

Análise da fase plástica de material aplicado a veículos: estudo de um veículo compacto utilizando o modelo de Johnson-Cook

Walter Paschoal Pereira¹, Alessandro Borges de Sousa Oliveira², Rita de Cássia Silva³

¹ Gmssa - Grupo de modelagem e simulação de sistemas automotivos, Faculdade UnB Gama - Engenharia Automotiva, Brasil. Email: walterpaschoal@icloud.com

² Gmssa - Grupo de modelagem e simulação de sistemas automotivos, Faculdade UnB Gama - Engenharia Automotiva, Brasil. Email: abso@unb.br

³ Gmssa - Grupo de modelagem e simulação de sistemas automotivos, Faculdade UnB Gama - Engenharia Automotiva, Brasil. Email: ritasilva.fga.unb@gmail.com

Resumo

Os modelos viscoelasto-plásticos são constantemente utilizados para descrever as propriedades mecânicas de materiais metálicos, com intuito de aplicação em colisão veicular. Destaca-se o modelo de Johnson-Cook: um modelo empírico que busca prever o comportamento dos materiais no regime plástico. O presente trabalho utilizou-se de um veículo compacto o qual foi previamente submetido ao teste de colisão frontal. Retirou-se do veículo sua longarina direita mais preservada, da qual retirou-se corpos de prova padrão submetendo-os ao ensaio de tração, a fim de determinar as constantes do modelo de Johnson-Cook. Os resultados dos ensaios e as constantes do modelo de J-C encontradas indicaram tratar-se de um aço de alta resistência. A determinação adequada dessas constantes auxilia na modelagem do material contribuindo para a melhoria das simulações computacionais do impacto. Do trabalho também foi possível compreender a importância na escolha do material das longarinas, pois da comparação entre dois veículos diferentes, um com nota máxima na proteção para adulto e outro que recebeu nota zero, segundo a Latin Ncap, percebeu-se uma diferença relevante entre os deslocamentos de pontos estruturais do veículo. De fato, há evidências de maior eficiência da estrutura com material de melhor desempenho, pois essa desloca-se menos e, portanto, deforma-se menos. Há uma correlação entre o tipo de material aplicado nas longarinas e o desempenho do veículo em colisões frontais.

Palavras-chave: *crash test*, Johnson-Cook, segurança veicular

Abstract

Viscoelastic-plastic models are used to describe a stress/strain relationship of materials and can predict their behavior in practical use situations such as a vehicle collision. Among them, the Johnson-Cook model stands out: it is an empirical model that seeks to preview the behavior of materials in the plastic regime. To delve further into this discussion, this work uses a compact car subjected to a crash test donated by Mr Alejandro Furas, Latin NCap. The vehicle was submitted to a complete disassemble, which allowed the tensile specimens to be cut, enabling to find the Johnson-Cook model constants. The results of the tests and constants of the J-C model found suggests that material found in the front side members is a high strength steel. These constants can be used to improve vehicle crash computational simulations. Dismantling the vehicle also made it possible to perform chassis measurements and compare with the original measurements via software, which generated three-dimensional coordinates. A comparison was made with another vehicle that had a worse rating in the frontal collision test (score zero). The largest displacements selected were recorded: 255 millimeters along the X axis and 141.4 millimeters along the Z axis. These results, obtained with specialized Celette measure equipment, can be used to validate computational simulations. Evidence of higher efficiency of the structure in dissipating the energy from the frontal collision was found, deforming fewer cabin-related points compared to the other vehicle. These results indicate a correlation between the type of material applied to the side members and the vehicle's performance in frontal collisions.

Keywords: crash test, Johnson-Cook model, Crashworthiness, AHSS Steel

1. Introdução

A evolução da segurança veicular e do *Crashworthiness* está intimamente relacionada com os estudos na área da Ciência dos Materiais. Tanto é que a expressão *Crashworthiness* traduz a resistência ao impacto de uma dada estrutura, como sendo a sua capacidade em absorver energia oriunda de um impacto, através de deformações plásticas, mantendo o colapso sob controle e, portanto, garantindo a integridade dos ocupantes do veículo. A aplicação de materiais com propriedades mecânicas adequadas nas zonas de deformação da carroceria contribui para maior dissipação de energia, por meio de deformações plásticas e, em alguns casos, flambagem progressiva. Isto acarreta uma menor transmissão de energia ao habitáculo e, consequentemente, aos ocupantes (VAN SLYCKEN *et al.*, 2006).

Fabricantes e pesquisadores recorrem a modelos viscoelasto-plásticos para descrever o efeito da taxa de deformação nas propriedades mecânicas de materiais em situações reais como, por exemplo, colisões veiculares. Dentre eles, destaca-se o modelo de Johnson-Cook. Trata-se de modelo empírico que busca prever o comportamento dos materiais no regime plástico, considerando os efeitos da deformação, da taxa de deformação e da temperatura (SMERD *et al.*, 2005).

