

CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS NO REGIME PLÁSTICO DO MATERIAL ARMOX 600T

Caio Cangirana Rodrigues, eng.cangirana@gmail.com¹
João Ricardo dos Santos Portilho, joaoportilho@gmail.com¹
Bruno Arruda da Silva, bruno.arruda.93@outlook.com²
Tiago de Bortoli Luciano, eng.bortoli@gmail.com¹

¹UDF – Centro Universitário. SGAS 903 Lote D, Brasília/DF, CEP 73390-045,

² UnB – Universidade de Brasília. Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília-DF, CEP 70910-900

Resumo: Para conduzir um projeto em que baseia-se na região plástica é de extrema importância conhecer o comportamento do material em regime elasto-plástico. Para tanto, os resultados obtidos por meio do ensaio de tração não trazem a confiabilidade necessária na captação dos dados até o começo da estricção. Com o avanço computacional das últimas décadas, tornou-se possível utilizar modelos e métodos matemáticos a fim de caracterizar completamente a região elasto-plástica do material, possibilitando obter valores satisfatórios e não limitados da curva de encruamento e a antecipação do comportamento material antes de aplicações industriais/reais. Nesse contexto, este trabalho, identificou os parâmetros elasto-plásticos por meio da convergência de valores obtidos experimentalmente e numericamente calculados (MEF – Método de Elementos Finitos), utilizando o método unidimensional da seção áurea para tal analogia. Foi obtida, por meio do ensaio de tração padrão monotônico, na Máquina de Ensaio Universal MTS 810 100kN, os gráficos de tensão deformação e após o devido tratamento matemático, utilizando o modelo de Ludwick, os dados foram inseridos em algoritmo no software MatLab para obtenção, com o método unidimensional da seção áurea, dos parâmetros do material.

Palavras-chave: identificação de parâmetros; método da seção áurea; otimização; regime elasto-plástico

1. INTRODUÇÃO

Em projetos onde demandam altos custos operacionais e materiais e com índices de periculosidade elevados é válido a utilização de métodos computacionais (MEF) a fim de minimizar os erros e custos, visto que este teve um avanço expressivo nas últimas décadas possibilitando construir modelos que prevejam o comportamento do material desde que aplicados à respectivas condições de contorno.

Um modelo matemático baseado em resultados uniaxiais reais vinculado com a caracterização paramétrica das variáveis do material conseguem estimar a curva de encruamento após o regime elástico, sendo capaz de aplicar outras possíveis situações industriais e/ou descobrir efeitos como retorno elástico (“springback”), assim reduzindo os custos dos ensaios experimentais para cada situação.

Abordagens diversas utilizam o método da caracterização paramétrica a fim de determinar a curva de escoamento do material. Stalchmidt, 2010; Lopes, 2016 e Silva, 2017 manipularam o método para diversos materiais com diferentes propriedades mecânicas.

Kleineremann & Ponthot, 2003 e Ponthot & Kleineremann, 2006 empregaram métodos numéricos de otimização para obter alguns parâmetros que podem ser aplicados em métodos unidimensionais e multidimensionais.

Este estudo tem como finalidade a caracterização completa da curva de encruamento do material ARMOX 600T, a qual será obtida por meio da análise da evolução da deformação plástica de um corpo de prova submetido a um ensaio de tração, e analisado por meio da identificação paramétrica unidimensional, método da seção áurea.

2. ENSAIO DE TRAÇÃO

Os melhores dados de propriedades mecânicas do material são obtidos a partir de ensaios destrutivos realizados sob carregamentos de serviço reais em protótipos reais, feitos de materiais reais por processos reais de manufatura (NORTON,2013), o qual são obtidos os valores de tensão e deformação ponto a ponto.

Para este estudo foi utilizado o aço ARMOX 600T, empregado em aplicações de blindagem balística, do qual foram extraídas as características mecânicas por meio do ensaio de tração monotônico padrão em corpos de provas (CP), cedidos pela empresa Technicae, onde as dimensões são indicadas na Figura 1.

