

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AEROESPACIAL

Thomas Facini Pithan

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DIDÁTICO PARA ANÁLISE
EXPERIMENTAL DE ESTRUTURAS TRELIÇADAS**

Santa Maria, RS
2019

Thomas Facini Pithan

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DIDÁTICO PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL
DE ESTRUTURAS TRELIÇADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro em Engenharia Aeroespacial**.

ORIENTADOR: Prof. Prof. Tiago dos Santos

Santa Maria, RS
2019

Thomas Facini Pithan

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DIDÁTICO PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL
DE ESTRUTURAS TRELIÇADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro em Engenharia Aeroespacial**.

Apresentado em 4 de dezembro de 2019:

Prof. Tiago dos Santos, Dr Eng. (UFSM/DEM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Alexandre Aparecido Buenos, Dr Eng. (UFSM/DEM)

Prof. Marcos Daniel de Freitas Awruch, Dr Eng. (UFSM/DEM)

Santa Maria, RS
2019

DEDICATÓRIA

Gostaria de dedicar esse trabalho primeiramente a todos aqueles que me ajudaram, o mais humilde que tenha sido, a enfrentar os anos de graduação. Em especial aos meus pais, que sem sua dedicação e paciência, não teria conquistado nada. Em especial também a minha esposa e filho, que me proveram amor e felicidade e que sem eles eu não teria conseguido chegar ao final do curso.

Por fim mas não menos importante, gostaria de dedicar esse trabalho a todos aqueles que foram meus professores, que sem seus ensinamentos e dedicação a profissão, hoje eu nem poderia pensar em chegar onde cheguei. Em especial ao meu orientador, pela sua paciência e empenho em me auxiliar nas dificuldades encontradas, corrigir meus erros e encaminhar o trabalho ao rumo correto.

*A ânsia de salvar a humanidade é quase
sempre uma desculpa para a ânsia de
governá-la.*

(H. L. Mencken)

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DIDÁTICO PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ESTRUTURAS TRELIÇADAS

AUTOR: Thomas Facini Pithan

ORIENTADOR: Prof. Tiago dos Santos

O presente trabalho faz o projeto de uma bancada didática experimental para uso em disciplinas de graduação. Todos os elementos de treliça foram projetados e construídos pelo autor. Transdutores de deformação do tipo extensômetros foram instrumentados para levantar os resultados experimentais, que são comparados com resultados numéricos obtidos em um código de elementos finitos desenvolvido em MATLAB. O trabalho conclui que, embora erros tenham sido cometidos na montagem da treliça que produziu alguns resultados equivocados no experimento, é possível relacionar corretamente os dados numéricos dos experimentais, comprovando a eficácia do uso da bancada.

Palavras-chave: Elementos Trelaçados. Experimental. Bancada Didática. Extensômetros. Instrumentação.

ABSTRACT

PROJECT OF A DIDACTIC BENCH FOR USE IN UNDERGRADUATION COURSES

AUTHOR: Thomas Facini Pithan

ADVISOR: Prof. Tiago dos Santos

The present paper describes the procedures for the construction of an experimental didactic bench for usage in undergraduation courses. All the trusses elements were made by the author. Strain gauges were instrumented to produce experimental results, that were analysed and compared with the numerical results obtained in a finite elements algorithm developed in MATLAB. Concluding remarks are that, even though a faulty manufacture of the trusses, that produced equivocated results, it is possible to still corelate both numerical and experimental findings, proving the reliability of the didatic bench.

Keywords: Trusses. Experimental. Didatic Bench. Strain gauges. Instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Esquema do elemento de barra com os dois graus de liberdade associados as suas duas pontas.	17
Figura 3.2 – Configuração de extensômetros em uma ponte de Wheatstone.	19
Figura 3.3 – Configuração de 1/4 de ponte de extensômetros.	20
Figura 4.1 – A esquerda, figuras do perfil usado na bancada, e a direita, uma foto tirada da bancada no NAFA.	22
Figura 4.2 – Detalhe do extensômetro EXCEL com fator de ganho de 2.11.	23
Figura 4.3 – Sistema com a treliça, os engastes, a força aplicada e os instrumentos de medição esquematizados na figura.	24
Figura 4.4 – Sistema final com a treliça, os engastes, a força aplicada e os instrumentos de medição esquematizados na figura.	24
Figura 4.5 – Esquema de ligação da placa de aquisição NI 9237 com o resistor e a extensômetro externo. No caso dessa placa, o resistor R3 ilustrado na figura é externo, diferentemente da placa NI 9945, também apresentada na ilustração.	26
Figura 4.6 – Placa de aquisição NI9237 conectada ao <i>chassi</i> de alimentação.	27
Figura 4.7 – Elemento de 200mm feito para a montagem da treliça.	28
Figura 4.8 – Sistema de treliça montado com os elementos manufaturados e indicação dos extensômetros.	28
Figura 4.9 – Sistema de treliça montado com os elementos manufaturados e indicação dos extensômetros.	29
Figura 4.10 – Elementos da treliça com os extensômetro devidamente colados.	30
Figura 4.11 – Diagrama de blocos e painel de controle desenvolvido no LabVIEW. ...	30
Figura 5.1 – Visualização da deformação obtida no sistema, a deformação foi ampliada 20 vezes para facilitar a visualização. Também é apresentada a numeração de cada nó da treliça.	32
Figura 5.2 – Avaliação de deslocamento no sentido horizontal do nó com relação a intensidade da força obtida.	33
Figura 5.3 – Avaliação de deslocamento no sentido vertical do nó com relação a intensidade da força obtida.	34
Figura 5.4 – Fotografia tirada durante um dos ensaios em que a treliça é submetida a carga máxima medida.	35
Figura 5.5 – Fotografia tirada durante um dos ensaios em que a treliça é submetida a carga máxima medida. Neste caso um desnível é presente entre os lados direito e esquerdo da estrutura.	36
Figura 5.6 – A esquerda as deformações experimental e numérica da barra horizontal. A direita as deformações experimental e numérica da barra diagonal. ...	37
Figura A.1 – Acessando o DAQ Assistant.	42
Figura A.2 – Janela de sinais medidos.	43
Figura A.3 – Diagrama de Blocos do VI feito para o trabalho.	44
Figura A.4 – Paleta com a iteração While.	45
Figura A.1 – Desenho técnico da bancada didática.	46
Figura B.1 – Desenho técnico do elemento horizontal e vertical.	48
Figura B.2 – Desenho técnico do elemento diagonal.	49
Figura B.3 – Desenho técnico da estrutura treliçada.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Resultados numéricos sintetizados em uma tabela.	35
Tabela 5.2 – resultados experimentais sintetizados em uma tabela.	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS.....	13
2.1	OBJETIVOS GERAIS	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1	BIBLIOGRAFIA	14
3.2	REVISÃO DE TEORIA	15
3.2.1	Bancadas Didáticas.....	15
3.2.2	Modelagem de Estruturas Treliçadas.....	15
3.2.2.1	<i>Método da Rigidez</i>	<i>16</i>
3.2.3	Extensômetros	18
3.2.3.1	<i>Ponte de Wheatstone</i>	<i>19</i>
3.2.4	LabVIEW.....	20
4	DESENVOLVIMENTO	22
4.1	A BANCADA	22
4.2	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO	23
4.3	TOMADAS DE DECISÃO	23
4.4	PLACAS DE AQUISIÇÃO	25
4.5	MONTAGEM	27
4.6	INTERFACE GRÁFICA	30
5	RESULTADOS	31
5.1	RESULTADOS NUMÉRICOS.....	31
5.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	35
6	CONCLUSÃO	38
7	TRABALHOS FUTUROS.....	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
	APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO EM LABVIEW.....	42
	ANEXO A – DETALHE E DIMENSÕES DA BANCADA.....	46
	ANEXO B – DETALHE E DIMENSÕES DA ESTRUTURA TRELIÇADA.....	48

1 INTRODUÇÃO

No atual cenário que a indústria aeronáutica se encontra é extremamente importante a validação de estruturas por métodos experimentais, a fim de prever como a mesma se comportará em operação (EWINS, 1984). Todavia, é muito comum estudantes de graduação de engenharia relatarem uma ausência de estudos práticos, tanto em sala de aula, quanto em projetos propostos por docentes, conforme comentado em (COLENCI, 2000). Naquele trabalho, é feita ainda uma avaliação da importância da multidisciplinaridade em estudos de engenharia.

É possível citar ainda a iniciativa *CDIO*, da sigla inglesa *conceive, design, implement, create*. O programa já é adotado por muitas universidades e tem o objetivo de "reviver" o ensino de engenharia com problemas práticos e tangíveis, conforme é descrito em seu site, disponível em Worldwide CDIO Initiative (). De acordo com os criadores do projeto, a ideia surgiu devido a uma tendência que ocorre em diversas escolas de engenharia, onde "o ensino evoluiu em estudar a ciência da engenharia, enquanto o estudo prático era desestimulado."

Além disso, conforme descrito em Martins et al. (2016), a falta de um ensino por viés experimental pode causar uma dificuldade do estudante de compreender o conteúdo teórico, deixando o assunto abstrato. Ainda assim, um estudo experimental em aulas de graduação pode garantir um entendimento mais sofisticado do conteúdo, bem como introduzir alunos ao uso de instrumentação e aparelhos de medição para poder obter os resultados experimentais.

Estes aparelhos de medição e métodos de instrumentação por sua vez, devido a sua crescente fidelidade e precisão, graças a avanços em áreas como semicondutores e eletrônicos, estão sendo cada vez mais utilizados no setor industrial. Por sua vez, um bom entendimento destes instrumentos pode tornar o estudante mais capaz para lidar com as exigências impostas no ramo industrial.

O projeto tem finalidade de construir uma bancada didática experimental para uso em disciplinas de Mecânica dos Sólidos e de Estruturas Aeronáuticas, ambas presentes no curso de graduação de Engenharia Aeroespacial na UFSM. A bancada permitirá, mas não se limitará, ao uso de experimentos de análise de tensão e deformação de barras engastadas sob esforços estáticos, análise de tensão e deformação de treliças. A aplicação da força será feita por uma massa conhecida, que aplicará sua força peso sobre a estrutura. A determinação das deformações é dada pelo uso de extensômetros, ou, da língua inglesa, *strain gauges*. O processamento e recebimento do sinal dos extensômetros é feito com o uso de uma placa de aquisição, que condiciona o sinal para um computador com um programa em LabView, que mostra e armazena os resultados experimentais. Com ambos os resultados anteriores e conhecendo o módulo de elasticidade do material, é possível

determinar a tensão que é imposta na treliça ou à barra em questão. O resultado obtido experimentalmente então pode ser comparado com resultados analíticos ou computacionais obtidos anteriormente, a fim de validar modelos ou definições de conceito.

Além da bancada experimental, o projeto também utiliza um código numérico em MATLAB, para modelagem de estruturas treliçadas pelo método da rigidez, desenvolvido a partir de Ferreira (2008) e modificado pelo autor, para determinação de deformação e tensão de treliças. Os resultados obtidos no código podem ser usados em paralelo com os resultados experimentais para comparar os valores e validar o código numérico.

2 OBJETIVOS

Nesse capítulo serão abordados os objetivos gerais e específicos do trabalho.

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O Trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento e a construção de uma bancada experimental para ensaios em estruturas e mecânica dos sólidos. Uma estrutura treliça é proposta e posteriormente testada com uso de extensômetros.

