

Capítulo 18

Correlação de ensaio de tração considerando os efeitos da taxa de deformação utilizando análises por elementos finitos

*Alexandre Luís Marangoni
Ernesto Massaroppi Junior*

Resumo: O método dos elementos finitos, amplamente utilizado nas avaliações de integridade estrutural, tem suporte para o aumento de conhecimento e a redução do grau de incerteza dos resultados, nas atividades de correlação, que podem ser iniciadas com a simulação de ensaios mecânicos normalizados. Dado o conhecimento sobre a sensibilidade dos polímeros à taxa de deformação, foram realizados ensaios de tração no polímero Estireno Acrilonitrilo (SAN). Os resultados foram utilizados tanto na estimativa dos parâmetros da equação de Cowper-Symonds como na relação entre a deformação de ruptura e a taxa de deformação e empregados no modelo de material *MAT_089 – Plasticity Polymer do programa comercial de elementos finitos LS-DYNA®. Os resultados das simulações do ensaio de tração com análises por elementos finitos demonstraram que o valor da tensão de ruptura foi superestimado em 7,8% e o valor da deformação de ruptura foi subestimado em 5,3%.

Palavras-chave: análise por elementos finitos, correlação, Cowper-Symonds, polímero, taxa de deformação.

1 INTRODUÇÃO

As simulações computacionais que utilizam o método dos elementos finitos são cada vez mais freqüente nas etapas de desenvolvimento e validação de componentes, dada sua capacidade de prover resultados acerca da integridade estrutural de um componente, principalmente para aqueles com geometrias complexas. A qualidade dos resultados por sua vez está diretamente relacionada com as estratégias adotadas na construção do modelo de elementos finitos, aplicação das condições de contorno, escolha adequada do tipo de elemento e do modelo constitutivo do material, o qual utiliza um modelo matemático para representar a relação entre a deformação e a tensão(1).

As atividades que envolvem a caracterização das propriedades dos materiais são de fundamental importância para que o modelo seja alimentado com informações precisas, as quais contribuirão de forma significativa na correlação dos resultados.

Tendo em vista que os materiais poliméricos apresentam sensibilidade à taxa de deformação aplicada, devido ao seu comportamento viscoelástico, devem ser escolhidos modelos constitutivos que sejam capazes de reproduzi-las(2).

Estratégias para condução de ensaios mecânicos com propósitos de investigação e quantificação dos efeitos da taxa de deformação no comportamento dos polímeros são apresentadas por Xiao(2), Zrida et al.(3), Omar, Akil e Ahmad(4) e Yin e Wang(5). Lobo e Croop(6), Năstăsescu e Iliescu(7) e Erhart(8) buscaram em seus estudos a verificação de correlações entre os dados experimentais e os resultados de simulações de elementos finitos.

O programa de elementos finitos LS-DYNA® possui alguns modelos constitutivos de material implementados, para os quais a tensão de escoamento do material pode ser corrigida em função da taxa de deformação, utilizando, para isto, a equação de Cowper-Symonds (A)(9).

$$\sigma_D = \sigma_E \cdot [1 + C \cdot P \cdot \dot{\epsilon}]^{\frac{1}{n}} \quad (A)$$

em que:

- σ_D : tensão dinâmica;
- σ_E : tensão estática;
- C e P: parâmetros da equação de Cowper-Symonds;
- $\dot{\epsilon}$: Taxa de Deformação.

Dentre os modelos com essa função implementada, pode ser citado o modelo de material *MAT_089 – Plasticity Polymer, cuja utilização é recomendada por Lobo e Croop(6), pois a curva tensão-deformação verdadeira é utilizada como dado de entrada, permitindo que a consideração da não-linearidade apresentada pelos polímeros na sua parte elástica seja representada. A isto se soma a possibilidade de inserção de uma relação que caracteriza a deformação de ruptura em função da taxa de deformação.