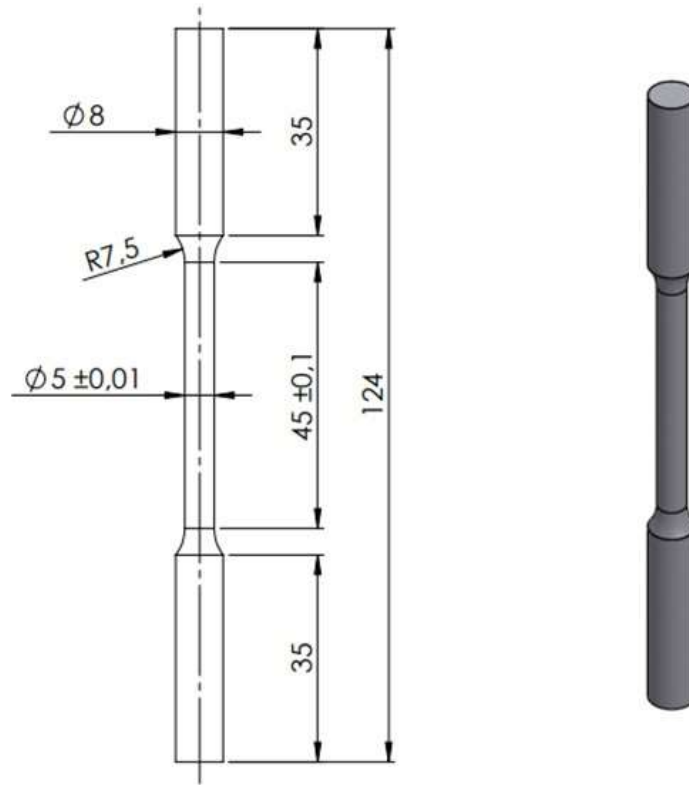


Figura 1. Dimensões do corpo de provas utilizados neste trabalho (TECHNICA).

A área de seção transversal utilizada foi determinada por um extensômetro calibrado e com comprimento inicial de $L_0 = 25$ mm e diâmetro inicial de $D_0 = 5$ mm para uma tolerância de $\pm 0,01$ mm já estimada.

Após a realização do ensaio foram obtidos os dados de força F e deslocamento ΔL , assim, foi possível calcular a tensão de engenharia σ e deformação de engenharia ε , conforme as Eq. (1) e (2), respectivamente, onde a Figura 2 ilustra a curva experimental obtida.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