Além disso, como deverá ser adquirida a deformação nos sistemas, o trabalho também contará com o uso de extensômetros. Devido a isso, outro objetivo é a realização correta da instrumentação dos aparelhos. Há também a questão do código numérico feito em MATLAB para determinar a deformação e tensão de treliças, com base em uma força aplicada. O código, embora não seja feito pelo autor, foi modificado para receber dados de entrada mais simples e facilitar as variáveis de entrada do sistema.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho podem ser pontuados nos seguintes itens

- Fabricação e operação da bancada didática, realizando ensaios e posteriormente comparando os resultados obtidos com métodos numéricos.
- Instrumentação e entendimento dos aparelhos de medição de deformação, como extensômetros.
- Generalização do código em MATLAB feito por (FERREIRA, 2008), a fim de facilitar a escrita dos dados de entrada do problema.
- Validação do código com comparação dos resultados obtidos com outros resultados experimentais ou analíticos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como o presente trabalho tem como objetivo realizar a construção, instrumentação e modelagem de uma bancada didática, três grupos de referências foram usados como apoio para a produção. Neste capítulo, inicialmente é apresentada as principais fontes usadas como referência, sendo em seguida apresentada uma noção breve da teoria necessária para o entendimento do trabalho.

3.1 BIBLIOGRAFIA

Para a parte de construção da bancada, o presente trabalho tomou como referência principal o artigo de Martins et al. (2016), que relata a instrumentação de uma bancada didática para análise estrutural em treliças planas. O artigo conta com resultados experimentais de diversas configurações de treliças, obtidos por meio de transdutores de deslocamento, bem como relógios de deformação. Além de comparar os resultados experimentais obtidos entre os dois instrumentos de medição, é feito ainda uma comparação com os resultados analíticos esperados. O artigo é bastante semelhante ao presente trabalho.

O trabalho de Alvez (2015) também foi usado como base para a construção da bancada. Nele, são realizados modelo experimentais, bem como guias experimentais, para apoio em disciplinas de graduação de estruturas.

Para a parte de instrumentação, a principal referência usada foram dos tutoriais disponibilizados pela *National Instruments*. Neles, é apresentado os diferentes tipos de configuração de extensômetros e maneiras de posicionamento na estrutura. Além disso, como uma placa de aquisição da empresa foi usada para aquisição dos sinais, os tutoriais também serviram para auxiliar no manejo e utilização da placa.

O livro de Sciammarella e Sciammarella (2012) também traz informações importantes para o estudo experimental de estruturas. Nele é introduzido conceitos e fundamentos fundamentais para a realização de um experimento correto.

Para o código em MATLAB de treliças, foi utilizado o texto de Ferreira (2008). Além disso, o livro de Donaldson (2008) foi utilizado para auxiliar e expandir o estudo da teoria mais avançada.

Além disso, foram ainda utilizados referências de teoria, como Philpot (2008), para revisão de teoria, bem como Popov et al. (1968) *Mecânica dos Sólidos*. Para obtenção de alguns exemplos de treliças planas, foi utilizado o livro Hibbeler (2010) *Resistência dos Materiais*.

3.2 REVISÃO DE TEORIA

A seguir será apresentada uma noção teórica dos principais assuntos abordados no trabalho. O capítulo serve como uma forma de apresentar, de maneira geral, todos os conteúdos pertinentes para a realização e entendimento do que é desenvolvido.

3.2.1 Bancadas Didáticas

Para Rodrigues, Jurach e Giordani (2003), bancadas didáticas são ferramentas de auxílio para a realização de experimentos que possibilita ao operador montar diversos sistemas variando seus parâmetros, ao familiarizar com os componentes e ao mesmo tempo verificar na prática a teoria vista em aula.

Embora a bancada do presente trabalho seja feita na própria universidade, existem diversas bancadas semelhantes disponíveis no mercado para aquisição. Uma delas, usada por Martins et al. (2016) é feita pela empresa alemã *GUNT Hamburg GmbH* e conta com um breve manual disponível no site da companhia. Nele, é mencionado que os conceitos mais abstratos da cadeira podem ser simulados de maneira prática e dar uma representação clara, por meio de experimentos com pequenos grupos de estudantes. Isso promove o conhecimento a longo prazo do estudante. Ao mesmo tempo, o experimento encoraja as habilidades sociais dos estudantes, bem como os conhecimentos técnicos referentes a bancada.

Dentro do assunto de estudos didáticos, é possível fazer uma menção ao aprendizado prático que o envolve. Leite, Silva e Vaz (2005) afirmam que as aulas práticas no ambiente de laboratório podem despertar curiosidade e, conseqüentemente, o interesse do estudante, visto que a estrutura do mesmo pode facilitar, entre outros fatores, a observação de fenômenos estudados em aulas teóricas.

3.2.2 Modelagem de Estruturas Treliçadas

Uma estrutura formada de elementos unidos por rótulas em suas extremidades para formar uma estrutura "rígida" é denominada treliça MERIAM e KRAIGE (2011). Pontes, apoios de telhados, guindastes e outras estruturas do gênero são exemplos comuns de treliças. Ela oferece, ao mesmo tempo, uma solução prática e econômica a muitas situações de engenharia. Ela consiste em elementos retos unidos por nós. A maioria das estruturas reais é feita de várias treliças unidas para formar uma estrutura espacial. Cada treliça é projetada para sustentar cargas que atuam em seu plano, podendo ser tratada como estrutura bidimensional MERIAM e KRAIGE (2011).

3.2.2.1 Método da Rigidez

Existem vários métodos diferentes para estudar estruturas treliçadas e estruturas mecânicas no geral, conforme descrito em MERIAM e KRAIGE (2011). É possível citar o método de Castigliano, o método dos trabalhos virtuais, etc. Nesse trabalho porém, será usado o método da rigidez. De acordo com Donaldson (2008) essa abordagem usa uma matriz de rigidez para relacionar os deslocamentos e as forças nodais em uma sistema mecânico.

Todo o desenvolvimento do método da rigidez que será feito a seguir foi retirado de Donaldson (2008). Na referência, todos os pormenores do assunto são explicado de modo mais detalhado.

A figura 3.1 abaixo apresenta a barra com seus respectivos graus de liberdade. O método pode ser facilmente implementado em uma rotina numérica, podendo ser considerado um método de elementos finitos.

Antes de prosseguir para o desenvolvimento das equações associadas ao método, é interessante definir um sistema de nomenclatura para melhor entendimento. Como será necessário trabalhar sistemas de referencias locais e globais, bem como matrizes de transformação as variáveis podem se tornar confusas. Será assumido para todo o trabalho variáveis em caixa baixa, como u_1 , v_2 , etc como variáveis no sistema local, enquanto variáveis em caixa alta como U_1 , V_2 , X , etc como escritas no sistema global. Já para a forma vetorial e matricial, o super índice * representa um vetor ou matriz escrito no sistema global. A seguir será apresentada a dedução principal do método da rigidez.

O objetivo final do método da rigidez é a determinação dos deslocamentos sofridos pela treliça, dada uma condição inicial e uma, ou mais, forças aplicadas. Assim, é possível escrever o equacionamento geral que deverá ser desenvolvido. Considerando que a magnitude das deformações das treliças e os materiais usados para os mesmos se encontram dentro do regime linear, pode-se usar a relação de Hooke para descrever o deslocamento

$$F = K \cdot d \quad (3.1)$$

onde F é a força aplicada, K é a rigidez e d é o deslocamento. Embora simples, a relação permite visualizar com exatidão as três magnitudes que deverão ser desenvolvidas e determinadas no método da rigidez. Sendo elas a rigidez, a força aplicada e as forças de reação e o deslocamento. As duas primeira podem ser determinadas pela configuração da treliça, das condições de contorno e das forças externas aplicadas, usualmente conhecidas. O deslocamento é então determinado com base nessas duas. Com o deslocamento, é possível determinar a deformação e consequentemente, a tensão em cada treliça.

Figura 3.1 – Esquema do elemento de barra com os dois graus de liberdade associados as suas duas pontas.



Fonte: Retirado de (DONALDSON, 2008).

Os deslocamentos dos nós evidenciados na Figura 3.1 podem ser agrupados na forma vetorial

$$\{d_e\} = \{u_1, v_1, u_2, v_2\}^T \quad (3.2)$$

Neste caso, conforme explicado em Donaldson (2008), a matriz de rigidez da treliça pode ser escrita da seguinte maneira

$$[K_e] = \begin{bmatrix} AE/L & 0 & -AE/L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -AE/L & 0 & AE/L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Percebe-se que as linhas e colunas 2 e 4 são nulas. Isso era esperado, uma vez que elas representam rigidezes transversais, que não estão presentes nas treliças consideradas.

Nesse caso, onde os eixos locais da treliça estão dispostos idênticos ao eixo global, nenhuma transformação precisa ser feita. Porém, para uma treliça geral, disposta a um ângulo θ entre sua linha axial e o eixo X global é necessário o uso de uma transformação de coordenadas. Nesse caso, podemos relacionar as deformações globais com as locais da seguinte maneira

$$\begin{aligned} U_1 &= u_1 \cos\theta - v_1 \sin\theta \\ V_1 &= v_1 \sin\theta + u_1 \cos\theta \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} U_2 &= u_2 \cos\theta - v_2 \sin\theta \\ V_2 &= v_2 \sin\theta + u_2 \cos\theta \end{aligned} \quad (3.5)$$

Ou, na forma matricial

$$\begin{Bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ U_2 \\ V_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

$$d_e^* = [C]d_e \quad (3.7)$$

Onde a matriz $[C]$ é a matriz de transformação. Essa matriz é uma matriz ortonormal com determinante unitário. Onde, de forma matemática

$$[C]^T = [C]^{-1} \quad (3.8)$$

Como um sistema treliçado real conta com várias treliças dispostas em ângulos e maneiras diferentes, o uso de uma matriz de transformação facilita o processo. Realizando as transformações de coordenadas para cada rigidez de cada treliça, é possível obter uma rigidez equivalente, que pode ser então somada com as outras matrizes, afim de obter uma matriz de rigidez equivalente.

Para uma montagem qualquer, alguns passos podem ser adotados para facilitar o processo de estudo. Inicialmente, pode-se evidenciar o número total de nós presentes no sistema. Em seguida é possível numerar os graus de liberdade associados a cada ponto, resultando no número total de graus de liberdade do sistema. Assim, levando em conta a definição de que não existe rigidezes transversais em treliças, é possível escrever a matriz de rigidez local, já transformada para as coordenadas de referência, de cada elemento. Finalmente, tendo cada matriz de rigidez local, é possível soma-las para obter a matriz de rigidez global do sistema treliçado.

3.2.3 Extensômetros

Os extensômetros são um tipo de sensor que usa princípios resistivos para transformar uma deformação física em uma variação de resistência, conseqüentemente, uma variação de tensão que poderá ser interpretada por um computador ou controlador (DINIS, 2010). O *strain gauge* varia sua resistência linearmente com a sua deformação, o que permite relacionar as duas grandezas de maneira simples.

Devido a sua utilização simples, fácil fabricação e baixo custo, os extensômetros do tipo resistivo são os mais usados na indústria. Diversos tipos e modelos estão presentes no comércio, sendo cada tipo com uma aplicação específica. Um dos parâmetros mais importantes que deve-se saber de um extensômetro é a sua sensibilidade a deformação, também denominada fator de gage (GF) (DINIS, 2010). A sensibilidade pode ser definida como a relação entre a variação relativa entre a resistência elétrica e a variação relativa do comprimento, logo é possível escrever a seguinte relação

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (3.9)$$

Onde ϵ é a deformação total submetida ao extensômetro. Com esta relação é pos-

sível correlacionar medições elétricas de saída com as medições mecânicas desejadas, como deformação. Assim, modificando a Equação 3.9 para obter a deformação temos

$$\epsilon = \frac{\Delta R/R}{GF} \quad (3.10)$$

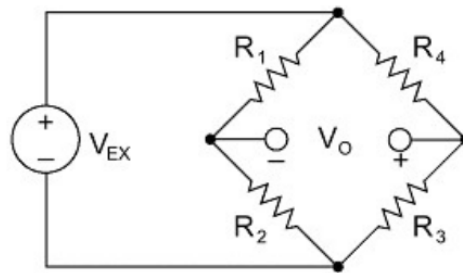
Sendo GF o fator de ganho, uma constante para o extensômetro, valor disponibilizado pelo fabricante e $\Delta R/R$ sendo medido pela placa de aquisição.