Este trabalho apresenta um comparativo entre os resultados da simulação de um ensaio de tração realizados no LS-DYNA® com os resultados obtidos experimentalmente para o polímero SAN, cujo tipo será omitido por questões de sigilo industrial. Os parâmetros da equação de Cowper-Symonds foram obtidos desses resultados e também utilizados no modelo constitutivo do material.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados utilizados neste estudo são provenientes de curvas tensão em função da deformação obtidas em uma máquina universal de ensaios INSTRON modelo 5569 com célula de carga de 500 N, considerando as velocidades de deslocamento da garra de 10 mm/min, 50 mm/min, 150 mm/min e 250 mm/min. Foram utilizados 20 corpos de prova obtidos pelo processo de injeção com dimensões estabelecidas pela norma ASTM D638 – tipo V(10).

As equações (B) e (C) foram utilizadas para obtenção das curvas tensão em função da deformação verdadeiras, sobre as quais se realizaram ajustes considerando polinômios de grau 4. Assim, a quantidade

de pontos das curvas obtidas experimentalmente foi reduzida de forma significativa para facilitar a utilização em um programa de elementos finitos.

$$\varepsilon = \ln(1 + e) (B)$$

$$\sigma = s(1 + e)(C)$$

Para cada ensaio foi calculada a taxa de deformação média, $\dot{\varepsilon}$ conforme a equação (D), na qual Δt representa o tempo total do ensaio e ε_{rup} representa a deformação de ruptura do material.

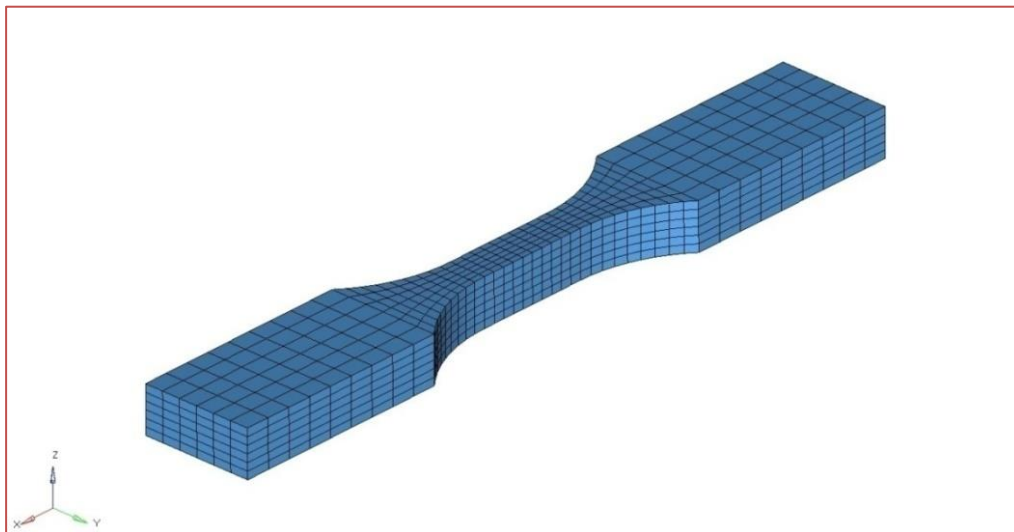
$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{rup}}{\Delta t} (D)$$

Os parâmetros C e P da equação de Cowper-Symonds foram obtidos com a ferramenta de regressão não linear do software SAS® JMP® 11.0, sendo para tal, utilizados os valores da tensão de ruptura do material em função da taxa de deformação. Os valores da deformação de ruptura foram ajustados por uma reta em função do logaritmo natural da taxa de deformação, conforme necessário para sua respectiva utilização no modelo de material do LS-DYNA®.