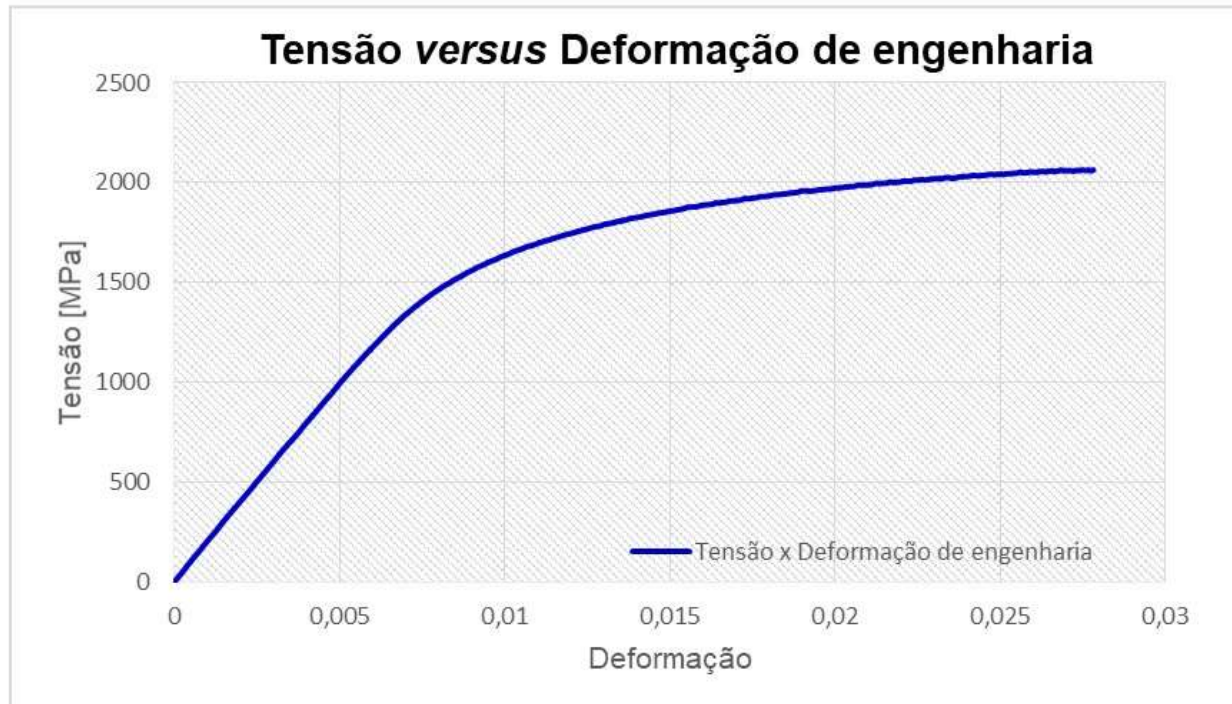


Figura 2. Curva tensão versus deformação de engenharia.

Posteriormente, foi estabelecido o limite de resistência ao escoamento inicial σ_{y0} e o módulo de Young E , a partir do critério de 0,2% da deformação de engenharia ε , onde uma reta paralela à curva de tensão *versus* deformação de engenharia, somente na região elástica, é criada com defasagem de 0,002.

Com a reta paralela criada, fez-se uma regressão linear a fim de obter sua respectiva equação, onde o módulo de Young E corresponde ao coeficiente angular da reta e o limite de resistência ao escoamento inicial σ_{y0} é o ponto de contato entre a curva de tensão *versus* deformação de engenharia e a reta gerada a partir da equação obtida.

Continuando o tratamento dos dados, foi calculada a tensão verdadeira σ_v e a deformação verdadeira ε_v , seguindo as Eq. (3) e (4), onde os valores são maiores que os de tensão de engenharia σ e deformação de engenharia ε , já que estes não consideram a estricção do corpo de provas ao longo do ensaio.

A Figura 3 apresenta as curvas de tensão *versus* deformação de engenharia e verdadeira plotadas. Vale ressaltar que a diferença entre os valores não foi muito discrepante por conta de o material ser extremamente duro, ou seja, onde não há grandes deformações até a ruptura.