Qing-dong, Qiang e Xiao-feng (2014) investigaram o comportamento mecânico de aços avançados de alta resistência (*advanced high strength steel* -AHSS), destacando a importância destes materiais na indústria automotiva. Os autores simplificaram o modelo original de Johnson-Cook, a fim de prever o comportamento mecânico de aços AHSS em diferentes temperaturas. Amaral *et al.* (2018) utilizaram três modelos elastoplásticos, Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN), Johnson-Cook e Lemaitre, para avaliar a predição sobre materiais não convencionais utilizados na indústria automotiva. Os autores concluíram que os modelos de Johnson-Cook e GTN mostraram-se próximos à realidade.

O modelo de Johnson-Cook é largamente utilizado na modelagem numérica de impactos veiculares, conforme discutido por (BUGELLI, 2010). Nesse contexto, o presente trabalho apresenta o método de determinação das constantes do modelo elastoplástico de Johnson-Cook, baseado em método experimental, conforme seção 2. O método foi aplicado a corpos de prova retirados da longarina de um veículo compacto, avaliado como 5 estrelas pela Latin Ncap. Em estudo pós crash do referido veículo (seção 3), foram determinadas as coordenadas de pontos pré-definidos da estrutura do veículo sinistrado, relativamente a um sistema de referência estabelecido. Nessa etapa do

estudo utilizou-se o equipamento CELLETE – NAJA 3D. As diferenças de coordenadas desses pontos e a referência propiciou a determinação dos deslocamentos sofridos pela estrutura (longarina) em caso de impacto. Como em estudo anterior, os orientadores realizaram análises semelhantes em veículo com pontuação 0 (zero) em números de estrelas, foi possível destacar a grande influência das propriedades mecânicas do material no deslocamento sofrido pela estrutura (longarina) em caso de colisão frontal, sobretudo na região plástica.

2. O Modelo Elastoplástico de Johnson-Cook

O uso de modelos visco-elastoplásticos na indústria automotiva permite a otimização de projetos e do processo de fabricação, eliminando tentativas e reduzindo os erros em protótipos e produtos finais (AMARAL *et al.*, 2018). O modelo de Johnson-Cook é bastante utilizado em simulações visto que considera a taxa de deformação do material, de suma relevância em impactos (KIRANLI, 2009).

A taxa de deformação representa a velocidade à qual o material se deforma podendo influenciar de forma significativa suas propriedades mecânicas. O aumento desta taxa provoca um aumento do limite elástico de metais (NÓBREGA, 2010). Neste sentido, é necessário realizar ensaios de tração em diversas taxas.

2.1 Determinação das Constantes

A qualidade do modelo demonstra-se na capacidade de retratar o comportamento do material através das constantes, A , B , n , C e m , definidas a partir de dados provenientes de ensaios de tração do material. O ensaio de tração é um teste destrutivo que fornece informações sobre propriedades mecânicas de metais, tais como tensões de escoamento, ruptura, módulo de elasticidade, resiliência, tenacidade e efeito da taxa de deformação. No presente trabalho, este ensaio é indispensável para encontrar as constantes do modelo de Johnson-Cook.

Baseado em Murugesan e Jung (2019) e Yuxi *et al.* (2015), apresenta-se, a seguir, a metodologia aplicada na determinação das constantes do modelo de Johnson-Cook (J-C). A metodologia baseia-se nas curvas tensão/deformação do material, obtidas a partir de ensaios à diferentes taxas de deformação. A Equação 1 retrata o modelo geral de J-C, onde não há variações relevantes de temperatura e, portanto, $T = T_r$, T_r é a temperatura ambiente.

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})] \quad (1)$$

Quando a taxa de deformação adotada é a mesma de referência, $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0$ na Eq. 1, há uma simplificação da Eq. 1 que se torna Eq.2.

$$\sigma = A + B\varepsilon^n \quad (2)$$

A partir das curvas tensão-deformação obtidas em ensaios de tração quasi-estáticos, podem ser obtidos os coeficientes A, B e n. Estas constantes representam a tensão de escoamento do material, a constante de encruamento mecânico e o coeficiente de encruamento mecânico, respectivamente. Por meio de tratamento matemático, o logaritmo natural é aplicado a ambos os lados desta equação levando a:

$$\ln(\sigma - A) = \ln B + n \ln \varepsilon \quad (3)$$

Há uma linearização entre $\ln(\sigma - A)$ e $\ln \varepsilon$, o que leva ao gráfico da Fig. 1. Substituindo-se os valores de tensão e deformação obtidos no ensaio de tração e a constante 'A' (tensão de escoamento), obtêm-se os coeficientes 'B' e 'n'. Estes coeficientes representam o ponto em que a reta intercepta o eixo y (no ponto 0) e a inclinação, respectivamente (MURUGESAN; JUNG, 2019).

