

ESTUDO COMPARATIVO DA PROXIMIDADE E QUALIDADE DOS RESULTADOS ENTRE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE BAIXO CUSTO COM STRAIN GAUGES E AS SOLUÇÕES NUMÉRICA E ANALÍTICA

Walter Mota da Fonseca^{1*}, Wender Henrique de Souza Araújo², Douglas Abreu da Rocha³, Francisco Gomes Soares Sanches Manso⁴, Alexandre Augusto Moraes Nogueira⁵

RESUMO

FONSECA, W., M.; ARAÚJO, W., H., S.; ROCHA, D., A.; MANSO, F., G., S., S.; NOGUEIRA, A., A., M. Estudo comparativo da proximidade e qualidade dos resultados entre um sistema de medição de baixo custo com strain gauges e as soluções numérica e analítica. **Perspectivas Online: Exatas & Engenharia**, v. 11, n. 31, p. 1-23, 2021.

O trabalho de análise experimental de tensões mecânicas em peças, na maioria dos casos, utiliza sistemas de aquisição de dados com expressivo custo de mercado. O artigo apresenta um estudo comparativo entre testes de tensões mecânicas utilizando a técnica experimental, numérica e analítica em corpos de prova fabricados em chapas de aço, nas condições com furo e ausência de furo. Dois modelos virtuais em 3D idênticos as chapas reais foram construídos e realizadas simulações numéricas de acordo com valores prescritos de força e condições de contorno. Um sistema proposto de baixo custo para aquisição dos sinais numéricos pelos *strain gauges* foi utilizado e definida as condições de contorno com base no modelo virtual. No método analítico, para o estudo comparativo, foram utilizadas às equações constitutivas da resistência dos materiais baseadas no regime linear elástico do material sendo os resultados apresentados em porcentagem de erro relativo à formulação analítica, onde para resultado positivo o valor é inferior ao analítico e resultado negativo o valor é

superior. Para os corpos de prova na condição sem furo o máximo erro relativo para o método numérico foi de -34 % com carregamento de 1,4 N e o experimental foi de 25,8 % com carregamento de 1,4 N. Para os corpos de prova na condição com furo, o máximo erro relativo para o método numérico foi de -87,8 % com carregamento de 1,4 N e o experimental foi de 30,7 %, ambos no carregamento de 10,4 N. Erros relativos mínimos de 0,27 % e 0,7 % foram encontrados utilizando o método experimental. Embora um sistema de aquisição de dados estiver apto a trabalhos desde ambientes controlados até complexos, como mineração, de acordo com os resultados, percebe-se que temperatura, umidade relativa do ar e propriedades mecânicas do material, influência nos valores mensurados pelo sistema de aquisição de dados. Entretanto, apesar das variações do processo, o sistema proposto de aquisição de dados de baixo custo apresentou boa aproximação em relação aos métodos numérico e analítico.

Palavras-chave: tensões; mecânica; experimental; numérico; analítico.

COMPARATIVE STUDY OF PROXIMITY AND QUALITY OF RESULTS BETWEEN A LOW-COST MEASUREMENT SYSTEM WITH STRAIN GAUGES AND NUMERIC AND ANALYTICAL SOLUTIONS

Walter Mota da Fonseca^{1}, Wender Henrique de Souza Araújo², Douglas Abreu da Rocha³, Francisco Gomes Soares Sanches Manso⁴, Alexandre Augusto Moraes Nogueira⁵*

ABSTRACT

FONSECA, W., M.; ARAÚJO, W., H., S.; ROCHA, D., A.; MANSO, F., G., S., S.; NOGUEIRA, A., A., M. Estudo comparativo da proximidade e qualidade dos resultados entre um sistema de medição de baixo custo com strain gauges e as soluções numérica e analítica. **Perspectivas Online: Exatas & Engenharia**, v. 11, n. 31, p. 1-23, 2021.

The work of experimental analysis of mechanical stresses in parts, in most cases, using data acquisition systems with significant market cost. The article presents a comparative study between testicles of mechanical stresses using an experimental, numerical, and analytical technique in specimens manufactured in steel sheets, borehole conditions, and borehole temperature. Two identical 3D virtual models as real plates were built, and numerical simulations were performed according to values of force and boundary conditions. A proposed low-cost system for the acquisition of numerical signals by strain gauges was used and defined as boundary conditions based on the virtual model. In the analytical method, for the comparative study, the equations constituting the strength of the materials were used based on the linear elastic regime of the material, the results being obtained in percentage of error relative to the analytical relationship, where for positive result the value is lower than the

analytical and result negative the value is higher. For specimens in the condition without hole, the maximum relative error for the numerical method was -34% with 1.4 N loading and the experimental was 25.8% with 1.4 N loading. Proof in the bore condition, the maximum relative error for the numerical method was -87.8% with 1.4 N loading, and the experimental was 30.7%, both not loading 10.4 N. 0, 27%, and 0.7% were found using the experimental method. Although a data acquisition system can work from controlled to complex environments, such as mining, according to the results, it is noticed that temperature, relative humidity of the material, and materials mechanical properties of the material influence the values measured by the acquisition system of data. However, despite the variations in the process, the proposed low-cost data acquisition system presents a good approximation in relation to the numerical and analytical methods.

Keywords: stress; mechanics; experimental; numeric; analytical.

^{1*}WJ Projetos – Rua: Professor Aimoré Dutra, 589, São João Batista, Belo Horizonte, MG, CEP: 31520-050, Brasil;

²Rua: José Pedro de Araújo, 960, Cinco, Contagem, MG, CEP: 32341-410, Brasil;

³Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica – PUC Minas – Av.: Itáú, 525, Dom Cabral, Belo Horizonte, MG, Brasil;

⁴Kotchergenkeno Engenharia – Rua: Levindo Lopes, 357, 14º andar, Savassi, Belo Horizonte, MG, Brasil;

⁵Rua: Paraisópolis, 122, Horto, Belo Horizonte, Brasil.

*e-mail: waltmec@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

Segundo Floyd (1984) com o rápido aumento na potência de processamento dos computadores digitais na última década, a abordagem por análise numérica direta para projetos de engenharia é adotada rotineiramente. Entretanto, no campo da análise de tensão linear elástica, em particular, o método dos elementos finitos é utilizado quase indiscriminadamente, e os resultados produzidos são frequentemente aceitos sem questionar, mesmo que uma determinada abordagem teórica forneça uma solução aparentemente satisfatória, a total confiança na solução não se justifica, a menos que a abordagem teórica tenha sido validada, seja contra outra técnica teórica independente ou contra experimento, (FLOYD, 1984).

Erklig et al. (2014) realizaram um estudo com o objetivo de determinar os pontos de localização dos extensômetros nos problemas de concentração de tensão, incluindo resultados experimentais e numéricos. Uma estrutura mecânica recebeu instrumentação com *strain gauges* e um modelo virtual foi analisado por meio do método dos elementos finitos. A análise de elementos finitos foi realizada pelo *software* ANSYS®. Foi demonstrado que os resultados dos estudos experimentais e numéricos estavam em boa concordância.

Silva et al. (2019) apresentaram uma metodologia para a medição de deformação por meio de *strain gauges*, onde a aquisição de dados é feita usando um módulo eletrônico Arduino®, modelo UNO, com uma ponte de Wheatstone e um conversor analógico-digital (ADC) externo ao Arduino®. Para a validação do sistema de medição proposto, foram realizados ensaios com uma chapa de alumínio na configuração de viga isostática aplicando forças na extremidade oposta ao engaste e instrumentação feita por *strain gauge*. Os resultados experimentais foram comparados com os métodos analítico e numérico e obtiveram precisão satisfatória.

1.1 Método analítico

Segundo Pilkey (2005), as tensões e deformações axiais estão relacionadas entre si pelas propriedades do material. Equações dessa natureza são conhecidas como “leis materiais” ou, no caso de sólidos no regime linear elástico, como a lei de Hooke, (PILKEY, 2005).

Para um estado tridimensional de tensão e deformações axiais, a lei de Hooke considerando o material com um comportamento isotrópico no regime linear elástico, é definida pelas Equações 1, 2 e 3.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (3)$$

Onde: ε_x , ε_y e ε_z são os valores das deformações nas direções normais em coordenadas cartesianas x , y e z , E é o módulo de elasticidade do material, σ_x , σ_y e σ_z são os valores das tensões nas direções normais a x , y e z e ν é o coeficiente de Poisson do material.

O cálculo dos valores das deformações transversais, ou seja, na direção “ z ” pela metodologia analítica são determinados por meio da Equação 4.

$$\varepsilon_z = -\nu \left(\frac{My}{EI_z} \right) \quad (4)$$

Onde: M é o momento fletor, y é a distância entre a linha neutra da seção transversal e o ponto de interesse localizado na superfície da peça e I_z é o momento de inércia em torno do eixo “z”.

Os cálculos dos valores das tensões axiais na chapa são determinados pela metodologia de formulação analítica, neste caso, aplicando a relação ao resultado analítico como erro relativo no estudo de comparação dos valores experimental e numérico. A Equação 5 fornece os valores calculados pelo método analítico da tensão de flexão (σ) utilizado no presente trabalho.

$$\sigma = \frac{My}{I_z} \quad (5)$$

De acordo com Peterson (1974), um caso fundamental de concentração de tensão é o estudo do campo de tensão em torno de um furo circular em uma chapa de espessura fina em relação ao comprimento e largura, que é submetida à tensão uniaxial no plano da chapa. O sistema de coordenadas polares é então utilizado para realização dos cálculos do campo de tensões em torno de um furo, como apresentado na Figura 1.

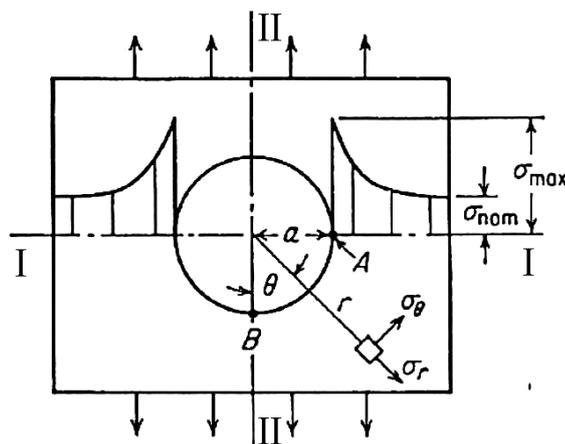


Figura 1: Campo de tensões devido à presença de um furo circular em uma placa. (Fonte: adaptado de Dieter, 1981).

Segundo Kenderová (2012), a solução analítica de Kirsch (1898) para o estado plano de deformação e tensões principais ao redor de um furo, na forma geométrica de uma circunferência de raio “a”, em um meio elástico infinito, pode ser determinada de acordo com as Equações 6, 7 e 8.

$$\sigma_r = \frac{1}{2} \sigma \left[\left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} \sigma \left[\left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (7)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2} \sigma \left[\left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \right] \quad (8)$$

Onde: σ_r são tensões axiais no sentido radial ao furo, σ é a tensão nominal aplicada perpendicularmente ao eixo I-I, visualizando a Figura 1, “a” é o tamanho do raio do furo, “r” é a distância entre o ponto central do furo ao ponto de interesse na superfície da chapa, “ θ ” é

o valor do ângulo tomando como referência os eixos I-I, II-II, de acordo com a Figura 1 ou outro qualquer, σ_θ são as tensões axiais no sentido circunferencial ao furo e $\tau_{r\theta}$ são as tensões de cisalhamento em relação ao eixo I-I.