$$\sigma_v = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (3)$$

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon) \quad (4)$$

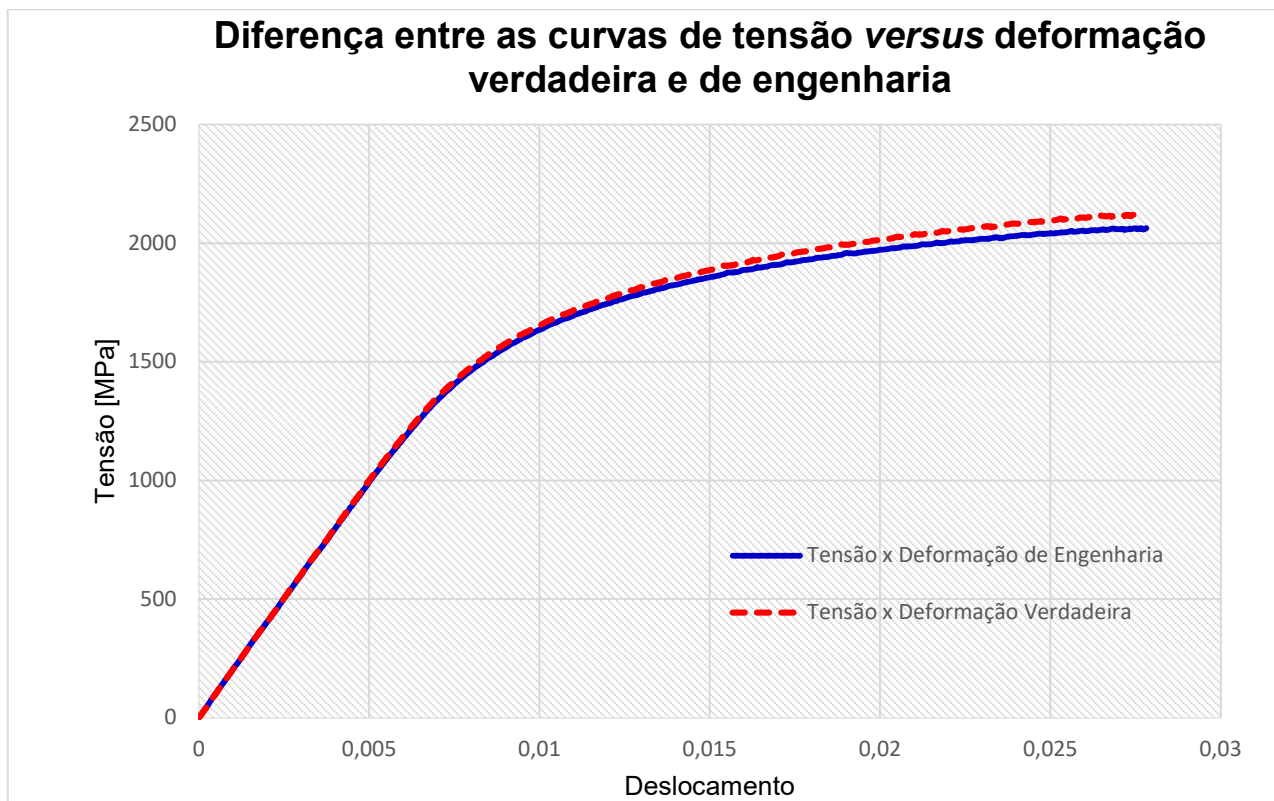


Figura 3. Curva tensão versus deformação de engenharia e verdadeira.

Finalmente, os valores da tensão verdadeira σ_v e deformação verdadeira ε_v que estivessem abaixo do limite de resistência ao escoamento inicial σ_{y0} e acima do valor máximo da tensão verdadeira σ_v foram desconsiderados pois o encruamento da região plástica só acontece até este ponto.

Após reestabelecidos os valores da tensão verdadeira σ_v e deformação verdadeira ε_v , estes foram utilizados para obter a estimativa inicial $\mathbf{p}^{(0)}$ com o auxílio da função *nlinfit*.

3. ESTIMATIVA INICIAL E ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS

A fim de obter-se a curva de encruamento e seus respectivos parâmetros pelo método da Seção Áurea, faz-se necessário determinar a estimativa inicial $\mathbf{p}^{(0)}$, onde, neste trabalho, foi utilizado o *software* MATLAB.

Após vários estudos e análises dos dados observou-se que ao utilizar o modelo matemático de Ludwick com três parâmetros de identificação os resultados foram satisfatórios e suficientes, alcançando o objetivo deste trabalho. A Eq. (5) evidencia o modelo matemático para encruamento de Ludwick utilizado.

$$\sigma_y = \sigma_{y0} + H\varepsilon_p^n \quad (5)$$

Outro ponto importante considerado sobre o modelo matemático de Ludwick é a relevância e significância dos parâmetros de identificação, onde H é o módulo de endurecimento isotrópico e n o expoente de encruamento, possibilitando uma ampla comparação com diversos resultados obtidos por meio deste modelo. Isso deve-se pelo fato do modelo de Ludwick ter sido elaborado em 1909, portanto considerado um clássico sendo bastante difundido na literatura.

