

**Universidade de Brasília – UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Curso de Engenharia Automotiva**

**ANÁLISE DA PLASTICIDADE DE MATERIAL  
APLICADO A AUTOMÓVEL: ESTUDO DE UM  
VEÍCULO COMPACTO UTILIZANDO O MODELO  
DE JOHNSON-COOK**

**Autor: Walter Paschoal Pereira**

**Orientador: Dr. Alessandro Borges de Sousa Oliveira  
Co-Orientadora: Dra. Rita de Cássia Silva**

**Brasília, DF  
2020  
Walter Paschoal Pereira**

# **Análise da Plasticidade de Material Aplicado a Automóvel: Estudo de um Veículo Compacto Utilizando o Modelo de Johnson-Cook**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Borges de Sousa Oliveira

Co-Orientadora: Profa. Dra. Rita de Cássia Silva

**Brasília, DF  
2020**

## CIP – Catalogação Internacional da Publicação\*

Paschoal, Walter.

Análise Da Plasticidade De Material Aplicado A Automóvel: Estudo De Um Veículo Compacto Utilizando O Modelo De Johnson-Cook / Walter Paschoal Pereira. Brasília: UnB, 2020. 127 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília Faculdade do Gama, Brasília, 2020. Orientação: Alessandro Borges de Sousa Oliveira.

1. Modelo De Johnson-Cook. 2. *Crashworthiness*. 3. Ensaio de colisão frontal (*crash test*). I Borges de Sousa Oliveira, Alessandro. II. Análise Da Plasticidade De Material Aplicado A Automóvel: Estudo De Um Veículo Compacto Utilizando O Modelo De Johnson-Cook

CDU Classificação

# **Análise da Plasticidade de Material Aplicado a Automóvel: Estudo de um Veículo Compacto Utilizando o Modelo de Johnson-Cook**

**Walter Paschoal Pereira**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação \_\_\_\_/\_\_\_\_/2020) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof. Dr.: Alessandro B. de S. Oliveira, UnB/ FGA**  
Orientador

---

**Profa. Dra.: Rita de Cássia Silva, UnB/ FGA**  
Co-Orientadora

---

**Prof. Dr.: Saleh Barbosa Khalil, UnB/FGA**  
Membro Convidado

---

**Prof. Dr.: Rodrigo Arbey Muñoz Meneses, UnB/FGA**  
Membro Convidado

Brasília, DF  
2020

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus e aos meus pais, Walter e Glória, por sempre me apoiarem e me incentivarem na trajetória, comemorando as vitórias, apesar das adversidades inerentes. Compartilho este trabalho com vocês, já que representam grande parte da minha formação pessoal e acadêmica.

Ao amigo José Paulo Afonso de Sousa, o meu agradecimento por sempre me motivar a alcançar meus objetivos, acompanhando a minha jornada acadêmica e pessoal. Não posso esquecer dos importantes conselhos que auxiliam constantemente na minha evolução profissional e como ser humano.

Ao engenheiro Gregório Pesinato, meu agradecimento pela amizade, companheirismo e pelos aprendizados ao longo da jornada acadêmica e profissional, por sempre me estimular e induzir a vontade de aprender cada vez mais sobre a área automotiva, compartilhando seu vasto conhecimento.

A todos os professores que contribuíram para este trabalho e minha formação dentro e fora de sala de aula. Um agradecimento especial ao professor Alessandro Borges de Sousa Oliveira e a professora Rita de Cássia Silva por me auxiliarem na construção do aprendizado e pela colaboração dedicada a este trabalho. Agradeço também aos professores Saleh Barbosa Khalil e Taís Tognetti, que desempenharam papéis especiais na minha formação.

A special acknowledgment to Mr. Alejandro Furas from Latin NCap, that made this work possible by donating the vehicle which structure was used in this work's analysis. I would also like to thank Stephane Jourdan, technical director at Celette for providing the Naja 3D Software, allowing to measure the structural displacements in the vehicle structure.

Por último, agradeço aos amigos e companheiros de caminhada, em especial àqueles que tiveram um papel importante em diversos momentos da jornada, dentro e fora da Universidade: Yuri Alves, Renata Vieira, Pedro Beghelli, Daniel Moura, Pedro Xavier, Lucas Lock e Gustavo Braz. O apoio de vocês foi essencial para motivar e dar forças, que culminaram na realização deste sonho.

Meu muito obrigado.

**Walter Paschoal**

## RESUMO

Com o advento dos ensaios de colisão frontal (*crash tests*), a evolução da segurança veicular é crescente. Apesar dos avanços nesta área, é grande o número de acidentes com vítimas. Neste sentido, são publicados atualmente diversos estudos na área da ciência dos materiais que constituem o chassi dos veículos, a fim de obter-se um aumento da segurança veicular e da *Crashworthiness* (capacidade de uma estrutura em proteger os seus ocupantes durante um impacto). Os modelos viscoelasto-plásticos são constantemente utilizados para descrever a relação tensão/deformação dos materiais, visando prever seu comportamento em situações práticas de uso como, por exemplo, a colisão de um veículo. Dentre eles, destaca-se o modelo de Johnson–Cook: um modelo empírico que busca prever o comportamento dos materiais no regime plástico. Para aprofundar-se nesta discussão, este trabalho utilizou-se de um exemplar de veículo compacto submetido à um ensaio de colisão *crash test*, doado pelo Sr. Alejandro Furas, da Latin NCap. Por meio do desmonte dos subsistemas do veículo retirou-se a longarina frontal, permitindo o recorte de corpos de prova para realizar ensaios de tração, necessários a encontrar 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 e alto desempenho. Estas constantes podem auxiliar na melhoria das simulações computacionais envolvendo colisões veiculares. O desmonte do veículo também possibilitou a realização das medições do chassi e compará-las com a referência via software, que gerou coordenadas tridimensionais. Realizou-se uma comparação com outro veículo que obteve uma pior classificação no ensaio de colisão frontal (nota zero). Os maiores deslocamentos estruturais registrados foram: 255 milímetros ao longo do eixo X e 141,4 milímetros ao longo do eixo Z. Estes valores, obtidos empiricamente por meio de um equipamento de medição específico, podem ser utilizados para validar simulações computacionais. Foram encontradas evidências de maior eficiência da estrutura em dissipar a energia proveniente da colisão frontal, deformando menos pontos referentes ao habitáculo, em comparação com o outro veículo. Estes resultados indicam uma correlação entre o tipo de material aplicado nas longarinas e o desempenho do veículo em colisões frontais.

**Palavras-chave:** Veículo compacto, ensaio de colisão frontal (*crash test*), modelo elastoplástico, modelo de Johnson-Cook, *Crashworthiness*, aço de alta resistência.

## ABSTRACT

With the advent of crash tests, there is an increasing evolution of vehicle safety. Despite advances in this area, the number of accidents with victims is high. In this sense, several studies are currently published in the area of materials science used in chassis of vehicles, with the objective to increase vehicle safety and *Crashworthiness* (the ability of a structure to protect its occupants during an impact). 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:** Compact car, crash test, Johnson-Cook model, *Crashworthiness*, AHSS Steel

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1.</b> Relação entre $\ln\sigma - A$ e $\ln\epsilon$ nas condições de referência.....	10
<b>Figura 2.</b> Relação entre $\sigma A + B\epsilon n$ e $\ln(\dot{\epsilon}\epsilon_0)$ nas condições de referência. ....	11
<b>Figura 3.</b> Espécime padrão de corpo de prova. ....	13
<b>Figura 4.</b> Máquina de ensaio de tração Instron 8801. ....	14
<b>Figura 5.</b> Curva tensão/deformação de ensaio de tração padrão. ....	15
<b>Figura 6.</b> Transição entre deformação plástica e elástica do material. ....	16
<b>Figura 7.</b> Representação do comportamento físico da amostra ao longo da curva tensão/deformação. ....	17
<b>Figura 8.</b> Comparação entre os comportamentos tensão/deformação de engenharia e verdadeiros. ....	19
<b>Figura 9.</b> Medidas mínimas para um espécime reduzido, modificado. ....	20
<b>Figura 10.</b> Desenho técnico do corpo de prova, contendo as medidas em milímetros. A espessura definida da chapa foi de 2mm. ....	20
<b>Figura 11.</b> Corpos de prova em aço 1020. ....	21
<b>Figura 12.</b> Equipamento servo hidráulico da marca Instron, modelo 8801 utilizado nos ensaios de tração. ....	22
<b>Figura 13.</b> Corpo de prova de aço 1020 posicionado na Instron 8801, imediatamente antes da realização do ensaio. ....	23
<b>Figura 14.</b> Corpos de prova em aço 1020, após ensaio de tração. ....	24
<b>Figura 15.</b> Gráfico tensão-deformação dos ensaios de tração do aço 1020, em diferentes taxas de deformação. ....	25
<b>Figura 16.</b> Gráfico tensão-deformação, na taxa de deformação de referência. A linha amarela indica o offset de 0,002. ....	26
<b>Figura 17.</b> Gráfico $\ln\sigma - A - \ln\epsilon$ . (a) Escala negativa. (b) Reta ajustada, visando indicar o termo independente (6,27) e a inclinação da reta (0,95). ....	27
<b>Figura 18.</b> Reta criada utilizando os dados provenientes da Tabela 2, visando indicar o procedimento para encontrar a constante C. ....	29
<b>Figura 19.</b> Gráfico $\sigma A + B\epsilon n - \ln(\dot{\epsilon}\epsilon_0)$ . O valor da constante C é igual à inclinação da reta. ....	30
<b>Figura 20.</b> Volkswagen Up! na versão comercializada na América Latina. ....	33
<b>Figura 21.</b> Representação do Volkswagen Up! e dos diversos tipos de aço que o compõe. ....	35
<b>Figura 22.</b> Chassi do Volkswagen Up! evidenciando os aços de diferentes propriedades mecânicas. ....	35
<b>Figura 23.</b> Volkswagen Up! após teste de colisão frontal realizado em laboratório, modelo exato utilizado por este trabalho. ....	36
<b>Figura 24.</b> Figuras (a) e (b). Fotos de colisões frontais reais envolvendo Volkswagen Up! em autoestradas brasileiras. ....	36
<b>Figura 25.</b> Volkswagen Up! durante preparação que antecede a realização do ensaio de colisão pelo Latin NCAP. ....	41
<b>Figura 26.</b> Representação da configuração do teste, indicando a barreira deformável que deve atingir 40% da área frontal do veículo. ....	42
<b>Figura 27.</b> Especificação da barreira deformável e periféricos. Medidas em milímetros. ....	43
<b>Figura 28.</b> Volkswagen Up! em teste de impacto frontal conduzido pelo Instituto Latin NCAP, no momento da colisão contra a barreira deformável. ....	44
<b>Figura 29.</b> Amostra do Volkswagen Up! doado para a Universidade de Brasília, cuja estrutura é objeto de estudo deste trabalho. ....	45
<b>Figura 30.</b> Veículo suspenso no elevador pneumático, após o desmonte dos para-lamas dianteiros e do conjunto de rodas/pneus. ....	46
<b>Figura 31.</b> Guincho hidráulico Marcon, utilizado para apoiar e retirar o conjunto motriz. ....	46
<b>Figura 32.</b> Vista frontal do veículo, suspenso no elevador pneumático, após o desmonte do conjunto motriz e da barra de direção. ....	47
<b>Figura 33.</b> Figuras (a) e (b). Motor tri cilíndrico do Volkswagen Up! retirado do exemplar cedido pela Latin NCAP e detalhe do coxim fraturado devido ao impacto sofrido. ....	48
<b>Figura 34.</b> Visão lateral da parte traseira do Up! em análise, registrada posteriormente à retirada do sistema de suspensão traseiro e tanque de combustível. ....	48
<b>Figura 35.</b> Tanque de combustível retirado do veículo, após o processo de drenagem. ....	49
<b>Figura 36.</b> Desmonte do crashbox traseiro utilizando a ferramenta adequada. ....	49

<b>Figura 37.</b> Figuras (a) e (b). Airbag do passageiro deflagrado no ensaio crash test e indicação da forma correta de desmonte de acordo com o Volkswagen UP! Workshop Manual. ....	50
<b>Figura 38.</b> Figuras (a) e (b). Instruções para retirada do volante e do airbag do motorista.....	50
<b>Figura 39.</b> Figuras (a) e (b). Airbag do motorista deflagrado após o impacto e volante do motorista removido. ....	51
<b>Figura 40.</b> Figuras (a) e (b). Instruções acerca da remoção do painel e estrutura metálica. ....	51
<b>Figura 41.</b> Figuras (a) e (b). Painel e console central removido, expondo a estrutura metálica e partes do chicote elétrico. ....	51
<b>Figura 42.</b> Veículo em avançado estado de desmonte, após remoção do para-brisa. Destaque para a porta do motorista, que abre e fecha normalmente, mesmo após impacto contra a barreira deformável. ....	52
<b>Figura 43.</b> Figuras (a) e (b). Bancos dianteiros removidos. Detalhe para o sensor de presença do ocupante, utilizado para emitir um aviso sonoro e visual caso o cinto de segurança não seja utilizado. ....	53
<b>Figura 44.</b> Parafuso no padrão estriado. ....	53
<b>Figura 45.</b> Vista frontal do chassi monobloco do Volkswagen Up!. ....	54
<b>Figura 46.</b> Vista traseira do chassi monobloco do Volkswagen Up!. ....	55
<b>Figura 47.</b> Elevador pneumático Rhone da Celette. ....	56
<b>Figura 48.</b> Detalhe do chassi monobloco fixado ao elevador pneumático Rhone por meio de garras metálicas. ....	57
<b>Figura 49.</b> Figuras (a) e (b). Chassi monobloco exposto, após a retirada de peças. Veículo preso diretamente ao elevador pneumático, que fora erguido para facilitar as medições. ....	57
<b>Figura 50.</b> Equipamento de medição Celette NAJA 3D utilizado nas medições deste trabalho. ....	58
<b>Figura 51.</b> Ponteiras e adaptadores intercambiáveis. ....	59
<b>Figura 52.</b> Computador com software NAJA 3D instalado, utilizado nas aferições. ....	60
<b>Figura 53.</b> Tela inicial do software NAJA 2014, que possui o Volkswagen Up! presente na base de dados. ....	60
<b>Figura 54.</b> Base de dados do software NAJA 3D que contem o Volkswagen Up!.....	61
<b>Figura 55.</b> Tela do ambiente de medição após a escolha do modelo. Nuvem de pontos em vista superior (1) e lateral (2), eixo de referência adotado (3) e lista de todos os pontos que devem ser mensurados (4). ....	62
<b>Figura 56.</b> Tela do ambiente de medição. Pontos 19, 20, 21 e 22 selecionados para referenciar a posição do chassi em relação aos eixos de traçados pelo software. ....	63
<b>Figura 57.</b> Tela do ambiente de medição indicando a localização do ponto (1) e o adaptador correto (2) para medição de um dos pontos escolhidos como referência. ....	64
<b>Figura 58.</b> Figuras (a) e (b). Adaptador modelo "M6" e posterior encaixe na esfera de medição. ....	64
<b>Figura 59.</b> Momento exato da medição de um dos pontos escolhidos como referência. Após encaixe do adaptador correto ao ponto indicado no chassi, pressiona-se o botão localizado no braço do equipamento NAJA 3D e uma coordenada tridimensional é gerada. ....	65
<b>Figura 60.</b> Figuras (a) e (b). Indicação do local e adaptador correto e posicionamento do equipamento para realização da medida. ....	66
<b>Figura 61.</b> Localização e encaixe da esfera em um dos pontos, utilizando o extensor, imediatamente antes do registro da medição. ....	66
<b>Figura 62.</b> Janela secundária mostrando a localização do ponto, e os deslocamentos divergentes do chassi inalterado, em X e Y. ....	67
<b>Figura 63.</b> Processo de aferição da longarina dianteira esquerda, menos afetada.....	68
<b>Figura 64.</b> Vista em perspectiva do processo de medição da longarina dianteira direita. Equipamento NAJA 3D com o extensor acoplado e o adaptador engastado em um dos pontos de medição. ....	69
<b>Figura 65.</b> Processo de aferição da longarina dianteira direita, comprometida pela colisão. ....	69
<b>Figura 66.</b> Referencial dos eixos X, Y e Z, referente às medições realizadas. ....	71
<b>Figura 67.</b> Régua padrão com medidas conhecidas: (1) $350,05 \pm 0,20$ e (2) $349,95 \pm 0,20$ milímetros, ambos a 20 °C. ....	73
<b>Figura 68.</b> Relatório parcial das medições obtidas, no ambiente de simetria do software. Os deslocamentos foram medidos no eixo Y (lista dY). ....	73
<b>Figura 69.</b> Medição da régua padronizada. Etiqueta referente à incerteza deste instrumento visível.....	76

<b>Figura 70.</b> Elementos frontais para absorver a energia do impacto. Destacam-se as longarinas dianteiras principais, em verde na imagem.....	79
<b>Figura 71.</b> Chassi monobloco do Volkswagen Up!, após retirada da longarina dianteira menos afetada.....	80
<b>Figura 72.</b> Longarina dianteira direita, menos afetada pela colisão frontal, retirada do veículo.....	81
<b>Figura 73.</b> Processo de corte à Jato d'água dos corpos de prova do Volkswagen Up!.....	82
<b>Figura 74.</b> Corpo de prova do Volkswagen Up!, precedendo o ensaio quase estático.....	83
<b>Figura 75.</b> Corpo de prova do Volkswagen Up!, após a ruptura pelo ensaio destrutivo.....	83
<b>Figura 76.</b> Gráfico tensão-deformação do ensaio de tração do corpo de prova proveniente do Volkswagen Up!, na taxa de deformação de referência.....	84
<b>Figura 77.</b> Gráfico $\ln\sigma - A - \ln\varepsilon$ , permitindo estimar as constantes B e n.....	85
<b>Figura 78.</b> Embutimento do corpo de prova utilizando-se PVC e material polimerizante.....	85
<b>Figura 79.</b> Corpo de prova embutido, imediatamente antes do lixamento.....	86
<b>Figura 80.</b> Corpo de prova pós processo de lixamento.....	87
<b>Figura 81.</b> Gráfico tensão-deformação do ensaio de tração do corpo de prova proveniente do Volkswagen Up!, na taxa de deformação $100\text{ s}^{-1}$ .....	87
<b>Figura 82.</b> Gráfico tensão-deformação do ensaio de tração do corpo de prova proveniente do Volkswagen Up!, na taxa de deformação $1000\text{ s}^{-1}$ .....	88
<b>Figura 83.</b> Gráfico $\sigma A + B\varepsilon n$ vs $\ln(\dot{\varepsilon}\dot{\varepsilon}0)$ para o aço retirado da longarina do Volkswagen Up!.....	89
<b>Figura 84.</b> Deformação progressiva de uma longarina frontal.....	90
<b>Figura 85.</b> Exemplo de flambagem progressiva.....	91
<b>Figura 86.</b> Exemplo de flambagem dinâmica plástica.....	92
<b>Figura 87.</b> Exemplo de flambagem global.....	92
<b>Figura 88.</b> Vídeo do crash test do Volkswagen Up!, em software de edição.....	94
<b>Figura 89.</b> Comparação curva tensão-deformação experimental (em azul) com o modelo de Johnson-Cook (em amarelo tracejado) para a taxa $0,001\text{ s}^{-1}$ .....	97
<b>Figura 90.</b> Comparação curva tensão-deformação experimental (em azul) com o modelo de Johnson-Cook (em amarelo tracejado) para a taxa $100\text{ s}^{-1}$ .....	97
<b>Figura 91.</b> Comparação curva tensão-deformação experimental (em azul) com o modelo de Johnson-Cook (em amarelo tracejado) para a taxa $500\text{ s}^{-1}$ .....	98
<b>Figura 92.</b> Comparação curva tensão-deformação experimental (em azul) com o modelo de Johnson-Cook (em amarelo tracejado) para a taxa $1000\text{ s}^{-1}$ .....	98
<b>Figura 93.</b> Comparação curva tensão-deformação experimental (em azul) com o modelo de Johnson-Cook (em vermelho tracejado) para a taxa $0,001\text{ s}^{-1}$ .....	99
<b>Figura 94.</b> Comparação curva tensão-deformação experimental (em azul) com o modelo de Johnson-Cook (em vermelho tracejado) para a taxa $100\text{ s}^{-1}$ .....	100
<b>Figura 95.</b> Comparação curva tensão-deformação experimental (em azul) com o modelo de Johnson-Cook (em vermelho tracejado) para a taxa $1000\text{ s}^{-1}$ .....	100
<b>Figura 96.</b> 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).....	102
<b>Figura 97.</b> Notas atribuídas ao veículo Chevrolet Aveo pela Latin NCAP.....	104
<b>Figura 98.</b> Notas atribuídas ao veículo Volkswagen Up! pela Latin NCAP.....	104
<b>Figura 99.</b> Ambiente do software Ansys 18, explicitando o local de inserção das constantes encontradas.....	106

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Classificação das taxas de deformação. ....	8
<b>Tabela 2.</b> Valores extraídos dos ensaios a cada uma das taxas, para ilustrar a confecção do gráfico. ....	29
<b>Tabela 3.</b> Constantes da equação de J-C encontradas para o material aço 1020. ....	30
<b>Tabela 4.</b> Relatório do processo de medição do chassi do Volkswagen Up! submetido ao crash test. ....	70
<b>Tabela 5.</b> Resultado das medições. ....	74
<b>Tabela 6.</b> Média, desvio padrão e desvio padrão amostral calculados. ....	75
<b>Tabela 7.</b> Incertezas associadas ao procedimento de medição. ....	78
<b>Tabela 8.</b> Propriedades do aço proveniente da longarina do veículo analisado por este trabalho (veículo 1) e do veículo analisado por Alves (2019) (veículo 2). ....	102
<b>Tabela 9.</b> Constantes da equação de J-C encontradas para o material retirado das longarinas frontais Volkswagen Up!. ....	105

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	Erro! Indicador não definido.
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	Erro! Indicador não definido.
1.2 MOTIVAÇÃO .....	Erro! Indicador não definido.
1.3 OBJETO DE ESTUDO.....	Erro! Indicador não definido.
1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	Erro! Indicador não definido.
1.4.1 Objetivo geral.....	Erro! Indicador não definido.
1.4.2 Objetivos específicos.....	Erro! Indicador não definido.
<b>2. O MODELO ELASTOPLÁSTICO DE JOHNSON-COOK</b> .....	Erro! Indicador não definido.
2.1 INTRODUÇÃO AO MODELO .....	Erro! Indicador não definido.
2.2 DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES .....	Erro! Indicador não definido.
2.3 ENSAIO DE TRAÇÃO .....	Erro! Indicador não definido.
2.3.1 Introdução.....	Erro! Indicador não definido.
2.3.2 Equipamento para realização do ensaio.....	Erro! Indicador não definido.
2.3.3 Resultado do ensaio .....	Erro! Indicador não definido.
2.3.4 Ensaio prático utilizando aço 1020.....	Erro! Indicador não definido.
2.3.5 Modelagem utilizando a equação de Johnson-Cook para o aço 1020	Erro! Indicador não definido.
<b>3. O VOLKSWAGEN UP!</b> .....	Erro! Indicador não definido.
3.1 INTRODUÇÃO AO <i>VOLKSWAGEN UP!</i> .....	Erro! Indicador não definido.
3.2 SEGURANÇA DO MODELO .....	Erro! Indicador não definido.
<b>4. O ENSAIO DE COLISÃO FRONTAL</b> .....	Erro! Indicador não definido.
4.1 PANORAMA HISTÓRICO .....	Erro! Indicador não definido.
4.2 LATIN NCAP.....	Erro! Indicador não definido.
4.3 PROCEDIMENTO DO ENSAIO.....	Erro! Indicador não definido.
4.3.1 Preparação do veículo.....	Erro! Indicador não definido.
4.3.2 Área frontal do impacto.....	Erro! Indicador não definido.
4.3.3 Dinâmica do teste.....	Erro! Indicador não definido.
<b>5. DESMONTE DO VEÍCULO</b> .....	Erro! Indicador não definido.
<b>6. MEDIÇÃO DO DESLOCAMENTO ESTRUTURAL</b> .....	Erro! Indicador não definido.
6.1 EQUIPAMENTO UTILIZADO.....	Erro! Indicador não definido.
6.1.1 Elevador pneumático .....	Erro! Indicador não definido.
6.1.2 Equipamento eletrônico de medição.....	Erro! Indicador não definido.
6.1.3 Computador com software instalado .....	Erro! Indicador não definido.
6.2 O PROCESSO DE MEDIÇÃO .....	Erro! Indicador não definido.
6.2.1 Seleção do veículo .....	Erro! Indicador não definido.
6.2.2 Ambiente de Medição .....	Erro! Indicador não definido.
6.2.3 Ambiente de Medição .....	Erro! Indicador não definido.
6.3 RESULTADOS DO PROCESSO DE MEDIÇÃO .....	Erro! Indicador não definido.
6.4 BALANÇO DE INCERTEZAS DO PROCESSO DE MEDIÇÃO ..	Erro! Indicador não definido.
<b>7. ELEMENTO ESTRUTURAL: LONGARINA DIANTEIRA</b> .....	Erro! Indicador não definido.
7.1 ENSAIO DE TRAÇÃO DOS CORPOS PROVENIENTES DO VOLKSWAGEN <i>UP!</i> E MODELAGEM POR MEIO DA EQUAÇÃO DE J-C.....	Erro! Indicador não definido.
7.2 FENÔMENO DA FLAMBAGEM.....	Erro! Indicador não definido.
7.3 ESTIMATIVA DA FORÇA ATUANTE SOBRE A LONGARINA ..	Erro! Indicador não definido.
<b>8. DISCUSSÃO</b> .....	Erro! Indicador não definido.
<b>9. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	Erro! Indicador não definido.
9.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS .....	Erro! Indicador não definido.
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	109
<b>APÊNDICE A</b> .....	119

## 1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a contextualização da evolução da Segurança Veicular ao longo dos últimos anos, ressaltando o papel do ensaio de colisão frontal. A função da estrutura no desempenho do veículo neste ensaio também é discutida, bem como modelos elastoplásticos utilizados em pesquisa e desenvolvimento acerca dos materiais constituintes do chassi, que contribuem para o aumento da segurança dos modelos comercializados.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Historicamente, houve uma evolução no que diz respeito ao aumento da Segurança Veicular e, conseqüentemente, da preservação da integridade dos ocupantes do automóvel. Foi nas últimas duas décadas que essa evolução ocorreu de forma mais sistemática e, principalmente, mais mensurável (por meio de testes e ensaios). Programas independentes como o *European New Car Assessment Programme* (Euro NCAP) avaliaram a performance de mais de 500 veículos desde a sua criação, em ensaios de *crash tests*<sup>1</sup> padronizados por meio de normas. A intenção é simular possíveis acidentes reais, através do impacto do veículo analisado contra uma barreira deformável, mediante uma velocidade preconizada em norma. Segundo critérios de lesão estabelecidos, que representam determinados valores limites, atrelam-se estrelas (em uma escala de zero a cinco). As notas são associadas à segurança do motorista, passageiro frontal e crianças. Mediante a resultados dos *crash tests* realizados, fabricantes foram incentivados e pressionados a incrementar a segurança dos modelos comercializados. Verificou-se o aumento do número de avaliações cinco estrelas (nota máxima) expedidas ao longo dos anos, que ilustra a melhora na segurança veicular (RATINGEN, 2016).

A partir do sucesso do Euro NCAP em disponibilizar informação precisa acerca da segurança oferecida por modelos de automóveis comercializados, em 2011, o Global NCAP foi estabelecido, a fim de promover o desenvolvimento de novos programas ao redor do mundo, fornecendo-os suporte técnico e financeiro (GLOBAL NCAP, 2017). Dentre os novos programas, o *Latin New Car*

---

<sup>1</sup> Análises de impacto realizadas em laboratório que buscam avaliar a segurança passiva do automóvel.

*Assessment Programme* (Latin NCAP) começou em 2010 como uma iniciativa e em 2014 foi criada como uma associação, no âmbito de uma entidade jurídica (LATIN NCAP, 2011). Essa entidade, é responsável por realizar avaliações imparciais acerca da segurança veicular de modelos vendidos na América Latina e Caribe, tendo divulgado os primeiros resultados de ensaios de colisão frontal em 2010.

A repercussão da realização de ensaios de colisão e divulgação dos resultados pelo Latin NCAP resultou em melhorias na segurança veicular, mesmo com o programa operando em fase piloto (OLIVEIRA, 2013). Ikeda (2012) conduziu uma pesquisa, que indicou a segurança, associada à ergonomia e ao conforto, como os itens mais importante na escolha de um veículo pelo consumidor.

A evolução da segurança veicular e da *Crashworthiness* (capacidade de uma estrutura em proteger os seus ocupantes durante um impacto) está intimamente relacionada com os estudos na área da Ciência dos Materiais. A aplicação de materiais com boas propriedades mecânicas nas zonas de deformação da carroceria contribui para maior dissipação de energia, por meio do fenômeno da flambagem. Isto acarreta uma menor transmissão de energia ao habitáculo e, conseqüentemente, aos ocupantes (VAN SLYCKEN *et al*, 2006). Nos últimos anos um progresso substancial foi atingido, com o desenvolvimento de aços de alta resistência pela indústria. Estes aços são caracterizados por suas propriedades mecânicas: tensão de escoamento maior que 550 MPa, diferenciando-se de aços comuns cuja tensão de escoamento está em torno de 400 MPa (SAMODAJEV, 2019). Os aços de alta resistência possuem alto potencial de dissipação de energia, enquanto os aços de ultra-alta resistência possuem alta rigidez e evitam a intrusão na carroceria, danosa aos ocupantes. O uso desses aços garante uma redução de peso e uma maior proteção aos ocupantes (KUZIAK; KAWALLA; WAENGLER, 2008).

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 a colisão de um veículo. 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).

Autores exploram, em seus estudos, abordagens e ajustes deste modelo. Smerd *et al* (2005) conduziram testes de tração utilizando uma barra de pressão *split* Hopkinson em duas chapas de alumínio AA5754 e AA5182, estudando propriedades que pudessem incrementar o *crashworthiness*, visando à substituição de aços convencionais em automóveis. Os dados experimentais foram ajustados ao modelo Johnson–Cook por meio de uma regressão linear, mostrando-se como um modelo adequado para estimar a tensão, dada uma deformação conhecida.

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. Testes de tração foram conduzidos em temperaturas de 298°, 473°, 873°, e 1073° K. Após a obtenção dos resultados experimentais, 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. 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.

Nóbrega (2010) conduziu um trabalho completo que englobou a discussão e influência de parâmetros da máquina de teste e estratégias de controle de ensaio de tração. Ensaçou 48 corpos de prova, subdividindo os ensaios entre controle por velocidade do pistão e controle por taxa de deformação. A partir dos dados obtidos, geraram-se curvas tensão-deformação, que foram ajustadas a três modelos diferentes, dentre eles o modelo de Johnson-Cook.

Cadoni et al. (2012) conduziram ensaios de tração de aços avançados de alta resistência com diferentes taxas de deformação, motivados pelas aplicações em estruturas automotivas e capacidade de dissipação de energia. Utilizando materiais obtidos da fabricante FIAT, realizaram testes quase estáticos, de média e alta taxa de deformação. Analisaram a influência da temperatura nos testes quase-estáticos, ajustando os resultados ao modelo de Johnson-Cook.

Conclui-se que há uma variação de propriedades com a temperatura e que os materiais são moderadamente sensíveis a taxa de deformação. O modelo de Johnson-Cook (que será abordado no capítulo 2) possui uma boa correlação com os dados experimentais, representando um bom modelo de plasticidade para o estudo de aços aplicados na indústria automotiva. Além disso, este modelo tem sido largamente utilizado em vários trabalhos envolvendo aplicações numéricas e experimentais (BUGELLI, 2010).

## 1.2 MOTIVAÇÃO

Embora haja crescente preocupação com a segurança veicular, o número de acidentes no Brasil ainda é expressivo. Em 2017, ocorreram 89.396 acidentes segundo Ministério dos Transportes (2017), indicando que houve um aumento percentual do número de acidentes com vítimas em relação ao número total de acidentes. No ano de 2015, foram contabilizadas 62.219 vítimas (50,93% do total de acidentes), enquanto em 2017 foram registrados 58.716, que representa um percentual de 65,68% do total de acidentes. Isso indica a necessidade da evolução de veículos comercializados no quesito segurança, além da melhoria da infraestrutura viária e aumento de campanhas de conscientização de motoristas quanto à direção defensiva.

A simulação computacional de eventos de colisão veicular possibilita compreender a dinâmica do evento. Isto é importante no âmbito de prevenção de acidentes, bem como em pesquisa e desenvolvimento de veículos, já que se reduz o custo referente à ensaios de colisão reais no estágio inicial. Além disso, as simulações permitem uma otimização do desempenho da estrutura em colisões, contribuindo para o aumento da Segurança Veicular e, conseqüentemente a *crashworthiness* (incrementando a proteção aos ocupantes) (SPETHMANN; THOMKE; HERSTATT, 2006). É crucial garantir a qualidade da simulação, já que acarreta diretamente na relevância dos resultados: os parâmetros envolvidos e entradas (*inputs*) definem a eficácia em aproximar-se do evento real. As saídas da simulação (*outputs*) podem ser validadas por meio de dados obtidos experimentalmente.

Visando providenciar subsídios e discussões que permitam melhorar a qualidade da simulação computacional, o automóvel compacto considerado

nesse trabalho é um interessante objeto de estudo. Ele é, de acordo com o Latin NCAP, um dos veículos mais seguros de sua categoria, e foi o primeiro compacto a receber a nota máxima de cinco estrelas no teste o qual foi submetido. Ambas as qualificações cinco e quatro estrelas para passageiros adultos e crianças obtidas pelo veículo representam, em conjunto, a melhor combinação de resultados outorgados pelo Latin NCAP até então (LATIN NCAP, 2014). Além disso, é um veículo cujo volume de mercado é bastante significativo, por ser um projeto acessível economicamente: em seu primeiro ano de mercado, comercializou-se 59.894 unidades, tendo obtido o 14º lugar no ranking anual dos carros mais vendidos, acumulando mais de 200.000 unidades vendidas ao longo de cinco anos de vendas no mercado brasileiro (FENABRAVE..., 2019). Este veículo, cuja estrutura é objeto de estudo, será abordado de forma mais detalhada no capítulo 3.

### **1.3 OBJETO DE ESTUDO**

O chassi do veículo compacto considerado será o principal objeto de estudo, mais especificamente a modelagem do material das longarinas dianteiras.

### **1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Apresentam-se, a seguir, os objetivos geral e específicos deste trabalho.

#### **1.4.1 Objetivo geral**

Este trabalho busca medir os deslocamentos estruturais decorrentes do impacto e a comparação com a referência. Como complemento do estudo pós-crash, será apresentada a modelagem das longarinas dianteiras do veículo, utilizando o modelo de Johnson-Cook.

### 1.4.2 Objetivos específicos

A fim de atingir o objetivo geral do trabalho, alguns objetivos específicos deverão ser atendidos. São eles:

- Desmontagem da amostra recebida, preservando a estrutura do chassi monobloco e longarinas;
- Medição de pontos específicos da carroceria pós ensaio *crash test* frontal da estrutura do veículo, comparando-as à referência;
- Aprender e validar a metodologia de determinação das constantes utilizando aço 1020
- Retirada e ensaio de corpos de prova provenientes das longarinas frontais.
- Determinação dos coeficientes por meio da equação de Johnson-Cook.
- Fornecer os subsídios necessários para um estudo futuro em simulação numérica do pós-teste do veículo

## 2. O MODELO ELASTOPLÁSTICO DE JOHNSON-COOK

### 2.1 INTRODUÇÃO AO MODELO

O enfoque na redução de peso da estrutura de veículos, visando maior desempenho e menor consumo de combustível, é crescente. Porém, a redução de peso estrutural deve estar atrelada à uma evolução da segurança para os ocupantes no caso de acidentes. Para isso, a indústria automotiva utiliza uma nova geração de materiais. O uso de modelos visco-elastoplásticos é fundamental nesta indústria, já que permite estimar tensões em materiais a partir de modelos empíricos. Neste sentido, ensaios experimentais e métodos numéricos são de grande importância. Eles permitem a otimização dos projetos e do próprio processo de fabricação, removendo tentativas e reduzindo os erros em moldes e nos produtos finais (AMARAL et al., 2018). Desta forma, reduz-se os custos relacionados aos testes de materiais, tornando-se uma poderosa ferramenta para modelagem de estruturas. O modelo de Johnson–Cook é bastante utilizado em simulações visto que considera a taxa de deformação do material, como no caso de impactos (KIRANLI, 2009). Este modelo, explorado a seguir, será adotado neste trabalho.

