

MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS CONSTITUTIVOS EM PLASTICIDADE PARA POLÍMEROS FABRICADOS POR SLS.

Congresso Brasileiro De Manufatura Aditiva, 1ª edição, de 30/11/2020 a 01/12/2020
ISBN dos Anais: 978-65-86861-62-4

PITANGA; Julia ¹, O'CONNOR; Joan ², SILVA; Cristiane Evelise Ribeiro da ³, GRAÇA; Guido Rezende de Alencastro ⁴, BORGES; Lavinia ⁵

RESUMO

1. Introdução

O presente trabalho responde diretamente a atividades relacionadas com a área de simulação computacional de um projeto maior intitulado “Utilização de técnicas avançadas de manufatura e de caracterização para desenvolvimento de Dispositivos Médicos Implantáveis (DMIs)” da Divisão de Materiais (DIMAT), do Instituto Nacional de Tecnologia (INT).

Em relação a simulação do comportamento de materiais usando o Método de Elementos Finitos (MEF), este trabalho irá abordar o estudo e a implementação computacional de modelos constitutivos fenomenológicos baseados em formulações elasto-plásticas dentro do contexto da mecânica do contínuo [GURTIN, M.E., et al. 2019].

Importante destacar que a teoria da plasticidade, que é considerada uma das teorias constitutivas de maior sucesso aplicada a materiais sólidos, fornece uma estrutura geral para a descrição do comportamento de um grande número de materiais de engenharia e para uma ampla gama de circunstâncias de interesse prático [LEMAITRE, J., CHABOCHE, J.1990], [NETO, E. A. D. S. et al. 2008].

Além disso, essa teoria, restrita à descrição de materiais para os quais as deformações permanentes não dependem da taxa de aplicação de cargas (rate-independent plasticity), foi estudada uma metodologia para a avaliação e calibração de modelos constitutivos de plasticidade combinando dados experimentais e modelos computacionais usando o MEF [COMSOL Multiphysics, 2013].

Assim sendo, o objetivo geral deste trabalho é o estudo do comportamento de corpos de prova (CP) de Poliamida 12 (PA12), fabricados mediante manufatura aditiva através da simulação computacional de ensaios experimentais de tensão uniaxial usando o MEF, considerando modelos constitutivos baseados em formulações elasto-plásticas. Ademais, o objetivo específico seria o estudo dos modelos teóricos usados para a identificação e obtenção de propriedades mecânicas, com foco nos modelos de plasticidade e tendo tomado como ponto de partida trabalhos prévios conduzidos pelo grupo de pesquisa [GONÇALVES, B. L., et al. 2019].

1. Metodologia

A metodologia proposta inclui a utilização de técnicas de caracterização de materiais, ensaios mecânicos e simulação numérica usando o MEF, como será apresentado nas próximas seções.

2.1 Corpo de prova

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), jpitanga@poli.ufrj.br

² Instituto Nacional de Tecnologia (INT), joan@mecsol.ufrj.br

³ Instituto Nacional de Tecnologia, cristiane.evelise@int.gov.br

⁴ Instituto Nacional de Tecnologia, guidogracia@poli.ufrj.br

⁵ Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE UFRJ), lavinia@mecanica.coppe.ufrj.br

A geometria utilizada para estudo foi a dos corpos de prova (CP) fabricados em Poliamida 12 (PA) pelo método de Sinterização Seletiva a Laser (SLS), utilizando o pó PA 2200 da empresa EOS, que é a responsável também pelo software dedicado EOS ParameterEditor, para o processo de fatiamento da impressora.

A simulação numérica usou o MEF para determinar e estudar a distribuição de tensões e deformações, entre outras análises, nos CP durante os ensaios de tração. Os parâmetros de impressão foram o volume de construção igual a 200 x 250 x 70 mm, o tipo de laser a CO2 sendo 30 W, a taxa de construção até 1,2 l/h, espessura da camada de 0,12 mm, além de 5 m/s para a velocidade de varredura do processo de construção.