Analisando as Equações 6 e 7 e realizando as substituições de $\theta = \pi/2$ e $r = a$, de acordo com a Figura 1, a tensão máxima ocorre no ponto “A”, ou seja, na borda do furo. Para $r = a$ e $\theta = 0$, $\sigma_\theta = -\sigma$, a tensão no ponto “B”, também situado na borda do furo, é igual, no caso de solicitações de tração, à magnitude negativa da tensão nominal aplicada axialmente na chapa. De acordo com Dieter (1981), o máximo valor do fator de concentração de tensão em uma chapa com um furo na região central é igual a 3.

1.2 Método numérico

Para Zienkiewicz (1972) o objetivo do método dos elementos finitos (MEF) é substituir o infinito sistema de grau de liberdade em aplicações contínuas, por um sistema finito exibindo a mesma base que a análise discreta.

Segundo Teixeira et al. (2010) a este processo de análise estruturada das partes dá-se o nome de discretização, e cada elemento discreto, o elemento finito, e as equações matemáticas constitutivas que regem o seu comportamento contribuem para o conhecimento e a análise do problema global. A Figura 2 apresenta um exemplo de uma ferramenta modelo chave de boca e um modelo virtual discretizado por elementos finitos.

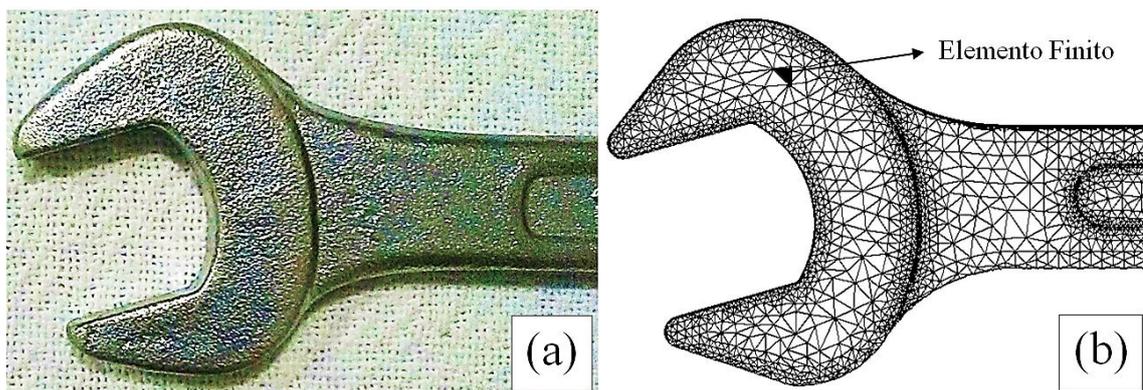


Figura 2: Chave de boca. (a) sistema físico. (b) sistema virtual discretizado. (Fonte: autores, 2020).

Independentemente da abordagem usada para a formulação de elementos, a solução de um problema contínuo pelo MEF segue sempre um processo passo a passo ordenado:

- Pré-processamento – construção do modelo geométrico virtual, carregamentos, restrições, tamanho e característica do elemento finito, propriedades mecânicas e/ou físicas dos materiais;
- Análise – fase em que todos os cálculos dos sistemas de equações algébricas são executados, ou seja, é a solução das equações do sistema mecânico;
- Pós-processamento – encarrega-se da tarefa de apresentar os resultados por meio de formatos gráficos; apresentando os resultados sob a forma de distribuição de isovalores ou isolinhas.

1.3 Método experimental

Segundo Freddi et al. (2015) extensômetro ou *strain gauge* (SG) é o sensor mais simples e difundido desenvolvido para medir deformações mecânicas estáticas e dinâmicas em pontos de estruturas carregadas e para a fabricação de transdutores e instrumentos de alta precisão e resolução.

A técnica de medição do SG, por serem colados na superfície de interesse da peça, utiliza-se da variação da resistência elétrica proporcionalmente à deformação mecânica, ou seja, a peça é submetida a um carregamento de força gerando um valor de deformação mecânica no material, ocasionando a variação da resistência elétrica do SG (R_1). Posteriormente estes valores são amplificados e armazenados por um sistema de gravação de dados, conforme apresentado pela Figura 3.

O material da base do SG é geralmente em polímero termoplástico e a grade formando a resistência elétrica é composta por 45% níquel e 55% cobre. O procedimento de colagem do SG é realizado por limpeza, lixamento da superfície e a etapa da fixação por meio de adesivo cianoacrilato.

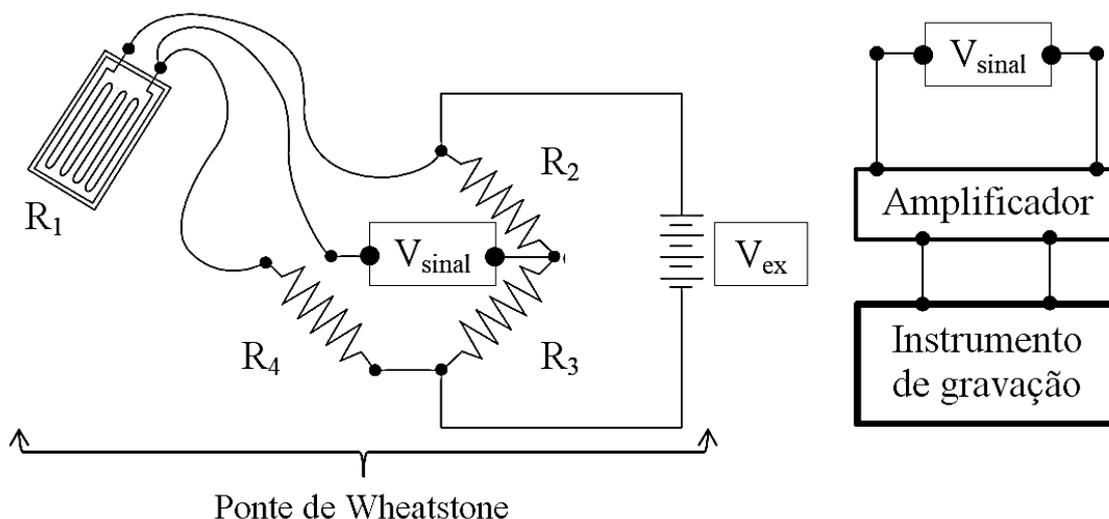


Figura 3: Diagrama de um sistema de medição por extensômetro. (Fonte: adaptado de Lee, 2005).

2. METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritas as etapas utilizadas para realização do procedimento numérico e experimental, os materiais utilizados, as informações sobre os equipamentos utilizados e métodos adotados neste trabalho.

Para um melhor entendimento da metodologia utilizada, foi elaborado um fluxograma, conforme Figura 4, das etapas realizadas referentes ao processo.

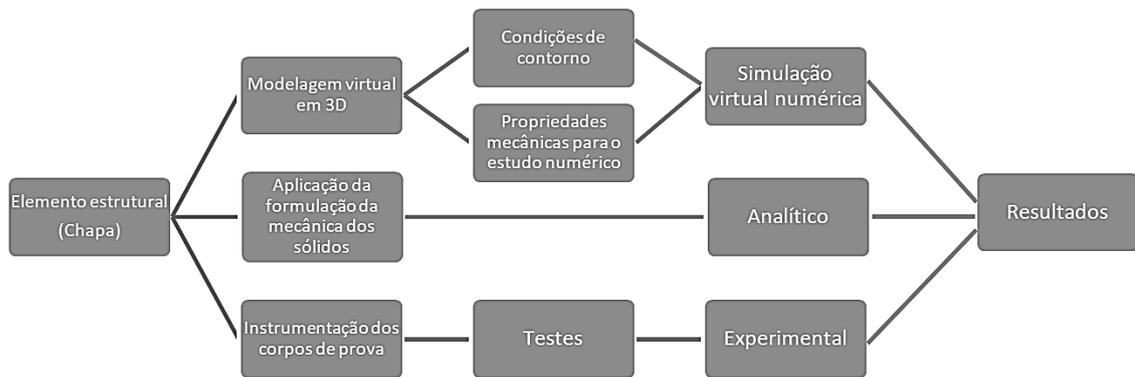


Figura 4: Fluxograma elaborado referente ao processo.

2.1 Elemento estrutural

Utilizaram-se elementos estruturais no formato de chapas em aço. Seis corpos de prova, três contendo um furo e três sem a presença do furo, foram selecionados, preparados conforme dimensões apresentadas e realizado a proteção dos *strain gauges* com silicone conforme Figura 5 e Figura 6. Em relação ao material adquirido, trata-se de um aço carbono geralmente utilizado na fabricação de portas residenciais, corrimãos de escada, grades e elementos estruturais em geral.

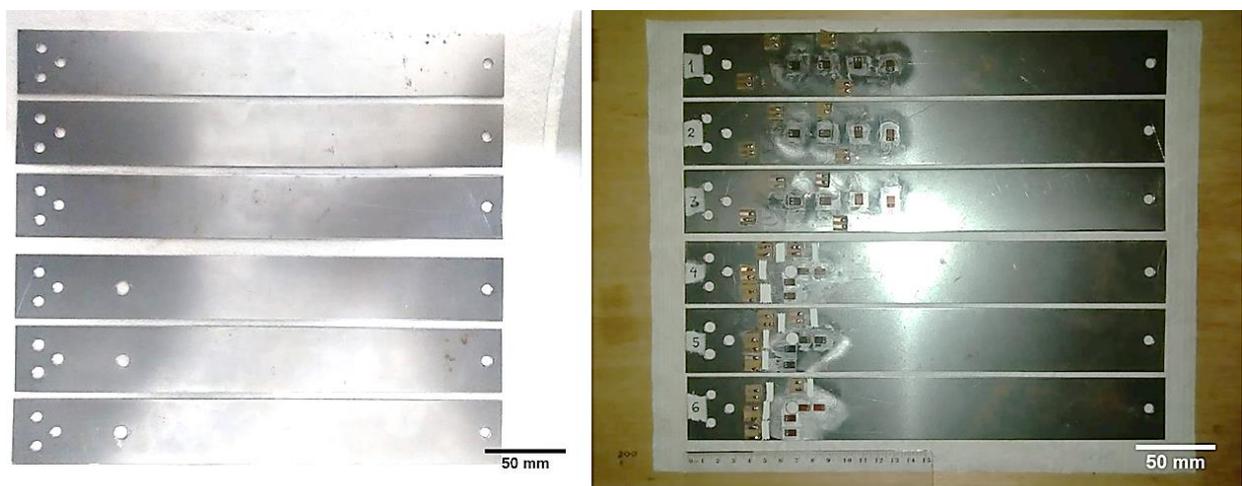
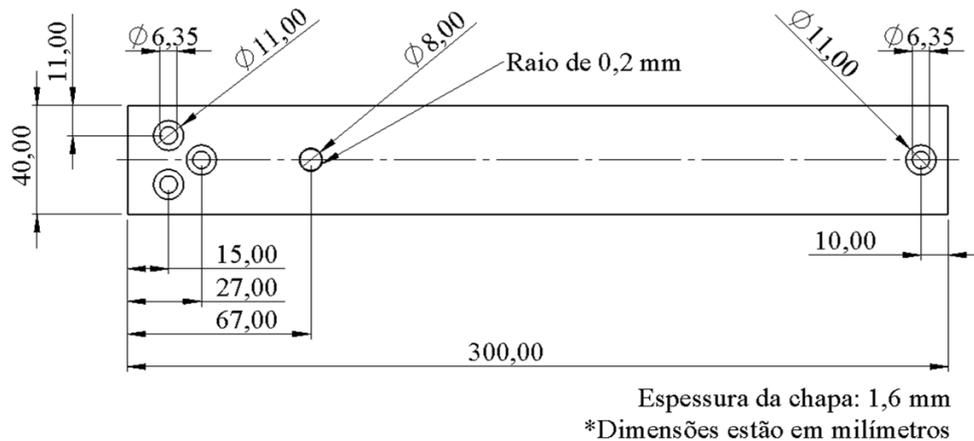


Figura 5: Dimensões e preparação dos corpos de prova.