Para encontrar a estimativa inicial dos parâmetros utilizou-se a função *nlinfit* do MATLAB empregado por ARRUDA (2016), onde a *nlinfit* do MATLAB é uma função de regressão não linear feita pelo método dos mínimos quadrados que ao final do algoritmo retorna um vetor dos coeficientes iterados, onde os valores de tal estimativa inicial dos parâmetros estão descritos da Tabela 1.

Tabela 1. Valores da estimativa inicial dos parâmetros.

	σ_{y0} [MPa]	H [MPa]	n []
Corpo de Provas	1662,2	5522,8	0,604

Após estabelecido os valores iniciais dos parâmetros, foi-se utilizado o programa PARFINDER também aplicado por ARRUDA (2016), para encontrar os parâmetros da curva de encruamento, visto que este software manipula o método da Seção Áurea para convergência dos resultados, objetivo do presente trabalho.

Antes de realizar a simulação numérica nos corpos de provas por meio do método de elementos finitos (MEF), alguns conceitos foram considerados para que o tempo computacional fosse reduzido ao máximo.

A simulação em um corpo cilíndrico, com carregamento unidimensional pode-se ser considerado um problema axissimétrico (possuem simetria com o eixo principal). Com isso, foi possível alterar a simulação de tridimensional (3D) para bidirecional (2D) sem alterar a qualidade dos resultados obtidos.

Assumindo uma simetria de revolução para com o eixo “z”, foi possível dividir o corpo de provas em quatro partes iguais. Assim, a simulação numérica foi realizada somente em $\frac{1}{4}$ do corpo de provas.

Admitindo tais simplificações, é necessário que os valores experimentais adquiridos de deslocamento ΔL sejam divididos por dois, para que os dados estejam em concordância com as condições de contorno da simulação.

A malha aplicada no método de elementos finitos foi construída com 500 elementos, portanto 561 nós quadráticos com integração completa com 4 pontos de Gauss. É considerada uma malha grossa, que permite uma convergência aos resultados de forma mais rápida sem gerar incongruência nos resultados adquiridos.

Vale a pena ressaltar que para execução precisa na identificação dos parâmetros da curva de encruamento é imperativo que os dados experimentais tratados, a malha criada, as condições de contorno definidas e o programa de elementos finitos HYPLAS interajam adequadamente, ou seja, encontrem-se na mesma rotina do programa.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Como objetivo deste trabalho, deseja-se identificar os parâmetros da curva de encruamento do material ARMOX 600T por meio do método unidimensional da Seção Áurea, onde foi considerado o modelo matemático elastoplástico com endurecimento isotrópico não linear proposto por Ludwick, que possui três parâmetros a serem identificados σ_{y0} , H e n .

Vale salientar que a tensão de escoamento inicial σ_{y0} , foi previamente estabelecido após o tratamento dos dados experimentais, portanto havendo necessidade de identificar somente o módulo de endurecimento isotrópico H e o expoente de encruamento n .

Para tolerância χ foi estabelecido como $\chi = 1,1 \cdot 10^{-2}$ para as iterações globais, ou seja, quando o valor da função objetivo $f(\mathbf{p})$ entre uma iteração e outra for menor que $\chi = 1,1 \cdot 10^{-2}$ o programa interpreta que obteve os valores ótimos e encerra a rotina.

O resultado obtido para caracterização dos parâmetros propostos pelo modelo matemático de Ludwick por meio do método unidimensional da Seção Áurea é mostrado na Figura 4 e Tabela 2.