A constante 'C' indica a sensibilidade à taxa de deformação do material e está no segundo termo da Eq. 1. Para determiná-la, aplica-se a linearização da Eq. 1.

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})] \rightarrow \frac{\sigma}{A+B\varepsilon^n} = 1 + C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}) \quad (4)$$

Traçando-se o gráfico $\frac{\sigma}{A+B\varepsilon^n}$ vs $\ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})$ (Fig. 2). Tendo os valores de 'A', 'B' e 'n' e os substituindo na Eq. 4, por intermédio das curvas de tração a diferentes taxas de deformação nominal ($\dot{\varepsilon}$), obtêm-se 'C' (inclinação da curva) (YUXI et al., 2015).

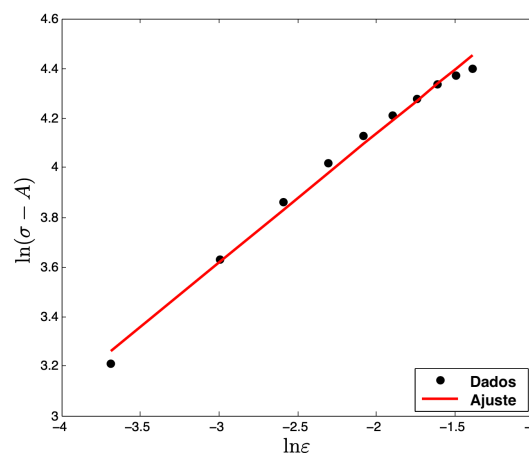


Figura 2. Relação entre $\ln(\sigma - A)$ e $\ln \varepsilon$ nas condições de referência. (fonte: MURUGESAN; JUNG, 2019, adaptado.)

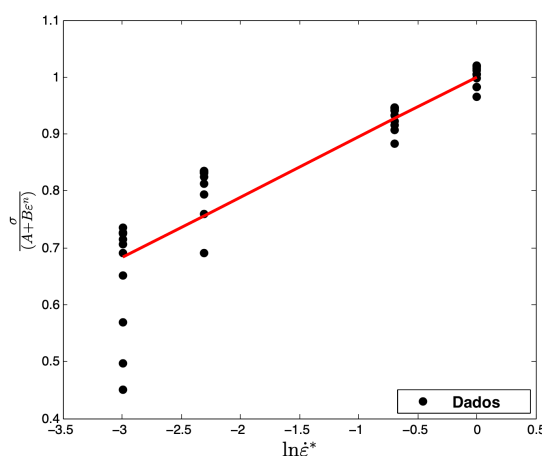


Figura 3. Relação entre $\frac{\sigma}{A+B\varepsilon^n}$ e $\ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})$ nas condições de referência. (fonte: MURUGESAN; JUNG, 2019, adaptado.)

As equações devem ser numeradas consecutivamente, com um numeral árabe entre parênteses, que aumenta consecutivamente com cada equação. As referências cruzadas também devem ser usadas para citações em texto usando a etiqueta Equação, por exemplo equação (1).

3. Método

3.1 Veículo Utilizado no Presente Estudo

O veículo compacto *Up!* é comercializado na América Latina e, segundo a Latin Ncap, obteve boa avaliação.

O veículo foi o primeiro modelo produzido no Brasil a obter nota máxima no teste de colisão frontal para ocupantes adultos. Sua estrutura é composta de 75% (em massa) de aços trabalhados a quente, de média, alta e ultra-alta resistência mecânica. Entende-se por ultra-alta resistência (resistência mecânica maior que 690 MPa), alta resistência (resistência mecânica maior que 410 MPa), média resistência (resistência mecânica maior que 300 MPa) e de estampagem profunda (resistência mecânica maior que 260 MPa) Up! (VOLKSWAGEN DO BRASIL, 2014) (Fig. 3).

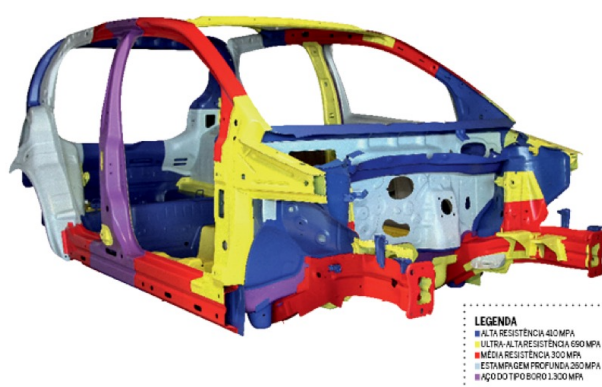


Figura 3. Chassi do Volkswagen Up! evidenciando os aços de diferentes propriedades mecânicas. (fonte: CABRAL, 2014)

3.2 Determinação dos Deslocamentos Estruturais

O veículo compacto do presente estudo passou pelo teste de colisão frontal (*crash test*). No pós-teste, removeu-se sua longarina de onde foram retiradas as amostras de material que passaram pelos testes descritos na seção 2 e que, também, proporcionou a determinação das constantes de Johnson-Cook. O chassi monobloco foi exposto no processo de desmontagem, Fig. 4.