Modelos visco-elastoplásticos buscam considerar a taxa de deformação, a fim de modelar o comportamento dos materiais com maior fidedignidade. A taxa de deformação, medida que representa a velocidade à qual o material se deforma, pode influenciar de forma significativa suas propriedades mecânicas. O aumento desta taxa provoca um aumento da resistência de metais, como o cobre (NÓBREGA, 2010). Neste sentido, é necessário realizar ensaios de tração em diversas taxas. Zhang *et al.* (2014) categorizou quatro principais taxas de deformação: quase-estática, baixa, média e alta. A tabela 1, a seguir, classifica as quatro taxas de deformação.

**Tabela 1.** Classificação das taxas de deformação.

<b>Taxa de deformação</b>	<b>Magnitude (s<sup>-1</sup>)</b>
<b>quase-estática</b>	$10^{-4} - 10^{-2}$
<b>baixa</b>	$10^{-2} - 10^{-1}$
<b>média</b>	$10^{-1} - 10^2$
<b>alta</b>	$10^2 - 10^4$

(fonte: ZHANG et al., 2014, adaptado).

O modelo de Johnson–Cook é um modelo empírico que considera os efeitos da deformação, da taxa de deformação e da temperatura. É amplamente empregado para modelagem de materiais utilizados na indústria automotiva em simulações numéricas envolvendo impacto (SMERD *et al.*, 2005). Trata-se de um modelo de falha que estabelece a deformação como uma função exponencial, assumindo que o dano é acumulado linearmente. Este modelo, representado pela equação (1) abaixo, é utilizado por diversos trabalhos (BUGELLI, 2010).

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

em que

$$T^* = \frac{(T - T_r)}{(T_M - T_r)} \quad (2)$$

Na equação 1, do modelo J-C, os três colchetes representam, em sequência, o efeito da deformação por encruamento, o efeito da taxa de deformação e o efeito da temperatura. A tensão, representada por  $\sigma$ , é uma função da deformação plástica efetiva ( $\varepsilon$ ). Neste modelo, A, B, n, C e m são constantes obtidas a partir dos ensaios de material. O parâmetro  $\dot{\varepsilon}_0$  representa

a taxa de deformação plástica de referência e  $T^*$  a forma homóloga da temperatura, definida pela equação 2. Neste último termo,  $T_r$  é a temperatura ambiente e  $T_M$  é a temperatura de fusão do material (MURUGESAN; JUNG, 2019).

## 2.2 DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES

O modelo J–C busca modelar o comportamento dos materiais no regime plástico. A efetividade do modelo em retratar o comportamento do material está fortemente associada com as constantes, A, B, n, C e m, que devem ser encontradas a partir de dados provenientes de ensaios de tração (retratados no tópico 2.3 deste trabalho). Em aplicações estruturais automotivas, em que não há grande variação de temperatura, pode-se considerar a temperatura como ambiente.

De acordo com os trabalhos de Murugesan e Jung (2019) e Yuxi *et al.* (2015), apresenta-se, a seguir, uma metodologia para determinação dos coeficientes da equação de J-C. A metodologia baseia-se nas curvas tensão/deformação do material, obtidas a partir de ensaios à diferentes taxas de deformação.

Em aplicações que não haja variação considerável de temperatura, a temperatura pode ser igualada a temperatura ambiente para efeitos de cálculo, então  $T = T_r$  :

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)] \quad (3)$$

Quando a taxa de deformação adotada é a mesma de referência,  $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0$  na equação 3. Portanto, simplifica-se a equação (1) ao primeiro termo:

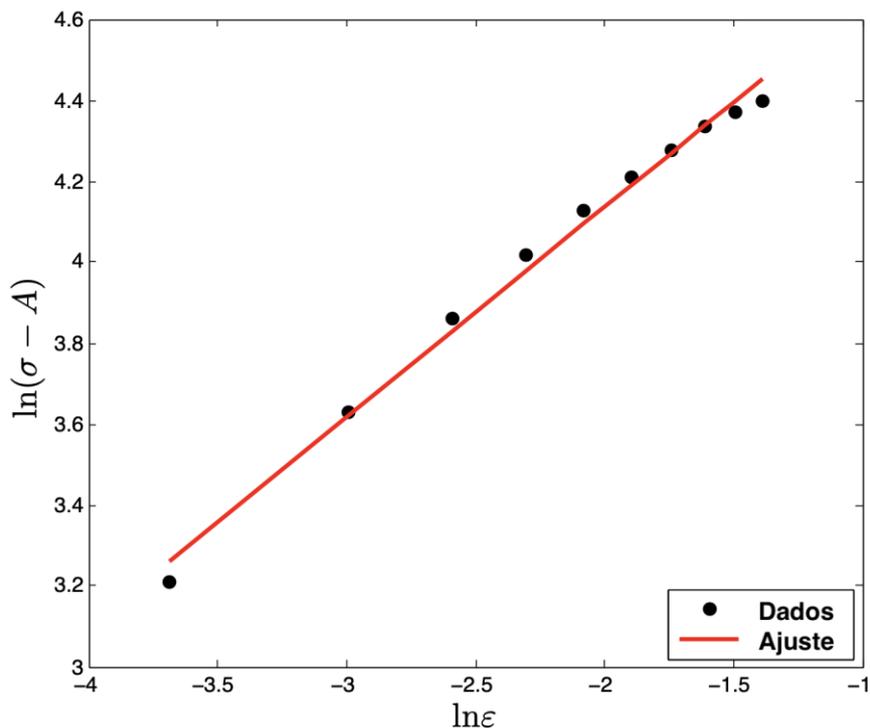
$$\sigma = A + B\varepsilon^n \quad (4)$$

A partir das curvas tensão-deformação obtidas em ensaios de tração quase 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:

$$\ln(\sigma - A) = \ln B + n \ln \varepsilon \quad (5)$$

Isto permite linearizar a relação entre  $\ln(\sigma - A)$  e  $\ln \varepsilon$ , possibilitando traçar um gráfico em forma de reta. 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). O procedimento será explicado detalhadamente no tópico 2.3.5. A figura 1, abaixo, ilustra este gráfico.



**Figura 1.** Relação entre  $\ln(\sigma - A)$  e  $\ln \varepsilon$  nas condições de referência.

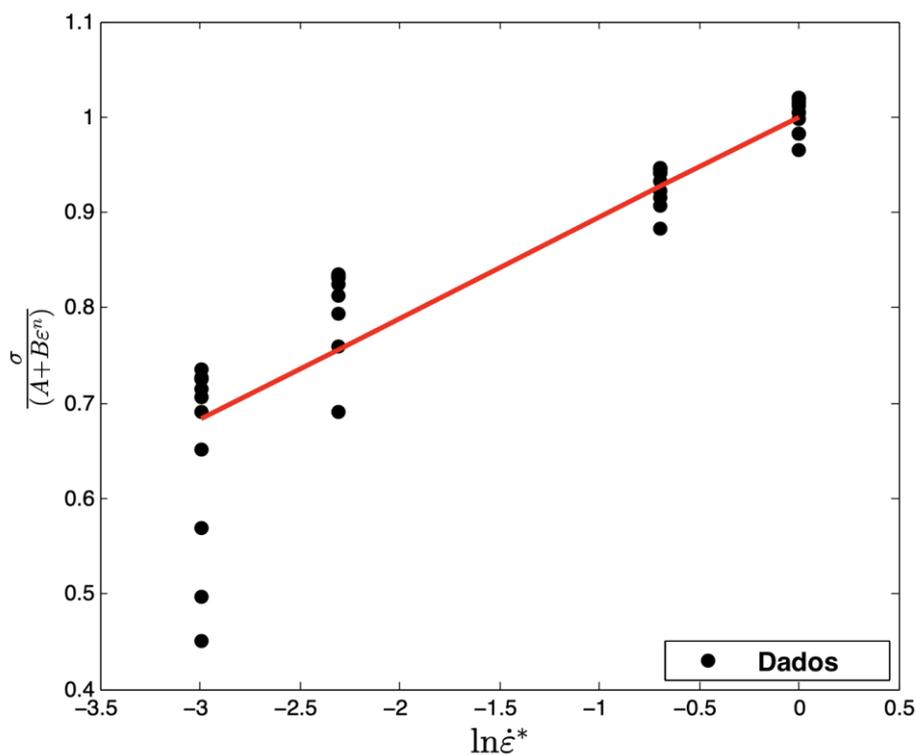
(fonte: MURUGESAN; JUNG, 2019, adaptado.)

A constante C indica a sensibilidade à taxa de deformação do material e está presente no segundo termo da equação original de J-C (equação 1). Para

determinar seu valor, a linearização da equação (3) também é possível. Tratando-se a equação 3:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})] \rightarrow \frac{\sigma}{A+B\varepsilon^n} = 1 + C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}) \quad (6)$$

Pode-se traçar um gráfico linear,  $\frac{\sigma}{A+B\varepsilon^n}$  vs  $\ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})$  (representado na figura 2). Com os valores de A, B e n encontrados anteriormente, substitui-se na equação (6). Por meio das curvas obtidas dos ensaios de tração realizados a taxas de deformação nominal diferentes da taxa de referência, obtêm-se C (inclinação da curva) (YUXI et al., 2015).



**Figura 2.** 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.)

## **2.3 ENSAIO DE TRAÇÃO**

### **2.3.1 Introdução**

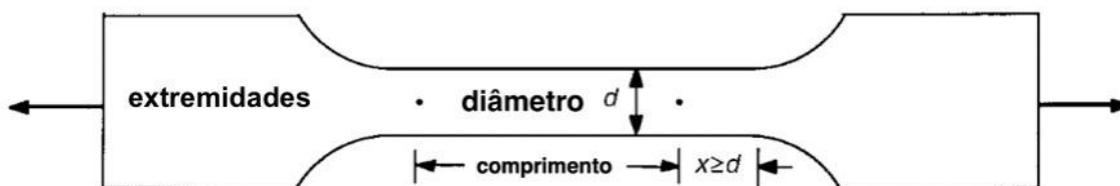
O ensaio de tração consiste em um teste destrutivo que fornece informações sobre propriedades do material, tais como resistência à tração, limite de elasticidade e ductilidade do material (no caso de metais). A força necessária para partir a espécime analisada é medida, assim como o alongamento até o ponto de ruptura. Estes ensaios produzem diagramas tensão-deformação utilizados para determinar o módulo de Young, relacionado com a rigidez do material (SABA; JAWAID; SULTAN, 2019).

Há diversas funções e motivações para a realização de ensaios de tração. Os resultados dos ensaios de tração são cruciais para a escolha de materiais em aplicações de engenharia. Propriedades reveladas por meio dos ensaios são utilizadas para comparar novos materiais e processos de fabricação e, quando escolhidos, para assegurar a qualidade do produto final (ASM INTERNATIONAL, 2004). No caso deste trabalho, o ensaio é indispensável para encontrar os coeficientes do modelo de Johnson-Cook. A indústria automotiva se beneficia dos testes mecânicos em componentes como a estrutura. O chassi de veículos modernos é produzido com vários materiais como alumínio e aços de alta resistência mecânica. A vantagem do teste de tração uniaxial para metais consiste no fato de possuírem uma alta homogeneidade e isotropia, permitindo avaliar grande parte de suas propriedades mecânicas. Por meio de propriedades como taxa de deformação no regime plástico ( $r$ ) e coeficiente de encruamento mecânico ( $n$ ), definem a conformabilidade do material, permitindo o desenvolvimento de novas fórmulas em que a perda de esta propriedade é mínima frente ao ganho de rigidez na estrutura automotiva (SPIRET, 2018).

### **2.3.2 Equipamento para realização do ensaio**

Para o ensaio em laboratório, o material deve possuir um padrão específico, que permita uma ruptura localizada (já que se trata de um ensaio destrutivo), otimizando os resultados do teste. Há diferentes modelos e variações de corpos de provas aceitos e válidos por normas para a realização dos ensaios.

A espécime padrão dos corpos de prova utilizada nos ensaios conduzidos por este trabalho está representada pela figura 3 abaixo. As extremidades alargadas otimizam a aderência com a máquina e sua secção transversal possui uma área reduzida. Isto é intencional: favorece a deformação e fratura nesta região (ASM INTERNATIONAL, 2004).



**Figura 3.** Espécime padrão de corpo de prova.

(fonte: ASM INTERNATIONAL, 2004, adaptado.)

Os corpos de prova são fixados na máquina para prosseguir o ensaio. Há várias formas de fixá-los: por meio de pinos, parafusos ou presos por garras. É crucial garantir que o espécime não se solte, quando ensaiado à máxima carga. Da mesma forma, deve-se evitar deslizamento ou empenamento da amostra durante o teste, o que pode influenciar os resultados.

O aparelho responsável por realizar o teste é primordial no produto final do ensaio de tração: o seu papel principal é traçar a curva tensão/deformação, que será descrita no próximo tópico. Existem diferentes tipos de máquinas, subdivididas em duas categorias de acordo com o método de aplicação de carga: eletromecânicas ou hidráulicas. As máquinas eletromecânicas baseiam-se em um motor elétrico cuja velocidade é variável e engrenagens de transmissão para tracionar o material. Já as hidráulicas, como a máquina que será utilizada neste trabalho, possuem um pistão de simples ou dupla ação para aplicar carga mecânica ao corpo de prova (ASM INTERNATIONAL, 2004). A figura 4 ilustra a máquina hidráulica Instron 8801, controlada por software, modelo utilizado no presente trabalho.



**Figura 4.** Máquina de ensaio de tração Instron 8801.

(fonte: INSTRON, 2016)

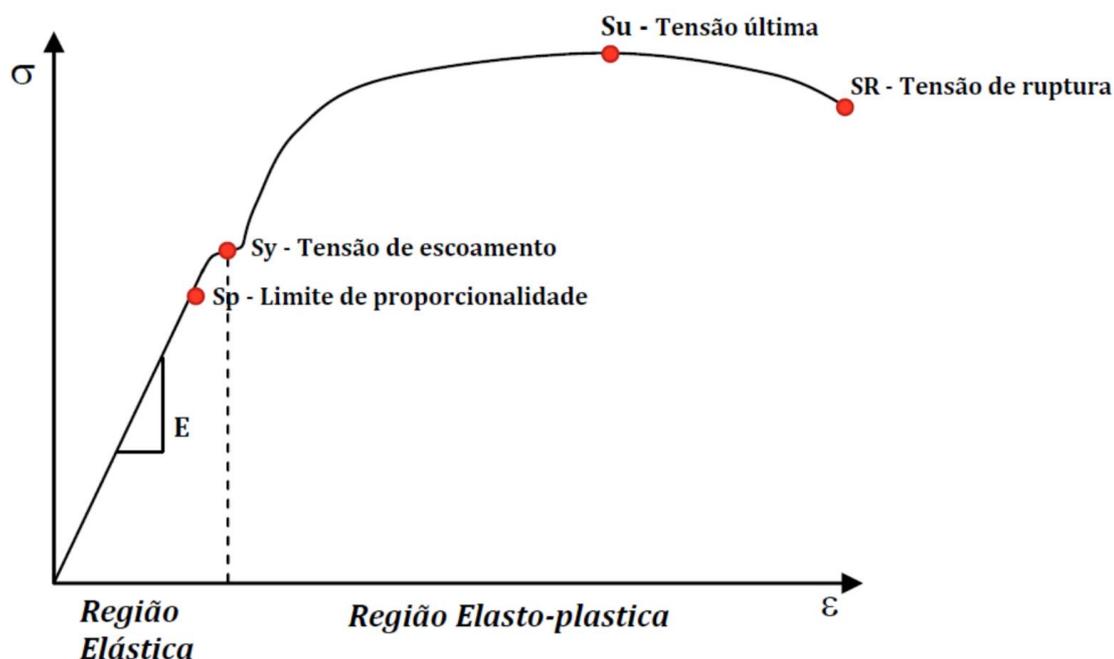
### 2.3.3 Resultado do ensaio

O resultado do ensaio de tração consiste no diagrama tensão/deformação que reflete o comportamento sob tensão do material analisado. Para muitos metais, tensionados em tração a baixos níveis, os parâmetros tensão e deformação são proporcionais entre si através da seguinte relação:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (7)$$

A equação acima é conhecida como Lei de Hook e a constante  $E$  representa o módulo de elasticidade ou módulo de Young. A faixa de

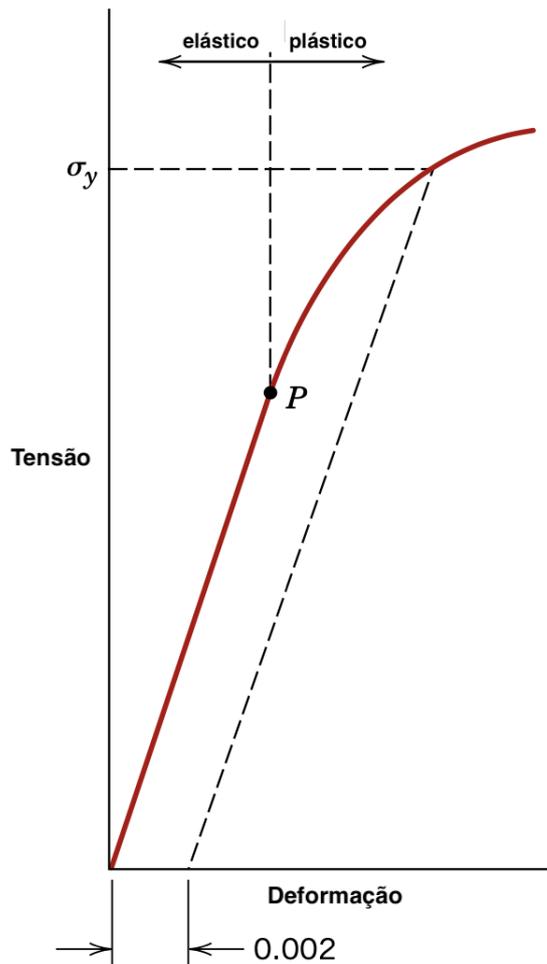
proporcionalidade é denominada deformação elástica e o gráfico de tensão (ordenada) versus deformação (abscissa) resulta numa correlação linear. A figura a seguir indica o gráfico gerado por um ensaio de tração padrão.



**Figura 5.** Curva tensão/deformação de ensaio de tração padrão.

(fonte: CALLISTER; RETHWISCH, 2010, adaptado).

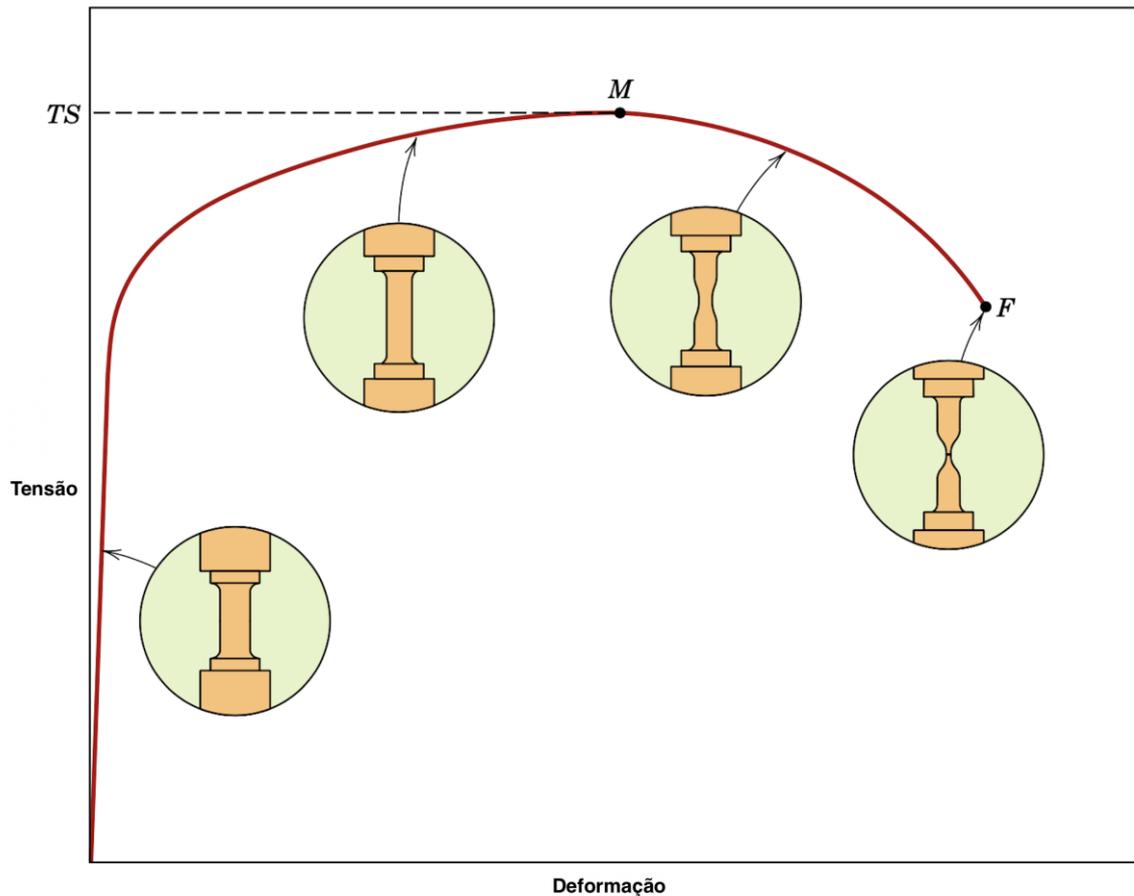
Em aplicações de Engenharia é necessário assegurar que ocorrerá apenas deformação elástica, quando uma tensão for aplicada. Neste sentido, deve-se conhecer o nível de tensão no qual ocorre o fenômeno do escoamento, iniciado no momento em que a deformação plástica (irreversível) começa. A fronteira entre a fração linear e não-linear da curva tensão/deformação é denominado limite proporcional (representada pelo ponto P na figura 6). Caso este ponto não seja bem definido, a convenção estabelece que uma reta deve ser traçada, paralelamente à parte linear do gráfico com um especificado desvio de deformação, normalmente 0,2%. O valor correspondente à interseção desta linha e a curva tensão-deformação na região plástica é definida como o limite convencional de escoamento (CALLISTER; RETHWISCH, 2010).



**Figura 6.** Transição entre deformação plástica e elástica do material.

(fonte: CALLISTER; RETHWISCH, 2010, adaptado).

A deformação plástica, que sucede o escoamento, acarretará a fratura do material. Em termos de tensão, é aumentada até um nível máximo (ponto M na figura 7) e decai até a fratura (ponto F na figura 7). O limite de resistência à tração é a máxima tensão na curva, representando o maior valor de tensão que pode ser suportada por uma estrutura em tração. Até este ponto, toda a deformação na amostra é uniforme. Ao receber a tensão máxima, porém, uma constrictão ou pescoço começa a se formar em algum ponto e toda subsequente deformação é confinada neste pescoço (fenômeno estricção ou *necking*). O comportamento físico da amostra ao longo de ambas as fases elásticas e plásticas é representado pelo esquema na figura a seguir.



**Figura 7.** Representação do comportamento físico da amostra ao longo da curva tensão/deformação.

(fonte: CALLISTER; RETHWISCH, 2010, adaptado).

As curvas e valores são dependentes das dimensões físicas da amostra (corpo de prova) utilizado no ensaio de tração. A fim de minimizar este efeito, carga e alongação são normalizadas, o que gera os parâmetros de tensão de Engenharia e deformação de Engenharia. A tensão de Engenharia é definida pela equação a seguir:

$$\sigma = F/A_0 \quad (8)$$

Em que F representa a carga instantânea aplicada perpendicularmente à seção reta da amostra, em unidade de libra-força (lbf) ou newtons (N) e  $A_0$  é a área da seção reta original anterior à aplicação de força, em unidade de polegada quadrada ( $\text{in}^2$ ) ou metro quadrado ( $\text{m}^2$ ) (CALLISTER; RETHWISCH, 2010).

Caso deseje-se utilizar estes dados para estimar o comportamento do material em outras formas de carregamento, é desejável traçar os gráficos em termos de tensão e deformação verdadeiras (ASM INTERNATIONAL, 2004). A Tensão verdadeira é definida como a carga  $F$  dividida pela área da seção reta instantânea  $A_i$  na qual a deformação está ocorrendo:

$$\sigma_T = F/A_i \quad (9)$$

Já a deformação verdadeira  $\varepsilon_T$  é definida por:

$$\varepsilon_T = \ln \frac{l_i}{l_0} \quad (10)$$

Não havendo variação de volume durante o processo de deformação

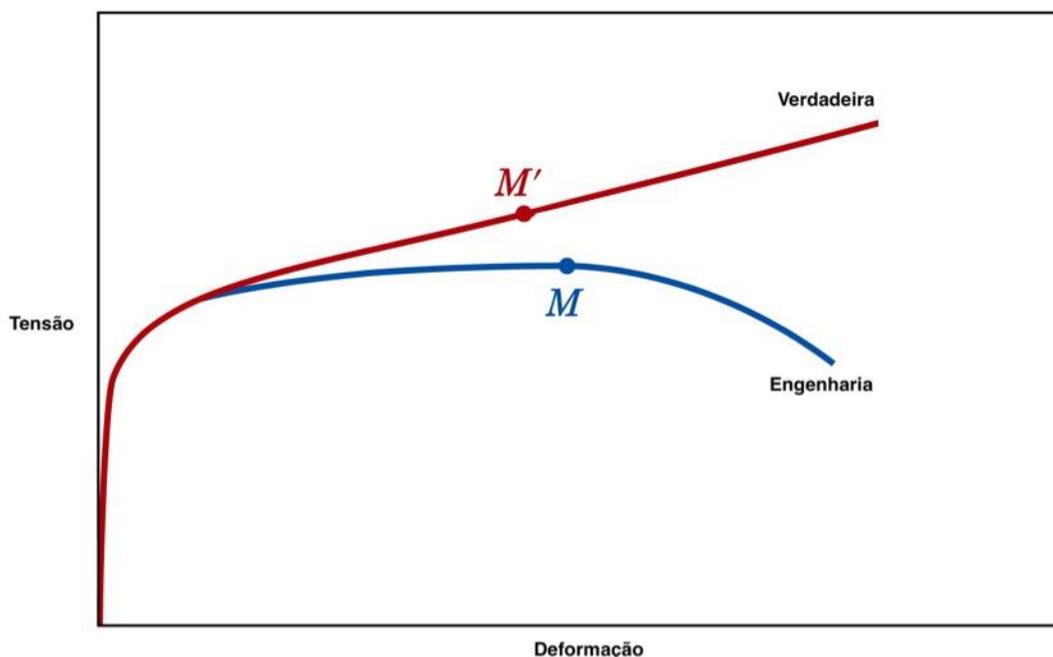
$$A_i l_i = A_0 l_0 \quad (11)$$

Os conceitos tensão verdadeira, tensão de engenharia, deformação verdadeira e deformação de engenharia relacionam-se por:

$$\sigma_T = \sigma (1 + \varepsilon) \quad (12)$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon) \quad (13)$$

A figura 8 indica uma comparação entre os comportamentos tensão/deformação de engenharia e verdadeiros. Verifica-se que a tensão verdadeira para sustentar a deformação crescente eleva-se além do ponto de tração  $M'$  (correspondente à  $M$  na curva de engenharia). O fenômeno de formação do pescoço coincide com um estado complexo de tensões: existência de outros componentes em adição à tensão axial.



**Figura 8.** Comparação entre os comportamentos tensão/deformação de engenharia e verdadeiros.

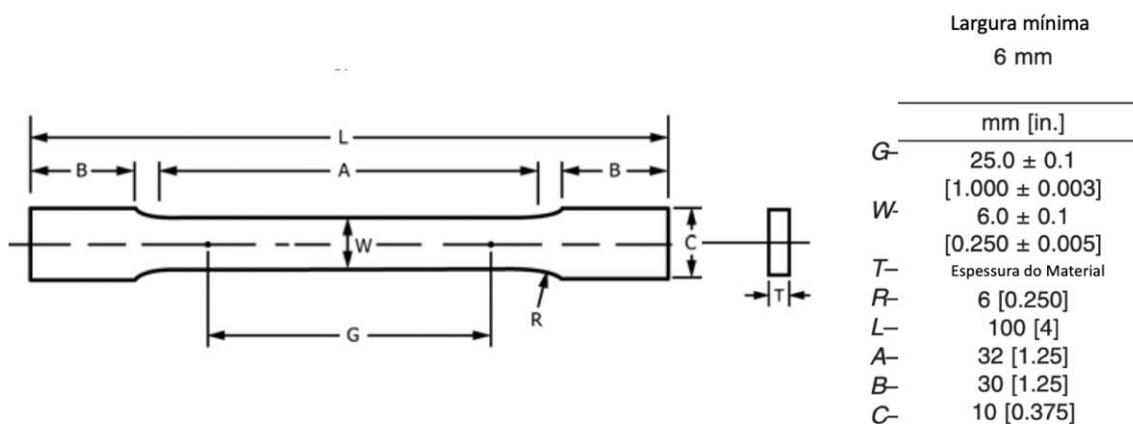
(fonte: CALLISTER; RETHWISCH, 2010, adaptado).

A partir dos dados obtidos com o ensaio de tração é possível ajustá-los à modelos de plasticidade que buscam antecipar o comportamento do material em situações diversas de temperatura e carga.

#### 2.3.4 Ensaios práticos utilizando aço 1020

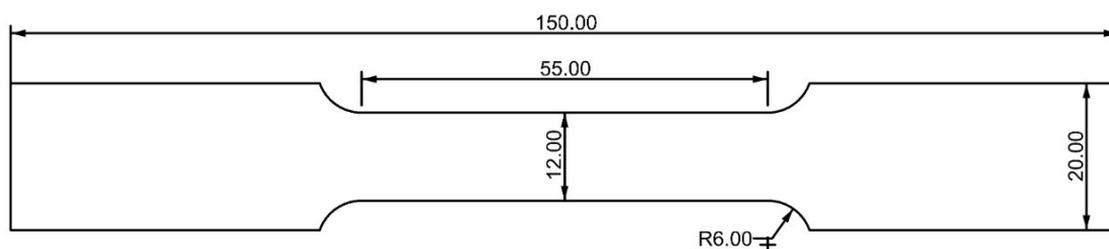
Os testes práticos de ensaio de tração, necessários à determinação dos coeficientes da equação de Johnson–Cook, foram conduzidos no laboratório de materiais do Campus Gama da Universidade de Brasília. Inicialmente foram confeccionados corpos de provas em Aço 1020, a fim de acumular experiência operacional com a máquina realizadora de teste. Foram fabricados doze corpos de provas baseados no corpo de prova de dimensões reduzidas utilizado no trabalho de Wang et al. (2017). Estes corpos de prova respeitam as medidas mínimas (dispostas por meio da figura 9) para um espécime reduzido conforme a norma E8/E8M (métodos de teste padrão para testes de tensão de materiais metálicos) (ASTM INTERNATIONAL, 2016). A figura 10 representa o desenho

técnico do corpo de prova, contendo as medidas, em milímetros, utilizadas no recorte das chapas.



**Figura 9.** Medidas mínimas para um espécime reduzido, modificado.

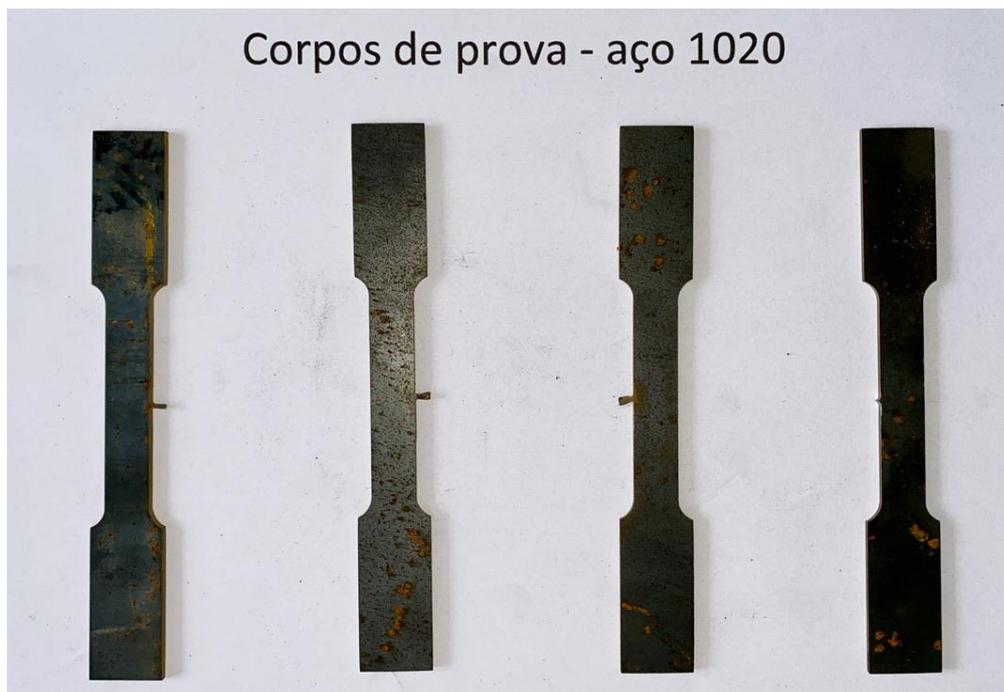
(fonte: ASTM INTERNATIONAL, 2016).



**Figura 10.** Desenho técnico do corpo de prova, contendo as medidas em milímetros. A espessura definida da chapa foi de 2mm.

(autoral)

Os espécimes em aço 1020 foram confeccionadas utilizando o processo de corte em jato d'água sob alta pressão. Este processo garante mínima alteração sobre as propriedades do material, dificultando alterações desta natureza no resultado final dos ensaios. A figura 11 ilustra os corpos de prova utilizados no ensaio.



**Figura 11.** *Corpos de prova em aço 1020.*

(autoral)

A máquina Instron 8801 foi empregada nos ensaios de tração deste trabalho. Trata-se de um equipamento servo hidráulico de atuação dupla, para ensaios de tração e testes de fadiga. A sua estrutura é formada por duas colunas estruturais e atuador na base inferior, o que garante uma maior rigidez ao equipamento. Dentre suas características técnicas, possui força máxima de atuação de 100 kN, 390 kN/mm de rigidez estrutural e curso de atuador de 150 mm (INSTRON, 2016). A figura 12 ilustra o equipamento utilizado, no ambiente do laboratório de materiais da Universidade de Brasília.



**Figura 12.** Equipamento servo hidráulico da marca Instron, modelo 8801 utilizado nos ensaios de tração.

(autoral)

Utilizando-se dos controles posicionados no corpo da máquina, posicionou-se corretamente o corpo de prova entre as garras do equipamento (ilustrado pela figura 13). Verificou-se, durante este processo, o alinhamento correto do corpo de prova, bem como o ajuste de pressão das garras fixadoras.