Um dos problemas dos extensômetros é a sua alta variação de sensibilidade devido a fatores ambientais, como temperatura e umidade. Como o sensor geralmente é usado em ambientes industriais, essa característica pode se tornar um grande empecilho para obter resultados confiáveis. Uma forma de contornar esse problema é usando vários extensômetros com uma configuração específica. Talvez a configuração mais famosa de extensômetros seja a ponte de Wheatstone, que será analisada na seção seguinte.

3.2.3.1 Ponte de Wheatstone

Uma configuração de extensômetros para capturar sinais de forma bastante confiável é por uma ponte de Wheatstone. A Figura 3.2 apresenta a configuração dos extensômetros usada na ponte.

Figura 3.2 – Configuração de extensômetros em uma ponte de Wheatstone.



Fonte: National Instruments.

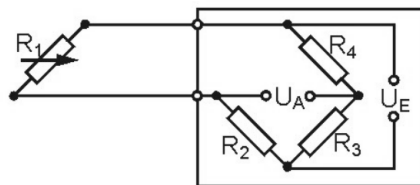
Na imagem, V_{EX} é a tensão externa aplicada aos extensômetros, enquanto V_O é a tensão de saída. Esta pode ser relacionada com as resistências e a tensão de entrada pela seguinte equação

$$V_O = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{EX} \quad (3.11)$$

Para o caso onde $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$ V_O será zero, neste caso, a ponte é considerada balanceada, qualquer variação nas resistências provocará uma tensão de saída diferente de zero.

É possível ainda fazer configurações fracionadas da ponte de Wheatstone, usando apenas três, dois ou um extensômetro(s), dependendo de como o usuário quiser usar. Como o presente trabalho trata do caso de um extensômetro, um detalhamento apenas dessa configuração será feita. Também denominado 1/4 de ponte de Wheatstone, esta configuração é uma das mais simples e fáceis de instrumentar. Nesse caso apenas um dos resistores da ponte é um extensômetro, com os outros três sendo resistências normais de valores conhecidos. Assim, o esquema do circuito fica semelhante ao que é apresentado na Figura 3.3, abaixo.

Figura 3.3 – Configuração de 1/4 de ponte de extensômetros.



Fonte: National Instruments.

Como é de se esperar, neste caso existe muito mais imprecisão devido a diferenças de temperatura e outros fatores externos. Também, esse tipo de configuração só permite capturar deformações axiais e de flexão.

Um ponto importante deve ser discutido quanto aos valores das resistências em um experimento real. Para qualquer caso de ponte, deve-se cuidar para usar valores de resistências de magnitudes semelhantes. Caso se utilize, por exemplo, R_1 como 100Ω e R_2 como $10k\Omega$, o sinal que será transmitido poderá não ter a capilaridade necessária, podendo capturar apenas variações de tensão muito altas, o que se resulta em um experimento equivocado. Isso ocorre pois a resistência equivalente será muito mais elevada, produzindo uma corrente menor, que produzirá um sinal de saída de menor intensidade.

Em casos reais, geralmente os extensômetros tem resistências nominais de 50Ω a 450Ω . Assim torna-se necessário resistências equivalentes para R_2 , R_3 e R_4 , de modo a completar a ponte de maneira correta.

3.2.4 LabVIEW

O LabVIEW é um software de programação gráfica de instrumentação virtual criado pela *National Instruments* que tem como função principal adquirir, processar e pós-processar resultados de testes experimentais e medição de transdutores. De acordo com o fabricante, o LabVIEW é um software de engenharia de sistemas criado especificamente para aplicações de teste, medição e controle, com rápido acesso ao *hardware* e às infor-

mações obtidas a partir dos dados.

O LabVIEW apresenta uma alternativa a sistemas de instrumentação tradicionais, uma vez que utiliza das capacidades computacionais para realizar a instrumentação necessária de maneira virtual. Ademais, os instrumentos virtuais atualmente representam uma mudança fundamental no campo de instrumentação (DINIS, 2010). Além de explorar a capacidade de processamento dos computadores, a instrumentação virtual pode realizar uma série de outros recursos, como compartilhamento de informações por placa de rede, armazenamento das informações obtidas na memória do próprio computador, etc.

O LabVIEW trata a instrumentação virtual por meio de *instrumentos virtuais*. Os instrumentos virtuais imitam instrumentos físicos reais, como osciloscópio, voltímetro, etc.

Dentro de um instrumento virtual do LabVIEW existem três componentes básicos. São eles o painel principal, o diagrama de blocos e o ícone ou conector. O primeiro serve como interface gráfica entre o computador e o usuário, é nele que é apresentado os resultados obtidos e onde o usuário pode interagir com o código durante o funcionamento. O segundo é o código propriamente dito, onde o usuário colocará as funções que deseja realizar com os dados recebidos. É no diagrama de blocos onde, por exemplo, o usuário colocaria os instrumentos reais, mencionados anteriormente. O ícone ou conector identifica o instrumento virtual de modo a que possa ser usado em outro instrumento virtual.

Um passo a passo geral sobre o uso do LabVIEW se encontra na seção A. Todos os procedimentos realizados pelo autor para adquirir o sinal são apresentados.

4 DESENVOLVIMENTO

O presente capítulo apresentará os instrumentos e aparelhos utilizados no trabalho. Também será discutido os procedimentos realizados para obter os resultados, bem como as tomadas de decisão adotadas.

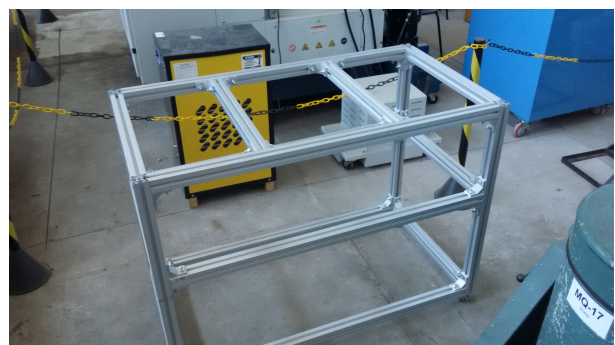
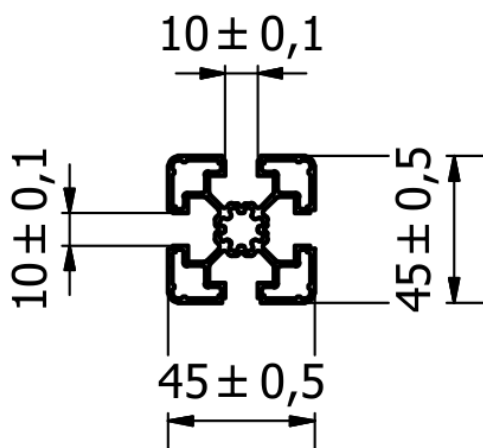
4.1 A BANCADA

A bancada didática está localizada no interior do Núcleo de Automação e Processos de Fabricação (NAFA), no Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). As estruturas são feitas de alumínio com perfil do tipo 45x45, bastante comuns em bancadas experimentais. O perfil conta com sulcos que permitem a fixação de diversos instrumentos e objetos, tornando a bancada bastante modular. As imagens abaixo apresentam algumas fotos referente a bancada experimental.

Figura 4.1 – A esquerda, figuras do perfil usado na bancada, e a direita, uma foto tirada da bancada no NAFA.

Detalhe do perfil:

A-A (1 : 3)



Fonte: Autor.

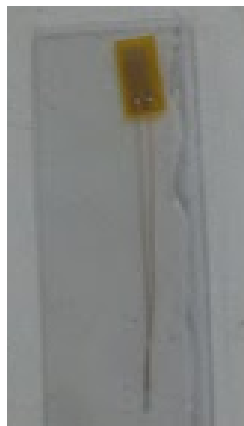
Cada barra da bancada é fixada pelos sulcos da outra barra paralela a ela, de modo que sua posição pode ser ajustada conforme desejada. Na seção de anexos, em anexo A, é apresentada as especificações e dimensões da bancada, bem como um desenho detalhado.

4.2 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

Os instrumentos de medição utilizados no trabalho, conforme descrito anteriormente, serão os transdutores de deformação com *strain gauge*. Aqueles usados para os testes foram da empresa nacional EXCEL e apresentavam um fator de ganho de 2.11. O componente é empregado para determinar a deformação linear de uma barra ou uma treliça por exemplo.

na figura 4.2, é apresentado um dos extensômetros, antes de ser colado a barra, usado no experimento.

Figura 4.2 – Detalhe do extensômetro EXCEL com fator de ganho de 2.11.



Fonte: Autor.

4.3 TOMADAS DE DECISÃO

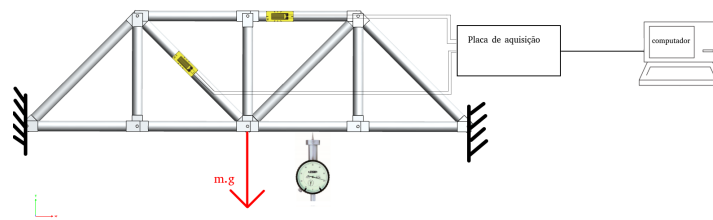
Para a produção das treliças foram adquiridos tubos de alumínio das dimensões desejadas, disponíveis no mercado. Para realizar os engastes entre as treliças é necessário planificar as extremidades de cada treliça, assim é possível produzir as juntas. As características mais desejáveis para os tubos são

Uma série de dimensões de tubos foi simulada no programa de elementos finitos em MATLAB. Contudo, como na grande maioria das seções simuladas, não chegou-se em uma magnitude de deformação aceitável, optou-se por utilizar um tubo de alumínio com a menor seção possível encontrada comercialmente. Uma seção circular com diâmetro de 3/8 de polegada (9.52mm).

Outra questão importante que foi levada em conta é o comprimento de cada treliça e a configuração que seria adotada para testes iniciais. Uma das dificuldades principais era a de garantir que a treliça seja plana, ou seja, que ela não se inclinasse para um lado ou outro, deixando-a em três dimensões. Inicialmente, foi decidido criar uma treliça que

seja engastada nas suas duas extremidades, semelhante a uma ponte. Assim, seriam produzidas duas treliças bi engastadas, iguais e paralelas, que seriam unidas entre si e na união imposta a força peso. Na imagem abaixo é apresentada a geometria adotada em perspectiva de duas dimensões. Idealmente esta seria a geometria feita, porém é feito uma outra idêntica fixada nela para evitar a sua caída para o lado.

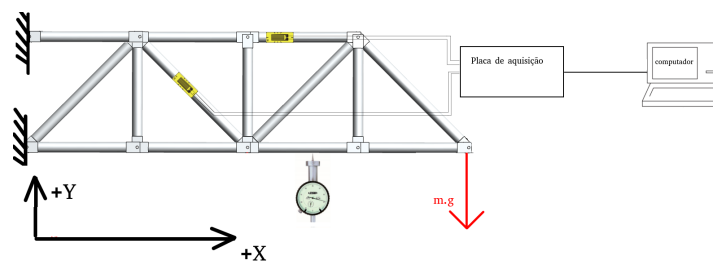
Figura 4.3 – Sistema com a treliça, os engastes, a força aplicada e os instrumentos de medição esquematizados na figura.



Fonte: Autor.