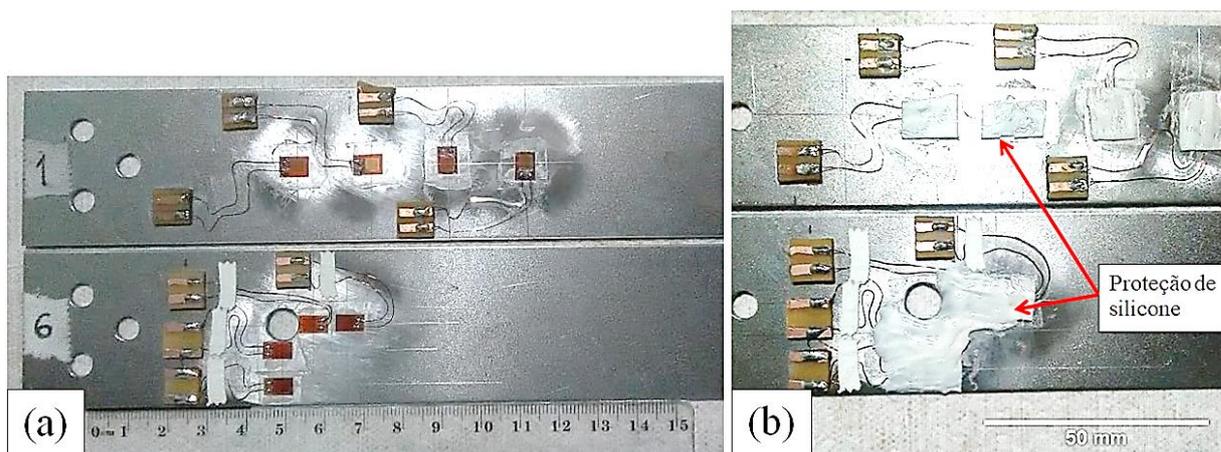


Figura 6: Preparação dos corpos de prova. (a) locais de fixação do strain gauges. (b) detalhe da aplicação de silicone.

Na parte superior do desenho da Figura 5, a dimensão de diâmetros 11 mm é atribuída às áreas delimitadas, simulando o contato entre arruelas e porcas incluído na modelagem virtual.

2.2 Preparação para simulação numérica computacional

Para realização das simulações foi utilizado o *software* de modelagem e simulação numérica computacional Solidworks Simulation[®] versão 3D-2019 desenvolvido pela Dassault Systèmes Corp, EUA. Com base nas dimensões das chapas reais, foram feitas as modelagens virtuais dos corpos de prova em 3D e análises por meio do critério de convergência de malha utilizando um valor de força aplicada de 10,4 N. Utilizou-se a relação do número de elementos pelos valores das primeiras tensões principais máximas de acordo com a solução numérica fornecida pelo *software*. Aplicou-se a solução no regime linear elástico para grandes deslocamentos e temperatura de acordo com as medições coletadas durante o procedimento experimental, ou seja, 24°C. Os tamanhos máximos de elementos selecionados foram de 1,2 mm para o modelo sem furo e 1,3 mm para o modelo com furo. A Figura 7 mostra graficamente os resultados por meio do critério da convergência de malha para os dois corpos de prova.

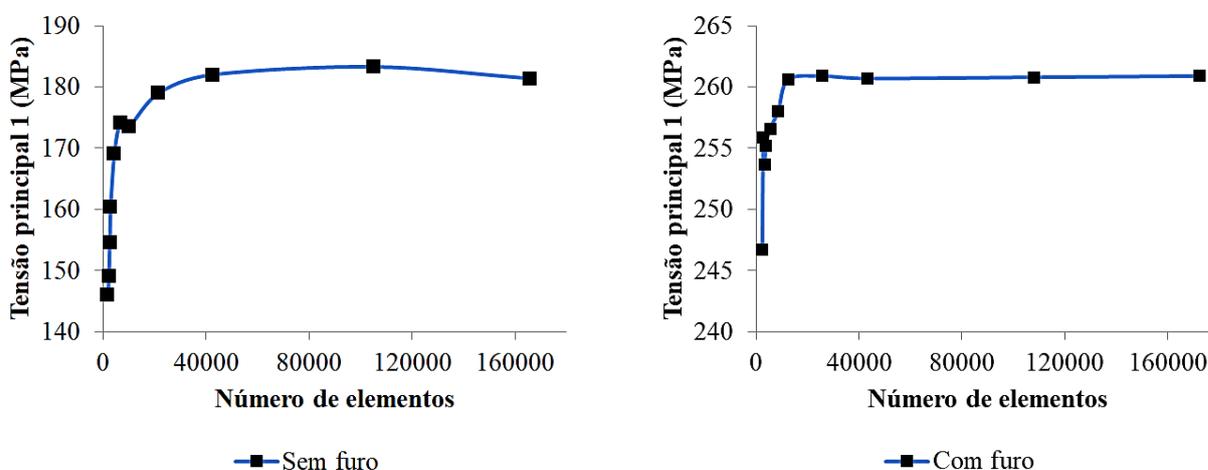


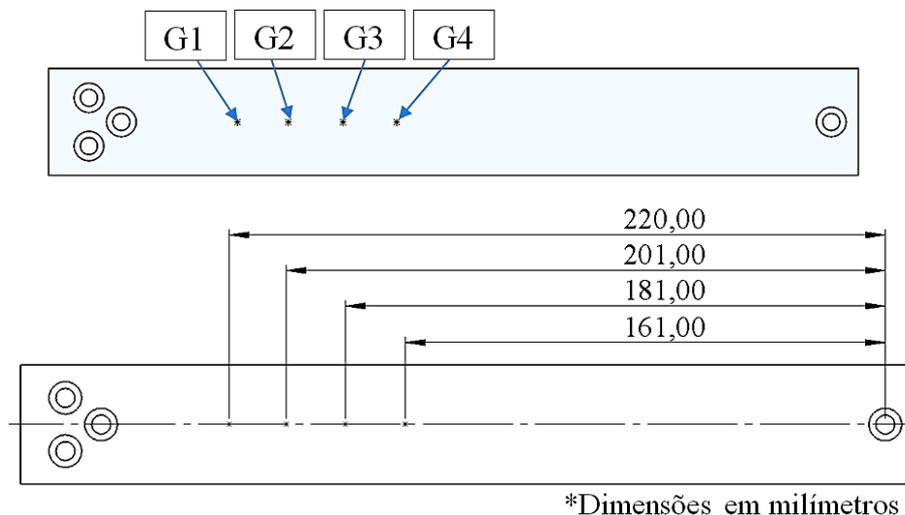
Figura 7: Representação gráfica do estudo de convergência de malha.

A Tabela 1 apresenta os valores selecionados por meio do critério da convergência de malha para o estudo utilizando o método de elementos finitos.

Tabela 1: Valores selecionados por meio da convergência de malha.

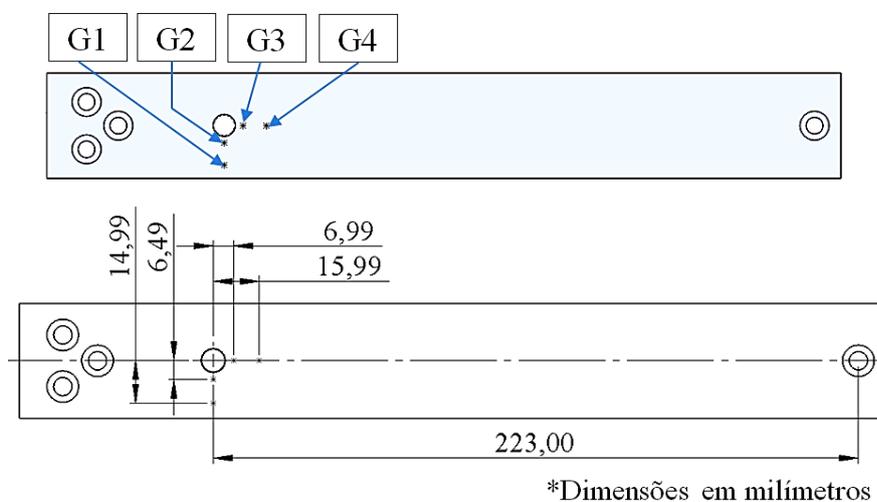
Característica quantitativa da malha	Sem furo	Com furo
Número de elementos	1113329	103384
Número de nós	191243	174585
Número de graus de liberdade	564132	515476
Distorção de elemento < 3 (%)	100	100
Tamanho máximo do elemento de malha (mm)	1,2	1,3
Tamanho mínimo do elemento de malha (mm)	0,4	0,26

Os pontos de coleta dos resultados dos valores de deformações e tensões mecânicas correspondentes à força aplicada em cada CP são apresentados conforme Figura 8 e Figura 9.



*Dimensões em milímetros

Figura 8: Região para coleta dos resultados dos corpos de prova sem a presença de furo.



*Dimensões em milímetros

Figura 9: Região para coleta dos resultados dos corpos de prova com a presença de furo.

Os cálculos dos problemas numéricos foram executados pelo *solver* FFEPlus e o material utilizado nas simulações numéricas foi um aço estrutural definido com base no banco de dados fornecido pelo *software* do Solidworks Simulation®, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades mecânica do material para a simulação numérica.

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Coefficiente de Poisson	Densidade (kg/m ³)
Aço	198	330	257	0,3	7800

A Figura 10 apresenta as condições de contorno para o modelo computacional e em detalhe a região de fixação da chapa por meio de três parafusos na superfície da bancada, simulando a condição real do teste experimental. A Figura 11 apresenta as condições de posicionamento do engaste por parafusos e a região de aplicação das forças por meio de fixação em gancho no teste experimental.

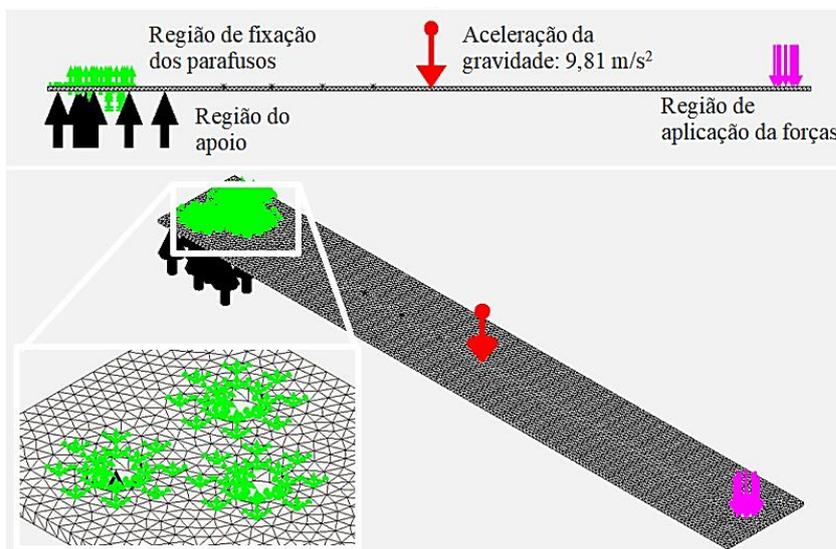


Figura 10: Condições de contorno do modelo virtual.



