através da otimização dos parâmetros (Rossi, 2008).

Em relação ao manuseio e colagem dos transdutores, foram utilizadas lixas finas de nº 200 e 300 para conferir à superfície a rugosidade adequada (valor não especificado) para a aderência da cola (Epóxi M-610 da Micro Measurement Group) e gazes umedecidas com acetona para a limpeza. A cola foi aplicada nas partes superior e inferior do transdutor para aumentar a aderência e protegê-lo do ambiente. Essas informações são um aspecto relevante do trabalho, servindo de referência para o dinamômetro em desenvolvimento.

Um fato interessante do trabalho de Rossi (2008) utiliza o aço ABNT 4340 para todos os componentes diferentemente do que é feito no artigo de referência de Saglam e Unuvar (2001), no qual se utiliza de uma liga de alumínio para o elemento elástico. A diferença de propriedades dos materiais, especificamente o módulo de elasticidade, é importante, pois permite que a deformação ocasionada pela aplicação da força esteja concentrada no elemento onde se efetua a medição. Não haver essa diferença implica que deslocamentos ocorrerão nos demais elementos (base e mesa), não sendo a deformação medida representativa do real carregamento.

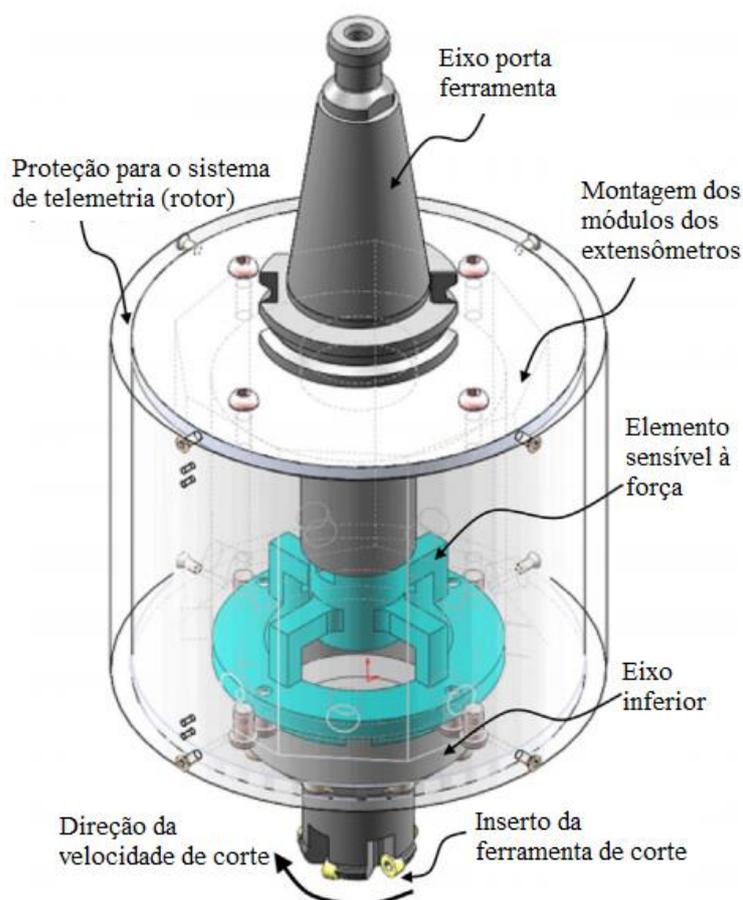
Os trabalhos abordados apresentaram modelos de dinamômetros com múltiplos elementos elásticos. Entretanto, há também dinamômetros com único elemento elástico. O conhecimento desse tipo se faz necessário para compreender o seu funcionamento e realizar a comparação com os demais modelos, de modo a buscar a configuração mais eficiente. No item 2.1.3 serão apresentados dinamômetros baseados em extensômetros com único elemento elástico.

2.1.3. Dinamômetros baseados em extensômetros e com único elemento elástico

Rizal et al. (2015) elaborou um dinamômetro rotativo com um único elemento elástico para medir forças tridimensionais de até 3 kN e rotação de até 5000 rpm em

operações de fresamento e de furação. Este apresenta simetria circular e utiliza extensômetros SGD – 3/350 – LY11 da marca Omega, arranjados em ponte completa de Wheatstone, alimentada com 4V, e composta por 8 transdutores para cada eixo de medição. Estes se localizam nos braços prismáticos na parte central do elemento sensível a força que é acoplado a uma porta-ferramenta. O dimensionamento baseado nos dados de simulações pelo método dos elementos finitos através do *software ANSYS* e na avaliação analítica dos carregamentos. O material utilizado para o elemento elástico foi o aço inoxidável AISI classe 304. A Figura 15 mostra o modelo do dinamômetro rotacional integrado à porta ferramenta.

Figura 15 – Modelo do dinamômetro rotacional integrado à porta-ferramenta



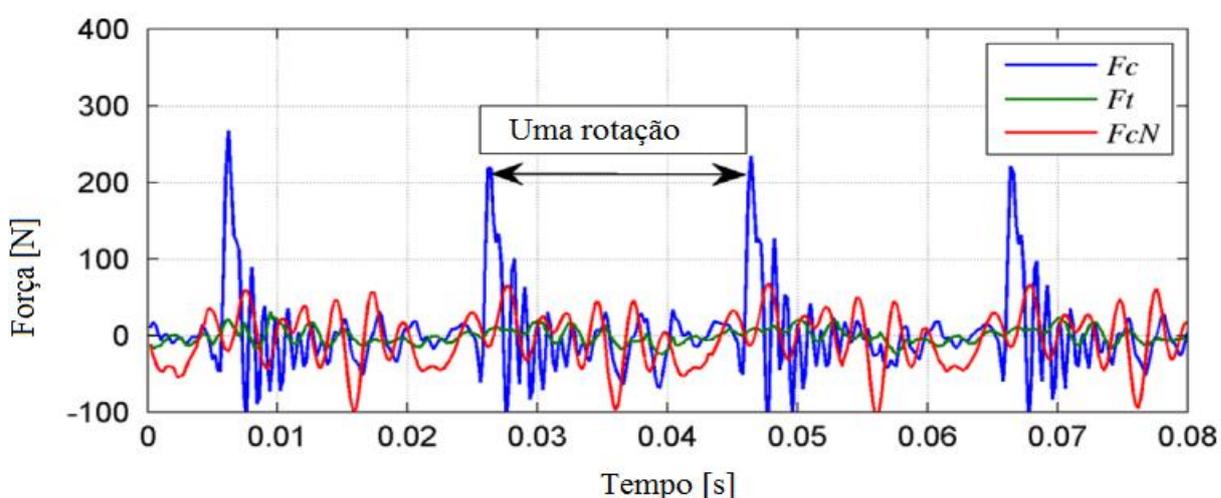
Fonte: Adaptado de Rizal et al. (2015)

Conforme apresentado na Figura 15, o elemento elástico é fixado entre a ferramenta e o eixo da porta-ferramenta e envolto por proteção de chapa metálica. Na ilustração do sistema, a proteção é representada de maneira translúcida para permitir a visualização dos componentes internos. A calibração estática foi realizada

com carregamentos de até 2 kN nas direções tangencial (F_c) e horizontal (perpendicular ao centro - F_{cN}) e de até 3 kN na vertical (F_t). Os valores de tensão de saída, em milivolts, foram registados para cada intervalo de carga de 100 N. Os erros máximos de sensibilidade cruzada apresentados foram de 4,05% para F_{cN} , de 2% para F_t e de 8,5% para F_c . Já o comportamento dinâmico do dinamômetro foi analisado utilizando com um martelo de impacto Endevco 3012 e um acelerômetro (Endevco 751-100). Com os sinais adquiridos realizou-se uma análise modal e observaram-se as frequências naturais de ressonância de aproximadamente 1050, 2079 e 450,9 Hz. As frequências naturais obtidas teoricamente foram de 980,7, 1959,2 e 470,5 Hz, resultando numa faixa de erro máximo de 7,1%.

Os testes de usinagem foram realizados por Rizal et al. (2015) em máquina CNC (DMC 635 V) com uma ferramenta de 40 mm de diâmetro, profundidade radial de corte (a_e) de 0,4 mm, profundidade axial de corte (a_p) de 1 mm, avanço por dente (f_z) de 0,2 mm/dente, velocidade de corte variada em 200 m/min, 375 m/min e 550 m/min. O efeito da temperatura também foi analisado, mostrando uma pequena alteração dos dados estáticos de força, mas sem influenciar nos valores de força aquisitados durante testes de usinagem. Os dados experimentais coletados foram analisados com o auxílio do *software MATLAB*. A Figura 16 exibe um dos ensaios de usinagem e as componentes da força medida para velocidade de 375 m/mim.

Figura 16 – Forças medidas para velocidade de corte de 375 m/min



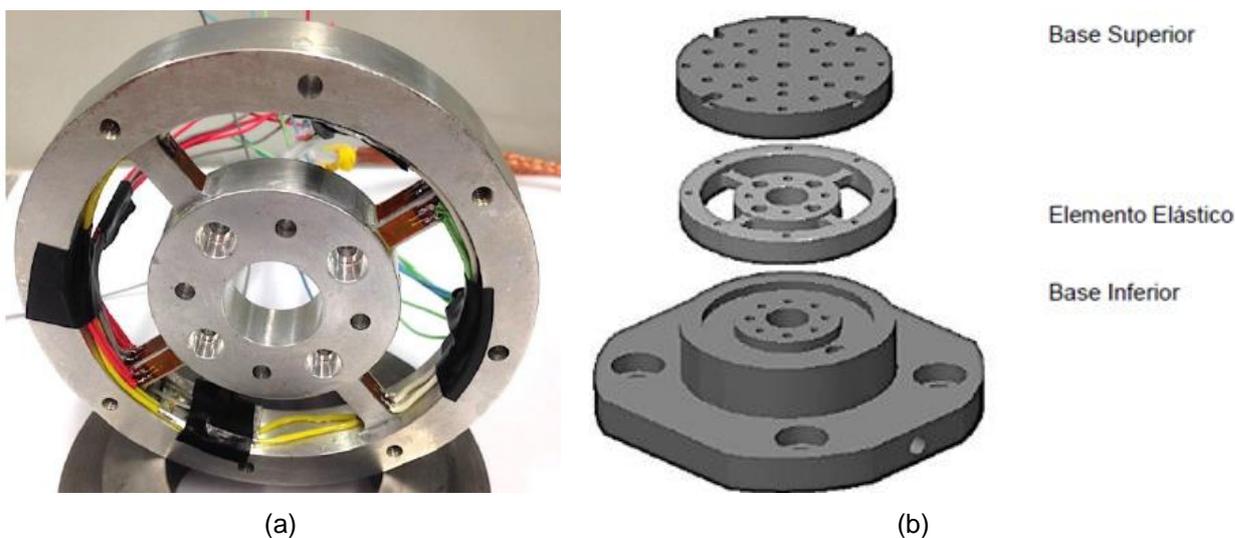
Fonte: Adaptado de Rizal et al. (2015)

Como se pode observar na Figura 16, os picos das componentes de força estavam na direção tangencial, variando a magnitude em uma faixa de 370 N. Esses valores estão relativamente distantes dos máximos de utilização desse dinamômetro (3 kN), o que prejudica a sensibilidade dessa célula de carga.

Em relação à aquisição de sinais, Rizal et al. (2015) apresenta um sistema bastante versátil, fazendo uso transmissão de dados por rádio frequência. Este é um tópico interessante, uma vez que a utilização de cabos é um fator limitante para algumas aplicações, principalmente com rotação do dispositivo.

Ribeiro (2016) construiu um dinamômetro baseado em extensômetros para a indicação de força de usinagem (componentes ortogonais de até 1 kN), em conjunto com um sistema de aquisição e processamento de dados. Os transdutores utilizados foram do modelo HBM LY13-3/350, configurados em circuito de ponte de Wheatstone completa para cada eixo, totalizando 12 extensômetros. Realizou-se simulações pelo método dos elementos finitos com auxílio do software PTC CREO Parametric 2.0 (versão de estudante) e os resultados obtidos para carga de 1 kN indicaram tensão máxima de 32,86 MPa, o que representa 8,83% da tensão máxima admissível do material (372 MPa), confirmando que o elemento elástico durante o carregamento sofre apenas deformações não permanentes, implicando em curvas de calibração com comportamento linear. A aquisição de dados fez uso de chassi NI CompactDAQ; dos módulos para aquisição de temperatura (NI 9201), aceleração e microfone (NI 9234) e tensão (NI 9215) da National Instruments; de microcomputador; de software de projeto gráfico NI LabVIEW (v.11); do módulo de aquisição para extensômetros NI 9237 (National Instruments); dos conectores e cabos RJ50. Na Figura 17 é apresentado o detalhamento do elemento elástico (a) e os três componentes principais do dinamômetro (b).

Figura 17 – Detalhamento do elemento elástico (a) e três componentes principais do dinamômetro (b)



Fonte: Ribeiro (2016)

Como pode ser observado na Figura 17, o elemento elástico (liga de alumínio 7075-T6) é fixado entre as duas bases (aço AISI 4340), sendo em cada base utilizados 4 pinos ($\varnothing 4 \times 25$ mm) e 4 parafusos (M4x0,7 x 25 mm). Ribeiro (2016) afirma que a compensação de temperatura foi agregada às conexões entre os sensores.

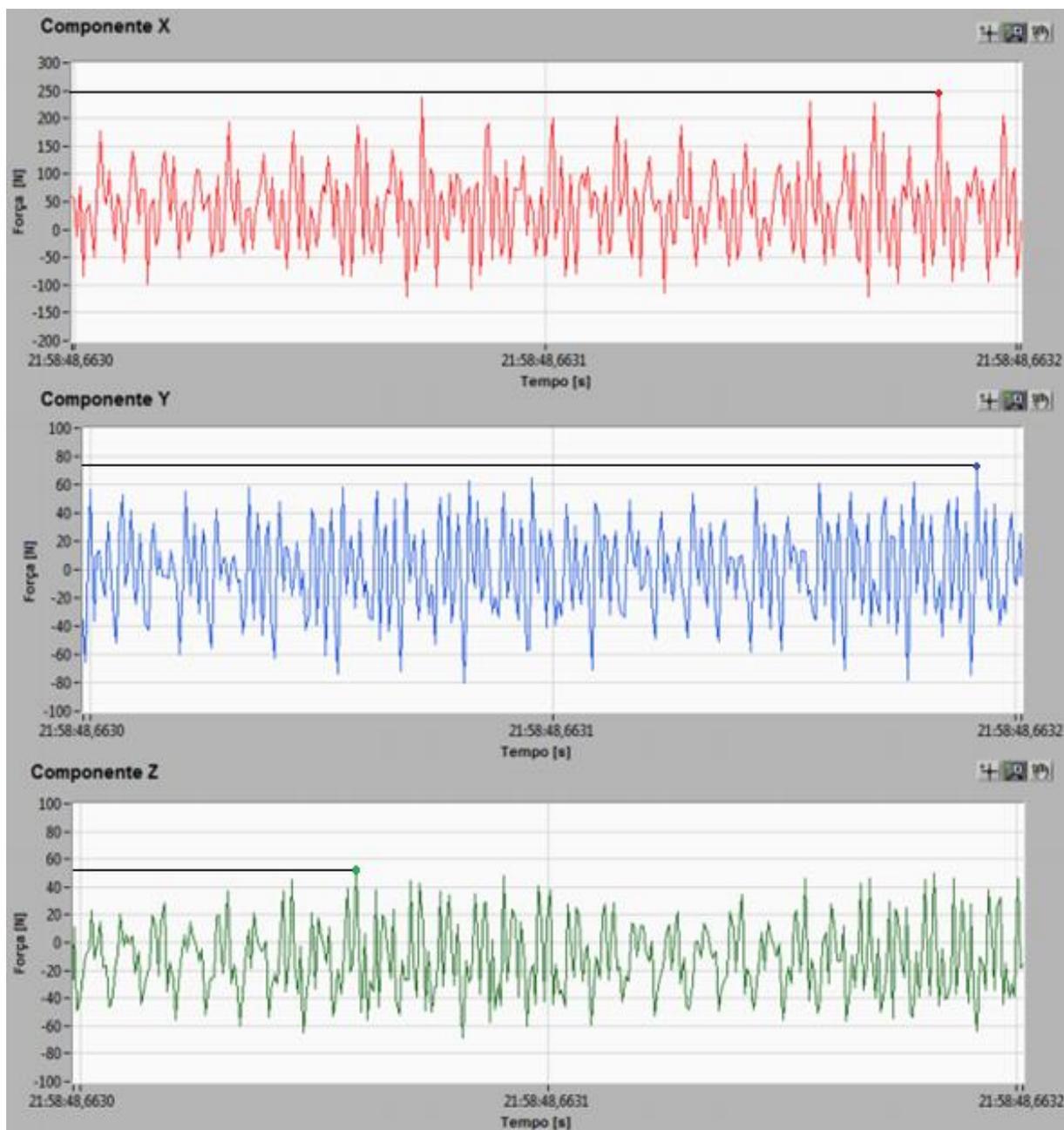
Em relação à fixação dos transdutores, destaca-se a importância da limpeza da superfície na qual o extensômetro será aderido, de modo que os níveis de impureza entre os transdutores e a superfície durante todo o processo de colagem seja mínimo (Ribeiro, 2016). O procedimento seguiu as indicações do fabricante do transdutor e os materiais utilizados foram: lixa d'água com granulometria 220, acetona PA, fita de nylon, papel celulose, cola para extensômetros HBM Z70, adesivo para revestimento superficial PU140, adesivo de teflon, extensômetros e cabos, fio de solda 0,3 mm, estação de solda HAKO 474 com controle de temperatura e ponteiros de solda intercambiáveis. Ressalta ainda a importância do controle da temperatura da solda para acomodar os diferentes pontos de fusão dos elementos, devendo estar entre 230 e 270 °C.

A calibração estática foi realizada na máquina de ensaio SHIMADZU Autograph AG-X com célula de carga de 300 kN, na configuração de ensaio de compressão. Cinco séries de carregamento e descarregamento até 1 kN foram realizadas, tomando-se nota de valores a cada 100 N. Fez-se uso de uma pré-carga de 10 % da faixa de calibração para minimizar erros por histerese durante o ensaio.

À medida que o carregamento foi aplicado para cada eixo, o circuito foi excitado, possibilitando a leitura de valores de saída em mV/V por um indicador digital Dinateste PRC e a construção das curvas de calibração. A incerteza na medição foi da ordem de 10 N (1% da indicação prevista de operação). Não foi realizada a calibração dinâmica em relação à frequência natural de excitação do sistema e seus harmônicos (Ribeiro, 2016).

Os testes de usinagem foram realizados no Centro de Usinagem Romi D600. Foi utilizada uma fresa de diâmetro de 20 mm e dois insertos do fornecedor Sandvik Coromant código R390-11T304M-PM e da classe 1030 (código ISO P30), sendo realizado o fresamento de topo. O corpo de prova era de aço AISI 4340 (dimensões não especificadas) e foi fixado à base superior por dois parafusos M6x0,7 mm. Os parâmetros de usinagem foram: velocidade de corte de 275 m/min; avanço de 0,15 mm/rotação; duas profundidades axiais de usinagem de 0,5 mm e 1,0 mm; e profundidade radial de usinagem de 10 mm (50% do valor de diâmetro da fresa). A Figura 18 apresenta os resultados das componentes de força de um dos ensaios realizados no eixo Y com profundidade axial de 1,0 mm em conte concordante.

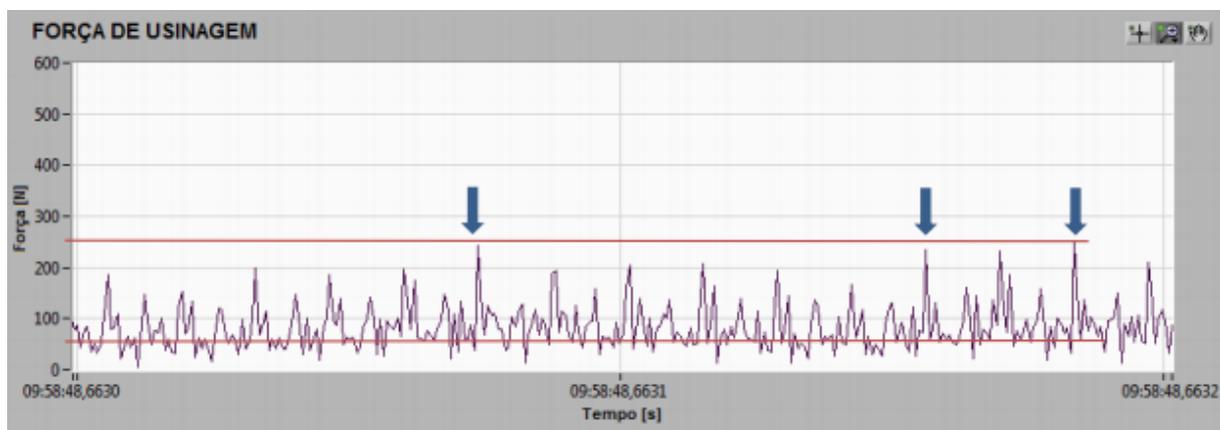
Figura 18 - Componentes de força de usinagem no ensaio em Y com profundidade axial de 1,0 mm em corte concordante



Fonte: Ribeiro (2016)

Nota-se na Figura 18 os valores de pico aproximados de 250 N, 75 N e 52 N, para os eixos “X”, “Y”, e “Z”, respectivamente. As amplitudes aproximadas foram de 325 N, 120 N e 100 N, respectivamente para os eixos “X”, “Y” e “Z”. A força resultante das componentes expostas na Figura 18 é apresentada na Figura 19.

Figura 19– Força resultante de usinagem no ensaio em Y com profundidade axial de 1,0 mm em corte concordante



Fonte: Ribeiro (2016)

Como se pode observar na Figura 19, o valor da força de usinagem no corte concordante observada no intervalo é de, aproximadamente, $F_u = 200$ N, chegando a até $F_u = 450$ N no corte discordante, segundo testes realizados pela autora. O trabalho realizado por Ribeiro (2016) fornece detalhes sobre a colagem e soldagem dos transdutores, pontos essenciais para o sucesso do projeto.

Dinamômetros com múltiplos elementos elásticos, quando comparados com modelos de um único elemento elástico, apresentam divergências quanto a sua aplicação e geometria. O uso de múltiplos elementos elásticos proporciona maior estabilidade dinâmica, pois os apoios se encontram mais distantes do ponto de carregamento. Esse conceito também permite que os elementos sejam tratados de forma individual durante os processos de preparação da superfície de fixação do transdutor, de colagem dos extensômetros e de soldagem dos cabos, proporcionando mais espaço para efetuar as operações. Além disso, facilita futuras manutenções e substituições de transdutores ou elementos elásticos, se necessário, visto que esses componentes não estão fisicamente interligadas e o reparo pode ser realizado apenas onde for relevante. Essa configuração permite ainda a expansão do dinamômetro para modelos de maior porte, sendo capazes de suportar componentes com maiores dimensões, uma vez que os elementos podem ser reposicionados em bases (superior e inferior), de variados tamanhos, agregando versatilidade ao projeto. Entretanto, há alguns desafios, como a necessidade de os

elementos manterem tolerâncias estreitas e da montagem ser realizada com exatidão, de modo a não gerar erros de forma e de posição.

A compreensão dos projetos apresentados é essencial para a elaboração de um novo projeto. Não obstante, o entendimento de como a resposta do sistema mecânico é captada, transmitida e processada também se faz relevante, sendo destas últimas etapas obtidos os valores de força almejados. No item 2.2 a seguir será abordada aquisição, transmissão e processamento dos dados coletados com o dinamômetro.

2.2. Aquisição e processamento de sinais

Os sinais representativos dos valores de força têm importância notória no funcionamento dos dinamômetros. A correta coleta dos dados e os ajustes dos parâmetros, tais como curvas de calibração, ajuste de offset, diminuição de ruídos, filtros e atenuação do sinal são fundamentais para que o resultado obtido seja fidedigno aos carregamentos reais que se deseja medir. Este tópico está subdividido em: 2.2.1 Aquisição de dados (equipamentos, softwares e parâmetros de aquisição); 2.2.2 Processamento de dados (softwares, programação e extração de informações).