Figura 4. Veículo suspenso no elevador pneumático no pós-teste (autoral)

No intuito de aprofundar a discussão acerca da eficiência da estrutura do compacto em colisões frontais, a medição das coordenadas da estrutura no pós-teste foi o ponto de partida para melhor compreender a dinâmica do acidente. Com o chassi exposto, utilizou-se um equipamento eletrônico de medição tridimensional: NAJA 3D, fabricado pela empresa Cellette. Trata-se de uma ferramenta especializada para medição de chassi veicular (Fig. 5). Através de uma interface virtual, pode-se correlacionar pontos em um ambiente 3D com a estrutura real do chassi. O equipamento se desloca em cima de um trilho (Fig. 5) posicionado de forma equidistante de cada lateral do veículo. Por meio de um braço de medição pode-se determinar as coordenadas X, Y e Z que se encontram na ponta da esfera acoplada ao braço (Fig. 5 e 6).



Figura 5. Equipamento Naja 3D – Cellette (autoral)



Figura 6. Momento exato de medição de um ponto no chassi (autoral)

Os pontos que apresentaram o maior deslocamento localizam-se na longarina dianteira esquerda (tabela 1), devido ao ensaio de colisão frontal. O maior deslocamento registrado foi de 255 mm ao longo do eixo 'X'. Houve um grande deslocamento também no eixo Z, indicando que a longarina foi elevada com o impacto. O maior deslocamento nesta direção foi de

141,4 mm. O referencial dos eixos X, Y e Z está indicado na Fig. 7.

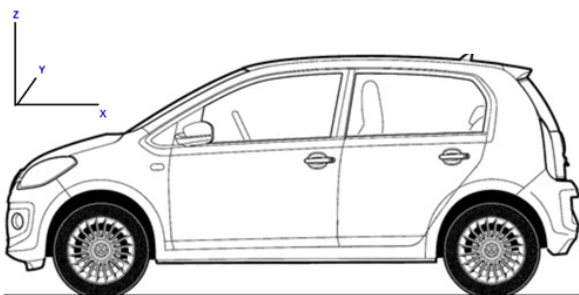


Figura 7. Referencial dos eixos X, Y e Z, referente às medições realizadas. (autoral)

Tabela 1 – Maiores deslocamentos registrados, referentes à longarina dianteira esquerda (autoral)

<u>Ponto</u>	<u>Descrição</u>	<u>dX(mm)</u>	<u>dY(mm)</u>	<u>dZ(mm)</u>
1	Fixação do para-choque frontal	255,0	-22,5	124,8
3	Fixação do para-choque frontal	248,4	-14,5	141,4
5	Trilho superior	79,8	59,6	-12,1
7	Furo na parte inferior da longarina frontal	220,5	76,4	148,2

3.2 Ensaio De Tração dos Corpos Provenientes da Longarina e Definição do Modelo de Johnson-Cook

Espera-se que o bom desempenho no teste de colisão frontal esteja associado ao bom arranjo estrutural do monobloco e aos materiais aplicados à estrutura. Apesar do *crash box*, presente nesse veículo, as longarinas dianteiras também recebem parte da energia cinética da colisão. As longarinas estão imediatamente atrás do *crash box*, unidas a ele pela barra do pára-choque. Em uma eventual colisão, a barra de pára-choque distribuirá a carga de impacto aos *crash box* e, em seguida, às longarinas dianteiras. Para a realização dos testes previstos na seção 2, retirou-se a longarina menos afetada do veículo para retirada dos espécimes (Fig.8).

Retiraram-se quatro corpos de prova, a partir de chapas retas da longarina (Fig. 9). Os corpos de prova foram em tamanho reduzido devido à escassez de material, conforme a norma E8/E8M (ASTM INTERNATIONAL, 2016). Os ensaios de tração foram iniciados com a taxa de deformação quase-estática de $0,001 \text{ s}^{-1}$ (Fig. 9).