Figura 11: Condições de contorno do teste experimental.

2.3 Preparação para o teste experimental

Para execução dos testes experimentais foi preparada uma bancada e reproduziu as condições de contorno utilizadas no modelo virtual sendo: a configuração de fixação da chapa por parafusos, área do apoio, ponto de aplicação das forças, nivelamento do plano de apoio da bancada por meio do nível de bolha e medição da temperatura ambiente por meio de um termômetro digital Inpelanyu, China, modelo C1126-01. A Figura 12 (a) apresenta a bancada com o computador utilizado no experimento. A Figura 12 (b) apresenta o modo de configuração da montagem para o teste experimental com um CP.

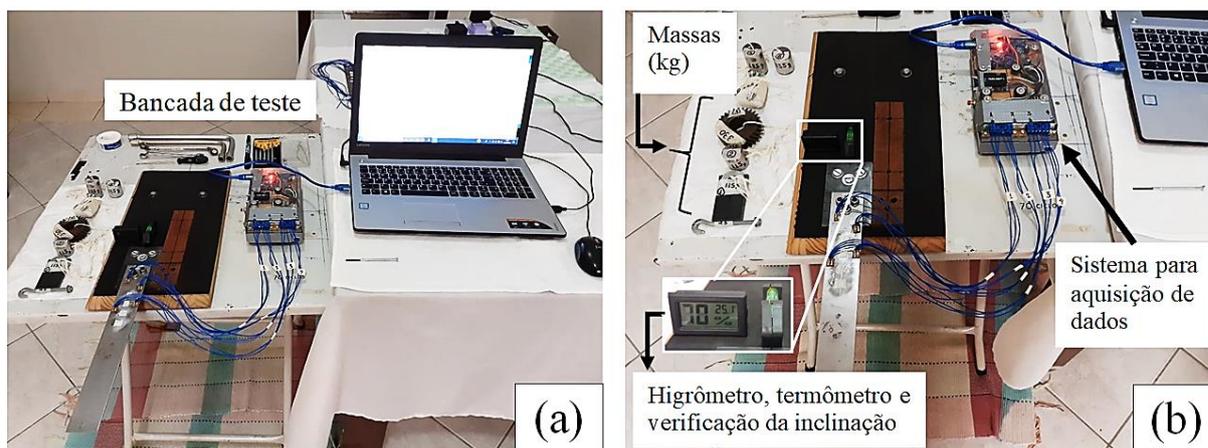


Figura 12: Condições de contorno para o teste experimental. (a) detalhe da montagem. (b) visão geral.

O sistema de aquisição de dados, conforme detalhado na Figura 13, é composto por um microcontrolador Arduino® modelo UNO, 4 módulos conversores analógico-digital da Avia® modelo HX711, quatro pontes de Wheatstone de 1/4 com potenciômetros para a ajustagem inicial das medições e um módulo de gravação dos valores para cartão SD.

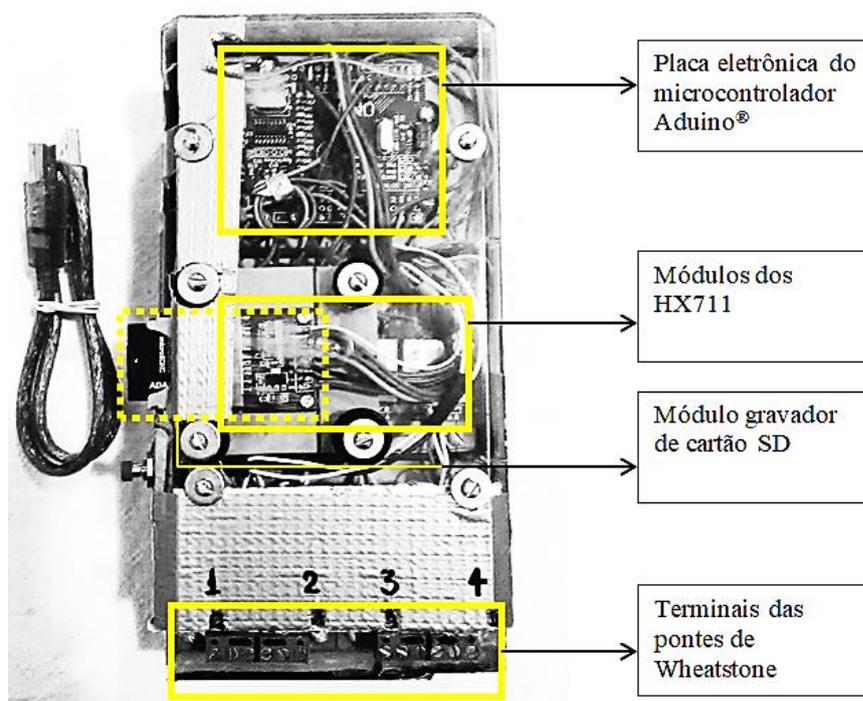


Figura 13: Sistema de aquisição de dados com quatro canais.

A alimentação das quatro pontes de Wheatstone é por meio de tensão elétrica constante de aproximadamente 3,8 V fornecida pelos próprios módulo HX711 alimentados em aproximadamente 5V a uma entrada diferencial em escala real de tensão elétrica de ± 20 mV.

A aferição do sistema de aquisição foi realizada por meio de um multímetro de precisão AGILENT® modelo U1253B e o incremento de massas conhecidas na unidade gramas foi realizado. O *software* Arduino® versão 1.8.4 foi utilizado para inserir o programa e exibir graficamente os resultados de tensão elétrica equivalentes a cada incremento de força aplicada na extremidade da chapa. A taxa de aquisição foi aproximadamente 11 Hz. O resultado das medições para aferição do programa são apresentados conforme Figura 14.

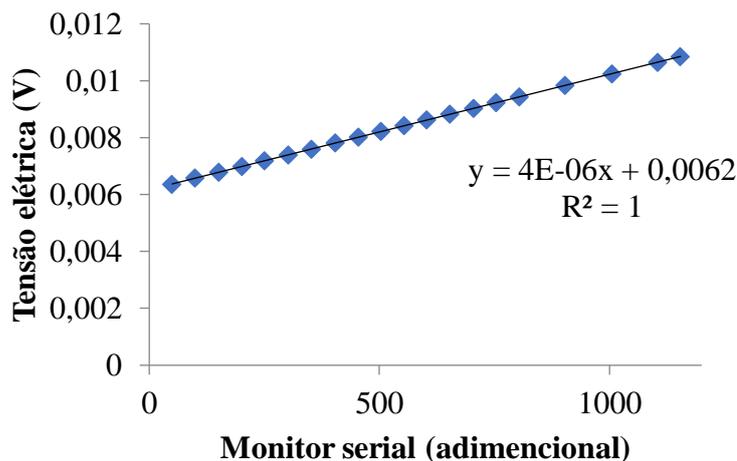


Figura 14: Valores do monitor serial do *software* Arduino® por resposta em tensão elétrica.

Para o programa calcular a microdeformação uniaxial do *strain gauge*, foram utilizadas as seguintes equações:

$$\Delta E = V \times \frac{\Delta R \times R_3}{(R_1 + \Delta R + R_2) \times (R_3 + R_4)} \quad (9)$$

Onde, $R_1 = 349,82 \Omega$, $R_2 = 349,65 \Omega$, $R_3 = 349,91 \Omega$, $R_4 = 349,24 \Omega$ e a tensão de excitação é $V = 3,8$ Volts.

$$\epsilon_x = \frac{4 \times \Delta E}{FG \times V} \quad (10)$$

Onde, ΔE é o resultado da variação da tensão elétrica, coeficiente de sensibilidade $FG = 2,1$ e $V = 3,8$ Volts.

A instrumentação dos corpos de prova é sequenciada pelas seguintes etapas:

- 1) Limpeza da superfície com álcool puro e acetona;
- 2) Delimitação dos pontos de medição;
- 3) Lixamento das áreas com lixas de densidade de grão de 100 ao 400;
- 4) Limpeza com álcool puro e acetona;
- 5) Marcação dos pontos;
- 6) Posicionamento e colagens dos *strain gauges*;
- 7) Soldagem dos cabos elétricos e posicionamento da instalação;
- 8) Aplicação de silicone para proteção dos *strain gauges*.

O modelo dos *strain gauges* utilizados foi o BF350-AA N8 de resistência elétrica de $349,8 \pm 1\%$, coeficiente de sensibilidade de 2 à 2,2; limite de deformação de 0,2% e temperatura de trabalho entre $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. A Figura 15 apresenta a instrumentação realizada nos corpos de prova.

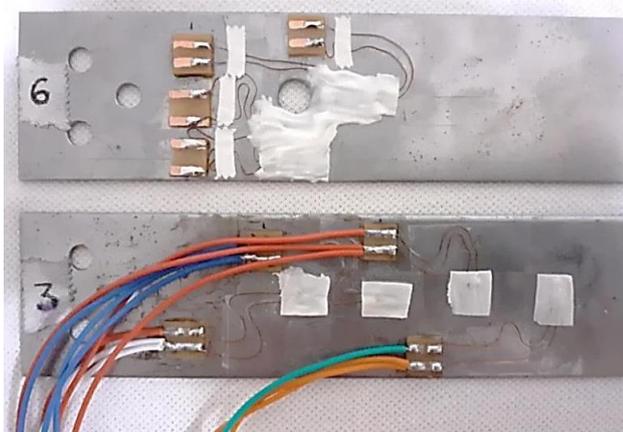


Figura 15: Instrumentação dos corpos de prova.

O estudo comparativo entre os resultados analíticos (X), numérico e experimental (\bar{X}), foi realizado por meio da formulação do erro relativo percentual (E. R. %), conforme Equação 9. E as força aplicadas foram incrementos de 1,4 N, 2,5 N, 5,7 N, 7,2 N, 9,1 N e 10,4 N.

$$E. R. \% = \left(\frac{X - \bar{X}}{X} \right) 100 \quad (9)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio do experimento comparativo para cada CP, obteve-se a aquisição dos resultados de deformação de cada SG e apresentados graficamente conforme Figuras 16 e 17.

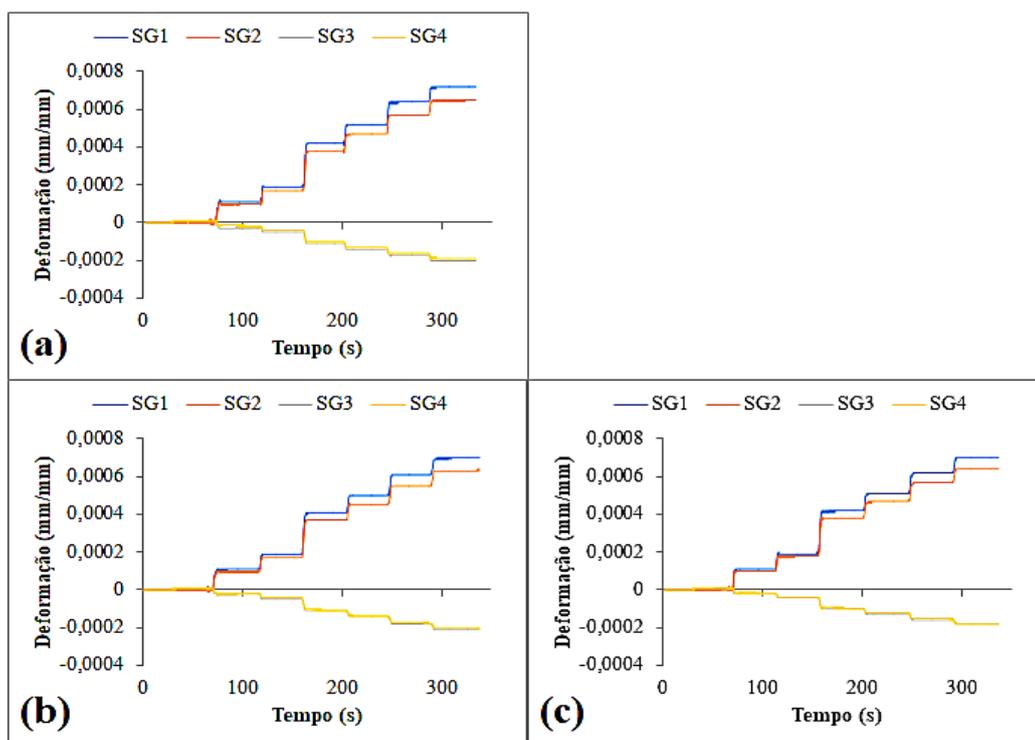


Figura 16: Deformações por flexão para cada incremento de carga. (a) CP1. (b) CP2. (c) CP3.

