

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE TAILOR WELDED BLANKS SUBMETIDOS AO ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

Guilherme Souza Assunção

Etiene Andrade Pereira

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG – Belo Horizonte, MG, Brasil.

guilhermeassuncao@ufmg.br e etieneandrade@ufmg.br

Wellington Augusto dos Santos

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC-MG - Belo Horizonte, MG, Brasil.

wellington.santos1@stellantis.com

Alexandre Queiroz Bracarense

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG - Belo Horizonte, MG, Brasil.

bracarense@urmg.br

Resumo: *Dentre os avanços e técnicas de processamento e fabricação aplicados à indústria automobilística, destaca-se o Tailor Welded Blank (TWB). Duas ou mais chapas de especificações distintas são unidas e submetidas à conformação. Tem-se “o material certo no lugar certo”, otimizando a massa e a resistência mecânica da carroceria veicular. Para prever o comportamento da carroceria, um dos métodos mais utilizados é a simulação numérica por método dos elementos finitos. No caso de TWBs há um desafio adicional: a solda. Normalmente, modelam-se as chapas desconsiderando-se a solda, para reduzir a complexidade e o processamento computacional. Na soldagem a laser, a zona fundida (ZF) e termicamente afetada (ZTA) são muito estreitas, o que dificulta a extração de corpos de prova (CPs) de tração para mensurar as propriedades mecânicas dessa região, motivo pelo qual muitas simulações a desprezam. No entanto, há trabalhos com abordagem experimental (regra das misturas e/ou CPs de menores dimensões (sub-size)) conciliada às simulações. Não há um consenso sobre a real melhora ocasionada com tais abordagens, mas é fato que ao simular TWBs a precisão das análises é reduzida em relação a chapas simples. Este trabalho buscou correlacionar os resultados obtidos em ensaios experimentais de tração uniaxial com TWBs nos quais a linha de solda possuía diferentes orientações, às simulações numéricas. Trabalhou-se com o software Abaqus®, considerando-se as propriedades da linha de solda, obtidas com a Regra das Misturas. Utilizou-se TWB composto de aços livres de intersticiais de diferentes propriedades mecânicas, o que levou a união de três diferentes zonas (dois materiais de base e a região soldada). Para representação, levou-se em consideração as propriedades mecânicas do regime elástico e plástico do ensaio de tração. Constatou-se que a solda faz diferença nos resultados, mas para que isso seja percebido realmente se faz necessário refinar a malha na região, demandando maior tempo de processamento. Considerando-se ou não a solda, desde que qualificada, a ruptura tende a ocorrer sempre no material de menor resistência mecânica. A região soldada possui maior resistência mecânica e relativa ductilidade, atuando como um concentrador de tensões e alterando a direção de fratura do TWB sob esforço de tração. A Regra das misturas se mostrou eficaz para representação da solda e o modelo numérico representado pelo método de elementos finitos, com as condições de contorno impostas e simplificação do material como isotrópico, se mostrou válido com resultados coerentes em relação a carga de ruptura e alongamento.*

Palavras-chave: Tailor Welded Blanks; Simulação numérica; Caracterização Mecânica; Abaqus®.

1. INTRODUÇÃO

A fabricação de Tailor Welded Blanks (TWBs) envolve a união de materiais com diferentes espessuras, propriedades e/ou revestimentos, geralmente por soldagem a laser (MARATHE, RAVAL, 2021; ANDRADE *et al*, 2019; ASSUNÇÃO *et al*, 2019). Apesar das vantagens dessa técnica, um de seus maiores desafios relaciona-se ao fato de que dois materiais distintos, com propriedades e espessuras específicas, se deformarão por conformação de maneira diferente, nas mesmas condições de carregamento (MOAYEDI *et. a*, 2020, MENG *et. al*, 2020).

Um dos ensaios críticos para caracterização do comportamento sob conformação dos TWBs são o de tração e de curvas limite de conformação (CLCs). A melhoria da simulação pode levar ao aumento da previsão de falhas e maior assertividade de projetos de ferramentais. Além de reduzir os índices de refugo, aumenta-se de 80% para valores

superiores a 90% a correlação entre resultados experimentais e simulados, caso se tenha uma boa seleção das condições de contorno e se contemple os efeitos da linha de solda (ANDRADE *et. al*, 2019, MOAYEDI *et. al*, 2020, MENG *et. al*, 2020 e KARDAN *et. al*, 2018).

Entretanto, conforme Assunção *et.al*, 2019, destaca-se a dificuldade de extração das propriedades mecânicas da solda pois a região soldada a laser é muito estreita, com isso, os métodos convencionais de análise avaliam não só da solda, mas também dos materiais de base. Dessa forma, utiliza-se processos como ensaio de microdureza e métodos como Regra das Misturas para minimizar a influência dos materiais de base na caracterização mecânica da solda.

Este trabalho tem como objetivo estudar, analisar e desenvolver soluções em parâmetros computacionais e de condições de contorno para caracterização da região soldada de TWBs, a partir de simulações por método de elementos finitos. A motivação está na investigação dos pontos críticos de projeto e de simulação como na definição dos parâmetros do processo e na seleção dos dados de entrada e saída das simulações apresentando um novo detalhamento da linha de solda no software numérico para obter boa correlação com os resultados experimentais (AMINZADEH *et. al*, 2020 e LIAVOLI *et. al*, 2020). Busca-se elevar a correlação com os ensaios mecânicos, como o de tração e de CLC, das chapas confeccionadas por TWB.

2. METODOLOGIA

Nesta seção serão abordados os materiais, equipamentos e os procedimentos utilizados para alcançar os dados e os resultados do trabalho. Na Figura 1 apresenta-se o fluxograma das etapas de execução do trabalho.

