

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Guilherme Souza Assunção

**ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DO COMPORTAMENTO DE TAILOR  
WELDED BLANKS (TWB) SUBMETIDOS AO ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL**

Belo Horizonte

2024

Guilherme Souza Assunção

**ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DO COMPORTAMENTO DE TAILOR  
WELDED BLANKS (TWB) SUBMETIDOS AO ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense

Belo Horizonte

2024

A851a	<p>Assunção, Guilherme Souza.  Análise por elementos finitos do comportamento de Tailor Welded Blanks (TWB) submetidos ao ensaio de tração uniaxial [recurso eletrônico] / Guilherme Souza Assunção. - 2024</p> <p>1 recurso online (94 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Apêndices: f. 90-94.</p> <p>Inclui bibliografia.  Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Método dos elementos finitos - Teses. 3. Simulação (Computadores) - Teses. 4. Chapas de aço - Teses. I. Bracarense, Alexandre Queiroz, 1959-. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621(043)</p>
-------	--



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DO COMPORTAMENTO DE  
TAILOR WELDED BLANKS (TWB) SUBMETIDOS AO ENSAIO DE TRAÇÃO  
UNIAXIAL**

**GUILHERME SOUZA ASSUNÇÃO**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense (Orientador - Prof. Aposentado Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Profa. Dra. Ivanilza Felizardo (Departamento de Engenharia Mecânica/CEFET-MG) e Prof. Dr. Bruno Silva Cota (Departamento de Engenharia Mecânica/UniFei), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Manufatura e Materiais**".

Dissertação aprovada no dia 26 de abril de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Queiroz Bracarense, Membro**, em 02/05/2024, às 14:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Silva Cota, Usuário Externo**, em 03/05/2024, às 09:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ariel Rodriguez Arias, Chefe de departamento**, em 03/05/2024, às 12:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ivanilza Felizardo, Usuário Externo**, em 23/05/2024, às 16:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3206473** e o código CRC **2EC8E1F4**.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por guiar cada passo desta jornada e por ser a luz que iluminou meu caminho em meio aos desafios e conquistas.

Não há palavras suficientes para expressar minha gratidão aos meus familiares: meu pai Renato, minha mãe Heloisa e meus irmãos Laíza, Fabiola, Renatinho e Lara, agradeço vocês por todo o apoio, incentivo e compreensão ao longo desta jornada de pesquisa.

Ao amigo e colega de trabalho Etiene Andrade, sua amizade e apoio foram fundamentais para superar obstáculos e manter o foco nos momentos mais intensos desta jornada.

Ao orientador Alexandre Bracarense, sua orientação, sabedoria e paciência foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Suas sugestões e ideias moldaram não apenas minha pesquisa, mas também meu crescimento acadêmico e profissional.

Ao Wellington Santos que colaborou com vários dados, sua contribuição foi crucial para enriquecer esta pesquisa com dados valiosos do setor automotivo. Sua disposição em compartilhar conhecimento foi um diferencial que ampliou os resultados deste estudo.

A todos que estiveram presentes, meu sincero agradecimento por fazerem parte desta trajetória. Este trabalho não seria possível sem o suporte de cada um de vocês.

Deixo meu agradecimento à banca examinadora composta pela Ivanilza, Ariel e Bruno, por dedicarem seu tempo e expertise na avaliação deste trabalho.

Ao LRSS (Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação) obrigado pela infraestrutura e suporte que foram fundamentais para a realização de ensaios e análises deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

O processo de fabricação por Tailor Welded Blank (TWB) consiste na união de duas ou mais chapas com especificações distintas (materiais, espessuras, revestimento e outras propriedades física e/ou químicas), submetidas à conformação, resultando em otimização da massa e da resistência mecânica, obtendo o "material certo no lugar certo". A simulação numérica pelo método dos elementos finitos é empregada para prever o comportamento da carroceria e apresenta um desafio adicional ao lidar com TWB, que é a junta soldada. Normalmente, as modelagens das chapas são realizadas desconsiderando a solda para simplificar a complexidade e reduzir o processamento computacional. A soldagem a laser gera uma zona fundida (ZF) e termicamente afetada (ZTA) estreitas, dificultando a extração de corpos de prova (CPs) de tração para avaliação das propriedades mecânicas da junta soldada e, portanto, algumas abordagens experimentais, como a regra das misturas (ROM – Rule of Mixtures) e o uso de CPs de dimensões reduzidas (sub-size), surgem para a caracterização dessa região. O presente trabalho buscou estabelecer uma correlação entre os resultados de ensaios experimentais e simulações numéricas de tração uniaxial em TWBs com diferentes orientações da linha de solda. Utilizando o software Abaqus®, foram consideradas as propriedades da linha de solda obtidas pela ROM. O TWB utilizado é composto por dois diferentes aços livres de intersticiais, unindo três zonas distintas (dois materiais de base e a junta soldada). Na representação, foram consideradas as propriedades mecânicas dos regimes elástico e plástico do ensaio de tração. Os resultados indicaram que a presença da solda impacta nos resultados, alterando a carga cisalhante com a variação da inclinação em relação a direção de laminação. A ruptura tende a ocorrer no material de menor resistência mecânica e a região soldada, atua como um concentrador de tensões, alterando a direção de fratura do TWB sob esforço de tração. A ROM mostrou-se eficaz para representar a solda, e o modelo numérico, simplificado como isotrópico obteve resultados coerentes em relação à carga de ruptura e alongamento para ângulos de inclinação da linha de solda de 0°, 45° e 90°, sendo o modelo não representativo para angulações intermediárias (15°, 30°, 60° e 75°) que dependem fortemente da anisotropia.