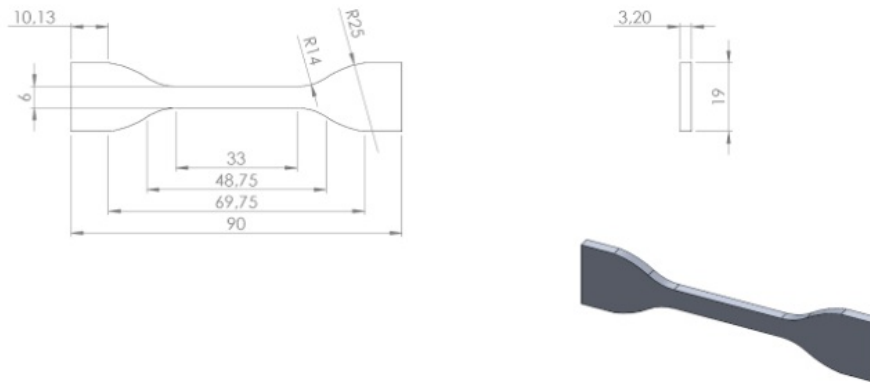


Fig. 1 CP Normalizado, desenhado no software SolidWorks, segundo ASTM-D638. (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics). *Todas as dimensões em mm.

2.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração consiste na aplicação de uma força de tração axial em um corpo de prova descrito anteriormente, promovendo a deformação do material na direção do esforço, que tende a alongá-lo até a fratura do CP.

O ensaio de tração foi realizado na máquina universal de ensaios INSTRON 3382 100 kN, (como representado na Figura 2) a uma taxa de carregamento de 5 mm/min, de acordo com a norma ASTM-D638.

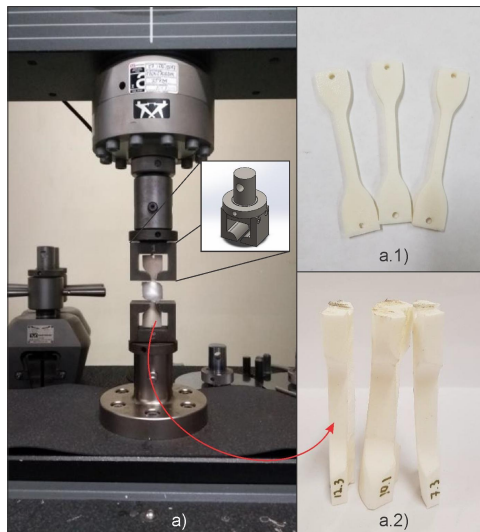


Fig. 2 a) Máquina de ensaio universal INSTRON 3382 durante o ensaio de tração com um dos corpos de prova. a.1) CP normalizados. a.2) CP digitalizados (apenas para ilustrar, uma vez que só foi utilizado CP normalizado no presente estudo).

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), jpitanga@poli.ufrj.br

² Instituto Nacional de Tecnologia (INT), joan@mecsol.ufrj.br

³ Instituto Nacional de Tecnologia, cristiane.evelise@int.gov.br

⁴ Instituto Nacional de Tecnologia, guidograce@poli.ufrj.br

⁵ Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE UFRJ), lavinia@mecanica.coppe.ufrj.br

Os resultados do ensaio de tração dos CP são mostrados na Tabela 1. Nela, dispõem-se os valores médios de tensão máxima, tensão de escoamento e módulo de elasticidade e seus respectivos desvios padrão, valores os quais são obtidos a partir dos ensaios experimentais.

Na Tabela 1, também são apresentados os parâmetros do modelo de encruamento isotrópico não linear de Hockett-Sherby (H-S) - modelo este escolhido por possuir comportamento de saturação em tensão. Os parâmetros foram determinados usando um procedimento de ajuste do modelo aos dados experimentais do CP, segundo [GONÇALVES, B. L., et al. 2019]. O ajuste foi realizado por meio da minimização da norma da diferença entre os dados experimentais e as previsões do modelo.