Na etapa de execução dos experimentos com os 6 corpos de prova, a taxa de amostragem dos módulos HX711 foi selecionada para aproximadamente 35 Hz. O tempo de duração dos ensaios experimentais para cada CP foi de aproximadamente 5 minutos e 30 segundos.

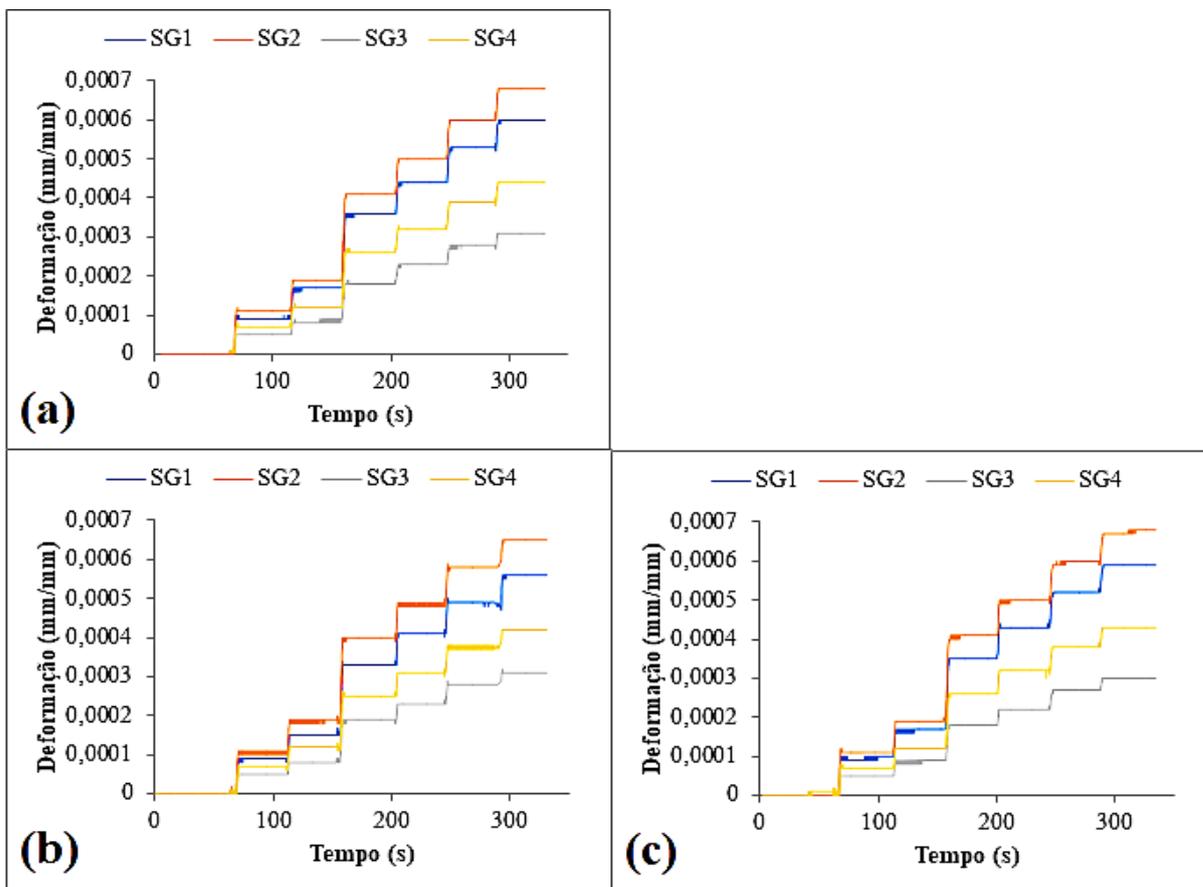


Figura 17: Deformações por flexão para cada incremento de carga. (a) CP4. (b) CP5. (c) CP6.

A coleta dos valores de temperatura e umidade relativa do ar para cada ensaio de CP foi realizada e apresentada conforme Tabela 3.

Tabela 3: Valores de temperatura e umidade relativa do ar durante os ensaios.

CP	Temperatura (°C)	Umidade relativa do ar (%)
1	25,8	72
2	24,1	76
3	25,4	73
4	26,7	60
5	25,8	63
6	25,1	63

As Figuras 18 e 19 apresentam graficamente os resultados de tensões mecânicas mensurados pela técnica experimental corresponde a cada ponto por SG e respectivo corpo de prova.

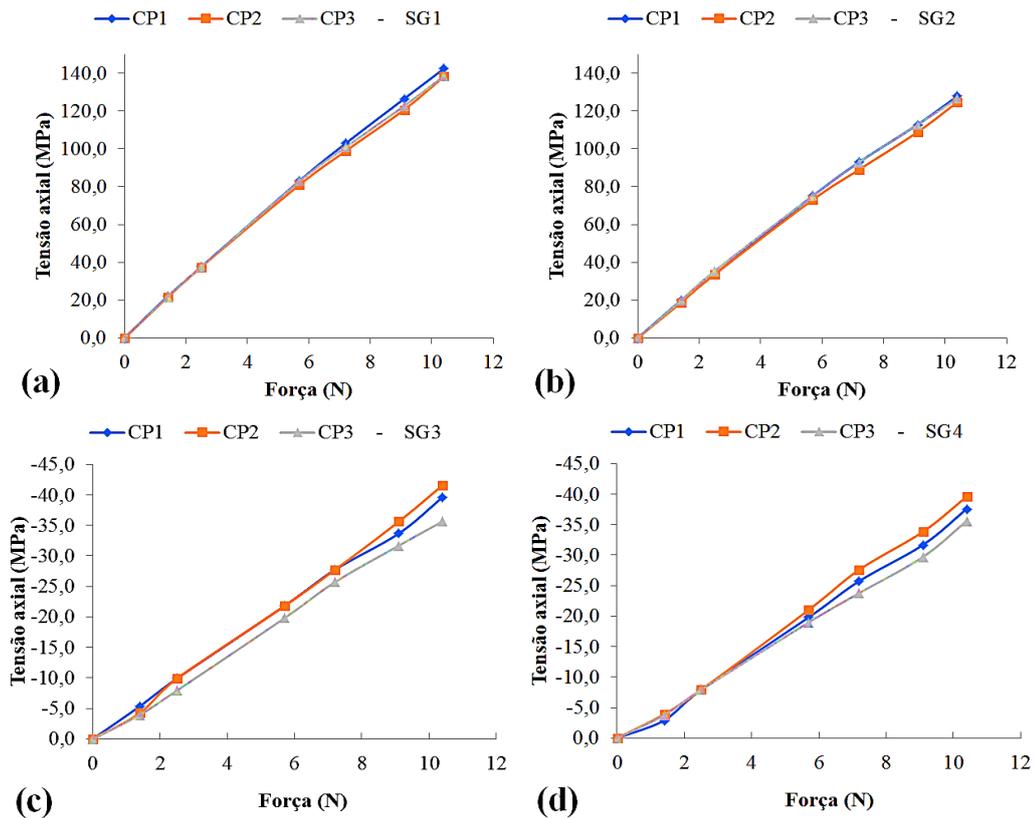


Figura 18: Resultados das tensões nos CP sem furo. (a) SG1. (b) SG2. (c) SG3. (d) SG4.

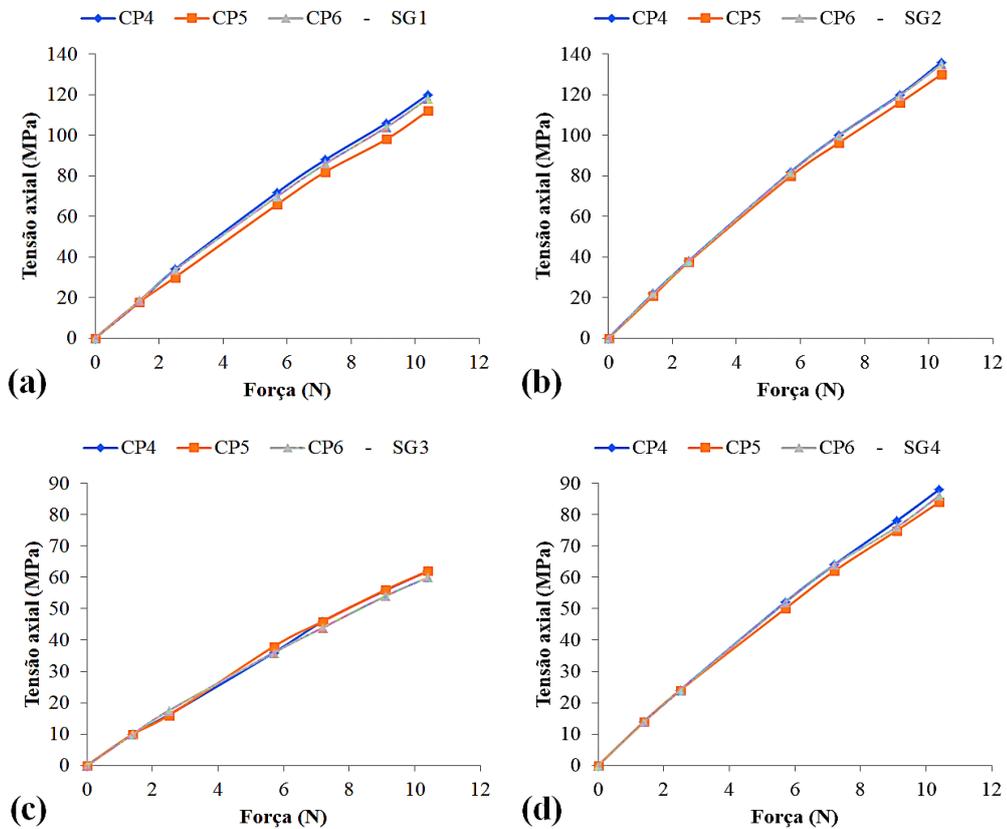


Figura 19: Resultados das tensões nos CP com furo. (a) SG1. (b) SG2. (c) SG3. (d) SG4.

Os resultados dos valores de tensão mecânica nos experimentos com corpos de prova sem furo apresentaram maiores incertezas de medição nos pontos mensurados pelos SG1 e SG3, $\pm 2,9$ MPa para a força de 9,1 N e ± 3 MPa para a força de 10,4 N, respectivamente, e menor incerteza de medição nos pontos mensurados pelos SG1 e SG4 para o mesmo valor de força de 2,5 N, conforme apresenta a Figura 20 (a). Uma média de incerteza aproximadamente de $\pm 1,1$ MPa foi observada em todos os pontos de medição na condição sem furo para a força de 5,7 N.