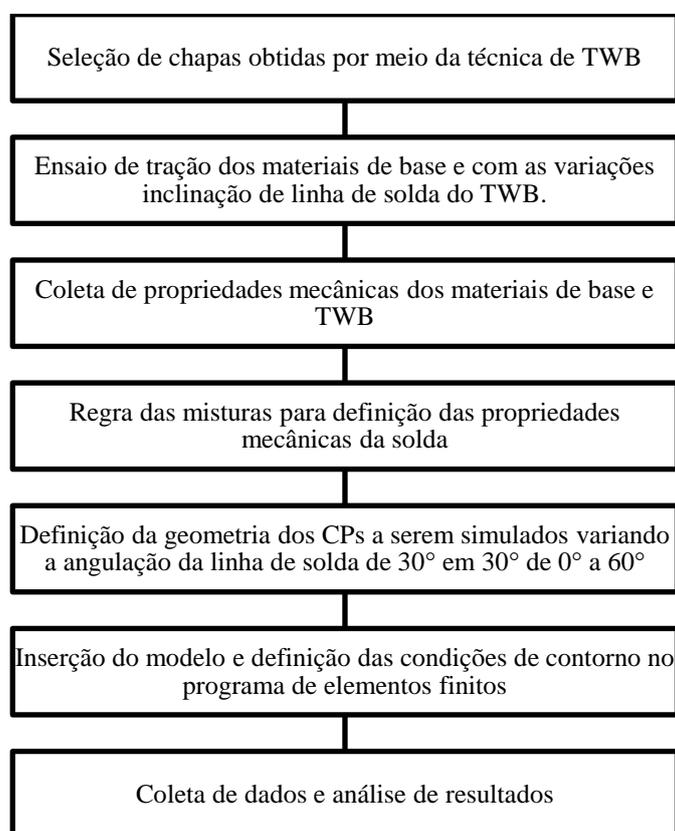


Figura 1. Etapas de execução da pesquisa.

2.1. Materiais

As chapas utilizadas para análise foram cedidas, já soldadas a laser, pela FIAT Chrysler Automóveis (FCA) Brasil. Os materiais utilizados na confecção das chapas são encontrados respectivamente conforme os códigos CSN FEE210 e CSN FEP05, fornecidos pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). Apresenta-se na Tab.1 as propriedades mecânicas, informadas pela CSN.

Tabela 1. Composição química dos aços IF empregados ao TWB

Elemento %	C	Mn	P	S	Si	N	Nb	Ti
IF FEP 05	0,0018	0,1350	0,0120	0,0100	0,0050	0,00420	0,0030	0,0570
IF FEE 210	0,0021	0,4320	0,0360	0,0120	0,0050	0,00360	0,0024	0,0260

Os blankes possuem 0,65 mm e 1,1 mm de espessura, para os materiais FEP05 e FEE210, respectivamente, conforme apresentado na Fig.2.

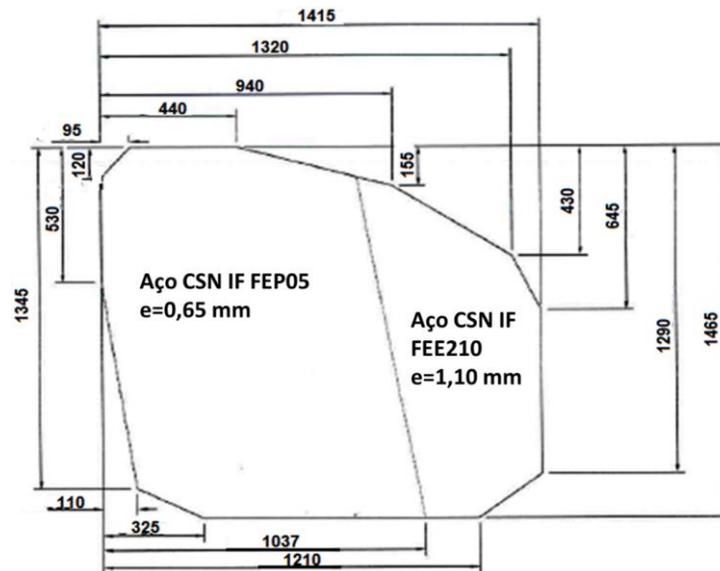


Figura 2. Blank utilizado para retirada de amostras

O processo de soldagem foi por solda a laser de topo, visando a menor extensão possível para as Zonas Fundida (ZF) e Termicamente Afetada (ZTA). Foi utilizado o equipamento CO₂ SoundRonic® com potência nominal de 8kW, com potência média de 65%, tendo Hélio puro como gás de proteção com vazão de 10,5 L/min e velocidade de soldagem de 6,5 m/min.

2.2. Ensaio de tração

A fim de realizar a caracterização mecânica dos materiais de base, e também da linha de solda, foram realizados ensaios de tração com base na norma ISO 6892-1 (2016), trabalhando-se com triplicata para maior confiabilidade e redução de erros experimentais. Confeccionaram-se CPs tanto para os dois materiais de base, FEP05 e FEE210, quanto para o TWB com a solda na transversal de todo o corpo de prova, conforme Fig. 3.

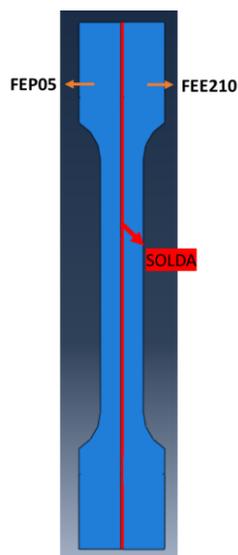


Figura 3. Corpo de prova para ensaios de tração uniaxial com a solda atravessando toda a extensão.

