



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

AVALIAÇÃO DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO NA CORRELAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UMA LIGA DE AÇO

Darllan Hygor de Paiva Souza, darllanh@hotmail.com¹
Tiago Simão Ferreira, tiago.simao@ifmg.edu.br¹
Diógenes Sena de França e Silva, diogenes.sfs@gmail.com¹
Timóteo Simão Ferreira, timoteo_ferreira@hotmail.com²
Bruno Cesar Pockszevnicki, bruno@visiongraphic.com.br³

¹ Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Congonhas, Congonhas, MG, Av. Michel Pereira de Souza, 3007, CEP: 36415-000

² Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Av. Antônio Carlos, 6627, CEP: 31270-901

³ Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Av. Dom José Gaspar, 500, CEP 30535-901

Resumo: *Esse estudo tem como objetivo apresentar uma análise experimental e simulação numérica do comportamento mecânico durante o ensaio de tração para efetuar melhorias nos resultados e compreender assim melhor o material utilizado. Neste trabalho será efetuado três ensaios de tração em temperatura ambiente com o corpo de prova de seção retangular, feitos de liga de aço, usando o Método dos Elementos Finitos – MEF para comparar com o ensaio experimental. O ensaio de tração é um importante procedimento de engenharia, útil para caracterizar algumas relevantes variáveis elásticas e plásticas relacionados com o comportamento mecânico dos materiais. Devido à não uniformidade das distribuições de tensões e deformações existentes para elevados níveis de deformação axial, tem sido reconhecido que as alterações significativas na configuração geométrica da amostra tem que ser considerada, a fim de descrever adequadamente a resposta do material durante todo o processo de deformação. As propriedades mecânicas foram determinadas com as curvas de tensão - deformação. O módulo de elasticidade obtido experimentalmente difere do valor real, como esperado. Através dos Elementos Finitos - EF a análise foi efetuada com uma correlação satisfatória para os resultados experimentais, desse modo prevendo dano para materiais com comportamento elástico-plástico. A metodologia proposta permitiu alcançar uma descrição adequada da resposta mecânica do material durante o ensaio de tração quando utilizando amostras de seções retangulares.*

Palavras-chave: *Ensaio de tração, Métodos dos Elementos Finitos, Tensão e deformação.*

1. INTRODUÇÃO

O ensaio de tração é um importante procedimento de engenharia, útil para caracterizar algumas relevantes variáveis elásticas e plásticas relacionados ao comportamento mecânico dos materiais, de acordo com Bluhm et. al. (1965) a facilidade na execução e a reprodutividade dos resultados colocam o ensaio de tração como um dos mais importantes meios de se determinar propriedades mecânicas dos materiais em engenharia. Este ensaio pode ser empregado para se avaliar inclusive propriedades existentes e deterioradas em componentes já em funcionamento, e quando no âmbito de ensaios destrutivos, pode ser uma forma de avaliar se uma estrutura requer alguma manutenção.

Uma manutenção preventiva pode nos mostrar uma resposta correta do comportamento dos materiais submetidos a certos esforços, e isto salvo algumas raras aplicações poder ser mais barato e pode assegurar a segurança ao componente que se pretende avaliar.

Desse modo, fazendo uso tanto de teste físico quanto da utilização do método dos elementos finitos pode-se analisar ensaios de tração que permitam avaliar a evolução das propriedades mecânicas com o uso na vida de componentes mecânicos. Num primeiro momento neste trabalho, realizou-se um ensaio de tração experimental para levantamento das propriedades mecânicas como módulo de elasticidade, tensão de escoamento, ruptura, e parâmetros de encruamento elasto-plástico, isto a partir dos gráficos Força – Deslocamento e a seguir os gráficos Tensão – Deformação.

Da mesma forma, efetuou-se uma modelagem de elementos finitos para avaliar o corpo de prova sob a mesma condição de carregamento.

Como objetivo procurou-se estabelecer um comparativo entre os resultados do teste experimental com o teste da simulação numérica, avaliando as dispersões entre os resultados, permitindo assim orientar modelagens futuras para teste de tração em outros materiais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma vez que o objetivo do presente trabalho é comparar resultados de uma análise experimental com uma análise numérica na parte linear do ensaio, dividiu-se o capítulo em três partes: ensaio de tração de corpos de prova de aço, ensaio de tração via simulação computacional e comparação dos resultados.

2.1. Ensaio de tração de corpos de prova de aço.

Para o ensaio de tração experimental usou-se a norma ABNT 6152, que recomenda um corpo de prova em forma de barra chata à ser ensaiado com as seguintes dimensões: 50mm de comprimento útil, 7,5mm de largura na área útil e 1,25mm de espessura na área útil.

A escolha pela geometria retangular dos corpos de prova deve-se ao equipamento disponível para a realização do ensaio, (P.C. Marcelo 2007). A saber, o equipamento é uma máquina de tração universal Emic modelo DL10000. Segue abaixo a Fig.1 que mostra o equipamento utilizado no ensaio de tração dos corpos de prova.



Figura 1: Equipamento utilizado no ensaio de tração dos corpos de prova de aço. Fonte: Autor

Uma vez que o material dos corpos de prova não pode ser determinado com precisão, e sabendo inicialmente que tratar-se de uma liga de aço, usou-se a velocidade de ensaio para uma condição de carga estática conforme norma ABNT 6152 foi de 8 N/mm².s⁻¹.

Para determinação das propriedades mecânicas à tração, foram utilizados corpos de prova padronizados. Estes foram obtidos no formato conhecido como “gravata” ou “dogbone”, conforme determina a norma. Foram feitos 3 corpos de prova iguais, a Fig. 2 mostra o formato de um dos corpos de prova, bem como as suas dimensões.



Figura 2: Corpo de prova antes do ensaio. Fonte: autor.