O modelo de elementos finitos do corpo de provas, com as mesmas dimensões utilizadas no ensaio de tração, foi criado no software Altair® HyperMesh® 13.0, com uma malha do tipo mapeada com elementos hexaédricos, conforme mostrado na figura 1. A formulação do elemento com integração completa (nº 2) foi adotada por não necessitar da utilização de controles para prevenção de aparecimento de modos de hourglass.

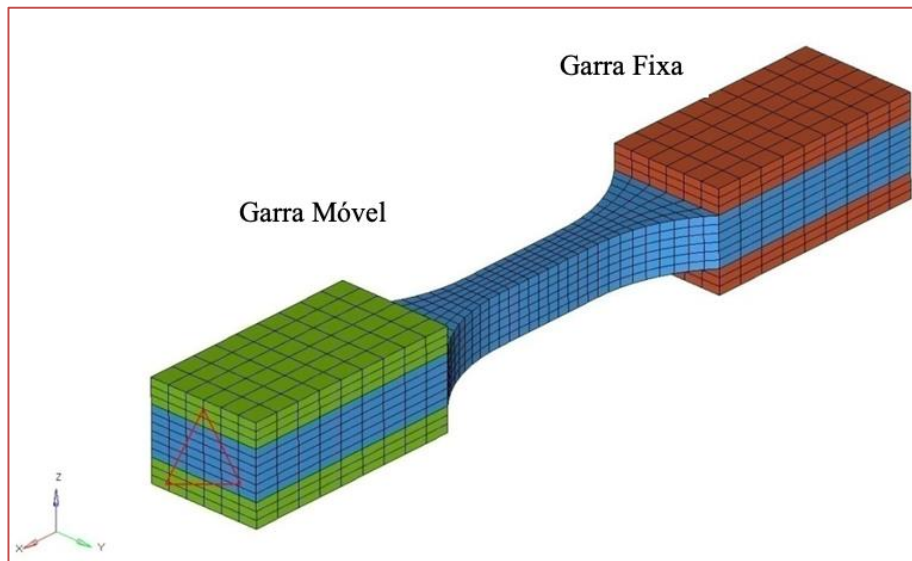
Adotou-se o modelo de material *MAT_089 – Plasticity Polymer para o corpo de provas e foram utilizados os parâmetros C e P da equação de Cowper-Symonds.

Figura 1 – Modelo de elementos finitos do corpo de provas utilizado na simulação do ensaio de tração.



As garras de fixação do equipamento de ensaio foram representadas por 2 pares de paralelepípedos com malha de elementos hexaédricos unidos aos elementos das extremidades do corpo de prova, conforme apresenta a figura 2. Para as garras de fixação, atribuiu-se o modelo de material *MAT_020 – Rigid Material, no qual foram aplicadas as condições de contorno. Para o componente denominado “garra fixa” aplicou-se a restrição em todos os graus de liberdade de translação. Para o componente “garra móvel” somente o grau de liberdade de translação no sentido longitudinal do corpo de prova foi mantido sem restrição.

Figura 2 – Modelo de elementos finitos do corpo de provas com as condições de contorno aplicadas.

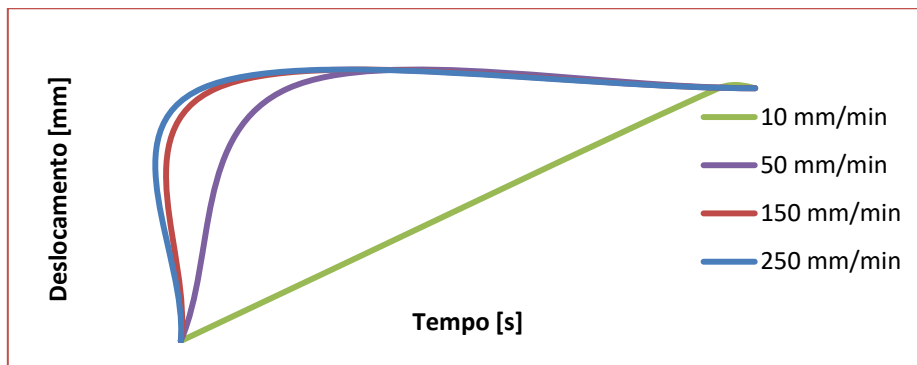


Na garra móvel aplicou-se um deslocamento ΔL de 1,25mm, ocorrendo este ao longo do tempo, calculado em função da velocidade de ensaio v , conforme demonstrado pela equação (E).