Utilizou-se a máquina Instron® 3382, dotada de extensômetro de vídeo 2663-821 e software de aquisição de dados BlueHill®2, sendo a velocidade de movimentação do cabeçote de 0,25 mm/s.

Outros três modelos corpos de prova foram ensaiados para avaliar a inclinação da linha de solda no ensaio de tração. Foram avaliados 3 CPs de cada tipo, são eles: 0°, 30° e 60° de inclinação da linha de solda.

2.3. Definições e condições de contorno no programa de elementos finitos

A definição do modelo no programa Abaqus® se inicia com a criação das três partes geométricas que compõem o ensaio de tração de um TWB: material de menor espessura (0,65 mm) com FEPO5; material de maior espessura (1,10 mm) com FEE210 e região soldada que possui geometria variável oriunda da junção das duas chapas metálicas. O modelo foi criado em espaço 3D, com elementos do tipo sólidos e deformáveis, criados a partir da extrusão, para representar a espessura das chapas.

O padrão geométrico utilizado para o ensaio de tração baseou-se na norma ISO 6892-1 (2016), conforme apresentado na Fig. 4.

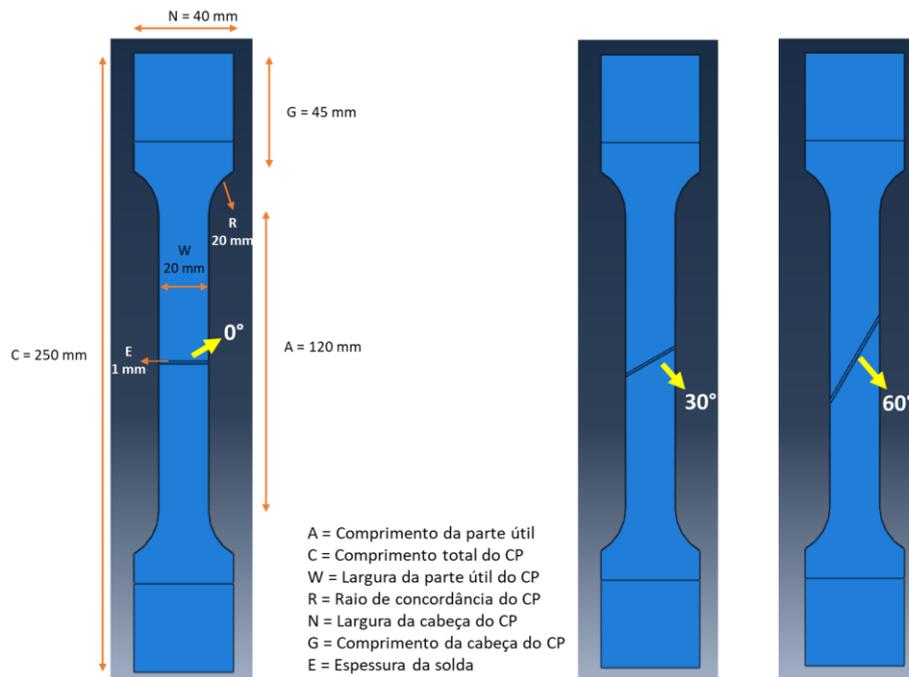


Figura 4. Representação esquemática de dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração uniaxial com a solda inclinada a 0°, 30° e 60°.

A malha determinada ao CP é variável, na qual na cabeça do corpo de prova o tamanho do elemento é de 7 e no meio do CP de 3,5; conforme apresentado na Fig. 5. Essa variação foi imposta para aumentar o refino na região de análise, reduzindo o número de nós do CP, aumentando a confiabilidade do resultado e reduzindo o tempo de processamento. O elemento é do tipo hexaédrico, gerado por técnica de varredura com algoritmo eixo medial.

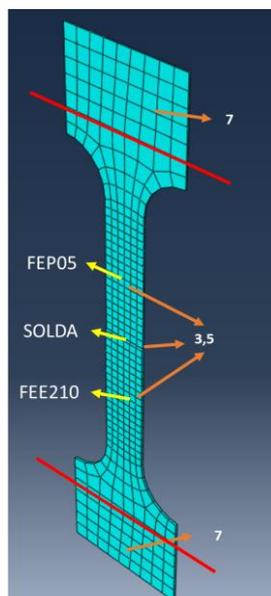


Figura 5. Tamanho dos elementos da malha dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração uniaxial

Quanto aos materiais, trabalhou-se com a divisão do CP em três regiões distintas: FEP05, FEE210 e região soldada (compreendendo ZTA e ZF juntas, para fins de simplificação do modelo). Como parâmetros em comum, utilizou-se a densidade dos aços de 7,80 g/cm³, materiais isotrópicos, módulo de elasticidade (E) de 210 GPa e coeficiente de Poisson (ν) de 0,30, sendo esses dois últimos úteis a representação da fase elástica do material. Para o regime plástico, utilizou-se a equação de Hollomon conforme apresentada na Eq. 1, na qual os dados de coeficiente de resistência do material (K) e coeficiente de encruamento (n) foram baseados no ensaio experimental de tração.

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (1)$$

Na qual:

- K = Constante de resistência do material;
- σ = Tensão a qual o material está submetido [MPa];
- ε = Deformação a qual se submete o material;
- n = Expoente de encruamento.