Tabela 1: Média dos valores de tensão máxima, tensão de escoamento e módulo de elasticidade dos CP ensaiados e parâmetros do modelo H-S.

CP

$\sigma_{ult} \pm DP$

(MPa)

$\sigma_y \pm DP$

(MPa)

$E \pm DP$

(MPa)

σ_{∞}

(MPa)

γ_{HS}

n_{HS}

Normalizado

39.5 ± 1.3

20.3 ± 0.96

1418 ± 32

64.7

0.48

0.852

σ_{ult} : Tensão máxima, σ_y : Tensão de escoamento, E : Módulo de elasticidade, DP : Desvio padrão.

Parâmetros modelo H-S: σ_{∞} ,

γ_{HS} e n_{HS} (determinados a partir dos resultados experimentais do CP).

2.3 Modelagem computacional usando o MEF

Esta seção apresenta o modelo constitutivo a ser utilizado nas simulações para descrever o comportamento elasto-plástico do material, considerando três casos particulares, que serão mostrados a seguir, bem como a geometria, condições de contorno, malha e o modelo de elementos finitos.

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), jpitanga@poli.ufrj.br

² Instituto Nacional de Tecnologia (INT), joan@mecsol.ufrj.br

³ Instituto Nacional de Tecnologia, cristiane.evelise@int.gov.br

⁴ Instituto Nacional de Tecnologia, guidogracia@poli.ufrj.br

⁵ Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE UFRJ), lavinia@mecanica.coppe.ufrj.br

2.3.1 Modelo teórico

Para a simulação computacional usando MEF dos testes experimentais, foi utilizado o modelo constitutivo de plasticidade para três casos (mostrados esquematicamente na Figura 3): i) Comportamento perfeitamente plástico, ii) Encruamento isotrópico linear, iii) Encruamento isotrópico não-linear de Hockett-Sherby (H-S).

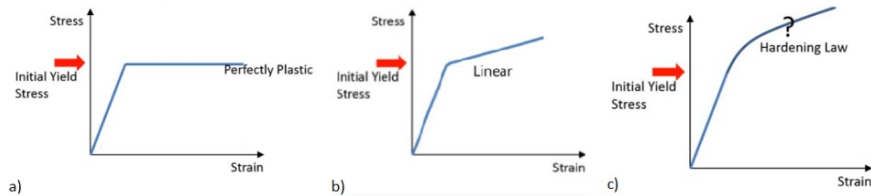


Fig. 3 Comportamento constitutivo elasto-plástico. Casos: a) Perfeitamente plástico (i). b) Encruamento isotrópico linear (ii). c) Encruamento isotrópico não-linear (iii). Adaptado de [KINDO, T. 2017] .

Esses três casos são expressos a partir de formulações teóricas necessárias para a simulação plástica em software MEF, e essas equações são formadas pela função de escoamento, a lei de endurecimento e a regra de fluxo, que são apresentadas nas seguintes seções. Mais detalhes sobre plasticidade no contexto da mecânica do contínuo são encontrados em [LEMAITRE, J., & CHABOCHE, J. 1990], [NETO, E. A. D. S. et al. 2008].

Função de escoamento

Considerando o critério de von Mises que geralmente é adotado para polímeros [BERGSTROM, J.S. 2015], a função de escoamento é dada pela seguinte expressão:

$$F_y = \sigma_{Mises} - \sigma_{ys} \quad (1)$$

onde σ_{ys} é a tensão de escoamento e σ_{Mises} , a tensão de von Mises efetiva.

Lei de encruamento

A lei de encruamento estabelece o comportamento do material após sair do regime elástico (após o limite de escoamento) e iniciar o regime plástico. Esta lei resulta do fato de que a superfície de escoamento, que é a região sobre a qual o comportamento para estados de tensão são elasto-plásticos, sofre constantes alterações à medida que o regime plástico é desenvolvido [NETO, E. A. D. S. et al. 2008]. Além disso, pode ser modelada de acordo com a definição dos parâmetros de endurecimento.