Esta configuração, porém apresentava um sério problema de não produzir as deformações mínimas requeridas nas definições de projeto mencionadas anteriormente. Assim, a estrutura foi redefinida para uma do tipo engastada em dois pontos verticais. O método de fazer duas treliças paralelas para evitar deformações em um terceiro eixo ainda se faz presente. A figura abaixo apresenta o sistema final da treliça estipulada.

Figura 4.4 – Sistema final com a treliça, os engastes, a força aplicada e os instrumentos de medição esquematizados na figura.



Fonte: Autor.

Em seguida, foi definido um valor para a força aplicada na estrutura. Os limitadores de projeto desse parâmetro são listados abaixo.

- Uma força que gere uma tensão na estrutura que não exceda a tensão de escoamento do material alumínio;
- Um peso que não seja excessivamente complicado de fixar na bancada. Levando em conta fatores humanos, qualquer objeto com massa menor de 100kg .

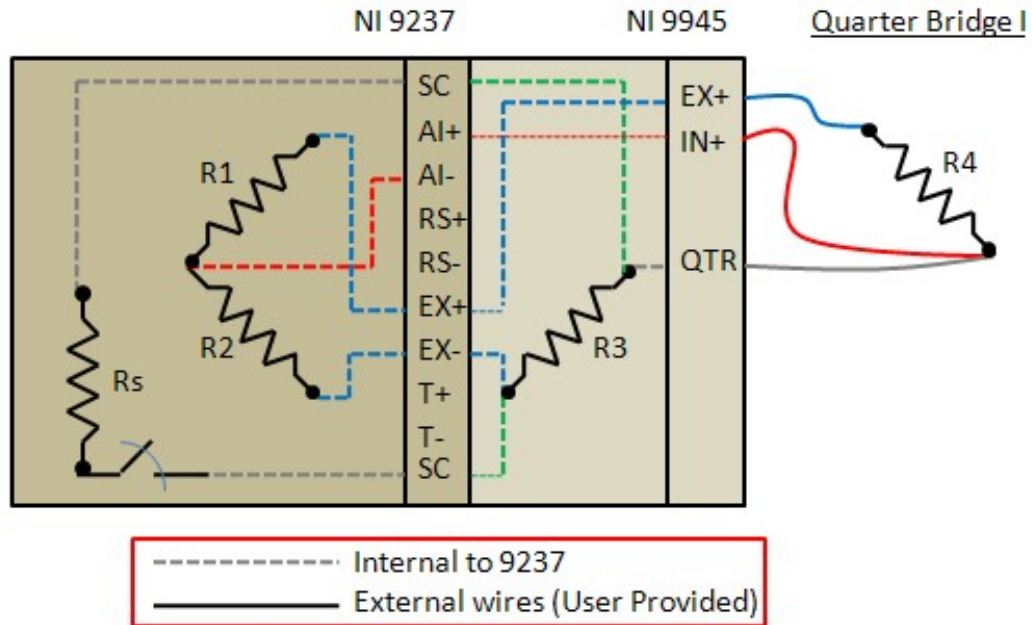
- Uma força que produza deformações possíveis de capturar em instrumentos de medição, conforme estipulado nos parâmetros de projeto descrito anteriormente.

Foram realizados alguns casos para a treliça com diferentes forças aplicadas no código numérico de MATLAB. Tendo em vista os parâmetros de projeto definidos anteriormente, optou-se por escolher uma massa de $40kg$, fixada no nó inferior da extrema direita da estrutura.

4.4 PLACAS DE AQUISIÇÃO

Para a aquisição e processamento do sinal emitido pelo extensômetro, foi usada uma placa NI 9237, da *National Instruments*. A placa, conforme o fabricante, tem uma meia ponte de resistores interna. Assim, é possível conectar outra metade de ponte a placa, com extensômetros, para realizar a aquisição. Isso a torna uma placa ideal para aquisição de sinais de extensômetros na configuração de 1/2 de ponte, porém ela ainda pode ser usada para aquisições em configuração de 1/4 de ponte, como é usado no presente trabalho. Essa configuração foi optada por ser a mais simples, com menos chance de falha. Neste caso porém, é necessário o uso de um resistor fixo, para poder completar a configuração. Na imagem 4.5, abaixo, retirada do site da fabricante, é feita uma ilustração da conexão realizada entre a placa de aquisição e os componentes externos.

Figura 4.5 – Esquema de ligação da placa de aquisição NI 9237 com o resistor e a extensômetro externo. No caso dessa placa, o resistor R3 ilustrado na figura é externo, diferentemente da placa NI 9945, também apresentada na ilustração.



Fonte: National Instruments.

Conforme apresentado na imagem 4.5, $R4$ é o extensômetro para aquisição.

Um imagem da placa ligada pode ser vista na imagem 4.6. Note que nesta imagem a placa esta conectada a um *chassi* de alimentação, que efetua tanto a conexão da placa a um microprocessador ou microcontrolador, quanto a sua alimentação de energia.

Figura 4.6 – Placa de aquisição NI9237 conectada ao *chassi* de alimentação.



Fonte: Autor.

4.5 MONTAGEM

A primeira parte a ser montada foi a treliça propriamente dita. Para a configuração inicial proposta, representada na figura 4.7, foram produzidas 12 elementos de $200mm$ e 5 elementos de $282mm$, sendo 10 do primeiro e 4 do segundo para a estrutura proposta. No capítulo B, em anexo, são apresentados desenhos técnicos de cada tipo de elemento, bem como as suas cotas devidamente dimensionadas. As extremidades foram planificadas com auxílio de uma morsa e os furos foram feitos em uma furadeira de mesa. Na imagem abaixo é apresentado um elemento de $200mm$ produzido.

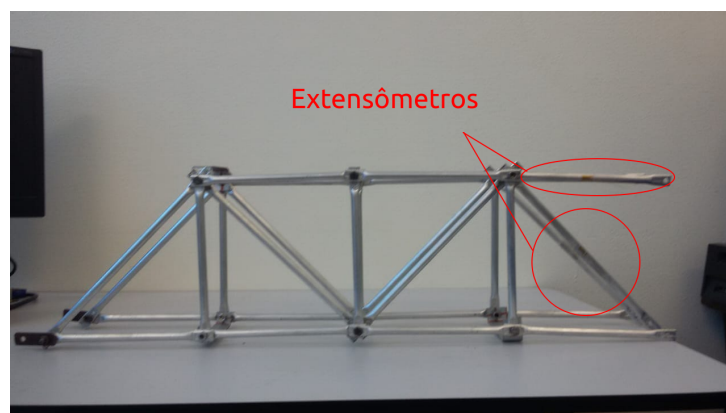
Figura 4.7 – Elemento de 200mm feito para a montagem da treliça.



Fonte: Autor.

Cada elemento foi unido na configuração desejada por meio de parafusos e porcas. Como a união não deve restringir a movimentação da estrutura, o parafuso foi apertado de modo a ficar um pouco frouxo, mas garantindo a união. Uma imagem da treliça completa montada é apresentada na figura 4.8.

Figura 4.8 – Sistema de treliça montado com os elementos manufaturados e indicação dos extensômetros.

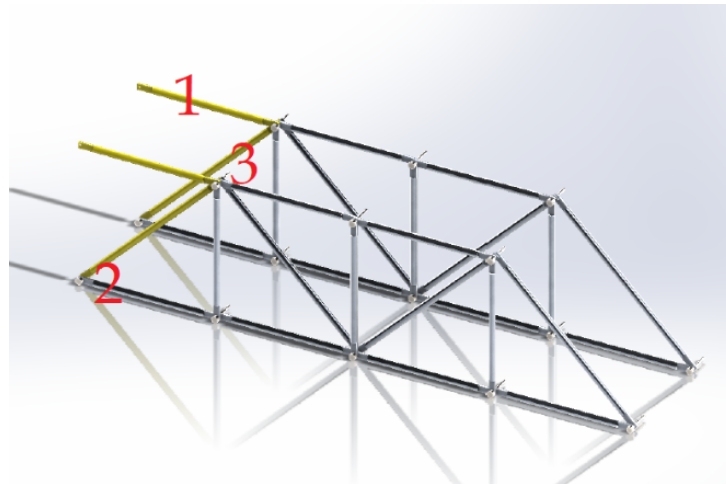


Fonte: Autor.

Como é possível perceber na imagem acima, os extensômetros foram todos posicionados nos elementos mais próximo da região de engaste. Isso se deu pois, como

evidenciado nos resultados numéricos, foram os elementos que sofreram a maior de deformação. Assim, seria mais simples processar os sinais do extensômetro, que apresentaria maior magnitude que se fossem posicionados mais distantes do engaste. Além disso, o uso dos dois extensômetros nos dois elementos diagonais espelhados pode servir de teste para detecção de assimetrias na treliça montada, uma vez que é esperado que os dois extensômetros resultem valores iguais. A figura 4.9 apresenta na color amarela as barras que foram consideradas para a fixação dos extensômetros. Na escrita vermelha é dada a numeração criada para cada extensômetro, que é usada na seção de resultados para comparação.

Figura 4.9 – Sistema de treliça montado com os elementos manufaturados e indicação dos extensômetros.

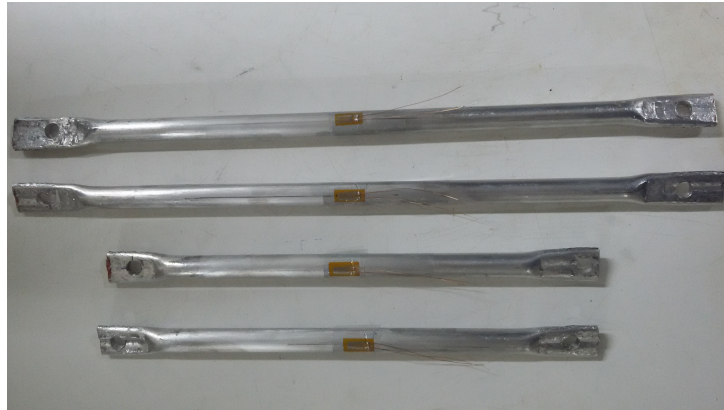


Fonte: Autor.

Em seguida, foi realizada a fixação dos extensômetros, bem como a escolha das barras para colagem dos sensores. Os elementos escolhidos foram, conforme indica a figura 4.9 acima, os primeiros diagonais, espelhados, do lado esquerdo e direito, bem como o primeiro horizontal superior, que também podem ser visualizados na imagem 4.8.

A colagem dos extensômetros se deu com o uso de uma cola rápida fria, do tipo Z70, da empresa alemã HBM, feita especificamente para a fixação de instrumentos de medição experimentais, conforme descrito no site do fabricante em HBM (2018). Conforme recomendado pelo fabricante, os elementos escolhidos para a colagem foram lixados, para remover rugosidades na superfície e em seguida limpos com acetona, para remover gorduras e matérias orgânicas que diminuiriam a influência da cola. Em seguida, a cola foi aplicada no elemento e o extensômetro foi fixado, sendo necessário manter pressão sobre o extensômetro por alguns minutos, afim de garantir a fixação correta. A figura 4.10 mostra todos os extensômetros colados em seus elementos. Finalizada a colagem, os elementos foram fixados novamente na treliça.

Figura 4.10 – Elementos da treliça com os extensômetro devidamente colados.

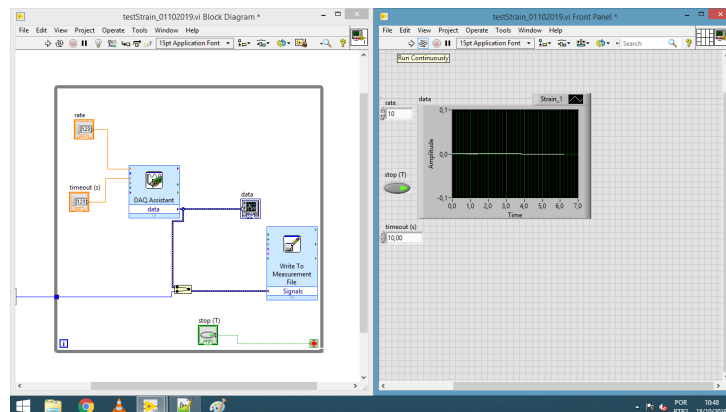


Fonte: Autor.