Para representação do material da região soldada, foi utilizada a Regra das Misturas, apresentada na Eq. 2, para definir o limite de resistência a tração da solda conforme a ponderação dos materiais de base e a região soldada em um corpo de prova cuja a solda atravessa todo o CP (ABDULLAH *et al*, 2001; CIUBOTARIU, BRABIE, 2011; LIAVOLI; GORJI; BAKHSHI-JOOYBARI; MIRNIA, 2020). A área soldada foi medida a partir de imagens obtidas por corte da seção transversal e posterior análise microscópica e tratamento de imagens no software ImageJ®.

$$\sigma_w = \frac{P - (K_1 \cdot \varepsilon_1^{n_1}) \cdot A_1 - (K_2 \cdot \varepsilon_2^{n_2}) \cdot A_2}{A_w} \quad (2)$$

Na qual:

- σ_w = Tensão limite de resistência da solda [MPa]
- P = Carga total suportada pelo corpo de prova [N]
- K₁ = Coeficiente de resistência mecânica do material 1 do TWB [MPa]
- ε_1 = Deformação verdadeira do material 1 do corpo de prova do TWB
- A₁ = Área da seção transversal do material 1 do corpo de prova do TWB [mm²]
- K₂ = Coeficiente de resistência mecânica do material 2 do TWB [MPa]
- ε_2 = Deformação verdadeira do material 2 do TWB
- A₂ = Área da seção transversal do material 2 do corpo de prova do TWB [MPa]
- A_w = Área da seção transversal da solda do corpo de prova do TWB [mm²]

Após a criação do modelo e inserção dos materiais, determina-se a seção de cada parte, atribuindo-se o material na categoria sólida, do tipo homogênea, e faz-se a união dos 3 corpos (FEE05, FEE210 e solda).

Na definição do tempo incremental (*step*), utiliza-se o tipo de procedimento como dinâmico explícito, com período de tempo de 150 segundos com incremento automático. No dimensionamento de massa, define-se como semiautomático com escala de tempo alvo de 1x10⁻⁵, sendo aplicado logo no início do ensaio.

Os parâmetros de saída da simulação foram de tensão, deformação, deslocamento e forças de reação. Dentre a tensão tem-se a tensão principal (S) e de Von Mises (MISES), na deformação tem-se a deformação total (E) e deformação efetiva (PEEQ), os deslocamentos são calculados em função do deslocamento (U), velocidade (V) e aceleração (A) e as forças de reação (RF).

As propriedades de contato entre os corpos foram definidas como contato geral entre as partes (*All with self*), com o comportamento tangencial sem deslizamento (*Rough*).

Foram impostas duas restrições para unir as três regiões com os diferentes materiais, que são do tipo ligação/nó e que conectam o material FEP05 a solda e o FEE210 a solda por meio das superfícies de contato. E uma outra restrição, do tipo acoplamento cinemático, restringindo todos os graus de liberdade, foi colocada na cabeça do corpo de prova para realizar a simulação da garra do ensaio de tração.

Selecionou-se duas condições de contorno, sendo a primeira a velocidade de deslocamento do cabeçote da máquina do ensaio de tração, aplicada no ponto de referência na cabeça do corpo de prova, sentindo positivo da direção Y (V2), com velocidade de 0,25 mm/s que representa a taxa de deformação de 10⁻² s⁻¹. A segunda condição de contorno é o travamento da base do CP na máquina de tração, portanto foram restringidos todos os movimentos de translação e rotação na parte inferior do CP.

Os resultados analisados foram registrados como tipo de trabalho com análise completa e com precisão do tipo dupla: análise e pacote de dados.

3. RESULTADOS

Os primeiros resultados obtidos são dos ensaios de tração dos materiais de base e do corpo de prova com a linha de solda atravessando o CP. Com a manipulação dos dados e utilizando as Eq. (1) e Eq. (2), obteve-se as propriedades mecânicas dos dois aços e da solda conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas dos aços FEE210, FEP05 e da solda

	FEE210	FEP05	CP com a solda a 90°	Unidade
Limite de escoamento (LE)	210.000	140.000	195.667	(MPa)
Limite de resistência a tração (LRT)	344.000	279.000	267.667	(MPa)
Deformação de engenharia (e)	0.215	0.240	0.200	-
Deformação verdadeira (ε)	0.195	0.215	0.182	-
Coefficiente de encruamento (n)	0.186	0.206	0.180	-
Coefficiente de resistencia (K)	466.357	382.891	393.955	(MPa)
Coefficiente de Poisson (ν)	0.300	0.300	0.300	-
Modulo de elasticidade (E)	2.10E+11	2.10E+11	2.10E+11	(Pa)
Area da solda cp90	10.450	6.175	22.165	mm ²

Com a definição das propriedades mecânicas dos materiais de base e da linha de solda, partiu-se para a simulação numérica do ensaio de tração no programa de método dos elementos finitos (Abaqus®), no qual variou-se a inclinação da linha de solda em 0°, 30° e 60°. Para a comparação com os resultados físicos foram selecionados os dados de carga de ruptura e alongamento, apresentados na Fig. 6.