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), jpitanga@poli.ufrj.br

² Instituto Nacional de Tecnologia (INT), joan@mecsol.ufrj.br

³ Instituto Nacional de Tecnologia, cristiane.evelise@int.gov.br

⁴ Instituto Nacional de Tecnologia, guidogracia@poli.ufrj.br

⁵ Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE UFRJ), lavinia@mecanica.coppe.ufrj.br

Para o caso perfeitamente plástico, a lei evolui como uma função constante com o valor da tensão de escoamento inicial, σ_{ys0} :

$$\sigma_{ys} = \sigma_{ys0} \quad (2)$$

Logo, o limite de escoamento do material e sua superfície de escoamento ficam inalteradas. Para o caso de encruamento isotrópico linear, a função adota a seguinte forma:

$$\sigma_{ys} = \sigma_{ys0} + E_{iso} \varepsilon_{pe} \quad (3)$$

E para o caso de encruamento isotrópico não linear, a tensão de escoamento aumenta proporcionalmente à deformação plástica, de acordo com a seguinte lei exponencial para o modelo de H-S, dada pela expressão:

$$\sigma_{ys} = \sigma_{ys0} + (\sigma_{\infty} - \sigma_{ys0})(1 - e^{-\gamma \varepsilon_{pe}^n}) \quad (4)$$

sendo σ_{y0} a tensão de escoamento inicial, ε_{pe} a deformação plástica efetiva, σ_{∞} a tensão de fluxo em estado estacionário, γ o coeficiente de saturação e n o expoente de saturação.

Regra de fluxo

Para os modelos constitutivos apresentados, a taxa do tensor de deformação plástica $\dot{\varepsilon}_{pe}$ pode ser determinada, segundo:

$$\dot{\varepsilon}_{pe} = \lambda \frac{\partial F_y}{\partial \sigma} \quad (5)$$

sendo o tensor de tensões de Cauchy e de o multiplicador de Lagrange, satisfazendo as condições de carregamento e descarregamento em plasticidade ou a condição de Kuhn-Tucker - mais detalhes em [LEMAITRE, J., & CHABOCHE, J. 1990], [NETO, E. A. D. S. et al. 2008]:

$$\lambda \geq 0, F_y(\sigma, \sigma_{ys}) \leq 0, \lambda F_y = 0 \quad (6)$$

2.4 Implementação no software COMSOL Multiphysics

Como descrito no objetivo geral deste trabalho, a simulação computacional utilizando o MEF tem o intuito de obter como resultado uma estimativa do comportamento dos CP mediante ensaio de

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), jpitanga@poli.ufrj.br

² Instituto Nacional de Tecnologia (INT), joan@mecsol.ufrj.br

³ Instituto Nacional de Tecnologia, cristiane.evelise@int.gov.br

⁴ Instituto Nacional de Tecnologia, guidograca@poli.ufrj.br

⁵ Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE UFRJ), lavinia@mecanica.coppe.ufrj.br

tração uniaxial. Assim, foram implementados os três casos particulares no software COMSOL Multiphysics, analisados nas seções anteriores, i.e, i) Comportamento perfeitamente plástico ii) Encruamento isotrópico linear e iii) Encruamento isotrópico não-linear de Hockett-Sherby (H-S), como descrito a seguir.

2.4.1 Geometria, condições de contorno e malha

A geometria correspondente ao CP (apresentada na seção 2.1) foi importada ao software COMSOL Multiphysics (Fig. 4. A). A estratégia adotada foi a de implementação de um modelo 2D com o intuito de diminuir o tempo de cômputo (Fig. 4. b). Importante destacar que, considerando o estado plano de deformações e o uso de condição de contorno de simetria, é possível que o problema seja representado em 3D a partir de uma análise 2D.