2.2.1. Aquisição de dados

Diante das referências analisadas nos itens anteriores, ficou clara a necessidade de compreender como os dados dos dispositivos são coletados e analisados. As informações fornecidas pelos autores se restringiram a equipamentos e parâmetros de aquisição. Totis et. al. (2010 e 2014), Rizal et al. (2015), Ribeiro (2016) e Yaldiz et al. (2007) apontaram a necessidade de amplificação do sinal recebido, podendo ser feita por equipamentos amplificadores ou pelo próprio módulo de aquisição de dados. As principais informações estão contidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Configurações de aquisição de dados

Autores	Transdutor	Faixa e tipo de carregamento	Equipamentos de condicionamento e aquisição	Transmissão	Frequência de aquisição
Totis et. al. (2010)	piezoresistivo	0 a 2 kN / Força	amplificador Kistler (NE) e NI DAQ-6036E	cabo USB 2.0 / Frequência de transmissão 13kHz	25 kHz
Totis et. al. (2014)	piezoresistivo	1 a 2 kN / Força 0 a 35 Nm / Torque	amplificador Kistler 5073A311 e NI9215 instalado no chassi cDAQ-9178	cabo USB 2.0	25 kHz
Rizal et al. (2015)	extensômetros	0 a 2 kN / Força tangencial 0 a 2 kN / Força horizontal 0 a 3 kN / Força vertical	módulo MT23-STG	transmissor (MT32-IND-Tx-45 MHz-2560k), receptor telemétrico (MT32-DEC8) e o armazenador (DT9836)	5 kHz
Ribeiro (2016)	extensômetros	50 N a 1 kN / Força	chassi NI CompactDAQ, módulos NI 9201, NI 9234, NI 9215 e 9237	cabo RJ50 e cabo USB 2.0	1000 Hz
Yaldiz et al. (2007)	extensômetros	0 a 5 kN / Força	Advantech ADAM 3016 e cartão de aquisição de dados PCI-1712	NE	1-10 MHz
Saglam e Unuvar (2001)	extensômetros	8 kN / Força radial 3 kN / Força tangencial	módulo ADAM3016 e cartão de aquisição de dados PCL-818H	NE	1 - 10 kHz
Shaw (2005)	extensômetros	22,24 N a 22,24 kN / Força NE / Torque	NE	NE	NE
Rossi (2008)	extensômetros	500 N a 2 kN / Força	Spider8 da Hottinger Baldwin Messtechnik	NE	600 Hz

*NE: Não especificado

Fonte: elaborada pelo autor

Como se observa na Tabela 1, foram utilizados variados equipamentos. Dentre eles pode-se destacar os amplificadores (TOTIS et. al. 2010 e 2014) e os módulos de aquisição NI (*National Instruments*). O módulo NI 9215 da Série C de entrada de tensão (Figura 20(a)), utilizado por Totis et. al. 2014, apresenta entradas simultâneas, alimentação de ± 10 V, 100 kS/s/canal, 16 bits, 4 canais, calibração rastreável ao NIST (*National Institute of Standards and Technology*) e uma barreira dupla de isolamento entre os canais e o terra do sistema, proporcionando segurança, imunidade ao ruído e ampla faixa de tensão no modo comum. Além disso, pode aceitar dois tipos de conectividade: terminais de parafuso de 10 posições ou BNC (NATIONAL INSTRUMENTS, 2018). Já o módulo NI 9237 (Figura 20(b)), utilizado por Ribeiro (2016), realiza o condicionamento de sinais para extensômetros conectados em meia ponte ou ponte completa de Wheatstone, com excitação interna de até 10 V. Esse possui quatro entradas analógicas simultâneas de $25,00 \pm 0,038$ mV/V, resolução de 24 bits e capacidade máxima de amostragem de 50 k amostras/segundo (NATIONAL INSTRUMENTS, 2018).

Os módulos NI possibilita o uso de ponte de Wheatstone digital que, segundo Ribeiro (2016), fornece mais versatilidade quanto à configuração e apresenta menos

fontes de ruído no sinal, quando comparada à ponte física. Os módulos NI 9215 e NI 9237 são apresentados na Figura 20 (a) e (b), respectivamente.

Figura 20 – Módulos NI 9215 (a) e NI 9237 (b).



Fonte: National Instruments.

Em relação a transmissão de dados, a utilização de cabos USB 2.0 é preponderante (Tabela 1). Por outro lado, a transmissão também pode ser feita sem fios quando há necessidade, como fez Rizal et. al. (2015) ao utilizar um sistema de transmissão e gravação de dados em tempo real por telemetria por rádio frequência, uma vez que o dinamômetro se encontrava sobre movimento rotativo durante o funcionamento. É importante frisar que as informações sobre aquisição e processamento de dados nas referências analisadas, com exceção de Ribeiro (2016) são incompletas e impossibilitam sua reprodução. Ribeiro (2016) apresentou como se dá a aquisição de dados, mostrando o caminho percorrido pelo sinal, como pode ser visto na Figura 21.

Figura 21- Cadeia completa do sistema de aquisição de sinal



Fonte: Adaptado de Karabay (2007) apud Ribeiro (2016).

Na Figura 21, a saída dos circuitos de ponte de Wheatstone completa, utilizado no dinamômetro, é conectada ao sistema de aquisição de dados (NI 9237) e o sinal passa por condicionamento analógico/digital e chega ao computador com o software de aquisição e processamento. Ribeiro (2016) destaca que o programa de aquisição de dados é fundamentado na utilização de uma função em sub-VI para aquisição de dados de força e armazenamento em arquivo de formato “tdms”. Características como tensão de alimentação, resistência nominal dos extensômetros, faixa de medição, dados de calibração e taxa de aquisição de dados são informados na configuração dessa função (RIBEIRO, 2016).

Em relação a frequência de aquisição, de acordo com a literatura, deve ser no mínimo 10 vezes a frequência de entrada de dentes na usinagem (frequência do processo).

2.2.2. Processamento de dados

As informações fornecidas pelos autores em relação ao processamento de dados se restringiram aos softwares e/ou tipo de linguagem de programação utilizada, com exceção de Ribeiro (2016). Esses dados estão contidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Softwares de aquisição e processamento de dados

Autores	Transdutor	Faixa e tipo de carregamento	Software aquisição e processamento
Totis et. al. (2010)	piezoresistivo	0 a 2 kN / Força	MathWorks MATLAB
Totis et. al. (2014)	piezoresistivo	1 a 2 kN / Força 0 a 35 Nm / Torque	plataforma LabVIEW / Aquisição MathWorks MATLAB / Processamento
Rizal et al. (2015)	extensômetros	0 a 2 kN / Força tangencial 0 a 2 kN / Força horizontal 0 a 3 kN / Força vertical	MATLAB
Ribeiro (2016)	extensômetros	50 N a 1 kN / Força	NI LabVIEW versão 2011
Yaldiz et al. (2007)	extensômetros	0 a 5 kN / Força	linguagem de programação C
Saglam e Unuvar (2001)	extensômetros	8 kN / Força radial 3 kN / Força tangencial	programa em Turbo Pascal
Shaw (2005)	extensômetros	22,24 N a 22,24 kN / Força NE / Torque	NE
Rossi (2008)	extensômetros	500 N a 2 kN / Força	NE

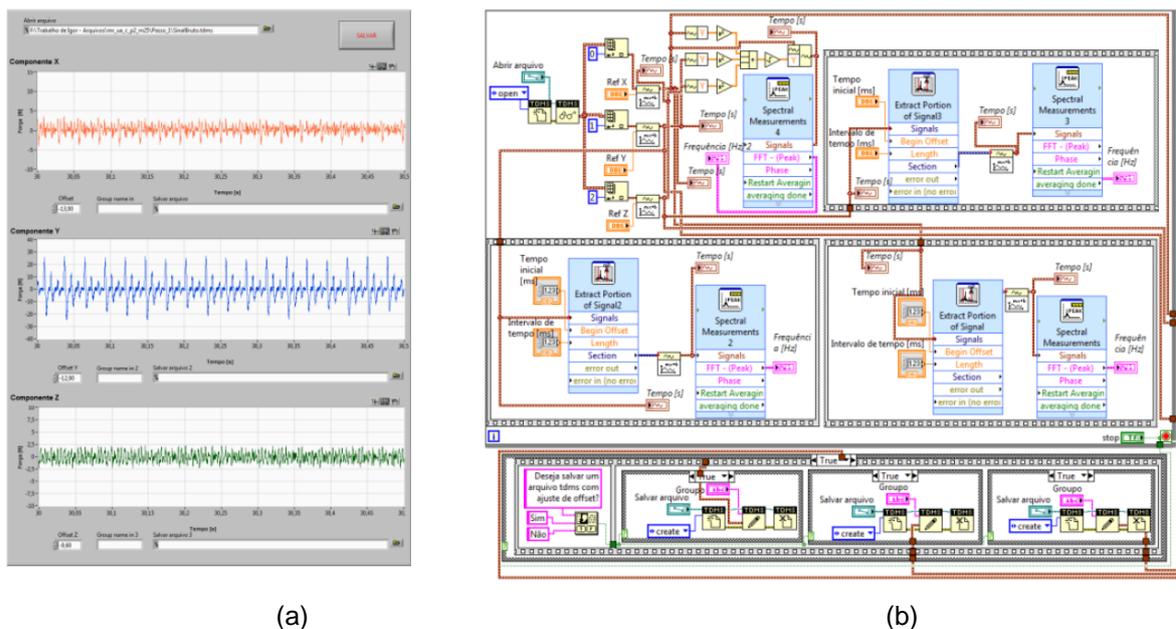
*NE: Não especificado

Fonte: elaborada pelo autor

Como pode ser visto na Tabela 2, para aquisição e processamento de dados foi preponderante o uso de plataformas MATLAB e LabVIEW. Esse último apresenta

vantagem em relação a sua compatibilidade com os módulos NI, sua programação por meio de diagrama de blocos e a interface interativa que pode ser criada com o usuário. Ribeiro (2016) utilizou o software LabVIEW (versão 2011) para realizar as aquisições e o processamento dos dados, como mostra a Figura 22.

Figura 22 – Interface para análise do sinal de força (a) e diagrama de blocos (b)



Fonte: Ribeiro (2016).

Na Figura 22 pode-se observar a Interface para análise do sinal de força (a) e diagrama de blocos (b). Ribeiro (2016) destaca que o programa para o pós-processamento do sinal possibilita a leitura de arquivo em formato “.tdms”, a apresentação dos dados e o tratamento de sinal. Ainda, possibilita uma análise local e global das componentes da força de usinagem, análise de FFT (Fast Fourier Transform), ajuste de offset e o cálculo da força de usinagem.

3. METODOLOGIA

Este capítulo aborda de forma sistemática a concepção e execução do projeto, incluindo os seus requisitos, as definições técnicas e os procedimentos utilizados. Portanto, ele foi subdividido em 7 etapas: 3.1 Projeto do dinamômetro e definição de extensômetros; 3.2 Análises de engenharia; 3.3 Manufatura e análise dimensional; 3.4 Instrumentação; 3.5 Calibração estática; 3.6 Ensaios funcionais e 3.7 Fluxograma de execução, de modo a proporcionar o entendimento do andamento das etapas.

3.1. Projeto do dinamômetro e especificação dos extensômetros

A concepção do projeto definiu requisitos iniciais baseados na fundamentação teórica e que se adequaram as restrições apresentadas por instrumentos, materiais, máquinas e ferramentas disponíveis. Assim, os requisitos, apresentados a seguir, proporcionaram ao dinamômetro as características desejadas.

- Capacidade de medir componentes ortogonais de força triaxial com magnitudes na faixa de 100 N a 5 kN;
- Elementos rígidos e elementos elásticos com diferença de pelo menos três vezes entre os módulos de elasticidade, de modo a concentrar as deformações no elemento de medição;
- Elementos elásticos carregados no regime elástico, proporcionando uma resposta linear do sinal;
- Sensibilidade e rigidez adequadas ao carregamento;
- Deformação do elemento elástico compatível com a faixa de leitura do transdutor;
- Transdutores compatíveis com sistemas de aquisição e processamento do sinal;
- Textura e rugosidade da superfície adequadas no elemento elástico para a fixação dos transdutores;
- Geometria compacta e simétrica, que permita a montagem, a desmontagem e a expansão sem alteração dos elementos elásticos;
- Geometria que facilite a colagem e soldagem dos transdutores;
- Canais para passagem de cabos e para o acesso a fiação elétrica que interliga os transdutores e o sistema de aquisição;

- Sistema de fixação do dinamômetro compatível com mesas de máquinas-ferramenta;
- Sistema de fixação de corpos de prova de acordo com a Série de Renard.

Para a criação do projeto foi utilizado o software CREO Parametric 4.0 PTC (versão acadêmica), disponível no Laboratório de Manufatura da UFRN.

Com relação aos extensômetros, esses devem atender aos seguintes requisitos para adaptação ao sistema de aquisição e ao projeto mecânico:

- Permitir tensão de alimentação de 10 V;
- Resistência adequada e máxima possível para a aplicação;
- Largura compatível com as dimensões do elemento elástico;
- Sensibilidade menor ou igual a 1 %.

As condições listadas tiveram como referência o projeto desenvolvido por Ribeiro (2016). A tensão de alimentação foi limitada a 10 V pelo fato desta ser a magnitude máxima fornecida pelo módulo de aquisição, descrito no item 3.4.2, disponível no Laboratório de Manufatura da UFRN. Quanto maior a resistência do extensômetros, maior é a sua resposta de deformação, de modo que a resistência do transdutor mais adequada diante das opções disponíveis no mercado à aplicação é de 350 Ω , como foi utilizado por Saglam e Unuvar (2001), Yaldiz et al. (2007), Rizal et al. (2015) e Ribeiro (2016). A sensibilidade menor ou igual a 1% significa a possibilidade de medir magnitudes de força menor ou igual a 50 N.

3.2. Análises de Engenharia

A análise de tensões e de deformações do sistema foi realizada com o auxílio do Método dos Elementos Finitos e com o software CREO Parametric 4.0 PTC. As simulações consideraram os elementos elásticos como componentes isolados, de modo a proporcionar uma compreensão pontual do funcionamento do sistema.

A aplicação do método com múltiplos passes (múltiplas iterações computacionais), geração da malha, definição do grau do polinômio utilizado nas curvas de aproximação e percentual de convergência permitem o controle dos da simulação de acordo aplicação desejada. Contudo, a especificação de parâmetros mais rigorosos exige maior trabalho computacional.

O comportamento do elemento elástico na simulação deve ser o mais próximo possível no comportamento real esperado quando o sistema estiver montado, para

isso são necessárias sejam inseridas condições de contorno. O elemento elástico, conforme apresentaram os trabalhos analisados na revisão bibliográfica, é situado entre duas bases. Na face de contato superior (recebe carregamento) deve ser colocado um vetor de força, com módulo, direção e sentido, e na superfície de contato inferior (transmite o carregamento) restrições ao movimento, restringindo todos os graus de liberdade, uma vez que essa face representa a fixação em um apoio ou base.

3.3. Manufatura e análise dimensional

O corte do material base foi realizado com o auxílio de uma serradora fita FRANHO FM 500 e a manufatura dos componentes do projeto foi realizada no Centro de Usinagem CNC ROMI D600 (conforme a Figura 23), ambos equipamentos presentes no Laboratório de Manufatura da UFRN. As operações de usinagem necessitaram das seguintes ferramentas:

- Fresas de topo reto ($\varnothing 5$, 12 e 20 mm);
- Brocas helicoidais ($\varnothing 4$, 5 e 5,8 mm);
- Alargador ($\varnothing 6$ mm);
- Escareador ($\varnothing 12$ e ângulo de 45°);
- Macho rígido (M6 x 1 mm).

Com relação às operações, definiu-se um sobrematerial par o desbaste de 0,25 mm e acabamento de regiões críticas de forma atingir as especificações de tolerância dimensional e textura superficial. A definição dos parâmetros de usinagem seguiu as recomendações do fabricante de ferramentas (SANDVIK, 2017). Utilizou-se fluido de corte em abundância (emulsão baseada em óleo mineral com concentração de 6%) em todas as operações. Os programas para a fabricação dos componentes foram elaborados no módulo de manufatura do software CREO Parametric 4.0 PTC (versão acadêmica).

Figura 23 – Sala de máquinas CNC/Laboratório de Manufatura UFRN



Fonte: elaborada pelo autor.

A análise dimensional dos elementos foi realizada de acordo com as tolerâncias estabelecidas em projeto, como pode ser visto nos desenhos técnicos no Apêndice A. Os instrumentos utilizados para as medições possuem certificado de calibração e estão disponíveis no Laboratório de Metrologia e no Laboratório de Manufatura da UFRN. Esses são listados a seguir:

- Micrômetro externo Mitutoyo 0-25 mm, com resolução de 0,01 mm;
- Micrômetro de profundidade Mitutoyo 0-25 mm, com resolução de 0,01 mm;
- Multímetro Digital ET-2053 Minipa;
- Paquímetro Mitutoyo 0-150 mm, com resolução de 0,01 mm;
- Relógio apalpador Mitutoyo, com resolução de 0,01 mm;
- Rugosímetro portátil Taylor Hobson *Surtronic 3*;
- Traçador de altura digital Mitutoyo, com resolução de 0,01 mm.

É necessário enfatizar o cuidado e a atenção nos processos de manufatura e de medição, uma vez que os componentes confeccionados possuem regiões de tolerâncias estreitas, como superfícies de colagem dos extensômetros, furações para pinos e faces de contatos entre componentes.

3.4. Instrumentação

O posicionamento e a fixação dos transdutores influenciam diretamente na exatidão e na eficiência das medições, sendo a etapa de instrumentação crítica para o sucesso do dispositivo. Esta etapa aborda os materiais e procedimentos

necessários para realizar a colagem e a soldagem dos extensômetros, bem como o manuseio do sistema de aquisição e o processamento de dados.

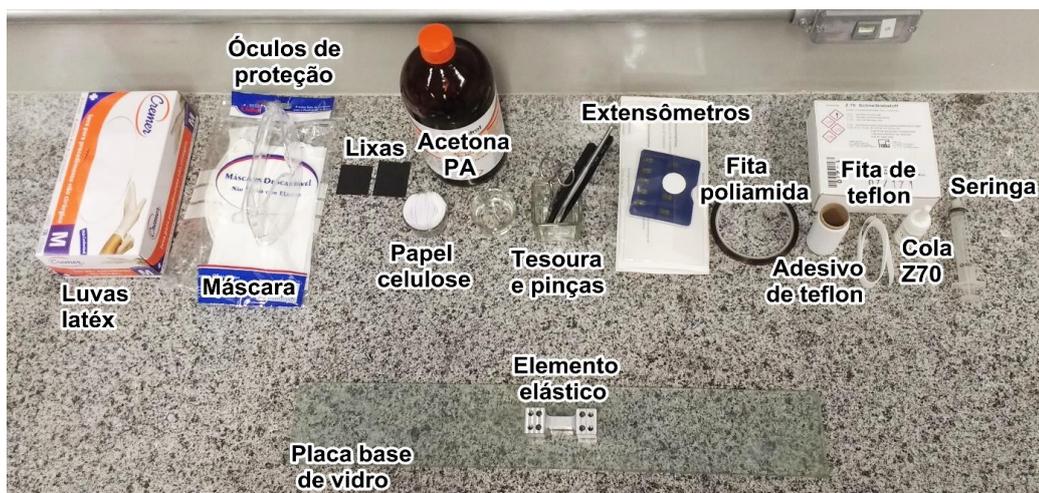
3.4.1. Colagem e soldagem dos extensômetros

Nos processos de colagem e soldagem fizeram-se necessários equipamentos de proteção individual, com o objetivo de proteger o operador e de evitar contaminações durante o processo. Foram utilizados os seguintes EPIs: luvas de látex, máscara, óculos de proteção. A utilização de luvas durante os procedimentos evita que resíduos presentes nas mãos do aplicador sejam transmitidos para os demais componentes. A máscara impede que o operador inale gases liberados nas atividades e que a umidade da respiração entre em contato com os elementos de trabalho. Os óculos protegem os olhos de possíveis irritações por substâncias voláteis utilizadas. Os materiais e equipamentos utilizados nos processos foram listados na tabela 3 e a Figura 24 mostra a bancada utilizada para colagem.

Tabela 3 – Equipamentos e materiais utilizados

Equipamentos	Materiais
Lupa de bancada LP 600	Peça
Traçador de altura	Lixas d'água Gr 150 e 240 (Abrasivo: SiC)
Tesoura	Papel celulose ou papel filtro
Pinças	Acetona para análise (PA)
Recipientes de vidro (30 e 80 ml)	Extensômetros
Placa base de vidro	Fita poliamida ou fita adesiva transparente
Seringa	Cola para extensômetros com cura a frio
Estação de soldagem Toyo TS-960D	Fita de teflon
Ponteiras de soldagem intercambiáveis	Adesivo de teflon
	Fio de solda 1 mm
	Pasta para soldar Cobix 110g
	Cabos
	Revestimento superficial para extensômetros

Figura 24 – Bancada para o processo de colagem



Fonte: elaborada pelo autor.

Primeiramente realizou-se a limpeza da bancada, da placa base de vidro e instalou-se uma lupa de bancada. Em seguida foi feito o lixamento com lixa d'água 150, removendo as impurezas mais grosseiras, e com lixa d'água 240, imprimindo na superfície de colagem uma rugosidade adequada para a aderência entre o material do componente, a cola e o transdutor. Com o auxílio do traçador de altura sobre um desempenho foram feitas marcações, horizontais e verticais, de orientação para a colagem.

Três recipientes de vidro foram utilizados para armazenar recortes de papel celulose, acetona PA, e descarte dos papeis já utilizados. Para a limpeza usou-se papel celulose umedecidos com acetona PA, manuseados com o auxílio de pinças e passando-os em uma única direção da superfície. A cada passe o papel foi trocado e o processo se repetiu até que este não apresentasse resíduos aparentes.

Com a superfície preparada e auxílio da fita poliamida, posicionou-se o extensômetros e foi feita sua centralização na região desejada. Uma vez na posição correta, a fita poliamida com o transdutor foi levantada e aplicou-se a cola na região de fixação, espalhando com a fita de teflon, como pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 – Remoção parcial da fita para aplicação da cola Z70



Fonte: elaborada pelo autor.

Para aplicação da cola Z70 foram seguidas as instruções presentes no manual do fabricante (HBM, Instructions for Use - Rapid Adhesive Z70). O procedimento apresentado na Figura 25 foi realizado em uma barra de testes com a finalidade de adquirir a habilidade para a execução do procedimento, bem como sua otimização.

A fita poliamida foi colocada na posição anterior e aplicou-se pressão, sem interrupções, até a secagem da cola, protegendo o polegar com o adesivo de teflon, evitando que a cola atuasse também sobre os dedos e a luva. Por fim, retirou-se o adesivo de teflon e a fita poliamida. Foi necessária a limpeza do bico da cola com o auxílio de uma seringa e acetona PA.

Ao término da colagem foi feita uma análise do processo, observando os seguintes aspectos: centralização da grade do extensômetro no elemento elástico; aderência da superfície inferior do transdutor à superfície de colagem; e espalhamento da cola para além das bordas do extensômetro (mínimo de 2 mm). A observação desses parâmetros serve de análise prévia do procedimento, sendo confirmado seu sucesso posteriormente com a leitura e aquisição de dados.

Para o processo de soldagem, primeiramente foi realizada a raspagem da camada de proteção dos terminais do extensômetros. Ligou-se a estação de soldagem (Toyo TS-960D) a temperatura foi regulada para 240°C. Com a ponteira limpa, com o fio de solda (\varnothing 1 mm) e com a pasta para soldagem foi feito o estanhamento dos fios e a soldagem nos terminais do extensômetros. Os fios foram fixados ao componente com fita adesiva para evitar que se movimentassem e dificultasse a soldagem. Por fim, aplicou-se o revestimento superficial PU140, da

HBM, específico para extensômetros, sobre o sistema de acordo com as recomendações do fabricante presentes no manual (HBM, Instructions for Use - Covering agent PU140). Os materiais e equipamentos utilizados na soldagem podem ser vistos na Figura 26.