$$t = \frac{\Delta L}{v} (E)$$

As curvas referentes aos deslocamentos aplicados para cada velocidade de ensaio são apresentadas na figura 3.

Figura 3 – Curva de aplicação de deslocamento em função do tempo para cada velocidade de ensaio.

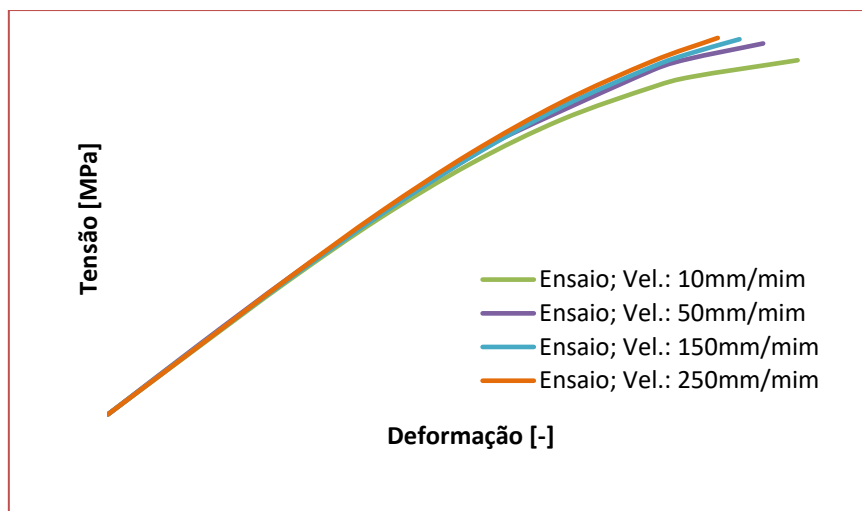


O software de pós-processamento ALTAIR® HYPERVIEW® 13.0 foi utilizado para obtenção dos valores de tensão e deformação, ambos em função do tempo, de um nó da região central do corpo de provas. Estes dados foram utilizados para a construção das curvas tensão-deformação computacionais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

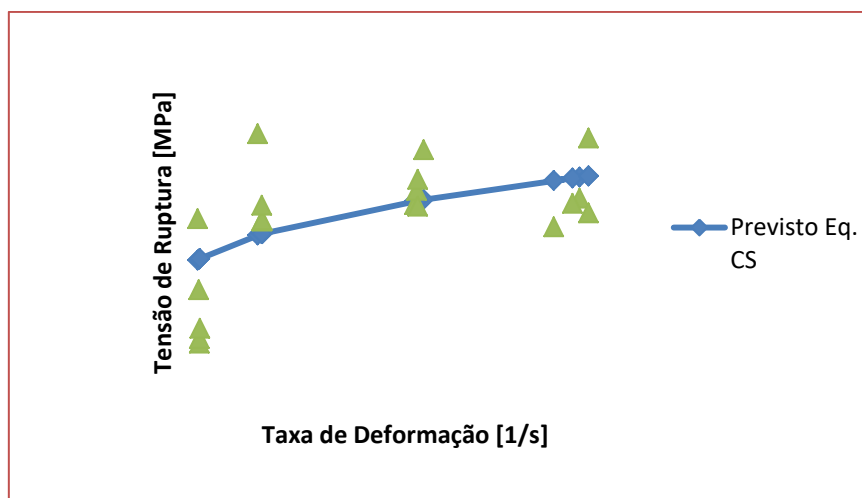
As curvas tensão deformação médias para cada velocidade de ensaio são apresentadas na figura 4, na qual pode ser observado um aumento na tensão de ruptura e uma redução na deformação de ruptura à medida que a velocidade de ensaio é aumentada.