Além disto, os corpos de prova foram fixados na máquina através de duas garras sendo a garra superior móvel e a inferior fixa. Segundo Callister(2012), um material isotrópico dúctil possui duas zonas de deformação: elásticas e plástica. O mesmo autor indica que na zona elástica de deformação é possível prever uma linearidade entre tensão e deformação, enquanto na zona plástica esta relação não é possível de ser determinada com tamanha exatidão. Callister(2012), afirma ainda que à esta relação linear entre a tensão e a deformação, dá-se o nome de módulo de elasticidade que tal módulo pode ser determinado, de maneira analítica, segundo a Eq.(1), se a tensão máxima for menor que a tensão limite proporcionalidade. O limite de proporcionalidade é o ponto máximo até onde a curva de tensão x deformação assume a forma de uma reta.

$$\sigma = \varepsilon.E \quad (1)$$

Um dos parâmetros de resistência mecânica obtidos pelo ensaio de tração é o limite de resistência à tração, LRT, calculado pela razão entre a carga máxima e a área da seção transversal inicial do corpo de prova, expresso pela Eq. (2) (DIETER, 1981)(P.Mariana, 2015).

$$LRT = \frac{\sigma_{\max}}{A_0} \quad (2)$$

Todavia, o limite de proporcionalidade não é ainda o ponto que define se o material entrou na zona plástica, ou se ainda está sofrendo deformação elástica. Para Callister (2012), o ponto que distingue essas duas zonas é o limite de escoamento e esse ponto é um pouco superior ao limite de proporcionalidade. Callister (2012) continua e explica que entre o limite de proporcionalidade e o limite de escoamento ocorre um fenômeno chamado escoamento.

A norma ABNT 6152 define que, para se determinar o limite de escoamento de um material é necessário conhecer o módulo elástico do mesmo e em seguida, traçar uma reta paralela à reta elástica que passe pelo ponto de deformação 0,002mm e tensão 0MPa e toque a curva de Tensão -Deformação. Desta maneira, o ponto onde a reta toca a curva de Tensão - Deformação é denominado ponto de limite de escoamento.

Os resultados do ensaio de tração podem ser vistos na Fig.3, Fig.4 e Fig.5 na qual é possível ver a curva de tensão x deformação construída a partir do aumento gradativo da carga sobre os corpos de prova. Na Fig.3 e Fig.4 é possível perceber que ocorreu escorregamento inicial da garra e que por isso a máquina identificou uma deformação muito grande, sem que houvesse incidência de tensão.



Figura 3: Curva de tensão – deformação do corpo de prova 1. Fonte: Autor



Figura 4: Curva de tensão – deformação do corpo de prova 2. Fonte: Autor

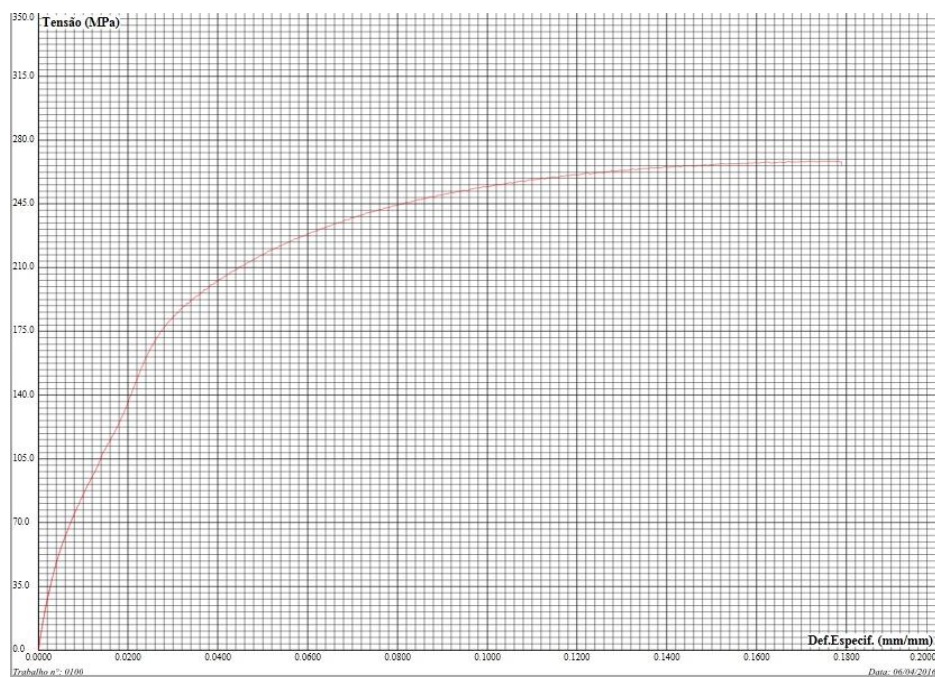


Figura 5: Curva de tensão – deformação do corpo de prova 3. Fonte: Autor

Devido ao escorregamento inicial e para facilitar o cálculo do módulo de elasticidade, do limite de proporcionalidade e do limite de escoamento, foi necessário ajustar a curva Tensão -Deformação conforme Fig. 6 e Fig.7. Uma vez ajustado, é mais fácil manipulá-lo e definir seus principais pontos. Para o desenho da curva foram adotados pontos arbitrários de tensão e seus pares correspondentes de deformação. A partir da nova curva foi possível identificar na Fig.6, Fig.7 e Fig.8 o limite de proporcionalidade como sendo respectivamente 154MPa (deformação de 0,006), 124,25MPa (deformação 0,007) e 161MPa (deformação 0,024) tendo o limite de escoamento, um pouco maior, sendo respectivamente 171,966667MPa, 177,5MPa e 174,416667MPa. O valor do módulo elástico foi determinado utilizando equação da reta e vale respectivamente 25666,7MPa, 17750MPa e 6708,33MPa.