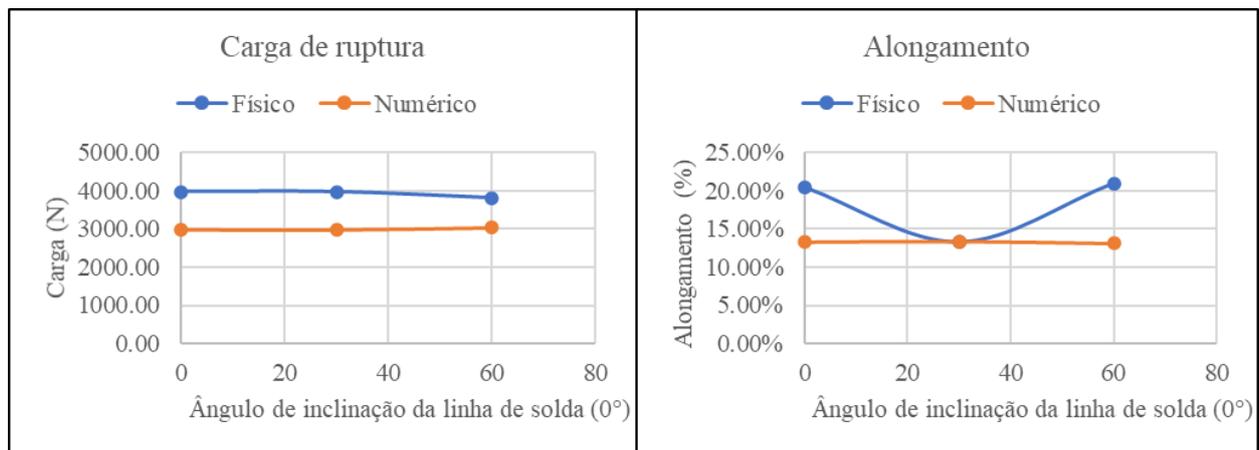


Figura 6. Carga de ruptura e alongamento com a variação da inclinação da linha de solda

A carga de ruptura mostrou comportamento similar para ambos os ensaios, em que a carga máxima é aproximadamente a mesma com a variação da inclinação da linha de solda, pois o CP tende a romper no material de menor espessura e resistência mecânica. Estes resultados foram observados em outros trabalhos como os de Andrade *et al.* (2019) e Santos *et al.* (2021). Isso é válido desde que a solda não apresente defeitos, conforme apontado por Safdarian (2016), Fazli (2016) e Gautam *et al.* (2018). A diferença entre as cargas do ensaio físico e numérico, 33,33%, podem estar relacionadas à simplificação do modelo, que leva em consideração um material isotrópico. Entretanto, sabe-se que aços IF possuem coeficiente de anisotropia acentuado (HAMIDINEJAD; HASANNIYA; SALARI; VALIZADEH, 2012).

Para avaliar a deformação total em função da variação da inclinação da linha de solda, utilizou-se o alongamento máximo dos CPs. No ensaio físico, obteve-se um comportamento similar para os ângulos de 0° e 60°, com alongamentos de 20,5% e 21% respectivamente. Entretanto, para 30°, o alongamento de 13,33% indica que nessa angulação da linha de solda houve perda da capacidade de alongamento, ou seja, menor capacidade de deformação máxima, o que indica uma menor capacidade de conformação nessa configuração. Esse resultado é oposto ao apresentado por Andrade *et al.* (2019) e Santos *et al.* (2021), em que a angulação de 30° apresenta maior alongamento e consequentemente seria um ângulo favorável a conformação. Esse fenômeno provavelmente ocorre porque, embora se tente encontrar um ângulo ótimo para orientação da linha de solda, não há consenso sobre tal questão, além de se lidar com anisotropia, concentradores de

tensão e outros aspectos dos materiais de base e da solda, principalmente (WANG; LIU; WANG; ZHOU, 2021; SANTOS, 2021).

No ensaio numérico, não foram observadas diferenças relevantes para o alongamento em função da inclinação da linha de solda no TWB, no qual o alongamento máximo ficou em torno de 13% para todos os ângulos avaliados. Isso indica que a variação do alongamento encontrado no ensaio físico pode estar correlacionada à anisotropia do material e pontos de fragilidade pontuais nos CPs, como descontinuidades na linha de solda (falta de fusão, porosidades, inclusões, falha de preenchimento ou mordeduras), região de retirada do CPs ou irregularidades geométricas do CPs (ANANTHAPADMANABAN; GEETHAN, 2020; BAGHERI; ABBASI; HAMZELOO, 2020).

Em relação à fratura, apresenta-se na Fig.7 os três CPs rompidos no ensaio de tração físico e simulados, variando a inclinação da linha de solda.