Figura 4 - Curvas tensão-deformação experimentais para cada velocidade de ensaio.



Os valores de tensão de ruptura do material em função da taxa de deformação são apresentados na figura 5. Mostra-se também a curva que representa a equação de Cowper-Symonds, considerando os parâmetros $C = 71,41$ e $P = 2,07$, obtidos via regressão não linear.

Figura 5 – Tensão de ruptura em função da taxa de deformação e ajuste com a equação de Cowper-Symonds.



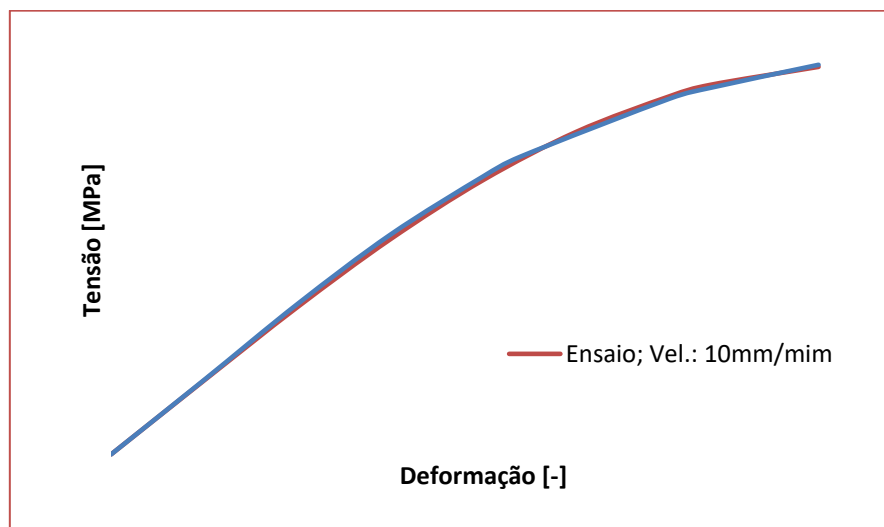
Os valores da deformação de ruptura em função do logaritmo natural da taxa de deformação são apresentados na figura 6. A realização de uma regressão linear resultou nos valores de deformação de 0,037 e 0,033, respectivamente para a menor e para a maior taxa de deformação obtida no ensaio.

Figura 6 – Deformação de ruptura em função do logaritmo natural da taxa de deformação.



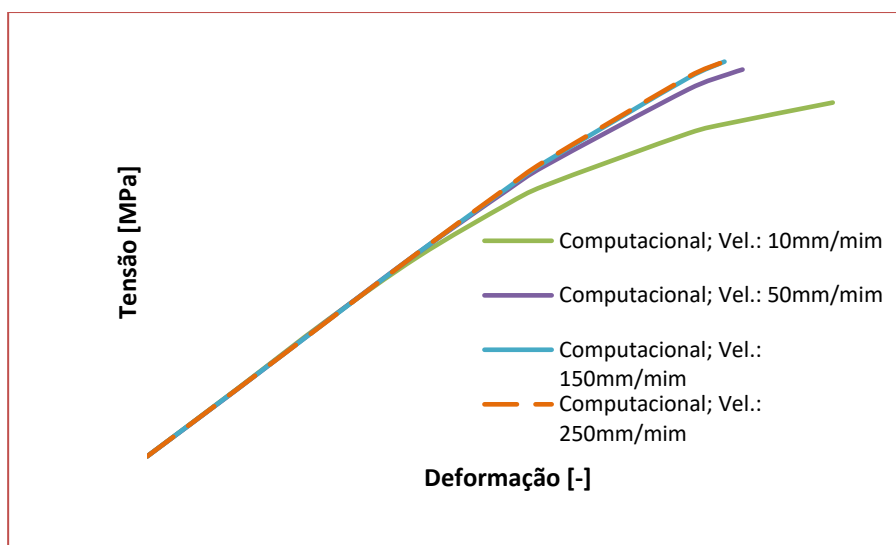
A figura 7 apresenta as curvas obtidas experimentalmente e computacionalmente sem a utilização dos parâmetros da equação de Cowper-Symonds. Neste caso é possível observar uma ótima aderência entre os dados experimentais e aqueles obtidos pela análise por elementos finitos.