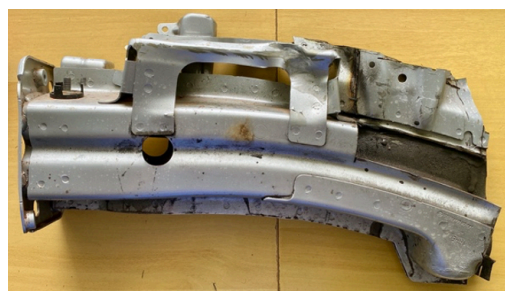


Figura 8. Longarina dianteira direita menos afetada pela colisão frontal (autoral)

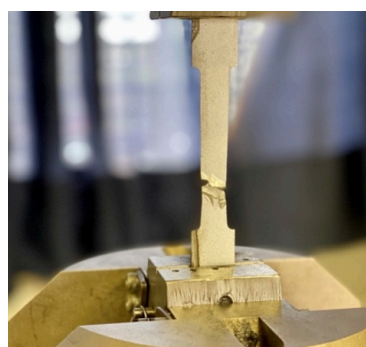


Figura 9. Corpo de prova após ruptura em ensaio de tração (autoral)

A Figura 10 mostra a curva tensão-deformação do corpo de prova referência com taxa de deformação quase-estática. A constante “A” foi estimada por meio da tensão de escoamento do material: construiu-se uma linha paralela à fase elástica do gráfico tensão-deformação, apontando o valor de 611,57 MPa.

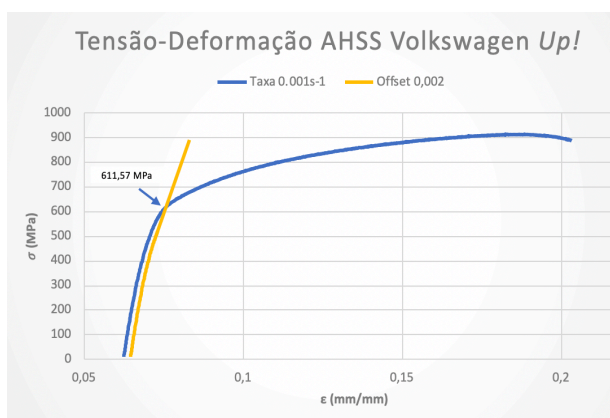
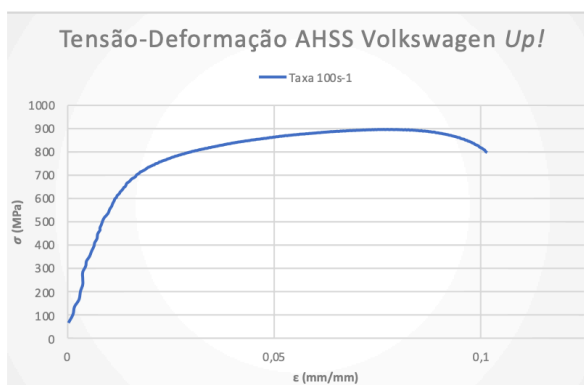
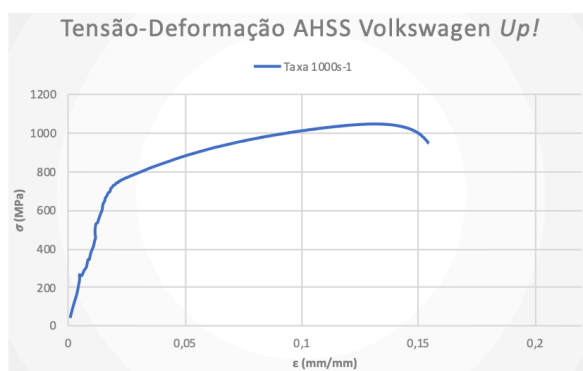


Figura 10. Gráfico tensão-deformação do ensaio de tração do corpo de prova proveniente do veículo compacto sob taxa de deformação de referência. (autoral)

O ensaio do segundo corpo de prova foi conduzido a uma taxa de 100 s^{-1} e, em seguida, de 1000 s^{-1} . O resultado destes ensaios está ilustrado na Fig. 11.



(a)



(b)

Figura 11. Figuras (a) e (b). Gráfico tensão-deformação do ensaio de tração do corpo de prova proveniente do veículo compacto nas taxas de deformação de 100 s^{-1} e 1000 s^{-1} (autoral).

Encontrados os valores de ‘A’, ‘B’ e ‘n’, traçou-se a reta $\frac{\sigma}{A+B\varepsilon^n}$ vs $\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)$ que permitiu encontrar a constante ‘C’, a partir de sua inclinação:

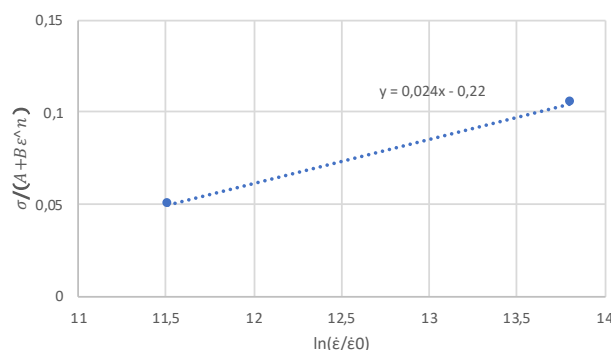


Figura 12. Gráfico $\frac{\sigma}{A+B\varepsilon^n}$ vs $\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)$ para o aço retirado da longarina do Volkswagen Up!. (autoral)

Cada um dos dois pontos nesta reta representa a mediana dos valores para as séries de 100 s^{-1} e 1000 s^{-1} e sua inclinação indica a sensibilidade à taxa de deformação do material (constante C). O valor encontrado foi de 0,024.