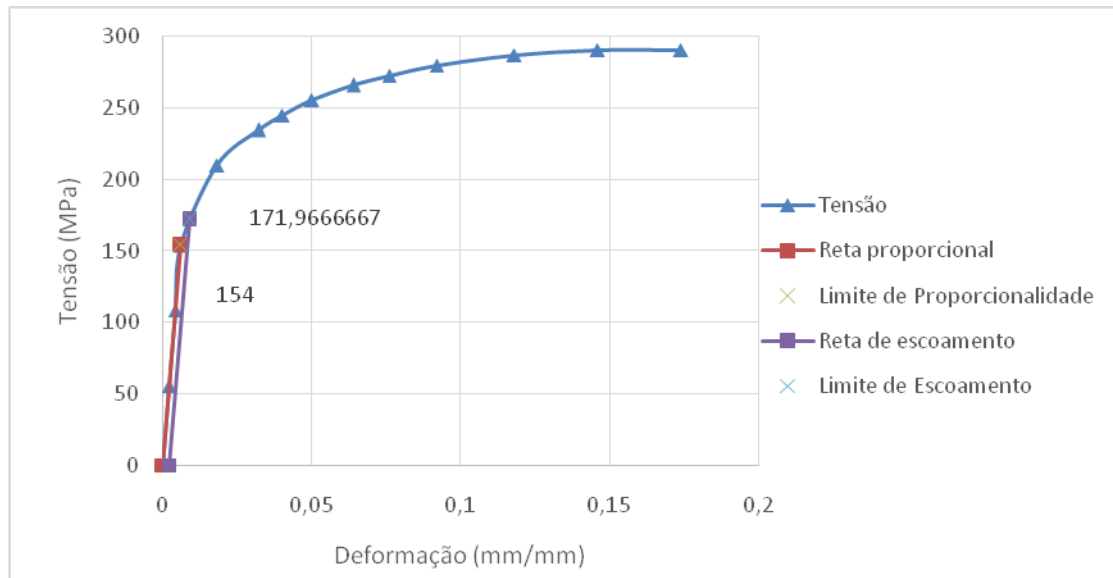


Figura 6: Resultado do ensaio de tração do corpo de prova 1, com destaque para o limite de proporcionalidade e limite de escoamento. Fonte: Autor

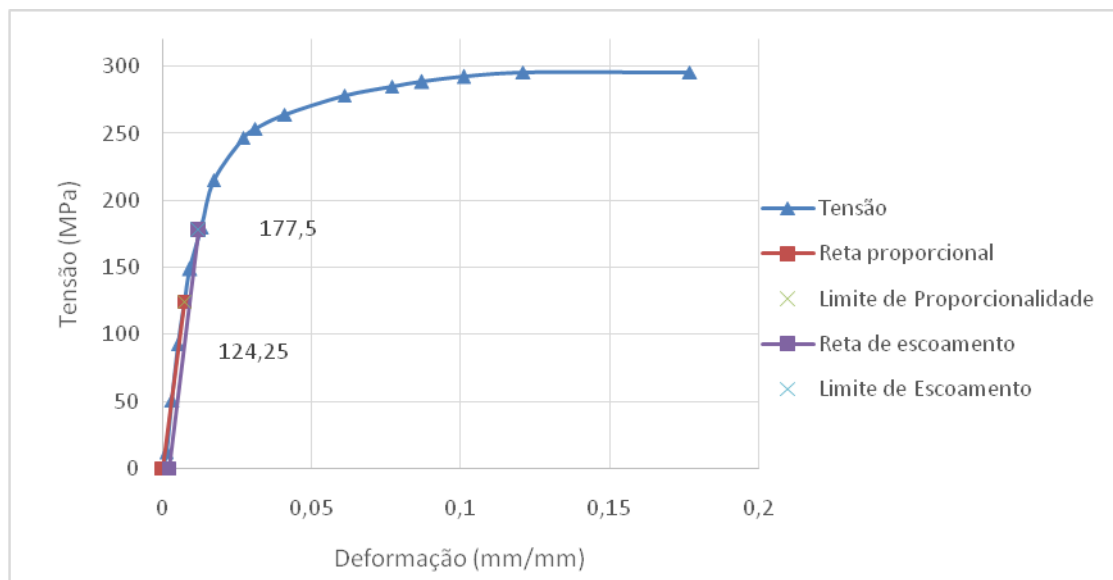


Figura 7: Resultado do ensaio de tração do corpo de prova 2, com destaque para o limite de proporcionalidade e limite de escoamento. Fonte: Autor

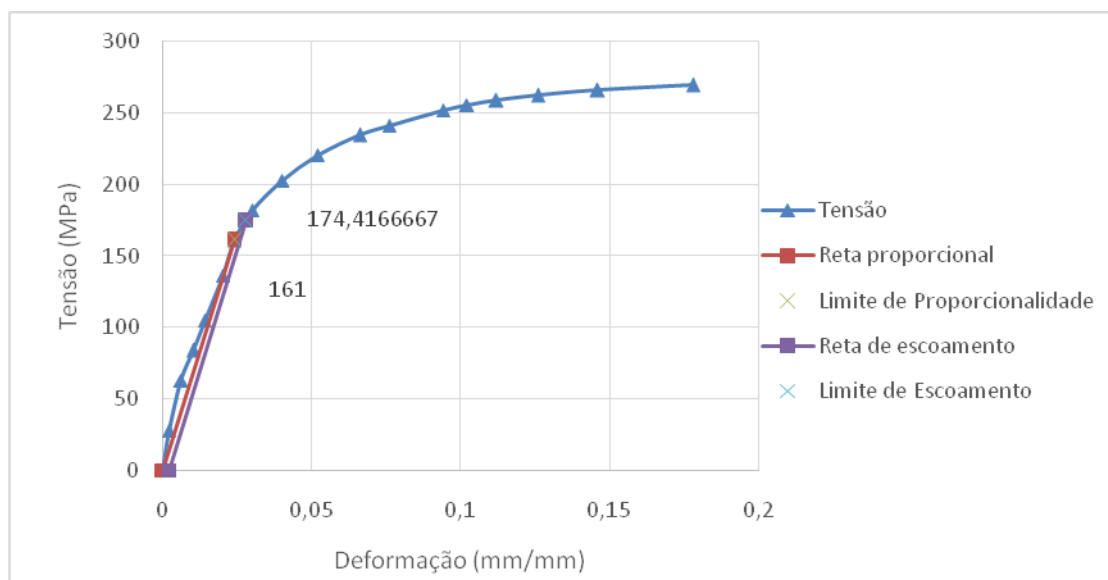


Figura 8: Resultado do ensaio de tração do corpo de prova 3, com destaque para o limite de proporcionalidade e limite de escoamento. Fonte: Autor

Depois de colher todos os resultados do ensaio real, foi possível descrever um gráfico que mostre a comparação dos três ensaios realizados como consta na Fig.9, que traz curvas bem parecidas mostrando se tratar do mesmo material. Somente no corpo de prova três ocorreu uma dispersão dos outros ensaios, mas nada que interfira muito nos valores de suas propriedades mecânicas.