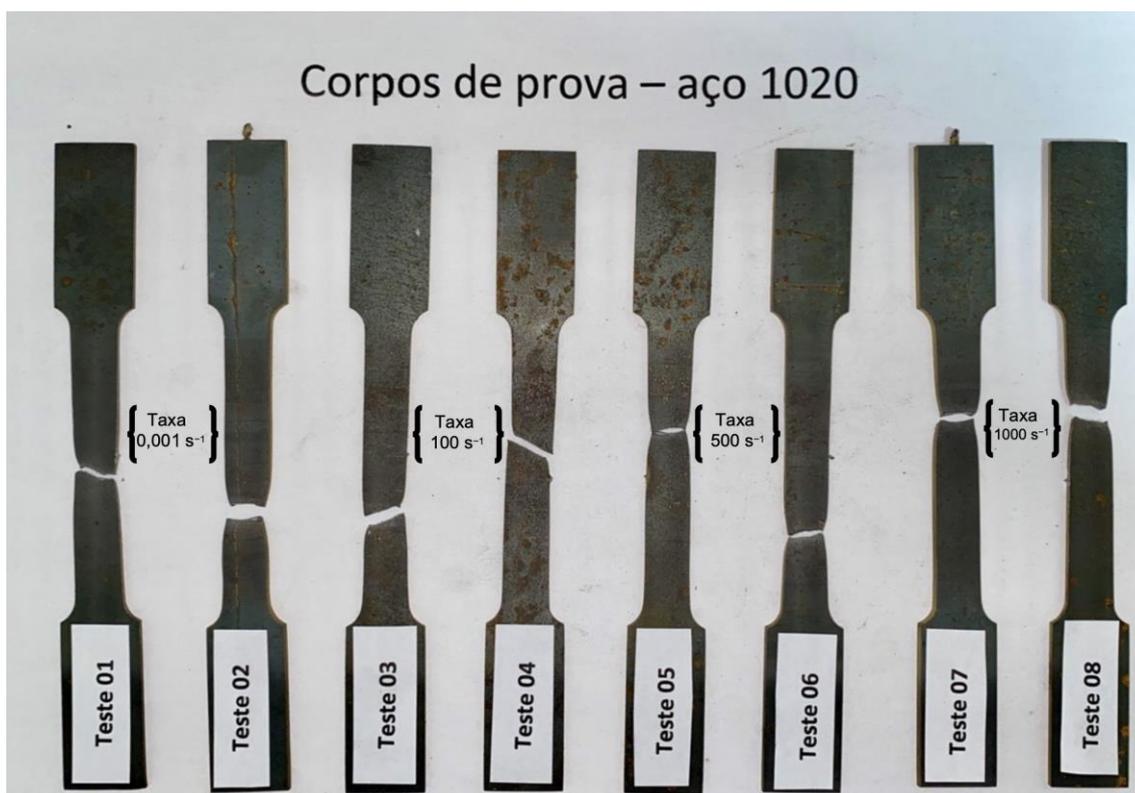


**Figura 13.** Corpo de prova de aço 1020 posicionado na Instron 8801, imediatamente antes da realização do ensaio.

(autoral)

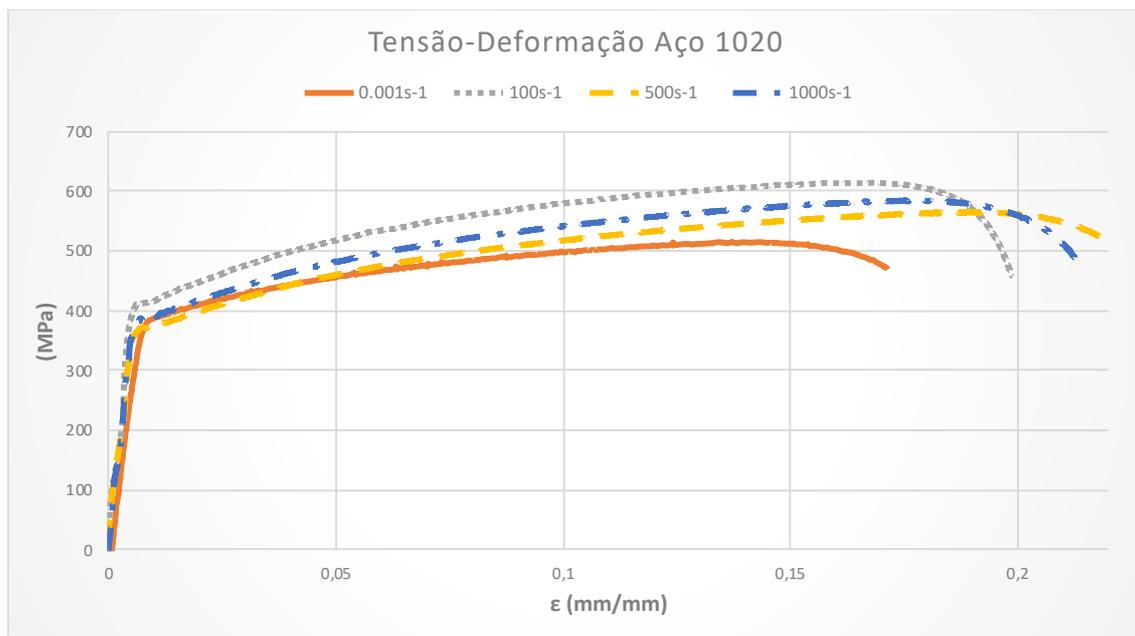
Após posicionamento correto do corpo de prova no equipamento, o computador equipado com software foi utilizado para definir as dimensões do corpo de prova, assim como a taxa de deformação. Visando encontrar os coeficientes para o modelo elastoplástico de Johnson-Cook (conforme explanado nos tópicos 2.1 e 2.2 deste trabalho), foi necessária a escolha de uma taxa de referência. Além disso, para determinar o coeficiente que indica a sensibilidade à taxa de deformação do material faz-se necessário o ensaio em diferentes taxas de deformação. Zhang et al. (2014) ensaiaram corpos de prova de alumínio 7075 com taxas de deformação quase estática ( $0,001 \text{ s}^{-1}$  e  $0,01 \text{ s}^{-1}$ ),

média ( $10 \text{ s}^{-1}$ ,  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $500 \text{ s}^{-1}$ ) e alta ( $1000 \text{ s}^{-1}$ ,  $1100 \text{ s}^{-1}$  e  $1200 \text{ s}^{-1}$ ). Utilizando a taxa de  $0,001 \text{ s}^{-1}$  como referência, obtiveram bom ajuste do modelo J-C. Para os ensaios deste trabalho, utilizou-se a mesma taxa de deformação de referência:  $0,001 \text{ s}^{-1}$ . É importante ressaltar que as taxas adotadas neste trabalho foram nominais, sem nenhum tipo de correção, tal como aplicado por Nóbrega (2010). Os corpos de prova estão representados na figura 14, após terem sido ensaiados. Foram ensaiados oito corpos de aço 1020 em quatro diferentes taxas, variando de quase estáticas a altas velocidades:  $0,001 \text{ s}^{-1}$  (testes 01 e 02 na figura abaixo),  $100 \text{ s}^{-1}$  (testes 03 e 04),  $500 \text{ s}^{-1}$  (testes 05 e 06) e  $1000 \text{ s}^{-1}$  (testes 07 e 08) (figura 14). A metodologia do ensaio resumiu-se a ensaiar dois corpos de prova para cada variação de taxa de deformação, a fim de garantir o posicionamento e funcionamento correto da máquina no primeiro teste e validar o segundo ensaio. Os resultados são apresentados pelo gráfico tensão-deformação (figura 15).



**Figura 14.** Corpos de prova em aço 1020, após ensaio de tração.

(autoral)



**Figura 15.** Gráfico tensão-deformação dos ensaios de tração do aço 1020, em diferentes taxas de deformação.

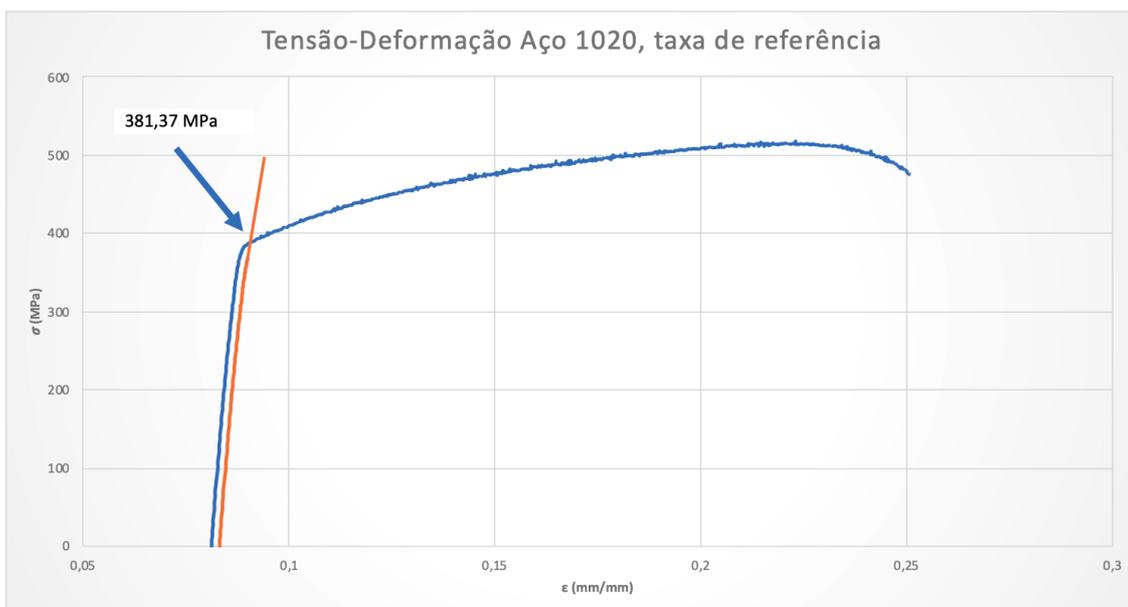
(autoral)

As curvas referentes às taxas de  $0,001 \text{ s}^{-1}$ ,  $500 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$  confirmam o aumento da tensão de escoamento com o aumento da taxa de deformação. De acordo com Nóbrega (2010), o acréscimo da tensão de escoamento é uma característica de cada material e só é possível obtê-la por meio dos testes dinâmicos de tração. O aumento observado, em torno de 5%, foi pequeno se comparado ao material analisado por Alves e Jones (2002). Estes autores encontraram um aumento de 80% entre as taxas de  $0,0004 \text{ s}^{-1}$  e  $208,8 \text{ s}^{-1}$  para um aço de baixo carbono, usado na indústria automobilística.

O ensaio à taxa intermediária de  $100 \text{ s}^{-1}$  resultou em um gráfico tensão-deformação cuja tensão de escoamento foi superior se comparada às demais taxas, contrapondo o que seria esperado: a tensão de escoamento deveria ter um valor intermediário entre as taxas de  $0,001 \text{ s}^{-1}$  e  $500 \text{ s}^{-1}$ . Analisando-se os corpos de prova após a realização do ensaio (figura 14), percebeu-se que os corpos ensaiados à taxa de  $100 \text{ s}^{-1}$  apresentaram uma fratura frágil, especialmente o corpo referente ao teste 04. A tensão de escoamento mais alta encontrada pode estar relacionada à fratura mais frágil, se comparada aos outros corpos de prova ensaiados à outras taxas.

### 2.3.5 Modelagem utilizando a equação de Johnson-Cook para o aço 1020

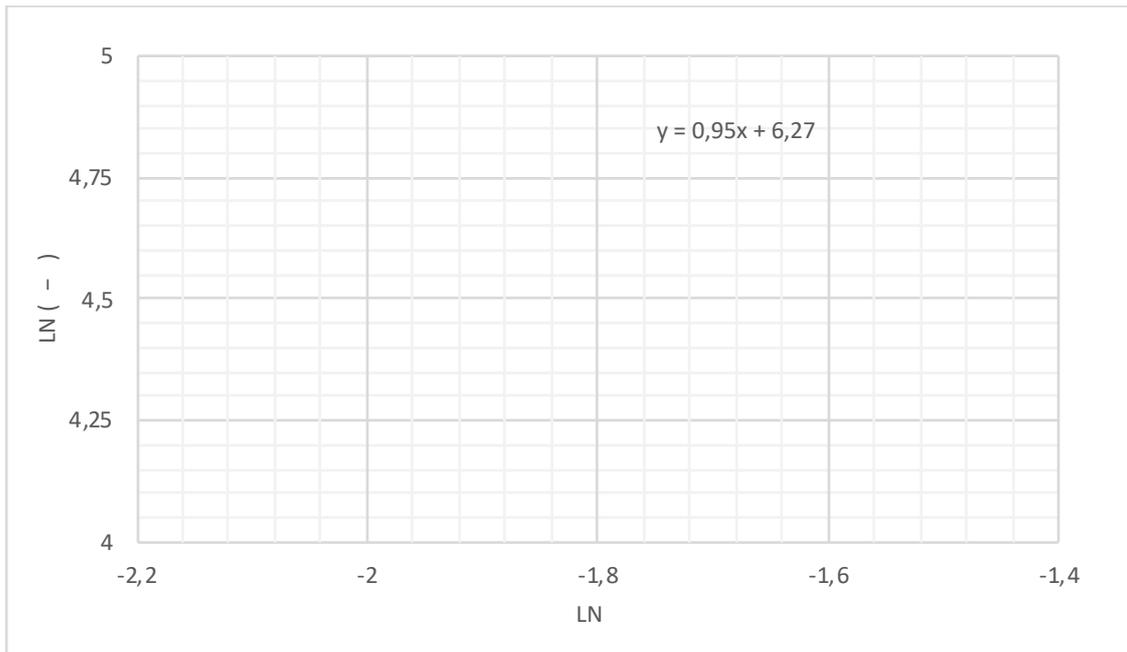
Traçadas as curvas tensão-deformação, fez-se possível encontrar os coeficientes do modelo de Johnson-Cook. Conforme descrito no tópico 2.1 deste trabalho, este modelo, quando ajustado, permite prever o comportamento do material na região plástica. A constante A pôde ser encontrada observando-se a tensão de escoamento do material. Para isso, construiu-se uma linha paralela à fase elástica do gráfico tensão-deformação, distando o valor absoluto de 0,002 conforme a convenção (ASM INTERNATIONAL, 2004). A tensão de escoamento encontrada foi de 381 MPa, conforme a figura 16 abaixo.



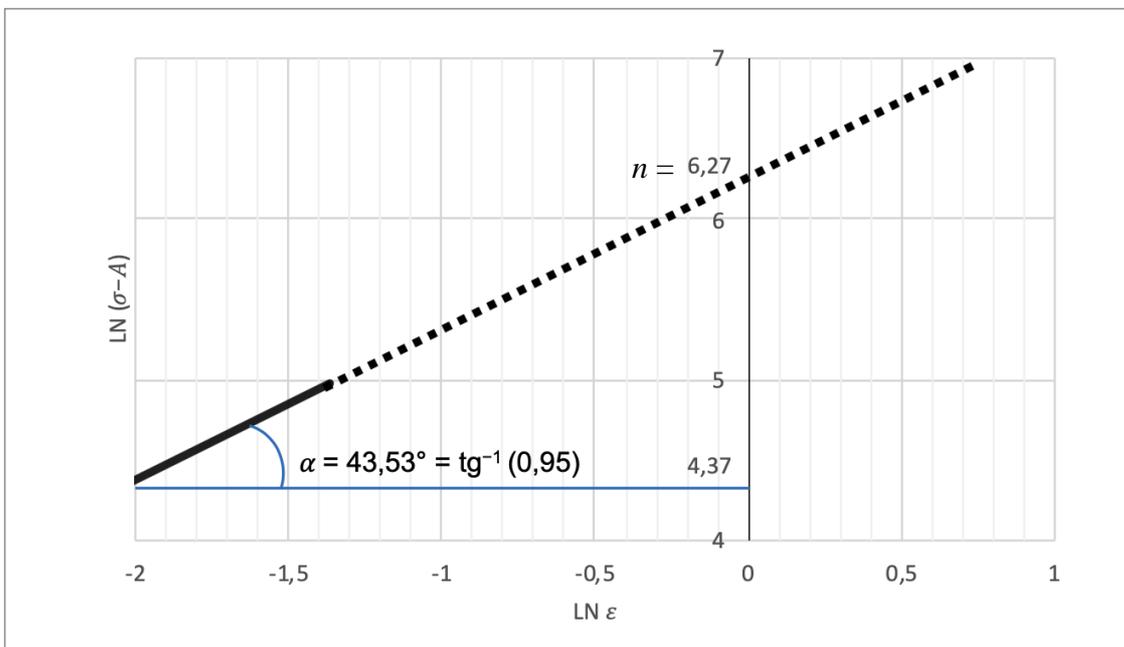
**Figura 16.** Gráfico tensão-deformação, na taxa de deformação de referência. A linha amarela indica o offset de 0,002.

(autoral)

Encontrado o valor de A (381 MPa), traçou-se o gráfico  $\ln(\sigma - A)$  vs  $\ln \epsilon$ , utilizando o ensaio conduzido sob a taxa de referência ( $0,001 \text{ s}^{-1}$ ). Por meio da linearização, identificou-se a reta (ilustrada na cor preta na figura abaixo) cujos coeficientes permitiram encontrar os valores das constantes B e n.



(a)



(b)

**Figura 17.** Gráfico  $\ln(\sigma - A) - \ln \varepsilon$ . (a) Escala negativa. (b) Reta ajustada, visando indicar o termo independente (6,27) e a inclinação da reta (0,95).

(autoral)

A constante  $n$  é a própria inclinação da reta ajustada:

$$\tan = \frac{\text{cat. oposto}}{\text{cat. adjacente}} = \frac{(6,27 - 4,37)}{(0 - (-2))}$$

$$\tan = 0,95 = n$$

Para encontrar  $B$ , temos:

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

$$y = 6,27 + 0,95x$$

$$\ln B = 6,27 \rightarrow B \sim 530 \text{ MPa}$$

Encontrados os valores de  $A$ ,  $B$  e  $n$ , traçou-se a reta  $\frac{\sigma}{A+B\varepsilon^n}$  vs  $\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)$  conforme o tópico 2.2. Substituí-se os valores encontrados:

$$\frac{\sigma}{381 + 530\varepsilon^{0,95}}$$

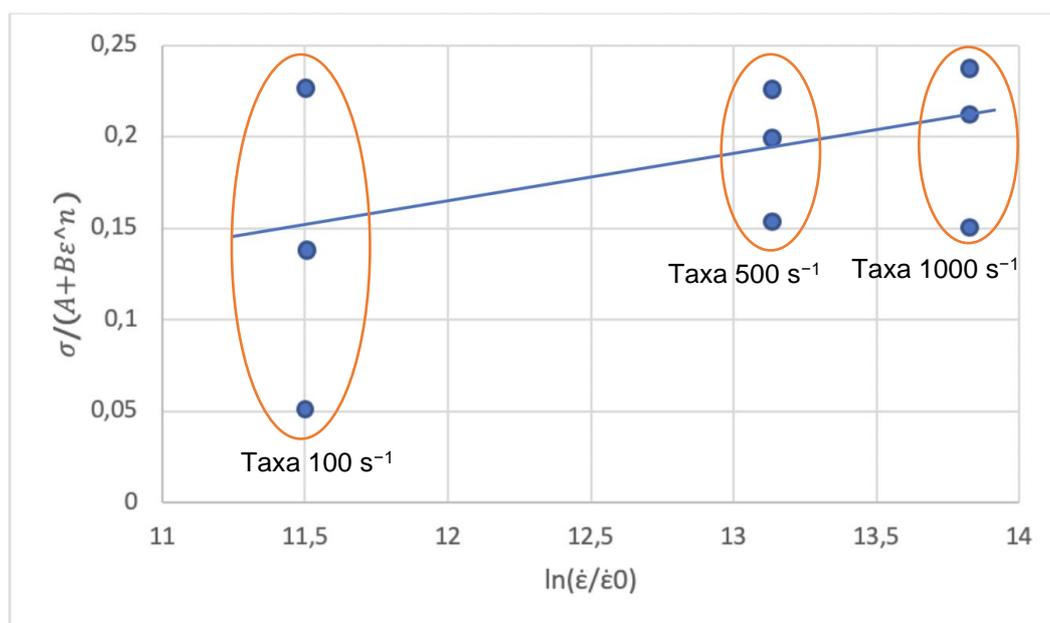
A partir deste coeficiente, os valores de tensão ( $\sigma$ ) e deformação ( $\varepsilon$ ) são substituídos com os resultados referentes aos ensaios de tração realizados à taxa de deformação de  $100 \text{ s}^{-1}$ ,  $500 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$ . Para cada uma das taxas, o termo  $\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)$  é alterado:  $\ln\left(\frac{100}{0,001}\right)$  para a taxa de  $100 \text{ s}^{-1}$ ,  $\ln\left(\frac{500}{0,001}\right)$  para a taxa de  $500 \text{ s}^{-1}$  e  $\ln\left(\frac{1000}{0,001}\right)$  para a taxa de  $1000 \text{ s}^{-1}$ . É importante notar que a taxa de  $0,001 \text{ s}^{-1}$ , utilizada como referência, não é empregada para encontrar a constante  $C$ . Para cada uma das taxas de deformação, escolheu-se três valores a fim de ilustrar este procedimento. O procedimento para traçar a reta é ilustrado pela tabela e pela figura, dispostas a seguir.

**Tabela 2.** Valores extraídos dos ensaios a cada uma das taxas, para ilustrar a confecção do gráfico.

	Valor de tensão ( $\sigma$ )	Valor de deformação ( $\epsilon$ )	Coefficiente $\frac{\sigma}{A+B\epsilon^n}$	Coefficiente $\ln\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)$
<b>Taxa 100 s<sup>-1</sup></b>	444,812	0,073	0,047	11,513
	502,227	0,095	0,147	11,513
	606,995	0,196	0,229	11,513
<b>Taxa 500 s<sup>-1</sup></b>	443,921	0,003	0,159	13,122
	475,793	0,023	0,202	13,122
	560,981	0,133	0,222	13,122
<b>Taxa 1000 s<sup>-1</sup></b>	464,904	0,037	0,151	13,816
	510,497	0,067	0,211	13,816
	570,449	0,137	0,237	13,816

(autoral)

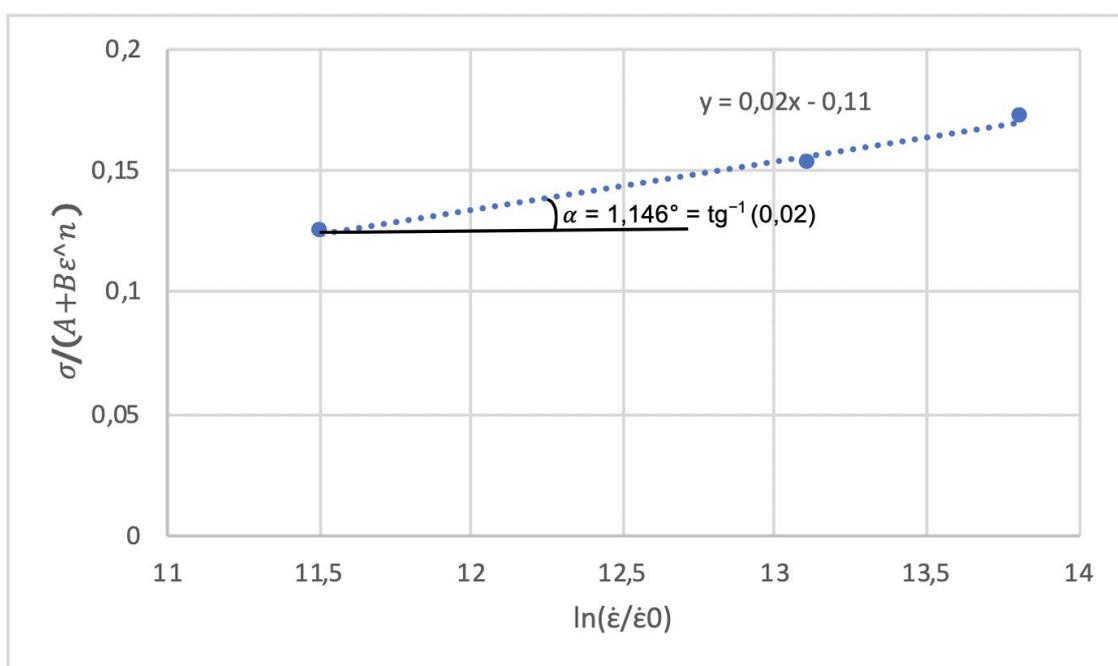
Para cada um dos valores, calculou-se o coeficiente  $\frac{\sigma}{A+B\epsilon^n}$  (quarta coluna na tabela, da esquerda para a direita). A partir dos valores calculados, traçou-se a reta representada na figura 18 abaixo, por meio da regressão linear de primeira ordem, utilizando o Método dos Mínimos Quadrados.



**Figura 18.** Reta criada utilizando os dados provenientes da Tabela 2, visando indicar o procedimento para encontrar a constante C.

(autoral)

A fim de facilitar a visualização, concentrou-se os dados calculados em três pontos principais, que representam as médias dos valores referentes a cada uma das taxas. Conduziu-se este cálculo da mesma forma feita para a figura 17 (b). A reta, cuja inclinação indica o coeficiente C, está representada na figura abaixo.



**Figura 19.** Gráfico  $\frac{\sigma}{A+B\epsilon^n} - \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)$ . O valor da constante C é igual à inclinação da reta.

(autoral)

A tabela abaixo aponta as constantes da equação de J-C encontradas.

**Tabela 3.** Constantes da equação de J-C encontradas para o material aço 1020.

Constantes do modelo de Johnson-Cook			
A	B	C	n
381 MPa	530 MPa	0,02	0,95

(autoral)

Estas constantes estão próximas à valores encontrados no trabalho de Brar, Joshi e Harris (2007). Os autores encontraram os valores de 367 MPa para a constante A, 0,935 para n, 700 MPa para B e 0,045 para C utilizando um aço 1010.

Afirma-se, no artigo, que o resultado é comparável com aços de baixo teor de carbono, dentre eles o aço 1020.

Validadas as condições de ensaio do laboratório de materiais da Universidade de Brasília e constatado o correto funcionamento do equipamento Instron 8801, foi possível prosseguir com o desmonte do veículo compacto cedido pela Latin NCAP. Este processo, que será relatado em detalhes no capítulo 5, permitiu a retirada da longarina e posterior produção dos corpos de prova a partir deste elemento.

### 3. O VOLKSWAGEN UP!

Apresentam-se, a seguir, detalhes a respeito do veículo cuja estrutura é o objeto de análise deste trabalho: o Volkswagen *Up!*. São explicitadas características, segurança do modelo e pontos relevantes à nível de contextualização.

#### 3.1 INTRODUÇÃO AO VOLKSWAGEN UP!

O Volkswagen *Up!* (Figura 20) é um veículo compacto urbano, apresentado no *International Motor Show Germany*, em 2011, salão de veículos comerciais de Frankfurt (Alemanha) (AUTOCAR, 2011). Sua produção foi iniciada em dezembro de 2011, para venda comercial no mercado europeu ao consumidor final. Em fevereiro de 2014, a Volkswagen introduziu uma versão do *Up!* para o mercado da América Latina. Ele difere-se do modelo europeu devido à um maior porta-malas, aumentando de 221 litros de capacidade para 285 litros, que resulta em um maior comprimento total, chegando a 3,6 metros (aumento de 6,5 centímetros). Além disso, o modelo recebeu uma tampa traseira redesenhada (que difere da tampa de vidro do modelo europeu), um maior tanque de combustível e uma suspensão 20 milímetros mais alta se comparada ao modelo europeu (VOLKSWAGEN DO BRASIL, 2014). Todas essas medidas visam adequar melhor o *Up!* às estradas brasileiras, aperfeiçoar a sua reparabilidade e torná-lo mais versátil. No continente europeu, o Volkswagen foi projetado para ser um carro prioritariamente urbano (*city car*). Na América Latina (e, em especial, no Brasil), o veículo deve atender, também, viagens interurbanas, devido à maior extensão territorial e ao fator socioeconômico, que limita as famílias a terem um veículo apenas para as finalidades diversas. Neste sentido, medidas como o maior tanque de combustível e um maior porta-malas auxiliam na adaptação do modelo e adequação ao uso dos consumidores locais.



**Figura 20.** Volkswagen Up! na versão comercializada na América Latina.

(fonte: VOLKSWAGEN, 2014)

### 3.2 SEGURANÇA DO MODELO

O veículo *Up!* comercializado na América Latina é considerado seguro, de acordo com dois testes conduzidos pelo instituto Latin NCAP. Em 2013, o veículo tornou-se o primeiro modelo produzido no Brasil a obter a avaliação máxima no teste de colisão frontal para ocupantes adultos. Testou-se um exemplar de Volkswagen Up! que recebeu a nota de 15.86 (de um máximo de 17.00) para a proteção de ocupantes adultos e 39.54 (de um máximo de 49.00) para a proteção de crianças (LATIN NCAP, 2014). Isso gerou uma nota de cinco estrelas para proteção de adultos e quatro para a proteção de crianças. Em 2015, por razões de auditoria, testou-se novamente um exemplar (utilizado para as análises deste trabalho), que obteve as notas de 16,03 pontos e 40,00 pontos para adultos e crianças, respectivamente (LATIN NCAP, 2015). A metodologia destes ensaios está relatada de forma detalhada no Capítulo 4.

Os bons resultados do Volkswagen *Up!*, nas análises de *crash test*, indicam um elevado padrão de segurança entre os carros compactos, bem acima da média de outros veículos da mesma categoria testados. Além de possuir *airbag* duplo frontal (motorista e passageiro), o modelo apresenta uma estrutura

de deformação programável, formada por aços de média, alta e ultra alta resistência. A deformação programada e previamente calculada no projeto da estrutura veicular é responsável por absorver parte da força de impacto e dissipar a energia do choque, preservando os ocupantes. Materiais com maior capacidade de dissipação são empregados nas longarinas e no *crashbox*<sup>2</sup> enquanto materiais rígidos são aplicados na célula do habitáculo, para casos de choques violentos.

A estrutura do *Up!* é composta de 75% (em massa) de aços formados a quente, de média, alta e ultra alta resistência mecânica. Definem-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). Os aços produzidos a quente possuem resistência ainda maior: 1300 MPa e representam 7,8% da composição estrutural da carroceria do *Up!*. (VOLKSWAGEN DO BRASIL, 2014). Nas Figuras 21 e 22, pode-se observar a variedade de tipos de aço aliada à aplicação localizada que permitiu o desenvolvimento de um chassi monobloco seguro, rígido e leve. Isto indica as características evidenciadas por um projeto moderno, que se utiliza da ciência dos materiais para aprimorar a segurança estrutural e a dissipação de energia em colisões.

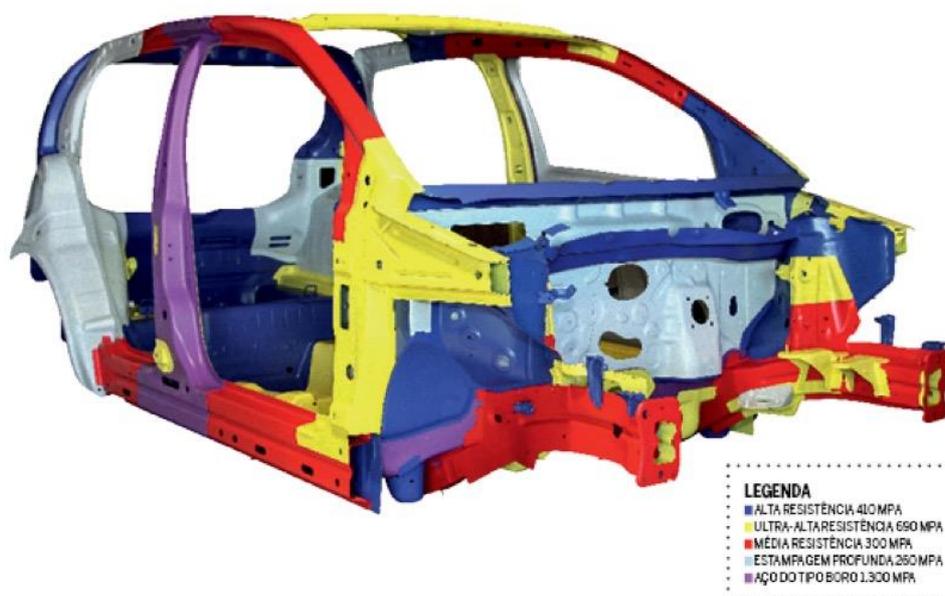
---

<sup>2</sup> Estrutura posicionada nas extremidades dianteira e/ou traseira de um automóvel, para absorver parte da energia do impacto resultante de uma colisão em baixa velocidade.



**Figura 21.** Representação do Volkswagen Up! e dos diversos tipos de aço que o compõe.

(fonte: VOLKSWAGEN DO BRASIL, 2014)



**Figura 22.** Chassi do Volkswagen Up! evidenciando os aços de diferentes propriedades mecânicas.

(fonte: CABRAL, 2014)

Comparando-se as Figura 23 e 24, a seguir, observa-se, visualmente, a semelhança entre o veículo testado em laboratório pelo instituto Latin NCAP e automóveis que sofreram acidentes reais de colisão frontal em autoestradas no Brasil. Lie e Tingvall (2002) encontraram uma correlação entre as pontuações

do Euro NCAP e o risco de lesões graves e fatais, indicando a fidedignidade dos *crash tests* conduzidos em laboratório em retratar acidentes reais.



**Figura 23.** Volkswagen Up! após teste de colisão frontal realizado em laboratório, modelo exato utilizado por este trabalho.

(fonte: ANDRADE, 2015)



**Figura 24.** Figuras (a) e (b). Fotos de colisões frontais reais envolvendo Volkswagen Up! em autoestradas brasileiras.

(fontes: I7 NOTÍCIAS, 2018 e GAZETA ONLINE, 2017)

## 4. O ENSAIO DE COLISÃO FRONTAL

A seguir, apresentam-se os aspectos relativos ao ensaio de colisão frontal, destacando-se, especialmente, os procedimentos do ensaio. Estes procedimentos são adotados nos ensaios do Euro NCAP e em programas derivados, como o Latin NCAP.

### 4.1 PANORAMA HISTÓRICO

Ensaio para assegurar a segurança do veículo começaram a ser desenvolvidos no início da década de 1970, no continente europeu por meio da *European Experimental Vehicles Committee* (EEVC), em uma colaboração de governos interessados em avaliar a segurança veicular. O primeiro ensaio de colisão frontal foi implementado em 1979 com o advento da NCAP pela NHTSA, a agência responsável pela segurança nas estradas dos Estados Unidos. Já na década de 1990, criou-se a Euro NCAP, baseada nos protocolos EEVC previamente desenvolvidos (RATINGEN, 2016). A partir daí, procedimentos e normas foram criados e evoluíram, conforme novos governos e montadoras apoiaram a iniciativa, mostrando-se um agente promissor para incrementar a segurança dos ocupantes em eventuais acidentes reais.

Estudos indicam a correlação dos ensaios realizados em laboratórios normativos e acidentes reais, demonstrando a sua importância. Lie e Tingvall (2002) encontraram, de forma geral, uma correlação entre as notas (de zero a cinco estrelas) cedidas pelo instituto Euro NCAP e eventos reais. Os autores encontraram uma média de 12% de redução de risco para ocorrência de ferimentos severos e fatais para cada estrela adicional na composição da nota. Quanto maior a nota outorgada, menor a probabilidade de ocupantes sofrerem danos severos e fatais. Kullgren et al. (2010) analisou, em seu trabalho, estatística de acidentes para concluir que há uma boa correlação entre os ensaios Euro NCAP e dados provenientes de acidentes reais. A eficácia em avaliar a segurança veicular de forma que reflita a realidade encoraja montadoras e fabricantes a tomar medidas para aprimorar os níveis de segurança em seus produtos. Disponibilizando os resultados dos testes ao

consumidor final, outros programas que seguem a vertente do Euro NCAP foram idealizados em outras regiões do mundo. Dentre eles, o Latin NCAP (detalhado no tópico a seguir) foi criado, o programa que efetuou o ensaio *crash test* do objeto de estudo deste trabalho.

## 4.2 LATIN NCAP

Apesar do Euro NCAP ter contribuído para o aumento da segurança nos modelos de veículos, montadoras de veículos continuam, em outras partes do mundo, a vender veículos que seriam, caso fossem testados, classificados como inseguros (nota zero) por esse instituto. Visando oferecer ao consumidor da América Latina e Caribe informação independente acerca da segurança dos automóveis comercializados nesse mercado, surge, em 2010, o Latin NCAP.

Baseada na metodologia do Euro NCAP, o Latin NCAP possui três objetivos principais:

- Oferecer informação imparcial e independente acerca da segurança de veículos novos comercializados na América Latina e Caribe;
- Encorajar montadoras a tornar mais seguros os veículos oferecidos nos mercados da América Latina e Caribe; e
- Encorajar governos latino americanos e caribenhos a implementar normas relativos ao desempenho de veículos de passeio submetidos a *crash tests*.

Para atingir esse objetivo, são realizados testes de impacto frontal e lateral, outorgando uma nota em uma escala de 0 a 5 estrelas. Isto difere do teste europeu, já que para outorgar uma nota acerca da segurança de um modelo, são estabelecidos cinco testes diferentes: testes de impactos frontal, lateral contra poste, efeito chicote e impacto contra pedestres. É importante destacar, também, que os modelos escolhidos pelo Latin NCAP são os modelos mais básicos da linha (em relação a itens de segurança). De acordo com Furas e Sandner (2012), foram recebidos comentários de consumidores finais

ressaltando o valor extra dos opcionais de segurança, como *airbags*, o que se torna um problema para os mercados emergentes.