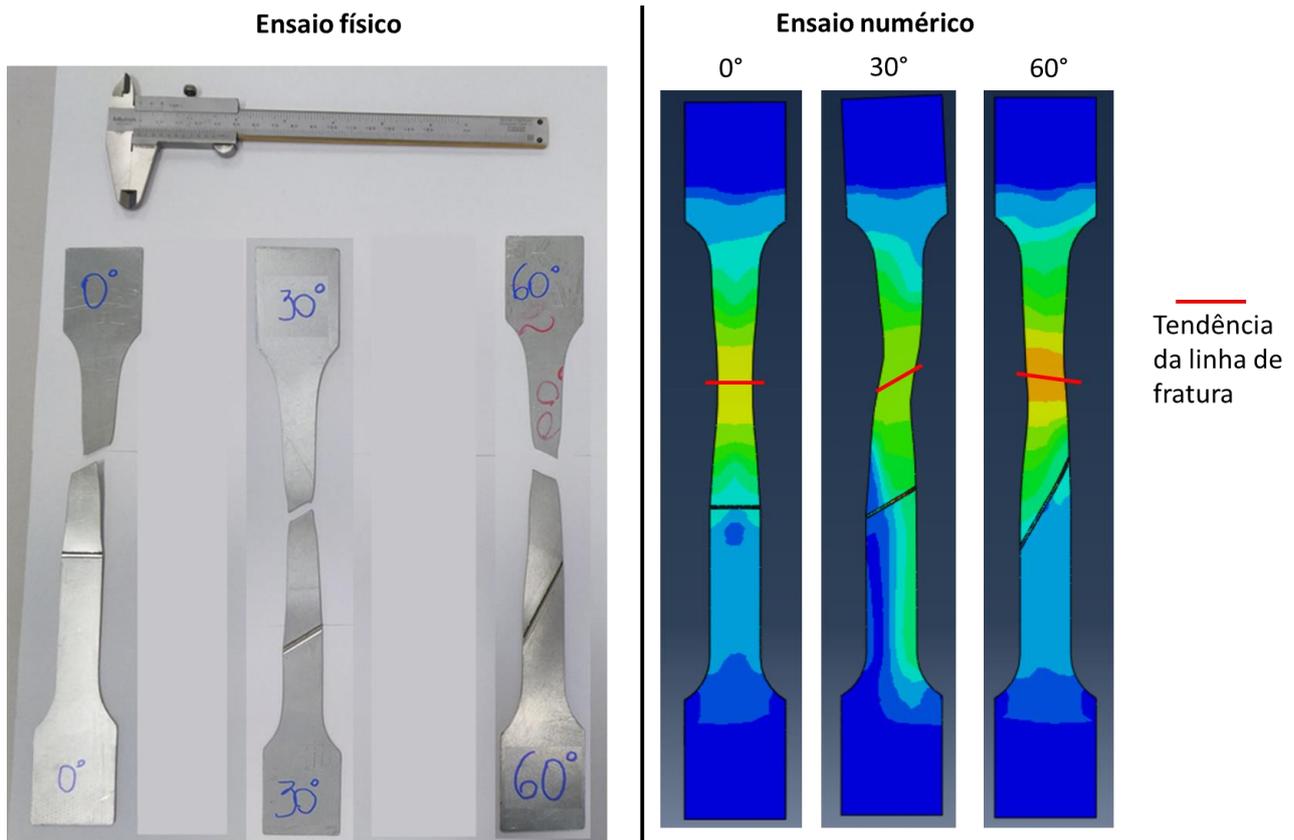


Figura 7. Corpos de prova (0°, 30° e 60°) rompidos no ensaio de tração uniaxial (A) Físico (B) Numérico

Observa-se que no CP com a inclinação de 0°, na amostra física há uma leve inclinação da fratura e no ensaio numérico a tendência é que a fratura ocorra de forma completamente transversal ao CP. A fratura transversal se deve à distribuição homogênea de tensão na linha de solda conforme apresentada na Fig.8 (A), em que a solda é mais solicitada em ambas as extremidades. Portanto, a trajetória seguida no ensaio físico está relacionada à não homogeneidade do material, fazendo com que a trinca se propague em uma direção não retilínea (ARHUMAH, 2019; SEPASI; GHADIRI, 2021; WANG; LIU; ZHOU, 2021)..

Para o CP de 30°, observa-se uma igualdade em relação à direção da fratura e a inclinação da linha de solda. Neste caso, a linha de solda começa a apresentar maior solicitação na sua porção superior, na qual há uma concentração de tensão verificada em vermelho na Fig.8 (B), influenciando diretamente a angulação da fratura, fenômeno relacionado aos planos de cisalhamento do material, que determinam a fratura dúctil de aços IF, ainda que soldados (ANANTHAPADMANABAN; GEETHAN, 2020).

Com a inclinação da solda em 60°, as fraturas para ambos os ensaios ocorrem na mesma direção e angulação, não acompanhando a direção da linha de solda. O comportamento da fratura da solda a 60° justifica-se pela maior restrição de movimentação da linha de solda em sua porção superior, gerando uma concentração de tensão de tal forma que o início da fratura se dá próximo à essa região, destacada em vermelho na Fig.8 (C). Esse fenômeno, dadas as condições de contorno, as simplificações e restrições do modelo, é explicado pois na outra extremidade da solda, região inferior, há ainda mais material de menor resistência mecânica para deformar e compensar o esforço de tração, alterando o padrão de início e direção da fratura (ANDRADE *et al.*, 2019).