4. Resultados e Discussão

O modelo de Johnson-Cook deve estimar as curvas tensão-deformação do material, considerando os efeitos da taxa de deformação e temperatura (MILANI et al., 2008). O modelo foi ajustado para o caso do aço proveniente da longarina do veículo compacto do presente estudo. Utilizando os valores de constantes encontrados, conforme seções 2 e 3, a equação completa de J-C está representada abaixo, Eq. 5.

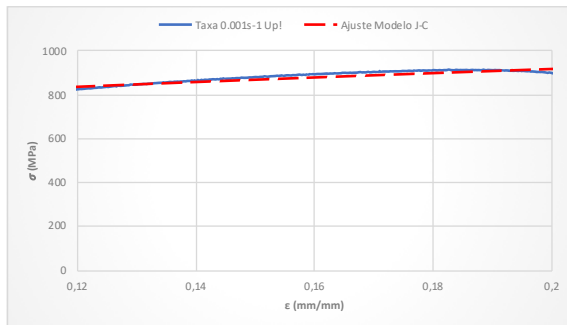
$$\sigma = [612 + 829 \varepsilon^{0,62}] [1 + 0,024 \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{0,001}\right)] \quad (5)$$

Tabela 2. Resumo das constantes do modelo de J-C encontradas para o material retirado das longarinas frontais do veículo compacto do presente estudo (autoral)

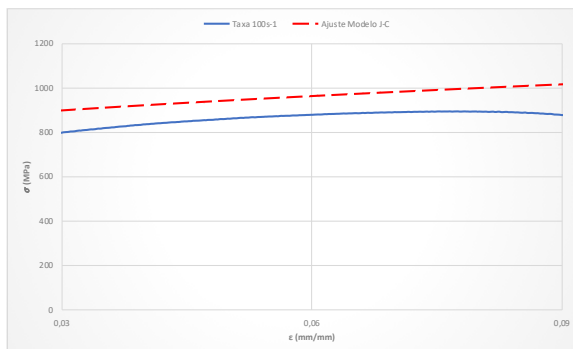
A	B	C	n
612 MPa	829 MPa	0,024	0,62

As curvas tracejadas, em vermelho, indicam a predição de valores da tensão equivalente (σ) geradas pelo modelo de Johnson-Cook ajustado, Eq.5, ao substituir-se os valores de deformação (ε) conhecidos por meio dos ensaios experimentais realizados. Estas curvas,

representadas nas figuras 13 e 14, estão dispostas junto aos resultados dos ensaios de tração para cada uma das taxas, em linhas sólidas.



(a)



(b)

Figura 13. Figuras (a) e (b). Comparação curva tensão-deformação experimental (em azul) com o modelo de Johnson-Cook (em vermelho tracejado) para a taxa $0,001 \text{ s}^{-1}$ e para a taxa 100 s^{-1} . (autoral)

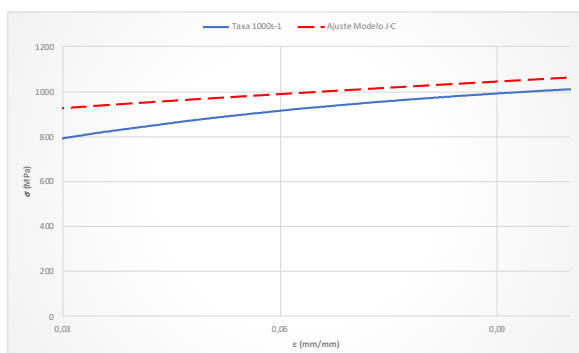


Figura 14. Comparação curva tensão-deformação experimental (em azul) com o modelo de Johnson-Cook (em vermelho tracejado) para a taxa 1000 s^{-1} (autoral).

As curvas acima demonstram uma boa concordância do modelo aplicado com o comportamento mecânico do aço estrutural da longarina do veículo compacto utilizado. A constante 'A' estimada (tensão de

escoamento) permite inferir que se trata de um aço de alta resistência, já que ultrapassa os 600 MPa. De acordo com Aldanondo et al. (2013), aços avançados de alta resistência (AHSS) Dual-Phase (bifásicos) possuem tensões de escoamento acima de 600 MPa, devido a suas propriedades microestruturais. O emprego do AHSS contribui para o aumento da segurança do veículo (BALUCH; UDIN; ABDULLAH, 2014).