Estudos mostram o impacto positivo da criação do Latin NCAP e a influência tanto na redução de acidentes quanto na formação de opinião dos consumidores ao escolherem os veículos. Lloyd et al. (2017) estimou o efeito da introdução do programa NCAP no mercado brasileiro tomando-se com base o impacto da implantação do Euro NCAP no mercado britânico. Estes autores estimaram que, com o advento do Latin NCAP e a consequente evolução da segurança veicular no mercado brasileiro, poderão ser evitadas de 12.500 a 34.200 fatalidades entre 2015 e 2030. Os autores creditam estes números à uma maior regulamentação e pressão dos consumidores, que resulta em um constante incremento no nível de segurança dos automóveis vendidos. Domingues e Lucinda (2018) buscaram investigar a relevância da informação acerca da segurança veicular disponibilizada pelo Latin NCAP para consumidores. Utilizando um modelo empírico e revisão vasta da literatura em seu trabalho, concluíram que a informação sobre segurança é relevante para a escolha do consumidor final. Isso demonstra a inserção do Latin NCAP no contexto da indústria automotiva no mercado nacional e indica o progressivo estabelecimento do programa como referência na área de avaliação de segurança veicular para a América Latina e Caribe.

#### **4.3 PROCEDIMENTO DO ENSAIO**

Nos itens a seguir, destacam-se os seguintes detalhes a respeito do procedimento do ensaio: preparação do veículo, área frontal do impacto e dinâmica do teste. A metodologia foi retirada do protocolo utilizado para realizar o teste do Volkswagen *Up!* em 19 de fevereiro de 2015: *ASSESSMENT PROTOCOL – ADULT OCCUPANT PROTECTION* (Protocolo de Avaliação - Proteção do Ocupante Adulto) (LATIN AMERICAN & CARRIBEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME, 2013). Este protocolo, baseado no documento de mesmo nome utilizado pelo Euro NCAP é relatado neste trabalho, juntamente com outros três documentos, relevantes para o ensaio de colisão frontal realizado:

- *CAR SPECIFICATION, SPONSORSHIP, TESTING AND RETESTING PROTOCOL* (Especificação do Carro, Patrocínio, Protocolo De Teste e Teste Duplicado) (EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME, 2006);
- *OFFSET DEFORMABLE BARRIER FRONTAL IMPACT TESTING PROTOCOL* (Protocolo de Testes Frontais de Impacto contra Barreira Deformável) (EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME, 2015); e
- *Agreement Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions. Addendum 93: Regulation No. 94.* (Acordo Relativo À Adoção De Prescrições Técnicas Uniformes Para Veículos Com Rodas, Equipamento e Peças que Possam Ser Instalados e/ou Utilizados em Veículos com Rodas e as Condições para Reconhecimento Recíproco de Homologações Concedidas com Base Nestas Prescrições. Adendo 93: Regulamento No. 94.) (UNITED NATIONS, 2013)

#### **4.3.1 Preparação do veículo**

Para a preparação do veículo a ser ensaiado, são utilizados procedimentos padrões, definidos no Protocolo de Testes Frontais de Impacto contra Barreira Deformável (EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME, 2015). De acordo com o documento, retira-se todo o combustível do tanque e completa-se com água. Utiliza-se a densidade da gasolina como parâmetro para completar seu volume, de acordo com o manual do veículo e respeitando a medida pré-determinada de 90% da capacidade total. Isto evita possíveis acidentes relacionados com a propriedade inflamável dos combustíveis. Após isso, todos os fluidos do carro (como o óleo do motor) são drenados (e substituídos por água) e a pressão dos pneus é verificada de acordo com as especificações recomendadas pelo fabricante. Retiram-se todos os objetos do veículo e o estepe. O ácido presente na bateria do veículo é drenado ou substitui-se por uma bateria adicional. Caso não seja possível a substituição, é necessário que o teste seja concluído dentro de quinze minutos (EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME, 2015). Estes cuidados são

necessários para evitar alterações no sistema elétrico do veículo, em especial no acionamento dos *airbags*. Após todos os procedimentos e checagens executados, são posicionados nos assentos dianteiros dois *dummies* (manequins), de acordo com os parâmetros ditados pelo protocolo. O manequim *Hybrid III* percentil 50% empregado no ensaio representa um homem adulto de estatura média e é amplamente usado em colisão frontal e testes de segurança automotiva (NHTSA, 2010). São posicionados, também, dois manequins, Q1.5 e Q3, representando crianças de 18 meses e três anos de idade, respectivamente. Uma nota avulsa é outorgada para representar o nível de proteção oferecida às crianças. A Figura 25, a seguir, exhibe um *Volkswagen Up!* durante preparação que antecede a realização do ensaio de colisão pelo Latin NCAP.



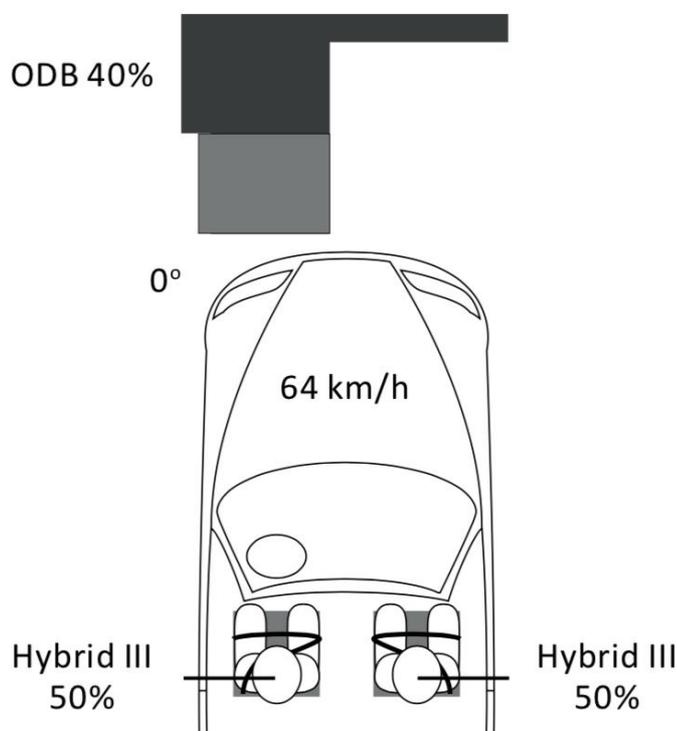
**Figura 25.** *Volkswagen Up!* durante preparação que antecede a realização do ensaio de colisão pelo Latin NCAP.

(fonte: RODRIGUEZ, 2015)

#### 4.3.2 Área frontal do impacto

A largura do carro (excluindo retrovisores) é mensurada e registrada, bem como a linha central (linha simétrica e equidistante de ambas laterais do veículo) é delimitada e marcada. A partir da demarcação da linha central, calcula-se 10% da largura total do veículo (medida anteriormente) e marca-se um ponto no capô e para-choque do veículo, a partir da linha central. A área frontal em contato com

a barreira deformável equivale à 40% da largura do veículo (ilustrado na Figura 26). Adicionalmente, um pino é fixado na parte mais externa da barreira deformável que será atingida. É demarcado, também, o ponto no para-choque do veículo onde o pino deve atingir o veículo. Caso não esteja dentro da tolerância horizontal de  $40\% \pm 20\text{mm}$  e da tolerância de alinhamento vertical de  $\pm 25\text{mm}$ , a análise de vídeo é utilizada como recurso adicional para avaliar o ensaio de colisão frontal (EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME, 2015).



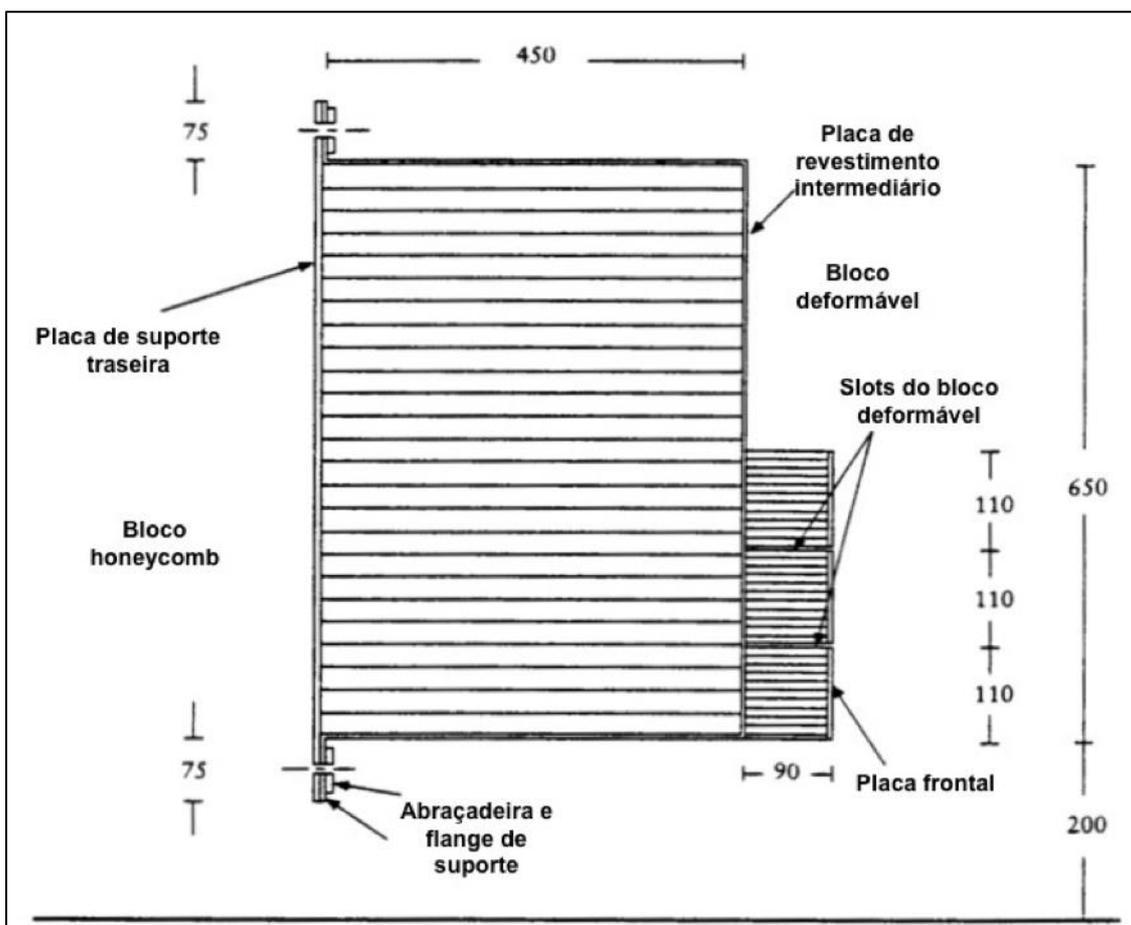
**Figura 26.** Representação da configuração do teste, indicando a barreira deformável que deve atingir 40% da área frontal do veículo.

(fonte: GLOBAL NCAP, 201-?)

### 4.3.3 Dinâmica do teste

O ensaio de colisão frontal consiste no avanço do veículo em relação a barreira deformável. Neste teste, a área almejada de contato com a barreira é de 40% da área frontal mensurada do veículo. A barreira utilizada é composta prioritariamente de um bloco *honeycomb* (estrutura no formato de células hexagonais) e de um bloco deformável para absorver o impacto, ambos

compostos de alumínio 3003 (ISO 209). Os elementos secundários englobam a placa de suporte traseira, a placa de revestimento intermediário e a placa frontal, ambos de alumínio 5251/5052 (ISO 209) (UNITED NATIONS, 2013). As dimensões físicas da barreira estão representadas na Figura 27, abaixo, em milímetros.



**Figura 27.** Especificação da barreira deformável e periféricos. Medidas em milímetros.

(fonte: UNITED NATIONS (2013), adaptada pelo autor.)

O veículo é projetado contra a barreira deformável a uma velocidade de 64 Km/h (40 milhas por hora). De acordo com Latin NCAP (201-?), essa velocidade representa uma colisão entre dois veículos de massa similar que viajam a, aproximadamente, 55 km/h (Figura 28). A diferença entre as velocidades é creditada à energia absorvida pela deformação da barreira. Por meio de pesquisas estatísticas em frequências de sinistro, constatou-se que essa velocidade cobre grande parte dos acidentes. Simulando a colisão entre dois carros, a barreira deformável é utilizada para retratar a natureza deformável

das carrocerias. Dessa forma, este teste busca retratar da forma mais fidedigna possível a colisão mais frequente entre dois veículos em autoestradas.



**Figura 28.** Volkswagen Up! em teste de impacto frontal conduzido pelo instituto Latin NCAP, no momento da colisão contra a barreira deformável.

(fonte: FURLAN, 2015)

Após o teste, os dados registrados pelo *dummy* no impacto frontal são o ponto de partida para a avaliação da proteção dos ocupantes adultos. Inicialmente, cada área relevante do corpo recebe uma pontuação baseada nos parâmetros medidos por sensores. Para a proteção de ocupantes adultos, a classificação geral é baseada nos parâmetros do *dummy* posicionado no assento do motorista, a menos que haja discrepância com a avaliação do manequim que representa o passageiro. A avaliação também considera o desempenho estrutural do carro, levando em conta aspectos como o deslocamento do volante, o movimento dos pedais, a deformação da parede corta-fogo e o deslocamento da coluna “A” (LATIN AMERICAN & CARRIBEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME, 2013). Após a análise dos dados e da estrutura do veículo, uma nota que varia de zero a cinco estrelas é outorgada, tanto para passageiros adultos como para crianças. Esta nota representa o nível de segurança do modelo ensaiado pelo Latin NCAP.

## 5. DESMONTE DO VEÍCULO

O Volkswagen Up!, mostrado na Figura 29, foi utilizado em um ensaio de colisão frontal (*crash test*) em 19 de fevereiro de 2015, seguindo os procedimentos destacados pelo capítulo 4 deste trabalho. Após o teste, este veículo foi doado à Universidade de Brasília pelo Latin NCAP.

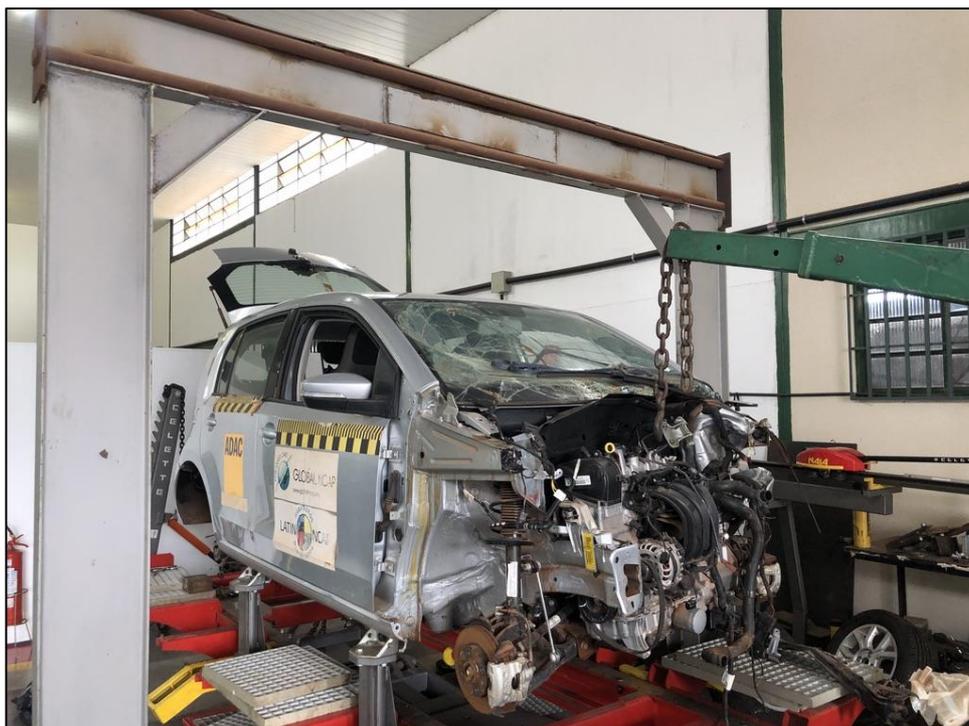


**Figura 29.** Amostra do Volkswagen Up! doado para a Universidade de Brasília, cuja estrutura é objeto de estudo deste trabalho.

(autoral)

Buscando facilitar a remoção da longarina para realizar a modelagem proposta nesse trabalho, fez-se necessário o desmonte do veículo. Os subsistemas foram completamente desmontados para expor o chassi monobloco. Isto permitiu a medição dos deslocamentos sofridos pela estrutura, que será detalhada no capítulo 6.

O veículo foi posicionado em um elevador pneumático *Celette* (descrito no Capítulo 6, deste trabalho) a fim de fixar o chassi e viabilizar a retirada de rodas, pneus e suspensões, bem como os diversos itens da carroceria e conjunto motriz (Figura 30).



**Figura 30.** Veículo suspenso no elevador pneumático, após o desmonte dos para-lamas dianteiros e do conjunto de rodas/pneus.

(autoral)

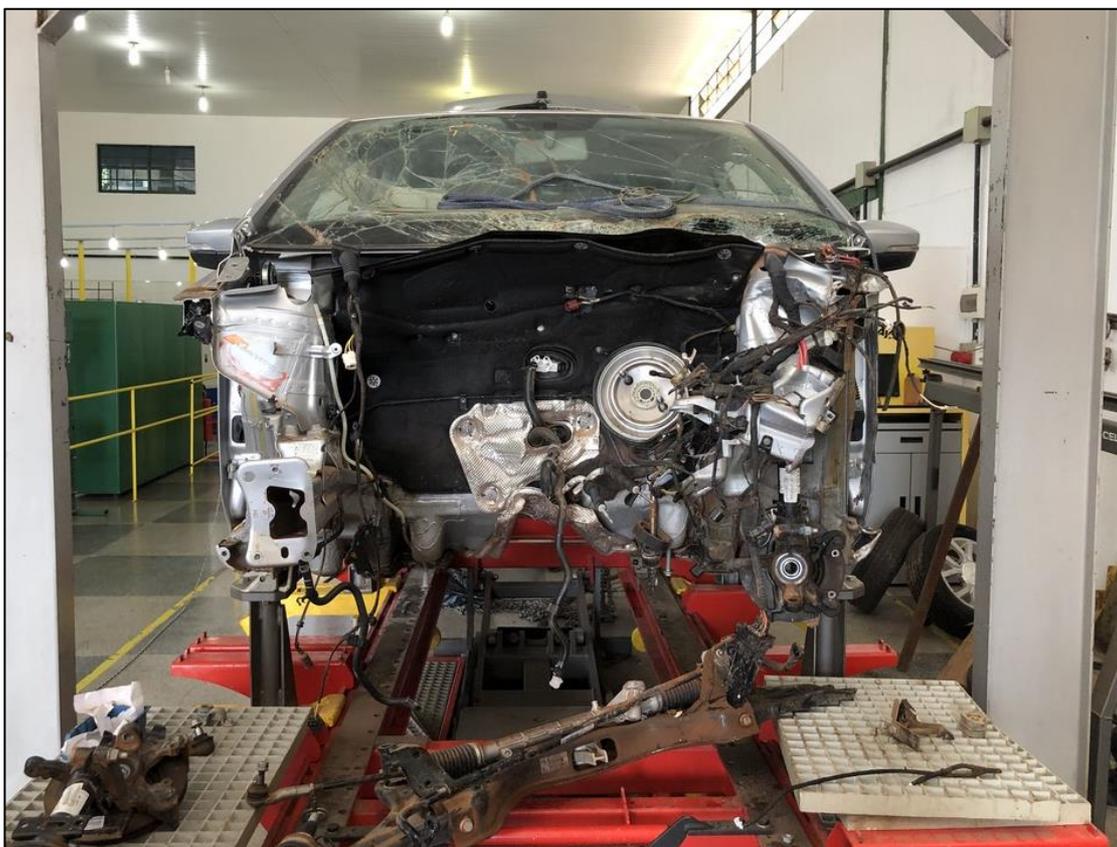
O conjunto motoriz foi apoiado por motivos de segurança e, posteriormente, retirado utilizando-se um guincho hidráulico (Figura 31).



**Figura 31.** Guincho hidráulico Marcon, utilizado para apoiar e retirar o conjunto motoriz.

(autoral)

Após a retirada do motor (Figuras 32 e 33), prosseguiu-se com o desmonte da barra da direção, e do conjunto mola/amortecedor dianteiro esquerdo, bem como os cubos de roda traseiros. Um cuidado adicional foi tomado devido à quebra de peças decorrentes do ensaio de colisão (como acabamentos plásticos, coxim do motor e para-brisa), sempre priorizando a preservação da estrutura para realizar as medições necessárias.



**Figura 32.** Vista frontal do veículo, suspenso no elevador pneumático, após o desmonte do conjunto motriz e da barra de direção.

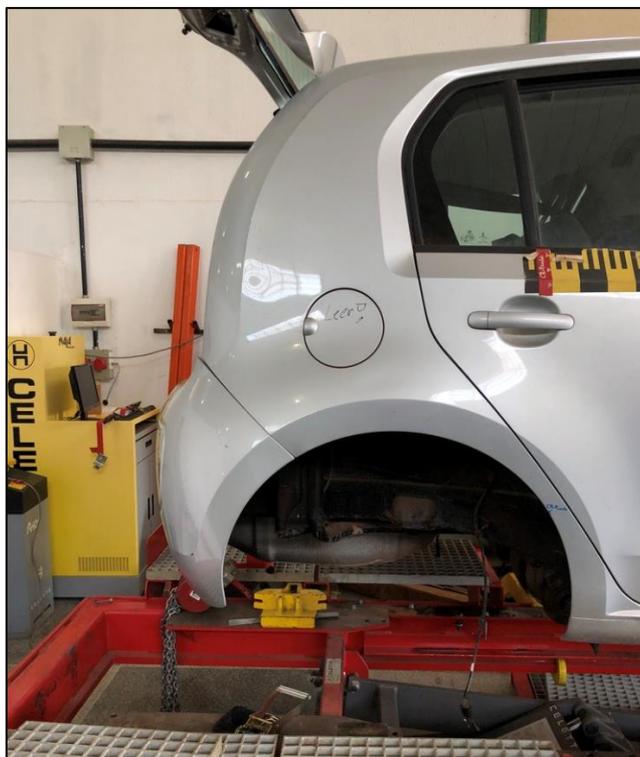
(autoral)



**Figura 33.** Figuras (a) e (b). Motor tri cilíndrico do Volkswagen Up! retirado do exemplar cedido pela Latin NCAP e detalhe do coxim fraturado devido ao impacto sofrido.

(autoral)

Em seguida, retirou-se o sistema de suspensão traseiro, o tanque de combustível e iniciou-se a retirada das portas do veículo (Figura 34). Em conformidade com a norma de realização do teste, que recomenda a substituição de líquidos inflamáveis por água o tanque ainda possuía resquícios deste líquido em seu interior, sendo necessário drená-lo (Figura 35).



**Figura 34.** Visão lateral da parte traseira do Up! em análise, registrada posteriormente à retirada do o sistema de suspensão traseiro e tanque de combustível.

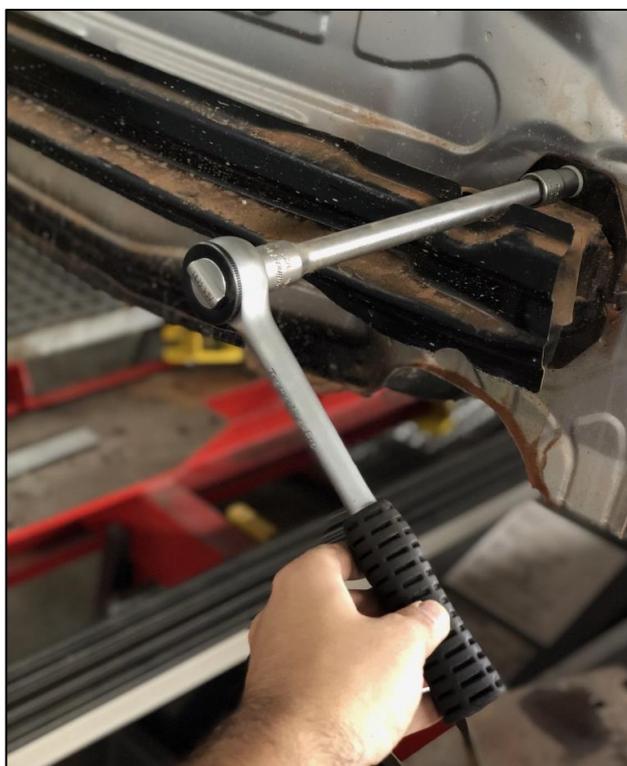
(autoral)



**Figura 35.** Tanque de combustível retirado do veículo, após o processo de drenagem.

(autoral)

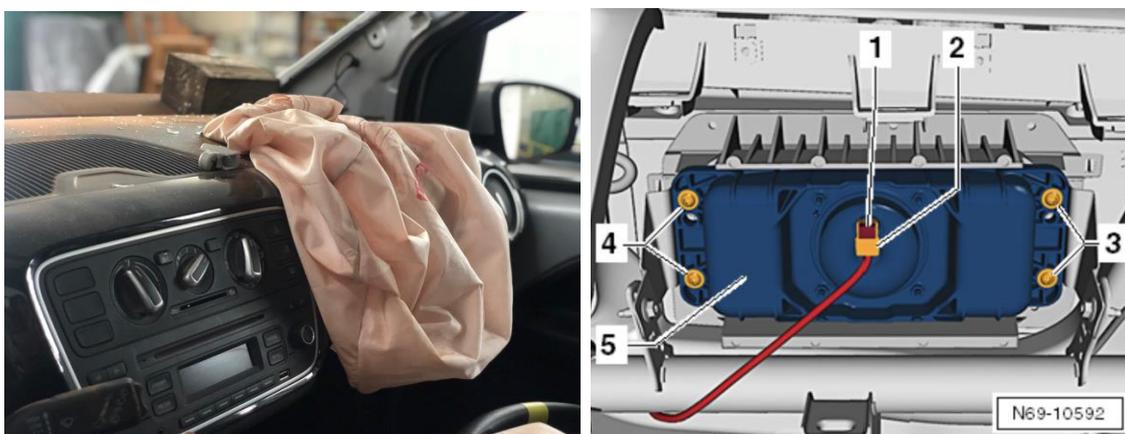
Prosseguiu-se com a remoção das peças externas da carroceria: para choque e *crashbox* traseiros (Figura 36)



**Figura 36.** Desmonte do *crashbox* traseiro utilizando a ferramenta adequada.

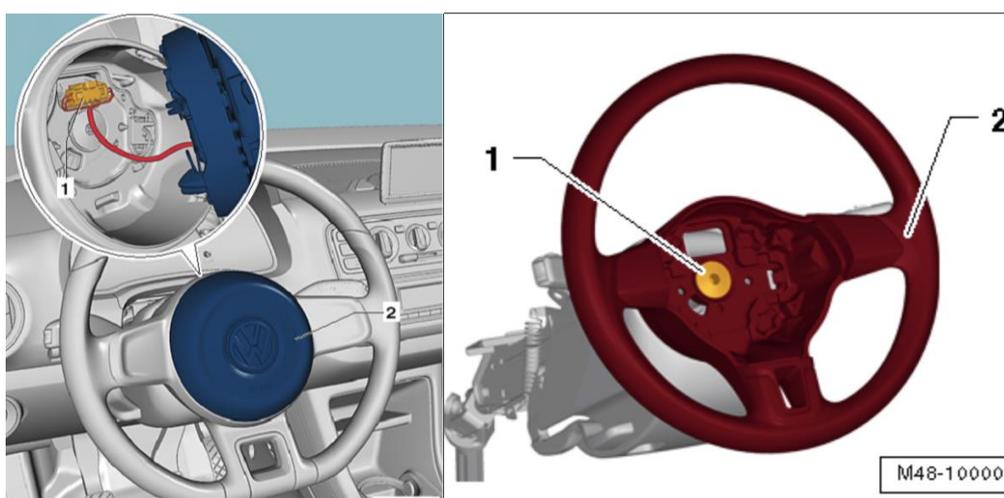
(autoral)

Iniciou-se, paralelamente, o desmonte das peças, painéis e acabamentos do interior do veículo (Figuras 39 e 40). Para isso, utilizou-se o manual técnico do *Volkswagen UP! (Workshop Manual)*, como referência, para agilizar o processo de desmontagem e evitar a quebra de mecanismos que não foram danificados no ensaio de colisão frontal, de modo a serem reaproveitados futuramente (Figuras 36, 37 e 38).



**Figura 37.** Figuras (a) e (b). Airbag do passageiro deflagrado no ensaio crash test e indicação da forma correta de desmonte de acordo com o Volkswagen UP! Workshop Manual.

(fonte: VOLKSWAGEN, 2011)



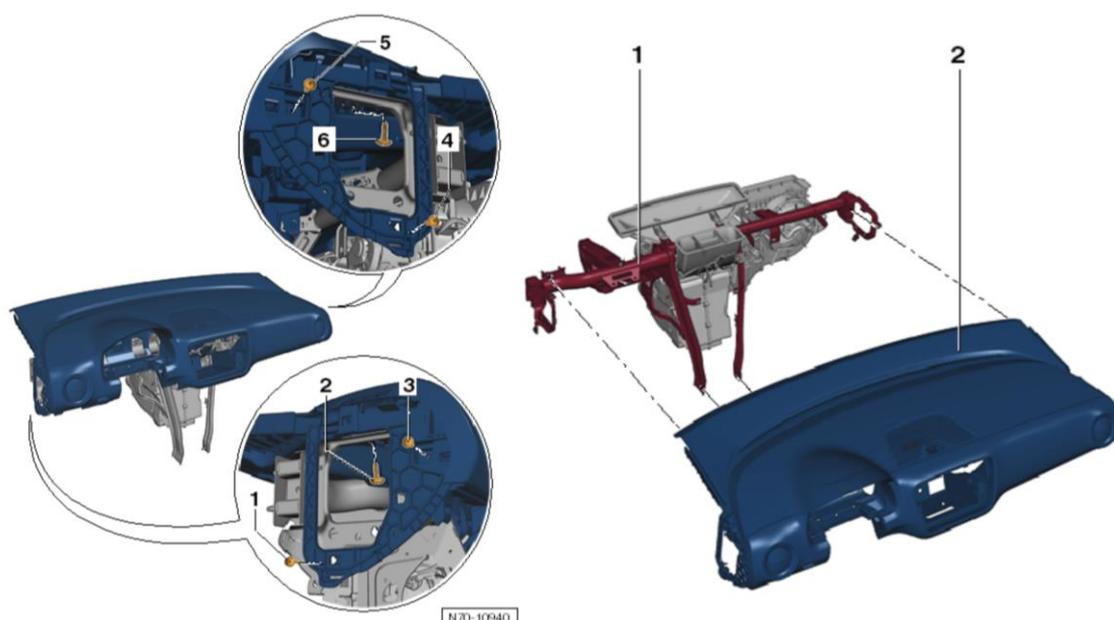
**Figura 38.** Figuras (a) e (b). Instruções para retirada do volante e do airbag do motorista.

(fonte: VOLKSWAGEN, 2011)



**Figura 39.** Figuras (a) e (b). Airbag do motorista deflagrado após o impacto e volante do motorista removido.

(autoral)



**Figura 40.** Figuras (a) e (b). Instruções acerca da remoção do painel e estrutura metálica.

(fonte: VOLKSWAGEN, 2011)



**Figura 41.** Figuras (a) e (b). Painel e console central removido, expondo a estrutura metálica e partes do chicote elétrico.

(autoral)

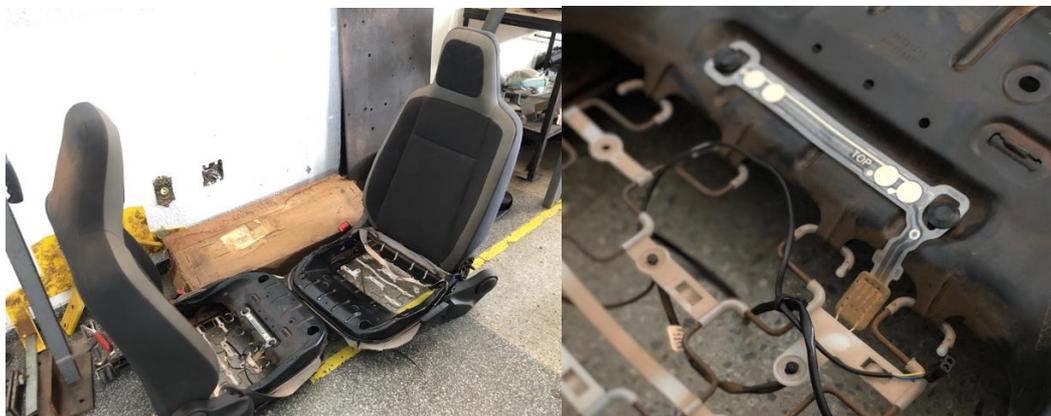
Após avanços na remoção do interior, retirou-se o para-brisa e acabamentos (Figura 42). Restaram os bancos, a porta dianteira direita e o conjunto mola/amortecedor dianteiro direito. Essa figura mostra, também, um detalhe importante notado durante o processo de desmontagem: a possibilidade de abertura normal da porta dianteira direita (lado do motorista). Isso indica que empenamento da coluna “A” foi mínimo, o que evidencia a qualidade da estrutura contra impactos dessa natureza. De acordo com Paine et al. (2009), o deslocamento residual da coluna “A” (adjacente à dobradiça superior da porta dianteira) representa uma indicação da integridade do habitáculo. Grandes deslocamentos são geralmente associados ao colapso do teto, da porta do motorista e do piso. O protocolo do teste de colisão (*crash test*) avalia este quesito, que é um dos parâmetros levados em consideração para outorgar a nota. A pontuação é reduzida caso haja deslocamento excessivo para a coluna localizada acima da porta dianteira do pilar (coluna “A”), medido a uma altura de 100 mm abaixo do nível mais baixo da abertura da janela lateral. Até 100mm de deslocamento não há penalidade. Acima de 200mm há uma penalidade de dois pontos. Entre esses limites, a penalidade é calculada pela interpolação linear (LATIN AMERICAN & CARRIBEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME, 2013).



**Figura 42.** Veículo em avançado estado de desmonte, após remoção do para-brisa. Destaque para a porta do motorista, que abre e fecha normalmente, mesmo após impacto contra a barreira deformável.

(autoral)

Prosseguiu-se com a remoção das mantas acústicas, tanto internas quanto externas, remoção da porta dianteira e do conjunto mola/amortecedor dianteiro, bem como a tampa traseira e bancos (Figura 43).



**Figura 43.** Figuras (a) e (b). Bancos dianteiros removidos. Detalhe para o sensor de presença do ocupante, utilizado para emitir um aviso sonoro e visual caso o cinto de segurança não seja utilizado.

(autoral)

Para remoção dos bancos e de âncoras na carroceria, foi necessária uma chave especial estriada (Figura 44).



**Figura 44.** Parafuso no padrão estriado.

(autoral)

Finalizada a remoção de bancos, manopla do câmbio e âncoras da carroceria, o chassi monobloco do Volkswagen *Up!* foi completamente exposto (Figuras 45 e 46). Este tipo de construção consiste em painéis laminados que

são, no caso de estruturas de aço, geralmente soldadas por pontos. A sua resistência à flexão resulta, em parte, das longarinas horizontais existentes ao longo das bordas exteriores do piso, entre as rodas dianteiras e traseiras. (COSTA, 2001). O design monobloco permite uma redução significativa do peso do carro e permite uma configuração do veículo mais compacta e espaçosa. Também aumenta a segurança porque as zonas de deformação que absorvem energia podem ser integradas ao chassi (EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, 2013). Estes elementos de deformação, como as longarinas dianteiras foram deformados no ensaio de colisão frontal do Volkswagen *Up!*.

Por fim, o chassi monobloco foi limpo superficialmente de forma a remover poeira e detritos. Isto o deixou pronto para início das medições de deformação estrutural e possibilitou a retirada da longarina dianteira direita (detalhada no capítulo 7).