Palavras-chave: tailor welded blanks; simulação numérica; caracterização mecânica; Abaqus®; aços livres de intersticiais.

## ABSTRACT

The Tailor Welded Blank (TWB) manufacturing process consists of joining two or more sheets with different specifications (materials, thicknesses, coatings, and other physical and/or chemical properties), subjected to forming, resulting in mass and mechanical strength optimization, achieving the "right material in the right place." Numerical simulation using the finite element method is employed to predict the body's behavior and presents an additional challenge when dealing with TWB, which is the welded joint. Typically, sheet modeling is performed without considering the weld to simplify complexity and reduce computational processing. Laser welding creates narrow melted (MZ) and heat-affected (HAZ) zones, making it difficult to extract tensile test specimens for evaluating the mechanical properties of the welded joint, thus, some experimental approaches such as the Rule of Mixtures (ROM) and the use of reduced-size specimens (sub-size) emerge for characterizing this region. This study aimed to establish a correlation between the results of experimental tensile tests and numerical simulations on TWBs with different weld line orientations. Using Abaqus® software, the properties of the weld line obtained by ROM were considered. The TWB used is composed of two different interstitial-free steels, joining three distinct zones (two base materials and the welded joint). The mechanical properties of the elastic and plastic regimes of the tensile test were considered in the representation. The results indicated that the presence of the weld affects the results, altering the shear load with the variation of the inclination relative to the rolling direction. Fracture tends to occur in the material with lower mechanical strength, and the welded region acts as a stress concentrator, altering the fracture direction of the TWB under tensile stress. ROM proved to be effective in representing the weld, and the numerical model, simplified as isotropic, obtained coherent results concerning the breaking load and elongation for weld line inclination angles of 0°, 45°, and 90°, being the model not representative for intermediate angles (15°, 30°, 60°, and 75°) that strongly depend on anisotropy.

Keywords: tailor welded blanks; numerical simulation; mechanical characterization; Abaqus®; interstitial free steel;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Equipamento básico para estampagem .....	23
Figura 2.2 - Exemplos de estampagem por conformação em geral .....	24
Figura 2.3 - Esforços de tensão durante o dobramento .....	24
Figura 2.4 – Alongamento em relação a resistência a tração dos principais tipos de aço	26
Figura 2.5 –Estampagem profunda com as regiões para análise de tensões.....	28
Figura 2.6 - Esforços de tensão na aba do copo da chapa submetida ao embutimento. ..	28
Figura 2.7 - Esforços de tensão na região de dobramento da chapa submetida ao embutimento. ....	29
Figura 2.8 - Esforços de tensão na região lateral e do fundo do copo da chapa submetida ao embutimento. ....	29
Figura 2.9 - Corpos de prova para obtenção do coeficiente de anisotropia .....	31
Figura 2.10 - Formação de orelhas na estampagem profunda.....	32
Figura 2.11 - Curva Limite de Conformação (CLC) padrão .....	33
Figura 2.12 - Gráfico CLC com as diferentes geometrias obtidas de acordo com a tensão. ....	33
Figura 2.13 - Principais regiões de deformação CLC .....	34
Figura 2.14 - Diferentes processos de fabricação de Tailor Blanks. (A) Patchwork Blanks; (B) Tailor Welded Blanks; (C) Tailor Rolled Blank e (D) Tailor Heat Treated Blanks..	35
Figura 2.15 – Comparação entre o processo convencional e TWB.....	36
Figura 2.16 – Aplicações de TWB na estrutura de um veículo .....	37
Figura 2.17 – Estruturas fabricadas por meio de TWB na estrutura de um veículo.....	37
Figura 2.18 – Desenho esquemático de um equipamento de solda a laser .....	40
Figura 2.19 - Representação do ensaio de tração .....	41
Figura 2.20 - Fases da fratura material no ensaio de tração .....	42
Figura 2.21 - Tipos de fraturas em metais submetidos a tensão uniaxial .....	43
Figura 2.22 - Corpos de prova fraturados após ensaio de tração. a) Metal base; b) Junta soldada a plasma; c) Junta soldada a laser. ....	43
Figura 2.23 Comparativo dimensional dos corpos de prova antes e depois do ensaio de tração. ....	44
Figura 2.24 - Exemplos da amostra TWB com a junta de solda na combinação HCT980X – CT600 após teste de tração (potência de soldagem 550W, taxa 5mm/s) .....	44