4.6 INTERFACE GRÁFICA

Para armazenar os dados de saída dos extensômetros, foi utilizado um microcomputador com LabVIEW 2018. Para tal, um diagrama de blocos foi montado para realizar as aquisições. Para o painel de controle, um gráfico em função do tempo foi adicionado, para apresentar os dados de saída em função do tempo. Na figura abaixo é apresentado tanto o diagrama de blocos quanto o painel de controle desenvolvido.

Figura 4.11 – Diagrama de blocos e painel de controle desenvolvido no LabVIEW.



Fonte: Autor.

O diagrama de blocos também salva os dados em função do tempo em um arquivo separado, para que os resultados possam ser analisados separadamente. Como mencionado nos capítulos anteriores, uma explicação mais detalhada do diagrama de blocos do LabVIEW é feita no apêndice A.

5 RESULTADOS

Nas seções seguintes é descrito em detalhes os procedimentos e resultados numéricos e experimentais, sendo apresentada também algumas conclusões preliminares dos resultados.

5.1 RESULTADOS NUMÉRICOS

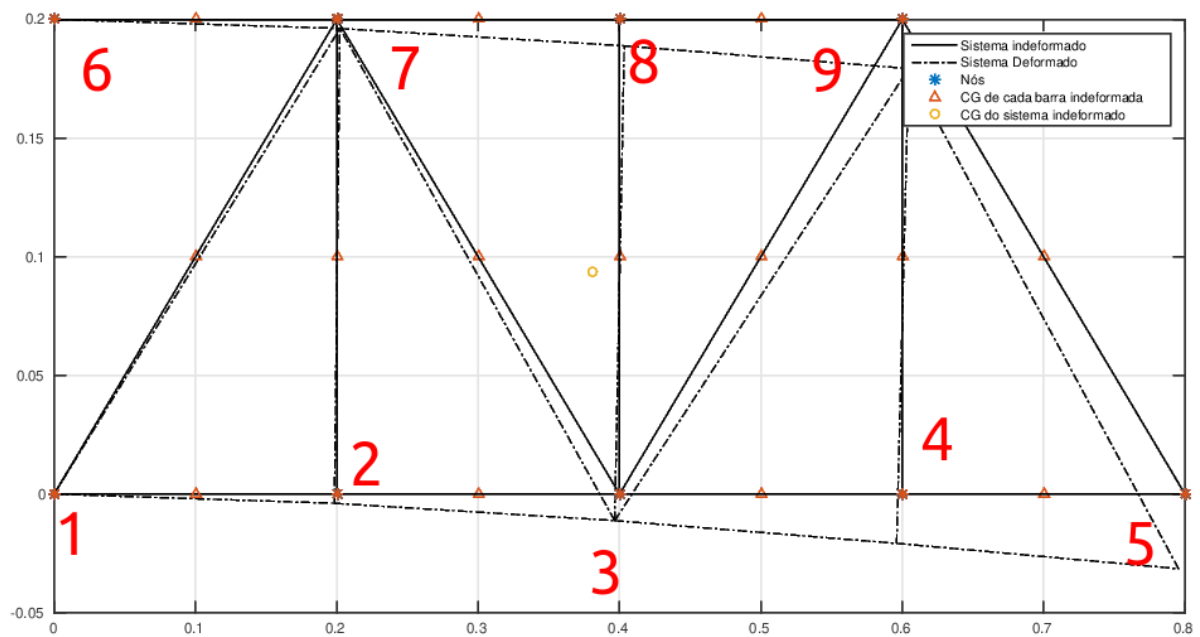
O procedimento numérico foi feito com base em um código de elementos finitos disponibilizado por (FERREIRA, 2008). No código, todo o procedimento básico já foi realizado. As modificações feitas no código foram para facilitar a entrada de dados, criando um tipo de "folha de entrada" para facilitar o *input* do usuário. Também foram criadas funções de pós processamento dos resultados, como o plote da estrutura deformada e não deformada e o plote de deformação de nós com variação da força aplicada, tanto no sentido horizontal e vertical.

Os dados de entrada do programa são

- Intensidade e posição da força aplicada (pelo menos uma)
- Comprimento das barras
- Propriedades do material escolhido (densidade e módulo de elasticidade)
- Propriedades da seção transversal do tubo (parede e raio externo)
- Definição dos nós de cada treliça
- A coordenada de cada nó do sistema
- Grau de liberdade onde as forças são aplicadas
- condições de contorno

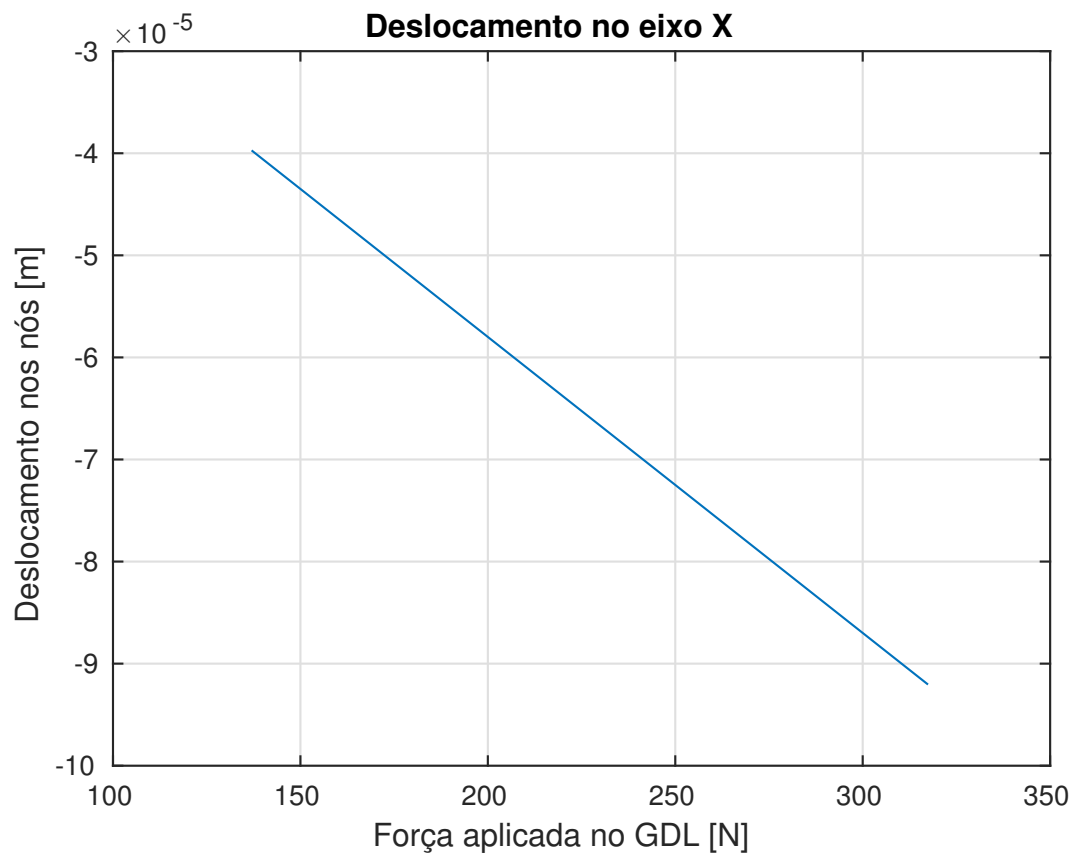
Depois de introduzir todos os dados de entrada para definir o sistema, o programa foi rodado. Os resultados obtidos são apresentados abaixo.

Figura 5.1 – Visualização da deformação obtida no sistema, a deformação foi ampliada 20 vezes para facilitar a visualização. Também é apresentada a numeração de cada nó da treliça.



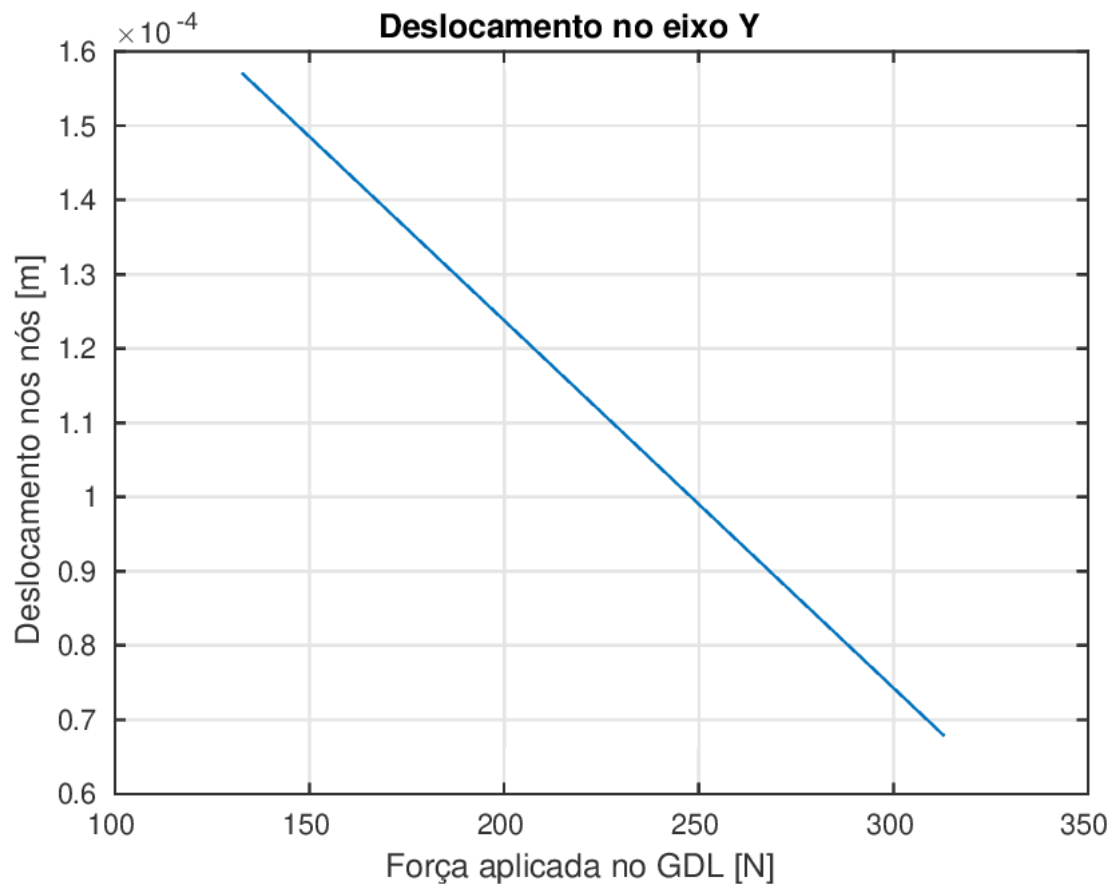
Fonte: Autor.

Figura 5.2 – Avaliação de deslocamento no sentido horizontal do nó com relação a intensidade da força obtida.



Fonte: Autor.

Figura 5.3 – Avaliação de deslocamento no sentido vertical do nó com relação a intensidade da força obtida.



Fonte: Autor.

Nos gráficos 5.2 e 5.3 é avaliado o ponto 7 da estrutura. Com uma carga externa de $319N$, o deslocamento horizontal é de aproximadamente $-9 \cdot 10^{-5}m$, enquanto o deslocamento vertical obtido é de $1.5 \cdot 10^{-4}m$. A deformação máxima total obtida é em torno de $1mm$, o que se encontra dentro do parâmetro mínimo estipulado no projeto.