**Figura 45.** Vista frontal do chassi monobloco do Volkswagen *Up!*.

(autoral)



**Figura 46.** Vista traseira do chassi monobloco do Volkswagen Up!.

(autoral)

## 6. MEDIÇÃO DO DESLOCAMENTO ESTRUTURAL

A fim de aprofundar a discussão acerca da eficiência da estrutura do *Up!* em colisões frontais, a medição dos deslocamentos na estrutura a partir da deformação sofrida é o ponto de partida para compreender a dinâmica do acidente. Com o chassi exposto, utilizou-se um equipamento *Celette NAJA 3D* (descrito a seguir) para mensurar pontos pré-definidos e compará-los ao gabarito disponibilizado via software.

### 6.1 EQUIPAMENTO UTILIZADO

Os equipamentos utilizados na medição do deslocamento estrutural são descritos a seguir.

#### 6.1.1 Elevador pneumático

Para viabilizar o processo de medição dos diversos pontos na carroceria (em especial pontos localizados na parte de baixo do veículo), foi necessário elevar o veículo em uma plataforma pneumática. Para isso, utilizou-se o elevador pneumático *Rhone 2.8T* da *Celette*, indicado na Figura 47.



**Figura 47.** Elevador pneumático Rhone da Celette.

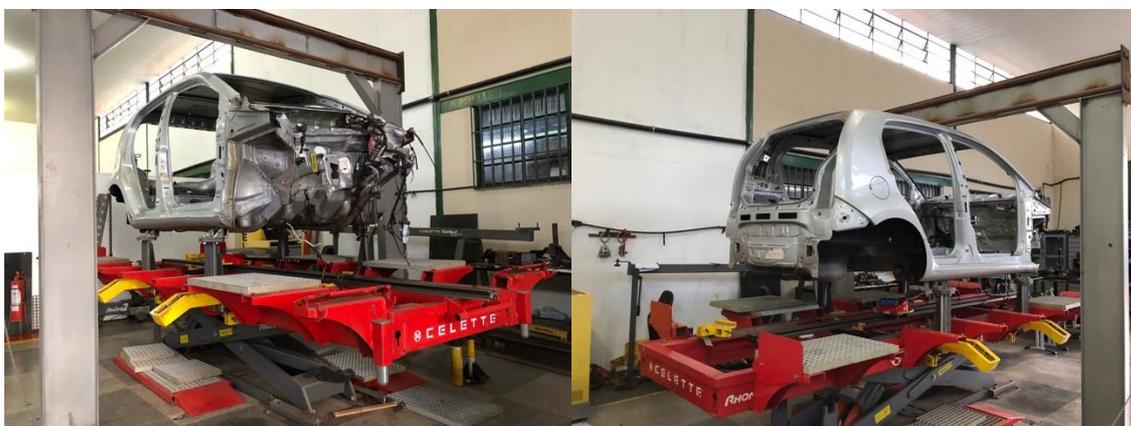
(fonte: CELETTE, 2015)

A capacidade máxima do equipamento foi verificada, visando a segurança no estudo conduzido. De acordo com a fabricante, este equipamento foi projetado para suportar cargas de até 2800 quilogramas (CELETTE, 2018). Este valor supera com folga a massa especificada do veículo: 953 quilogramas (VOLKSWAGEN DO BRASIL, 2014), permitindo seu uso com ampla margem de segurança. Buscou-se posicionar o veículo centralizado em relação ao elevador, fixando-o por meio das garras metálicas (Figura 48). Após o posicionamento correto, o veículo foi erguido para facilitar as medições, relatadas no tópico 6.2 deste trabalho (Figura 49).



**Figura 48.** Detalhe do chassi monobloco fixado ao elevador pneumático Rhone por meio de garras metálicas.

(autoral)



**Figura 49.** Figuras (a) e (b). Chassi monobloco exposto, após a retirada de peças. Veículo preso diretamente ao elevador pneumático, que fora erguido para facilitar as medições.

(autoral)

### 6.1.2 Equipamento eletrônico de medição

As medições realizadas neste trabalho foram possíveis com o uso de um equipamento eletrônico de medição tridimensional: NAJA 3D, fabricado pela empresa *Celette*. Trata-se de uma ferramenta especializada para medição estrutural (Figura 50). Por meio da comunicação com o software fornecido pela fabricante, pode-se medir pontos em um ambiente 3D, gerando coordenadas nos eixos X, Y e Z.



*Figura 50. Equipamento de medição Celette NAJA 3D utilizado nas medições deste trabalho.*

(autoral)

O NAJA 3D é energizado por uma bateria (6,1 V) e se desloca em cima de um trilho posicionado de forma equidistante de cada lateral do veículo. Por meio de um braço e uma esfera acoplada, seu funcionamento consiste na medição de pontos específicos do chassi do veículo que geram coordenadas tridimensionais. Um conjunto de ponteiros e adaptadores intercambiáveis (conforme indicado na Figura 51) acompanha o equipamento, garantindo medidas precisas em todas as partes da carroceria. Para cada ponto do chassi a ser medido, é necessária a troca do adaptador, que conecta a esfera do equipamento de medição ao local específico no chassi do veículo (esse processo será descrito no tópico 6.2 deste trabalho). As medidas são transferidas via conexão *bluetooth* ao computador com o software instalado (descrito no tópico 6.1.3 a seguir).



**Figura 51.** Ponteiras e adaptadores intercambiáveis.

(autoral)

### 6.1.3 Computador com software instalado

Para registrar as medições, foi necessário à conexão do aparelho NAJA 3D a um computador com o software NAJA 2014, devidamente instalado (Figura 52). Este software permite comunicação em tempo real com o equipamento de medição, possibilitando a gravação de pontos mensurados e comparação com a referência (de um chassi integro) para cada veículo cuja base de dados está presente no software. O software fornecido pela empresa *Celette*, foi atualizado em 15/12/2014 e possui o Volkswagen *Up!* em sua base de dados.



**Figura 52.** Computador com software NAJA 3D instalado, utilizado nas aferições.

(autoral)

A tela inicial do software é apresentada na Figura 53, abaixo. A partir dela, pode-se (1) medir o veículo ou (2) acessar as medições salvas. Para iniciar o processo de medição, clicou-se no ícone indicado por (1), que leva diretamente ao ambiente de seleção do veículo, descrito no tópico 6.2.1.



**Figura 53.** Tela inicial do software NAJA 2014, que possui o Volkswagen Up! presente na base de dados.

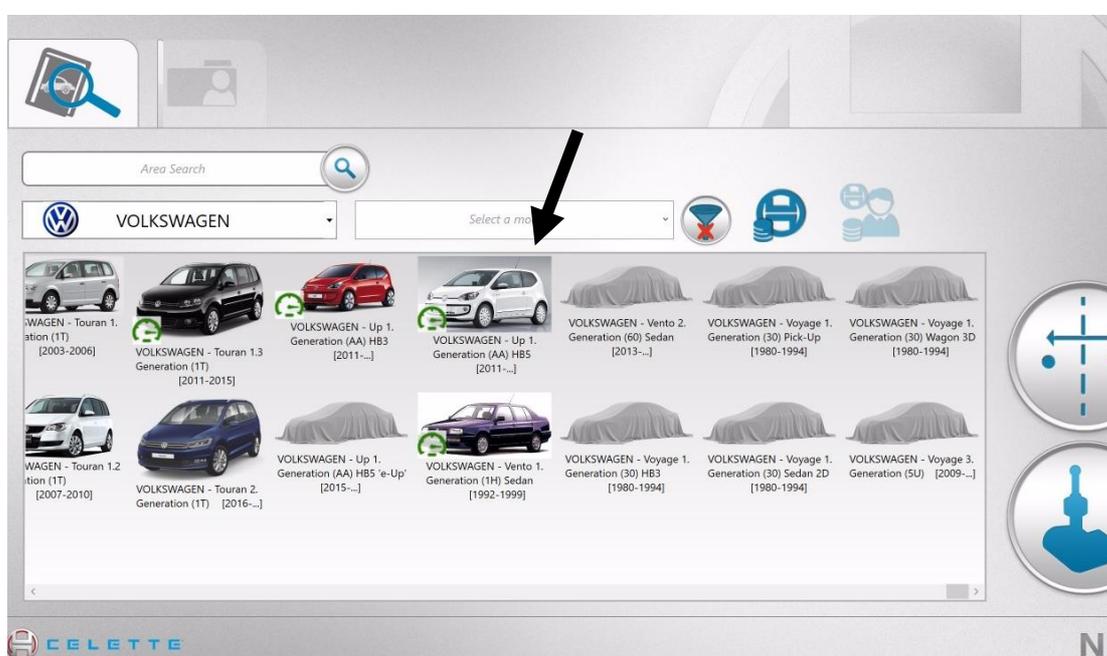
(autoral)

## 6.2 O PROCESSO DE MEDIÇÃO

Descreve-se, a seguir, as etapas do processo de medição do chassi monobloco do Volkswagen *Up!*.

### 6.2.1 Seleção do veículo

A seleção do veículo Volkswagen *Up!*, disponível na base de dados do software NAJA 2014, foi realizada a partir da interface exibida na Figura 54.



**Figura 54.** Base de dados do software NAJA 3D que contém o Volkswagen *Up!*.

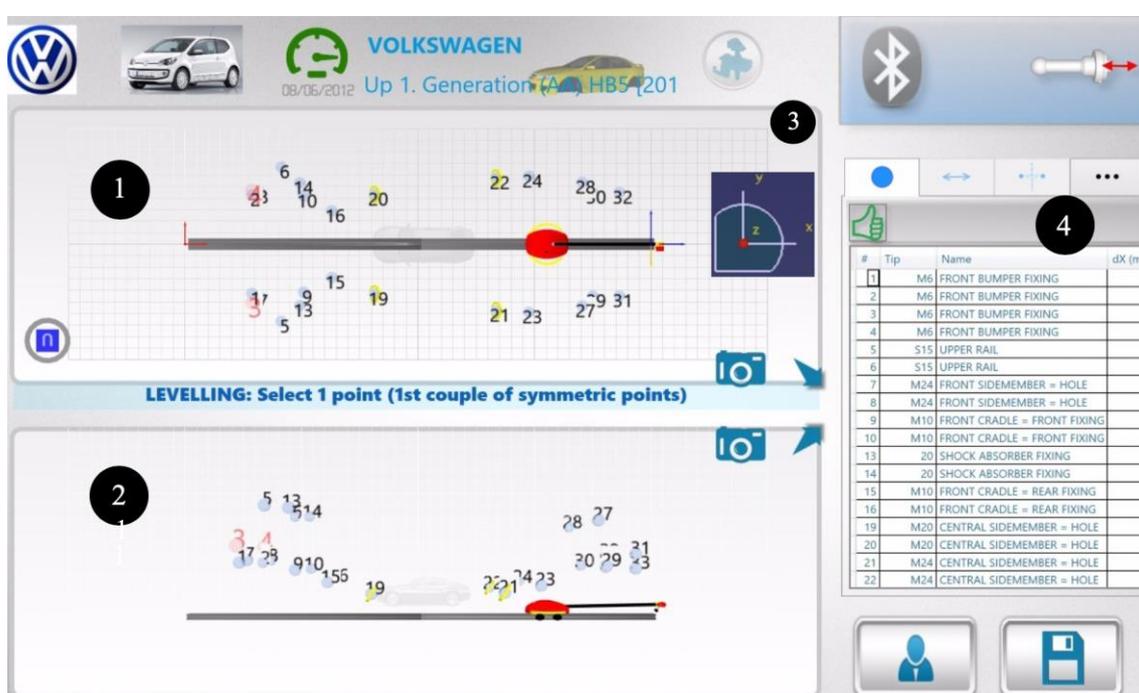
(autoral)

O software utilizado possui o modelo europeu em sua base de dados, com carroceria de cinco portas. Conforme relatado no tópico 3.1 deste trabalho, o comprimento total é um dos pontos no qual o *Up!* brasileiro difere do europeu. Houve um aumento de 6,5 centímetros visando um maior porta-malas para o mercado local, o que resultou em um maior comprimento total do chassi. Por se tratar de uma alteração na parte traseira do veículo, não irá interferir na análise proposta por este trabalho, já que os deslocamentos na estrutura foram

causados por um ensaio de colisão frontal. Pode haver, porém, uma divergência em relação à parte traseira do monobloco adotado como referência.

### 6.2.2 Ambiente de Medição

Assim que o modelo é selecionado, o software entra em um ambiente que contém a vista superior (plano definido pelos eixos x e y) e a vista lateral (plano definido pelos eixos x e z) da nuvem de pontos pré-definidos para o modelo específico (conforme a Figura 55). Todos os pontos a serem medidos estão listados no software.



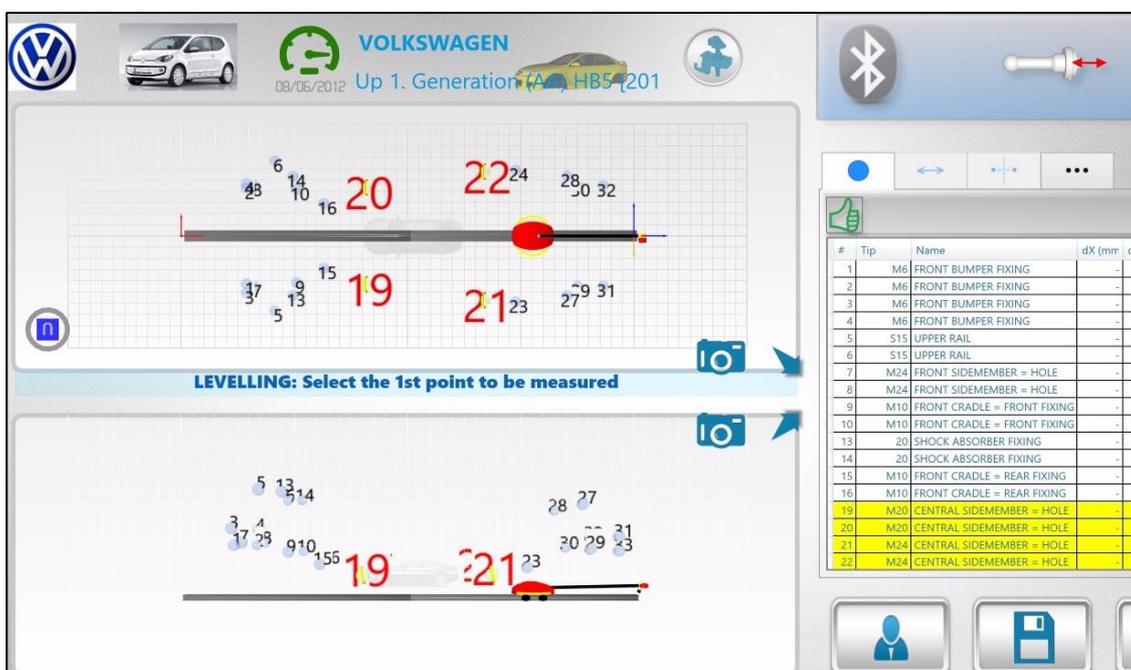
**Figura 55.** Tela do ambiente de medição após a escolha do modelo. Nuvem de pontos em vista superior (1) e lateral (2), eixo de referência adotado (3) e lista de todos os pontos que devem ser mensurados (4).

(autoral)

### 6.2.3 Ambiente de Medição

O processo de medição foi realizado seguindo-se a metodologia indicada pelo manual do software NAJA 3D. Partindo do ambiente de medição, o programa exige a escolha de quatro pontos para referenciar a posição do chassi em relação aos eixos de traçados pelo software. É adotado um deslocamento nulo nestes pontos. No caso deste estudo, é conveniente a escolha de pontos suficientemente distantes da frente do veículo, afetada pela colisão. O software

indica quatro pontos recomendados como referência: 19, 20, 21 e 22 (destacados na Figura 56). Estes pontos, escolhidos para iniciar as medições, estão localizados na parte inferior do monobloco, de forma centralizada no veículo.



**Figura 56.** Tela do ambiente de medição. Pontos 19, 20, 21 e 22 selecionados para referenciar a posição do chassi em relação aos eixos de traçados pelo software.

(autoral)

Por meio do ambiente do software, assim que o ponto inicial é selecionado (cliqueando-se duas vezes sobre ele), surge uma janela com informações relevantes para o processo de medição, representada na Figura 57. Esta janela apresenta foto do local correto para posicionamento da esfera de medição no chassi, apontado pela seta vermelha (nº 1), bem como o adaptador indicado para a medição do ponto (nº 2), que, nesse caso é o “M20”.



**Figura 57.** Tela do ambiente de medição indicando a localização do ponto (1) e o adaptador correto (2) para medição de um dos pontos escolhidos como referência.

(autoral)

Para utilizar o adaptador indicado, é necessário recorrer ao jogo de ponteiros e adaptadores intercambiáveis, para encontrar o modelo indicado pelo software. A Figura 58 ilustra um dos modelos de adaptador e o processo de encaixe na esfera de medição.

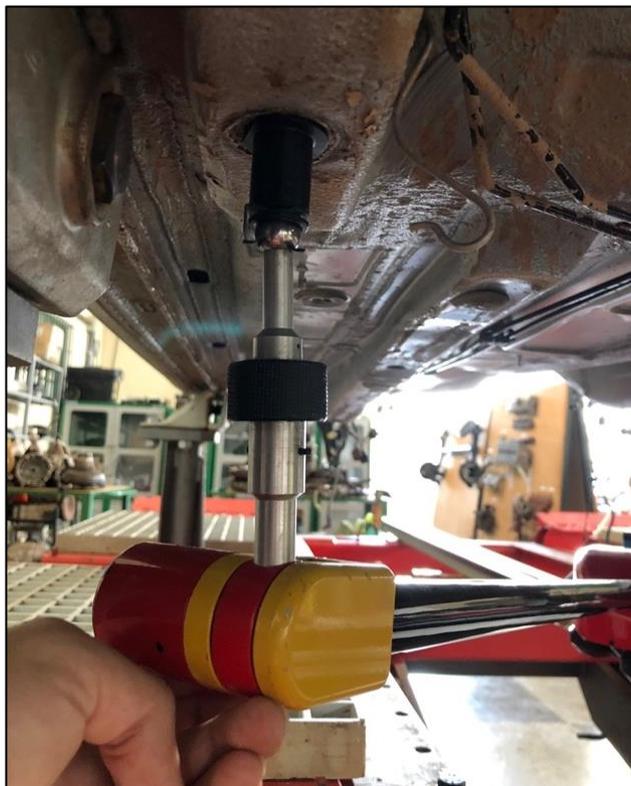


**Figura 58.** Figuras (a) e (b). Adaptador modelo “M6” e posterior encaixe na esfera de medição.

(autoral)

Após a instalação do adaptador recomendado para a medição do ponto, busca-se localizar o local exato de posicionamento da esfera (com auxílio da figura providenciada pelo software). Identificado o local, movimenta-se o equipamento NAJA 3D pelo trilho e posiciona-se o braço de forma a possibilitar o encaixe do adaptador no ponto indicado. O equipamento possui um botão que,

quando pressionado, grava a medida no software, gerando, imediatamente, uma coordenada tridimensional. Este processo é ilustrado na Figura 59.



**Figura 59.** Momento exato da medição de um dos pontos escolhidos como referência. Após encaixe do adaptador correto ao ponto indicado no chassi, pressiona-se o botão localizado no braço do equipamento NAJA 3D e uma coordenada tridimensional é gerada.

(autoral)

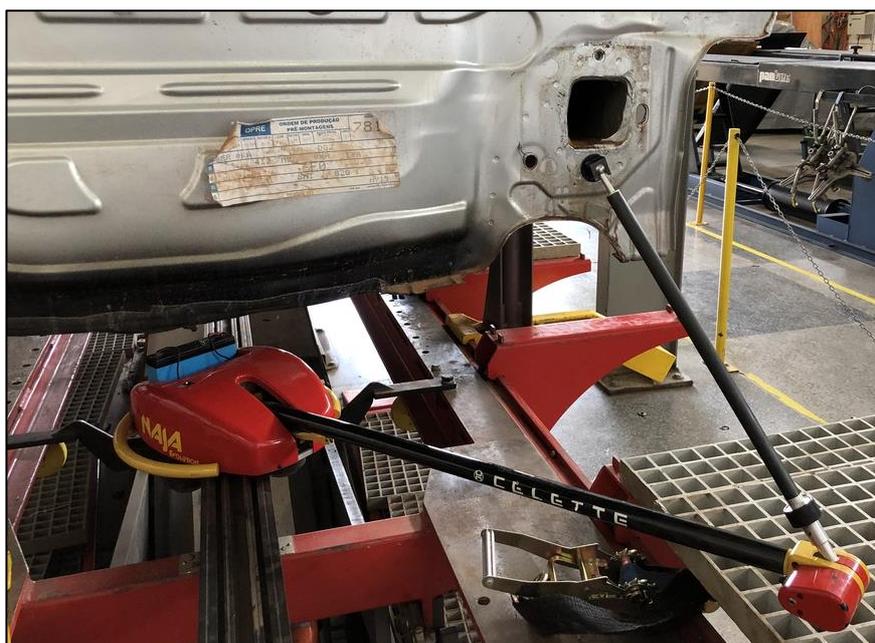
Subsequentemente à medição dos quatro pontos iniciais (de referência), o software traça o eixo de simetria e permite a continuidade do processo de medição. A Figura 60 indica um dos 30 pontos restantes de medição: o ponto de fixação do amortecedor traseiro. Por meio da imagem disponibilizada pelo software (Figura 60 (a)), localizou-se o ponto no chassi do veículo (Figura 60 (b)). Conectando-se o adaptador indicado pelo software, foi possível encaixá-lo no local exato e realizar a medição do ponto.



**Figura 60.** Figuras (a) e (b). Indicação do local e adaptador correto e posicionamento do equipamento para realização da medida.

(autoral)

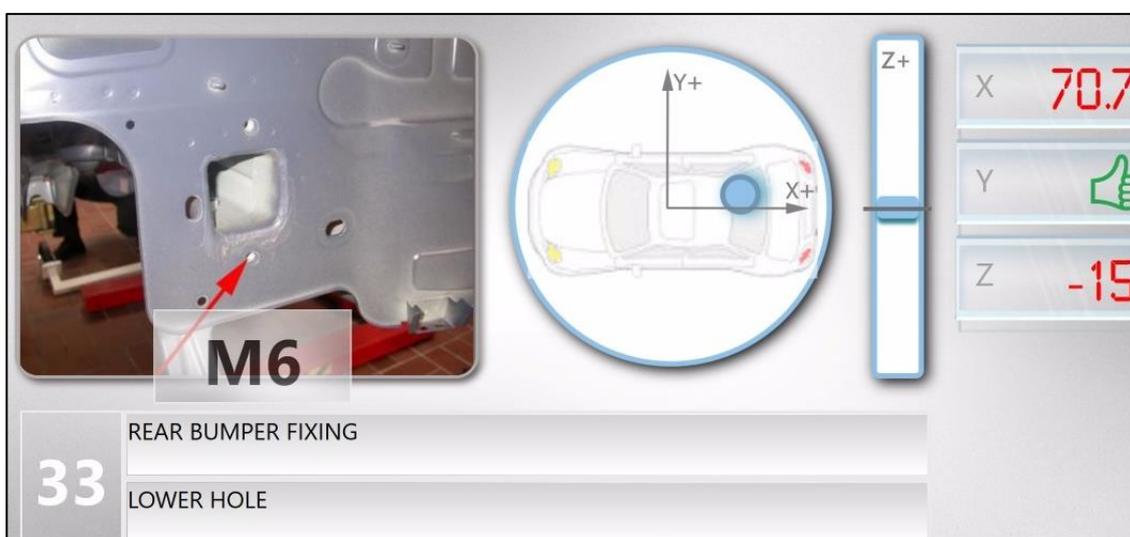
Fez-se necessária a troca de adaptadores e extensores diversas vezes, sempre movimentando o equipamento com cautela pelo trilho e buscando o melhor engaste entre o adaptador indicado e o respectivo ponto na carroceria. Para a medição dos pontos de fixação do para-choque traseiro, foi necessária a utilização do extensor, conforme mostra a Figura 61. Não há a necessidade de alterar nenhum parâmetro com a utilização do extensor: o equipamento reconhece a mudança e possibilita a medição, realizada seguindo-se a mesma metodologia já adotada.



**Figura 61.** Localização e encaixe da esfera em um dos pontos, utilizando o extensor, imediatamente antes do registro da medição.

(autoral)

A Figura 62 mostra a janela do software que contém a imagem da localização do ponto a ser medido, o adaptador indicado e o deslocamento nos eixos X, Y e Z do ponto em questão se comparado à referência. Por meio recursos visuais e audíveis, o software auxilia na medição: quando o encaixe no ponto é correto, emite um sinal sonoro para alertar o operador. Faz-se necessário, então, pressionar o botão para que a medida seja registrada. Nessa figura, O símbolo  indica que o deslocamento é nulo nesta direção, quando comparado ao chassi de um veículo inalterado (referência).



**Figura 62.** Janela secundária mostrando a localização do ponto, e os deslocamentos divergentes do chassi inalterado, em X e Y.

(autoral)

Seguiu-se o processo de medição por meio do registro de todos os pontos restantes, com enfoque na deformação das longarinas dianteiras, que foram as partes mais afetadas pelo ensaio de colisão frontal. A Figura 63 ilustra a medição da longarina dianteira esquerda, que foi a menos afetada e seria retirada posteriormente.



**Figura 63.** Processo de aferição da longarina dianteira esquerda, menos afetada.

(autoral)

A Figura 64 ilustra o processo de medição dos pontos referentes à longarina mais afetada (lado direito). Observando-se tal figura, percebe-se que este elemento estrutural se deformou visivelmente, havendo deslocamento espacial. Os resultados de medição, discutidos no tópico 6.3 a seguir, indicaram grandes valores de deslocamento para esta longarina (Figura 65).



**Figura 64.** Vista em perspectiva do processo de medição da longarina dianteira direita. Equipamento NAJA 3D com o extensor acoplado e o adaptador engastado em um dos pontos de medição.

(autoral)



**Figura 65.** Processo de aferição da longarina dianteira direita, comprometida pela colisão.

(autoral)

Finalizadas as medições, o software NAJA 2014 permite a exportação de relatório contendo os resultados das coordenadas registradas dos pontos, que será exposto e discutido a seguir.

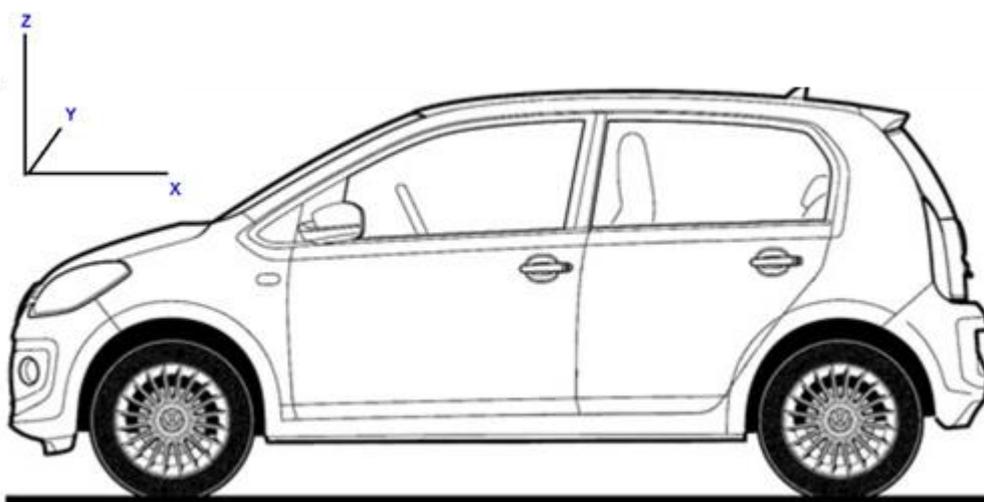
### 6.3 RESULTADOS DO PROCESSO DE MEDIÇÃO

Após todas as medições registradas dos 28 pontos pré-definidos pelo software, gerou-se um relatório correspondente, cujas medições podem ser vistas na Tabela 4, a seguir.

**Tabela 4.** Relatório do processo de medição do chassi do Volkswagen Up! submetido ao crash test.

Ponto	Descrição	dX(mm)	dY(mm)	dZ(mm)
1	Fixação do para-choque frontal	255,0	-22,5	124,8
2	Fixação do para-choque frontal	-15,6	61,1	36,9
3	Fixação do para-choque frontal	248,4	-14,5	141,4
4	Fixação do para-choque frontal	11,9	6,8	29,6
5	Trilho superior	79,8	59,6	-12,1
6	Trilho superior	46,0	27,3	-27,1
7	Furo na parte inferior da longarina frontal	220,5	76,4	148,2
8	Furo na parte inferior da longarina frontal	8,9	ok	28,2
9	Fixação frontal do subchassi	43,6	26,3	88,1
10	Fixação frontal do subchassi	3,8	10,4	14,1
13	Fixação do amortecedor dianteiro	114,5	41,9	61,1
14	Fixação do amortecedor dianteiro	14,4	ok	34,1
15	Fixação traseira do subchassi	29,1	11,0	33,0
16	Fixação traseira do subchassi	ok	12,6	9,3
19	Furo da longarina inferior	ok	ok	ok
20	Furo da longarina inferior	ok	ok	ok
21	Furo da longarina inferior	ok	ok	ok
22	Furo da longarina inferior	ok	ok	ok
23	Fixação da travessa da suspensão traseira	ok	ok	-4,5
24	Fixação da travessa da suspensão traseira	ok	ok	-8,1
27	Fixação do amortecedor traseiro	6,0	ok	-9,4
28	Fixação do amortecedor traseiro	8,7	ok	-13,6
29	Furo da longarina traseira	ok	ok	-9,6
30	Furo da longarina traseira	ok	ok	-12,0
31	Fixação do para-choque traseiro	67,0	ok	-15,3
32	Fixação do para-choque traseiro	67,6	ok	-15,6
33	Fixação do para-choque traseiro	67,6	ok	-12,7
34	Fixação do para-choque traseiro	72,0	ok	-13,8

Os pontos que apresentaram o maior deslocamento localizam-se na longarina dianteira direita, conforme se pode observar na Tabela 4, relacionados com o ensaio de colisão frontal. Nessa tabela, as maiores deformações ocorreram nos pontos 1, 3, 5 e 7. O maior deslocamento ao longo do eixo X registrado foi de 255 milímetros na longarina do lado do motorista. O eixo X é referenciado como o eixo ao longo da lateral do veículo na direção do entre eixos, conforme indicado na Figura 48. 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 milímetros. Todos estes pontos, cujo referencial dos eixos X, Y e Z está indicado na figura 66, estão detalhados no Apêndice A.



**Figura 66.** Referencial dos eixos X, Y e Z, referente às medições realizadas.

(autoral)

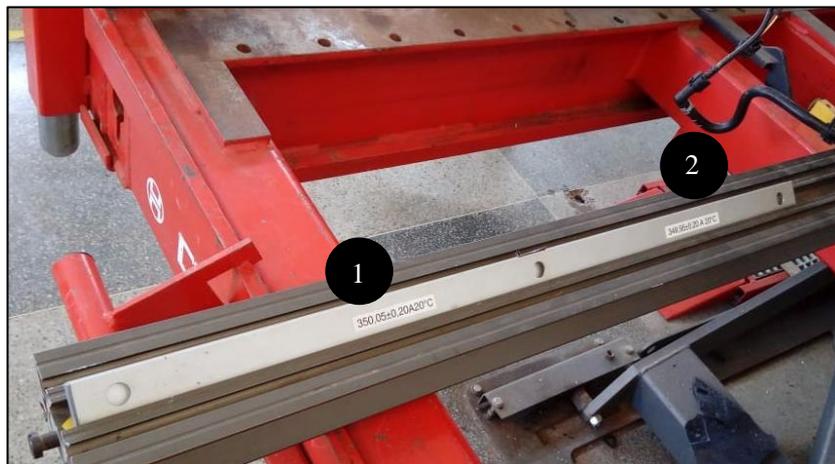
Alves (2019) realizou medições similares em um veículo Chevrolet Aveo, utilizando o mesmo equipamento de medição, em condições similares. O Aveo obteve nota zero em um ensaio de colisão frontal conduzido pelo Latin NCAP (LATIN NCAP, 2017). Comparando-se o resultado das medições, vê-se que o ponto próximo à dianteira do veículo medido por Alves (2019), furo na parte inferior da longarina frontal, resultou em um deslocamento estrutural de 86,9 milímetros no eixo X e 378 milímetros no eixo Z. Já nas medições realizadas por

este trabalho, a medida do ponto equivalente resultou em um deslocamento estrutural de 220,5 milímetros no eixo X e 148,2 milímetros no eixo Z. Isso indica que a deformação da longarina dianteira do Volkswagen *Up!* ocorreu de forma longitudinal, com menor envergadura no eixo Z. O resultado da medição do ponto correspondente à fixação do amortecedor dianteiro esquerdo também gerou uma discrepância entre os veículos. Em medições realizadas no Chevrolet Aveo foi encontrada uma deformação de 135,2 milímetros no eixo X e 191,8 milímetros no eixo Z. As medições realizadas no Volkswagen *Up!* resultaram em um deslocamento estrutural de 114,5 milímetros no eixo X e 61,1 milímetros no eixo Z. Este ponto, localizado após a longarina, mais próximo do habitáculo foi deslocado em menor magnitude no Volkswagen *Up!*. Isto pode indicar a maior eficiência da estrutura do *Up!* em absorver parte da energia da colisão por meio da deformação na longarina, diferentemente do Aveo, que repassou uma maior energia para o habitáculo, resultando em maiores deslocamento ao longo de toda a carroceria.

#### **6.4 BALANÇO DE INCERTEZAS DO PROCESSO DE MEDIÇÃO**

Apesar do cuidado na realização das medidas na carroceria do Volkswagen *Up!*, existem incertezas associadas ao processo de medição que independem da metodologia adotada. De acordo com ALBERTAZZI (2008), por maior que seja a qualidade do sistema de medição e por mais cuidadoso e habilidoso que seja o operador, ainda assim o erro de medição estará presente. Faz-se essencial, portanto, avaliar a incerteza relacionada com o processo de medição por meio do balanço de incertezas.

A fim de calcular os erros associados ao sistema de medição específico utilizado por este trabalho, empregou-se uma régua-padrão, fornecida em conjunto com o equipamento NAJA 3D, cujas medidas são conhecidas. A Figura 67 a seguir, indica a régua utilizada para estudo das incertezas de medição.



**Figura 67.** Régua padrão com medidas conhecidas: (1)  $350,05 \pm 0,20$  e (2)  $349,95 \pm 0,20$  milímetros, ambos a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

(autoral)

Utilizando-se o lado esquerdo da régua com o valor conhecido de  $350,05 \pm 0,20$  milímetros, efetuou-se medidas sequenciais. Após uma medida de referência, bastou acoplar a esfera do equipamento no centro e na extremidade da régua, pressionando o botão para registrar. Este processo foi repetido seis vezes. A Figura 68 ilustra o ambiente utilizado no software NAJA 2014, expondo o relatório parcial das medições obtidas (no eixo Y) e a Tabela 5 lista as medidas registradas.

Number	Points	dX (mm)	dY (mm)	dZ (mm)
1	S1 <--> S2			
2	S3 <--> S4	4,2	-350,3	6,6
3	S5 <--> S6	4,4	-350,1	5,2
4	S19 <--> S20	4,4	-349,7	8,1
5	S21 <--> S22	3,4	-349,9	7,8
6	S59 <--> S60	5,1	-350,1	7,9
7	S61 <--> S62	5,1	-349,7	8,3

**Figura 68.** Relatório parcial das medições obtidas, no ambiente de simetria do software. Os deslocamentos foram medidos no eixo Y (lista dY).

(autoral)

A Tabela 5, a seguir, exhibe os resultados das medições realizadas, com base no relatório parcial expedido pelo software (Figura 51)

**Tabela 5.** Resultado das medições.

Medida	Aferição Registrada
1	350,3
2	350,1
3	349,7
4	349,9
5	350,1
6	349,7

A partir das medições obtidas, foi possível calcular o desvio padrão e média dos valores, necessários à análise estatística e base para cálculo das incertezas. Baseando-se em ALBERTAZZI (2008), tem-se:

- Média:

$$I_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \quad (14)$$

- Desvio padrão:

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - I_m)^2} \quad (15)$$

- Desvio padrão amostral:

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - I_m)^2}{n-1}} \quad (16)$$

Sendo:

$I_i$  I-ésima indicação

$I_m$  Média de todas as indicações

$n$  Número de medições repetitivas efetuadas

Com isso, os valores estatísticos calculados para o conjunto de dados obtido estão indicados na Tabela 6, a seguir.