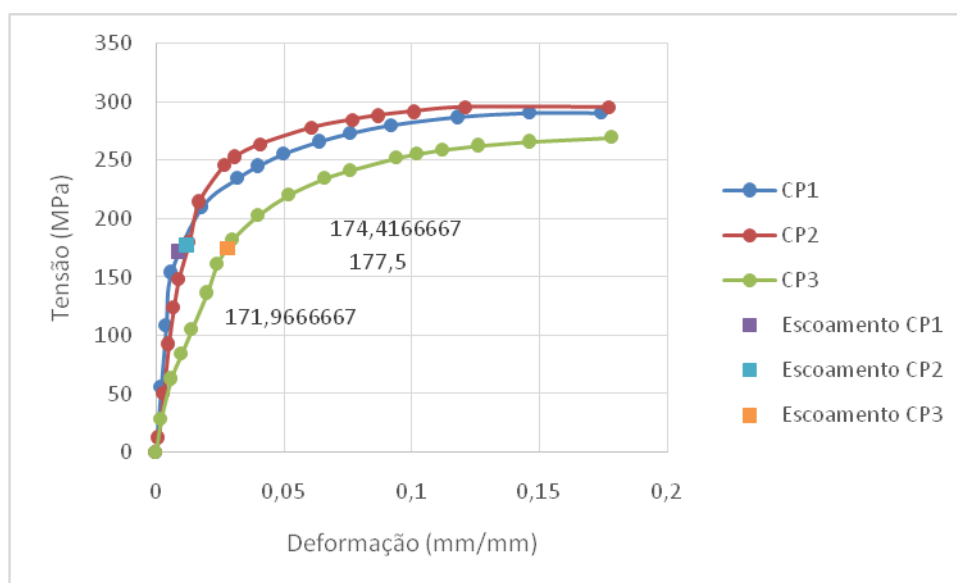


Figura 9: Comparação das curvas do ensaio de tração real. Fonte: Autor

2.2. Ensaio de tração via simulação computacional.

Com os resultados do ensaio de tração o próximo passo foi realizar a simulação numérica da mesma geometria do corpo de prova. Bosch (2005) recomenda que, uma vez que a espessura seja muito menor que seu comprimento, recomenda-se a utilização de uma malha do tipo casca.

A Fig. 10 mostra os tipos de malha. O corpo de prova possui comprimento na zona útil de 50mm e espessura de 1,25mm, o que leva à uma razão entre espessura/comprimento de 0,025. Essa espessura é pequena, o que justifica a utilização de malha do tipo casca. Com destaque para este tipo de elemento é plano, na Fig.10, é possível ver que existem dois tipos de malha plana: triangulares e quadrangulares. Além delas, cada uma possui duas variações: com nós somente nas arestas e com nós nas arestas e no meio dos segmentos. As malhas com nós somente nas arestas servem para corpos que são simétricos em relação à algum eixo. O presente trabalho considera o corpo de prova a ser simulado simétrico e portanto a malha escolhida é do tipo que possui nós apenas nas arestas.

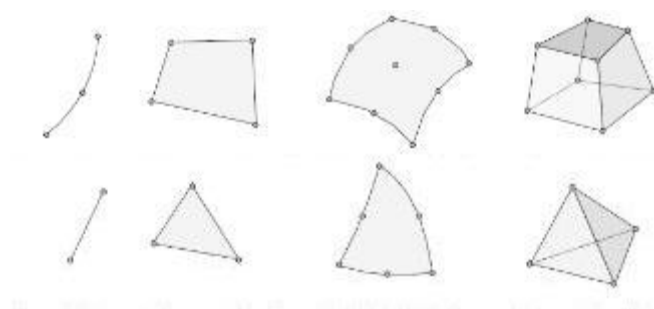


Figura 10: Tipos de malha da esquerda para direita: linear, superficial de aresta, superficial de aresta e segmento e sólida. Fonte: Budynas (2011).

Em relação ao tipo de malha, Budynaset al.(2011) é bastante conciso em afirmar que a utilização da malha de superfície triangular de três nós deve ser evitada, em relação à malha de superfície quadrilateral de quatro nós. A malha de três nós só deve ser utilizada quando a geometria do corpo não permitir a utilização da malha de quatro nós. Uma vez que a geometria do corpo de prova pode ser considerada simples (baixos concentradores de tensão), é possível utilizar somente malha de quatro nós.

As condições de contornos, segundo Bosch (2005) devem tentar reproduzir de maneira mais fiel possível os fenômenos que ocorrem. Nos ensaios de tração, uma garra do equipamento de tração é fixa e a outra garra é móvel. Durante o ensaio, a garra móvel tende a se distanciar da garra fixa de maneira gradativa e com velocidade constante. Uma vez que exista um corpo de prova entre as duas garras, enquanto a garra móvel se distancia, a mesma exerce uma força no corpo de prova. Essa força faz o corpo de prova ser tracionado. A maneira de definir as condições de contorno então é fixar um lado do corpo de prova, enquanto no outro lado do corpo de prova é aplicada uma força. Para o atual estudo foram usados diferentes valores de força, cada um gerando uma tensão e uma deformação, com o objetivo de traçar uma curva de Tensão -Deformação. A Tab. 1, Tab.2 e Tab.3 mostra os valores de entrada dessas cargas retiradas da Fig.3, Fig.4 e Fig.5.

Nas Fig.11, Fig.12 e Fig.13 mostram os resultados do ensaio computacional numérico para as cargas que contam na Tab. 1, Tab.2 e Tab.3 respectivamente.

Tabela 1: Valores de carga utilizados na simulação numérica do corpo de prova 1. Fonte: Autor

F1	0N
F2	525
F3	1017,1875

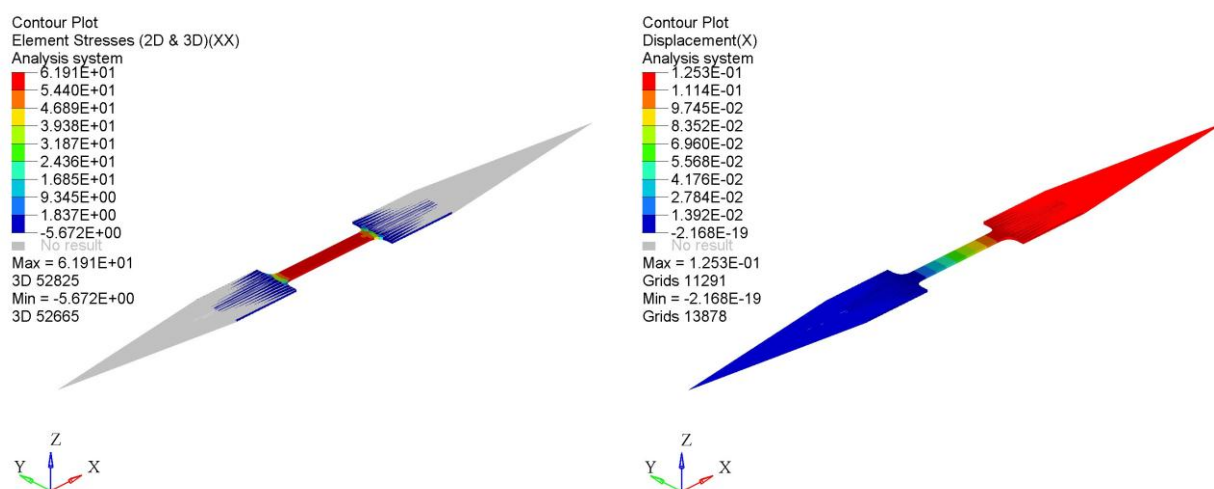


Figura 11: Simulação numérica do corpo de prova 1. Fonte: Autor

Tabela 2: Valores de carga utilizados na simulação numérica do corpo de prova 2. Fonte: Autor