Conforme dito, os orientadores já haviam trabalhado com a estrutura de outro veículo, mal avaliado em segurança pela Latin Ncap. Alves (2019) retirou um corpo de prova de uma das longarinas do veículo, a mais conservada, pois o veículo também foi submetido ao ensaio de colisão frontal. A Figura 15 mostra o resultado do ensaio de tração do material proveniente do veículo compacto utilizado no presente estudo, com o material proveniente do veículo de Alves (2019) (linha tracejada), sob as mesmas condições.

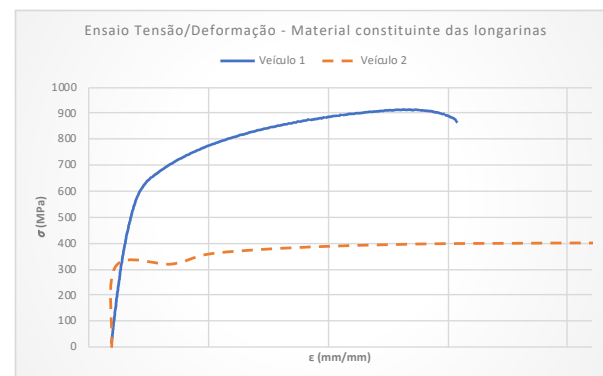


Figura 15. Gráfico tensão-deformação do ensaio de tração do corpo de prova proveniente da longarina do veículo analisado por este trabalho (veículo 1) e do veículo analisado por Alves (2019) (veículo 2).

O segundo veículo, ensaiado pela Latin NCAP, obteve nota zero na classificação de segurança para adultos. A longarina deste veículo é composta por um material cuja tensão de escoamento e de ruptura se assemelham a de um aço convencional.

As constantes de Johnson-Cook aqui determinadas, Tab. 1, em estudos de simulação numérica, podem ser *inputs* (valores de entrada) em *softwares* de modelagem de elementos finitos. Dessa forma, os resultados obtidos em simulação se tornam mais fidedignos, pois as propriedades mecânicas do material foram determinadas por ensaios experimentais do material em uso.

Estes resultados são comparáveis aos obtidos em trabalhos como o de Vedantam *et al.* (2006), que encontraram os valores de 430 MPa, 823,6 MPa, 0,0171 e 0,5071 para 'A', 'B', 'C' e 'n', respectivamente, analisando um aço bifásico. Há uma

diferença considerável no valor da constante A, que representa a tensão de escoamento do material. Isto significa que o material que compõe as longarinas frontais do veículo compacto do presente estudo, possui uma tensão de escoamento maior do que o aço analisado por Vedantam *et al.* (2006).

Quanto aos deslocamentos da longarina frontal a tabela abaixo, Tabela 2, mostra o deslocamento de alguns desses pontos. Nessa mesma tabela, encontram-se alguns dos valores encontrados por Alves (2019). Repare como esses deslocamentos são maiores, especialmente no eixo Z. Isso pode ser atribuído ao aço de pior qualidade o que ocasionaria maior deformação e, por conseguinte, maior deslocamento.

Tabela 2 – Comparação entre pontos estruturais das longarinas entre o veículo do presente estudo e o de Alves (2019)

Ponto	Descrição	dX(mm)	dZ(mm)
3	Fixação do Amortecedor (Up!)	114,5	61,1
3	Fixação do Amortecedor (Aveo)	135,2	191,8
7	Furo na parte inferior da longarina frontal (Up!)	220,5	148,2
7	Furo na parte inferior da longarina frontal (Aveo)	86,9	378

5. Conclusão

O presente trabalho apresenta a metodologia de determinação das constantes de Johnson-Cook para as longarinas de um veículo compacto avaliado em 5 estrelas para proteção adulto pela Latin Ncap. Os valores encontrados demonstram boa correlação com os valores experimentais, figuras 13 e 14 e valores de trabalhos de outros pesquisadores.

Foi encontrada uma forte influência quanto ao nível de deformação das longarinas e, portanto, seus deslocamentos com relação às propriedades mecânicas dos materiais aplicados nesse elemento estrutural, conforme mostrado na Tab. 2. A medição dos deslocamentos estruturais da carroceria, em ambos veículos, indicou que os pontos com maior deslocamento referem-se à longarina dianteira, do lado do motorista. Em resumo, ao comparar com as medições em um veículo, que recebeu nota zero no *crash test*, foram encontradas evidências de maior eficiência da estrutura em dissipar a energia proveniente da colisão frontal, no veículo compacto do

presente estudo, pois houve menor deformação dos pontos referentes ao habitáculo.

3.1. Agradecimentos

Os agradecimentos são opcionais.

3.2. Referencias

O estilo de citação utilizado em todo o texto deve ser uniforme. O sistema de referenciamento será o indicado na secção seguinte. A ordem das referências coincidirá com a ordem em que as citações aparecem no texto.