O código também apresenta as tensões submetidas a cada elemento. Como era esperado, as tensões máximas foram capturadas nos elementos que apresentam engaste nas condições de contorno. Como o engaste impede o movimento completo do elemento, toda a energia é acumulada em tensão interna da peça.

Como os resultados experimentais obtidos pelos extensômetros são em função da deformação e não do deslocamento, como é calculado no código, uma conversão dos resultados numéricos foi feita e apresentada na tabela abaixo para melhor visualização.

Tabela 5.1 – Resultados numéricos sintetizados em uma tabela.

Resultados Numéricos			
carga (N)	deformação(mm/mm)		
	Ext. 1	Ext. 2	Ext. 3
149	4,19E-04	2,82E-04	2,82E-04
282	7,93E-04	5,00E-04	5,00E-04
325	9,14E-04	6,40E-04	6,40E-04

Neste caso como a treliça simulada é apenas 2D, os extensômetros 2 e 3 serão os mesmos.

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Previamente ao experimento, foi realizada uma calibração de cada extensômetro, já com a treliça fixada na bancada. Também foi feita uma medição com carga nula, afim de usar o sinal de saída nessa condição como padrão para o zero da escala. O procedimento experimental se baseou na medição de cada extensômetro um por vez, realizando um total de três medições em três condições diferentes de carga para cada sensor. As três condições de carga realizadas foram com massas crescentes de 14.9kg , 28.2kg e 32.5kg . A imagem abaixo 5.4 apresenta a treliça em teste com a carga máxima medida.

Figura 5.4 – Fotografia tirada durante um dos ensaios em que a treliça é submetida a carga máxima medida.



Fonte: Autor.

Para melhor visualizar os resultados obtidos para cada teste a seguinte tabela foi

montada, no mesmo padrão da tabela dos resultado numéricos. Ela indica o valor de deformação obtido para cada extensômetro, para cada condição de carga. Neste caso o extensômetro 1 representa aquele do elemento horizontal, enquanto o extensômetro 2 indica o fixado no elemento diagonal direito visto de cima para baixo e o extensômetro 3 o do elemento diagonal esquerdo, do mesmo ponto de vista do anterior.

Tabela 5.2 – resultados experimentais sintetizados em uma tabela.

Resultados Experimentais			
carga (N)	deformação(mm/mm)		
	Ext. 1	Ext. 2	Ext. 3
149	4,47E-04	3,14E-05	-2,86E-04
282	7,21E-04	1,15E-04	-3,26E-04
325	8,03E-04	1,29E-04	-3,80E-04

Como é possível perceber, os extensômetros 2 e 3 não apresentaram mesmo valor de deformação, como seria esperado em um caso ideal. Essa diferença pode ser relacionada à assimetria da treliça montada. Também é possível relacionar à aplicação assimétrica da carga, conforme é apresentada na imagem 5.5, abaixo. A treliça apresenta um desnível entre os seus dois lados na sua deformação máxima, esse desnível se deu inicialmente as erros de montagem, que foram acentuados na aplicação da carga externa. Ao final, essas duas falhas foram os principais fatores que causaram as disparidades de resultados numéricos e experimentais.

Figura 5.5 – Fotografia tirada durante um dos ensaios em que a treliça é submetida a carga máxima medida. Neste caso um desnível é presente entre os lados direito e esquerdo da estrutura.



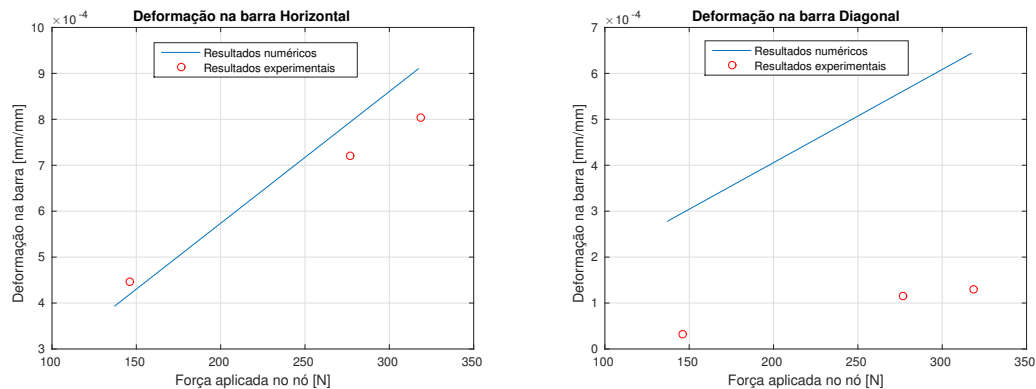
Fonte: Autor.

Também é possível observar que o terceiro extensômetro apresentou valores negativos de deformação, ou seja, o elemento sofreu compressão. Esse resultado, novamente pode ser relacionado à montagem da treliça. Um dos possíveis motivos é o excesso de

torque aplicado aos parafusos de união dos elementos, que produziriam uma união mais semelhante ao um engaste e não seria livre para rotação, como é o tipo de união em estruturas treliçadas.

Finalmente, é apresentado abaixo os resultados numéricos e experimentais em um mesmo gráfico, para melhor comparação dos dados.

Figura 5.6 – A esquerda as deformações experimental e numérica da barra horizontal. A direita as deformações experimental e numérica da barra diagonal.



Fonte: Autor.

Como é possível perceber pelos gráficos, os resultados obtidos para a barra horizontal se encontram semelhantes, dentro de uma margem esperada. Os resultados da barra diagonal porém, apresentaram bastante diferença entre seus resultados numéricos e experimentais. Os motivos da grande diferença são discutidos nos subcapítulos seguintes.

6 CONCLUSÃO

Com uma análise dos resultados experimentais e dos resultados numéricos obtidos, é possível tecer alguns comentários sobre o que foi obtido. Primeiramente, o resultado experimental mais chamativo foi dos extensômetros 2 e 3. Como explicado no capítulo anterior, previamente ao experimento era esperado que ambos os sensores resultassem valores semelhantes de deformação, o que não foi o caso de acordo com a tabela 5.2. Durante os testes foi possível perceber uma assimetria entre os dois lados, que se formou tanto devido a manufatura irregular de cada barra, quanto a uma aplicação de carga durante os testes não simétrica.

Quanto a fabricação de cada elemento de treliça, conforme foi explicado no capítulo de montagem, cada elemento foi planificado nas suas extremidades com uso de uma morsa manual. Esse processo resultava em uma planificação levemente inclinada para um lado, que quando montada em todo o sistema da treliça, resultava em um somatório da inclinação de cada elemento, deixando a treliça assimétrica.

Além disso, outra questão de montagem que contribuiu a disparidade de valores foi quanto ao aperto dos parafusos para a produzir a união entre os elementos da treliça. Conforme é explicado no capítulo de revisão bibliográfica, a união da treliça permite apenas deformações normais nos elementos, ou seja, só irão existir tensões de compressão ou tração. Esse tipo de união, se dá pelo uso de um parafuso com porca levemente torcidos, garantindo a união entre os elementos sem restringir seus movimentos. Durante o experimento porém, as uniões continham demasiado aperto nos parafusos, que resultou em uma união mais semelhante a um engaste ou uma soldagem.

Essa explicação também pode ser usada para os resultados negativos obtidos para o extensômetro 3. Como a união entre os elementos era demasiada, o elemento em que o extensômetro era montado acabou sofrendo compressão.

Todavia, tendo em consideração os objetivos específicos e gerais definidos no capítulo 2. O trabalho conseguiu atingir todas suas metas. O código em MATLAB foi generalizado a fim de facilitar o uso, a treliça foi devidamente fabricada e montada, a instrumentação dos extensômetros foi realizada e os resultados numéricos e experimentais comparados.

7 TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo será feita uma breve discussão de possíveis trabalhos futuros referentes ao tema do trabalho, com base em falhas que foram obtidas neste atual. Inicialmente, o autor recomenda duas grandes mudanças que podem ser feitas em trabalhos futuros.

A primeira seria em usar outro tipo de elemento para realizar o nó dos elementos treliçados. O uso de rolamento seria o mais indicado, pois garante liberdade para os as barras se deslocarem, porém mantendo a união entre os mesmos.

A segunda mudança seria em utilizar uma chapa ou barra de seção quadrada como elemento treliçado. Dessa maneira não seria necessário realizar as planificação nas extremidades, que produziram irregularidades na estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVEZ, R. M. Água D. Modelo experimentais para apoio ao ensino da mecânica estrutural. In: TÉCNICO LISBOA. [S.l.], 2015.

COLENCI, A. T. **O ensino de engenharia como uma atividade de serviços: a exigência de atuação em novos patamares de qualidade acadêmica**. 2000. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2000.

DINIS, F. J. V. **Sistema de instrumentação de baixo custo compatível com o LabVIEW**. 2010. Tese (Doutorado) — Universidade da Madeira, 2010.

DONALDSON, B. K. **Analysis of aircraft structures: an introduction**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2008.

EWINS, D. J. **Modal testing: theory and practice**. [S.l.]: Research studies press Letchworth, 1984. v. 15.

FERREIRA, A. J. **MATLAB codes for finite element analysis: solids and structures**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2008. v. 157.

HBM. **Z70: Super cola de cura a frio para testes experimentais**. Home. HBM, 2018. Acesso em 06 nov. 2019. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/2962/z70-super-cola-para-strain-gauge/>>.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. [S.l.]: Pearson Educación, 2010.

LABVIEW FOR LOOPS AND WHILE LOOPS EXPLAINED. [S.l.]. Acessado em 11 dez. 2019. Disponível em: <<http://www.ni.com/product-documentation/7588/en/>>.

LEITE, A. C. S.; SILVA, P. A. B.; VAZ, A. C. R. A importância das aulas práticas para alunos jovens e adultos: uma abordagem investigativa sobre a percepção dos alunos do proef ii. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)**, SciELO Brasil, v. 7, n. 3, p. 166–181, 2005.

MARTINS, P. R. O. et al. Instrumentação de bancada didática para análise estrutural de treliças planas. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA CONEM. [S.l.], 2016.

MEASUREMENTS I - 1/4 BRIDGE STRAIN GUAGE LABVIEW TUTORIAL. [S.l.]. Acessado em 10 dez. 2019. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=itJxmz5AOOW&t=655s>>.

MERIAM, J.; KRAIGE, L. Mecânica para engenharia: Estática-v. 1. 6. **ED. RIO DE JANEIRO: LTC**, 2011.

PHILPOT, T. A. **Mechanics of materials: an integrated learning system**. [S.l.]: J. Wiley, 2008.

POPOV, E. P. et al. Introduction to mechanics of solids. Prentice-Hall, 1968.

RODRIGUES, M.; JURACH, P.; GIORDANI, R. **Bancada Didática de Pneumática**. 2003. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso), 2003.

SCIAMMARELLA, C. A.; SCIAMMARELLA, F. M. **Experimental mechanics of solids**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.

USING THE DAQ ASSISTANT TO AUTOMATICALLY GENERATE LABVIEW CODE. [S.l.]. Acessado em 10 dez. 2019. Disponível em: <<http://www.ni.com/tutorial/4656/en/>>.

WORLDWIDE CDIO INITIATIVE. [S.l.]. Acessado em 04 dez. 2019. Disponível em: <<http://www.cdio.org/>>.

APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO EM LABVIEW

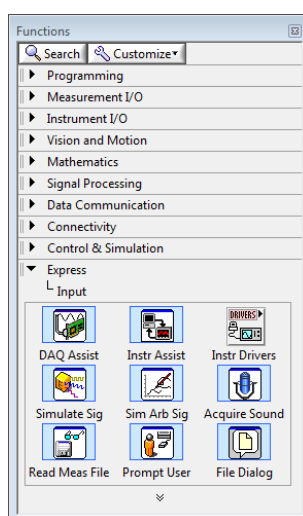
O LabVIEW, como descrito nas seções referentes a ele, apresenta duas janelas principais, uma de diagrama de blocos e outra de painel. Na primeira é adicionado as funções de trabalho, que produzirão o algoritmo do programa. A segunda janela atua como função da primeira e apresenta telas ou gráficos com os resultados de saída do programa. Assim, de maneira simples, é criado inicialmente o programa com o diagrama de blocos e sua execução e resultados são apresentados no painel. O programa inteiro, com o diagrama de blocos e os painéis de controle são definidos pela fabricante como VI (*Virtual instruments*). Muitos materiais e tutoriais sobre esse assunto são disponíveis na internet, porém os mais úteis para o autor foram o vídeo Measurements I - 1/4 Bridge Strain Gauge LabView Tutorial () e o site da National Using the DAQ Assistant to Automatically Generate LabVIEW Code ().

O objetivo do algoritmo do presente trabalho era de adquirir o sinal de deformação de um extensômetro, processar e armazenar em um arquivo na memória.

Embora seja possível realizar o diagrama de blocos inteiramente do início, o LabVIEW possui um assistente de criação. Nele, o usuário define apenas os dados que o programa irá receber, a porta de entrada da placa de aquisição em que os resultados irão chegar e a calibração inicial dos instrumentos de medição. Em seguida o próprio LabVIEW cria todo o diagrama de blocos e os painéis de saída.

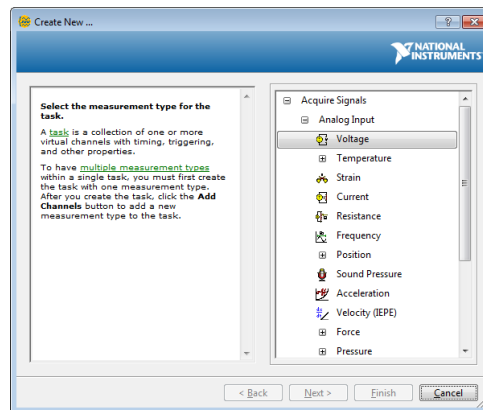
O bloco é nomeado *DAQ Assistant*, e pode ser encontrado abrindo um novo VI e acessando a janela diagrama de blocos e escolhendo *Functions* → *Express* → *Input* → *DAQ Assistant*. A figura A.1 abaixo ilustra o procedimento acima.

Figura A.1 – Acessando o DAQ Assistant.



Com a bloco do DAQ posicionado, uma nova janela abrirá, pedindo para o usuário definir o tipo de sinal que será adquirido. Para o presente trabalho, *Strain*, ou deformação, foi escolhido como o sinal. A figura A.2 apresenta a janela de sinais.

Figura A.2 – Janela de sinais medidos.

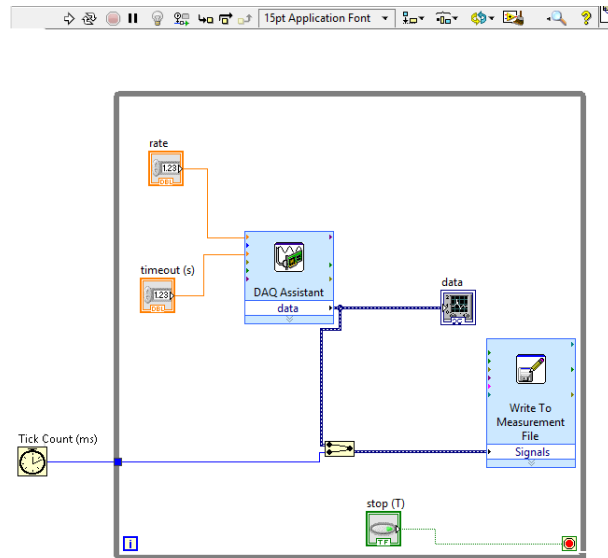


Fonte: <http://www.ni.com/tutorial/4656/en/>.

Em seguida é aberta outra janela em que o software pede a porta de entrada da placa de aquisição em que o extensômetro é conectada. A placa 9237, possui quatro entradas, *A0*, *A1*, *A2* e *A3*. Finalmente, a janela de configuração principal é aberta, onde o usuário pode definir, entre outras coisas, os níveis máximo e mínimo de sinal adquirido, calibrar o equipamento e realizar testes iniciais de aquisição. Para o caso de extensômetros, é possível definir também a configuração da ponte de *Wheatstone* que será usada. Nesse trabalho foi definido o uso de 1/4 de ponte. Clicando no botão *OK*, o LabVIEW montará todo o diagrama de blocos, com as caixas de entrada e saída como funções do bloco principal DAQ Assistant, que servirá de bloco principal para código.

Para o código realizado, diversos blocos que são criados pelo LabVIEW foram deletados pois não são cruciais. Abaixo é apresentada novamente a figura A.4, porém aplicada no diagrama do blocos do VI

Figura A.3 – Diagrama de Blocos do VI feito para o trabalho.



Fonte: Autor.

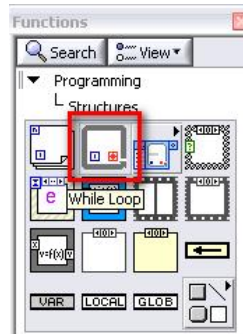
Nela é possível ver que apenas os blocos *rate* e *timeout* estão presentes para a entrada e como saída apenas o bloco *data*. Os dois primeiros definem a taxa de aquisição e o tempo total de operação da medição, respectivamente. O último cria um gráfico na janela de painel onde é exibido o sinal adquirido ao longo do tempo. É interessante ressaltar que este último possui uma taxa de aquisição relativa à exposição dos dados no gráfico, independente da taxa de aquisição principal, dada no bloco *rate*.

Ainda é necessário adicionar ao diagrama de blocos a função para armazenar os dados e um *loop* ao sistema completo, para repetir de modo contínuo. Ambas as funções não são criados no DAQ Assistant.

O primeiro é simplesmente um bloco que pode ser encontrado na paleta de funções do LabVIEW. Ele pode ser conectado ao mesmo sinal de saída do DAQ Assistant que liga ao bloco *data*, exatamente como indicado na imagem A.4. Como é possível perceber, os dados que são enviados ao bloco que realiza o armazenamento são concatenados com um outro bloco, *time count*, que realiza a contagem precisa do tempo de execução do código. Esse processo é necessário pois os dados de saída do DAQ são apenas os dados de deformação enviados pelos extensômetros.

O *loop* usado no programa é do tipo *while*, que realizará a iteração até que determinada condição seja cumprida. Nesse caso, a condição é quando o usuário aperta o botão de parada. o bloco pode ser encontrado, conforme indicado no site LabVIEW For Loops and While Loops Explained () na paleta de funções, em *Programming* → *Structures* → *While Loop*, conforme indicado na imagem abaixo.

Figura A.4 – Palete com a iteração While.

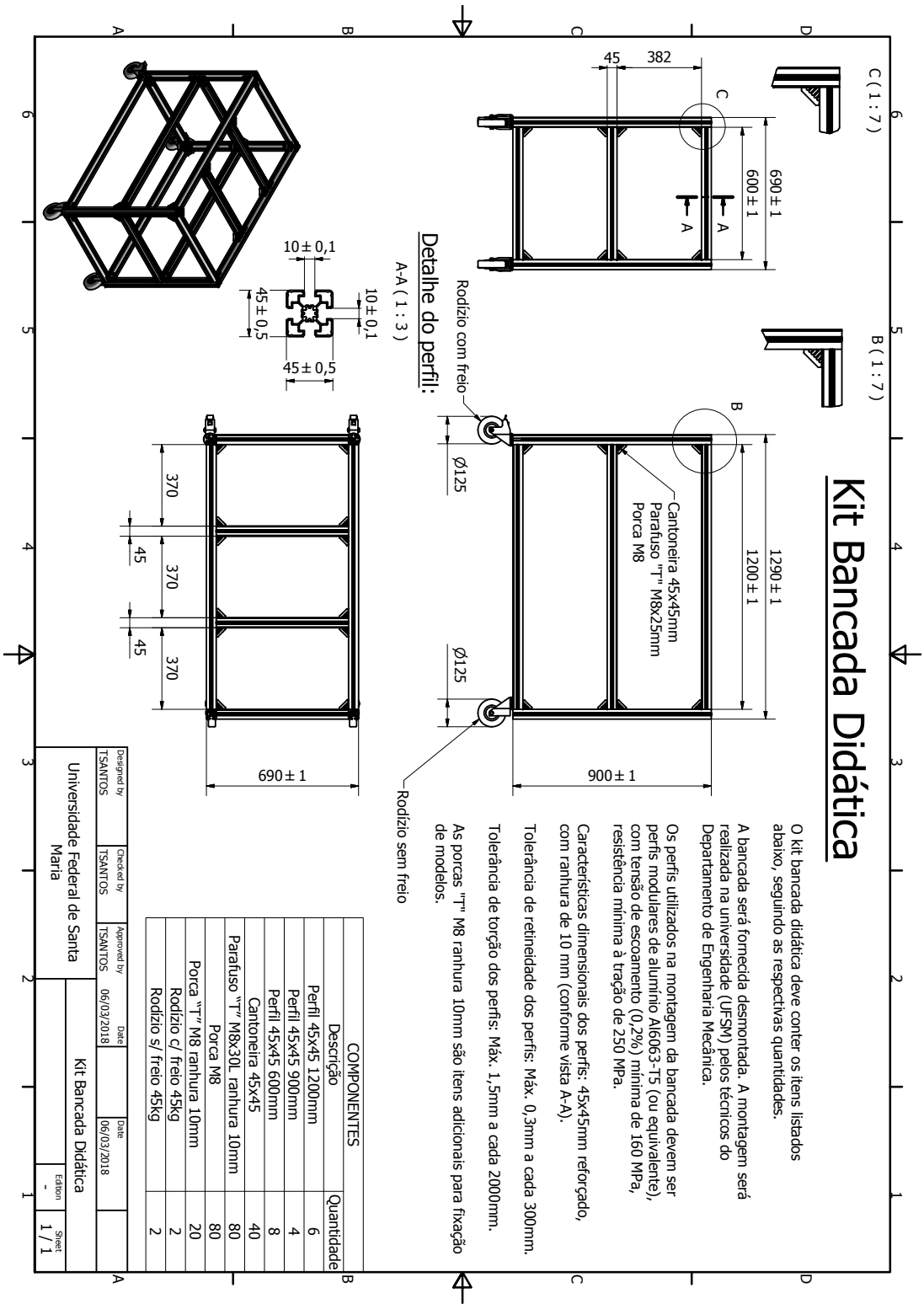


Fonte: <http://www.ni.com/product-documentation/7588/en/>.

Em seguida é necessário arrastar o *loop* de modo que todos os blocos, com exceção do bloco de contagem, estejam dentro da iteração. Por fim, é preciso definir a condição de parada da função. Essa condição é representada pelo círculo vermelho no extremidade inferior direita do *loop*. Qualquer bloco que seja conectado ao círculo será considerado como condição de parada. Nesse caso foi colocado um botão, ou seja, quando pressionado, enviará sinal para a condição de parada e o *loop* cessará. O código pode ser rodado no botão *Run Continuously*, na aba superior na janela de diagrama de blocos do VI.

ANEXO A – DETALHE E DIMENSÕES DA BANCADA

Figura A.1 – Desenho técnico da bancada didática.



Fonte: Tiago dos Santos.

ANEXO B – DETALHE E DIMENSÕES DA ESTRUTURA TRELIÇADA

Figura B.1 – Desenho técnico do elemento horizontal e vertical.