Figura 7 – Comparativo sem consideração dos efeitos da taxa de deformação.



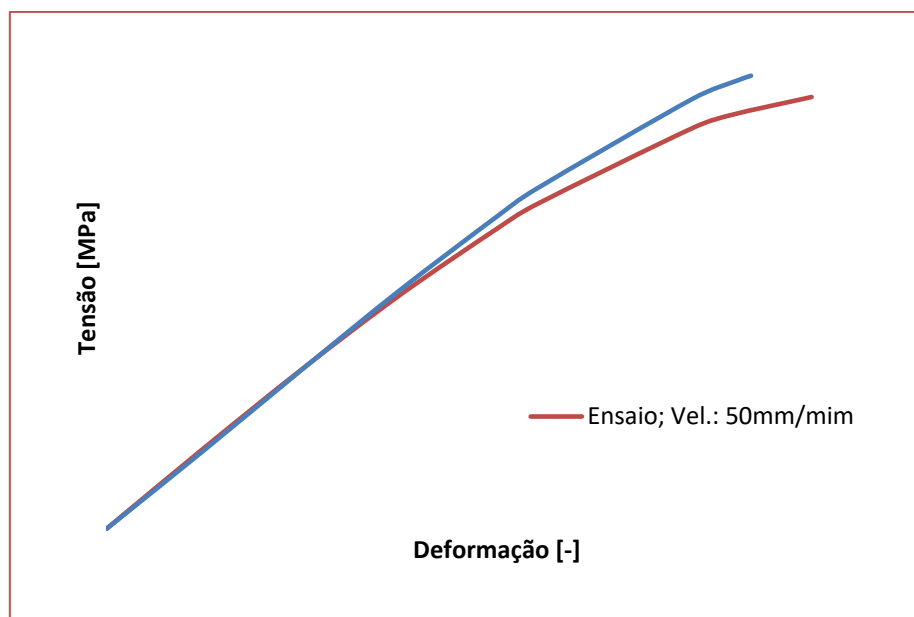
As curvas da tensão em função da deformação obtidas computacionalmente pela análise por elementos finitos são apresentadas na figura 8, na qual é possível constatar o aumento da tensão de ruptura do material quando se aumenta a taxa de deformação.

Figura 8 – Curvas tensão-deformação computacionais para cada velocidades de ensaio.



A figura 9 apresenta as curvas obtidas experimentalmente e computacionalmente para a velocidade de ensaio de 50 mm/min, onde pode ser observada uma elevação na rigidez do material. O mesmo fenômeno foi observado para as demais velocidades de ensaio.

Figura 9 – Curvas tensão-deformação experimental e computacional para a velocidade de ensaio de 50mm/min.



Na tabela 1 são apresentados os valores das médias da tensão de ruptura obtidas experimentalmente, os valores obtidos através da simulação com o programa de elementos finitos LS-DYNA® e respectivo erro percentual, o qual apresentou comportamento crescente com o aumento da velocidade do ensaio.

Tabela 1 – Valores de tensão de ruptura obtidos experimentalmente e computacionalmente.