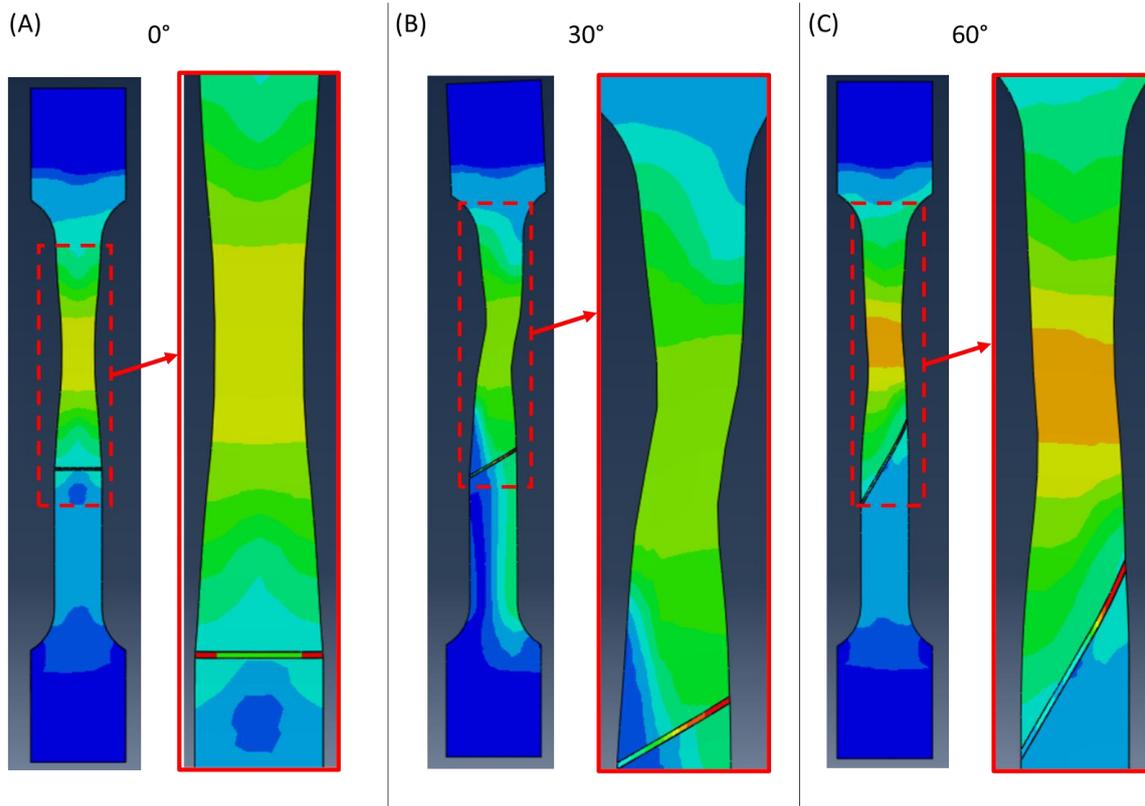


Figura 8. Avaliação sob tensão da linha de solda dos CPs (0°, 30° e 60°) no ensaio de tração uniaxial numérico

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou uma forma de modelar e caracterizar mecanicamente a região soldada de chapas fabricadas por Tailor Welded Blanks (TWB), por método dos elementos finitos. Por meio da realização de ensaios de tração dos materiais de base e do TWB, físicos e numéricos, pôde-se concluir que:

- O uso da Regras das Misturas se mostrou eficaz para representar as propriedades mecânicas da solda. Para tornar a representação mais fiel a realidade indica-se o uso de corpos de prova *sub-size*, aproximando ainda mais as propriedades da linha de solda.
- O modelo numérico representado pelo método de elementos finitos se mostrou válido com resultados coerentes as condições de contorno impostas. As diferenças observadas na comparação entre os ensaios físicos e numéricos da carga de ruptura e alongamento podem estar ligadas a anisotropia dos aços livre de intersticiais.
- Em relação à fratura dos CPs, observou-se que para 0° a fratura no ensaio físico deveria ocorrer transversalmente caso o material fosse homogêneo e sem defeitos. Para 30° e 60° obteve-se resultados similares na comparação entre o físico e numérico, em que a concentração de tensão gerada na linha de solda se altera de acordo com a variação do ângulo de inclinação, fazendo com que se rompa com angulação paralela a direção de 30° e direção oposta para 60°.

5. REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, K.; WILD, P.M.; JESWIET, J.J.; GHASEMPOOR, A. Tensile testing for weld deformation properties in similar gage tailor welded blanks using the rule of mixtures. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 112, n. 1, p.91-97, maio 2001. Elsevier BV.
- AMINZADEH, Ahmad; PARVIZI, Ali; MORADI, Mahmoud. Multi-objective topology optimization of deep drawing dissimilar tailor laser welded blanks; experimental and finite element investigation. *Optics & Laser Technology*, [S.L.], v. 125, p. 106029, maio 2020.
- ANANTHAPADMANABAN, Dattaguru; GEETHAN, K. Arun Vasantha. Fracture Behavior of Solid-State Welded Joints. In: THANAPALAN, Kary (ed.). *Engineering Failure Analysis*. [S.L.]: Intechopen, 2020. Cap. 5, p. 17.
- ANDRADE, Etiene Pereira de. Caracterização mecânica e análise microestrutural de chapas obtidas pelo processo de Tailor Welded Blank (TWB). 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- ANDRADE, Etiene Pereira de; ASSUNÇÃO, Guilherme Souza; SANTOS, Wellington Augusto dos; BRACARENSE, Alexandre Queiroz; FELIZARDO, Ivanilza. Caracterização Mecânica e Análise Microestrutural de Chapas Obtidas