Figura 26 – Bancada para o processo de soldagem



Fonte: elaborada pelo autor.

Os processos de colagem e de soldagem dos transdutores são parte fundamental da construção do dinamômetro. Não obstante, a aquisição e o processamento de dados são igualmente relevantes para o sucesso do dispositivo, sendo esse tópico detalhado no item seguinte.

3.4.2. Sistema de aquisição e processamento de dados

Uma vez com os transdutores colados e os cabos soldados nos elementos elásticos, faz-se necessário um sistema de aquisição de dados e o desenvolvimento de programas para a aquisição e o processamento. Diante das análises realizadas na revisão bibliográfica, constatou-se que as plataformas *National Instruments* (hardware e software), utilizadas por Totis et. al. (2010 e 2014) e Ribeiro (2016), se mostraram adequadas para o objetivo, visto a sua funcionalidade e disponibilidade no Laboratório de Manufatura da UFRN.

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

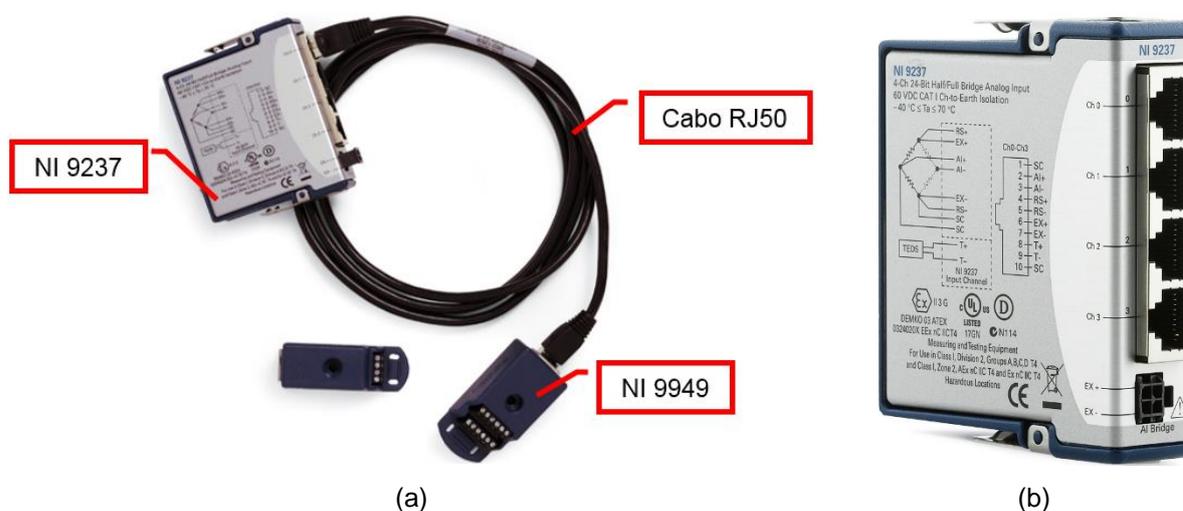
- Conector NI 9949;
- Cabos RJ50;
- Módulo NI 9237;
- Chassi NI CompactDAQ;

- Computador.

Para cada eixo de medição um conector NI 9949, com 10 terminais, permite a rápida conexão e remoção do sistema de medição. Este conector recebe os fios do dinamômetro, ligados de acordo com as instruções do módulo NI 9237 (

Figura 27(b)), através do cabo RJ50 se liga ao módulo. A Figura 27(a) mostra o NI 9949 conectado ao NI 9237 pelo cabo RJ50.

Figura 27 – NI 9949 conectado ao NI 9237 por cabo RJ50 (a) e detalhe do NI 9237 (b).



Fonte: Adaptado de National Instruments (2018).

O módulo 9237 (de acordo com a Figura 27) é acoplado ao chassi NI CompactDAQ, o qual se conecta ao computador via cabo USB 2.0 (ver a Figura 28). No computador, com o auxílio do software NI LabVIEW (versão 2011), foram elaborados os programas de aquisição e de processamento de dados. O programa de aquisição deve ser capaz de coletar e salvar os dados do equipamento. Já o processamento, realizado em um segundo programa, o qual deve ser capaz de abrir os dados salvos, filtrá-los e fornecer informações e possibilidades de tratamento de sinal, tais como os valores das componentes de força nas direções “X”, “Y”, “Z” e da resultante em cada instante de tempo, valores de picos e vales de força, ajustes de offset, tratamento de ruídos, etc.

Figura 28 – Esquema do sistema de aquisição e processamento de dados



Fonte: elaborada pelo autor

Uma vez que o sistema de aquisição e de processamento é conectado ao dinamômetro, faz-se necessário estabelecer uma correlação entre os carregamentos aplicados e a leitura obtida pelo sistema. Visando atender a essa necessidade, no item 3.5 será abordada a metodologia da calibração estática.

3.5. Calibração estática

Os ensaios de calibração foram realizados no Laboratório de Metais e Ensaios Mecânicos da UFRN com a máquina de ensaios AG-I 300 kN AUTOGRAPH SHIMADZU. Uma vez que, segundo os requisitos de projeto, o funcionamento da célula de carga se dá no regime elástico do material, uma resposta linear do sinal é esperada. Deste modo, para o eixo “Z” foi obtida uma curva de calibração apresentada no item 4.5.

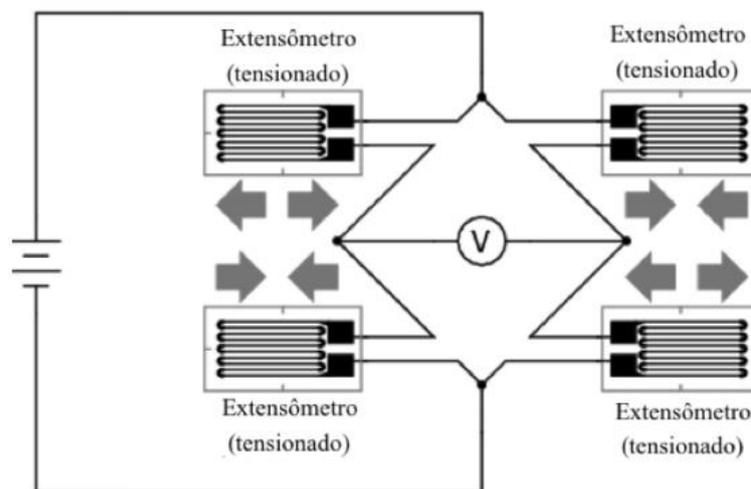
O objetivo desta etapa é estabelecer uma correspondência entre os sinais lidos com carregamentos conhecidos, os quais o dispositivo está submetido. Esses carregamentos podem ser obtidos através de células de carga de maior precisão. O método escolhido foi o da célula de carga presente na máquina de ensaios de tração e compressão, devido à disponibilidade e facilidade de alteração da carga aplicada.

Cargas de até 8 kN, abrangendo a faixa de aplicação de 100 N a 5 kN, foram aplicadas em duas séries de aquecimento (carregamento e descarregamento) mais quatro séries de calibração, duas de carregamento e duas de descarregamento para o eixo “Z”. Já para os eixos “X” e “Y”, a aplicação do carregamento será realizada com o auxílio de um dispositivo específico e não está incluída neste trabalho.

Para a leitura do sinal em cada eixo, a ponte completa de Wheatstone, como apresentado na Figura 29, é excitada com 10 V pelo indicador digital Dinateste PRC. Ao serem tensionados, os extensômetros causam um desequilíbrio na ponte, gerando uma diferença de potencial que pode ser medida através de um multímetro

ou do próprio indicador digital Dinateste PRC. O segundo método foi o escolhido para a calibração do sistema.

Figura 29 – Esquema de funcionamento da ponte completa de Wheatstone



Fonte: Kuphaldt (2006, *apud* Ribeiro, 2016)

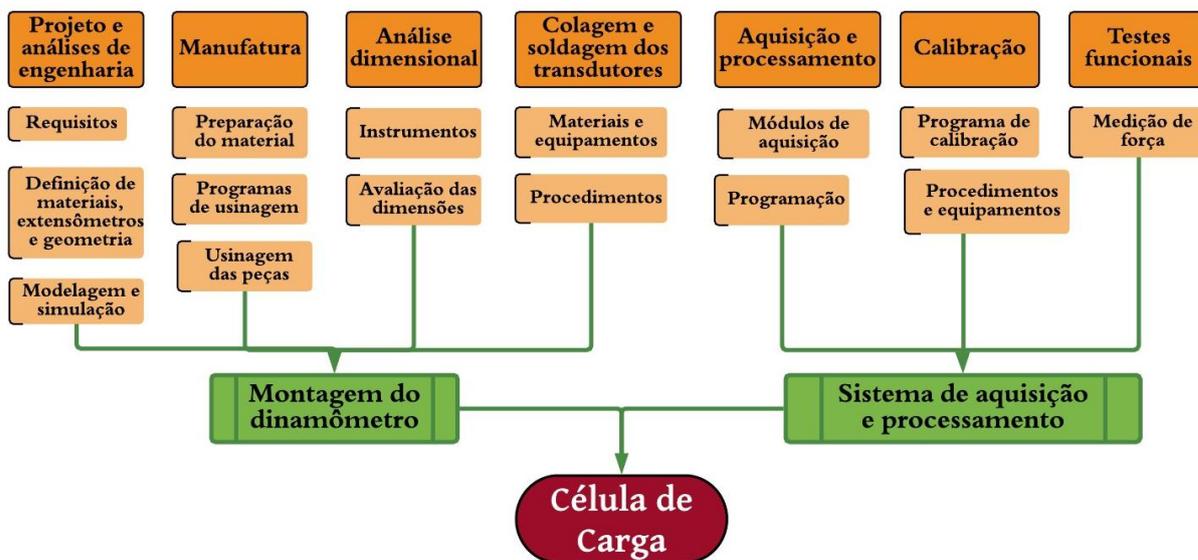
3.6. Testes funcionais

Após a calibração foram realizados testes funcionais para aferir o funcionamento do sistema. Esses consistem em conectar o dinamômetro ao sistema de aquisição, inserir os dados de calibração e aplicar carregamentos conhecidos. Desse modo, pode-se aferir se a carga aplicada é a apresentada pela célula de carga. É feita também a análise do sinal bruto, analisando o ruído apresentado pelo sistema e buscando a melhor forma de reduzi-lo sem interferir nas informações de comportamento da força.

3.7. Fluxograma de execução

A Figura 30 apresenta o fluxograma de execução do projeto, dividindo as definições e etapas.

Figura 30 – Fluxograma de execução



Fonte: elaborada pelo autor

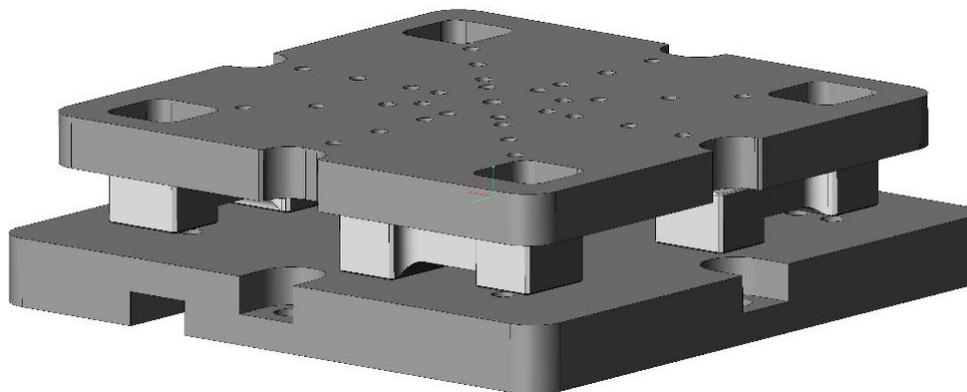
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo aborda os resultados obtidos com a aplicação da metodologia e apresenta as discussões. O capítulo segue a mesma estrutura apresentada no item Metodologia, visando proporcionar o melhor entendimento e a correlação entre as etapas de projeto. Portanto, foram abordados os seguintes itens: 4.1 Projeto conceitual do dinamômetro e especificação dos extensômetros, 4.2 Análises de engenharia, 4.3 Manufatura e análise dimensional, 4.4 Instrumentação (colagem e soldagem, sistema de aquisição e processamento de dados), 4.5 Calibração estática e 4.6 Testes funcionais.

4.1. Projeto conceitual do dinamômetro e especificação dos extensômetros

O projeto conceitual do dinamômetro foi realizado considerando os requisitos estabelecidos no item metodologia (de acordo com o item 3.1). Na Figura 31 pode-se visualizar um desenho de montagem do sistema mecânico. Os desenhos técnicos referentes aos componentes do projeto encontram-se no Apêndice A.

Figura 31 – Modelagem do dinamômetro



Fonte: elaborada pelo autor.

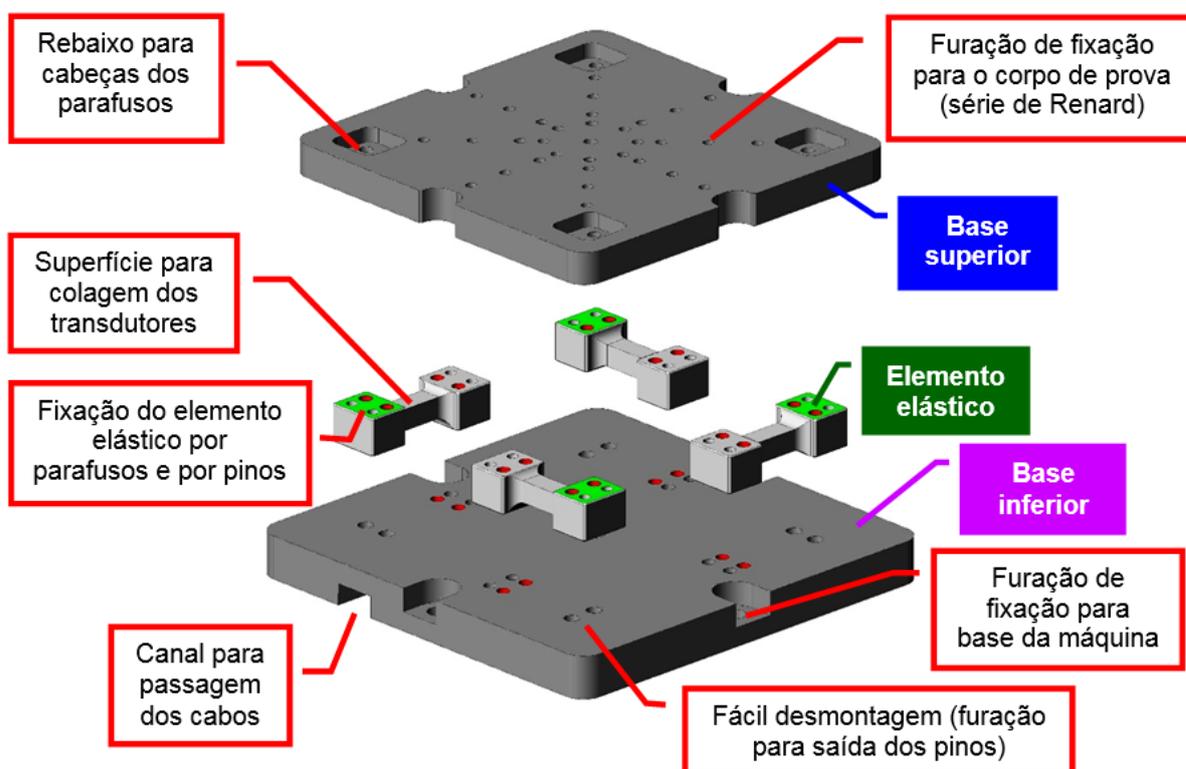
O projeto conceitual da Figura 31 apresenta as soluções para os requisitos geométricos propostos, como: superfície adequada no elemento elástico para a fixação dos transdutores (seção quadrada de 10 mm); geometria compacta e simétrica, que permite montagem, desmontagem e expansão das bases sem alteração dos elementos elásticos; geometria que facilita a colagem e soldagem dos transdutores no elemento elástico; canais para passagem de cabos e para acesso à fiação elétrica; eliminação de graus de liberdade ao sistema mecânico; sistema de

fixação do dinamômetro compatível com mesas de máquinas-ferramenta e sistema de fixação do corpo de prova de acordo com a Série de Renard.

O extensômetro escolhido foi o HBM 1-LY43-3/350. Esse possui resistência de 350Ω , é específico para ligas de alumínio e suas dimensões, de acordo com o catálogo do fabricante (HBM, 2018), são compatíveis com as do elemento elástico. A tensão máxima de alimentação é de até 18,5 V para a ponte de Wheatstone, abrangendo o valor máximo de 10 V fornecido pelo módulo NI. A sensibilidade transversal é de 0,1% e seu fator K (*Gage fator*) é de $2,06 \pm 1,0\%$. As informações técnicas desse modelo podem ser consultadas no Anexo A.

A Figura 32 mostra a aplicação dos requisitos e as partes internas no dispositivo.

Figura 32– Aplicação dos requisitos de projeto



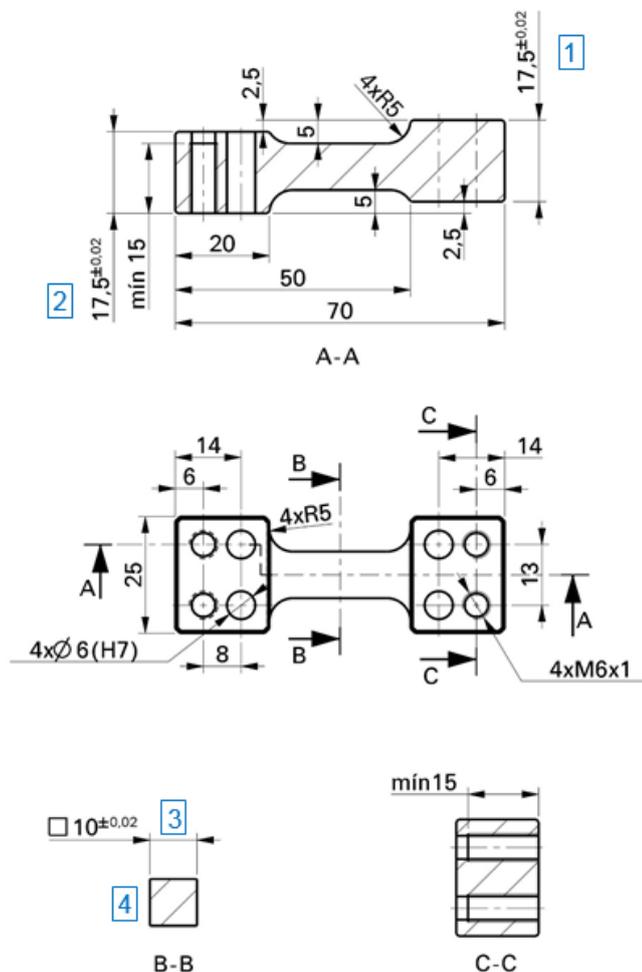
Fonte: elaborada pelo autor.

Como pode ser visto na Figura 32, as superfícies destacadas em verde indicam as superfícies, de cada elemento elástico, que estão em contato com a base superior. Como aplicações dos requisitos têm-se a superfície do elemento elástico,

para a fixação dos transdutores, com dimensões adequadas quando comparadas com as dimensões dos extensômetros e que permite fácil acesso aos processos de colagem e soldagem. Para a montagem, parafusos e pinos (superfícies indicadas em vermelho) atravessam as bases e se fixam no elemento elástico. Na base superior, pode-se notar os rebaixos para acomodar as cabeças dos parafusos, de modo a evitar que ficassem salientes e se tornassem obstáculos durante a utilização do dinamômetro. Já na base inferior, nota-se a furação para saída dos pinos, com diâmetro maior que o dos pinos, proporcionando sua remoção com o auxílio de um saca-pino. Na Figura 32 também se pode visualizar o canal para a passagem dos cabos que fazem a ligação entre os extensômetros e o sistema de aquisição. Em relação à fixação da base inferior em mesas de máquinas-ferramenta, essa apresenta rebaixos para acomodação da cabeça dos parafusos e o espaçamento entre os furos é compatível com os rasgos de um Centro de Usinagem Romi D600, disponível no Laboratório de Manufatura da UFRN. Já em relação aos furos roscados para fixação do corpo de prova na base superior, esses são espaçados de acordo com a Série de Renard, proporcionando compatibilidade com padrões internacionais. Essa furação pode ser preenchida por parafusos sem cabeça com sextavado interno M6 x 1 (DIN 913 ou ISO 4026) quando não estiver em uso, evitando entrada de resíduos na parte instrumentada do dinamômetro.

Como abordado na revisão bibliográfica, modelos de dinamômetros com múltiplos elementos elásticos, comparados aos com um único elemento, possuem vantagens e desvantagens. A utilização de múltiplos elementos elásticos proporciona maior estabilidade dinâmica e permite que os esses sejam tratados de forma individual durante os processos de preparação da superfície de fixação do transdutor, de colagem dos extensômetros e de soldagem dos cabos, facilitando futuras manutenções e substituições de transdutores e/ou elementos elásticos. Essa configuração também possibilita a expansão do dinamômetro para modelos de maior porte, uma vez que os elementos elásticos podem ser montados em bases de maiores dimensões. Por outro lado, existem desafios, tais como a exatidão da montagem e o alcance de tolerâncias estreitas nas seções de fixação dos transdutores e nas superfícies de contato entre componentes. As dimensões críticas estão numeradas de 1 a 4 na Figura 33.

Figura 33 - Dimensões críticas do projeto dos elementos elásticos



Fonte: elaborada pelo autor.

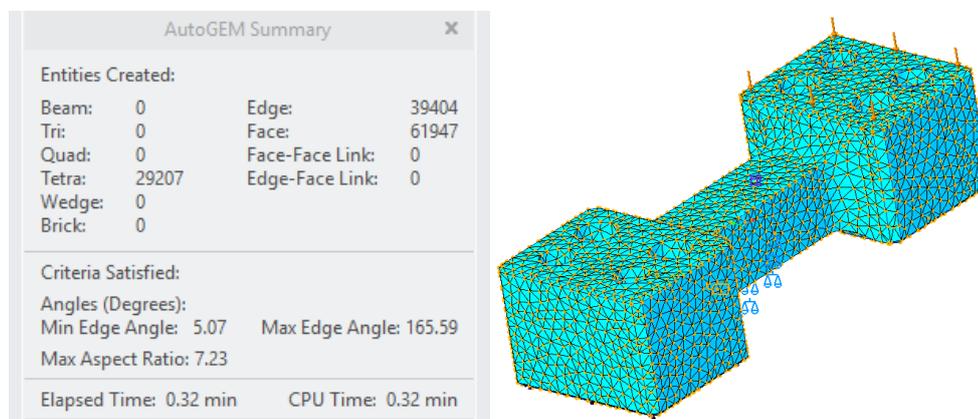
Em relação aos materiais utilizados, foram escolhidos o aço 4340 para as bases e a liga de alumínio 7075-T6 para o elemento elástico. O módulo de elasticidade para o aço e a liga de alumínio utilizados é de, respectivamente, 205 e 71,7 GPa (ASM MATWEB, 2017).

4.2. Análises de Engenharia

A simulação de tensões e deformações no elemento elástico isolado buscou reproduzir o comportamento mais próximo possível do real esperado. Para isso se fez necessário gerar uma malha e inserir as condições de contorno. Foi gerada a malha (conforme a Figura 34) controlando-se o tamanho máximo dos elementos (2

mm). Essa apresentou como entidades criadas 29207 elementos, 39404 arestas e 61947 faces.