Para estabelecer a condição de carregamento, aplicou-se uma velocidade prescrita de 5mm/min, de acordo com o ensaio experimental, em uma das extremidades da geometria (Fig. 4. a) Assim, essa condição é do tipo tempo dependente. Na outra extremidade, foi considerada uma condição de deslocamento zero, ou seja, mantendo-a fixa ou engastada.

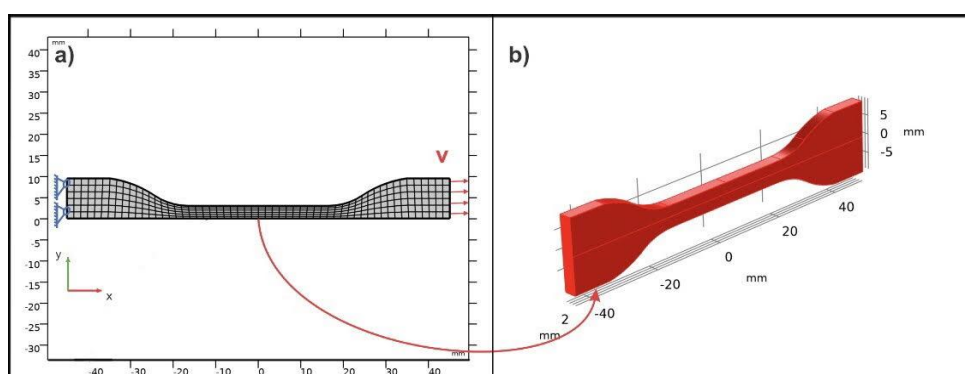


Fig. 4 a) Malha e condições de contorno do modelo. Condições de deslocamento zero (engaste) e velocidade prescrita, nos extremos do CP, respectivamente. b) Representação 3D do modelo 2D, considerando simetria e estado plano de deformação.

O modelo foi discretizado em 304 elementos (do tipo Quadratic Serendipity com interpolação quadrática) e para a discretização do tempo, foi utilizado o método BDF (Backward Differentiation Formula). O solver MUMPS foi escolhido para resolver o problema discreto resultante de cada passo de discretização com um nível de tolerância residual de 10^{-4} e foi considerado um intervalo de tempo de 0 a 120 s (tempo total do experimento) com um passo de tempo $\Delta t=1s$.

Além disso, fez-se uso do recurso de varredura paramétrica (Parametric Sweep) que permite, no mesmo modelo, obter-se uma avaliação de várias soluções combinadas a partir de diferentes valores dos parâmetros dos modelos constitutivos.

3. Resultados

Nesta seção, são apresentados os resultados das tensões de von Mises dos modelos computacionais para o CP (mostrados na Figura 5), além das curvas de tensão vs deformação, considerando os três casos de comportamentos simulados (mostradas na Figura 6). Também consta a análise dos resultados correspondentes ao modelo considerando o comportamento visco-plástico, que está sendo estudado atualmente.

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), jpitanga@poli.ufrj.br

² Instituto Nacional de Tecnologia (INT), joan@mecsol.ufrj.br

³ Instituto Nacional de Tecnologia, cristiane.evelise@int.gov.br

⁴ Instituto Nacional de Tecnologia, guidograca@poli.ufrj.br

⁵ Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE UFRJ), lavinia@mecanica.coppe.ufrj.br