- pelo Processo de Tailor Welded Blank (TWB). *Soldagem & Inspeção*, v. 24,24:e2425, 2019. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.252019>.
- ARHUMAH, Zeli. Characterization of microstructure and mechanical behaviour of heat affected Zones in robotic arc welding of AA6061-t6. 2019. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Master In Mechanical Engineering, École de Technologie Supérieure Université Du Québec, Montreal, 2019.
- ASSUNÇÃO, Guilherme Souza; ANDRADE, Etienne Pereira de; SANTOS, Wellington Augusto dos; FELIZARDO, Ivanilza; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. Caracterização Mecânica da Região Soldada de Tailor Welded Blanks (TWB) a Partir do Perfil de Microdureza. *Soldagem & Inspeção*, [s.l.], v. 24, p.1-10, nov. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR-ISO – 6892-1. Materiais Metálicos – Ensaio de Tração à Temperatura Ambiente.
- BAGHERI, Behrouz; ABBASI, Mahmoud; HAMZELOO, Reza. Comparison of different welding methods on mechanical properties and formability behaviors of tailor welded blanks (TWB) made from AA6061 alloys. *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, [S.L.], v. 235, n. 12, p. 2225-2237, 27 ago. 2020. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0954406220952504>.
- CIUBOTARIU, V.; BRABIE, G.. Weld line behaviour during uniaxial tensile testing of tailor welded blanks. *Archives Of Civil And Mechanical Engineering*, [S.L.], v., n. 4, p. 811-824, 2011.
- FAZLI, Ali. Investigation of The Effects of Process Parameters on The Welding Line Movement in Deep Drawing of Tailor Welded Blanks. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, v. 9, n. 2, p. 45-52, 2016.
- GAUTAM, Vijay; RAUT, Vinayak Manohar; KUMAR, D. Ravi. Analytical prediction of spring back in bending of tailor-welded blanks incorporating effect of anisotropy and weld zone properties. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, v. 232, n. 4, p. 294-306, 2018.
- HAMIDINEJAD, Seyed Mahdi; HASANNIYA, M. H.; SALARI, Nooshin; VALIZADEH, E.. CO2 laser welding of interstitial free galvanized steel sheets used in tailor welded blanks. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, [S.L.], v. 64, n. 1-4, p. 195-206, 1 mar. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4005-7>.
- KARDAN, Masoud; PARVIZI, Ali; ASKARI, Ali. Influence of process parameters on residual stresses in deep-drawing process with FEM and experimental evaluations. *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, [S.L.], v. 40, n. 3, p. 1-12, 24 fev. 2018.
- LIAVOLI, R. Panahi; GORJI, H.; BAKHSHI-JOOYBARI, M.; MIRNIA, M. J.. Investigation on Formability of Tailor-Welded Blanks in Incremental Forming. *International Journal Of Engineering*, [S.L.], v. 33, n. 5, p. 906-9115, maio 2020.
- MARATHE, Shalin; RAVAL, Harit. Investigation On Effect Of Weld Yield Strength During Single Point Incremental Forming Of Tailor Welded Blanks. *International Journal Of Modern Manufacturing Technologies*, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 123-131, 2021.
- MENG, Dawei; ZHANG, Liping; LI, Yan; ZHANG, Guizhi. Welding Deformation of Unequal Thickness Tailor Welded Blanks under Multiple Factors. *Iop Conference Series: Earth and Environmental Science*, [S.L.], v. 508, n. 1, p. 012223, 1 maio 2020. IOP Publishing.
- MOAYEDI, Hossein; DARABI, Roya; GHABUSSI, Aria; HABIBI, Mostafa; FOONG, Loke Kok. Weld orientation effects on the formability of tailor welded thin steel sheets. *Thin-Walled Structures*, [S.L.], v. 149, p. 106669, abr. 2020.
- SAFDARIAN, Rassoul. The effects of strength ratio on the forming limit diagram of tailor-welded blanks. *Ironmaking & Steelmaking*, [s.l.], v. 45, n. 1, p.17-24, 27 set. 2016.
- SEPASI, Mehdi; GHADIRI, Faezeh. Application of experimental investigation of forming limit diagrams of Tailor Welded Blanks in ship hull design. [S.L.]: Iranian PMO - Ports And Maritime Organization, 2021. 39 slides, color.
- WANG, Hui; LIU, Lizi; WANG, Haibao; ZHOU, Jie. Control of Defects in Deep Drawing of Tailor-welded Blanks for Complex Shape Automotive Panel. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, [S.L.], p. 1-20, 16 fev. 2021. Research Square. <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-230410/v1>.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF TAILOR WELDED BLANKS TO THE UNIAXIAL TRACTION TEST

Guilherme Souza Assunção
Etiene Andrade Pereira

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG – Belo Horizonte, MG, Brasil.
guilhermeassuncao@ufmg.br e etieneandrade@ufmg.br

Wellington Augusto dos Santos

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC-MG - Belo Horizonte, MG, Brasil.
wellington.santos1@stellantis.com

Alexandre Queiroz Bracarense

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG - Belo Horizonte, MG, Brasil.
bracarense@urmg.br

Abstract. *Among the advances and processing and manufacturing techniques applied to the automotive industry, Tailor Welded Blank (TWB) stands out. Two or more sheets of different specifications are joined together and subjected to forming. There is “the right material in the right place”, optimizing the mass and mechanical strength of the vehicle body. To predict the behavior, one of the most used methods is numerical simulation by finite element method. In the case of TWBs there is an additional challenge: the weld. Normally, plates are modeled disregarding the weld, to reduce complexity and computational processing. In laser welding, the melt zone (MZ) and heat-affected zone (HAZ) are very narrow, which makes it difficult to extract tensile test specimens to measure the mechanical properties of this region, which is why many simulations neglect it. However, there are works with an experimental approach (rule of mixtures and/or specimens of smaller dimensions (sub-size)) reconciled to simulations. There is no consensus on the real improvement caused by such approaches, but it is a fact that when simulating TWBs, the accuracy of the analyzes is reduced. This work sought to correlate the results of experimental uniaxial tensile tests with TWBs in which the weld line had different orientations, to numerical simulations. We worked with the Abaqus® software, considering the properties of the weld line, obtained with the Rule of Mixtures. TWB composed of interstitial-free steels of different mechanical properties was used, which led to the union of three different zones (two base materials and the welded region). For representation, the mechanical properties of the elastic and plastic regime of the tensile test were taken into account. It was found that weld makes a difference in the results, but for this to be really perceived, it is necessary to refine the mesh in the region, demanding more processing time. Whether or not the weld is considered, as long as it is qualified, rupture tends to occur in the material with the lowest mechanical resistance. The weld has greater mechanical strength and relative ductility, acting as a stress concentrator and changing the fracture direction of the TWB under tensile stress. The Rule of mixtures proved to be effective for representing the weld and the numerical model represented by the finite element method, with the imposed boundary conditions and simplification of the material as isotropic, proved to be valid with consistent results in relation to rupture load and elongation.*

Keywords: *Tailor Welded Blanks; Numerical simulation; Mechanical Characterization; Abaqus®.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.