F1	0N
F2	114,84375
F3	475,78125
F4	869,53125

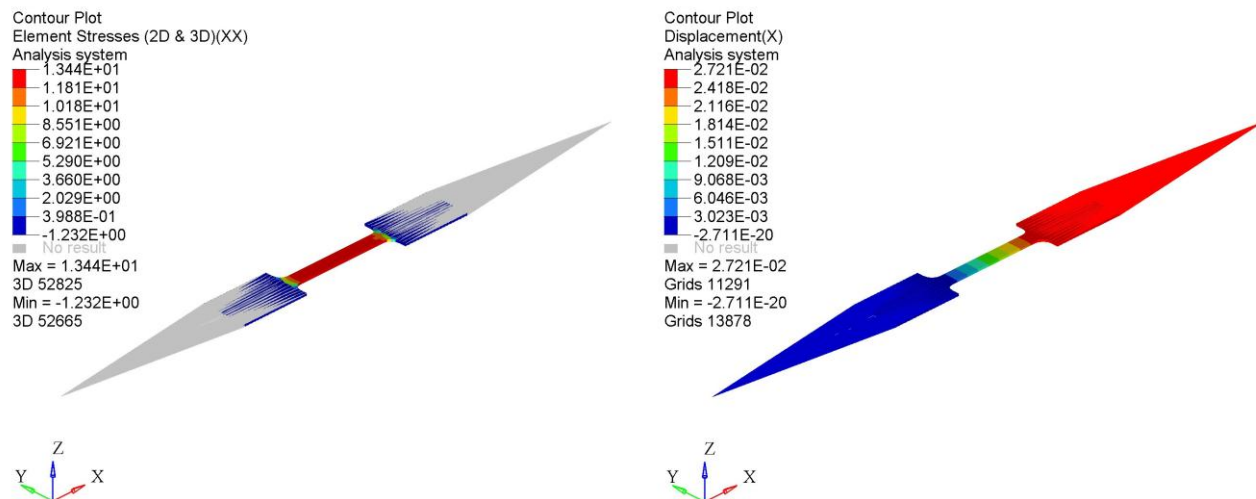


Figura 12: Simulação numérica do corpo de prova 2. Fonte: Autor

Tabela 3: Valores de carga utilizados na simulação numérica do corpo de prova 3. Fonte: Autor

F1	0N
F2	297,5
F3	669,375

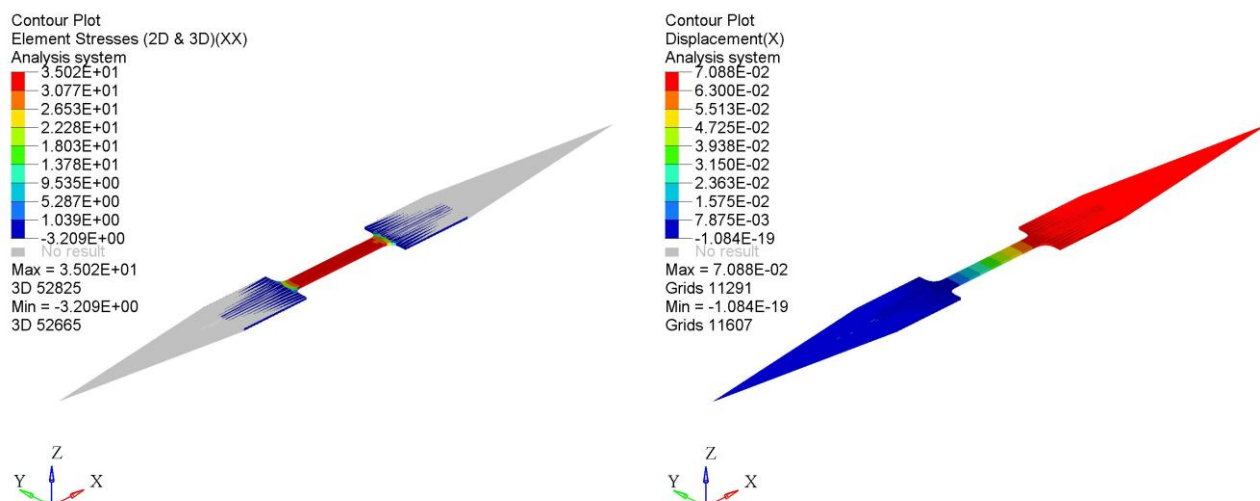


Figura 13: Simulação numérica do corpo de prova 3. Fonte: Autor

O tamanho da malha também deve ser uma preocupação a ser considerada. Bosch (2005) afirma que deve-se utilizar a menor quantidade de nós possível, mas que consiga representar de maneira fiel a geometria do elemento. Percebeu-se

que, utilizando malha de 2mm de tamanho, obteve-se uma aproximação bastante boa entre o corpo de prova e o modelo descritivo do corpo de prova. Os dados da malha, está disponível na Tab.4.

Tabela 4: Características da malha. Fonte: Autor.

Tamanho da malha	2mm
Número de elementos	6725

Mantendo as condições de contorno do apoio e as características da malha, além do tamanho da mesma, o modelo foi calculado para cada carga, com o objetivo de se obter as tensões e deformações correspondentes com cada carga da Tab.1, Tab.2 e Tab.3. O resultado dessas simulações estão disponíveis na Tab.5, Tab.6 e Tab.7 e a curva de tensão deformação construída a partir destes mesmos dados pode ser vista na Fig. 14, Fig.15 e Fig.16. Como já era previsto, a curva só possui os valores correspondentes à zona elástica do material, mais precisamente à zona linear do mesmo.