Em relação à condição corpos de prova com furo, valores máximos de incertezas de medição foram observados para uma mesma força de 10,4 N nos pontos de medição correspondentes ao SG1, $\pm 4,1$ MPa, e SG2 $\pm 3,2$ MPa, conforme apresenta Figura 20 (b).

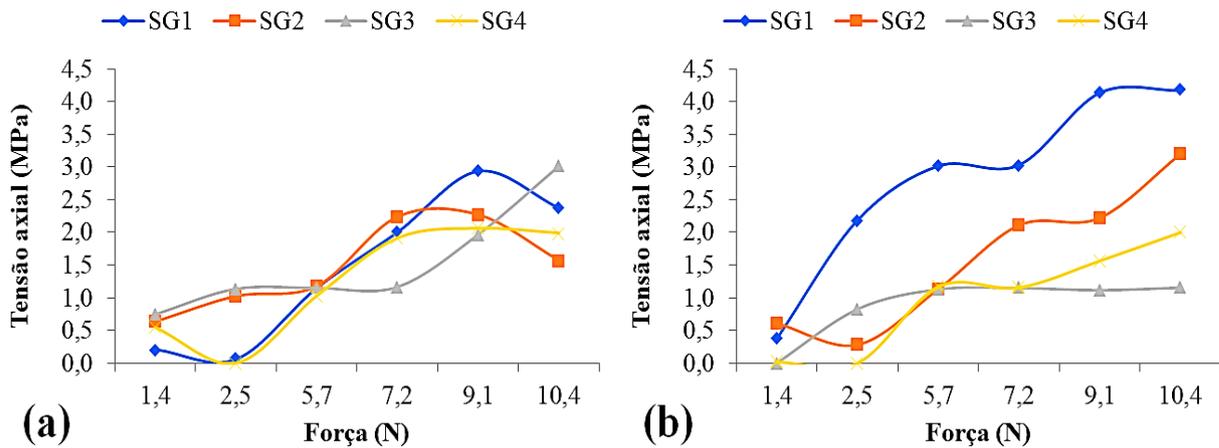


Figura 20: Resultados do desvio padrão para as tensões. (a) CP sem furo (b) CP com furo.

Em relação à simulação numérica computacional, as leituras dos resultados da tensão mecânica foram realizadas nos nós correspondentes ou próximos aos pontos estabelecidos para o estudo de comparação dos métodos conforme Figura 21 para uma força aplicada de 10,4 N e os campos de deformação em (a) e campos de tensão mecânica em (b).

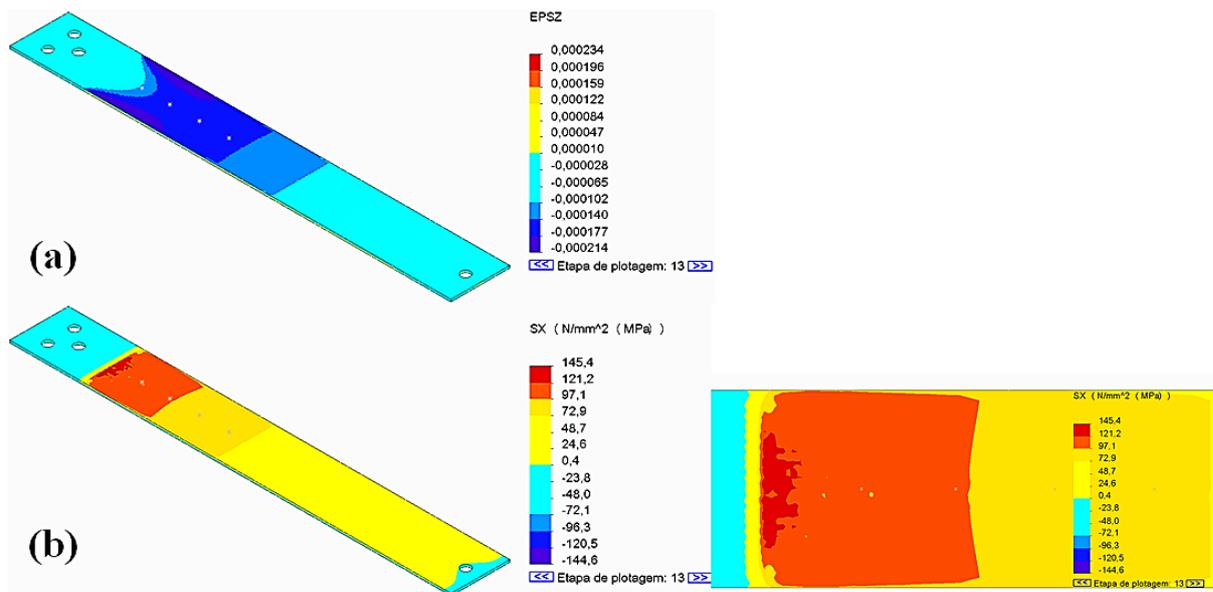


Figura 21: Corpo de prova sem furo. (a) campo de deformações na direção “z”. (b) campo de tensões na direção “x”.

Conforme Equação 9 os valores de porcentagens de erro relativo em comparação ao método analítico são discutidos no formato; (+) para resultados abaixo do analítico e (-) para resultados acima do analítico. Para os corpos de prova na condição sem furo, no ponto G1, Figura 22 (a), para o método experimental e numérico, porcentagens máximas de erro relativo de -14,7 % e -34,1 % para o carregamento de 1,4 N, respectivamente, foram observadas e porcentagens mínimas de erro relativo de 0,3 %, experimental, e 0,2 %, numérico, submetidos ao carregamento de 10,4 N. No ponto G2, Figura 22 (b), para o carregamento de 1,4 N nota-se porcentagens máximas de erro relativo de -11,8 % pelo método experimental e -31,1 % pelo método numérico. Para o carregamento de 10,4 N, observa-se o erro relativo para o experimental de 1,6 % e o numérico 0,4 %.

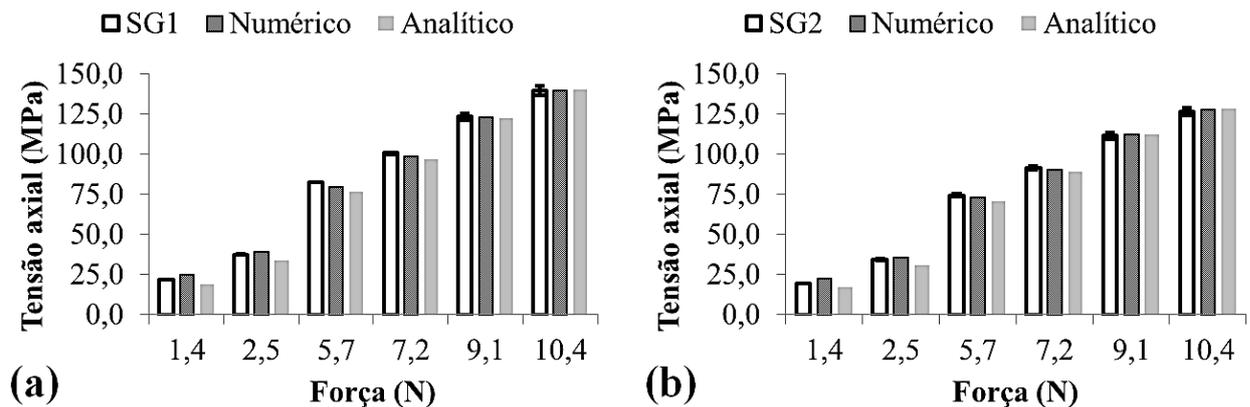


Figura 22: Resultados das tensões axiais para cada aplicação de força. (a) ponto G1. (b) ponto G2.

No ponto G3, Figura 23 (a), observa-se porcentagens máximas de erro relativo de 15,1 % em 1,4 N pelo método experimental e 17,1 % em 10,4 N pelo método numérico. Para porcentagens mínimas de erro relativo, observa-se 1,3 % para o experimental com carregamento de 7,2 N e 2,4 % para o numérico, submetido ao carregamento de 1,4 N. No ponto G4, Figura 23 (b), observa-se porcentagens máximas de erro relativo de 25,8 % em 1,4 N para o método experimental e 16 % em 7,2 N para o método numérico. Para porcentagens mínimas de erro relativo, observa-se -2,4 % para o experimental com carregamento de 9,1 N e -0,6 % para o numérico submetido ao carregamento de 1,4 N.

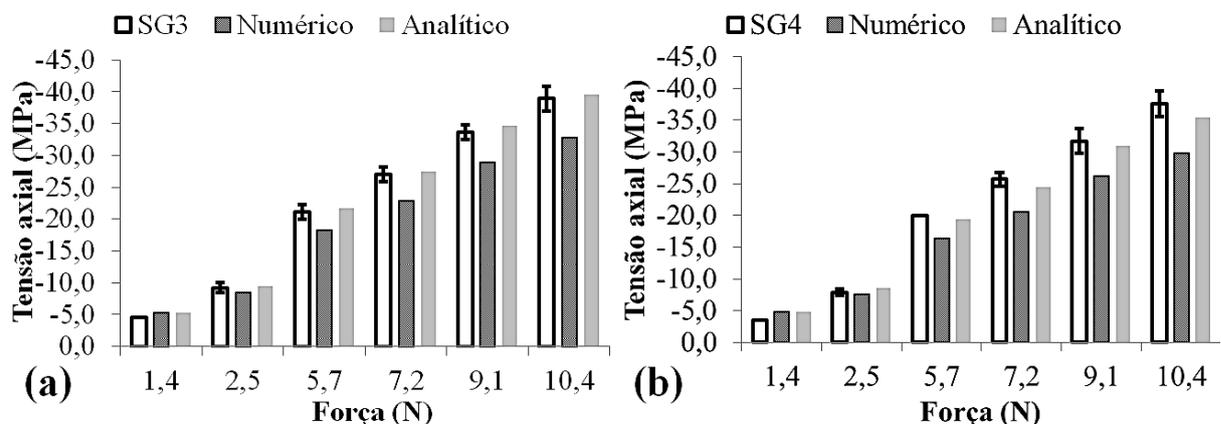


Figura 23: Resultados das tensões axiais para cada aplicação de força. (a) ponto G3. (b) ponto G4.

Observa-se que após o carregamento de 2,5 N os resultados dos pontos mensurados, G3 e G4, apresentaram menores valores de deformação pelo método numérico, conseqüentemente, menor tensão mecânica pela formulação da lei de Hooke. Embora, os resultados pelos métodos experimental e analítico apresentaram-se certa disparidade em relação aos resultados numéricos, a observação sugere uma influência de aproximadamente $\pm 11\%$ na relação dos valores do coeficiente de Poisson pelo sentido de direção do processo de fabricação da chapa por laminação, acrescentando um encruamento no material e apresentando tal comportamento durante o ensaio experimental nos valores de deformação nas direções “x” e “z” das chapas.

Silva et al. (2019) citam uma observação onde, é possível uma influência no sistema da taxa de conversão analógica-digital do próprio Arduino®, que efetua em 10 *bits* os processamentos, ser inferior a taxa de conversão do módulo HX711, 24 *bits*, nos resultados finais de leitura dos valores de deformação.

Nota-se pela representação gráfica da Figura 24 (a) e (b) uma convergência dos valores de erro relativo após o carregamento de 5,7 N com boa correlação dos resultados entre os métodos experimental e numérico. Para os pontos G3 e G4, Figura 24 (c) e (d), os valores de erro relativo pelo método numérico, após carregamento de 5,7 N, apresentaram-se certa convergência para 16 % enquanto o método experimental o erro relativo foi diminuindo de acordo com o incremento de força, apresentando-se com uma média de aproximadamente $\pm 3\%$.