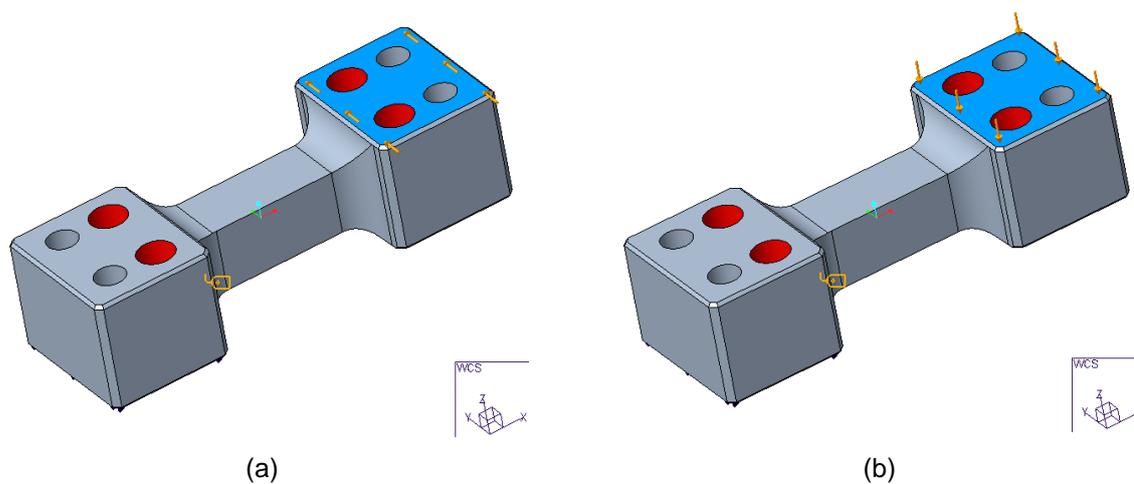
Figura 34 – Malha gerada automaticamente no modo Simulate do software CREO Parametric 4.0



Fonte: elaborada pelo autor.

Para estabelecer as condições de contorno é necessário compreender a transmissão das cargas. Um par de elementos elásticos mede o carregamento na componente “X” e “Z” enquanto outro par realiza a medição na componente “Y”, de modo que os carregamentos medidos são ortogonais à superfície com o extensômetro que realiza sua medição. Devido à simetria do sistema, os eixos “X” e “Y” apresentam o mesmo comportamento. Conforme pode ser observado na Figura 35, foi aplicado carregamento na superfície superior do elemento elástico (face que “recebe” o carregamento transmitido pela base superior) e na superfície inferior (face que “transmite” o carregamento para a base inferior), foram colocadas restrições aos movimentos de translação em X, Y e Z. Isso proporciona que a simulação se aproxime melhor do real comportamento do sistema mecânico montado.

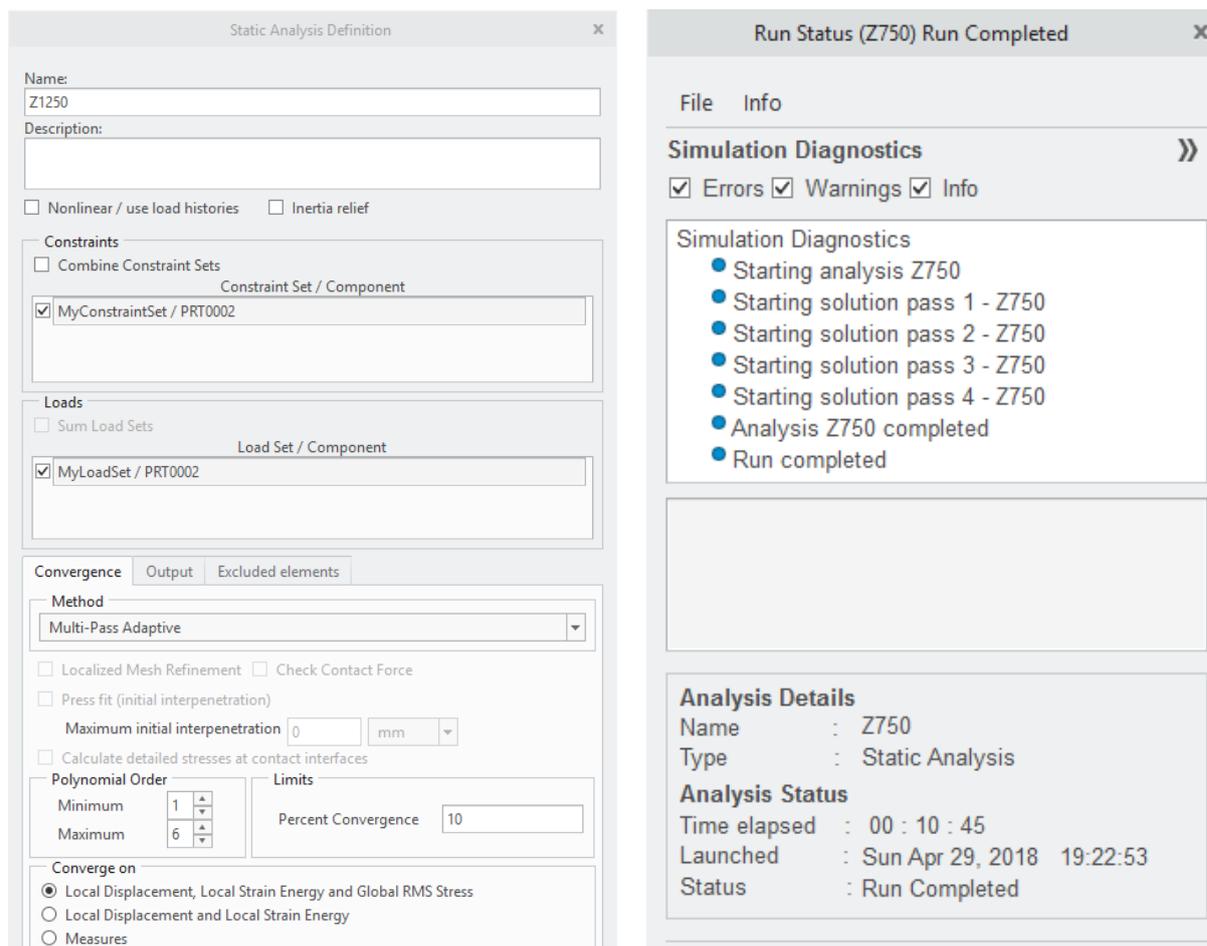
Figura 35 – Condições de contorno utilizadas em “Y” (a) e em “Z” (b)



Fonte: elaborada pelo autor.

Em relação aos parâmetros, a simulação foi realizada com múltiplos passes (múltiplas iterações computacionais), o grau do polinômio variou de 1 a 6 e o percentual de convergência foi de 10%. As definições desses parâmetros, bem como o diagnóstico da simulação após ter sido completada, podem ser vistos na Figura 36 (a) e (b), respectivamente.

Figura 36 – Parâmetros e diagnóstico

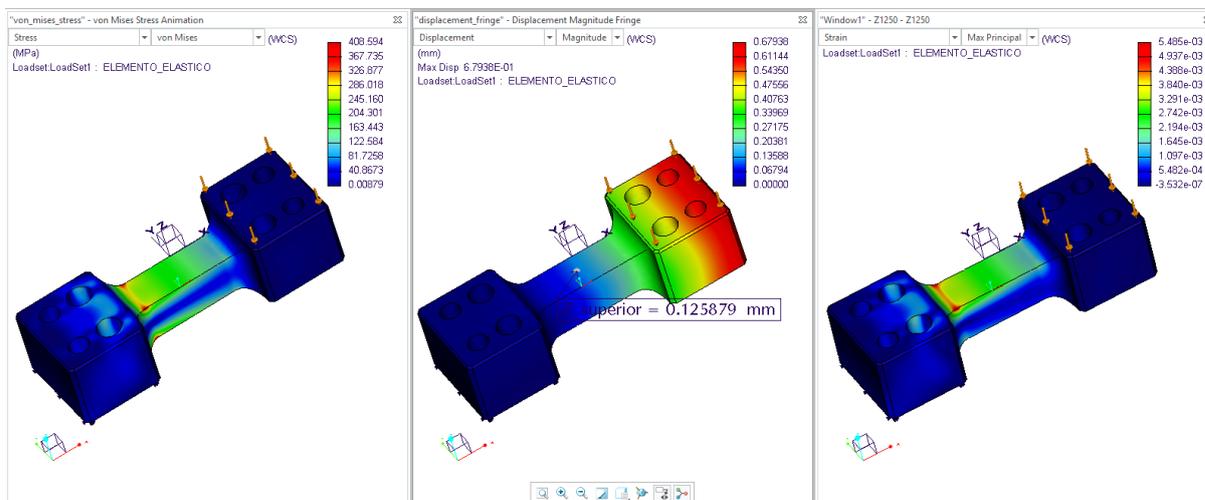


(a)

(b)

Compreendendo que a base superior é igualmente apoiada nos quatro elementos elásticos, a faixa de carregamento de 100 N a 5 kN foi dividida igualmente entre eles, obtendo-se uma faixa, por elemento elástico, de 25 N a 1,25 kN. Os carregamentos, dentro da faixa de medição, foram testados nas três direções. Os resultados das simulações para 1,25 kN de compressão no eixo “Z” podem ser constatados na Figura 37.

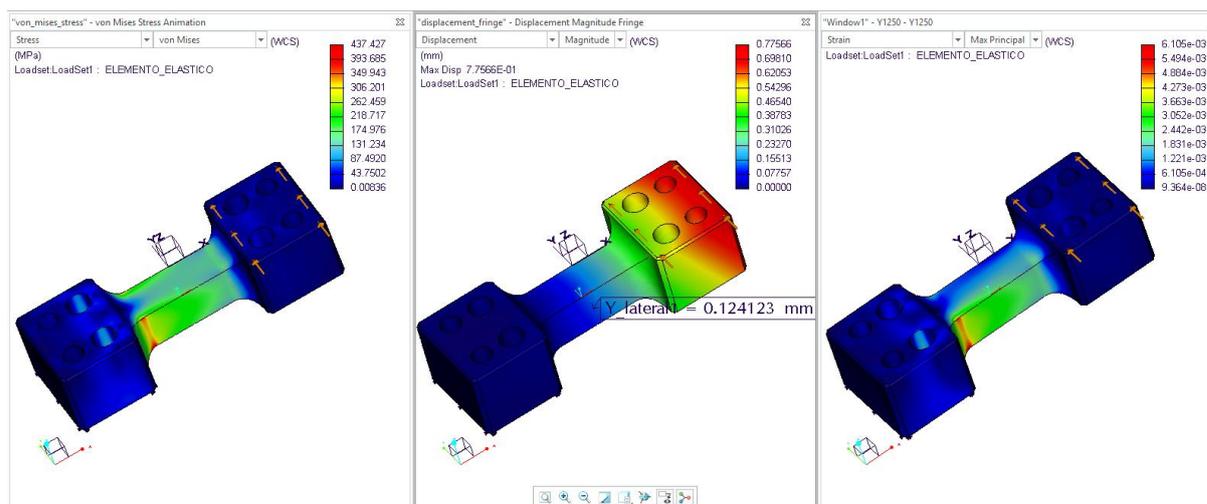
Figura 37 – Resultados das simulações de tensão, deslocamento e deformação específica para 1,25 kN no eixo “Z” negativo, respectivamente



Fonte: elaborada pelo autor.

Como pode-se observar na Figura 37, o carregamento de 1,25 kN no eixo “Z” negativo ocasionou, no ponto central de colagem do extensômetro, um deslocamento de 126 μm na tração e de 118 μm na compressão, em relação a região de apoio. Para essa carga, as tensões chegaram a 408,594 MPa (conforme a Figura 37), quando analisadas pelo critério de Von Mises, o que representa 81,23% do limite de elasticidade do material de 503 MPa (ASM MATWEB, 2017a). Uma análise semelhante foi feita para o eixo “Y”, o qual apresentou comportamento simétrico para tração e compressão. Os resultados das simulações para 1,25 kN no eixo “Y” positivo podem ser constatados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Figura 38 – Resultados das simulações de tensão, deslocamento e deformação específica para 1,25 kN no eixo “Y” positivo, respectivamente



Fonte: elaborada pelo autor.

Como pode-se observar na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, o carregamento de 1,25 kN no eixo “Y” positivo ocasionou, no ponto central de colagem do extensômetro, um deslocamento de 124 μm na tração e na compressão, em relação a região de apoio. Para essa carga, as tensões atingiram 437 MPa (conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), quando analisadas pelo critério de Von Mises, o que representa 86,96% do limite de elasticidade do material de 503 MPa (ASM MATWEB, 2017a).

Tanto para o eixo “Z” como para o “Y”, as tensões e as deformações específicas apresentaram comportamento semelhante, com pontos de concentração nos arredondamentos. Essas foram aproximadamente constantes nas superfícies centrais de colagem dos transdutores (em cor verde).

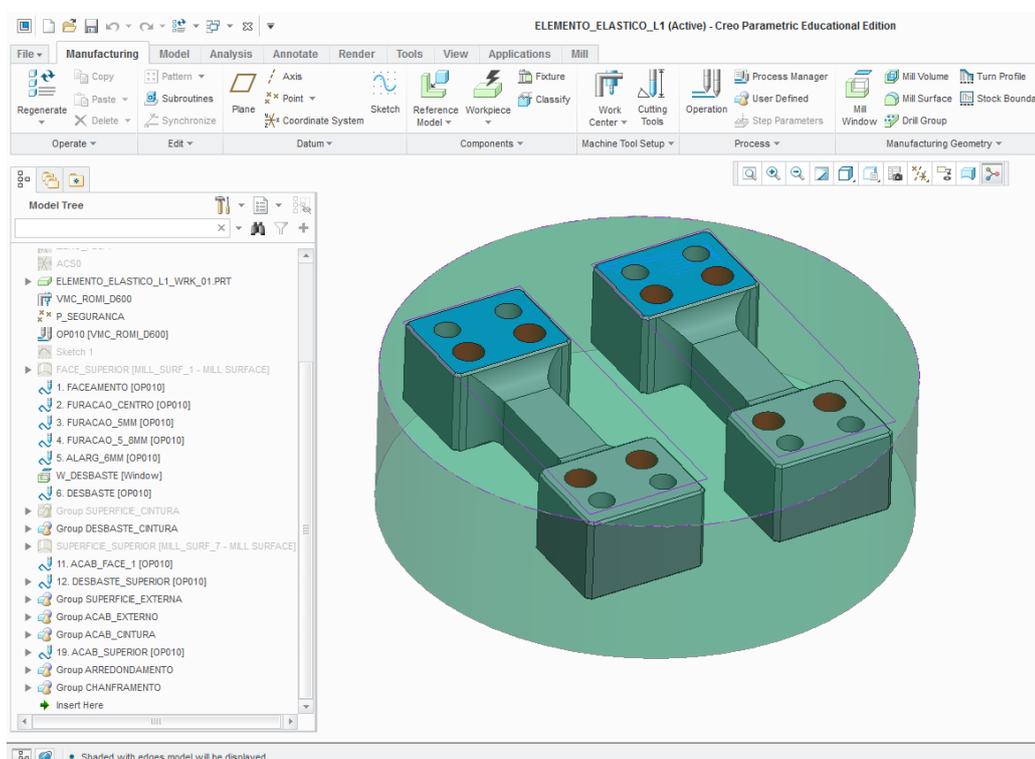
4.3. Manufatura e análise dimensional

Os primeiros componentes construídos foram os elementos elásticos, uma vez que essas demandaram mais tempo para sua finalização devido à instrumentação necessária. Para sua manufatura partiu-se de uma barra de liga de Alumínio 7075-T6 com diâmetro de 102 mm. Dois discos de 30 mm de espessura foram cortados para o material base de usinagem. De cada disco foi feito um par de elementos, sendo esse par responsável por um eixo de medição. O fato de dois elementos elásticos serem manufaturados a partir da mesma seção de barra contribuiu para a homogeneidade e para minimização de fontes de variabilidade dos

resultados de deformação. O planejamento do processo e a distribuição par de elementos na barra cilíndrica podem ser visualizados nas Figura 39 e Figura 40.

Primeiramente foi realizada a operação de faceamento, regularizando a superfície superior. Em seguida foram feitas as 16 furações, iniciando com os furos de centros e posteriormente os de $\varnothing 5$ mm. Os 8 furos dos pinos foram alargados para $\varnothing 6$ mm. Para isto necessitou-se de um furo prévio (com uma broca) de $\varnothing 5,8$ mm e um alargador (da classe H7) de $\varnothing 6$ mm. Por outro lado, os demais furos roscados foram finalizados manualmente com um macho rígido, após terem sido concluídas todas as operações no centro de usinagem. Em sequência foi realizado o desbaste externo de cada componente, com posterior acabamento da superfície superior rebaixada (ver a Figura 39). Na sequência, foi feito o desbaste lateral e o superior da seção central, seguidos de seus respectivos acabamentos, bem como os arredondamentos superiores, entre as superfícies das extremidades e a seção central, e os chanframentos. Essa sequência de operações pode ser visualizada na Figura 37, obtida no módulo de manufatura do software CAM.

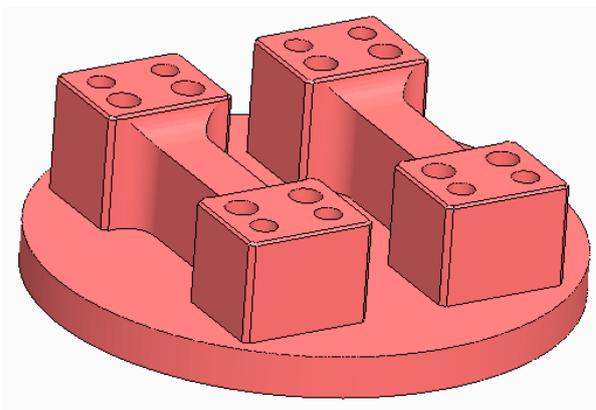
Figura 39– Operações de manufatura no primeiro lado dos elementos elásticos



Fonte: elaborado pelo autor.

Como resultado dessas operações têm-se a primeira parte dos elementos elásticos usinada, apresentada na Figura 40 (a) e (b).

Figura 40 – Elementos elásticos usinados em simulação CAM (a) e no centro de usinagem (b)



(a)

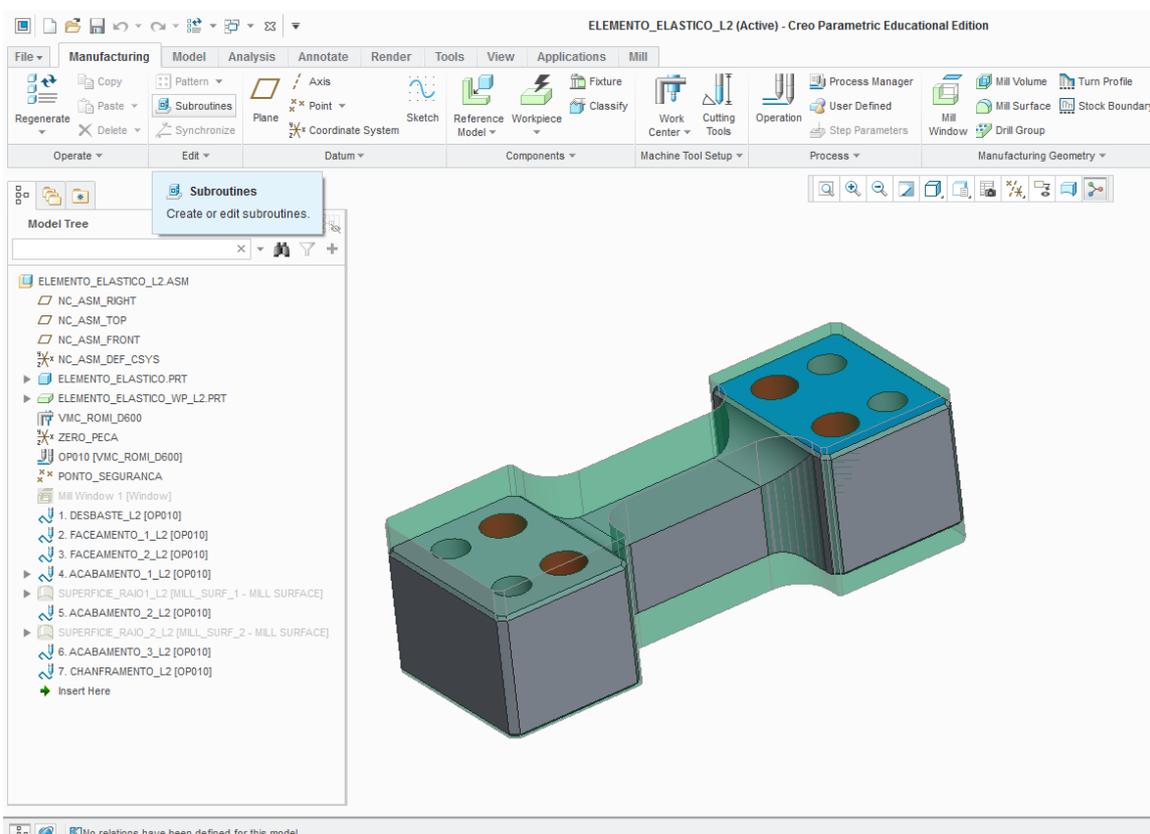


(b)

Fonte: elaborado pelo autor.

Uma vez concluído o primeiro lado, cada par foi preso no mordente plano com a superfície circular para cima e os componentes foram separados por uma operação de faceamento. Com cada componente deu-se início as operações no segundo lado (de acordo com a Figura 41) prendendo-a no mordente, como se pode visualizar nas Figura 41 e Figura 42.

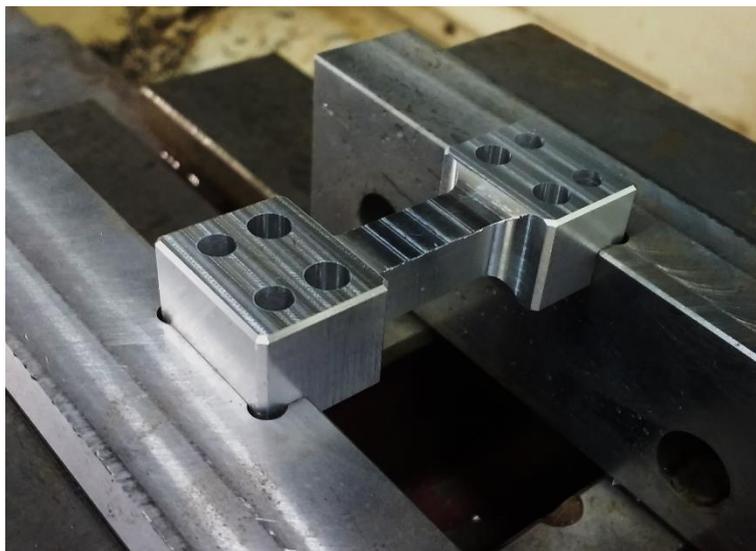
Figura 41 – Operações de manufatura no segundo lado do elemento elástico



Fonte: elaborado pelo autor.

Primeiramente foi realizada a operação de desbaste em todo o componente, de modo a remover o excesso de material e aproximar as dimensões das desejadas. Em seguida foram realizados os faceamentos em cada um dos planos nas extremidades do componente, deixando-os nas dimensões finais. Posteriormente, foi feito a acabamento da superfície superior da seção central do elemento. Na sequência, foram realizados os acabamentos nos arredondamentos superiores que fazem a transição entre a seção central e as extremidades. Por fim, foram realizados os chanframentos. Essa sequência de operações pode ser visualizada na Figura 41. Como resultado dessas operações têm-se a finalização das operações no centro de usinagem para elementos elásticos, apresentada na Figura 42.

Figura 42 – Elemento elástico usinado em ambos os lados



Fonte: elaborado pelo autor.

Um ponto importante a destacar são os sistemas de fixação dos componentes ao longo do processo de usinagem do elemento elástico. Foram utilizados três sistemas de fixação no centro de usinagem, utilizando a mesma morsa e diferindo nos tipos de mordentes. O primeiro deles pode ser visualizado na Figura 40 (b), no qual o componente é fixado com um par de mordentes com rebaiços circulares para acomodar os discos de material base. No segundo sistema de fixação as faces dos mordentes eram planas e sem rebaiços para acomodar as superfícies planas do par de elementos elásticos. Já o terceiro par de mordentes, como se pode visualizar na Figura 42, possui rebaiços para acomodar um elemento elástico, de modo que as superfícies superior e inferior do elemento ficassem paralelas à base do centro de usinagem. Os pares mordentes foram previamente usinados, fixados à morsa com o objetivo de minimizar os erros de forma e posição do sistema de fixação.