Tabela 5: Tensão e deformação correspondentes às cargas no corpo de prova 1. Fonte: Autor.

Força	Tensão	Deformação
F1	0MPa	0mm
F2	61,91MPa	0,002506mm
F3	119,9MPa	0,004854mm

Tabela 6: Tensão e deformação correspondentes às cargas no corpo de prova 2. Fonte: Autor.

Força	Tensão	Deformação
F1	0MPa	0mm
F2	13,44MPa	0,001mm
F3	56,01MPa	0,002mm
F4	102,5MPa	0,004mm

Tabela 7: Tensão e deformação correspondentes às cargas no corpo de prova 3. Fonte: Autor.

Força	Tensão	Deformação
F1	0MPa	0mm
F2	35,02MPa	0,0014176mm
F3	78,89MPa	0,003194mm

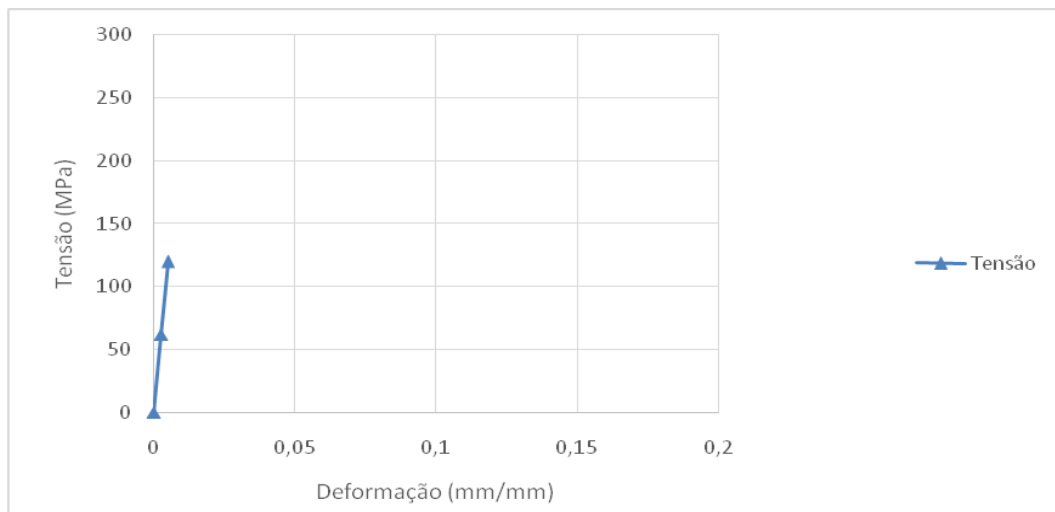


Figura 14: Curva de Tensão x deformação numérica obtida por meio de simulação do corpo de prova 1. Fonte: Autor.

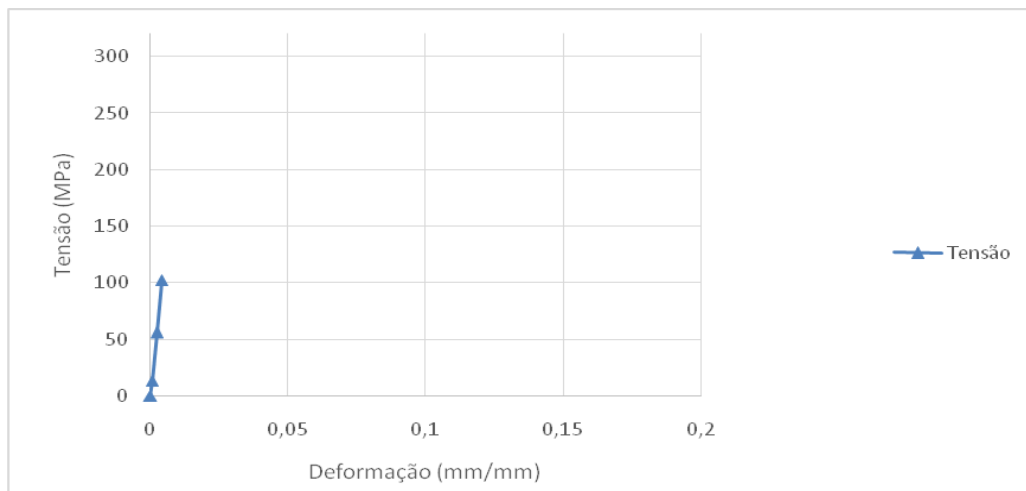


Figura 15: Curva de Tensão x deformação numérica obtida por meio de simulação do corpo de prova 2. Fonte: Autor.

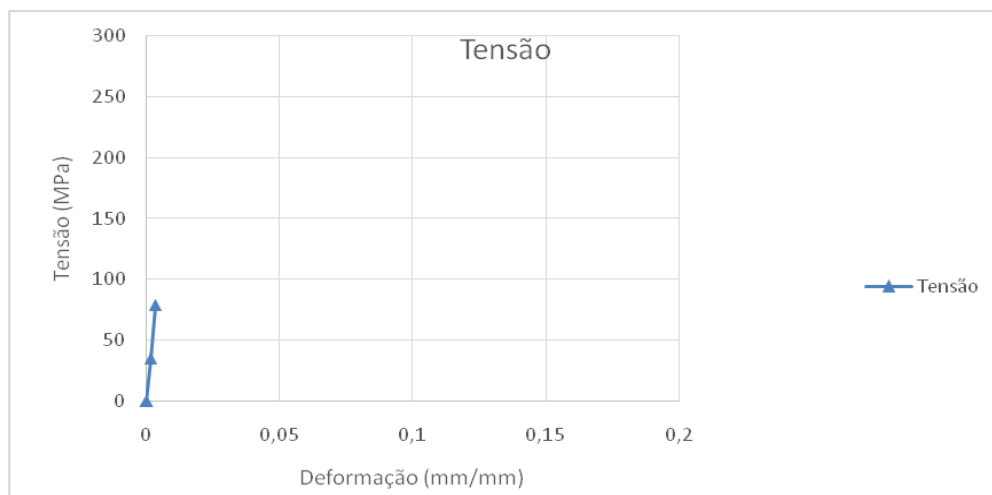


Figura 16: Curva de Tensão x deformação numérica obtida por meio de simulação do corpo de prova3. Fonte: Autor.