Ensaio realizado por Lamari et al. (2019) em uma chapa de aço submetida à flexão pura com um *strain gauge*, comparando resultados obtidos de um sistema de baixo custo utilizando um sistema com Arduino® módulos HX711 e um sistema QuantumX-MX840A do fabricante HBM®, apresentaram erros relativos de no máximo 5% em relação ao método analítico.

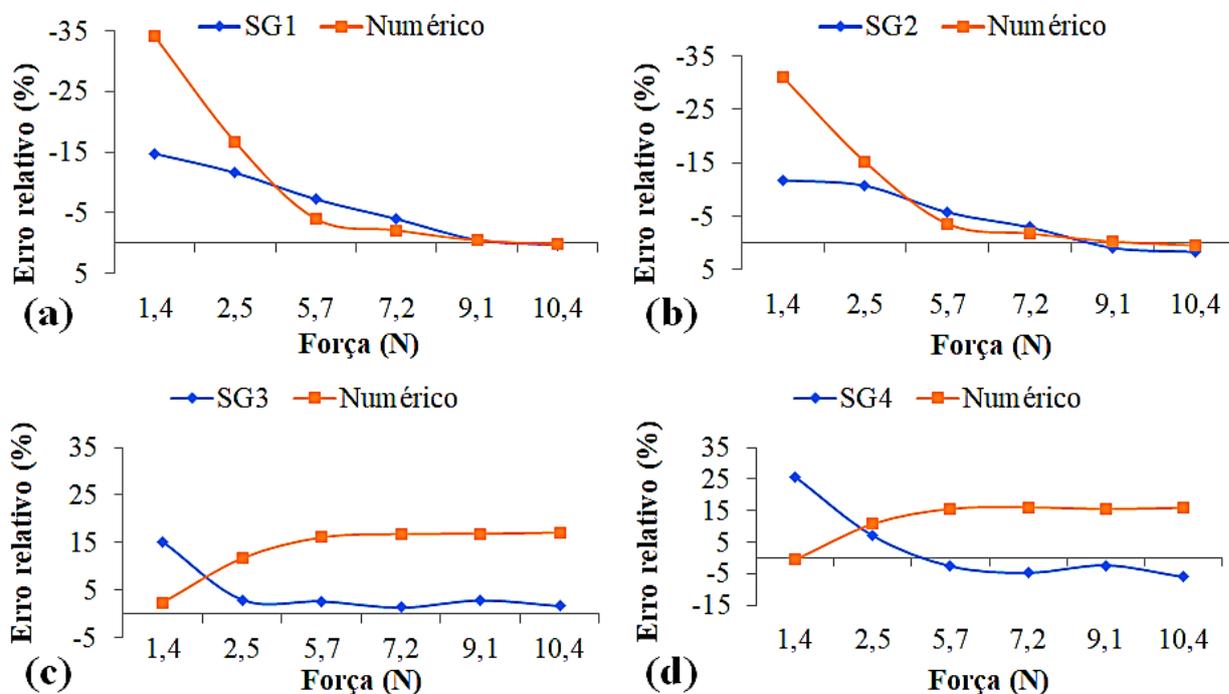


Figura 24: Resultados dos erros relativos na condição sem furo.

Observa-se pela representação gráfica da Figura 24 (d) média de erro absoluto mais expressivo de 8,1 % pelo método experimental, e pela Figura 24 (c), 13,5 % pelo método numérico.

Para os corpos de prova na condição com furo, a coleta dos resultados da tensão mecânica seguiu a metodologia aplicada para os corpos de prova sem furo e o estudo comparativo é realizado. A Figura 25 apresenta o campo de deformação e tensão mecânica para uma força aplicada de 10,4 N.

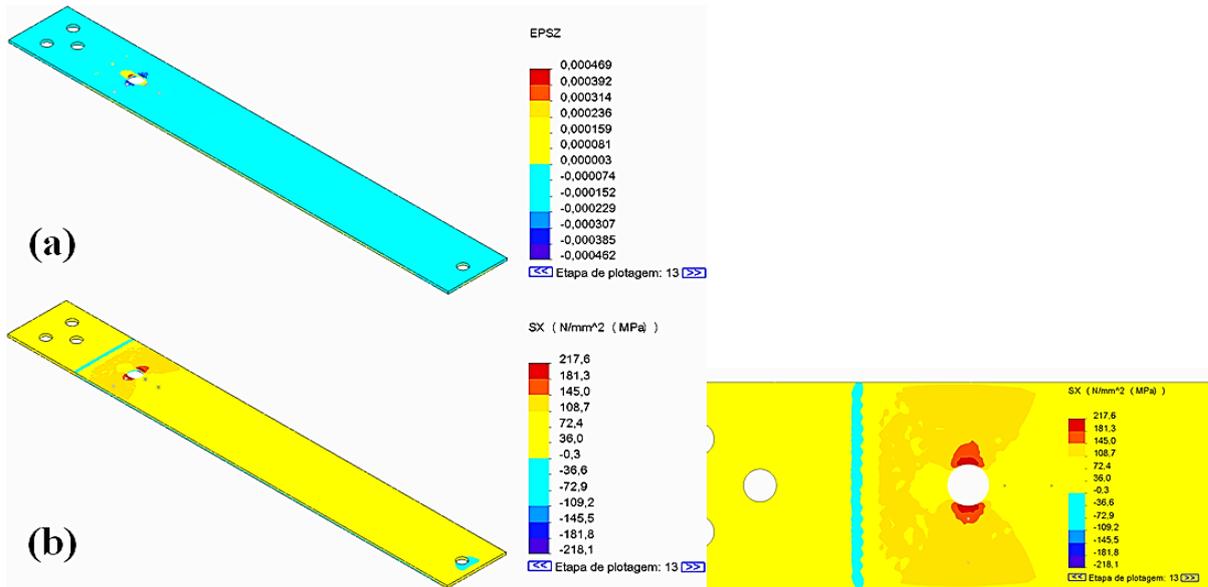


Figura 25: Corpo de prova com furo. (a) campo de deformações na direção “z”. (b) campo de tensões na direção “x”.

No ponto G1, Figura 26 (a), para o método experimental e numérico, porcentagens máximas de erro relativo de -26,5 % e -87,8 % para o carregamento de 1,4 N, respectivamente, foram observadas e porcentagens mínimas de erro relativo de -8,8 %, experimental, e 18 %, numérico, submetidos ao carregamento de 10,4 N. No ponto G2, Figura 26 (b), para o carregamento de 1,4 N nota-se porcentagens máximas de erro relativo de -13,6 % pelo método experimental e -54,2 % pelo método numérico. Para o carregamento de 7,2 N, observa-se um erro relativo de -0,7 % para o experimental, e para o carregamento de 10,4 N um erro relativo de -10 % para o numérico.

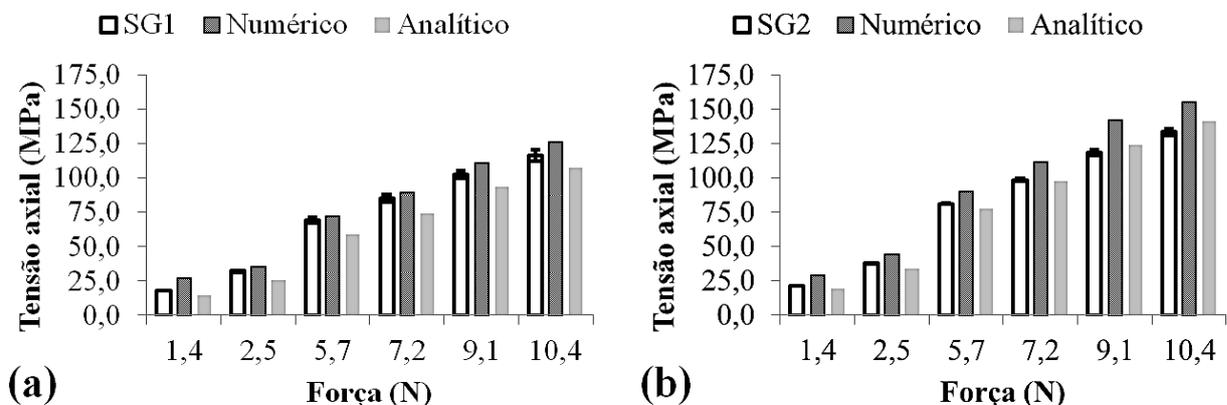


Figura 26: Resultados das tensões axiais. (a) ponto G1. (b) ponto G2.

No ponto G3, Figura 27 (a), observa-se porcentagens máximas de erro relativo de 30,7 % para carregamento de 10,4 N pelo método experimental e -44,4 % para 1,4 N pelo método numérico. Para porcentagens mínimas de erro relativo, observa-se 16 % para o experimental com carregamento de 1,4 N e 8 % para o numérico, submetido ao carregamento de 5,7 N. No ponto G4, Figura 27 (b), observa-se porcentagens máximas de erro relativo de 25,3 % carregamento de 10,4 N para o método experimental e -47,7 % para carregamento de 1,4 N para o método numérico. Para porcentagens mínimas de erro relativo, observa-se 9,6 % de erro relativo para o método experimental com carregamento de 1,4 N e -5,4 % para o numérico submetido ao carregamento de 2,5 N.

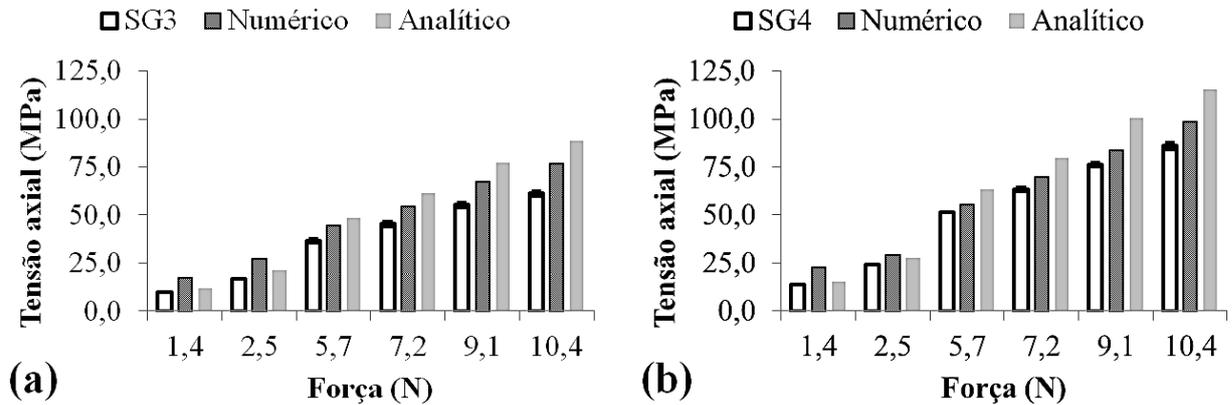


Figura 27: Resultados das tensões axiais. (a) ponto G3. (b) ponto G4.

Em relação ao erro em função do carregamento para os pontos analisados, nota-se pelas representações gráficas da Figura 27, que uma correlação entre o método experimental e numérico foi expressiva após o incremento de carregamento de 5,7 N. Observa-se pela representação gráfica da Figura 27 (c) médias de erro absoluto mais expressivas de 24,6 % pelo método experimental, e pela Figura 24 (a), 34,4 % pelo método numérico.