Velocidade de Tração mm/min	Tensão Ruptura Média (Experimental) MPa	Tensão Ruptura (Simulação) MPa	Erro %
10	89,54	90,92	1,5
50	93,84	99,40	5,9
150	94,43	101,44	7,4
250	94,01	101,31	7,8

Os valores de deformação de ruptura são apresentados na tabela 2. Os valores obtidos nas simulações nas quais foram utilizados os parâmetros de Cowper-Symonds mostraram-se inferiores aos obtidos experimentalmente.

Tabela 2 – Valores de deformação de ruptura obtidos experimentalmente e computacionalmente.

Velocidade de Tração mm/min	Deformação de Ruptura Média (Experimental) -	Deformação de Ruptura (Simulação) -	Erro %
10	0,0369	0,0380	3,0
50	0,0347	0,0330	-4,9
150	0,0338	0,0320	-5,3
250	0,0324	0,0319	-1,5

4 CONCLUSÕES

O modelo de material empregado foi capaz de reproduzir o fenômeno de aumento da rigidez e da tensão de ruptura do material em função do aumento da taxa de deformação. Foram obtidos valores de tensão de ruptura ligeiramente superiores aos obtidos experimentalmente, apresentando um erro máximo de 7,8 %. A ruptura dos corpos de provas na simulação ocorreu em níveis de deformação inferiores aos observados nos ensaios mecânicos, com a maior discrepância de -5,3 %.

AGRADECIMENTOS

À Whirlpool S.A e ao Laboratório de Mecânica Aplicada e Computacional do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo pelo fornecimento dos recursos computacionais necessários para a realização do trabalho. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) pela oportunidade de desenvolvimento dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Runesson, K. Constitutive Modeling of Engineering Materials - Theory and Computation - The Primer, Notas de Aula, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2006.
- [2] Xiao, X. Dynamic tensile testing of plastic materials. Polymer Testing, v.27, n.2, p.164-178, 2008. doi:10.1016/j.polymertesting.2017.019.010.
- [3] ZRIDA, M.; LAURENT, H.; GROLLEAU, V.; RIO, G.; KHLIF, M.; GUINES, D.; MASMOUDI, N.; BRADAI, C. High-speed tensile tests on a polypropylene material. Polymer Testing, v.29, n.6, p.685-692, 2010. doi:10.1016/j.polymertesting.2010.05.007.

- [4] OMAR, M. F.; HAZIZAN, M. A.; Ahmad, Z. A. Measurement on strain rate sensitivity and dynamic mechanical properties of various polymeric materials. *Key Engineering Materials*. v.471-472, p.385-390, 2011. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.471-472.385.
- [5] YIN, Z.; WANG, T. Investigation of Tensile Deformation Behavior of PC, ABS, and PC/ABS Blends from Low to High Strain Rates. *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, v.33, n.4, p.455-464, 2012. doi:10.1007/s10483-012-1563-x.
- [6] LOBO, H.; CROOP, B. (2009). A robust methodology to calibrate crash material models for polymers. In: *NAFEMS World Congress*. Crete, Greece, 2007. *Proceedings...*, 2007, 14 p. Disponível em:
- [7] <http://www.datapointlabs.com/testpaks/2009/NAFEMS09.pdf>. Acesso em: 01 de abril de 2016.
- [8] NĂSTĂSESCU, V., ILIESCU, N. Upon Accompanying of the Experimental Testing of Materials by Numerical Analysis with FEM, *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS, Applied Mathematics and Mechanics*, p. 173-178, 2010.
- [9] Erhart, T. Review of solid element formulations in LS-DYNA: properties, limits, advantages, disadvantages, In: *LS-DYNA-Forum – Entwicklerforum*, Stuttgart, Germany, 2011. *Proceedings...*
- [10] Tanimura, S.; TSUDA, T.; ABE, A.; HAYASHI, H.; JONES, N. Comparison of rate-dependent constitutive models with experimental data. *International Journal of Impact Engineering*, v.69, p.104-113, 2014.
- [11] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D638. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, 2010.