Depois de colher todos os resultados do ensaio computacional numérico, foi possível descrever um gráfico que mostre a comparação dos três ensaios realizados como consta na Fig.17. O gráfico trouxe 3 retas na zona elástica bem parecidas mostrando se tratar do mesmo material.

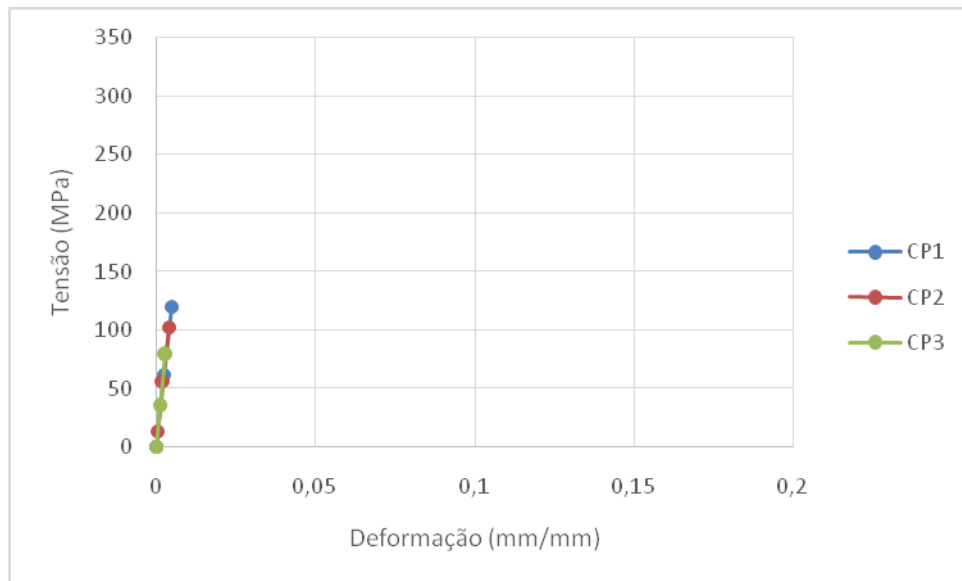


Figura 17: Comparação das curvas do ensaio de tração computacional.

2.3. Comparação dos resultados: ensaio real x computacional.

Dispondo de ambas curvas de Tensão – Deformação é possível compará-las e analisar seus resultados. A Fig.18, Fig.19 e a Fig.20 mostram a curva Tensão – Deformação que mostra a comparação entre os valores de tensão obtidos por meio do ensaio de tração e obtidos por meio de simulação computacional. O mesmo vale para a deformação. Para a confecção da curva foram utilizados os mesmos pares ordenados apresentados na Tab.5, Tab.6 e Tab.7 contando também com os correspondentes do ensaio de tração.

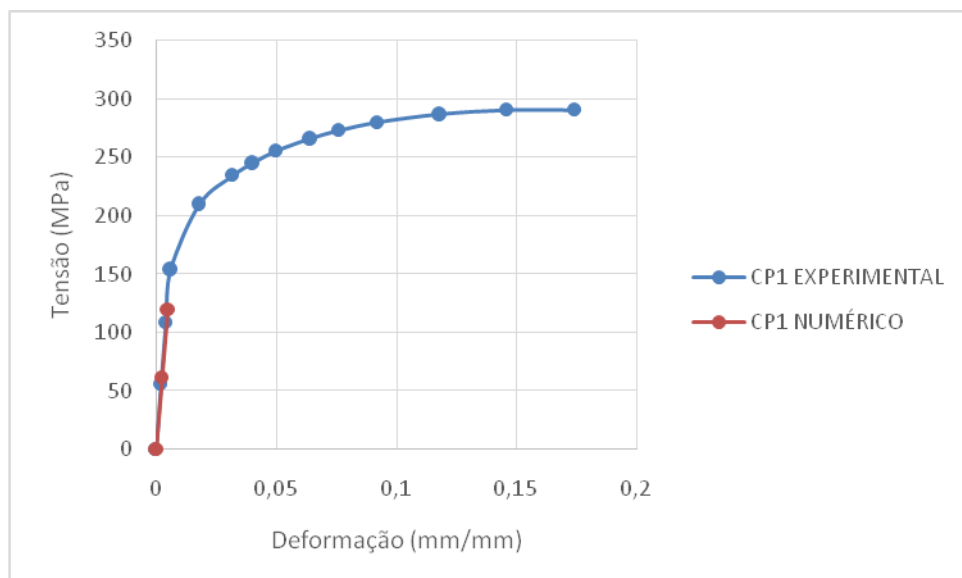


Figura 18: Comparação das curvas do ensaio de tração real com o computacional do corpo de prova 1.

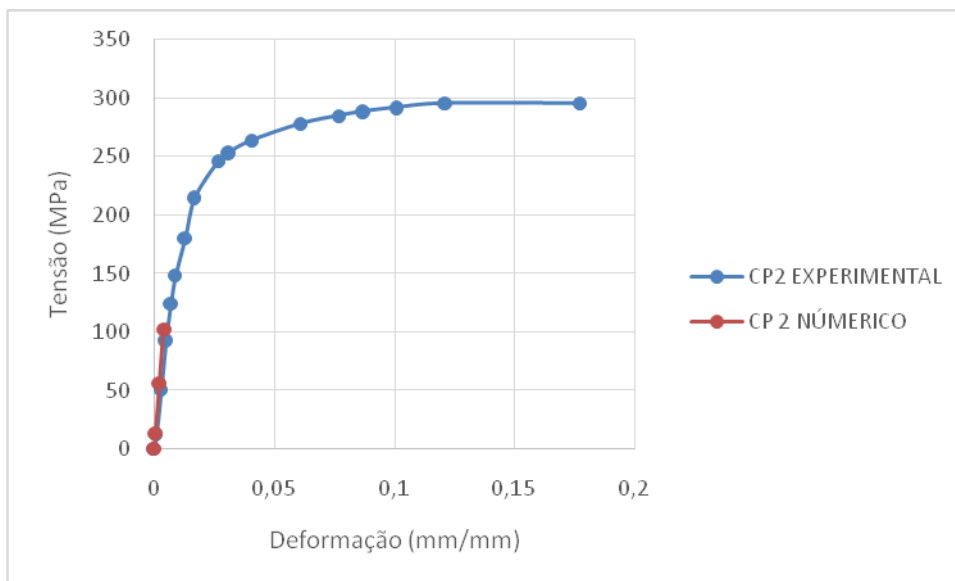


Figura 19: Comparação das curvas do ensaio de tração real com o computacional do corpo de prova 2.