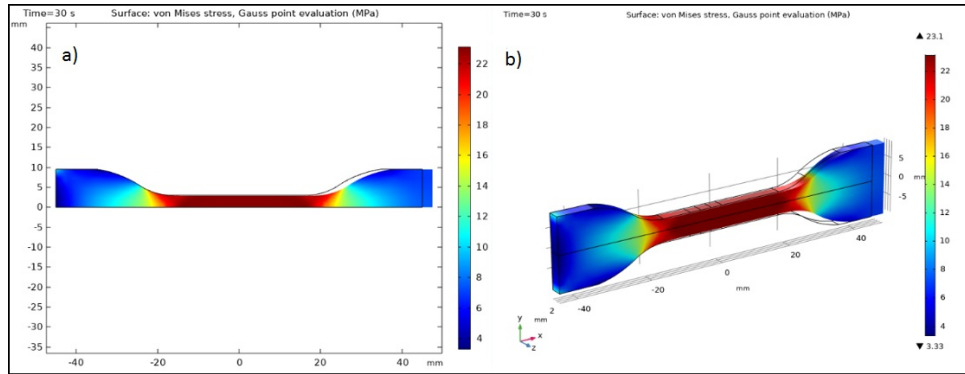


Fig. 5 a-b) Distribuição de tensões de von Mises para o modelo 2D e visualização da solução em 3D para $\Delta t = 30s$.

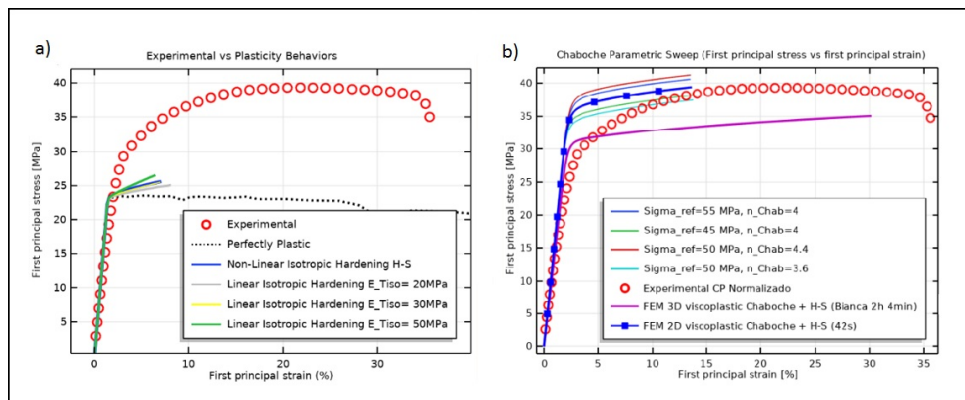


Fig. 6 a) Gráficos tensão vs deformação e comparação MEF vs experimental, com os 3 casos estudados. b) Varredura paramétrica para o caso de visco-plasticidade.

Nas Fig. 5a) b) são apresentados os resultados das tensões de von Mises do CP para o modelo de Plasticidade com comportamento não-linear de H-S, para $\Delta t = 30s$. A tensão máxima de von Mises encontrada corresponde a 23.1 MPa.

Já nas Fig. 6 a) b) são mostrados os modelos de Plasticidade (com os 3 casos abordados) e visco-plasticidade, sendo este último uma prévia do estudo que está sendo realizado. No gráfico de plasticidade (Fig. 6 a), pode-se observar uma varredura paramétrica variando o módulo tangente isotrópico (característico do comportamento linear) para os valores de 20, 30 e 50 MPa. Além disso, na Fig. 6 b) é mostrado o modelo de visco-plasticidade de Chaboche, com encruamento isotrópico de H-S e variando também parâmetros com intuito de se aproximar da curva experimental.

Em nenhum dos dois casos foi possível capturar a fase de dano e conseqüentemente, ruptura. Para capturar a fase de ruptura mostrada no final da curva experimental do comportamento da PA12 submetida a tensão uniaxial, precisa ser incorporado o efeito de dano no modelo constitutivo de visco-plasticidade - um trabalho em andamento.

4. Conclusão

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), jpitanga@poli.ufrj.br

² Instituto Nacional de Tecnologia (INT), joan@mecsol.ufrj.br

³ Instituto Nacional de Tecnologia, cristiane.evelise@int.gov.br

⁴ Instituto Nacional de Tecnologia, guidogracia@poli.ufrj.br

⁵ Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE UFRJ), lavinia@mecanica.coppe.ufrj.br

Conforme observado nos modelos, os comportamentos perfeitamente plástico, encruamento linear e não linear de H-S, subestimam o comportamento em tensão da PA12, uma vez que é possível representá-lo até o limite de escoamento, mas não até o limite de ruptura.