**Tabela 6.** Média, desvio padrão e desvio padrão amostral calculados.

Grandeza	Valor Calculado
Média	<b>349,96</b>
Desvio padrão	<b>0,22</b>
Desvio padrão amostral	<b>0,24</b>

A análise das incertezas de medição deve ser baseada nos elementos que compõem o processo de medição: o mensurando, o procedimento de medição, as condições ambientais, o operador e o próprio sistema de medição. Fatores que afetam qualquer um desses elementos são potenciais fontes de incerteza. (ALBERTAZZI, 2008).

Após verificar os fatores acima citados, é possível apontar as principais fontes de incerteza:

1. Incerteza associada à repetitividade do equipamento de medição ( $u_{re}$ );
2. Incerteza associada à régua utilizada ( $u_{rg}$ ); e
3. Incerteza associada à resolução do equipamento ( $u_R$ ).

Cada uma das fontes de incerteza é discutida individualmente a seguir.

1. Incerteza associada à repetitividade do equipamento de medição ( $u_{re}$ );

Esta fonte de incerteza está relacionada ao fato de medições repetidas não indicarem o mesmo valor. Os efeitos da influência do operador estão embutidos na repetitividade, constituindo uma contribuição aleatória.

A incerteza associada à repetitividade é calculada dividindo-se a incerteza padrão,  $u_i$ , pela raiz quadrada de  $m$ , o número de medições utilizadas para o cálculo da média. A incerteza padrão é o próprio desvio padrão amostral, então:

$$u_{re} = \frac{u}{\sqrt{m}} \quad (17)$$

$$u_{re} = \frac{0,24}{\sqrt{6}} = 0,1 \text{ mm} \quad (18)$$

## 2. Incerteza da régua-padrão utilizada ( $u_{rg}$ )

A régua padronizada, utilizada para medições repetidas a fim de estabelecer o balanço de incertezas do processo de medição, possui uma incerteza associada à sua escala, definida pelo fabricante. A incerteza é de  $\pm 0,20$  milímetros, conforme a etiqueta fixada, visível na Figura 69, a seguir.



**Figura 69.** Medição da régua padronizada. Etiqueta referente à incerteza deste instrumento visível.

(autoral)

## 3. Incerteza associada à resolução do equipamento ( $u_R$ )

A resolução do equipamento ( $R$ ) é associada à precisão decimal das medidas, e a incerteza é referente ao arredondamento para exibir a medida. De acordo com ALBERTAZZI (2008), trata-se de uma distribuição de probabilidades retangular e sua incerteza associada é calculada por:

$$u_R = \frac{R}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

$$u_R = \frac{0,05}{\sqrt{3}} = 0,03 \text{ mm}$$

Calculadas as fontes de incerteza individuais que contribuem para o erro do processo de medição, a incerteza combinada deve ser estimada. Definida como o desvio padrão resultante da ação combinada das componentes aleatórias de todas as fontes de incerteza que afetam um processo de medição (ALBERTAZZI, 2008), seu cálculo é dado por:

$$u_C = \sqrt{u_{re}^2 + u_{rg}^2 + u_R^2} \quad (20)$$

$$u_C = \sqrt{(0,1)^2 + (0,20)^2 + (0,03^2)} = 0,23$$

Por fim, é necessário calcular a incerteza expandida: intervalo esperado para encontrar a componente aleatória das incertezas de um processo de medição (ALBERTAZZI, 2008). Para encontrar o valor da incerteza expandida, é necessário descobrir o número de graus de liberdade efetivo ( $v_{ef}$ ).

$$\frac{u_C^4}{v_{ef}} = \frac{u_{re}^4}{v_{re}} + \frac{u_{rg}^4}{v_{rg}} + \frac{u_R^4}{v_R} \quad (21)$$

$$\frac{0,23^4}{v_{ef}} = \frac{0,1^4}{5} + \frac{0,20^4}{\infty} + \frac{0,03^4}{\infty} = 139,92$$

$$v_{ef} = 140$$

A incerteza expandida é calculada por:

$$U = t \cdot u_C \quad (22)$$

Em que  $t$  é o coeficiente  $t$  de Student para a probabilidade de 95,45%, de acordo com os graus de liberdade efetivos. Tomando como aproximação, utilizou-se o coeficiente igual a 2,015. Logo:

$$U = 2,017 \times 0,23$$

$$U = 0,46 \text{ mm}$$

As incertezas associadas ao procedimento específico de medição deste trabalho estão relatadas na Tabela 7, abaixo.

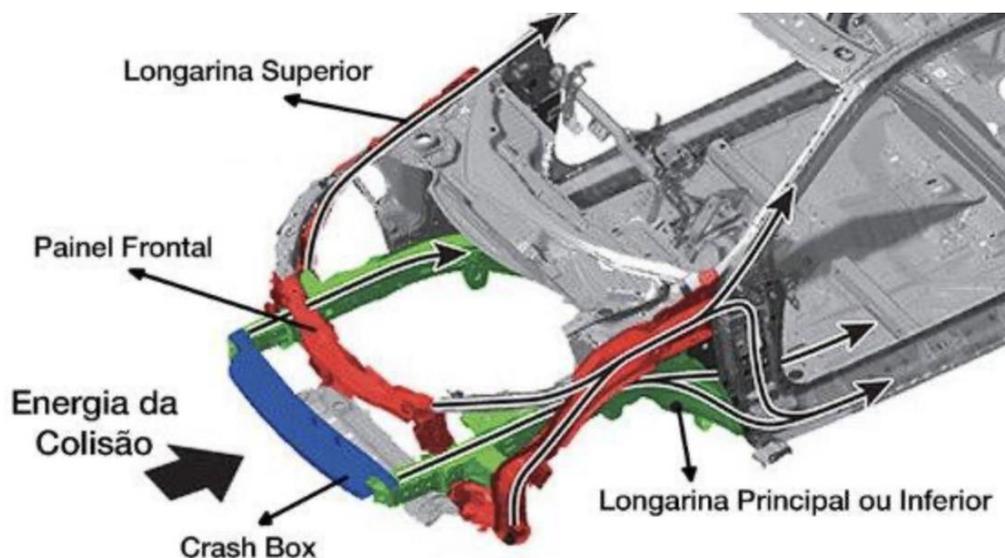
**Tabela 7.** Incertezas associadas ao procedimento de medição.

<b>Incertezas associadas ao procedimento de medição: Equipamento Naja 3D</b>	
<b>Descrição da incerteza</b>	<b>Contribuição no erro associado à medida (mm)</b>
<b>Repetitividade do equipamento de medição</b>	0,10
<b>Incerteza da régua-padrão utilizada</b>	0,20
<b>Resolução do equipamento</b>	0,03
<b>Incerteza combinada</b>	0,23
<b>Incerteza expandida</b>	0,46

Conforme exibido na tabela acima, a incerteza expandida é de 0,46 milímetros. Portanto, o resultado de medição será  $(M \pm 0,46)$  mm, em que M é a aferição realizada com o instrumento NAJA 3D, utilizado no processo de medição.

## 7. ELEMENTO ESTRUTURAL: LONGARINA DIANTEIRA

Conforme abordado no capítulo 5 deste trabalho, o ensaio de colisão frontal consiste no choque do veículo contra uma barreira deformável, sob condições definidas em ambiente controlado. O bom resultado obtido no ensaio é consequência da qualidade estrutural do veículo. O chassi do tipo monobloco permite, além de uma redução no peso e melhor aproveitamento do espaço, a adição de elementos para absorver a energia do impacto (EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, 2013). Dentre os principais elementos responsáveis por dissipar esta energia estão as longarinas dianteiras. Este elemento está localizado imediatamente atrás do para-choque dianteiro, unido pela barra do para-choque. Em uma eventual colisão, a barra de para-choque é responsável pela distribuição de carga em impacto frontal entre as longarinas dianteiras, estabilizando seu carregamento. Dessa maneira tem-se o melhor aproveitamento da estrutura frontal para absorção de energia de impacto (BUGELLI, 2010). O fenômeno da flambagem, responsável pela dissipação da energia proveniente do impacto, é discutido no tópico 7.2. A figura 70 representa o caminho de dissipação por elementos frontais do veículo, dentre eles as longarinas dianteiras principais.



**Figura 70.** Elementos frontais para absorver a energia do impacto. Destacam-se as longarinas dianteiras principais, em verde na imagem.

(fonte: FELDMAN, 2014).

A fim de aprofundar os estudos acerca deste importante elemento, retirou-se a longarina dianteira principal menos afetada do Volkswagen *Up!*, após o processo de desmonte. A figura abaixo ilustra a carroceria do veículo após retirada da longarina. O recorte está indicado pela seta, à esquerda na imagem.



**Figura 71.** Chassi monobloco do Volkswagen *Up!*, após retirada da longarina dianteira menos afetada.

(autoral)

O perfil retangular e a forma da longarina retirada favorecem o fenômeno da flambagem e otimizam a absorção de energia cinética. Isto tornou-se um problema para a retirada dos corpos de prova, necessários para o ensaio de tração que, por sua vez é essencial para encontrar as constantes de ajuste do modelo de Johnson-Cook. A figura 72 abaixo ilustra a longarina dianteira direita, após ser retirada do veículo.



**Figura 72.** Longarina dianteira direita, menos afetada pela colisão frontal, retirada do veículo.

(autoral)

Fez-se possível a retirada de apenas quatro corpos de prova a partir de chapas retas da longarina. Estes corpos necessitaram ser modelados em tamanho reduzido, considerando a escassez de material com chapa plana na longarina. O corte dos quatro corpos de prova de dimensões reduzidas baseados em espécimes utilizados no trabalho de Wang et al. (2017) foi conduzido por meio de corte em jato d'água. Esta técnica de corte utiliza uma bomba de alta pressão para pressurizar água filtrada que, quando associada a material abrasivo, possui alto poder de corte. O corte ocorre no momento em que a força do jato supera a resistência à compressão do material. A grande vantagem do corte em jato d'água é evitar alterações por efeito térmico, ou seja, decorrentes da geração de calor, como ocorre em muitos outros processos de corte (ESSEL ENGENHARIA, 20--?). Desta forma o resultado do ensaio de tração não é afetado por variações térmicas derivadas do processo de corte, o que evita alterações no resultado final do ensaio e, neste caso, das constantes do modelo J-C. A figura 73 abaixo ilustra o processo de corte dos corpos de prova do Volkswagen Up!.



*Figura 73. Processo de corte à Jato d'água dos corpos de prova do Volkswagen Up!.*

(autoral)

## **7.1 ENSAIO DE TRAÇÃO DOS CORPOS PROVENIENTES DO VOLKSWAGEN UP! E MODELAGEM POR MEIO DA EQUAÇÃO DE J-C**

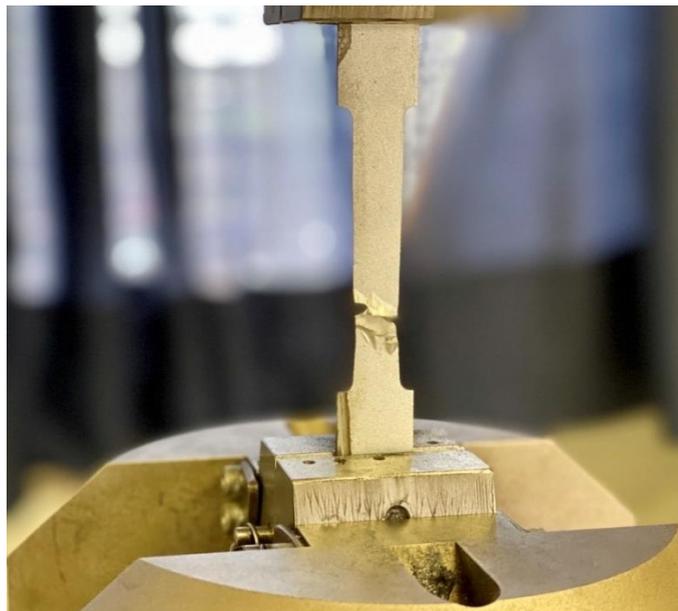
Os ensaios de tração dos corpos de prova foram conduzidos conforme os procedimentos retratados no tópico 2.3.4. Iniciou-se o ensaio com um dos corpos, posicionando-o entre as garras da máquina e verificando o alinhamento vertical, assim como a pressão de aperto do espécime. A figura 74 ilustra o corpo de prova do Volkswagen *Up!*, fixado no equipamento.



**Figura 74.** Corpo de prova do Volkswagen Up!, precedendo o ensaio quase estático.

(autoral)

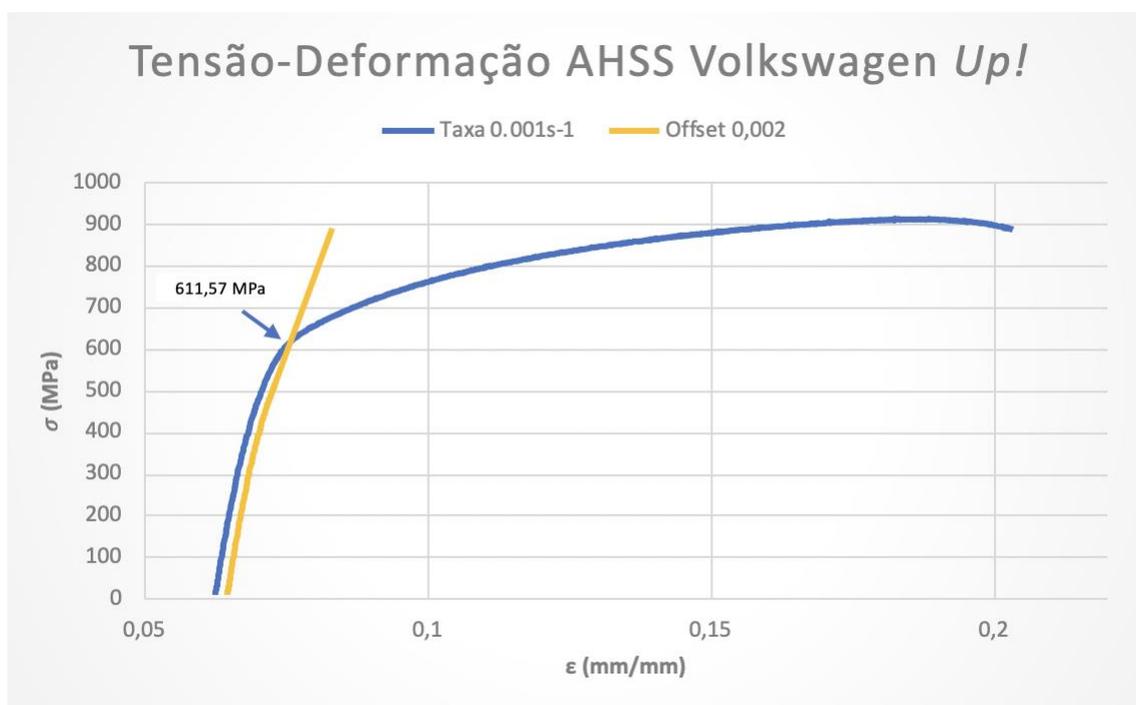
Objetivando-se encontrar as constantes do modelo de Johnson-Cook, iniciou-se com a taxa quase estática de  $0,001 \text{ s}^{-1}$  da mesma forma realizada com os corpos de prova de aço 1020. O momento após da ruptura do primeiro ensaio está ilustrado na figura abaixo.



**Figura 75.** Corpo de prova do Volkswagen Up!, após a ruptura pelo ensaio destrutivo.

(autoral)

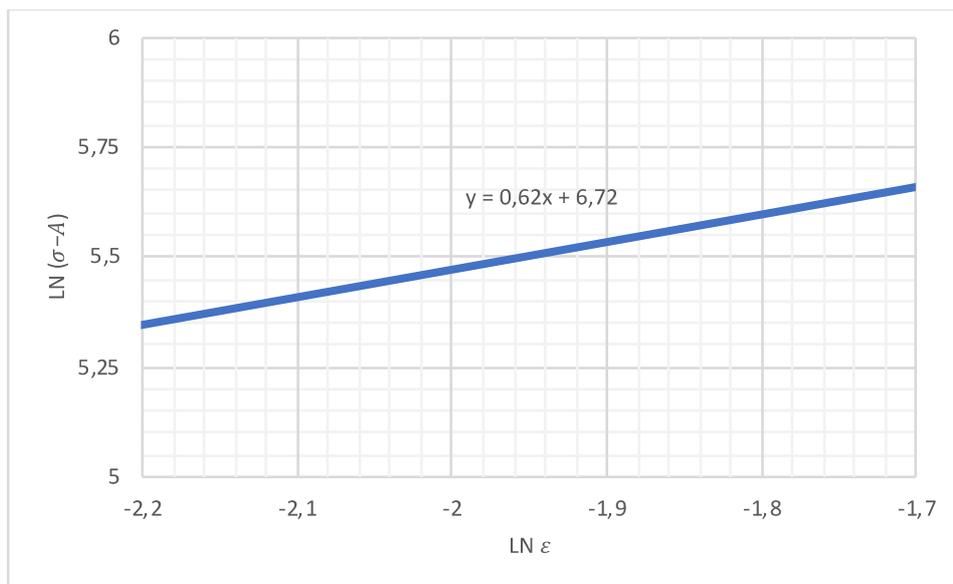
Este teste, cujo resultado (curva de tensão-deformação) está disposto por meio da figura 76, permite estimar as constantes A, B e n, conforme o tópico 2.3.5 deste trabalho, no qual encontrou-se A, B e n para o aço 1020. A constante A foi estimada por meio da tensão de escoamento do material: construiu-se uma linha paralela à fase elástica do gráfico tensão-deformação, apontando o valor de 611,57MPa.



**Figura 76.** Gráfico tensão-deformação do ensaio de tração do corpo de prova proveniente do Volkswagen Up!, na taxa de deformação de referência.

(autoral)

Traçando-se  $\ln(\sigma - A) - \ln \epsilon$  (figura 77), estimou-se as constantes B e n do material utilizado na longarina do Volkswagen Up!, seguindo o procedimento adotado no o tópico 2.3.5. Os valores encontrados foram de 829 e 0,62, respectivamente.



**Figura 77.** Gráfico  $\ln(\sigma - A) - \ln \epsilon$ , permitindo estimar as constantes  $B$  e  $n$ .

(autoral)

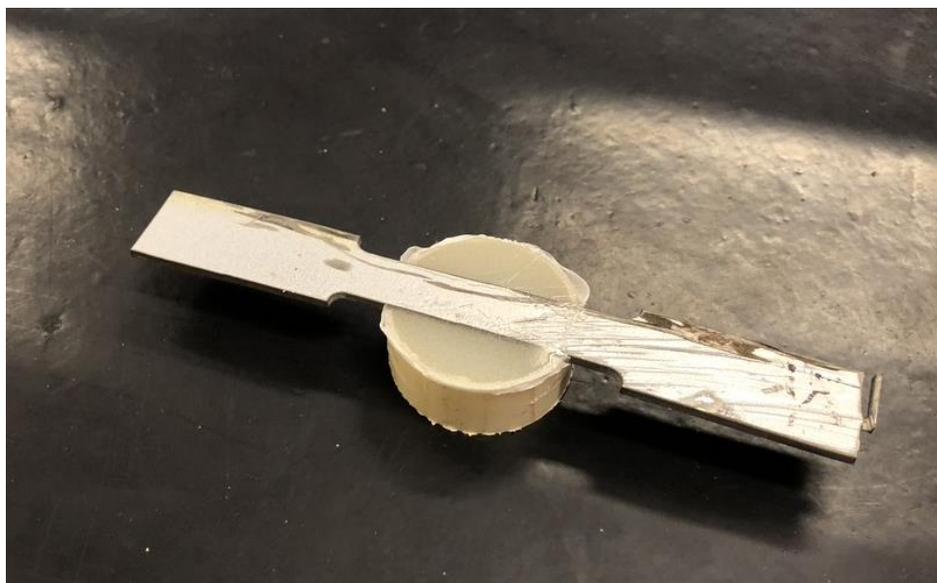
Encontrados os coeficientes de J-C sob taxa de referência ( $\dot{\epsilon}_0 = 0,001 \text{ s}^{-1}$ ), partiu-se para a preparação do ensaio referente ao segundo corpo de prova. Devido às imperfeições superficiais e o revestimento de tinta que podiam afetar o ensaio, foi necessário lixá-lo superficialmente. Embutiu-se o corpo de prova com o propósito de permitir o manuseio na lixa. Este processo, retratado na figura 78, foi realizado utilizando-se PVC e material polimerizante, fixando o espécime após curado.



**Figura 78.** Embutimento do corpo de prova utilizando-se PVC e material polimerizante.

(autoral)

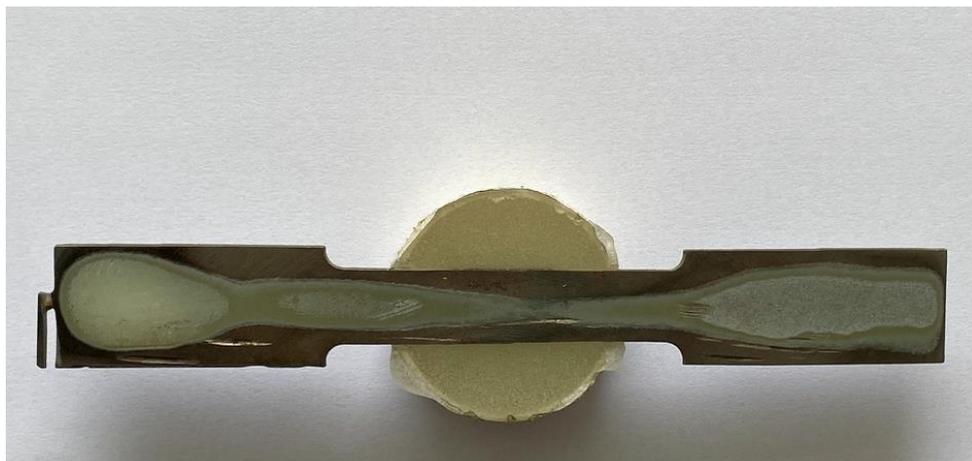
A conclusão do processo de cura é ilustrada pela figura 79 abaixo, com o corpo de prova embutido. Nela destacam-se as imperfeições superficiais, que devem ser removidas ou minimizadas, evitando a concentração de tensões que podem afetar o resultado do ensaio de tração.



**Figura 79.** Corpo de prova embutido, imediatamente antes do lixamento.

(autoral)

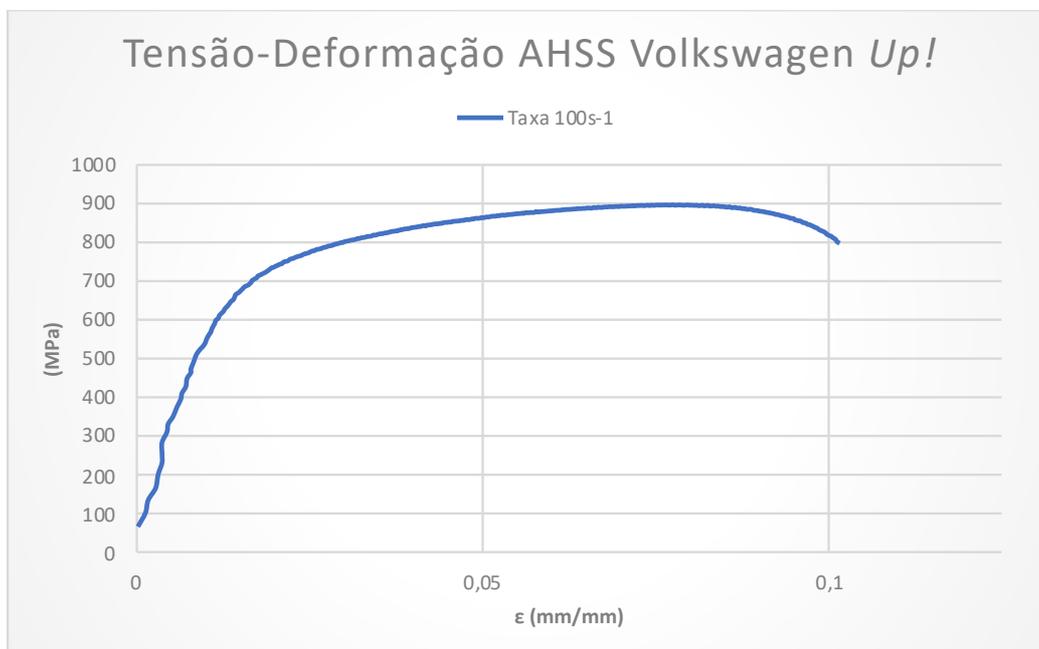
O processo de lixamento foi realizado utilizando lixas rotativas e refrigeração à água, conforme a figura 79. Iniciou-se com uma lixa de granulometria 220, finalizando com 800. Isto permitiu uma meticulosa remoção de grande parte dos riscos superficiais do corpo de prova. Durante todo o processo atentou-se para a espessura do corpo de prova, buscando-se desgastar o mínimo possível de material. O corpo de prova pronto para em ensaio está representado na figura abaixo.



**Figura 80.** Corpo de prova pós processo de lixamento.

(autoral)

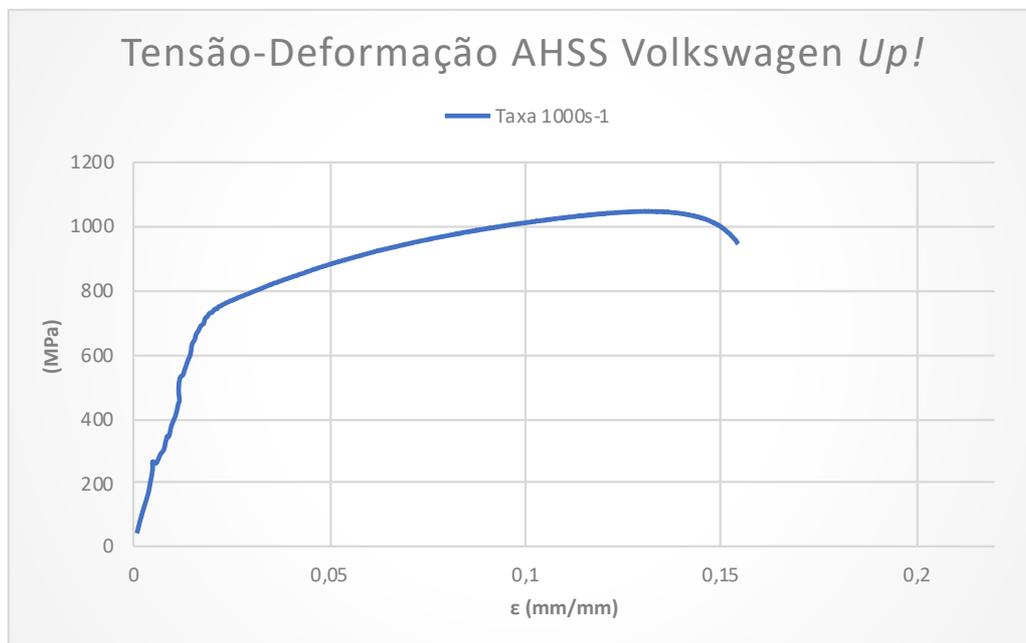
O ensaio do segundo corpo de prova foi conduzido a uma taxa diferente da taxa de referência, já que buscou-se estimar a constante C (sensibilidade à taxa de deformação do material). Conforme o ensaio do Aço 1020, utilizou-se a taxa de  $100 \text{ s}^{-1}$ . O resultado deste ensaio está disposto por meio da figura 81 abaixo.



**Figura 81.** Gráfico tensão-deformação do ensaio de tração do corpo de prova proveniente do Volkswagen Up!, na taxa de deformação  $100 \text{ s}^{-1}$ .

(autoral)

Após o ensaio do corpo de prova à taxa de  $100 \text{ s}^{-1}$ , ensaiou-se outros dois corpos, à taxa de  $500 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$ . A curva tensão-deformação à taxa de  $1000 \text{ s}^{-1}$  está representada na figura abaixo.

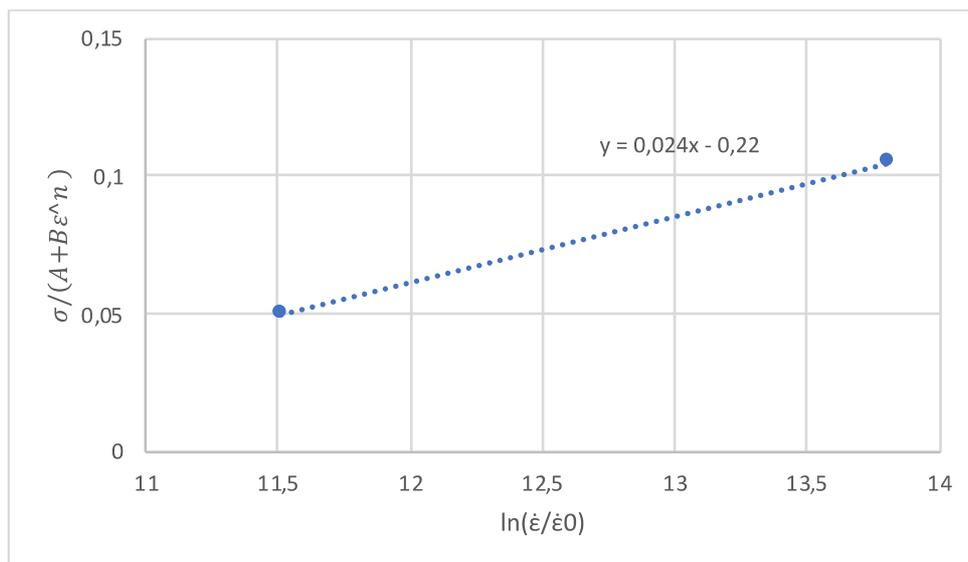


**Figura 82.** Gráfico tensão-deformação do ensaio de tração do corpo de prova proveniente do Volkswagen Up!, na taxa de deformação  $1000 \text{ s}^{-1}$ .

(autoral)

O resultado proveniente do ensaio de  $500 \text{ s}^{-1}$  foi discrepante em relação aos outros ensaios realizados com corpos de prova do Up!. De acordo com United States National Bureau of Standards (1930), quando o resultado do ensaio com um espécime varia mais de 10% em relação à média dos outros ensaios, ele deve ser descartado. Prosseguiu-se com o descarte deste resultado a fim de evitar alterações na determinação de constantes do modelo J-C.

Encontrados os valores de A, B e n, traçou-se a reta  $\frac{\sigma}{A+B\epsilon^n}$  vs  $\ln\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)$  que permitiu encontrar a constante C a partir de sua inclinação, conforme feito no tópico 2.3.5. Esta reta está representada na figura abaixo.



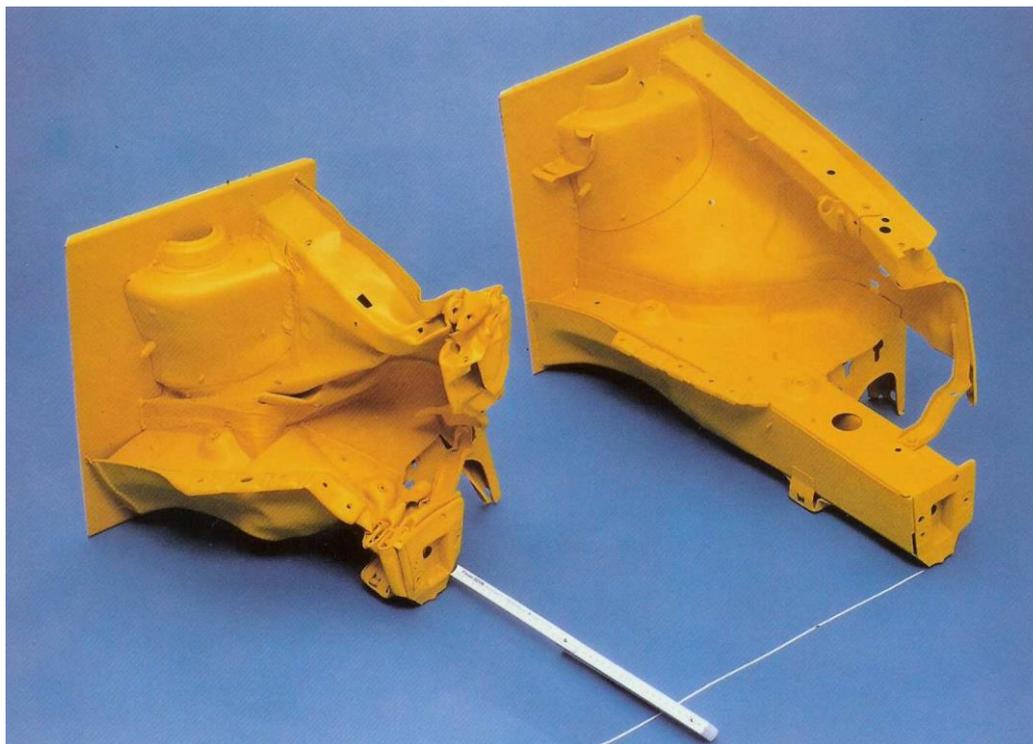
**Figura 83.** Gráfico  $\frac{\sigma}{A+B\dot{\epsilon}^n}$  vs  $\ln(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0})$  para o aço retirado da longarina do Volkswagen Up!.

(autoral)

Cada um dos dois pontos nesta reta representa a mediana dos valores para as séries de  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$  e sua inclinação indica a sensibilidade à taxa de deformação do material (constante C). O valor encontrado foi de 0,024. Este valor e os demais parâmetros serão explorados e discutidos no capítulo 8.

## 7.2 FENÔMENO DA FLAMBAGEM

A busca pela otimização da absorção da energia do impacto é crescente especialmente na indústria veicular, em que uma maior segurança para os ocupantes é desejável. Em uma eventual colisão, a estrutura do veículo deve ser rígida o suficiente para impedir intrusões excessivas, mas, ao mesmo tempo, não deve transmitir desacelerações acima dos níveis toleráveis ao corpo humano. Neste sentido, as longarinas dianteiras desempenham importante papel em impactos frontais. Por meio da deformação progressiva, absorve-se a parte da energia que seria transmitida aos ocupantes (BUGELLI, 2005). Esse fenômeno, conhecido como flambagem, é ilustrado pela figura abaixo.

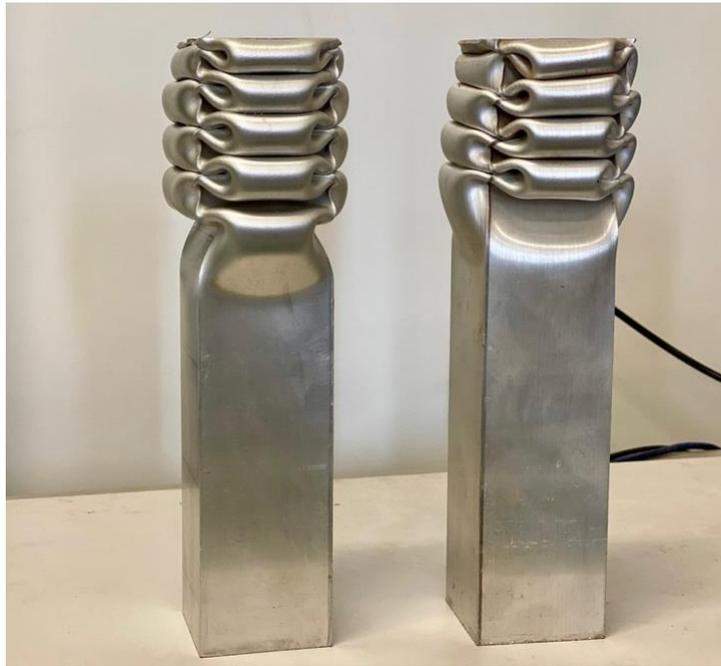


**Figura 84.** Deformação progressiva de uma longarina frontal.

(fonte: BUGELLI, 2005).

Há, de acordo com Jones (1997), três principais modos de flambagem: flambagem dinâmica progressiva, flambagem dinâmica plástica e flambagem global. A flambagem dinâmica progressiva (figura 85) é caracterizada por sucessivas dobras resultantes da deformação plástica, iniciadas próximas à extremidade submetida ao impacto.