Figura 2.25 - Tensões normal ( $\sigma'$ ) e cisalhante ( $\tau'$ ) representadas em um plano orientado em relação a um ângulo em relação ao plano perpendicular de atuação da tensão $\sigma$ .....	45
Figura 2.26 - Razões entre a carga cisalhante e o ângulo de inclinação, para as amostras de tração de TWB.....	46
Figura 2.27 - Razão entre a deformação verdadeira e o ângulo de inclinação, para as amostras de tração de TWB. ....	46
Figura 2.28 - Ilustrativo entre a relação de alongamento e ângulo.....	47
Figura 2.29 – Geometria e malhas de elementos finitos.....	48
Figura 2.30 – Objeto tridimensional sob carregamento .....	49
Figura 2.31 - Tipos de elementos tridimensionais – (a) Hexaedro de oito nós (b) tetraedro de quatro nós (c) pentaedro de seis nós (d) Pirâmide de base quadrangular. ....	51
Figura 2.32 - Distribuição da tensão para o CP retangular .....	53
Figura 2.33 – Deformação efetiva em ensaio de tração de material dúctil. ....	53
Figura 2.34 - Gráficos de contorno de deformação efetiva (PEQ) e variável de dano (SDEG) para cada aço após fratura.....	54
Figura 3.1 – Etapas de execução do trabalho.....	55
Figura 3.2 – Blank utilizado para retirada de amostras.....	56
Figura 3.3 - Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração uniaxial...	57
Figura 3.4 – Equipamento de corte dos corpos de prova de tração.....	57
Figura 3.5 – Angulação representativa dos corpos de prova no blanque.....	58
Figura 3.6 - Criação da geometria das partes que compõe o ensaio de tração .....	60
Figura 3.7 - Representação esquemática de dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração uniaxial com a solda inclinada a $0^\circ$ .....	61
Figura 3.8 - Tamanho dos elementos da malha dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração uniaxial .....	62
Figura 3.9 – Critério de dano atribuído no Abaqus® .....	64
Figura 3.10 – Definição do tempo incremental ( <i>step</i> ).....	65
Figura 3.11 - Parâmetros de saída da simulação. ....	66
Figura 3.12 - Propriedades de contato.....	67
Figura 3.13 - Restrições de contato .....	67
Figura 3.14 - Condições de carregamento .....	68
Figura 4.1 – Área da junta soldada no corpo de prova com orientação relativa de $90^\circ$ ..	71
Figura 4.2 – CPs rompidos variando a inclinação da linha de solda de $0^\circ$ a $90^\circ$ .....	72
Figura 4.3 - Carga de ruptura com a variação da inclinação da linha de solda.....	73

<b>Figura 4.4 - Alongamento com a variação da inclinação da linha de solda. ....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 4.5 - Mapas de deformação dos CPs de tração dos TWBs e do MB (a) 90°, (b) 60°, (c) 45°, (d) 30°, (e) 0° e (f) MB.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 4.6 - Corpos de prova (0° a 90°) rompidos no ensaio de tração uniaxial (A)Físico (B) Numérico .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 4.7 - Avaliação sob tensão da linha de solda dos CPs (0° a 90°) no ensaio de tração uniaxial numérico .....</b>	<b>79</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição química dos aços IF empregados ao TWB .....	55
Tabela 4.1- Propriedades mecânicas dos materiais (FEE210 e FEP05) e do CP com a solda orientada a 90° .....	70
Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas da junta soldada .....	71
Tabela 4.3- Comparação percentual da carga de ruptura entre o teste físico e numérico .....	74
Tabela 4.4 - Comparação percentual do alongamento entre o teste físico e numérico ....	77