Conseguiu-se diminuir o tempo de cômputo de 2 h para 50 s (incluindo recurso de “varredura paramétrica”), usando condições de contorno de simetria e modelo 2D representativo do problema real 3D. O que contribui a diminuir o custo computacional das análises de estimativa de parâmetros utilizando métodos inversos .

Pretende-se, para trabalhos futuros, a fim de obter um melhor ajuste aos resultados experimentais, estender essa metodologia à modelos constitutivos de visco-plasticidade e hiper-elasticidade para outros materiais.

Referências

Arruda, E. M. And Boyce, M. C., 1993, A Three-dimensional model for the large stretch behavior of rubber elastic materials, *J. Mech. Phys. Solids*, 41(2), Pp. 389–412.

<https://doi.org/10.1007/s40430-020-02511-2>

Bergstrom, J.S. *Mechanics of solid polymers: Theory and computational modeling*. Plastics Design Library. Elsevier Science, 2015. ISBN:9780323322966.

Comsol Multiphysics Software Reference Manual V 4.4. 2013.

Gonçalves, B. L. ; Silva, C. E. R. ; Duda, F. P. ; Graça, G. R. A. ; Santos, C. T. ; Monteiro, M. J. ; O'Connor, J. O. ; Borges, L. M. S. A. O impacto da geometria complexa do tecido cortical ósseo bovino no ensaio de tração: uma abordagem experimental e computacional, 2019. 6o OBI Workshop de Órgãos Artificiais, Biomateriais e Engenharia de Tecidos.

Gurtin, M. E.; Fried, E.; Anand, L. 2010. *The mechanics and thermodynamics of continua*. Cambridge University Press, ISBN: 9781139482158.

Lemaitre, J., & Chaboche, J. 1990. *Mechanics of solid materials*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/cbo 9781139167970

Neto, E. A. D. S., Perić, D., & Owen, D. R. J. 2008. *Computational methods for plasticity: Theory and applications*. Chichester, West Sussex, Uk, Wiley .

O'Connor, J., Santos, B.B.d., Borges, L.et al. Computational modeling of viscoplastic polymeric material response during micro-indentation tests. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 42, 438 (2020).

Rappel, H., Beex, L.A.A., Hale, J.S. et al. a) A tutorial on bayesian inference to identify material parameters in solid mechanics. *Arch. Comp. Methods Eng* 2019. <https://doi.org/10.1007/s11831-018-09311-x>

Rappel, H., Beex, L.A.A., Noels, L., Bordas, S.P.A. b). Identifying elastoplastic parameters with bayes' theorem considering output error, input error and model uncertainty, *Probab. Eng. Mech* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2018.08.004>

KINDO, T, .*Simulating Elastoplastic Behavior in COMSOL Multiphysics*. S.I: Comsol Multiphysics, 2017. P&B

PALAVRAS-CHAVE: Elementos Finitos, Plasticidade, Polímeros.

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), jpitanga@poli.ufrj.br

² Instituto Nacional de Tecnologia (INT), joan@mecsol.ufrj.br

³ Instituto Nacional de Tecnologia, cristiane.evelise@int.gov.br

⁴ Instituto Nacional de Tecnologia, guidogracia@poli.ufrj.br

⁵ Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE UFRJ), lavinia@mecanica.coppe.ufrj.br

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), jpitanga@poli.ufrj.br

² Instituto Nacional de Tecnologia (INT), joan@mecsol.ufrj.br

³ Instituto Nacional de Tecnologia, cristiane.evelise@int.gov.br

⁴ Instituto Nacional de Tecnologia, guidograca@poli.ufrj.br

⁵ Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE UFRJ), lavinia@mecanica.coppe.ufrj.br