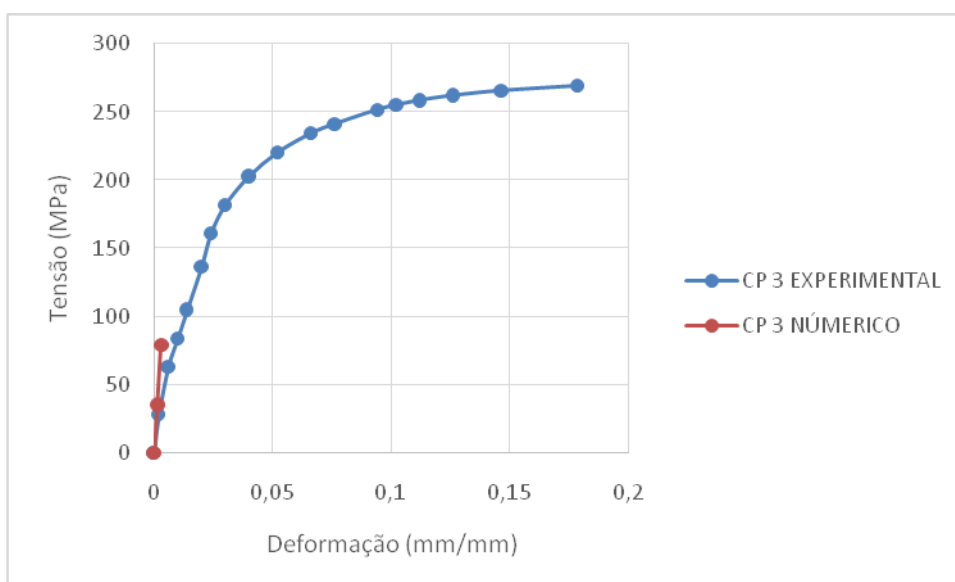


Figura 20: Comparação das curvas do ensaio de tração real com o computacional do corpo de prova 3.

3. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Observou-se pela análise experimental um resultado já esperado de tensão e deformação por se tratar de uma liga de aço, que tem suas propriedades mecânicas já conhecidas, tendo uma reta na zona elástica bem parecida com a proporcional. Pela análise numérica viu-se que a tensão e a deformação crescem proporcionalmente de acordo com a carga aplicada, pela comparação dos resultados numéricos e experimental observou-se a boa proximidade dos resultados de tensão e deformação na zona elástica, gerando duas retas bem parecidas até o limite de escoamento. Assim este trabalho conclui, que através das análises realizadas, que a simulação numérica pelo método de elementos finitos é um meio viável de avaliação de um ensaio de tração, pois cria resultados numéricos muito parecidos com os de um ensaio real, tendo dispersão de valor que pode ser desconsiderada.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o auxílio dos membros da equipe de Bajaço, o apoio do Instituto Federal de Minas Gerais Campus Congonhas e também da Altair Brasil pela contribuição à realização do trabalho.

5. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT6152, 2002. Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente.
- DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. 2. ed. [S.l.]: Guanabara Koogan S.A., 1981.
- Bosch, R., 2005. Manual de Tecnologia Automotiva. 25ªEd. São Paulo: Blucher. pp. 190-196;749.
- Budynas, R., Nisbet, J.K., 2011. Elementos de Máquinas de Shigley – Projeto de Engenharia Mecânica. 8ªEd. Porto Alegre: AMGH. pp. 963-971.
- P.C.Marcelo., 2007. Dissertação para a obtenção do título de mestre em engenharia e tecnologia de materiais. Tese de mestrado, departamento de pós-graduação, PUCRS,.Porto Alegre, Brasil.
- Callister, Jr., 2012. Ciência Engenharia de Materiais - Uma Introdução. 8ªEd. LTC.
- P.Mariana., 2015; simulação do ensaio de tração para o aço AISI 430 via redes neurais artificiais e análise do comportamento mecânico, Tese de mestrado, departamento de pós-graduação, CEFET-MG, Belo Horizonte, Brasil.
- Gonçalves, C.A., Simulação numérica de processos de conformação superplástica e corte de chapas metálicas, TCC USP, São Paulo,2011.
- Bluhm, J. I. e Morrissey, R. J., 1965, “Fracture in a Tensile Specimen”. First International Conference on Fracture, Sendai, Japão, pp. 1739-1780

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STRESS-STRAIN ASSESSMENT IN CORRELATION NUMERICAL AND EXPERIMENTAL OF A STEEL ALLOY

Darllan Hygor de Paiva Souza, darllanh@hotmail.com¹
Tiago Simão ferreira, Tiago.simao@ifmg.edu.br¹
Diógenes Sena de França e Silva, diogenes.sfs@gmail.com¹
Timóteo Simão Ferreira, timoteo_ferreira@hotmail.com²
Bruno Cesar Pockszevnicki, bruno@visiongraphic.com.br³

¹ Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Congonhas, Congonhas, MG, Av. Michel Pereira de Souza, 3007, CEP: 36415-000

² Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Av. Antônio Carlos, 6627, CEP: 31270-901

³ Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Av. Dom José Gaspar, 500, CEP 30535-901

Abstract. *This study aimed to present an experimental analysis and numerical simulation of the mechanical behavior during the tensile test to make improvements in results and thus understand better the material used. This work will be completed three room temperature tensile tests on the specimen of rectangular section, made of steel alloy, using the Finite Element Method - MEF to compare with the experimental test. The tensile test is an important engineering procedure, useful for characterizing some relevant elastic and plastic variables related to the mechanical behavior of materials. Due to non-uniformity of the existing distribution of stresses and deformations to high levels of axial strain, it has been recognized that significant changes in geometry of the sample setting must be considered in order to adequately describe the response of the material during the deformation process. The mechanical properties were determined with voltage curves - deformation. The modulus of elasticity differs from the actual experimentally obtained value as expected. Through of method the Finite Element - EF the analysis was performed with a satisfactory correlation to the experimental results, thereby predicting damage to materials with elastic-plastic behavior. The proposed methodology enable to achieve an adequate description of the mechanical response of the material during the tensile test using samples of rectangular sections.*

Keywords: *tensile testing, Finite Element Methods, Stress and strain.*