## LISTA DE SIGLAS

A	Aceleração
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Testes e Materiais)
AWS	<i>American Welding Society</i> (Sociedade Americana de Soldagem)
BH	<i>Bake Hardening</i>
CLC	Curva Limite de Conformação
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CP	Corpo de prova
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
DL	Direção de laminação
DMICRT	Damage Initiation Criteria (Critério de Início de Dano)
DP	<i>Dual Phase</i> (Duplas fases)
E	<i>Enlongation</i> (Deformação total)
EMAT	<i>Electromagnetic Acoustic Transducer</i> (Transdutor Acústico Eletromagnético)
FCA	FIAT Chrysler Automóveis
FEA	<i>Finite Element Analysis</i> (Análise por Elementos Finitos)
FIAT	<i>Fabbrica Italiana Automobili Torino</i> (Fábrica Italiana de Automóveis de Turim)
HSLA	<i>High Strength &amp; Low Alloy</i> (Aço de alta resistência e baixa liga)
IF	<i>Interstitial Free</i> (Livre de Intersticiais)
IF-HS	<i>Interstitial Free High Strength</i> (Livre de Intersticiais de alta Resistência)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
K	Coefficiente de Resistência do Material
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> (Amplificação da luz por emissão estimulada de radiação)
LE	Limite De Escoamento
LRT	Limite De Resistência a Tração

MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MISES	Critério de Von Mises
Nd:YAG	<i>Neodymium – Yttrium Aluminium Garnet</i>
P	Carga total suportada pelo corpo de prova [N]
PEEQ	<i>Equivalent Plastic Strain</i> (Deformação Plástica Efetiva)
PVT	Princípio dos Trabalhos Virtuais
RF	<i>Reaction Forces</i> (Forças de reação)
ROM	<i>Rule of Mixtures</i> (Regra das Misturas)
S	<i>Stress</i> (Tensão)
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
TRIP	<i>Transformation Induced Plasticity</i> (Transformação induzida plasticidade)
TWB	<i>Tailor Welded Blank</i>
TWIP	<i>Twin Induced Plasticity</i> (Plasticidade induzida por maclação)
U	Deslocamento
V	Velocidade
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

## SÍMBOLOS

### Letras Latinas

Al	Alumínio
b	Forças externas
C	Carbono
Cr	Cromo
e	Espessura
K	Coefficiente de resistência mecânica
kW	Quilowatt
L	Litro
m	Metro
M	Mega
min	Minuto
mm	Milímetro
Mn	Manganês
N	Nitrogênio
n	Expoente de encruamento
Nb	Nióbio
P	Fosforo
Pa	Pascal
S	Enxofre
Si	Silício
Ti	Titânio
u	Deslocamento
$\bar{t}$	Carregamentos superficiais

### Letras Gregas

$\mu$	Micro
$\epsilon$	Deformação
$\Gamma$	Condições de fronteira
$\Gamma_u$	Áreas de fronteira
$\Theta$	Ângulo do plano de corte

$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\sigma$	Tensão
$\sigma'$	Tensão normal
$\tau'$	Tensão cisalhante
$\Omega$	Região no espaço tridimensional
$\delta U$	Trabalho de forças internas
$\delta W$	Trabalho de forças externas

### Subscritos

$A_1$	Área da seção transversal do material 1 do corpo de prova
$A_2$	Área da seção transversal do material 2 do corpo de prova do TWB
$A_s$	Área ocupada pela solda
$A_w$	Área da seção transversal da solda do corpo de prova do TWB
$e_s$	Espessura da solda
$K_1$	Coeficiente de resistência mecânica do material 1 do TWB
$K_2$	Coeficiente de resistência mecânica do material 2 do TWB
$R_0$	Coeficiente de anisotropia a $0^\circ$
$R_{45}$	Coeficiente de anisotropia a $45^\circ$
$R_{90}$	Coeficiente de anisotropia a $90^\circ$
$\epsilon_1$	Deformação verdadeira do material 1 do TWB
$\epsilon_2$	Deformação verdadeira do material 2 do TWB
$\sigma_w$	Tensão limite da resistência da solda
$\sigma_y$	Tensão de escoamento