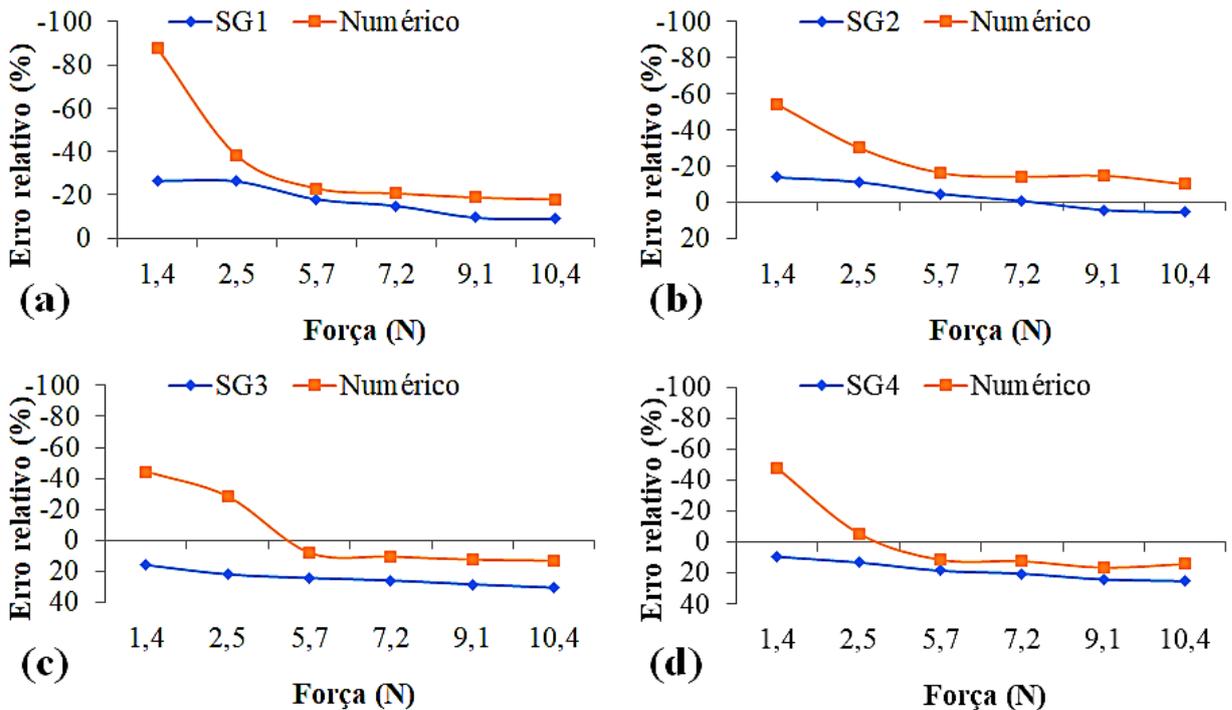


Figura 27: Resultados dos erros relativos. (a) pontos G1 e G2. (b) pontos G3 e G4.

De maneira geral, os pontos que apresentaram valores com menor erro relativo ao método analítico foram aqueles localizados em regiões de maior deformação, pontos G1 e G2, na condição sem furo, e pontos G1 e G3, na condição com furo. Em relação aos pontos que apresentaram maiores erros relativos, uma representação gráfica entre os métodos numérico e experimental por aproximação de curvas polinomiais de 2ª ordem é apresentada conforme Figura 28. A Figura 28 (a) evidencia, pelo momento de interseção das curvas, o ponto correspondente ao incremento de força entre 2,5 e 5,7 N. Observa-se pela Figura 28 (b) e (c) significativa disparidade entre os resultados pelos métodos experimental e numérico da tensão mecânica durante a fase inicial dos incrementos de força, 1,4 e 2,5 N.

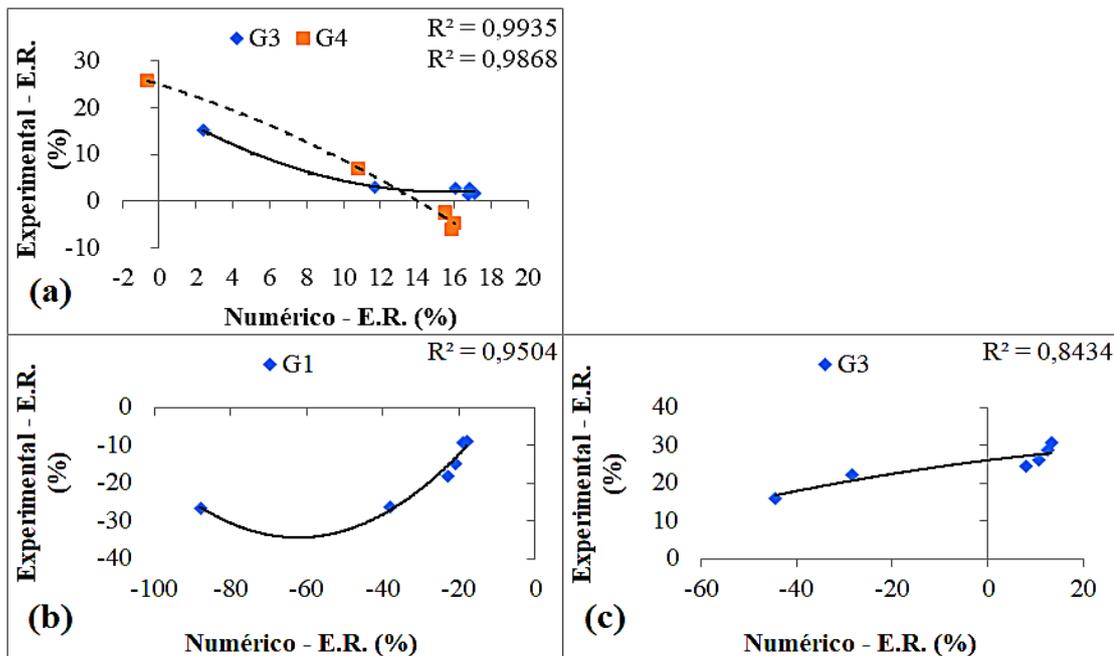


Figura 28: Erros relacionados entre o método experimental e numérico. (a) sem furo, pontos G3 e G4. (b) e (c) com furo, pontos G1 e G3.

4. CONCLUSÕES

Um estudo comparativo abordando dois casos da resistência dos materiais foi realizado utilizando três metodologias de análise de tensões mecânicas: experimental, numérica e analítica. Para os corpos de prova na condição sem furo, o resultado máximo de erro relativo calculado pelo método numérico foi de -34 % com carregamento de 1,4 N no ponto G1. No método experimental foi de 25,8 % com carregamento de 1,4 N no ponto G4. O mínimo erro relativo calculado pelo método numérico foi de 0,18 % com carregamento de 10,4 N no ponto G1, e pelo método experimental, o resultado mínimo foi 0,3 % com carregamento de 10,4 N no ponto G1. Para os corpos de prova na condição com furo, o máximo erro relativo calculado pelo método numérico foi de -87,8 % com carregamento de 1,4 N no ponto G1 e para o experimental o máximo erro relativo foi de 30,7 % com carregamento de 10,4 N no ponto G3. O valor mínimo de erro relativo pelo numérico foi de -5,4 % com carregamento de 2,5 N no ponto G4 e pelo experimental o valor mínimo foi de -0,7 % com carregamento de 7,2 N no ponto G2. De maneira geral, os resultados pelo sistema de aquisição experimental apresentaram-se menor erro relativo. Entretanto, observa-se que com o incremento de força aplicada, os resultados pelos dois métodos, experimental e numérico, os resultados de erro relativo se convergem aos valores pelo método analítico e no caso dos pontos G3 e G4 houve uma divergência mantendo-se constante com incrementos de força após 5,7 N. Embora um sistema de aquisição de dados do tipo *strain gauge* estar apto à operar desde um ambiente controlado, como um laboratório de análises, até a utilização em

campo, neste caso, análise de esforços em estruturas de equipamento de mineração, em maior parte das análises é impossível controlar ações no intuito de obter um ambiente ideal. Assim, influências ambientais como; umidade relativa do ar, oscilação da temperatura e materiais como metalúrgica, podem influenciar em pequena parcela nos resultados apresentados pelo sistema de aquisição de dados. Entretanto, nesta pesquisa o sistema de aquisição de dados proposto apresenta-se com boa correlação aos resultados das análises de tensões mecânicas calculados pelos métodos numérico e analítico.

5. REFERÊNCIAS

- ARDUINO. <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. Itália. Acesso em: 02/03/2019.
- AVIA SEMICONDUTORES. <http://en.aviaic.com/detail/730856.html>. China. Acesso em: 10/03/2017.
- DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica**. Ed. Guanabara Dois. 2ª ed. Carnegie Mellon University. 1981.
- DOYLE, J.; F. **Modern Experimental Stress Analysis: completing the solution of partially specified problems**. Wiley & Sons, UK. 2004.
- ELECROW:
<https://www.elecrow.com/download/Coding%20System%20of%20Strain%20Gauges-AGS-TECH%20Version.pdf>. EUA. Acesso em: 05/01/2020.
- ERKLIĞ, A.; KÜTÜK, M. A. Experimental finite element approach for stress analysis. **Journal of Engineering**, v. 2014, 2014. DOI: 10.1155/2014/643051
- TEIXEIRA-DIAS, F. et al. Método dos Elementos Finitos-Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia. ETEP, 2010.
- FLOYD C. G. **The Determination of stresses Using a Combined Theoretical and Experimental Analysis Approach**. In: Brebbia C. A., Keramidas G. A. Computational Methods and Experimental Measurements. Springer, Berlin, Heidelberg. 1984.
- FREDDI, A., OLMI G., CRISTOFOLINI L. **Experimental Stress Analysis for Materials and Structures: Stress Analysis Models for Developing Design Methodologies**. Springer Series in Solid and Structural Mechanics. Volume 4, 509 pg. Bologna, Italy. 2015.
- HOFFMANN, K.; **An Introduction to Measurement Using Strain Gages**. HBM Test and Measurement. 1989.
- KENDEROVÁ, M.; TREBUŇA, F.; FRANKOVSKÝ, P. Verification of stress components determined by experimental methods using Airy stress function. **Procedia Engineering**, v. 48, p. 295-303, 2012. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.09.517
- LEE, Y.; PAN, J.; HATHAWAY, R.; BARKEY, M. **Fatigue Testing and Analysis: theory and practice**. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann. 2005.
- DIN 17350. **Tool Steels Technical Conditions of Delivery**, German Institute for Standardisation, 1980.
- NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. Porto Alegre: Bookman, 2004, 931 p.

PETERSON, R. E. **Stress concentration Factors**; John Wiley and Son, New York. 1974.

PILKEY, W. D.; PETERSON, R. E. **Peterson's stress concentration factors**. 2nd ed. New York, 508 p., EUA: Wiley. 1997.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7ª ed. - Porto Alegre: Bookman. 2005.

SILVA, A. L. et al. A study of strain and deformation measurement using the Arduino microcontroller and strain gauges devices. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 3, 2019. DOI: 10.1590/1806-9126-rbef-2018-0206

SILVA, J. B. L. P. et al. Desenvolvimento de sistema de baixo custo para monitoramento de integridade estrutural. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 24, n. 4, 2019. DOI: 10.1590/s1517-707620190004.0853

ZIENKIEWICZ, O. C. **Introductory Lectures on the Finite Element Method_ Course Held at the Department of Mechanics of Solids. International Centre for Mechanical Sciences**. Ed.: Springer. 1972.

DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso contidos neste artigo.