4. Referencias

[1] J. Van Slycken et al., *Crashworthiness Characterization and Modelling Of High-Strength Steels For Automotive Applications*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Automobile Engineering, 2006. 220: 391 DOI: 10.1243/09544070

[2] SMERD, R. *et al. High strain rate tensile testing of automotive aluminum alloy sheet*. International Journal of Impact Engineering, [s. l.], v. 32, ed. 1-4, p. 541-560, 2005.

[3] QING-DONG, Zhang; QIANG, Cao; XIAO-FENG, Zhang. *A Modified Johnson-Cook Model for Advanced High-Strength Steels Over a Wide Range of Temperatures*. Journal of Materials Engineering and Performance, [s. l.], 2014.

[4] AMARAL, Rui *et al. Assessment of different ductile damage models and experimental validation*. Int J Mater Form, [s. l.], v. 11, p. 435-444, 2018.

[5] BUGELLI, Eduardo Barjud. *Modelos De Falha Em Análise Numérica De Estrutura Veicular Submetida A Impacto De Baixa Velocidade*. 2010. Tese de Mestrado (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, [S. l.], 2010.

[6] Amaral et al. (2018) utilizaram três modelos elastoplásticos, Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN), Johnson-Cook e Lemaitre, para avaliar a predição sobre materiais não convencionais utilizados na indústria automotiva. Por meio de análise de dados experimentais e simulação em elementos finitos, concluiu-se que os modelos de Johnson-Cook e GTN mostraram-se próximos à realidade.

- [7] KIRANLI, Engin. *Determination of Material Constitutive Equation of a Biomedical Grade Ti6Al4V Alloy For Cross-Wedge Rolling*. 2009. Thesis (Master of Science in Material Science) - Graduate, [S. l.], 2009.
- [8] NÓBREGA, Marcelo de Jesus Rodrigues. *Influência da metodologia de medição das propriedades mecânicas dinâmicas na previsibilidade do comportamento de estruturas sujeitas a impactos elastoplásticos*. 2010. Tese de Doutorado (Doutorando em Engenharia Mecânica) - Engenharia Mecânica, PUC-Rio, [S. l.], 2010.
- [9] MURUGESAN, Mohanraj; JUNG, Dong Won. *Johnson Cook Material and Failure Model Parameters Estimation of AISI-1045 Medium Carbon Steel for Metal Forming Applications*. *Materials*, [s. l.], v. 12, ed. 609, 2019. Disponível em: www.mdpi.com/journal/materials. Acesso em: 16 out. 2019.
- [10] YUXI, Li *et al.* *Determination of 40Cr Johnson-Cook Dynamic Constitutive Equation for Cold roll-beating Forming Process*. *HEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, [S. l.], v. 46, 2015.
- [11] NÓBREGA, Marcelo de Jesus Rodrigues. *Influência da metodologia de medição das propriedades mecânicas dinâmicas na previsibilidade do comportamento de estruturas sujeitas a impactos elastoplásticos*. 2010. Tese de Doutorado (Doutorando em Engenharia Mecânica) - Engenharia Mecânica, PUC-Rio, [S. l.], 2010.
- [12] VOLKSWAGEN DO BRASIL. *Ficha Técnica Volkswagen up!*. [S. l.], 5 fev. 2014. Disponível em: <http://vwbr.com.br/ImprensaVW/Release.aspx?id=e13a8783-3ea6-41da-9223-b969b8519d6a>. Acesso em: 22 maio 2019
- [13] CABRAL, Julio. *Atraso Estrutural: Carros Brasileiros São Fabricados Com Estruturas Inseguras*. [S. l.], 2014. Disponível em: <https://revistaautoesporte.globo.com/Noticias/noticia/2014/05/atraso-estrutural-carros-brasileiros-sao-fabricados-com-material-de-qualidade-inferior-aos-europeus.html>. Acesso em: 20 fev. 2019.
- [14] ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials: Designation: E8/E8M – 16a*. [S. l.: s. n.], 2016
- [15] ALDANONDO, E. *et al.* *Friction stir spot welding of DP1200 steel*. In: 1st International Joint Symposium On Joining And Welding, 2013, Osaka, Japan. *Proceedings [...]*. [S. L.: s. N.], 2013.
- [16] BALUCH, Nazim; UDIN, Zulkifli Mohamed; ABDULLAH, Che Sobry. *Advanced High Strength Steel in Auto Industry: An Overview*. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 686-689, 2014.
- [17] ALVES, Yuri Souza. *Proposição de Metodologia de Correlação da Velocidade de Impacto e Deformação de um Veículo Utilizando o Crash Test*. 2019. Monografia (Engenharia Automotiva) - Brasília, DF, 2019
- [18] VEDANTAM, K.; BAJAJ, D.; BRAR, N.; HILL, S. *Johnson - Cook Strength Models for Mild and DP 590 Steels*. *AIP Conference Proceedings*. 845. 10.1063/1.2263437, 2006.