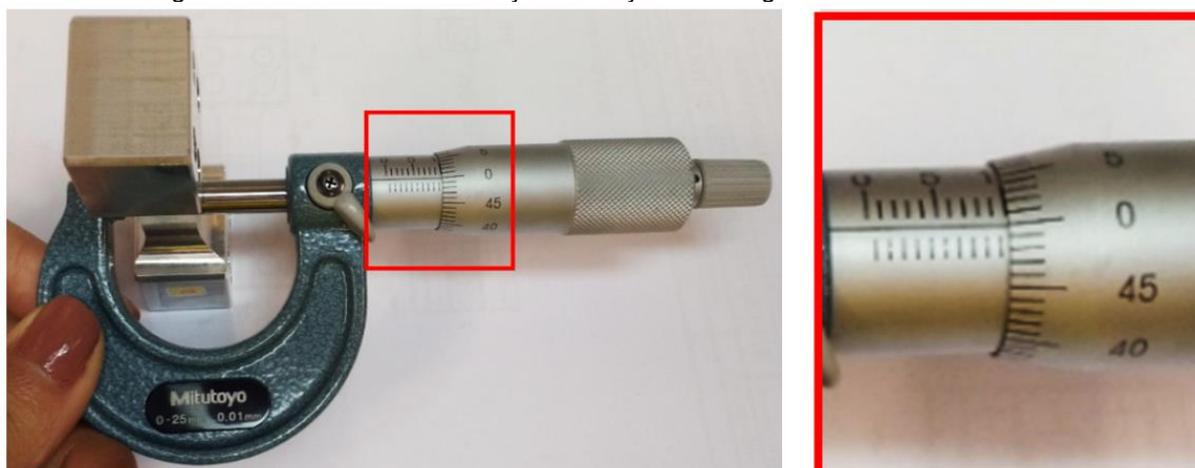
Em todos os componentes foi realizada uma análise dimensional e pôde-se concluir que todas as tolerâncias impostas em projeto foram atendidas na usinagem. Para os elementos elásticos, vale destacar a aferição de quatro dimensões críticas sinalizadas na Figura 33 do item 4.1. O resultado dessas medições é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Medições críticas dos elementos elásticos

Elemento elástico	Comprimentos			
	1	2	3	4
1	17,51	17,55	10,01	10,01
	17,52	17,53	10,005	10,01
	17,50	17,51	10,01	10,015
	17,51	17,53	10,005	10,01
	17,50	17,52	10,005	10,01
2	17,48	17,49	10,005	10,01
	17,48	17,50	10,005	10,01
	17,50	17,48	10,00	10,01
	17,475	17,48	10,01	10,00
	17,48	17,49	10,00	10,005
3	17,52	17,54	10,02	10,00
	17,51	17,52	10,005	10,00
	17,515	17,535	10,01	10,005
	17,51	17,57	10,01	10,005
	17,51	17,54	10,015	10,00
4	17,49	17,52	10,00	10,00
	17,49	17,52	10,00	10,005
	17,48	17,53	10,01	10,00
	17,505	17,51	10,005	9,99
	17,495	17,495	10,015	10,00

Como se pôde observar na Tabela 4, as dimensões atenderam aos requisitos estipulados em projeto, estando as dimensões 1 e 2 entre 17,48 mm e 17,52 mm e as dimensões 3 e 4 entre 9,99 mm e 10,02 mm. A Figura 43 mostra o resultado da medição da seção de colagem do extensômetro.

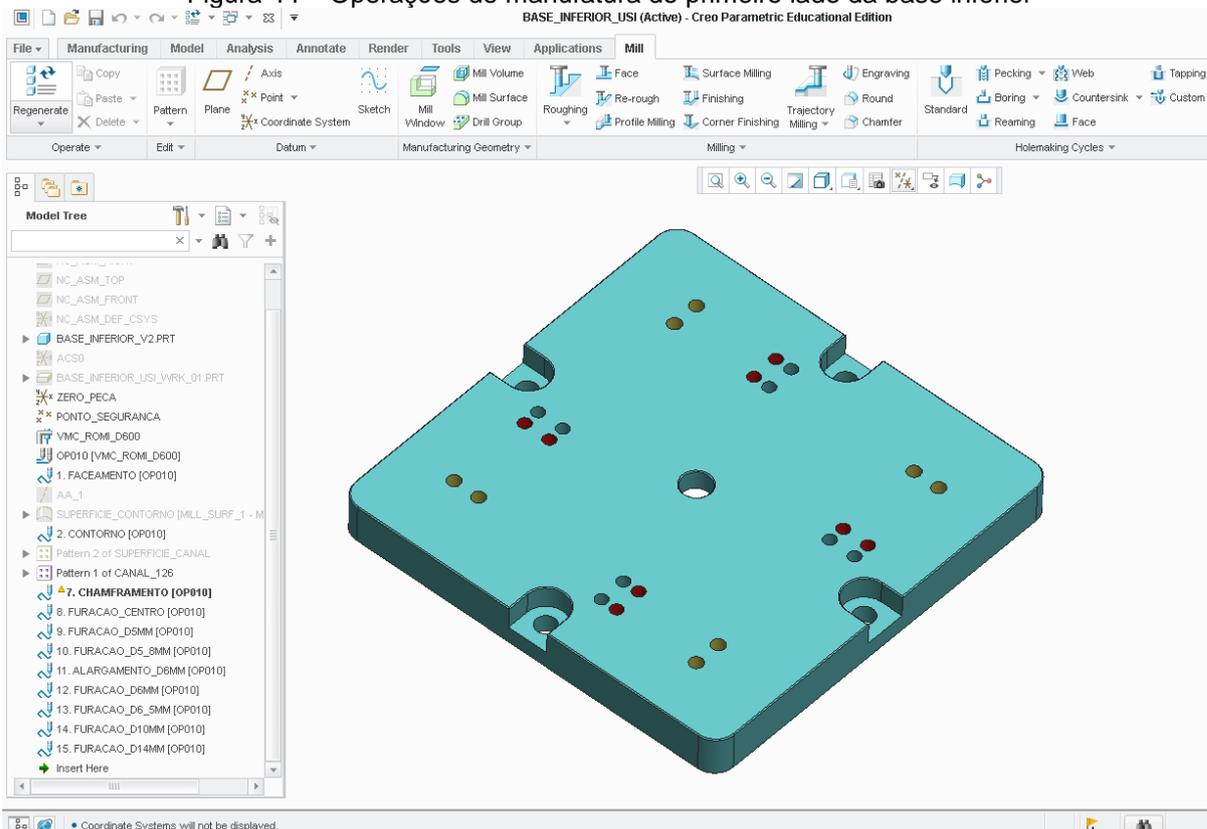
Figura 43– Resultado da medição da seção de colagem do elemento elástico



Fonte: elaborado pelo autor.

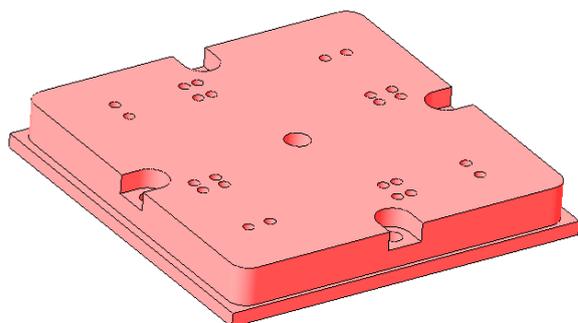
Os componentes construídos em seguida foram as bases (inferior e superior). Para a manufatura da base inferior partiu-se de uma placa de aço 4340 com as seguintes dimensões: 205 x 210 x 30 mm. A usinagem foi dividida em duas etapas: operações do primeiro lado (de acordo com a Figura 44) e do segundo lado (conforme a Figura 46). O primeiro lado iniciou-se com o faceamento, usinagem do contorno, remoção de material dos canais laterais e chanframento do contorno. Em seguida foram feitas as 24 furações - iniciando com os furos de centros e posteriormente os de \varnothing 5 mm. Os 8 furos (da classe H7) para pinos, destacados em vermelho na Figura 43, foram alargados até \varnothing 6 mm, inicialmente com uma broca de \varnothing 5,8 mm e depois com um alargador de \varnothing 6 mm. Os demais tiveram seus diâmetros aumentados com uma broca de \varnothing 6 mm. Nos furos em amarelo na Figura 43, passou-se o diâmetro para \varnothing 6,5 mm. Finalizando a primeira etapa têm-se as furações de \varnothing 10 mm, nos quatro nos canais laterais e no centro do componente, e a de \varnothing 14 mm, apenas no centro. Como resultado dessas operações (conforme a Figura 44) têm-se a primeira parte da base inferior usinada, sendo o modelo CAM apresentada na Figura 45 (a) e o componente usinado na Figura 44 (b).

Figura 44 – Operações de manufatura do primeiro lado da base inferior



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 45 – Base inferior (primeiro lado) usinado em simulação CAM (a) e no centro de usinagem (b)



(a)

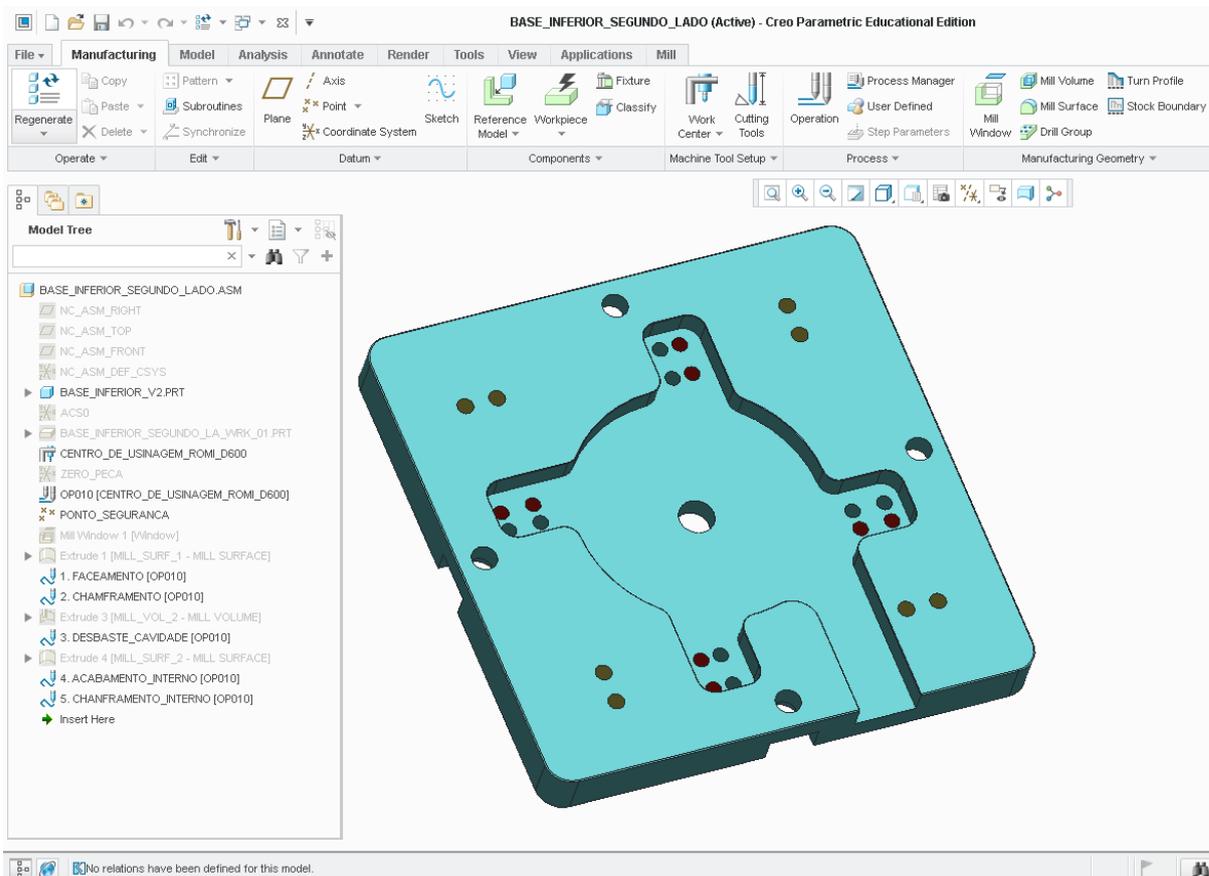


(b)

Fonte: elaborado pelo autor.

Uma vez concluído o primeiro lado, o componente foi retirado da morsa, reorientado com a superfície recém usinada para baixo e preso novamente para que se pudesse dar início a segunda etapa da usinagem (conforme a Figura 46).

Figura 46 – Operações de manufatura do segundo lado da base inferior



Fonte: elaborado pelo autor.

Como pode ser visto na árvore de operações apresentada na Figura 46, primeiramente foi realizada a operação de faceamento, seguido do chanframento do contorno. Em sequência foi realizada a usinagem da cavidade para a passagem dos cabos, com três operações: desbaste, acabamento e chanframento. Como resultado dessas operações (ver a Figura 46) têm-se a base inferior finalizada, sendo apresentada na Figura 47.

Figura 47 – Base inferior (segundo lado) usinada no centro de usinagem

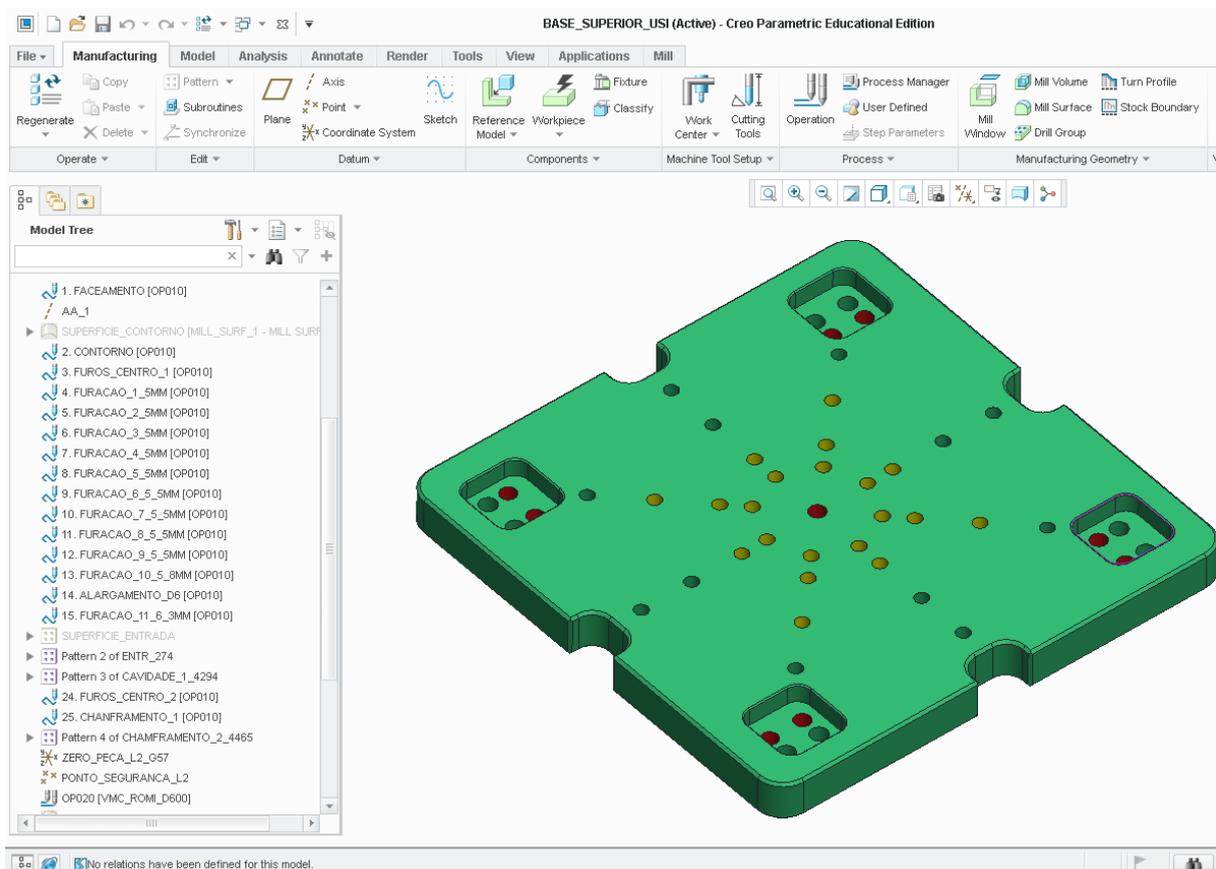


Fonte: elaborado pelo autor.

Já para a base superior, a usinagem teve como material base uma placa de aço 4340 com as seguintes dimensões: 185 x 185 x 25 mm. Assim como na base anterior, a manufatura foi dividida em duas etapas: operações do primeiro lado e do segundo lado. A primeira etapa iniciou-se com o faceamento, e a usinagem do contorno, Em seguida foram feitas as furações, iniciando com os furos de centros e posteriormente os de \varnothing 5 mm. Assim como na base inferior, os 9 furos (H7), em vermelho na Figura 48, foram alargados até \varnothing 6 mm, inicialmente com uma broca de \varnothing 5,8 mm e depois com um alargador de \varnothing 6 mm, enquanto os 8 furos restantes para fixação dos elementos elásticos foram aumentados para \varnothing 6,3 mm. Os demais furos da face superior foram roscados foram manualmente com um macho rígido M6 x 1 mm, após terem sido finalizadas todas as operações no centro de usinagem.

Para concluir a primeira etapa foi realizada a usinagem das 4 entradas laterais, s 4 cavidades em cada uma das extremidades e o chanframento destes contornos. A figura 47 mostra o planejamento das operações no módulo de CAM.

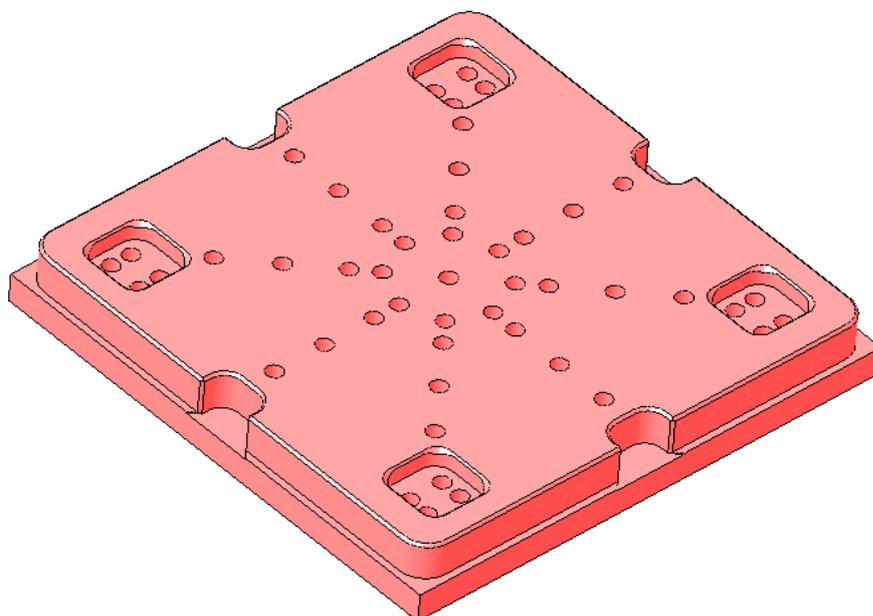
Figura 48 – Operações de manufatura do primeiro lado da base superior



Fonte: elaborado pelo autor.

Como resultado dessas operações (ver a Figura 48) têm-se a primeira parte da base superior usinada, sendo apresentada na Figura 49.

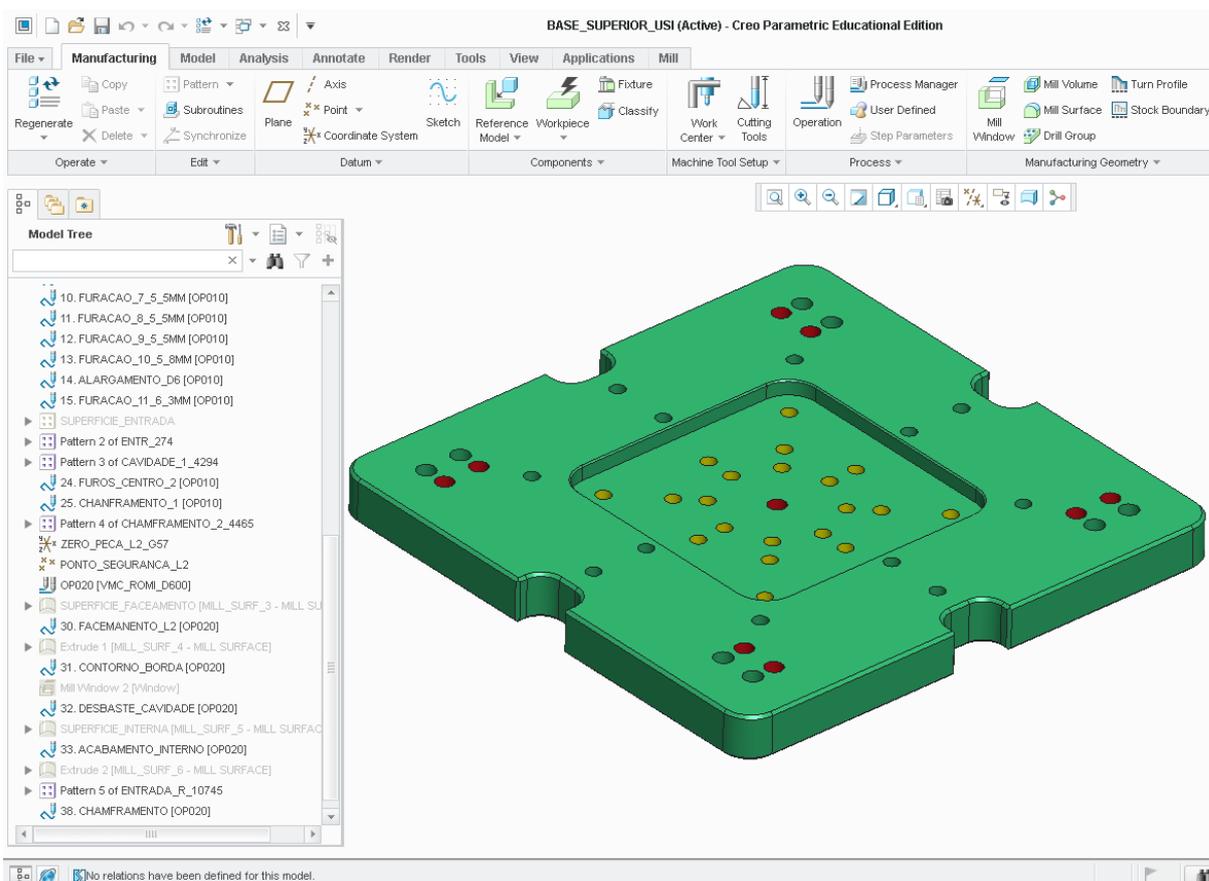
Figura 49 - Base superior (primeiro lado) usinada simulação CAM



Fonte: elaborado pelo autor.

Uma vez concluído o primeiro lado, o componente foi retirado da morsa, reorientado com a superfície recém usinada para baixo e preso novamente para que se pudesse dar início a segunda etapa da usinagem (Figura 50).

Figura 50 – Operações de manufatura do segundo lado da base superior



Fonte: elaborado pelo autor.

Observando as operações apresentadas na Figura 50, para o segundo lado foi realizado o faceamento, seguido do acabamento do contorno. Em sequência, a cavidade central foi usinada com as operações de desbaste e acabamento interno. Por fim, foi feito o acabamento das entradas laterais e o chanframento nos contornos. Como resultado têm-se a finalização das operações no centro de usinagem para a base superior (Figura 51 (a) e (b)).