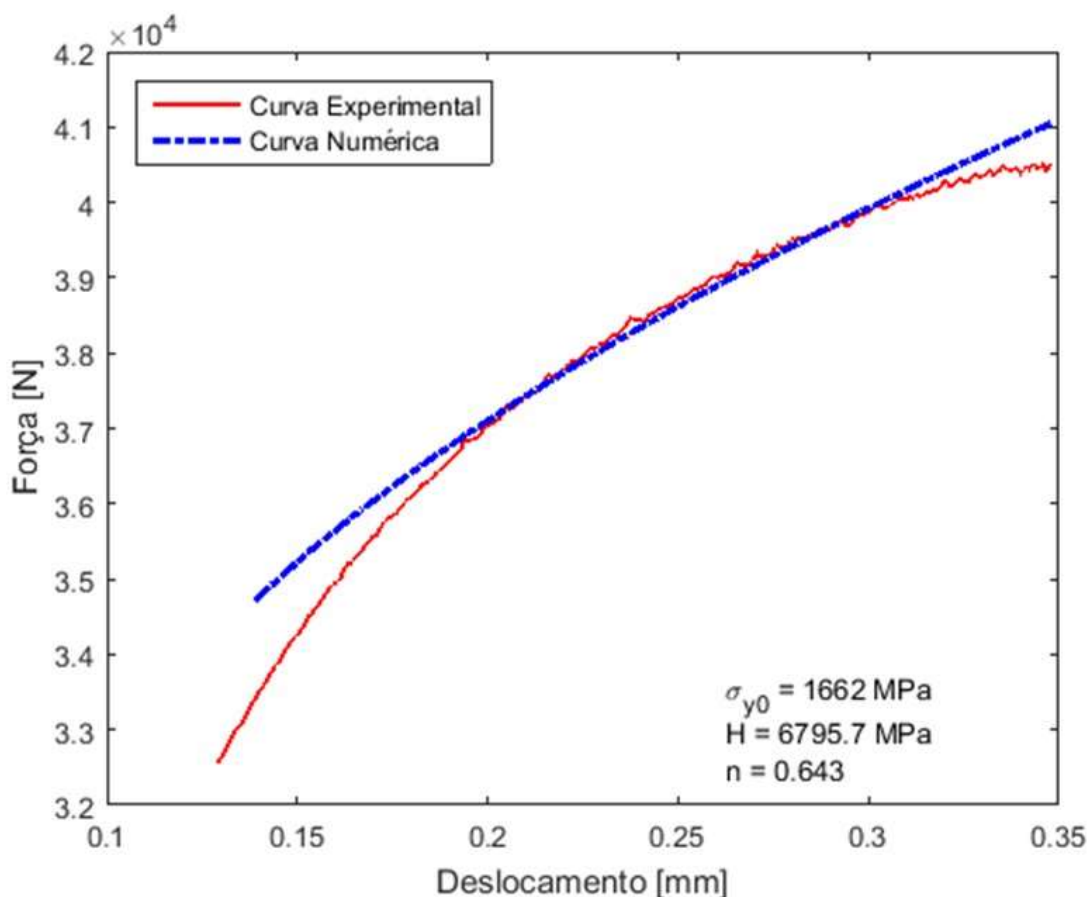


Figura 4. Resultado obtido entre a convergência da curva força versus deslocamento experimental e o método da seção áurea.

Tabela 2 Resultado da caracterização dos parâmetros e detalhes da simulação.

	σ_{y0} [MPa]	H [MPa]	n []	T [min]	Iterações	$f(p)$
ARMOX 600T	1662,2	6796,7	0,643	11,51	24	$1,006 \cdot 10^{-2}$

Durante as simulações pode-se observar que o método unidimensional da Seção Áurea é muito dependente do intervalo de incerteza I , pois ao passo que aumenta-se o intervalo de incerteza o tempo de processamento aumenta e isto ocorre pelo fato do método embasa-se nos valores dos limites superiores e inferiores.

Outra ressalva a ser considerada, o valor estabelecido para tolerância x influência diretamente na redundância da rotina, pois caso seja estipulado valores de tolerância muito rigorosos a simulação continuará iterando e repetindo, desnecessariamente, os dados sem nunca alcançar o valor ideal pra função objetivo $f(p)$ ocasionando em tempo computacional desprezível.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, constata-se que o método unidimensional da Seção Áurea utilizando o modelo matemático de encruamento proposto por Ludwick foi capaz de identificar os parâmetros σ_{y0} , H e n do material ARMOX 600T.