O carregamento responsável pelo esmagamento da peça produz convulsões axissimétricas, que se resumem a uma resistência ao esmagamento em torno de um valor médio de carregamento, denominado  $P_m$ . As forças oriundas da inercia transversal não são significantes em um tubo de paredes finas e podem ser desprezadas. Neste caso, a forma de esmagamento se aproxima de uma flambagem sob carregamento quase-estático.



**Figura 85.** Exemplo de flambagem progressiva.

(autoral).

Esta forma de flambagem não é exclusiva de tubos circulares, perfis de seção quadrada se deformam de forma similar aos objetos que possuem seções circulares (LANGSETH *et al.*, 1994). A força inicial para desencadear a flambagem progressiva é menor para seções transversais quadradas se comparada a perfis circulares ou hexagonais (SETHY; PRAKASH, 2016). Pode-se explicar, assim, o fato de muitas longarinas e elementos *crash box* possuírem perfis quadrados ou retangulares, facilitando a barreira da deformação inicial e favorecendo a dissipação de energia.

O segundo modo listado, flambagem dinâmica plástica (figura 86), consiste na formação de dobras suaves ao longo de todo o comprimento do elemento afetado. Este modo de deformação é causado por impactos axiais a velocidades elevadas e provoca dobras menos evidentes, conforme a figura abaixo. Os lóbulos se formam e crescem simultaneamente, ao longo de todo o tubo.



**Figura 86.** Exemplo de flambagem dinâmica plástica.

(fonte: JONES, 1997).

O último modo citado, flambagem global, apresenta a menor eficiência em absorver energia proveniente do impacto. Há deformação ao redor de um único ponto, conhecido como rótula plástica. O elemento colapsa de forma estável, não havendo formação de dobras plásticas. A figura a seguir ilustra um exemplo de flambagem global.



**Figura 87.** Exemplo de flambagem global.

(fonte: JONES, 1997).

Um mesmo tubo pode deformar-se de diferentes modos, o que influencia a eficiência em absorver energia cinética. A flambagem dinâmica progressiva

oferece uma maior absorção por unidade de deslocamento. Há alguns fatores que afetam, para um mesmo elemento, a transição entre modos de deformação citados, como velocidade de impacto e comprimento do elemento. O aumento da velocidade de impacto faz com que os tubos longos se tornem mais estáveis sob carregamento, desenvolvendo o modo de flambagem progressiva em vez da global (ALVES, 2009).

O comportamento apresentado pela estrutura é, portanto, função da geometria, velocidade, tipo de carregamento e material envolvido. Além da posição do carregamento (referente ao elemento), que pode provocar mudanças no modo de flambagem para uma mesma velocidade (ALVES, 2009). A força atuante, que pode influenciar o modo de flambagem é estimada no tópico 7.3 a seguir.

### 7.3 ESTIMATIVA DA FORÇA ATUANTE SOBRE A LONGARINA

O impacto decorrente do ensaio de colisão frontal submete a longarina do veículo a grande esforço longitudinal. Apesar de não ser a função primária da longarina, ela deve ser capaz de se deformar a fim de preservar os ocupantes no caso de uma colisão de maior intensidade. A estimativa da força aplicada à longarina é importante para auxiliar em trabalhos futuros envolvendo simulações computacionais.

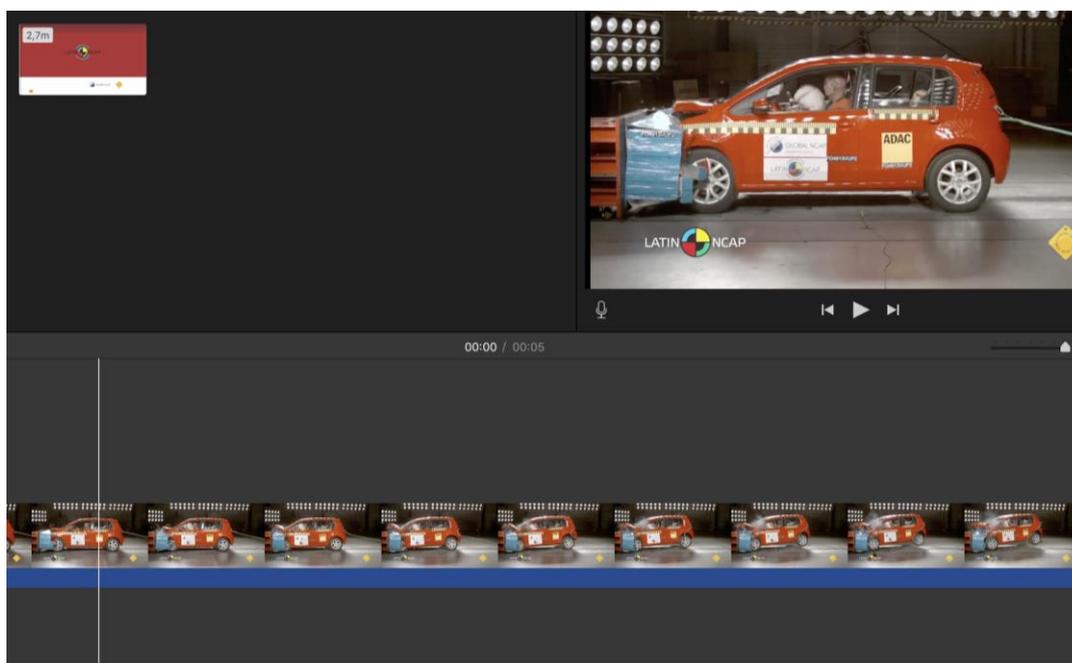
Conforme apresentado no tópico 4.3 deste trabalho, o *crash test* consiste na colisão do Volkswagen *Up!* com uma barreira deformável a uma velocidade de 64 km/h. Para este problema, desconsiderou-se a energia absorvida pelo para choque e considerou-se a velocidade inicial do veículo como zero. Isto permite a aplicação de conceitos de física para resolução deste problema. Pelo princípio do *impulso* e quantidade de movimento, tem-se:

$$m \times v_0 + \int_{k_0}^{k_1} F dt = m \times v_1 \quad (22)$$

Considerando a velocidade inicial do veículo igual a zero:

$$\int_{k_0}^{k_1} F dt = m \times v_1 \quad (23)$$

O intervalo de tempo do evento, pode ser encontrado utilizando vídeo-análise. Wrasse et al. (2014) utilizaram vídeo-análise para investigar o impulso em *crash tests*. Utilizando um software de edição de vídeo, encontraram uma escala de 1:60 em relação ao tempo real para um ensaio de colisão frontal do Latin NCAP. Desta forma, utilizou-se a análise de vídeo do *crash test* do Volkswagen Up! providenciada pelo Latin NCAP e, por meio de um software de edição, os tempos inicial e final do contato carro-barreira deformável foram registrados. Após isso, bastou-se multiplicar pelo fator de escala  $\frac{1}{60}$  para encontrar o tempo real envolvido, já que os vídeos são propositalmente retardados (a fim de facilitar a compreensão dos eventos do acidente). A imagem abaixo ilustra o software utilizado para mensurar o intervalo de tempo  $\Delta t$ .



**Figura 88.** Vídeo do crash test do Volkswagen Up!, em software de edição.

(autoral)

O intervalo de tempo entre o início e o final da colisão medido a partir do vídeo é de 6 segundos e 58 décimos de segundos, ou 6,58 segundos. Multiplicando-se pela escala  $\frac{1}{60}$ , temos o valor 0,10967 s. Adotou-se a velocidade de 55 km/h (15,27778 m/s) já que, conforme retratado no tópico 4.3.3 deste trabalho, o impacto contra a barreira deformável a 64 km/h equivale a acidentes

ocorridos a 55 km/h, que abrangem a maior parte das estatísticas em estradas. Tratando-se a equação 23, temos

$$F \times (k_1 - k_0) = m \times v_1$$

$$F \times 0,10967 = 953 \times 15,27778$$

$$F = 132759,4086 \text{ N}$$

$$F = 132,76 \text{ kN}$$

Para encontrarmos a força em cada longarina:

$$Fl = \frac{132,76}{2} = 66,38 \text{ kN}$$

ALVES (2019) encontrou, em sua aproximação analítica, o valor de 117,63 kN para um ensaio de colisão frontal realizado pelo Latin NCAP, mas com um Chevrolet Aveo. Os valores referentes à força sofrida pela estrutura do veículo estão próximos, indicando uma consistência no resultado.

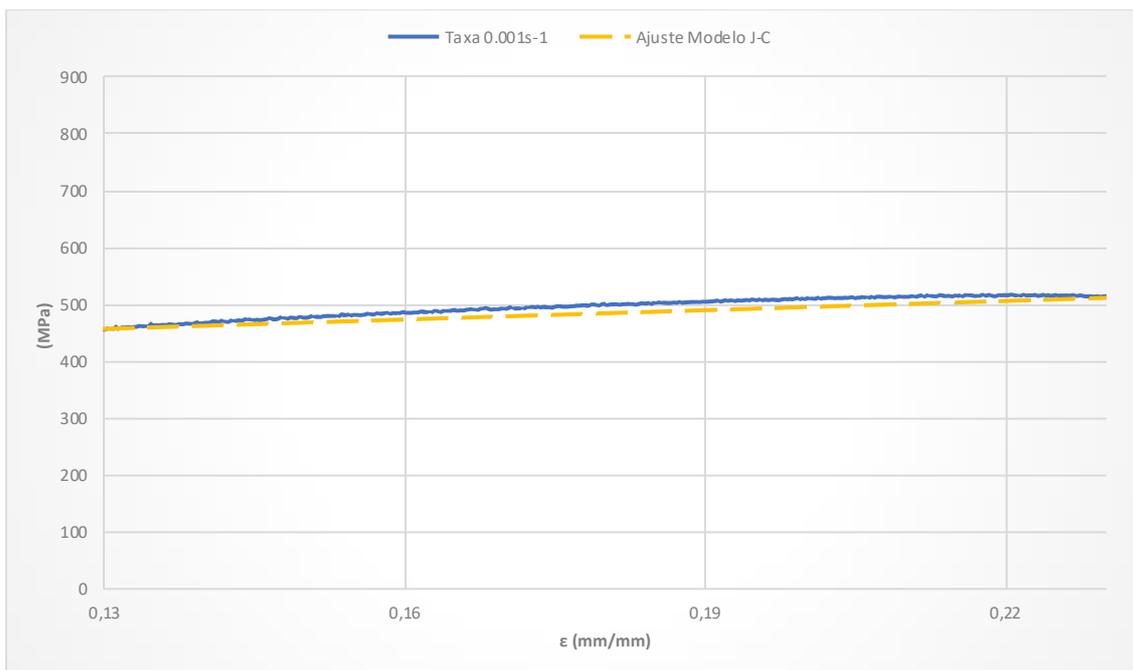
## 8. DISCUSSÃO

O modelo elastoplástico é essencial em um contexto de modelagem em elementos finitos, já que representa o comportamento do material. Isto é essencial em qualquer simulação computacional que envolva a plasticidade do material. Idealmente, 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). Neste trabalho, desconsiderou-se o efeito da temperatura já que, para o caso de aplicações estruturais na indústria automotiva, espera-se temperaturas de trabalho próximas à temperatura ambiente. Inicialmente, calibrou-se o modelo J-C para o Aço 1020, conforme os coeficientes encontrados por meio do ensaio de tração detalhado no tópico 2.3.5 deste trabalho: 381 MPa, 530 MPa, 0,02 e 0,949 para A, B, C e n, respectivamente. Substituindo-se estes valores na equação 1, original de Johnson-Cook (descrita no tópico 2.1), temos:

$$\sigma = [381 + 530 \varepsilon^{0,949}] [1 + 0,02 \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{0,001})]$$

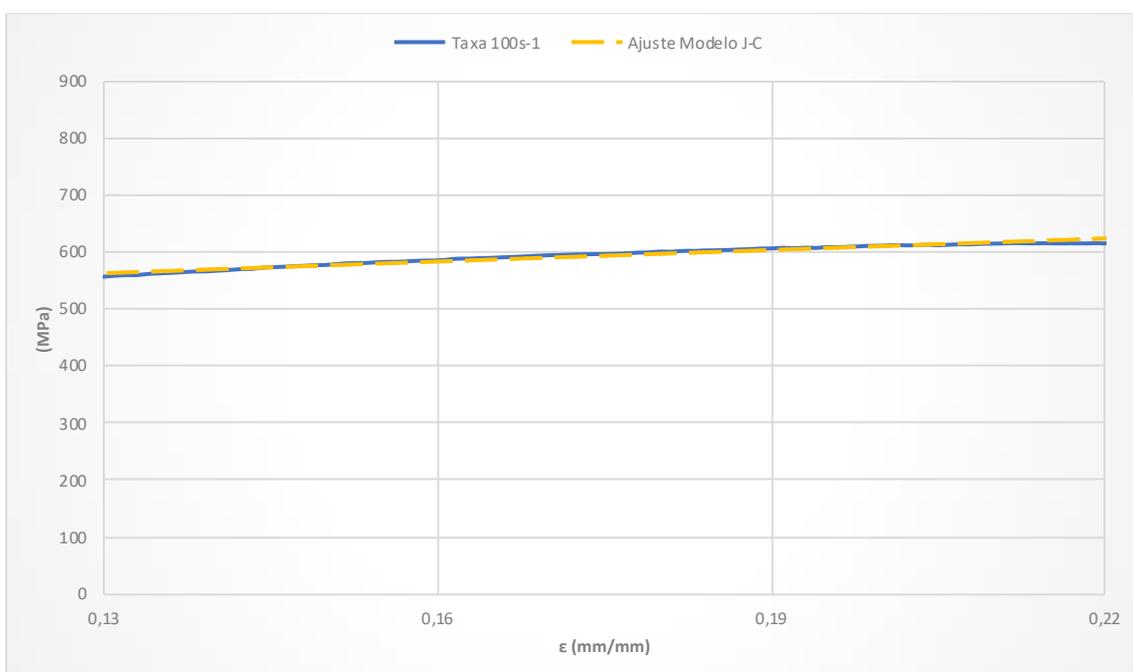
A partir desta equação, é possível encontrar os valores de tensão equivalente ( $\sigma$ ) a partir de um valor de deformação ( $\varepsilon$ ) para uma taxa de deformação conhecida ( $\dot{\varepsilon}$ ).

Os coeficientes encontrados estão em consonância com trabalhos que investigaram constantes do modelo de Johnson-Cook para aços com baixo teor de carbono, cujas constantes são comparáveis às do aço 1020. Obteve-se um bom ajuste em parte da faixa plástica do material por meio do modelo J-C. As figuras 89 a 92, dispostas a seguir, representam a comparação curva tensão-deformação experimental com o modelo matemático ajustado utilizando-se as constantes encontradas. As curvas tracejadas indicam a predição de valores da tensão equivalente ( $\sigma$ ) geradas pelo modelo J-C ajustado, ao substituir-se os valores de deformação ( $\varepsilon$ ) conhecidos por meio do ensaio empírico. Estas curvas estão dispostas junto ao resultado dos ensaios de tração, representadas por linhas sólidas.

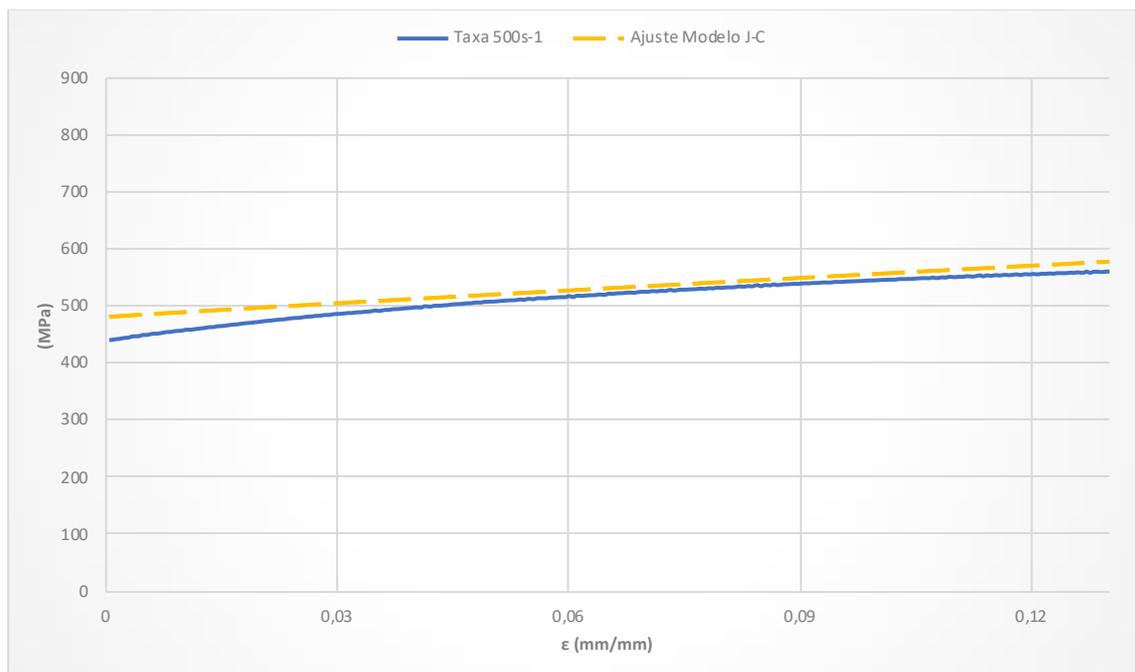


**Figura 89.** Comparação curva tensão-deformação experimental (em azul) com o modelo de Johnson-Cook (em amarelo tracejado) para a taxa  $0,001 \text{ s}^{-1}$ .

(autoral)

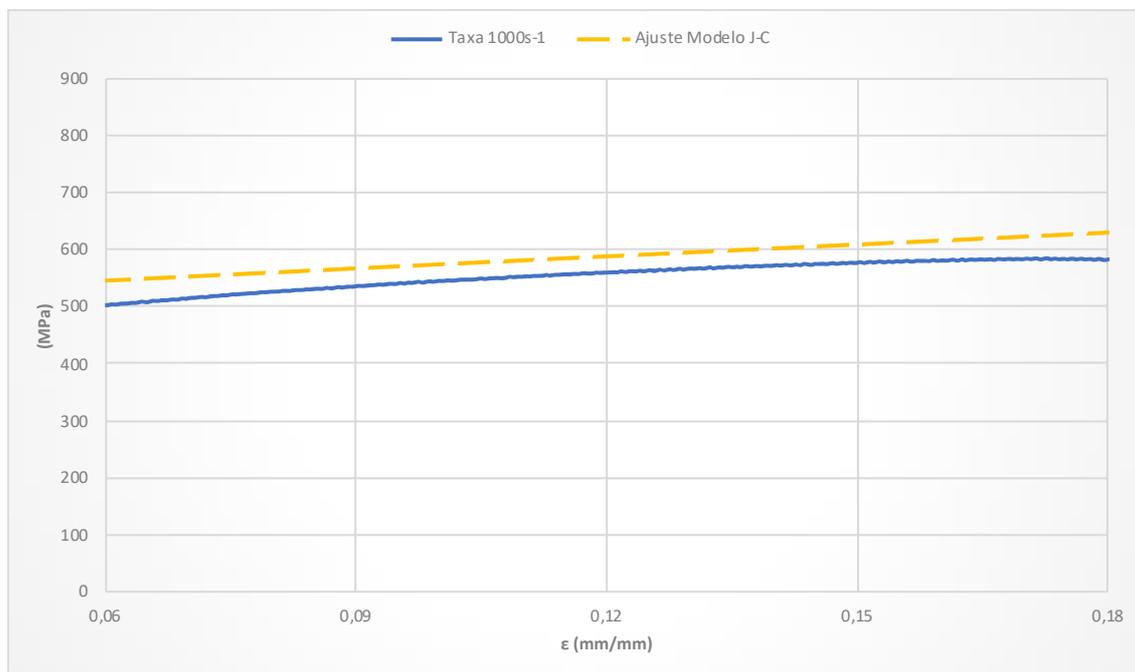


**Figura 90.** Comparação curva tensão-deformação experimental (em azul) com o modelo de Johnson-Cook (em amarelo tracejado) para a taxa  $100 \text{ s}^{-1}$ .



**Figura 91.** Comparação curva tensão-deformação experimental (em azul) com o modelo de Johnson-Cook (em amarelo tracejado) para a taxa  $500 \text{ s}^{-1}$ .

(autoral)



**Figura 92.** Comparação curva tensão-deformação experimental (em azul) com o modelo de Johnson-Cook (em amarelo tracejado) para a taxa  $1000 \text{ s}^{-1}$ .

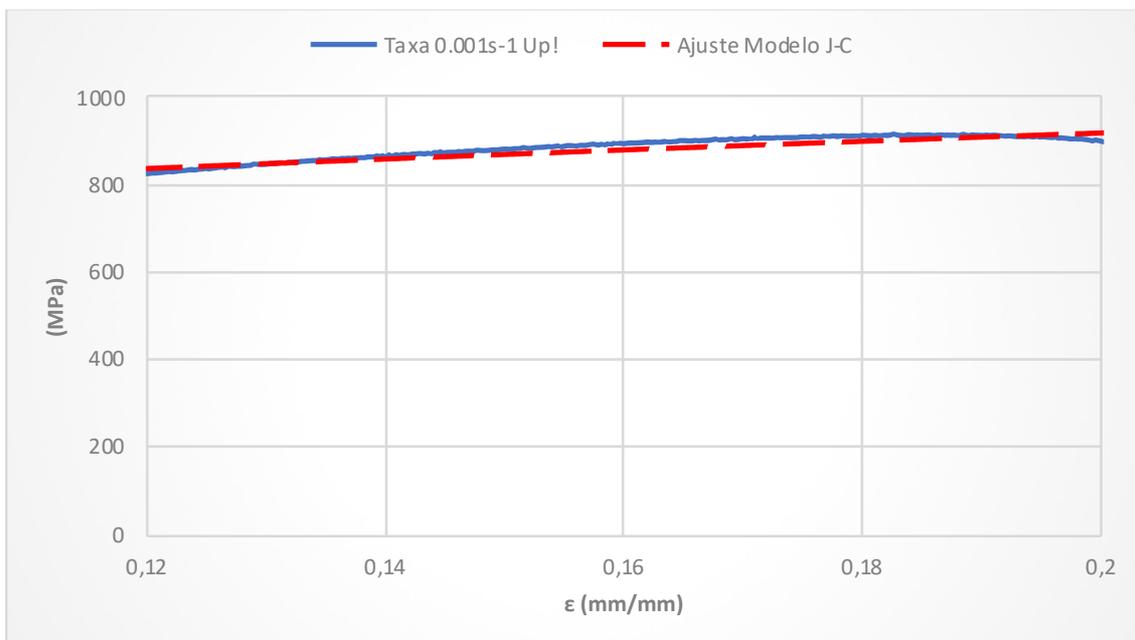
(autoral)

O modelo elastoplástico de Johnson-Cook também foi ajustado para o caso do aço proveniente da longarina do Volkswagen *Up!*, utilizando os

coeficientes encontrados após ensaio de tração no tópico 7.1 deste trabalho. A equação completa de J-C está representada abaixo:

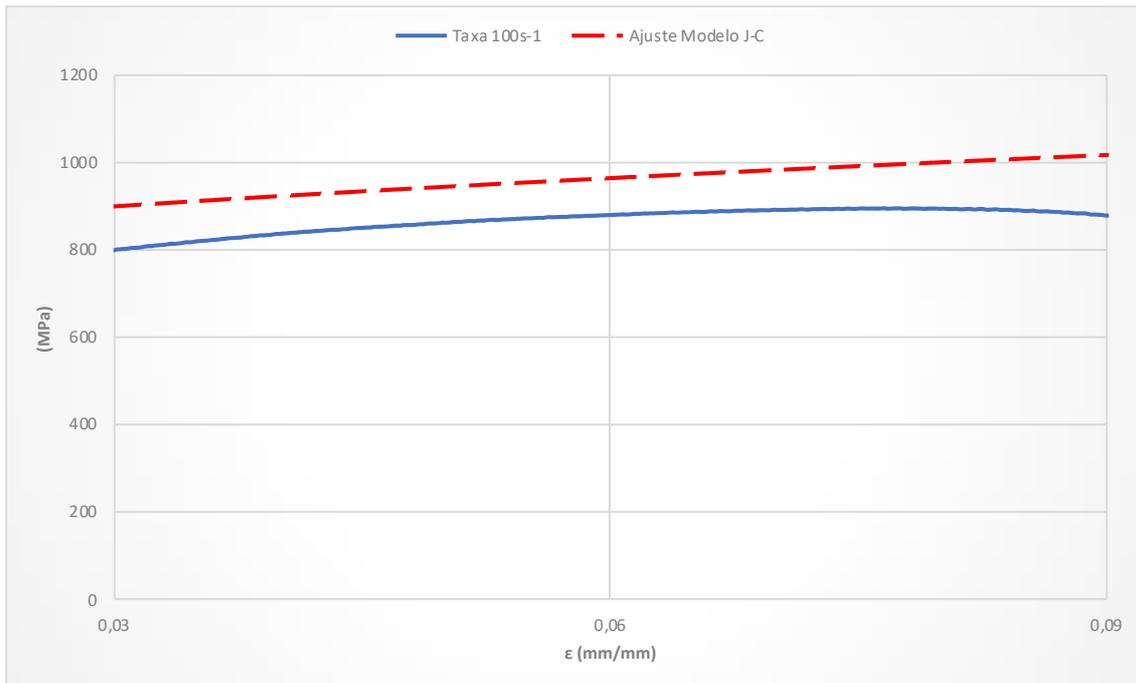
$$\sigma = [612 + 829 \varepsilon^{0,62}] [1 + 0,024 \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{0,001})]$$

Abaixo apresentam-se, por meio das figuras 93, 94 e 95 os resultados do ajuste: a comparação da curva tensão-deformação com o modelo matemático utilizando as constantes encontradas. Indicam uma predição adequada para este material, que será discutido a seguir.



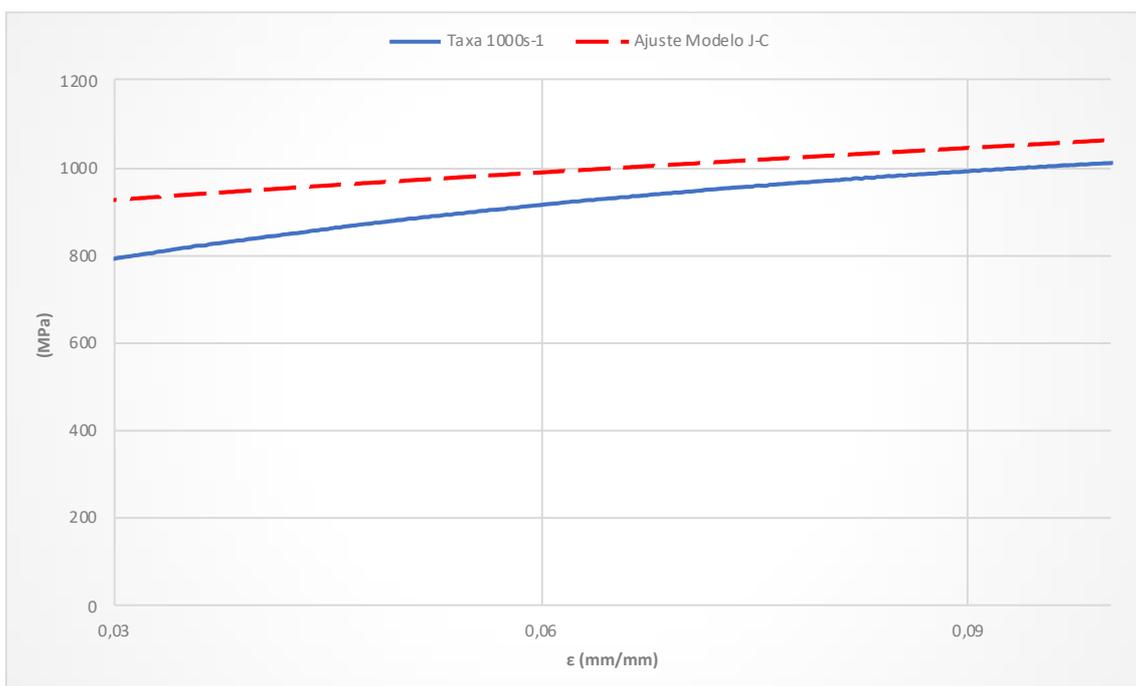
**Figura 93.** Comparação curva tensão-deformação experimental (em azul) com o modelo de Johnson-Cook (em vermelho tracejado) para a taxa  $0,001 \text{ s}^{-1}$ .

(autoral)



**Figura 94.** Comparação curva tensão-deformação experimental (em azul) com o modelo de Johnson-Cook (em vermelho tracejado) para a taxa  $100 \text{ s}^{-1}$ .

(autoral)



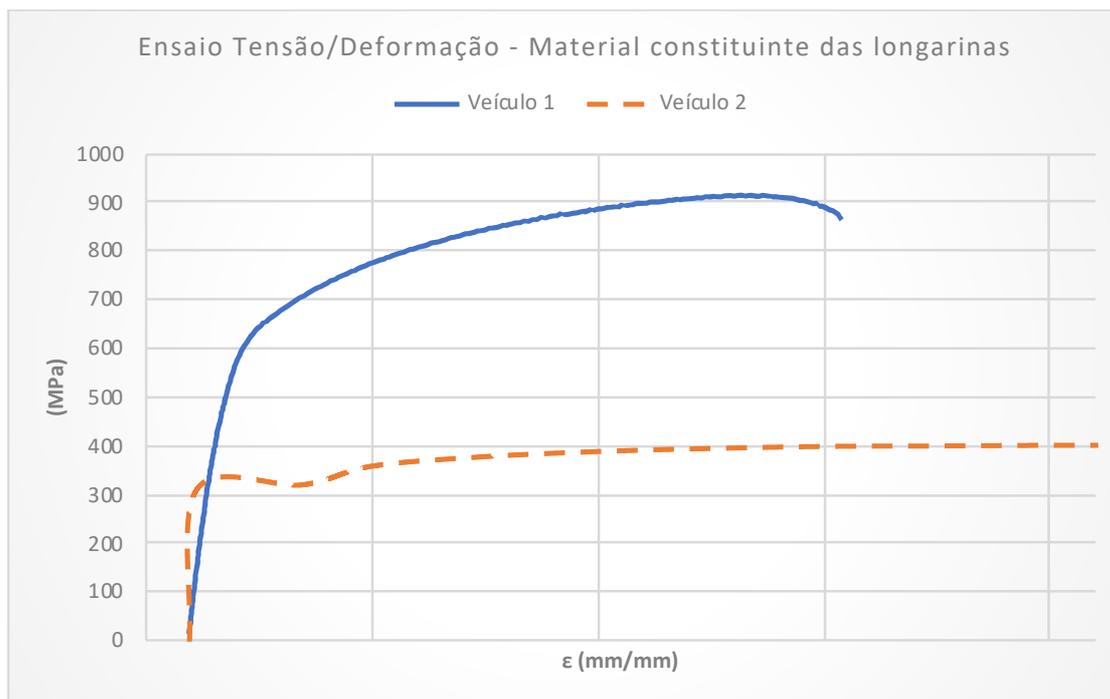
**Figura 95.** Comparação curva tensão-deformação experimental (em azul) com o modelo de Johnson-Cook (em vermelho tracejado) para a taxa  $1000 \text{ s}^{-1}$

(autoral)

As curvas acima demonstram uma boa concordância do modelo aplicado com o comportamento físico do aço estrutural da longarina do Volkswagen *Up!*. 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 à suas propriedades microestruturais. Isso permite um aumento expressivo de resistência, enquanto mantém uma boa conformabilidade. Em adição à alta tensão de escoamento inicial, aços AHSS apresentam um endurecimento proporcional à taxa de deformação, sustentando maiores forças em altas taxas. Este efeito representa um aumento de cerca de 100 MPa de resistência em taxas envolvidas em acidentes automotivos, o que contribui para o aumento da segurança do veículo (BALUCH; UDIN; ABDULLAH, 2014).

A contribuição da longarina em casos de impactos frontais em velocidades mais altas é significativa. Neste sentido é relevante demonstrar este aumento de segurança na prática, comparando-se o material proveniente de dois veículos da mesma categoria, testados pelo mesmo avaliador: o Latin NCap.

Este trabalho deu sequência à pesquisa iniciada por Alves (2019). Este autor retirou um corpo de prova de uma das longarinas do Chevrolet Aveo utilizado em um ensaio de colisão frontal. A figura 96, a seguir, compara o resultado do ensaio de tração do material proveniente do *Up!* (linha sólida) com o material proveniente do Aveo (linha tracejada), ensaiados no mesmo laboratório (laboratório de materiais da UnB Gama), sob as mesmas condições.



**Figura 96.** 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).

(autoral)

As propriedades físicas entre os materiais aplicados nos dois veículos são bastante distintas. O ensaio de tração deste material está representado na figura 96 abaixo, bem como a tabela 8, contendo as propriedades identificadas.

**Tabela 8.** Propriedades do aço proveniente da longarina do veículo analisado por este trabalho (veículo 1) e do veículo analisado por Alves (2019) (veículo 2).

Propriedades - Material constituinte das longarinas		
Veículo	1	2
Tensão de Escoamento	611,57 MPa	312,14 MPa
Tensão de Ruptura (verdadeira)	1015,21 MPa	477,67 MPa

(autoral)

A partir dos resultados do ensaio, infere-se que o material extraído do Volkswagen *Up!* se trata de um aço de alta resistência e alto desempenho, com propriedades superiores às encontradas na estrutura do Chevrolet *Aveo*. É importante ressaltar, porém, que o tipo de material é definido pelos processos de conformação que sofreu e os tratamentos recebidos, bem como sua composição específica.

Atualmente, muitos dos aços de alta resistência e alto desempenho empregados em estruturas automotivas são aços bifásicos. Aços bifásicos (dual phase) são compostos por uma liga com baixo teor de carbono, cuja microestrutura é formada por ferrita poligonal e cerca de 10 a 20% de martensita em formas de pequenas ilhas dispersas na matriz (FARIA NETO, 2015). A ferrita é formada por uma solução sólida de inserção de carbono em ferro alfa. É o constituinte mais mole dos aços, porém o mais tenaz, e o mais maleável. Já a martensita é uma solução sólida supersaturada de carbono em ferro alfa. É o constituinte estrutural da têmpera dos aços e sua microestrutura apresenta-se na forma de agulhas cruzadas. Da mesma forma que a ferrita, os átomos de ferro estão nos vértices. Os átomos de carbono estão nas faces e nas arestas, tornando sua rede distorcida. Esta distorção da rede é responsável pela dureza da martensita (UFPR, 20--?). Por meio de sua microestrutura, este tipo de aço reúne duas propriedades antagônicas, boa resistência e conformabilidade, o que permite seu amplo uso na indústria automotiva. A figura 97 ilustra a microestrutura de um aço bifásico, formada prioritariamente pela matriz de ferrita com martensita.