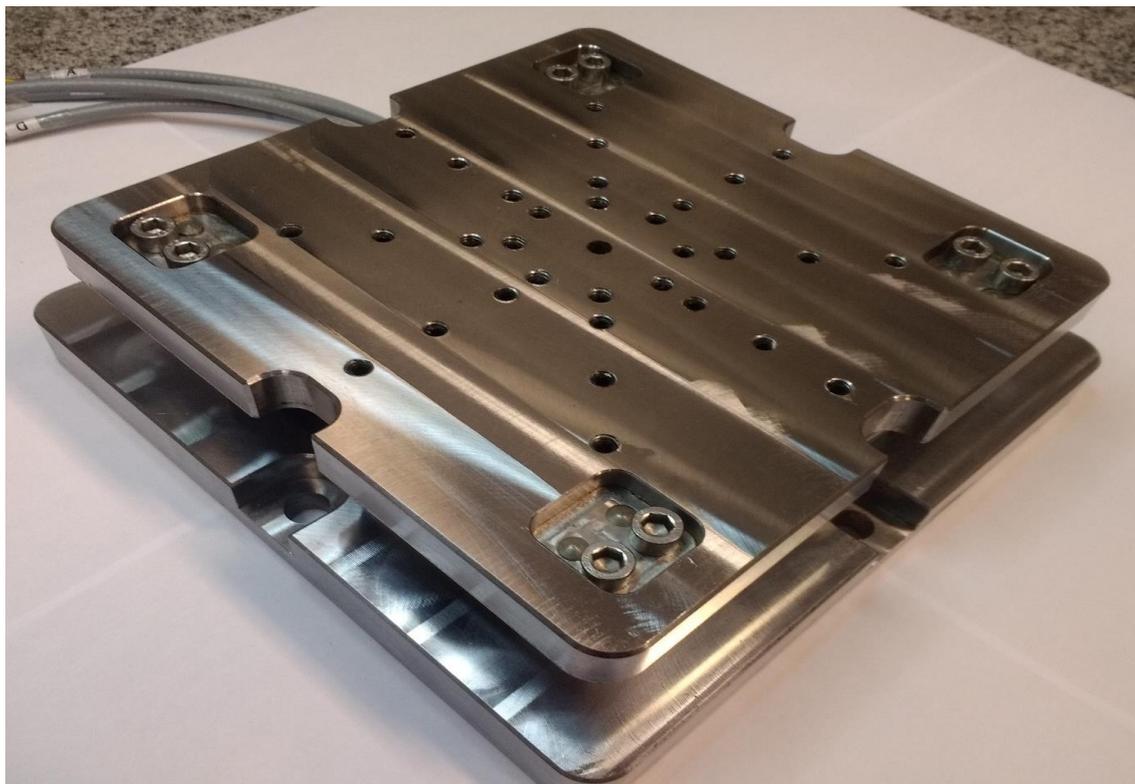
Figura 51 – Base superior (segundo lado) usinada no centro de usinagem



Fonte: elaborado pelo autor.

Uma vez concluída a usinagem das bases, foi realizada a montagem do dinamômetro, como pode ser visto na Figura 52.

Figura 52 – Montagem do dinamômetro



Fonte: elaborado pelo autor.

Finalizada a montagem, a próxima etapa compreende a instrumentação do dispositivo, abordando os resultados da colagem e da soldagem dos extensômetros, bem como do sistema de aquisição e o processamento de dados.

4.4. Instrumentação

Os resultados de instrumentação englobam o que foi obtido ao se realizar a colagem e a soldagem dos extensômetros, manuseio do sistema de aquisição e processamento de dados. A relevância dos procedimentos realizados foi dividida em dois itens (4.4.1 e 4.4.2) com o objetivo de facilitar a compreensão.

4.4.1. Colagem e soldagem dos extensômetros

Determinados procedimentos na colagem dos extensômetros merecem destaque, vista as suas relevâncias. Primeiramente, com a finalidade de remover resquícios de oxidação, de proporcionar orientação de estrias e de permitir uma aderência adequada entre a cola Z70, o extensômetros e o material do componente, utilizaram-se as lixas 150 e 240, respectivamente. Essa combinação foi capaz de imprimir na superfície de colagem uma rugosidade de 0,64 Ra, como indica a Figura

53. Esse valor de rugosidade é adequado para a colagem dos extensômetros, visto que, de acordo com Micro-Measurement (2011), a superfície final na qual os transdutores serão aderidos deve apresentar rugosidade entre 0,4 e 1,6 $\mu\text{m Ra}$.

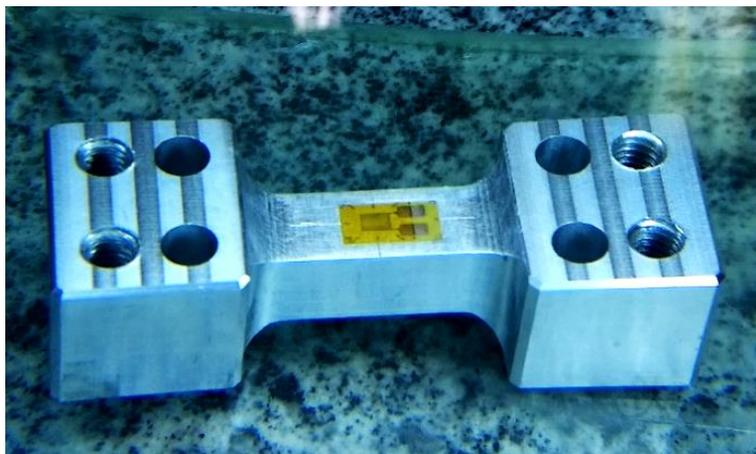
Figura 53 – Medição de rugosidades após lixamento na superfície de colagem



Fonte: elaborado pelo autor.

Na aplicação da cola teve-se o cuidado em colocar uma quantidade suficiente para que, quando espalhada, estivesse presente em toda superfície inferior do extensômetros e suas bordas, permitindo que todo o transdutor e, principalmente, sua grade estivessem aderidos. Após a aplicação da cola, o bico dosador deve ser limpo e a cola fechada, ainda durante o tempo em que o extensômetro era pressionado para auxiliar na adesão. Esse procedimento fez-se necessário uma vez que a cola possui componentes voláteis que evaporam quando aberta, modificando sua composição e seu tempo de cura. O mesmo raciocínio é aplicado para revestimento superficial PU140. Para a secagem, aplicou-se pressão com o polegar sobre o transdutor, sem interrupções, até que a cola estava completamente seca, podendo ser visualizada pelas laterais. A fita kapton, aplicada à soldagem de componentes eletrônicos é resistente à temperaturas de até 250°C, promoveu a proteção do transdutor após a colagem e durante a soldagem. O resultado da colagem pode ser visualizado na Figura 54.

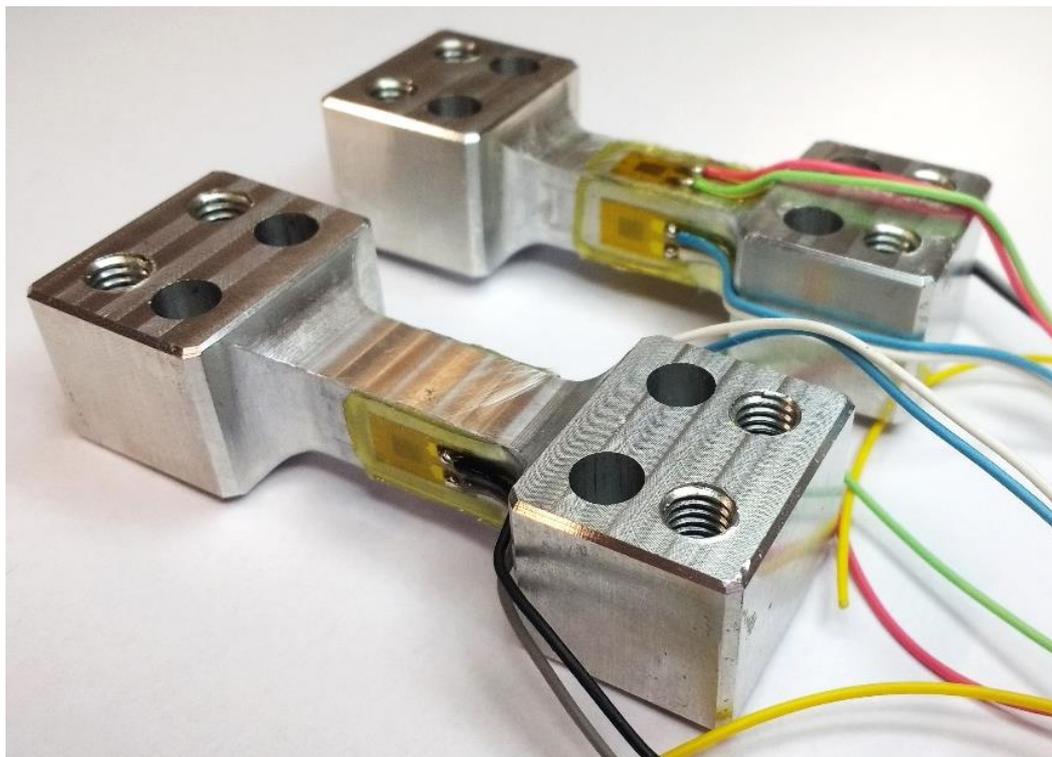
Figura 54 – Extensômetros colado sobre elemento elástico



Fonte: elaborada pelo autor

O processo de soldagem foi dividido em seis etapas: a raspagem da camada de proteção dos terminais do extensômetros; limpeza da superfície de soldagem; controle da temperatura da estação de solda; estanhamento dos fios e a soldagem nos terminais do extensômetros; limpeza da região soldada; aplicação do revestimento superficial. Entre essas etapas, vale frisar que a raspagem da camada de proteção dos terminais do extensômetros proporcionou a aderência adequada entre terminal e material de adição. Em relação à temperatura, ajustou-se a estação de soldagem em 240°C, pois, de acordo com Hoffman (2014), é necessário que a temperatura esteja entre 230 e 270 °C para não danificar o extensômetro. Não menos importante, é necessário manter a ponteira do ferro de solda limpa durante o processo, de modo a remover material oxidado e impedir que esse seja depositado sobre os terminais. O resultado da soldagem e da proteção pode ser visualizado na Figura 55.

Figura 55 – Extensômetros colado, soldado e protegido sobre elemento elástico



Fonte: elaborada pelo autor

A eficácia da soldagem foi verificada pela medição da resistência dos extensômetros nos cabos soldados com o Multímetro Digital. Os valores obtidos variaram de 351,0 a 352,9 Ω . Este resultado é a evidência da consistência dos processos de colagem e de soldagem.

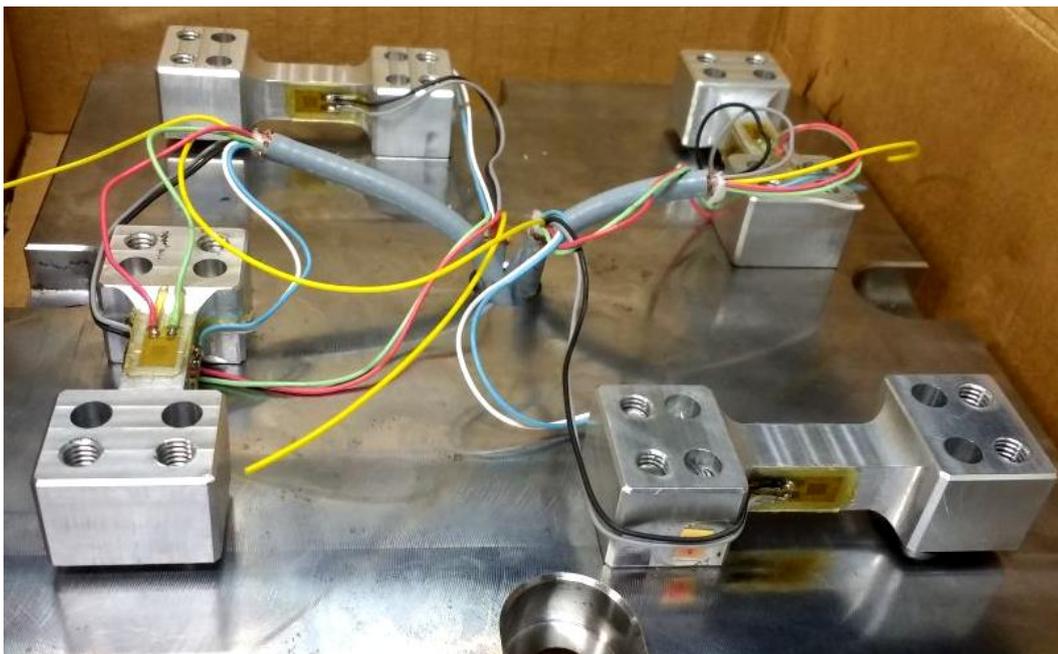
Durante os procedimentos de colagem e de soldagem, a limpeza dos materiais e equipamentos utilizados foi essencial para evitar contaminação dos transdutores e dos processos. Em ambos os ensaios, a fita poliamida protegeu as regiões de grade e terminais do extensômetros, de modo a não haver resquícios de cola e solda em regiões inadequadas do transdutor.

A colagem e a soldagem dos extensômetros são as atividades-chave da instrumentação e elas têm relação direta com o correto funcionamento do sistema. Não obstante, a conexão entre esses transdutores e o sistema de aquisição e processamento de dados é igualmente relevante para o sucesso do dispositivo, sendo esse tópico detalhado no item seguinte.

4.4.2. Sistema de aquisição e processamento de dados

A aquisição dos dados se inicia com a conexão dos extensômetros aos equipamentos. Os fios dos transdutores, como pode-se observar na Figura 56, fazem parte de cabos que deixam o dinamômetro (pela parte inferior) e que foram conectados aos equipamentos.

Figura 56 – Distribuição dos cabos no dinamômetro.



Fonte: produzida pelo autor.

A conexão desses fios, mostrados na Figura 56, segue as indicações apresentadas na Tabela 5. Cada fio foi especificado de acordo com o eixo de medição (X, Y e Z), com o elemento elástico (de 1 a 4), com o cabo (de A a D) e com sua respectiva cor. As cores verde e vermelho foram utilizadas para medições do eixo Z, enquanto que as demais cores foram distribuídas para os eixos X e Y. A especificação e legenda dos fios é fundamental para que, uma vez o sistema montado, se possa manipulá-los e realizar as ligações de forma adequada.

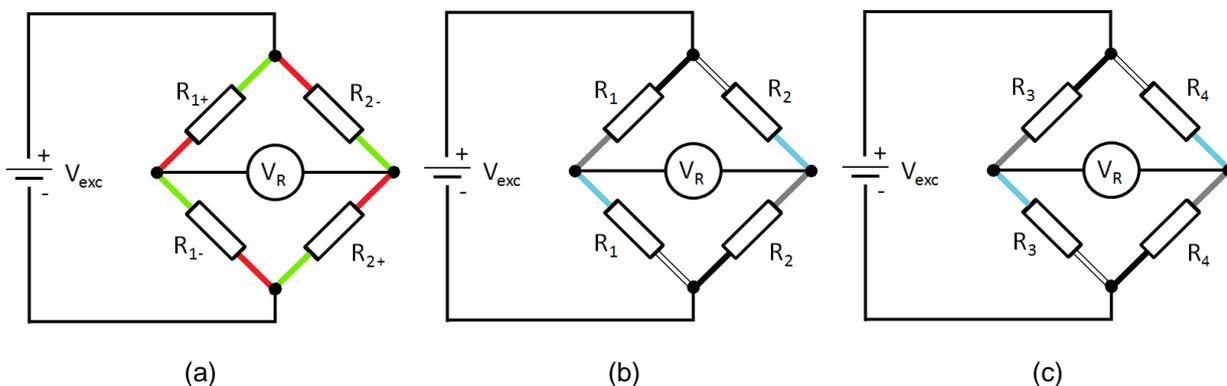
Tabela 5– Mapeamento das fiações dos extensômetros

Mapeamento - fiação dos extensômetros				
Eixo	Elemento elástico	Cabo	Fio	Legenda
X	1	A	Branco	X / 2C Branco
	1	A	Preto	X / 1A Preto
	1	A	Azul	X / 1A Azul
	1	A	Cinza	X / 1A Cinza
	2	C	Branco	X / 1A Branco
	2	C	Preto	X / 2C Preto
	2	C	Azul	X / 2C Azul
	2	C	Cinza	X / 2C Cinza
Y	3	B	Branco	Y / 3B Branco
	3	B	Preto	Y / 3B Preto
	3	B	Azul	Y / 3B Azul
	3	B	Cinza	Y / 3B Cinza
	4	D	Branco	Y / 4D Branco
	4	D	Preto	Y / 4D Preto
	4	D	Azul	Y / 4D Azul
	4	D	Cinza	Y / 4D Cinza
Z	1	A	Vermelho	Z+ / 1A Vermelho
	1	A	Verde	Z+ / 1A Verde
	1	D	Vermelho	Z- / 1D Vermelho
	1	D	Verde	Z- / 1D Verde
	2	B	Vermelho	Z+ / 2C Vermelho
	2	B	Verde	Z+ / 2C Verde
	2	C	Vermelho	Z- / 2B Vermelho
	2	C	Verde	Z- / 2B Verde
Observações:				
*Os sinais positivos e negativos para o eixo Z indicam a posição do extensômetro no elemento elástico, respectivamente, na parte superior ou inferior.				
*Os fios amarelos não representam conexão elétrica				

Fonte: produzida pelo autor.

De acordo com a Figura 56 e a Tabela 5, os cabos dos extensômetros são conectados e organizados por eixos de medição, de modo que os transdutores sigam a configuração de ponte de Wheatstone completa. O esquema de ligações de cada ponte é mostrado na Figura 57, indicando as cores e os fios conectados.

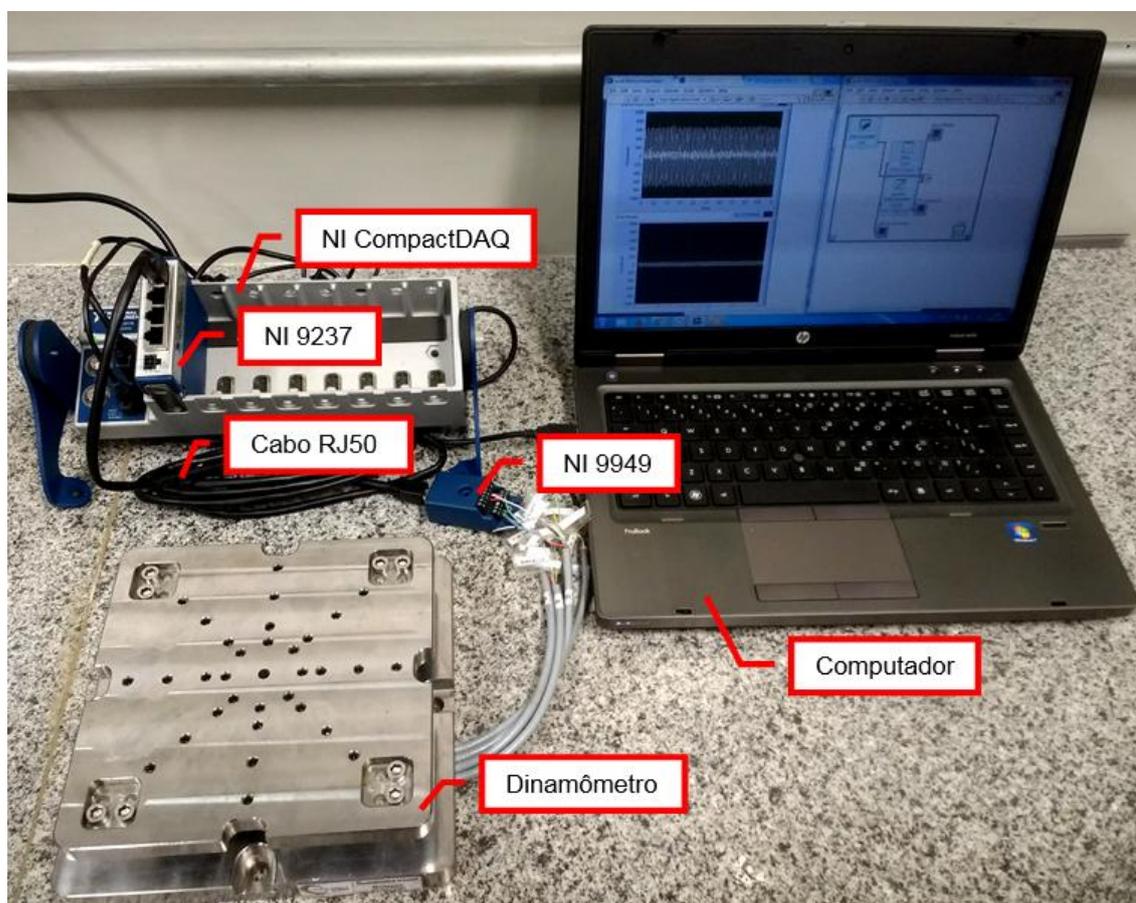
Figura 57 – Ligação dos extensômetros em ponte de Wheatstone nos eixos Z (a), X (b) e Y (c).



Fonte: produzida pelo autor.

Essa ligação, apresentada na Figura 57, é utilizada como base para realizar a conexão dos fios no indicador digital Dinateste PRC e no conector NI 9949, ligado ao módulo NI 9237, por meio de um cabo RJ50. O módulo NI 9237 é acoplado ao chassi NI CompactDAQ conectado ao computador por porta USB (ver a Figura 58).

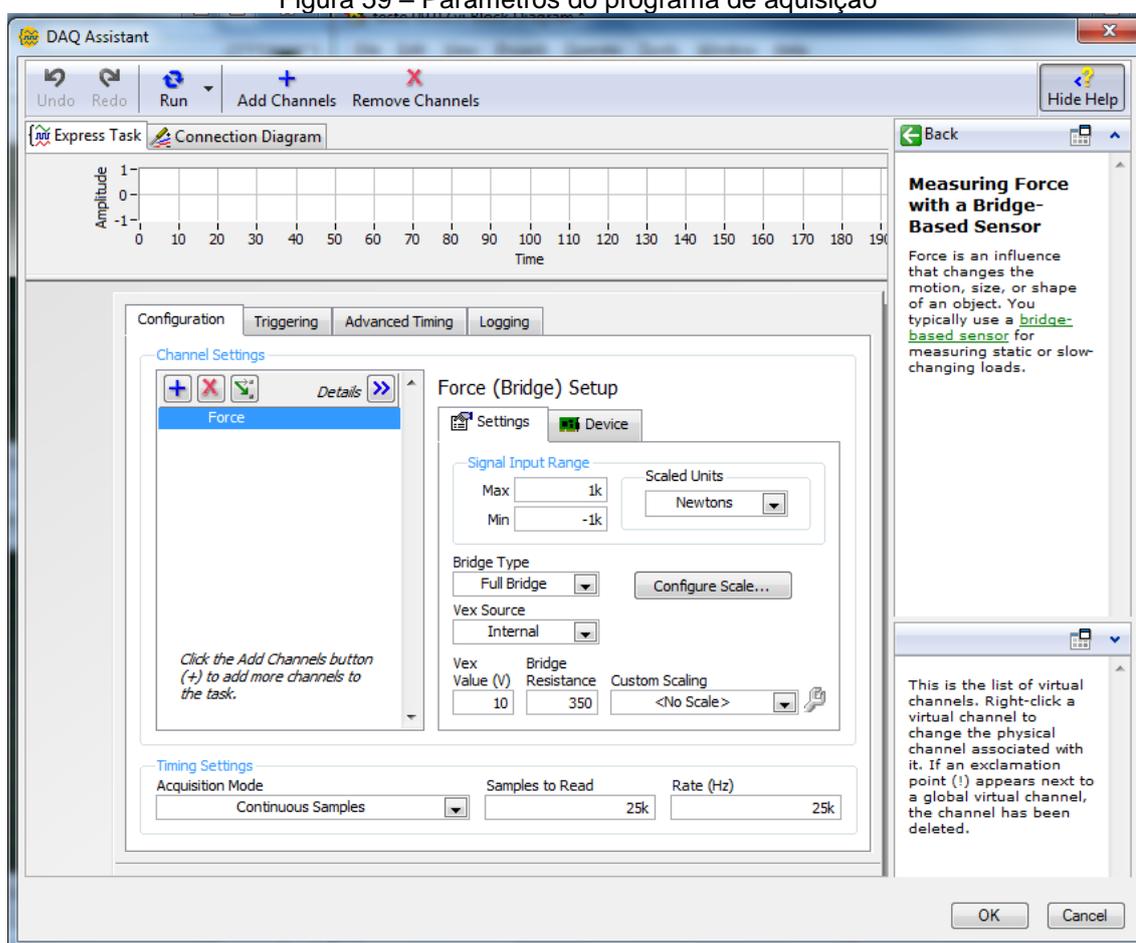
Figura 58 – Sequência de equipamentos para aquisição e processamento de dados para um eixo



Fonte: elaborada pelo autor.