Nota-se também que por meio da metodologia aplicada foi possível convergir eficientemente os resultados experimentais e numéricos com mínimo tempo computacional, mesmo em computadores que não dispõem de configurações robustas.

A grande dependência dos valores informados para o limite superior e limite inferior torna-se um ponto negativo para o método da Seção Áurea, visto que tais dados podem não ser facilmente estabelecidos o que ocasionaria na inviabilidade do método. Portanto ao utiliza-lo é necessário certificar que o *fitting* não linear seja feito de forma correta para melhor identificação da estimativa inicial.

Como trabalhos futuros, propõe-se a utilização de outros métodos numéricos de otimização para aumentar acurácia e diminuir o tempo de processamento entre as curvas experimental e numérica, nesse contexto podem-se ser destacados o método multidimensional da máxima descida e o método BFGS.

Indica-se a utilização de outros materiais, principalmente os comumente estudados, a serem submetidos a metodologia abordada neste trabalho, a fim de obter-se os parâmetros e comparados com os valores encontrados nas literaturas e outros projetos.

6. REFERÊNCIAS

- Arruda. B. S., 2016 Implementação De Método Multidimensional Para Identificação De Parâmetros Da Curva De Encruamento De Materiais Em Regime Plástico. Brasília. Universidade de Brasília.
- Kleinermann, J. P.; Ponthot, J.P., 2003, Parameter Identification And Shape/Process Optimization In Metal Forming Simulation. Journal of Matherials Processing Technology. v. 139. Elsevier Academic Press.
- Lopes, J. P., 2016, Análise De Vida À Fadiga Sob Carregamentos Não Proporcionais Através De Modelo De Dano Contínuo. Brasília. Universidade de Brasília.
- Neto, E. A. S.; Perić, D.; Owen, D. R. J., 2010, Computational methods for plasticity: theory and applications. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- Norton, R. L., 2013, Projeto de máquinas. 4. ed. Porto Alegre: Bookman.
- Ponthot, J.P.; Kleinermann, J. P., 2006, A Cascade Optimization Methodology For Automatic Parameter Identification And Shape/Process Optimization In Metal Forming Simulation. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. v. 195. North-Holland.
- Stalchmidt, J., 2010, Estudos de Identificação de Parâmetros Elasto-plásticos utilizando Métodos de Otimização. Joinville. Universidade do Estado de Santa Catarina.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

CHARACTERIZATION OF THE PARAMENTERS IN THE PLASTIC REGION OF THE MATERIAL ARMOX 600T

Caio Cangirana Rodrigues, eng.cangirana@gmail.com¹
 João Ricardo dos Santos Portilho, joaoportilho@gmail.com¹
 Bruno Arruda da Silva, bruno.arruda.93@outlook.com²
 Tiago de Bortoli Luciano, eng.bortoli@gmail.com¹

¹ UDF – Centro Universitário. SGAS 903 Lote D, Brasília/DF, CEP 73390-045,

² UnB – Universidade de Brasília. Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília-DF, CEP 70910-900

Abstract. *In order to conduct a project in which the material will be used in the plastic regime, it is extremely important to know the behavior of the material in an elasto-plastic region. So that only the results obtained by means of traction testing limit the capture of the data until the beginning of the constraint. With the computational advancement of the last decades, it became possible to use mathematical models and methods in order to completely characterize the elasto-plastic region of the material, allowing to obtain satisfactory values not limited to the hardening curve and in anticipation of the material behavior before industrial/real applications. In this context, this final work in mechanical engineering, seeks the identification of elasto-plastic parameters through the convergence of experimentally and numerically calculated values (FEM), where the one-dimensional method of the golden section will be used for such analogy.*

Keywords: *identification of parameters; method of the golden section; optimization; elasto-plastic regime*