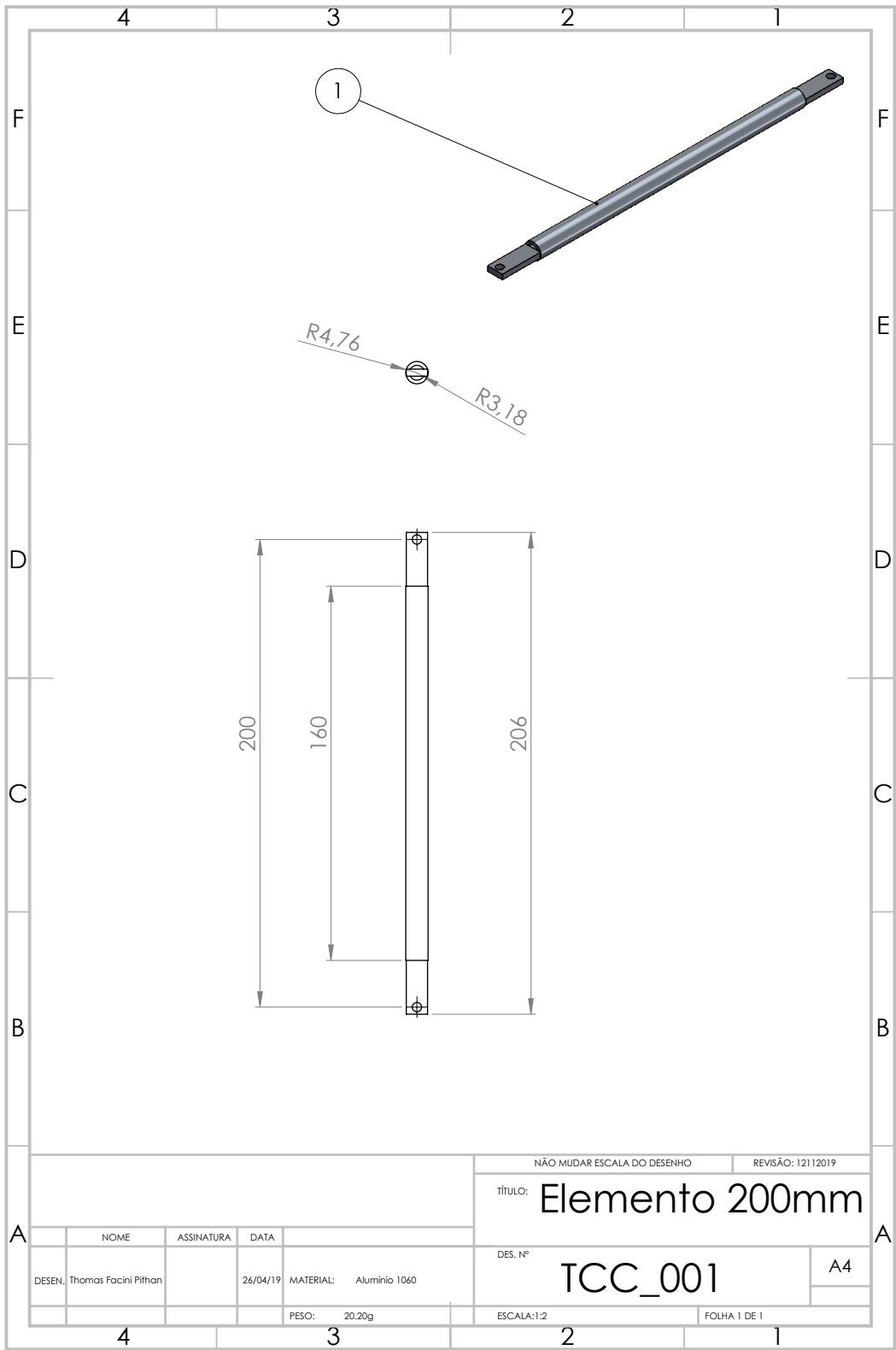
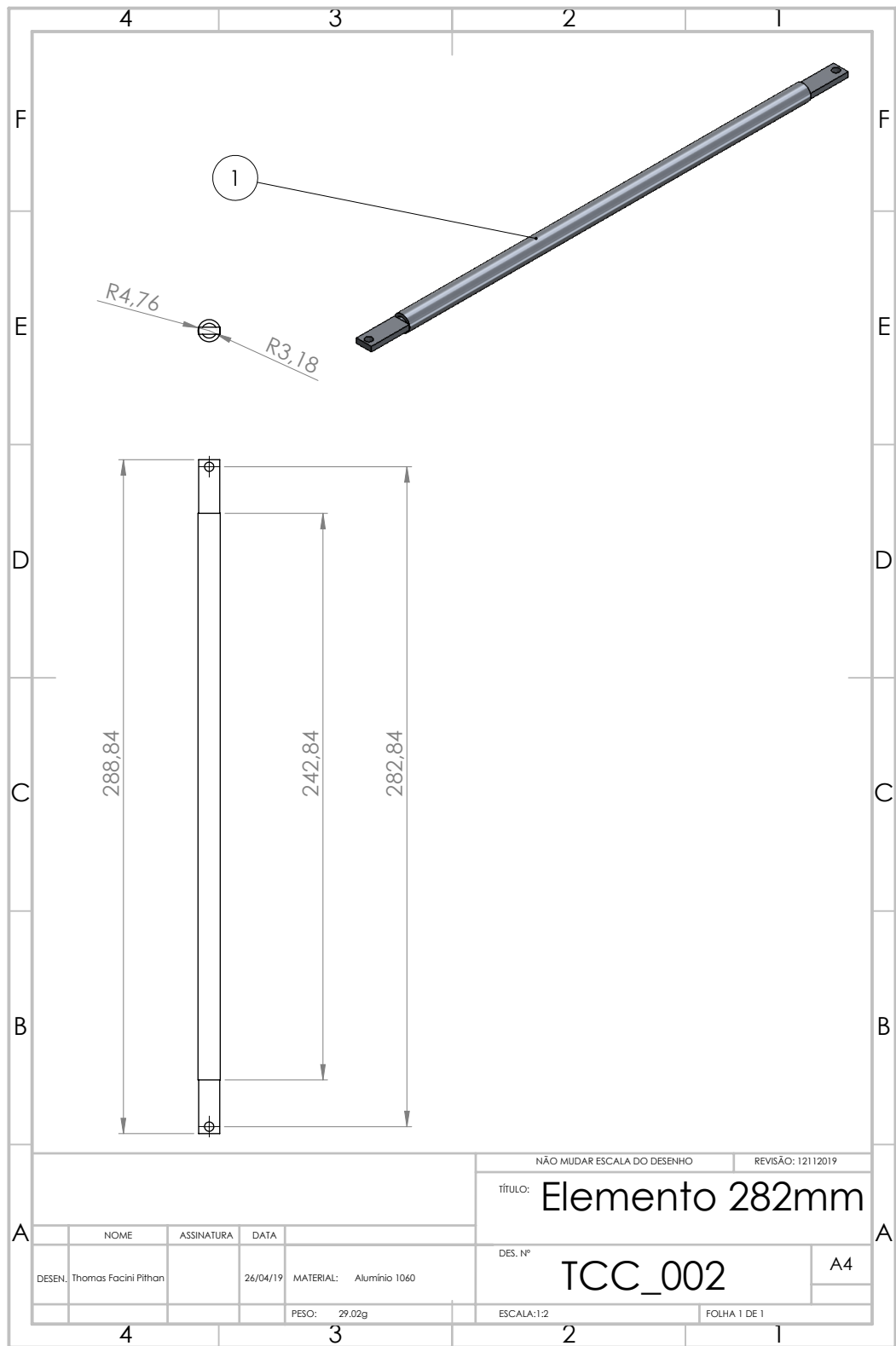
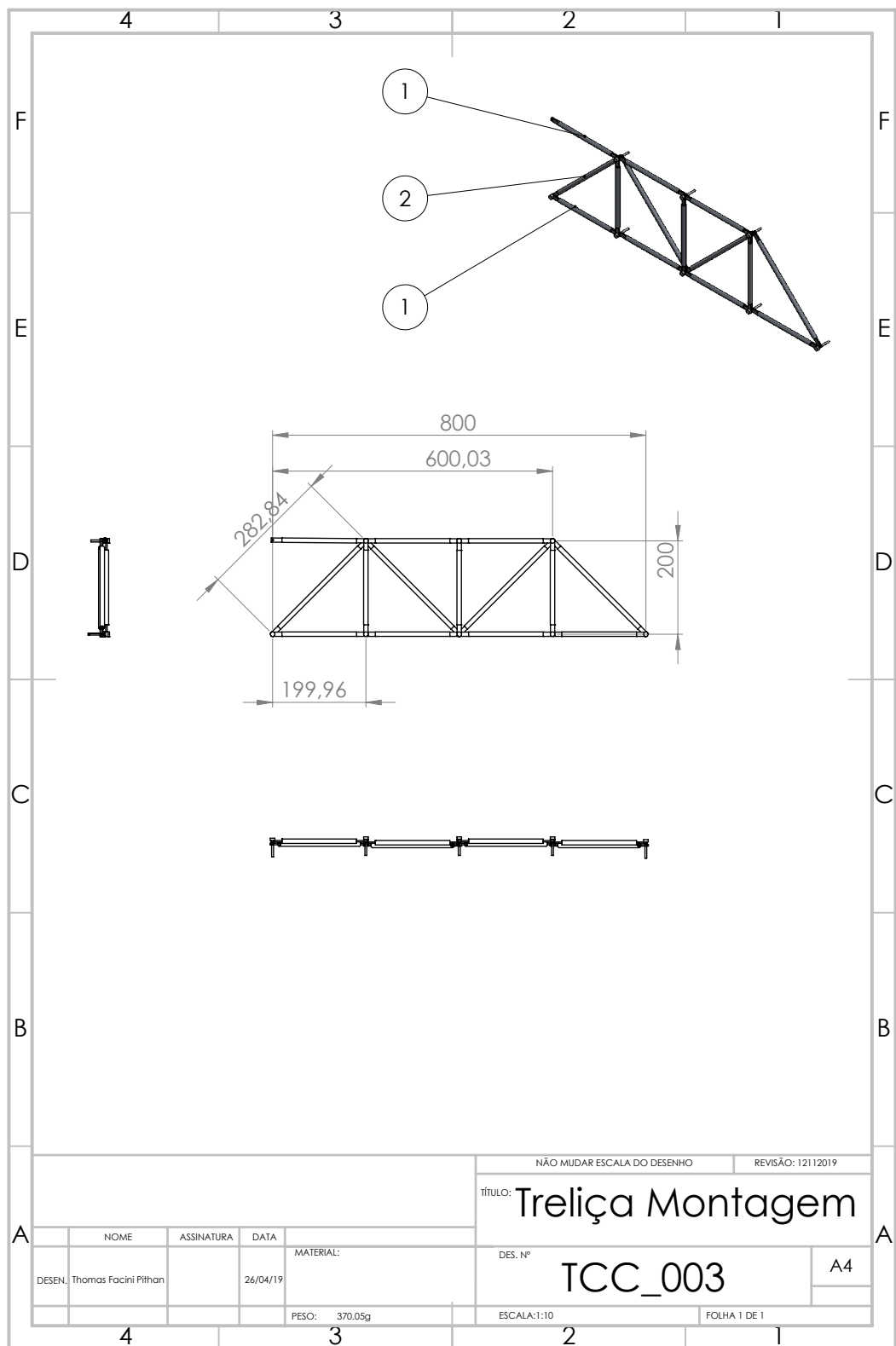


Figura B.2 – Desenho técnico do elemento diagonal.



Fonte: Autor.

Figura B.3 – Desenho técnico da estrutura treliçada.



Fonte: Autor.