Uma vez conectado ao computador, o software LabView foi utilizado para elaboração de programas de aquisição e processamento de dados. A Figura 59 mostra alguns parâmetros definidos no programa de aquisição, nas propriedades do bloco DAQ Assistant), como o tipo de ponte de Wheatstone, origem e valor da tensão de alimentação, valores máximos e mínimos de medição, unidades e escalas utilizadas e parâmetros de amostragem.

Figura 59 – Parâmetros do programa de aquisição



Fonte: elaborada pelo autor.

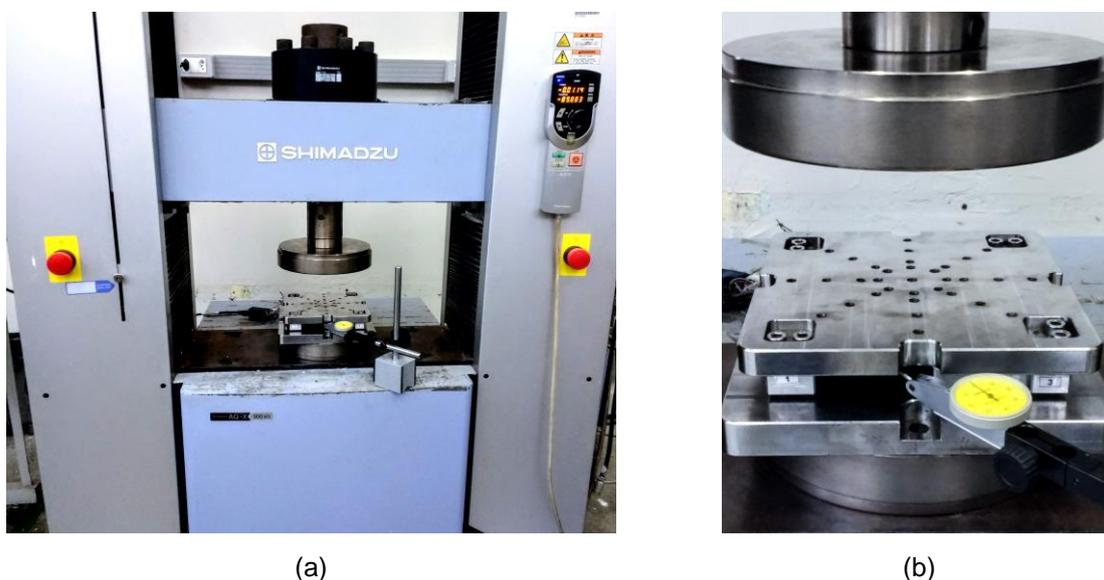
Foram realizados testes de resposta do sistema sem calibração para os três eixos de medição. Os circuitos conectados em ponte de Wheatstone completa foram alimentados e as diferenças de potencial foram medidas, tanto com as plataformas NI como também com equipamentos independentes, como o indicador digital Dinateste PRC, fontes e multímetros. Para todos os casos, ao se aplicar

carregamento foi provocada uma diferença de potencial no circuito. Assim, os testes de resposta do sinal foram satisfatórios.

4.5. Calibração estática

Esta etapa consistiu em aplicar carregamentos de compressão no eixo Z, variando a carga a cada 1 kN até 8 kN em duas séries de aquecimento (carregamento e descarregamento) e quatro séries de calibração (duas de carregamento e duas de descarregamento), o que abrange a faixa de utilização de 100 N a 5 kN. A Figura 60 mostra a realização dos ensaios.

Figura 60 – Ensaio de calibração do eixo Z



Fonte: elaborada pelo autor.

Para a leitura do sinal, a ponte completa de Wheatstone foi excitada pelo próprio indicador digital Dinateste PRC. As variações de tensão causadas pela aplicação desse carregamento são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados de tensão à aplicação de carga.

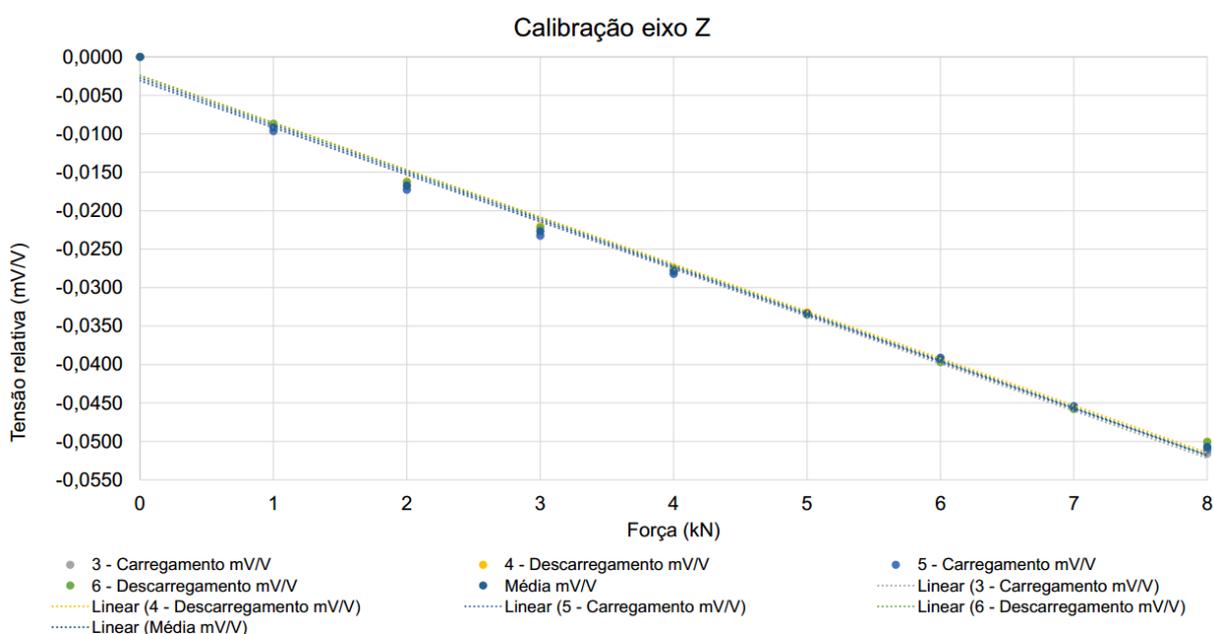
Força	3 - Carregamento	4 - Descarregamento	5 - Carregamento	6 - Descarregamento	Média
kN	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	-0,0097	-0,0087	-0,0096	-0,0087	-0,0092
2	-0,0172	-0,0162	-0,0173	-0,0163	-0,0168
3	-0,0233	-0,0220	-0,0232	-0,0222	-0,0227
4	-0,0282	-0,0274	-0,0282	-0,0276	-0,0279
5	-0,0335	-0,0332	-0,0334	-0,0335	-0,0334
6	-0,0392	-0,0394	-0,0391	-0,0397	-0,0394
7	-0,0457	-0,0455	-0,0454	-0,0458	-0,0456
8	-0,0516	-0,0500	-0,0511	-0,0501	-0,0507

Fonte: elaborada pelo autor

É importante frisar que os valores de tensão relativa mostrados na Tabela 5 são as variações, considerando como ponto de referência (0 mV/V) a diferença de potencial apresentada pelo sistema sem carga. Os valores sem o tratamento de ajuste de referência e com as séries de aquecimento podem ser conferidos no Apêndice C.

Partindo dos valores da Tabela 5 foi elaborada uma curva de calibração (conforme a Figura 61) com os pontos, bem como os valores médios e linhas de tendência linear.

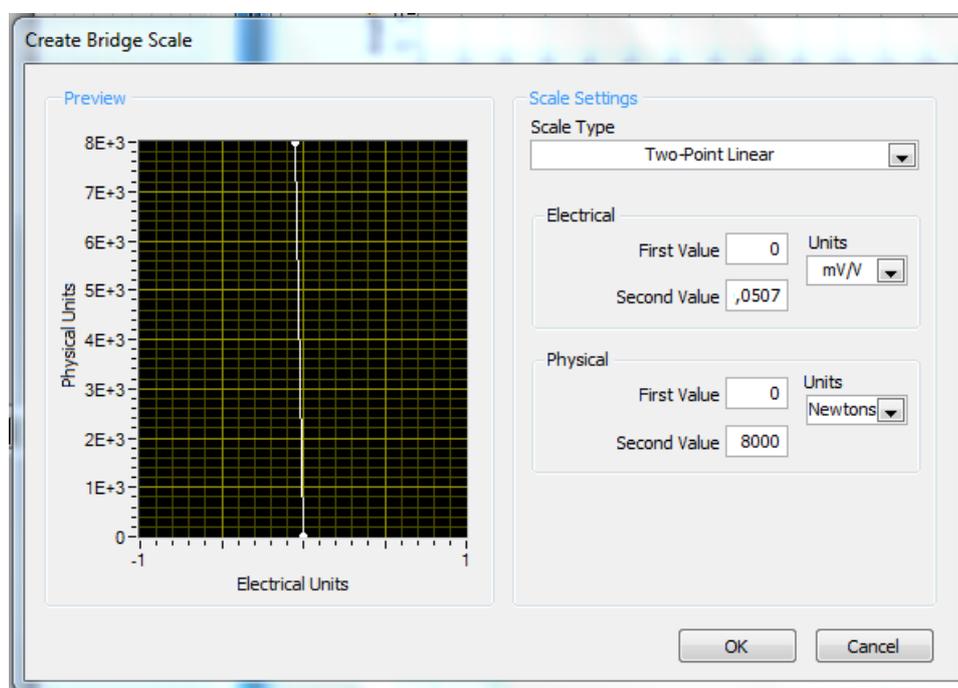
Figura 61 – Resultados de tensão à aplicação de carga



Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando a Figura 61, pode-se observar o comportamento linear dos dados, como era esperado, reforçando que as deformações ocorrem no regime linear elástico. Os dados de calibração podem ser inseridos no sistema NI por uma equação da curva de calibração, por dois pontos, definindo uma reta, ou por uma tabela de pontos. Na Figura 62 é apresentada a interface de configuração da escala, na qual são inseridos os valores dos pontos inicial e final das grandezas elétricas e físicas, respectivamente.

Figura 62 – Ajuste da escala de medição nas configurações de aquisição do módulo NI 9237



Fonte: elaborada pelo autor.

4.6. Testes funcionais

Nessa etapa foi possível analisar as divergências entre os tipos de alimentação e de leitura do sinal. Observou-se que equipamentos como multímetros e fontes externas de alimentação inserem mais ruído e instabilidade no sinal quando comparados aos módulos NI e ao indicador digital Dinateste PRC. Assim, recomenda-se a utilização do indicador digital Dinateste PRC e dos módulos NI, sendo o uso de multímetros e de fontes externas indicado para aplicações em que os ruídos e instabilidades inseridos não representem uma parcela significativa do sinal.

Também foi constatado que para ligações em ponte completa com extensômetros de 350Ω , os módulos NI não permitiram alimentar o circuito com a tensão programada (10 V), sendo a real alimentação de 7,7 V, conferida com um multímetro. Uma das possíveis causas para essa diferença é o não controle da corrente de alimentação do circuito pelo operador. Uma vez que, pela Lei de Ohm, a tensão é dependente da corrente inserida no sistema, a corrente fornecida pelo módulo não seria capaz de manter o circuito alimentado a 10 V. Testes com fonte de alimentação externa mostraram o valor de corrente de 0,03 A como sendo o mais adequado. O indicador digital Dinateste PRC também apresentou variações alimentação (9,85 – 12,7 V) devido às variações da tensão da rede elétrica local (219,7 – 221,5 V).

Além disso, foram realizados testes para a aferição do ruído em cada um dos extensômetros por meio quatro ligações de circuitos diferentes em meia ponte para cada eixo, totalizando 12 circuitos. Todos apresentaram o mesmo comportamento e faixa de ruído.

5. CONCLUSÕES

Um dinamômetro baseado em extensômetros, com base retangular e múltiplos elementos elásticos, para medição de componentes tridimensionais de força (componente de força até 5 kN) foi projetado e construído. Esse objetivo foi alcançado por meio das seguintes atividades:

- O Projeto conceitual do sistema mecânico e as análises de engenharia mostrou que o dinamômetro é adequado para medição de carregamentos tridimensionais (entre 100 N a 5 kN);
- A manufatura dos componentes, inspeção e montagem do dinamômetro atenderam aos requisitos estabelecidos em projeto;
- A colagem e a soldagem dos extensômetros mostraram-se adequadas, podendo a técnica ser expandida para diversas áreas de aplicações;
- Os programas de aquisição e de processamento de dados, juntamente com os equipamentos de aquisição, permitiram a coleta e análise dos dados de força;
- Calibração estática do sistema para o eixo Z possibilitou a obtenção da correlação entre o carregamento de compressão aplicado e a saída do sinal;
- Os testes de medição de força mostraram que, ao se aplicar um carregamento conhecido, o mesmo era apresentado pelo sistema de aquisição.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Confeccionar proteção metálica para as laterais, impedindo que materiais indesejados entrem no interior do sistema;
- Desenvolvimento de sistema de polias para permitir a aplicação de carga e calibração dos eixos X e Y;
- Realizar simulações do conjunto montado, considerando os diferentes materiais e fixações;
- Desenvolver circuito impresso de ponte de Wheatstone, de modo a otimizar o espaço necessário e não depender dos módulos comerciais;
- Realizar a transmissão de dados através de rede sem fio;
- Elaboração de programas de aquisição e processamento do sinal que permitam diferenciados tratamentos de dados;
- Investigar o impacto das variações de tensão da rede elétrica nos equipamentos de alimentação e de aquisição.
- Aprimoramento dos modelos de dinamômetros já existentes, bem como o desenvolvimento de novos devido à aplicabilidade desses dispositivos e das técnicas desenvolvidas.

REFERÊNCIAS

ASM MATWEB, Aerospace Specification Metals. Aluminum 7075-T6. Disponível em: <<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075T6>>. Acesso em: 01 jun. 2017.

ASM MATWEB, Aerospace Specification Metals. AISI 4340 Steel. Disponível em: <<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=m434ae>>. Acesso em: 01 jun. 2017.

HBM. Catálogo de Strain Gages da HBM. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/2073/catalogo-strain-gage/>>. Acesso em: 02 mai. 2018.

DEVRIES, W.R. Analysis of Material Removal Processes, 2 ed. New York: Springer Publisher, 2011.

HBM. Instructions for Use - Covering agent PU140. Disponível em: <<https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/a2558.pdf>>. Acesso em: 18 de abril de 2017a.

HBM. Instructions for Use - Rapid Adhesive Z70. Disponível em: <<http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/a1653.pdf>>. Acesso em: 18 de abril de 2017b.

HOFFMAN, Karl. An introduction to stress analysis and transducer design using strain gauges. 1 ed. Darmstad: HBM Publisher, 2014.

MICRO-MEASUREMENT. Surface Preparation for Strain Gage Bonding. 2011. Disponível em: <http://www.vishaypg.com/docs/11129/11129_b1.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2017.

MICRO-MEASUREMENT. Noise Control in Strain Gage Measurements. 2013. Disponível em: <<http://www.vishaypg.com/docs/11051/tn501.pdf>>. Acesso em: 8 de março de 2018.

NI. NATIONAL INSTRUMENTS. Disponível em: <<http://www.ni.com/pt-br.html>>. Acesso em: 8 de março de 2018.

RIBEIRO, Kandice Suane Barros. Projeto e construção de um dinamômetro triaxial para avaliação de carregamentos na usinagem. 2016. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

RIZAL, Muhammad & GHANI, Jaharah & NUAWI, Mohd & HARON, C. (2015). Development and testing of an integrated rotating dynamometer on tool holder for milling process. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 52-53. 559–576. 10.1016/j.ymssp.2014.07.017.

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. São Paulo, SP: 2008. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica.

SAGLAM, H.; UNUVAR, A. Three-component, strain gage based milling dynamometer design and manufacturing. *Journal of Integrated Design and Process Science*, v. 5, p.95-109, 2001.

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

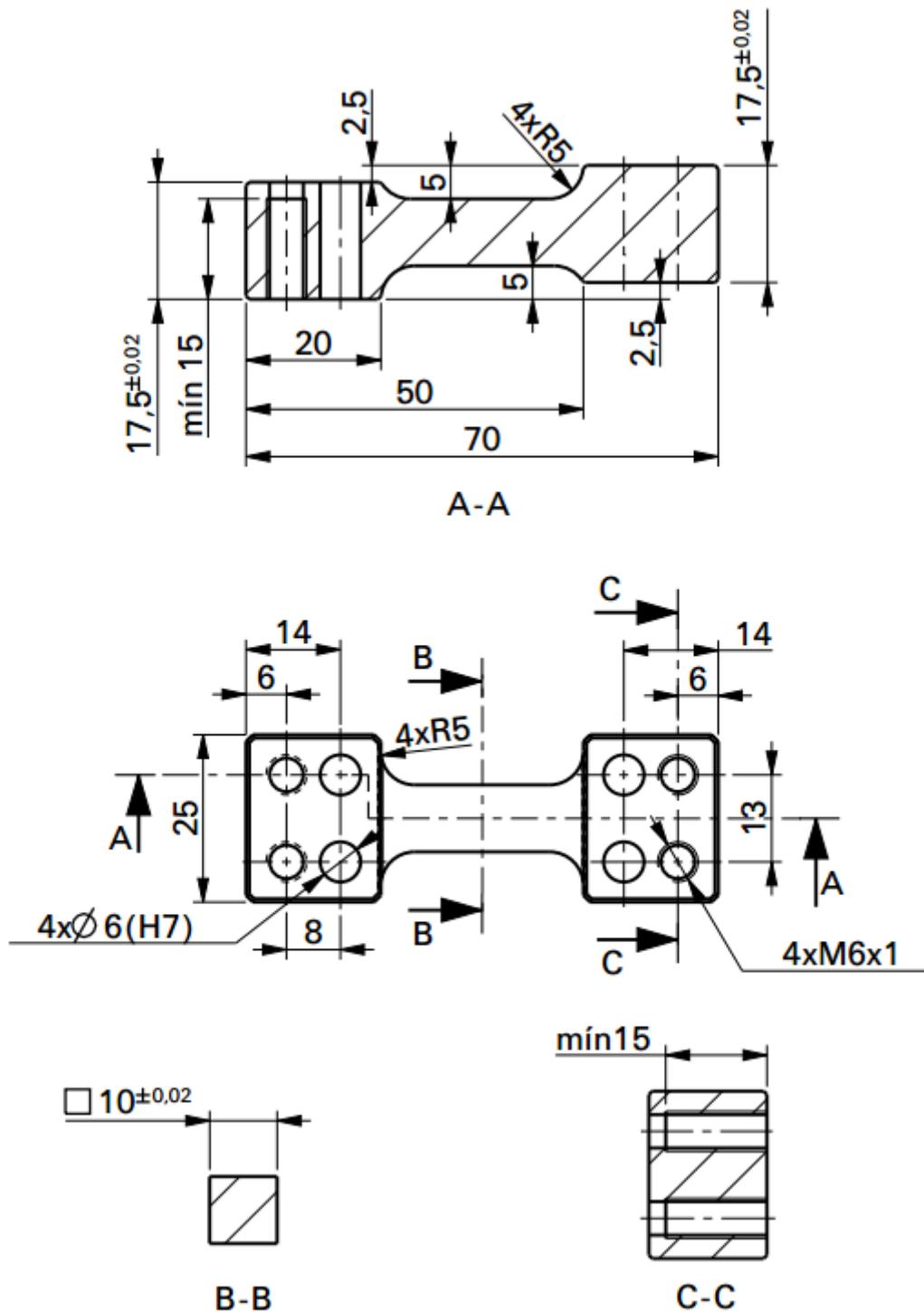
SILVA, Paulo Sérgio e FILHO, José Alberto Pinheiro da Silva. A importância da metrologia na Petrobrás. Artigo, Petrobrás, 2005. Disponível em: <<http://www.banasqualidade.com.br/revistas/metrologia%20na%20petrobras.pdf>>, acesso em 13 de junho de 2016.

TOTIS, G.; WIRTZ, G.; SORTINO, M.; VESELOVAC, D.; KULJANIC, E.; KLOCKE, F. Development of a dynamometer for measuring individual cutting edge force in face milling. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 24, p. 1844–1857, 2010.

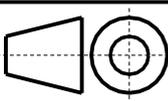
TOTIS, G.; ADAMS, O.; SORTINO, M.; VESELOVAC, D.; KLOCKE, F. Development of an innovative plate dynamometer for advanced milling and drilling applications. *Measurement*, v.49, p.164-181, 2014.