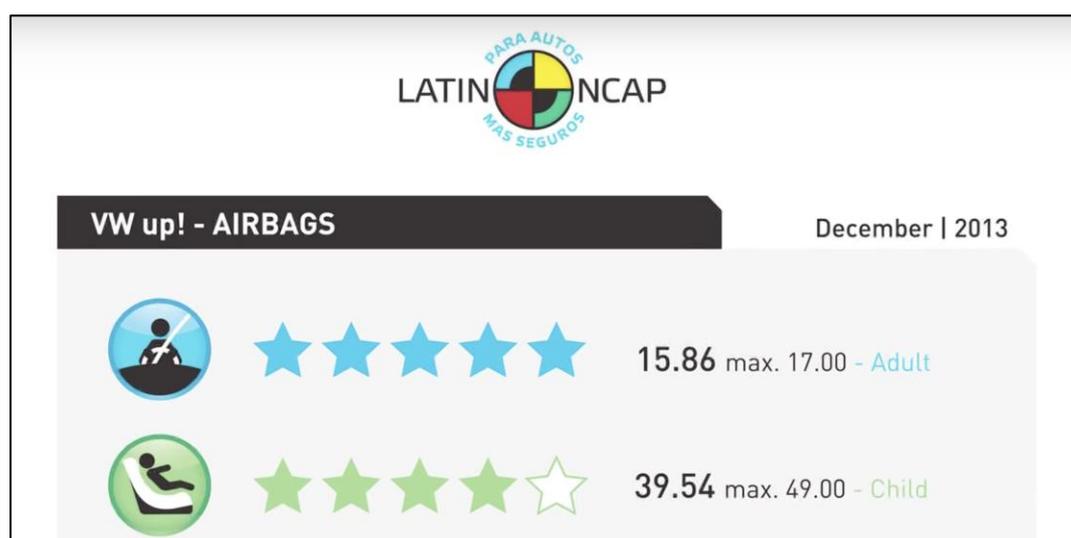
O desenvolvimento dos aços DP foi resultado da demanda por parte da indústria automotiva por classes de aço com alto alongamento de tração para garantir a conformabilidade, alta resistência à tração para estabelecer resistência à fadiga e colisão, baixo teor de liga para garantir a soldabilidade sem influenciar o custo de produção. Esta combinação favorável de propriedades, combinada à um alto endurecimento quando submetido à deformação implica em um alto potencial de absorção de energia, melhorando a segurança em caso de colisões (*crashworthiness*) (GRANBOM, 2010). Além dos elementos principais para a dissipação da energia de um acidente, como o crash box, o material e a geometria das longarinas frontais podem contribuir para um aumento da segurança no caso de colisões frontais em velocidades mais altas. O Chevrolet

Aveo, ensaiado pelo Latin NCAP conforme normas descritas no tópico 4.3 deste trabalho obteve nota zero na classificação de segurança para adultos (figura 98). A longarina deste veículo é composta por um material cuja tensão de escoamento e de ruptura se assemelham à de um aço convencional, conforme Alves (2019). Enquanto isso, o Volkswagen *Up!*, ensaiado nas mesmas condições, possui um material constituinte da longarina cujas propriedades analisadas são superiores. Este veículo obteve nota máxima (nota 5) (figura 99) na classificação de segurança para adultos, indicando uma possível correlação entre o material constituinte da longarina e a segurança oferecida aos ocupantes.



**Figura 97.** Notas atribuídas ao veículo Chevrolet Aveo pela Latin NCAP.

(fonte: CHEVROLET..., 2017)



**Figura 98.** Notas atribuídas ao veículo Volkswagen Up! pela Latin NCAP.

(fonte: VW..., 2013)

Considerando as vantagens em termos de baixo peso e absorção de energia, aços bifásicos são objetos de constante estudo considerando a atual alta demanda por parte da indústria automotiva (GRANBOM, 2010). Nesta vertente, um dos objetivos deste trabalho é encontrar as constantes do modelo de Johnson-Cook para um aço de alta resistência aplicado em um veículo vendido atualmente em diversos mercados: O Volkswagen *Up!*. Estas constantes podem ser aplicadas em *softwares* de modelagem elasto-plástica a fim de viabilizar e contribuir com simulações computacionais na área do desenvolvimento de materiais. Dito isso, as constantes do modelo J-C encontradas para o aço constituinte das longarinas frontais do *Up!* estão dispostas por meio da tabela 9 abaixo.

**Tabela 9.** Constantes da equação de J-C encontradas para o material retirado das longarinas frontais Volkswagen *Up!*.

Constantes do modelo de Johnson-Cook			
A	B	C	n
612 MPa	829 MPa	0,024	0,62

(autoral)

Estes resultados são comparáveis a trabalhos como o de Vedantam et al. (2006) que encontraram os valores de 430, 823,6, 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 *Up!* possui uma tensão de escoamento maior do que o aço analisado por Vedantam *et al.* (2006). As boas propriedades mecânicas, constatadas no aço ensaiado no tópico deste trabalho podem indicar que os aços de alta resistência aplicados na estrutura do veículo auxiliam itens de segurança passivos, contribuindo para um aumento do desempenho geral do veículo na proteção dos ocupantes. As constantes encontradas são relevantes em programas de simulação de elementos finitos e podem ser utilizadas com a finalidade de melhorar a simulação, otimizando os resultados. O ambiente de um desses programas (*Ansys 18*), está representado na figura abaixo. A seta vermelha

indica o local para inserir as constantes do modelo de Johnson-Cook no software.

The screenshot displays the 'Properties of Outline Row 3: Structural Steel' dialog box in Ansys 18. The 'Johnson Cook Strength' property is selected and expanded, showing a table for inputting constants. A red arrow points to the 'Johnson Cook Strength' property in the main dialog box.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Initial Yield Stress (Pa)	Hardening Constant (Pa)	Hardening Exponent	Strain Rate Constant	Thermal Softening Exponent	Melting Temperature (C)	Reference Strain Rate (/sec)
2							1

**Figura 99.** Ambiente do software Ansys 18, explicitando o local de inserção das constantes encontradas.

(autoral)

## 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer deste trabalho, valiosas informações acerca da importância do material constituinte do chassi em colisões automotivas puderam ser observadas. Por meio do desmonte completo da carroceria do Volkswagen *Up!* proveniente de ensaio de colisão frontal realizado pela Latin NCAP, a medição dos deslocamentos estruturais da carroceria foi possível. Utilizando um equipamento de medição 3D, foram medidos 28 pontos distribuídos por toda a estrutura, gerando coordenadas tridimensionais. Essas coordenadas foram comparadas à referência de um chassi inalterado por meio de um software, o que explicitou os deslocamentos sofridos pela estrutura durante a colisão. Os pontos medidos com maior deslocamento são referentes à longarina dianteira, do lado do motorista. Os maiores deslocamentos estruturais registrados foram: 255 milímetros ao longo do eixo X e 141,4 milímetros ao longo do eixo Z. Ao comparar com as medições em um veículo, que recebeu nota zero no *crash test*, foram encontradas evidências de maior eficiência da estrutura do *Up!* em dissipar a energia proveniente da colisão frontal, deformando menos pontos referentes ao habitáculo.

Além dos deslocamentos estruturais medidos, o acesso à longarina foi facilitado, permitindo a retirada dos corpos de prova. Apesar das dificuldades relacionadas à retirada de corpos de provas planos de um elemento de geometria complexa (longarina), os ensaios foram conduzidos e possibilitaram encontrar as constantes do modelo elastoplástico de Johnson-Cook.

Desejando-se verificar uma simulação numérica das longarinas dianteiras do *Up!*, para colisões mais severas (casos em que se pode desprezar o *crash box*) dispõe-se das seguintes informações:

- É possível realizar um ensaio quase-estático, já que é possível desprezar a inércia transversal dos tubos (longarinas), conforme discutido na seção 7.2. Neste caso, a flambagem dinâmica progressiva se aproxima de um ensaio quase-estático.
- Foi possível estimar o carregamento inicial sobre a longarina, aplicando-se conceitos de física (item 7.3)

- Com espaço amostral reduzido, foi possível estimar as variáveis do modelo visco-elastoplástico de Johnson-Cook. Estes dados podem ser aplicados a fim de auxiliar a melhoria da qualidade da simulação.

## 9.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos que objetivem estudos acerca de aços empregados na indústria automotiva utilizando o modelo de Johnson-Cook podem utilizar-se dos resultados deste trabalho como referencial inicial ou meio de comparação a nível de caracterização das propriedades do material. Os coeficientes encontrados podem ser utilizados em softwares de elementos finitos como o *Ansys Workbench*, facilitando a modelagem do material constituinte das longarinas do veículo analisado.

Os resultados deste trabalho, bem como os conceitos explorados, poderão ser também utilizados por trabalhos futuros que visem relacionar os deslocamentos estruturais encontrados com as forças envolvidas em um evento de colisão frontal. Sugere-se partir das variáveis encontradas neste trabalho, como força atuante sobre a longarina e deslocamentos estruturais medidos pelo equipamento *Celette NAJA 3D*. Efeitos como dissipação de energia pelo choque contra a barreira deformável e pela longarina podem ser explorados por trabalhos futuros, a fim de compreender na totalidade o evento da colisão frontal.

Os copos de prova foram retirados de forma a preservar a longarina frontal menos afetada pela colisão retirada do veículo. A compressão mecânica deste elemento é uma linha de pesquisa interessante. O tópico 7.2 deste trabalho pode auxiliar com referências bibliográficas acerca da caracterização da flambagem, a fim de identificar o modo de deformação (flambagem dinâmica progressiva, dinâmica plástica ou global). Trabalhos que visem a correlação da tensão imposta à deformação sofrida podem explorar a dissipação da energia pela longarina, relacionando-a com a segurança do modelo em colisões frontais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTAZZI, A. G. Jr. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*. 2008. Editora Manole.

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.

ALVES, GILVANIA TERTO. *Avaliação Da Absorção De Energia De Impacto: Uma Abordagem Baseada Em Testes Com Estruturas Similares*. 2009. Dissertação (Mestre Em Engenharia Mecânica) - Mestrando, [S. L.], 2009.

ALVES M., JONES, N., *Failure of beams using damage mechanics: Part II - application*. International Journal of Impact Engineering, 2002.

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

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.

ANDRADE, Leonardo. *Volkswagen up! passa por novo teste no Latin NCAP e mantém 5 estrelas*. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://www.noticiasautomotivas.com.br/volkswagen-up-passa-por-novo-teste-no-latin-ncap-e-mantem-5-estrelas/>. Acesso em: 20 fev. 2019.

ASM INTERNATIONAL. *Introduction to Tensile Testing*. Tensile Testing, Second Edition. [S. l.: s. n.], 2004. cap. 1.

ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*: Designation: E8/E8M – 16a. [S. l.: s. n.], 2016.

AUTOCAR. *Frankfurt show: VW Up GT concept*. [S. l.], 13 set. 2011. Disponível em: <https://www.autocar.co.uk/car-news/frankfurt-motor-show/frankfurt-show-vw-gt-concept>. Acesso em: 28 mar. 2019.

AUTOPRESS. *Latin NCAP: Questão de sobrevivência: Resultados do Latin NCAP podem despertar interesse do consumidor e servir como estímulo para a melhoria da segurança nos veículos nacionais*. [S. l.: s. n.], 1 nov. 2010. Disponível em: <https://www.webmotors.com.br/wm1/tecnologia/latin-ncap-questao-de-sobrevivencia/>. Acesso em: 11 mar. 2019.

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.

BRAR, Nachhatter; JOSHI, Vasant; HARRIS, Bryan. *Constitutive Model Constants for Low Carbon Steels from Tension and Torsion Data*. American Physical Society, 15th APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter, [S. l.], p. 1111, 24 jun. 2007.

BUGELLI, Eduardo Barjud. *Estudo Do Impacto Axial Em Tubos Para Ensaio Em Segurança Veicular*. 2005. Monografia (Engenheiro Mecânico) - Graduando, [S. l.], 2005.

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.

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.

CADONI, E. *et al.* *Strain rate behaviour of multi-phase and complex-phase steels for automotive applications*. EPJ Web of Conferences, [s. l.], n. 26, 2012. Disponível em: [https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2012/08/epjconf\\_dymat2012\\_05003/epjconf\\_dymat2012\\_05003.html](https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2012/08/epjconf_dymat2012_05003/epjconf_dymat2012_05003.html). Acesso em: 2 out. 2019.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Oitava. ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

CELETTE. *Rhone 4.2T*. [S. l.], 2015. Disponível em: <http://www.celette.com/our-products/alignment-and-straightening-systems/bench/rhone-4-2t/>. Acesso em: 12 abr. 2019.

CELETTE. *CAR BODY EQUIPMENT: Measuring and Straightening Systems*. [S. l.: s. n.], 2018.

COSTA, Paulo G. *A BÍBLIA DO CARRO*. [S. l.: s. n.], 2001.

DOMINGUES, Cláudio, Marcelo; LUCINDA, Cláudio. *Demanda por Automóveis e as Avaliações de Segurança do Latin NCAP*. Revista Brasileira de Economia, [S. l.], p. Vol. 72, No. 3, jul. 2018.

ESSEL ENGENHARIA. *Corte com jato de água*. AULA 61. ed. [S.l.: s. n.], 20--?. Disponível em: <https://essel.com.br/cursos/material/01/ProcessosFabricacao/61proc.pdf>. Acesso em: 15 out. 2019.

EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION. *The Aluminum Automotive Manual*. [S. l.: s. n.], 2013.

EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME. *OFFSET DEFORMABLE BARRIER FRONTAL IMPACT TESTING PROTOCOL*. [S. l.: s. n.], 2015.

FARIA NETO, ANTONIO REIS. *Aços avançados de alta resistência: avaliação da microestrutura e propriedades dos aços DP 600 E DP 780*. 2015. Trabalho de Graduação (Engenharia Mecânica) - Graduando, [S. l.], 2015.

FELDMAN, Boris. *Segurança veicular*. [S. l.], 2014. Disponível em: <https://bateuvida.com.br/seguranca-veicular>. Acesso em: 2 set. 2019.

FENABRAVE. *Índices e Números - Emplacamentos Novos*. [S.l.], 2019. Disponível em: <http://www.fenabreve.org.br/portal/conteudo/emplacamentos>. Acesso em: 20 fev. 2019.

FURAS, Alejandro; SANDNER, Volker. *The Pilot Phases of Latin NCAP: how far is the market from improvement?*. *Mobility in a Globalised World 2012*, [S. l.], p. 38-46, 2013.

FURLAN, Rodrigo. *Avaliações do Latin NCAP serão mais rigorosas a partir de 2016*. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/avaliacoes-do-latin-ncap-serao-mais-rigorosas-a-partir-de-2016/>. Acesso em: 11 abr. 2019.

GAZETA ONLINE. *Duplicações não saem e rodovias seguem fazendo vítimas no Estado*. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.gazetaonline.com.br/noticias/cidades/2017/06/duplicacoes-nao-saem-e-rodovias-seguem-fazendo-vitimas-no-estado-1014066529.html>. Acesso em: 20 fev. 2019.

GLOBAL NCAP. *Creating a Global Market for Vehicle Safety*. [S. l.: s. n.], (2017).

GRANBOM, Ylva. *Structure and mechanical properties of dual phase steels: An experimental and theoretical analysis*. 2010. Tese de Doutorado (Materials Science and Engineering) - Doutorando, [S. l.], 2010.

I7 NOTÍCIAS. *Carros colidem frontalmente e deixam 7 pessoas feridas na rodovia Paraguaçu/Quatá*. [S. l.], 2018. Disponível em: <http://www.i7noticias.com//paraguacu/noticia/30784/carros-colidem-frontalmente-e-deixam-7-pessoas-feridas-na-rodovia-paraguacu-quata>. Acesso em: 20 fev. 2019.

IKEDA, Toshiaki. *Segurança Veicular Dispositivos De Segurança Passiva – Descrição E Recomendações*. 2012. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia Automotiva) - Pós-Graduando, São Caetano do Sul, 2012.

INSTRON. *Servo-hydraulic - Fatigue Testing Systems*. [S. l.: s. n.], 2016.

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: 10.1243/09544070JAUTO26

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.

KULLGREN, Anders; LIE, Anders; TINGVALL, Claes. *Comparison Between Euro NCAP Test Results and Real-World Crash Data*, Traffic Injury Prevention, 11:6, 587-593, 2010.

KUZIYAK, R.; KAWALLA, R.; WAENGLER, S. *Advanced high strength steels for automotive industry*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, [s. l.], v. 8, n. 2, 2008.

LATIN AMERICAN & CARRIBEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME. ASSESSMENT PROTOCOL – ADULT OCCUPANT PROTECTION. [S. l.: s. n.], Version 2.0, 2013.

LATIN NCAP. *Chevrolet Aveo + 2 Airbags*. [S. l.], 17 dez. 2017. Disponível em: <https://www.latinncap.com/po/resultado/99/chevrolet-aveo+-2-airbags>. Acesso em: 1 jul. 2019.

LATIN NCAP. *Nossos testes: Passageiro Adulto*. [S. l.], (201-?). Disponível em: <https://www.latinncap.com/po/nossos-testes/passageiro-adulto>. Acesso em: 3 maio 2019.

LATIN NCAP. *O VW up! passa a fazer parte do clube de carros “cinco estrelas” em segurança de adultos do Latin NCAP*. [S. l.], 13 jan. 2014. Disponível em: <https://www.latinncap.com/po/area-imprensa/noticia/852d407473feff/o-vw-up-passa-a-fazer-parte-do-clube-de-carros-cinco-estrelas-em-seguranca-de-adultos-do-latin-ncap>. Acesso em: 17 jan. 2019.

LATIN NCAP. *VW up! consegue igual resultado em teste de auditoria*. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://www.latinncap.com/po/area-imprensa/noticia/854f7363873c16/vw-up-consegue-igual-resultado-em-teste-de-auditoria>. Acesso em: 31 mar. 2019.

LATIN NCAP. *Quem somos*. [S. l.], 2011. Disponível em: <https://www.latinncap.com/po/quem-somos>. Acesso em: 5 fev. 2019.

LIE, Anders; TINGVALL, Claes. *How Do Euro NCAP Results Correlate with Real-Life Injury Risks? A Paired Comparison Study of Car-to-Car Crashes*, Traffic Injury Prevention, 3:4, 288-293, 2002.

LLOYD, Louise *et al.* *Estimating the potential impact of vehicle secondary safety regulations and consumer testing programs on road casualties in emerging markets*, Journal of Transportation Safety & Security, 149-177, 2017.

LANGSETH, M. *et al.*, *Energy absorption in axially loaded square thin-walled aluminium extrusions*, Structures Under Shock Impact III (SUSI III), pp. 401-410, 1994.

MILANI, A.S. *et al.* An improved multi-objective identification of Johnson–Cook material parameters. *International Journal of Impact Engineering*, [S. l.], v. 36, p. 294-302, 15 maio 2008.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL. *Anuário Estatístico de Segurança Rodoviária*, [S. l.], 2017.

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](http://www.mdpi.com/journal/materials). Acesso em: 16 out. 2019.

N. JONES. *Structural Impact*, CUP, 1997

NHTSA. *Hybrid III 50th Percentile Male*. May 28, 2010. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20100528110712/http://www.nhtsa.gov/Research/Hybrid%2BIII%2B50th%2BPercentile%2BMale> Acesso em: 30 Junho 2019.

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.

OLIVEIRA, Mariana Bresciani Annicchino. *Estudo Comparativo Do Avanço Tecnológico Da Segurança Veicular No Brasil Em Relação Aos Demais Mercados*. 2013. Trabalho de Conclusão do Curso (Pós-Graduação em Engenharia Automotiva) - Pós-graduando, São Caetano do Sul, 2013.

PAINE, Michael *et al.* *Injury and Structural Trends During 12 Years Of Ncap Frontal Offset Crash Tests*. Proceedings of 21st ESV, Stuttgart, p. Paper. 90-0374, 2009.

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.

RODRIGUEZ, Henrique. *Volkswagen Up! repete nota máxima nos crash tests do Latin NCAP*. [S. l.], 2015. Disponível em: <http://primeiramarcha.com.br/2015/03/volkswagen-up-repete-nota-maxima-nos.html>. Acesso em: 27 mar. 2019.

SABA, N.; JAWAID, M.; SULTAN, M.T.H. *An overview of mechanical and physical testing of composite materials*. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, [s. l.], p. 1-12, 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00001-1>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081022924000011>. Acesso em: 14 out. 2019.

SAMODAJEV, Nina. *Advanced High Strength Steel (AHSS) for Stronger, Lighter and Safer Cars*. [S. l.], 3 jun. 2019. Disponível em: <https://matmatch.com/blog/advanced-high-strength-steel-stronger-lighter-safer-cars/>. Acesso em: 7 out. 2019.

SETHY, Girija Kumari; PRAKASH, Raghu. *Understanding Progressive Buckling in Extruded Square Tubes Using Multiple Measurement Techniques*. Proceedings of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Phoenix, Arizona, USA, 2016.

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.

SPETHMANN, Philipp; THOMKE, Stefan; HERSTATT, Cornelius. *The Impact of Crash Simulation on Productivity and Problem-Solving in Automotive R&D*. Hamburg University of Technology (TUHH), [S. l.], Vol. 43, 2006.

SPIRET, Matthew. *Mechanical Testing of Automotive Materials and Components*. Quality MAGAZINE, [s. l.], 2018. Disponível em: <https://www.qualitymag.com/articles/94257-mechanical-testing-of-automotive-materials-and-components>. Acesso em: 14 out. 2019.

UFPR. *Constituintes estruturais de equilíbrio dos aços*. [S. l.], 20--?. Disponível em: [http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasivan/processoscorte\\_arquivos/FerroAcoConceitos.pdf](http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasivan/processoscorte_arquivos/FerroAcoConceitos.pdf). Acesso em: 12 nov. 2019.

UNITED NATIONS. *Agreement Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions*. Addendum 93: Regulation No. 94. Geneva: [s. n.], 2013.

UNITED STATES NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. *NBS Special Publication*. 110. ed. [S. l.]: U.S. Government Printing Office, 1930.

VAN RATINGEN, Michiel *et al.* *The European New Car Assessment Programme: A historical review*. Chinese Journal of Traumatology, 63-69 [S. l.], 2016.

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.

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.

VOLKSWAGEN DO BRASIL. *Up! traz o melhor da engenharia Volkswagen em uma construção compacta e eficiente*. [S. l.], 5 fev. 2014. Disponível em: <http://vwbr.com.br/ImprensaVW/Release.aspx?id=d6856698-776a-4255-a8bc-2541f5b8e2b1>. Acesso em: 17 maio 2019.

VOLKSWAGEN Up! 2015 Prata-Egito. [S. l.], 2014. Disponível em: <https://www.blogauto.com.br/wp-content/2014/01/Volkswagen-up-2015-Prata-Egito-643x429.jpg>. Acesso em: 19 fev. 2019.

VOLKSWAGEN. *Volkswagen Up! Workshop Manual*. [S. l.: s. n.], 2011. Disponível em: [https://workshop-manuals.com/volkswagen/up/brake\\_systems/technical\\_data/identification/](https://workshop-manuals.com/volkswagen/up/brake_systems/technical_data/identification/). Acesso em: 20 fev. 2019.

WANG, Jianfeng *et al.* *Effect of ultrasonic vibration on microstructural evolution and mechanical properties of underwater wet welding joint*. *Journal of Materials Processing Technology*, [S. l.], p. 185–197, 2017.

WRASSE, Ana Claudia *et al.* *Investigando o impulso em crash tests utilizando vídeo-análise*. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, [s. l.], v. 36, n. 1, 6 fev. 2014.

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.

ZHANG, Ding-Ni *et al.* *A modified Johnson–Cook model of dynamic tensile behaviors for 7075-T6 aluminum alloy*. *Journal of Alloys and Compounds*, [S. l.], n. 619, p. 186-194, 16 set. 2014.

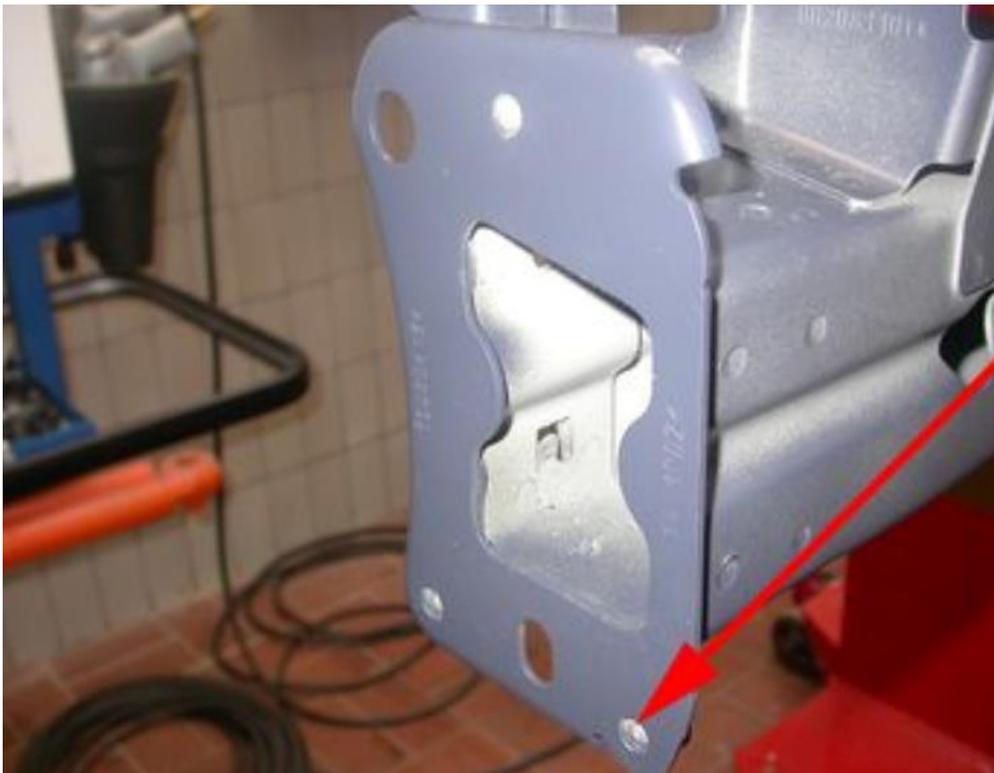
## APÊNDICE A – IMAGENS DETALHANDO OS PONTOS DE MEDIÇÃO DA CARROCERIA

Este apêndice visa detalhar, por meio de imagens retiradas do software NAJA 3D, fornecido pela *Celette*, a localização de todos os pontos da carroceria do Volkswagen *Up!* medidos na seção 6.2 deste trabalho. Os resultados da medição estão dispostos por meio da tabela 4.



**Figura A.1.** Ponto de medição 1.

(autoral)



**Figura A.2.** Ponto de medição 2.

(autoral)



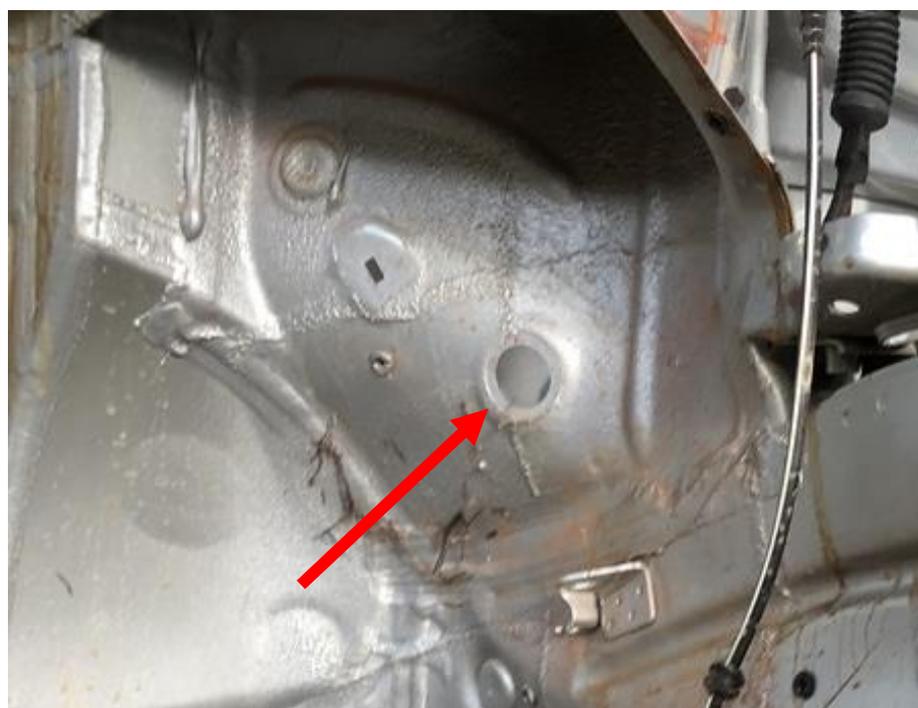
**Figura A.3.** Ponto de medição 3.

(autoral)



**Figura A.4.** Ponto de medição 4.

(autoral)



**Figura A.5.** Pontos de medição 5 e 6, simétricos, referentes aos lados esquerdo e direito do veículo, respectivamente.

(autoral)



**Figura A.6.** Pontos de medição 7 e 8, simétricos, referentes aos lados esquerdo e direito do veículo, respectivamente.

(autoral)



**Figura A.7.** Pontos de medição 9 e 10, simétricos, referentes aos lados esquerdo e direito do veículo, respectivamente.

(autoral)



**Figura A.8.** Pontos de medição 13 e 14, simétricos, referentes aos lados esquerdo e direito do veículo, respectivamente.

(autoral)



**Figura A.9.** Pontos de medição 15 e 16, simétricos, referentes aos lados esquerdo e direito do veículo, respectivamente.

(autoral)



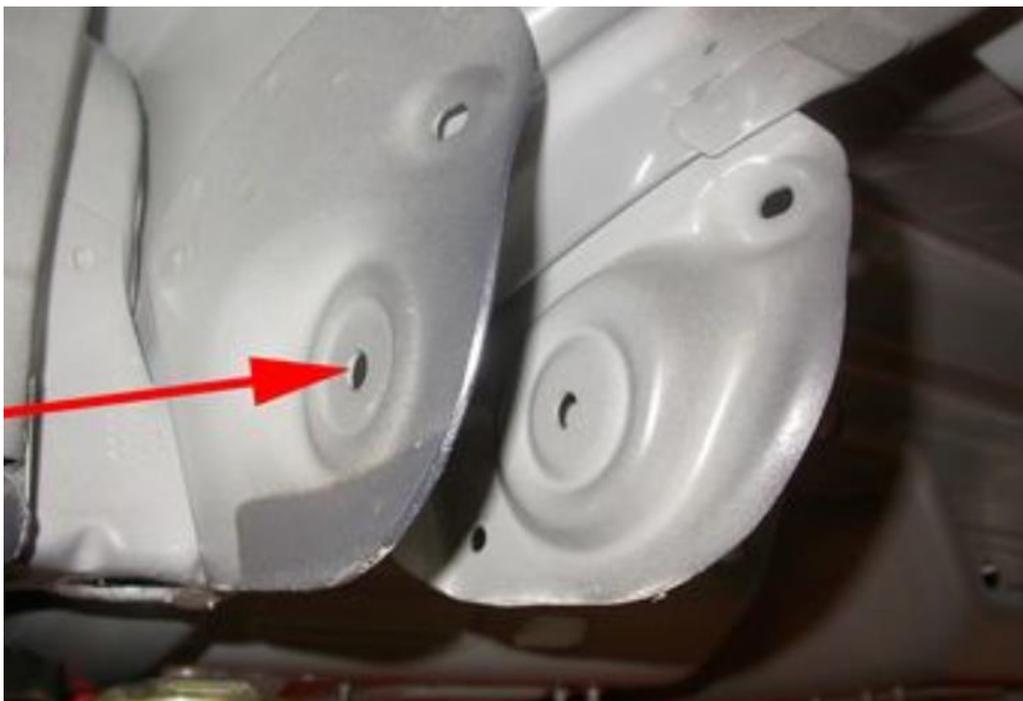
**Figura A.10.** Pontos de medição 19 e 20, simétricos, referentes aos lados esquerdo e direito do veículo, respectivamente.

(autoral)



**Figura A.11.** Pontos de medição 21 e 22, simétricos, referentes aos lados esquerdo e direito do veículo, respectivamente.

(autoral)



**Figura A.12.** Pontos de medição 23 e 24, simétricos, referentes aos lados esquerdo e direito do veículo, respectivamente.

(autoral)



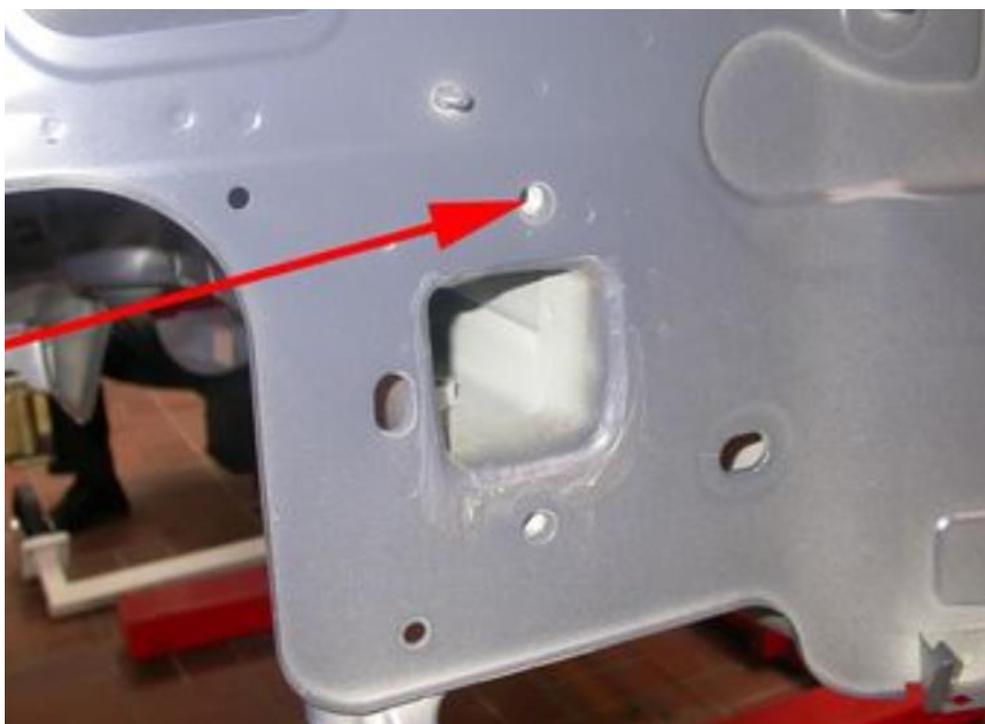
**Figura A.13.** Pontos de medição 27 e 28, simétricos, referentes aos lados esquerdo e direito do veículo, respectivamente.

(autoral)



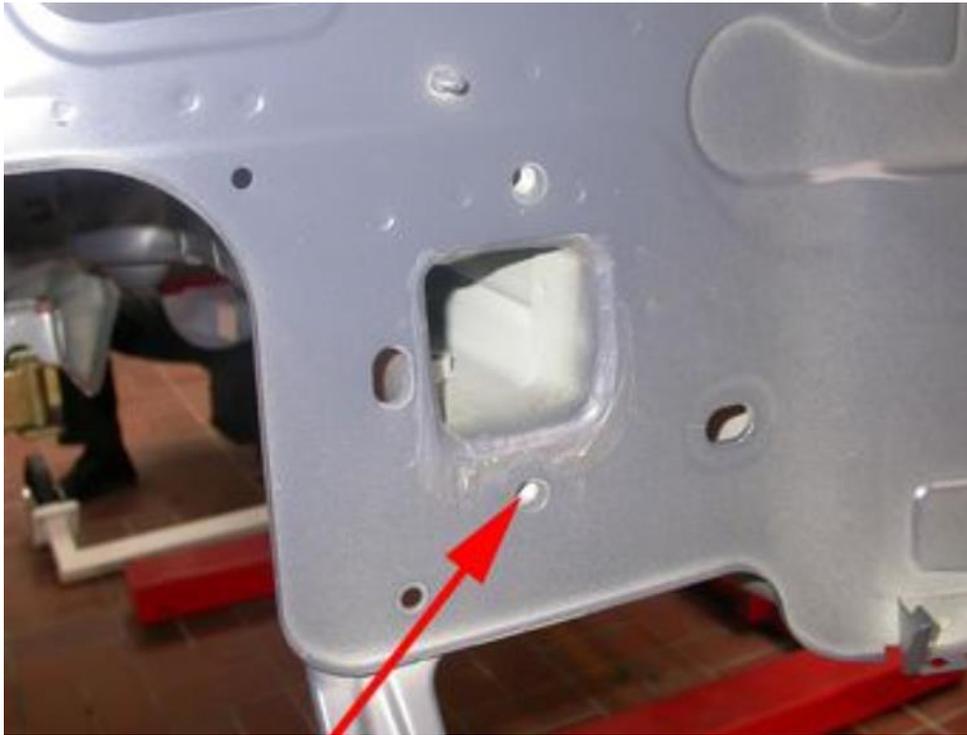
**Figura A.13.** Pontos de medição 29 e 30, simétricos, referentes aos lados esquerdo e direito do veículo, respectivamente.

(autoral)



**Figura A.15.** Pontos de medição 31 e 32, simétricos, referentes aos lados esquerdo e direito do veículo, respectivamente.

(autoral)



**Figura A.16.** Pontos de medição 33 e 34, simétricos, referentes aos lados esquerdo e direito do veículo, respectivamente.

(autoral)