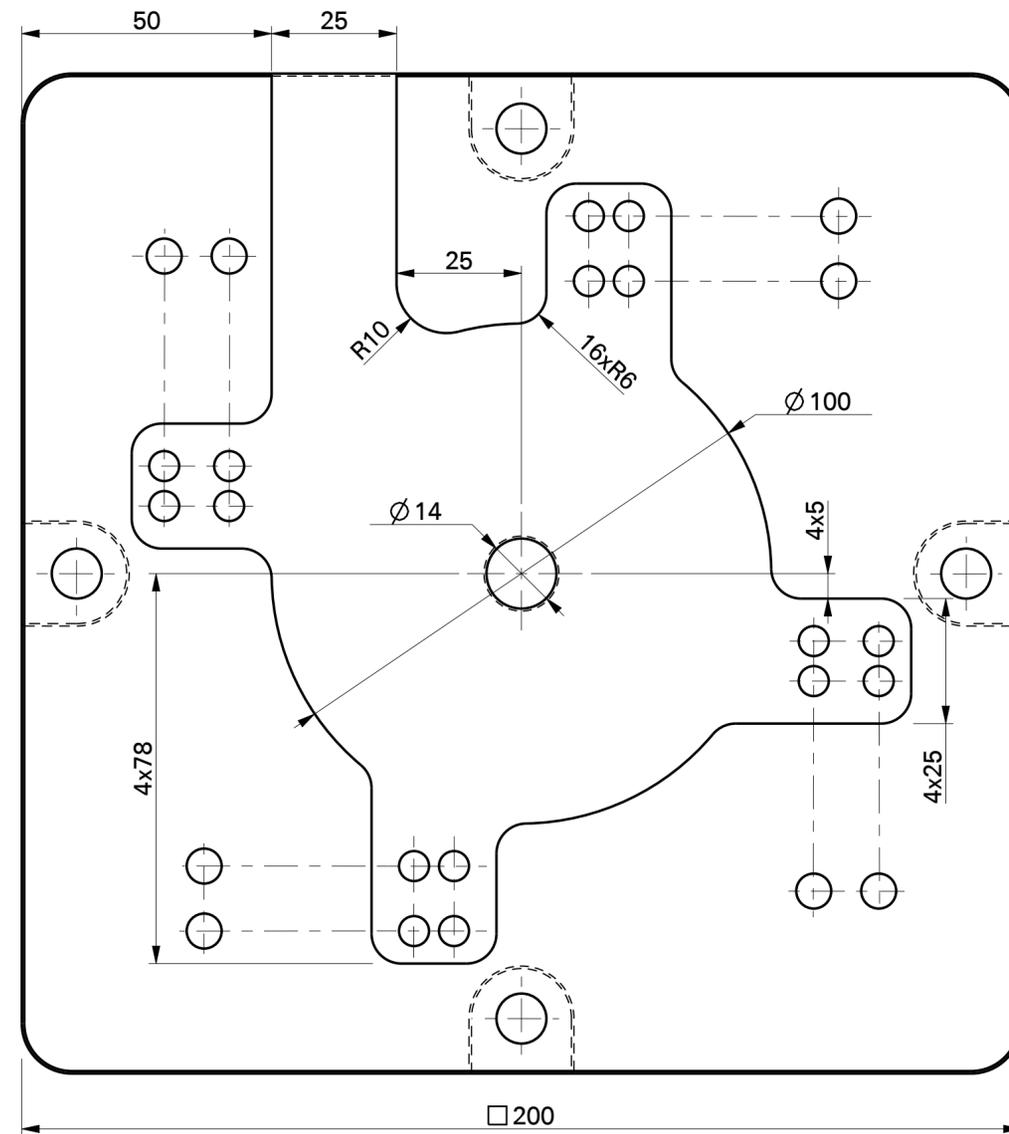
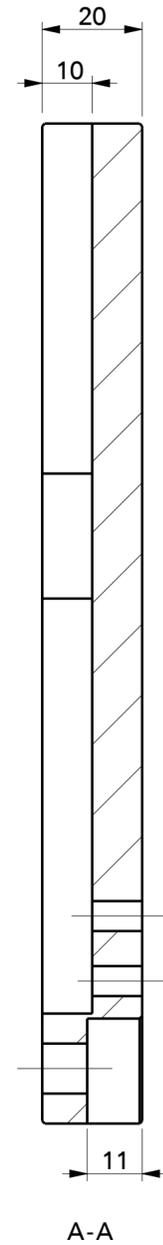
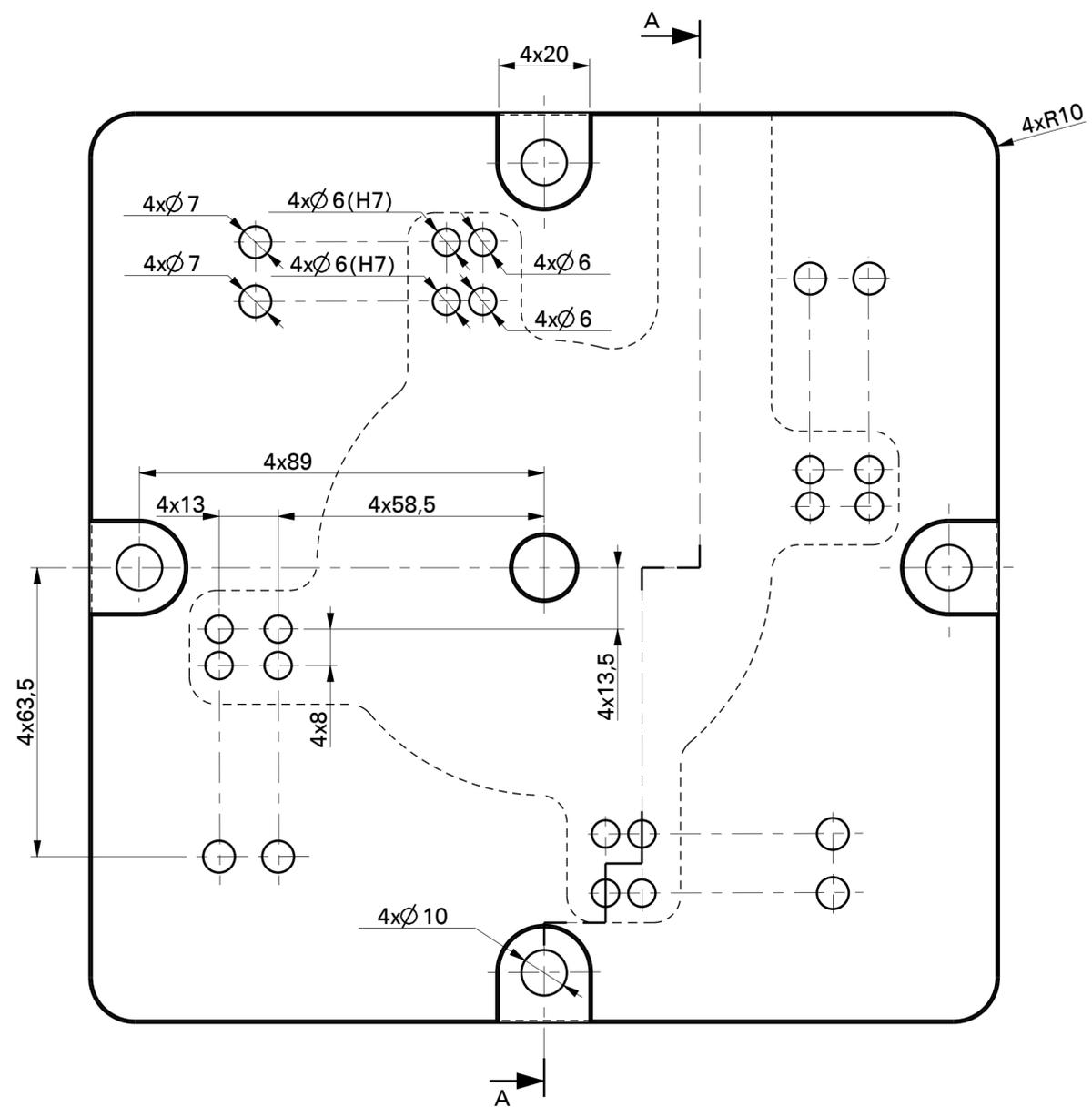
YALDIZ, S.; ÜNSAÇAR, F.; SAĞLAM, H.; IŞIK, H. Design, development and testing of a four-component milling dynamometer for the measurement of cutting force and torque. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.21, p. 1499-1511, 2007.

APÊNDICE A – DESENHOS TÉCNICOS



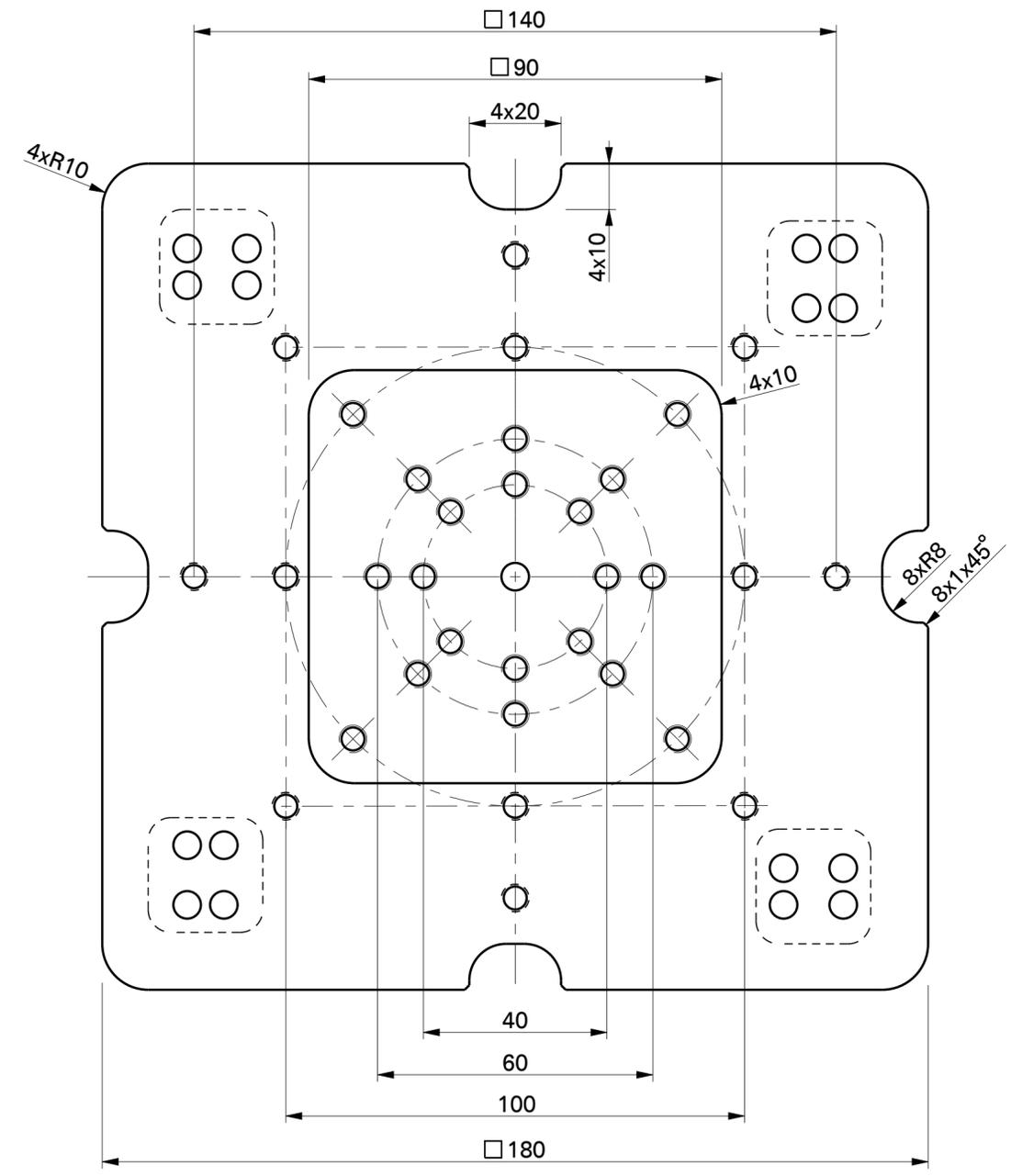
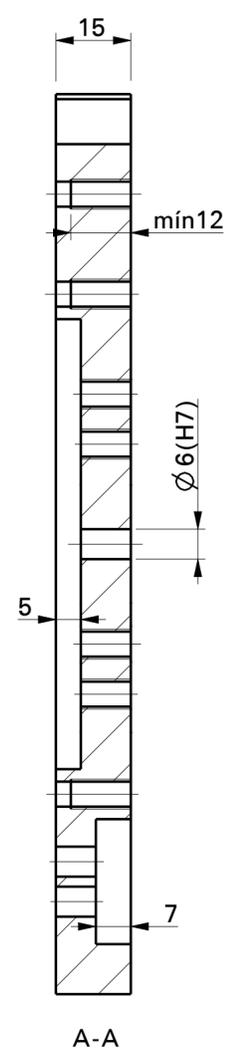
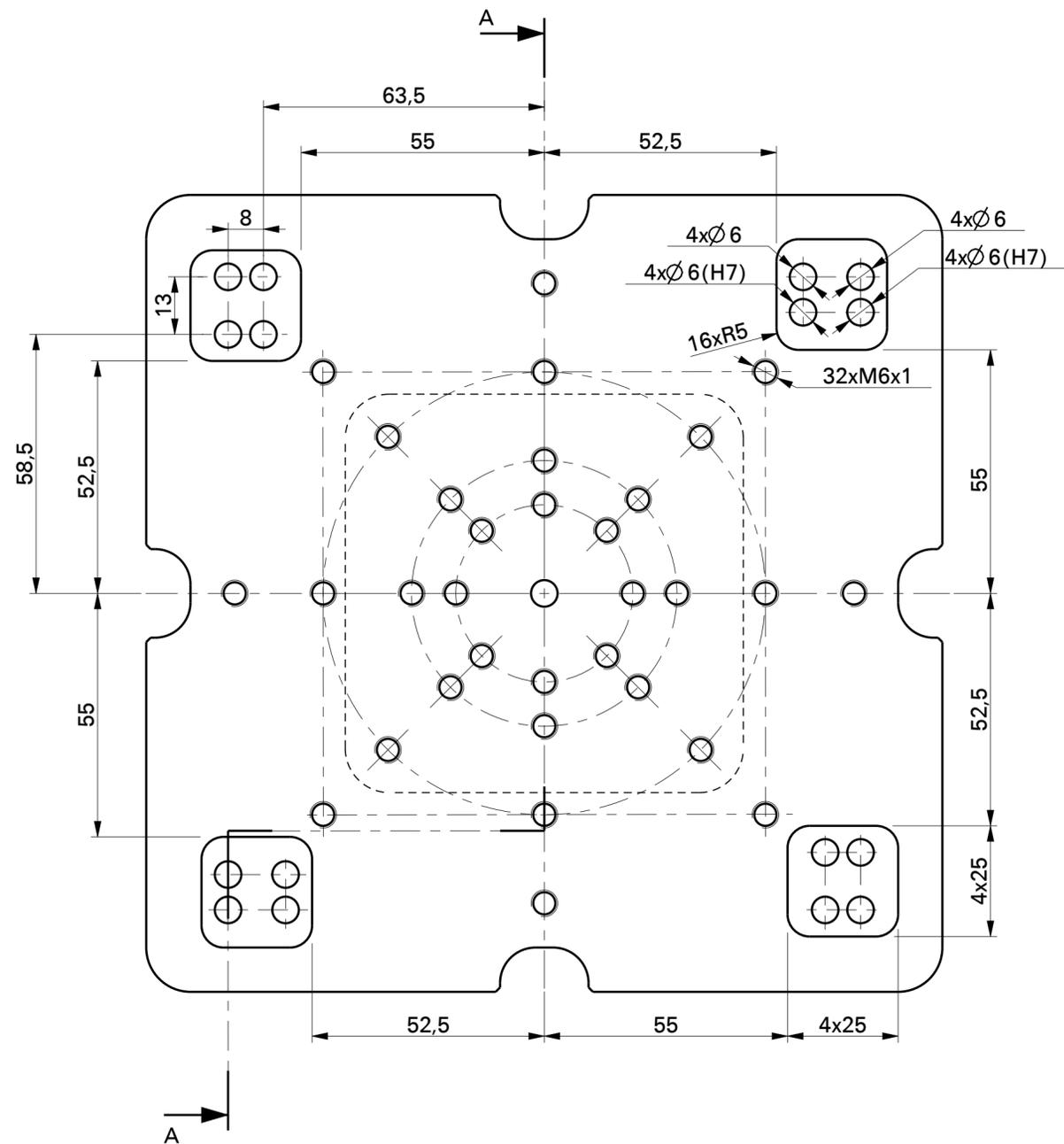
Nota:
Chanfros não cotados - 0,5X45°

ITEM	QTDE.	DENOMINAÇÃO	MATERIAL - DIM. EM BRUTO	REFERÊNCIA
1	4	Elemento Elástico	Aluminio 7075-T6	-
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE				DIMENSÕES EM: mm
TOL. GERAL NBR ISO 2768-m	TÍTULO Dinamômetro		FOLHA 01/01	REVISÃO -
 1ºDIEDRO	RESPONSÁVEL	Maria Augusta de Menezes Lourenço	ESCALA 1:1	Nº DO DESENHO 01/03
	LOCAL E DATA	Natal, 16 de janeiro de 2017		
	DISCIPLINA	Projeto de Iniciação Científica		



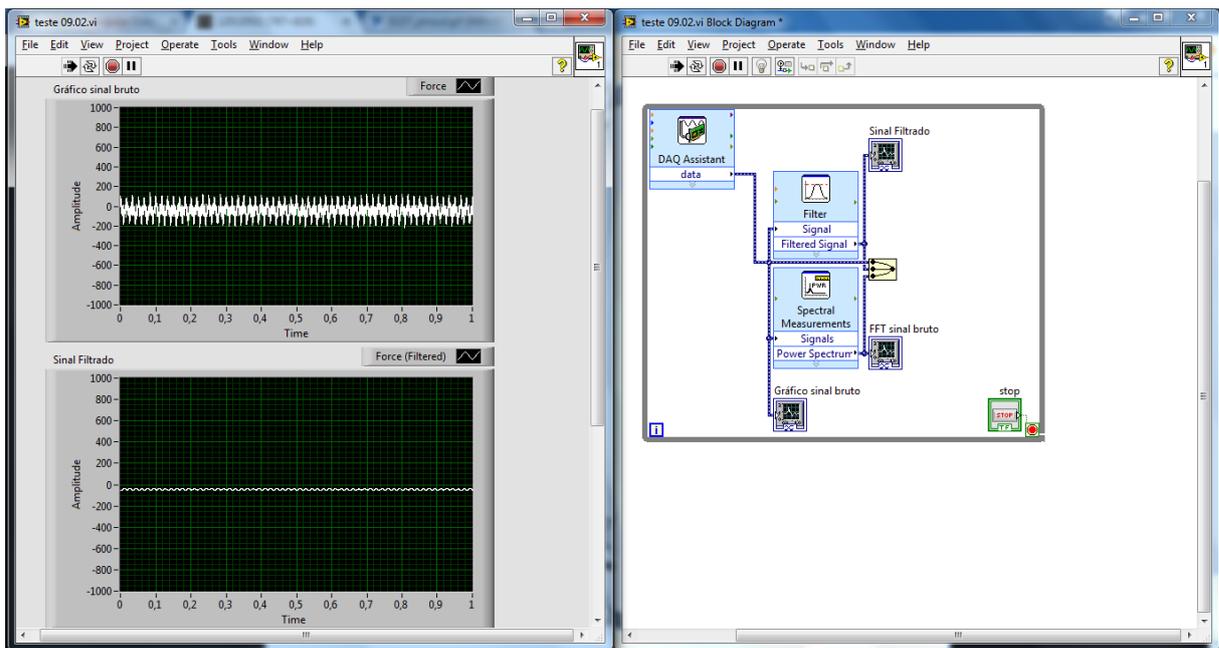
Nota:
Furos passantes

1	1	Base inferior	Aço 4340	-
ITEM	QTDE.	DENOMINAÇÃO	MATERIAL - DIM. EM BRUTO	REFERÊNCIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE				DIMENSÕES EM: mm
TOL. GERAL NBR ISO 2768-m	TÍTULO Dinamômetro		FOLHA 01/01	REVISÃO -
1° DIEDRO	RESPONSÁVEL	Maria Augusta de Menezes Lourenço	ESCALA 1:1	N° DO DESENHO 02/03
	LOCAL E DATA	Natal, 27 de abril de 2017		
	DISCIPLINA	Projeto de Iniciação Científica		



1	1	Base superior	Aço 4340	-
ITEM	QTDE.	DENOMINAÇÃO	MATERIAL - DIM. EM BRUTO	REFERÊNCIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE				DIMENSÕES EM: mm
TOL. GERAL NBR ISO 2768-m	TÍTULO Dinamômetro		FOLHA 01/01	REVISÃO -
1°DIEDRO	RESPONSÁVEL	María Augusta de Menezes Lourenço	ESCALA 1:1	N° DO DESENHO 03/03
	LOCAL E DATA	Natal, 11 de maio de 2017		
	DISCIPLINA	Projeto de Iniciação Científica		

APÊNDICE B – PROGRAMAS DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS



APÊNDICE C – DADOS DE CALIBRAÇÃO

Calibração - Eixo Z

Força	1 - Carreg.	2 - Descarreg.	3 - Carreg.	4 - Descarreg.	5 - Carreg.	6 - Descarreg.	Média
kN	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V
0	0,5349	0,5290	0,5290	0,5274	0,5275	0,5265	0,5291
1	0,5249	0,5204	0,5193	0,5187	0,5179	0,5178	0,5198
2	0,5169	0,5130	0,5118	0,5112	0,5102	0,5102	0,5122
3	0,5102	0,5072	0,5057	0,5054	0,5043	0,5043	0,5062
4	0,5050	0,5019	0,5008	0,5000	0,4993	0,4989	0,5010
5	0,4995	0,4962	0,4955	0,4942	0,4941	0,4930	0,4954
6	0,4934	0,4901	0,4898	0,4880	0,4884	0,4868	0,4894
7	0,4863	0,4842	0,4833	0,4819	0,4821	0,4807	0,4831
8	0,4801	0,4800	0,4774	0,4774	0,4764	0,4764	0,4780

ANEXO A – DADOS DO EXTENSÔMETRO



**Dehnungsmessstreifen
Strain gages
Jauges d'extensométrie**

Widerstand
Resistance
Résistance 350 Ω ±0.30 %

k-Faktor
Gage factor
Facteur k 2.06 ±1.0 %

Querempfindlichkeit
Transverse sensitivity
Sensibilité transverse 0.1 %

Bestellnummer
Order No.
No. de référence 1-LY43-3/350

Typ
Type
Type 3/350 LY43

Stückzahl
Contents
Quantité 10

Temperaturkoeffizient
des k-Faktors
Temperature coefficient
of gage factor
Coefficient de température
du facteur k 101 ±10 [10⁻⁶ / K]
(-10°C ... +45°C)

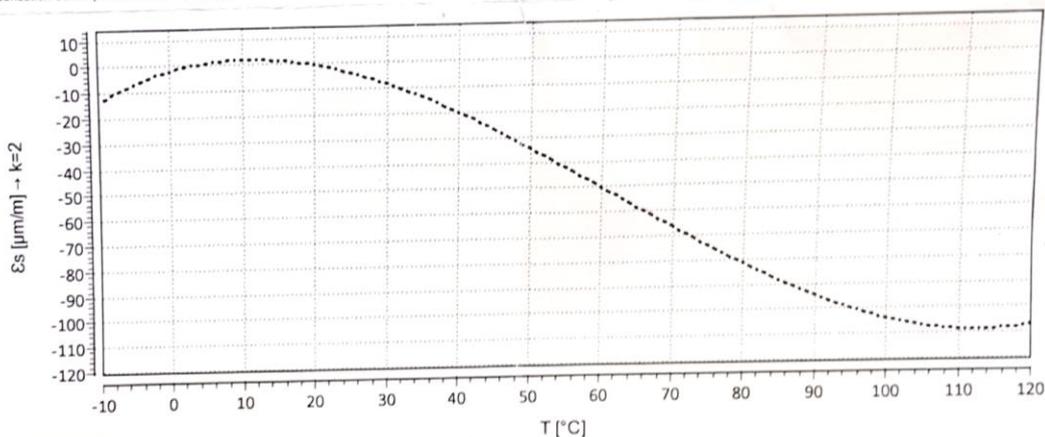
Folienlos
Foil lot
Lot de la feuille A407/10

Herstellungslot
Production batch
Lot de fabrication 812068253

Max. effekt. Brückenspeisespannung
max. rms bridge excitation voltage
Tension d'alim. de pont maxi eff. 18.5 V

Temperaturkompensation: Aluminium mit
Temperature compensation: aluminium with
Compensation de température: aluminium avec

α = 23.0 [10⁻⁶ / K]



Curve 1 ****

$$\epsilon_s(T) = -1.89 + 0.76 \cdot T - 3.86E-02 \cdot T^2 + 2.08E-04 \cdot T^3 \pm (T-20) \cdot 0.30 \text{ [µm/m]}$$

Alle technischen Daten nach VDI/VDE 2635. Geben Sie bei Rückfragen bitte Bestellnummer und Herstellungslot an.

All specifications in accordance with VDI/VDE 2635. In case of further inquiries please indicate order no. and production batch number.

Toutes les caractéristiques techniques selon la norme VDI/VDE 2635. Dans toutes communications, prière d'indiquer le numéro de commande et le numéro du lot de production.

Réponse en température des jauges d'extensométrie appliquées sur des matériaux dont des coefficients de dilatation thermique α sont indiqués. Mesurée à variation continue de la température.

Curve 1: Jauges sans pattes de raccordement.
T = température en °C
(sans dimension)

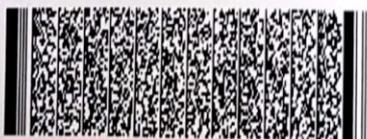
Temperaturgang der Dehnungsmessstreifen bei Applikationen mit oben angegebenen Wärmeausdehnungskoeffizienten α. Gemessen bei kontinuierlicher Temperaturänderung

Kennlinie 1: DMS ohne Anschlussbändchen.
T = Temperatur in °C
(dimensionlos)

The temperature response refers to strain gages bonded to materials with specified coefficients of thermal expansion α. Values are measured with continuous temperature variation.

Curve 1: Strain gages without leads
T = temperature in °C
(dimensionless)

Kopfdaten / Header / Titre



A point (".") is used as decimal separator in data, the separator needs to be configured accordingly for import into Excel.