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1	Objetivos .....	19
1.2	Justificativa.....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
2.1	Conformação Mecânica.....	21
2.1.1	Conformação geral .....	23
2.1.2	Estampagem .....	25
2.1.2.1	Aços para Estampagem .....	25
2.1.2.2	Estampagem profunda (Embutimento) .....	27
2.1.3	Anisotropia.....	30
2.1.4	Curvas Limite de Conformação (CLC).....	32
2.2	Tailor Welded Blanks.....	35
2.2.1	Soldagem a Laser .....	39
2.2.2	Ensaio de tração .....	41
2.3	Elementos Finitos.....	47
2.3.1	Formulação matemática .....	49
2.3.2	Tipos de elementos.....	50
2.3.3	Simulação do ensaio de tração pelo método dos elementos finitos .....	52
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>55</b>
3.1	Materiais.....	55
3.2	Ensaio de Tração Uniaxial.....	56
3.3	Simulação no programa de elementos finitos .....	58
3.3.1	Pré-processamento .....	60
3.3.2	Processamento .....	65
3.3.3	Pós-processamento .....	68
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>70</b>
4.1	Ensaio de Tração.....	70
4.2	Simulação por elementos finitos do Ensaio de Tração .....	72
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>82</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>84</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>

<b>APÊNDICE A – Ensaio de tração dos twb com solda a 90° .....</b>	<b>90</b>
<b>APÊNDICE B – Dados de tração dos corpos de prova de TWB ensaiados .....</b>	<b>92</b>
<b>APÊNDICE C – Dados de tração dos corpos de prova SIMULADOS .....</b>	<b>94</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A simulação numérica por meio do método dos elementos finitos (MEF) tem se consolidado como uma ferramenta indispensável na análise do comportamento estrutural de materiais e componentes complexos. No âmbito da engenharia mecânica, a simulação desempenha um papel crucial na compreensão aprofundada do desempenho mecânico de ligas metálicas, proporcionando uma abordagem eficiente para avaliar o impacto de diferentes variáveis e geometrias.

No contexto específico de ensaios de tração em Tailor Welded Blanks (TWBs), a simulação em elementos finitos emerge como um importante recurso para antecipar e entender as respostas mecânicas dessas estruturas compostas por chapas soldadas com distintas especificações. O presente estudo concentrou-se na análise desses ensaios, propondo uma nova metodologia no método de elementos finitos utilizando Abaqus®, explorando variáveis como a inclinação da linha de solda e o impacto nas propriedades mecânicas e no padrão de fratura dos corpos de prova.

Os resultados obtidos, provenientes tanto dos ensaios físicos quanto da simulação numérica, representam uma contribuição significativa para o entendimento do comportamento de TWB submetidos aos esforços de tração. A concordância entre os dados experimentais e os simulados visa aumentar a eficácia da abordagem numérica adotada, reforçando sua utilidade como uma ferramenta preditiva confiável.

Este estudo, portanto, busca não apenas apresentar os resultados alcançados, mas também destacar a importância da simulação em elementos finitos como um meio de antecipar o desempenho estrutural de componentes complexos. Ao explorar o comportamento mecânico em TWBs, almeja-se oferecer ideias relevantes para a otimização de processos de fabricação, aprimorando assim a eficiência e a confiabilidade de componentes fundamentais na indústria metalúrgica.

Ao longo dessa análise, examinou-se não apenas as propriedades mecânicas, carga de ruptura e alongamento, mas também o fenômeno da fratura por critério de dano dúctil. Essa abordagem permite uma compreensão mais completa dos desafios e oportunidades associados à fabricação e ao uso desses materiais em aplicações práticas.

## 1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho compreende na proposição de uma nova metodologia de avaliação, por meio de simulações numéricas, do desempenho mecânico dos TWBs sob condições de tração, contribuindo para o avanço do conhecimento na área de conformação de materiais metálicos soldados. Como objetivos específicos destaca-se:

- Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de Tailor Welded Blanks (TWB) em ensaios de tração uniaxial, investigando características como carga de ruptura, alongamento e padrões de fratura em diferentes inclinações da linha de solda.
- Proposição de uma nova metodologia por meio de simulações em elementos finitos (Abaqus®) para validar numericamente o comportamento observado nos ensaios físicos, verificando a eficácia do modelo proposto na representação do comportamento dos materiais em condições de tração.
- Análise da influência da inclinação da linha de solda em TWBs nas propriedades mecânicas e o padrão de fratura, de modo a investigar a distribuição de tensões na linha de solda e sua relação com o desempenho estrutural do material.

## 1.2 Justificativa

O ensaio de tração destaca-se como uma etapa crítica na caracterização dos TWBs, enfrentando desafios significativos devido à geometria complexa do corpo de prova, decorrente das diferenças de material e espessura entre as chapas que compõem o blank. A avaliação da inclinação da linha de solda, em particular, é dificultada pela fixação do corpo de prova na máquina de tração. A consolidação e otimização da simulação numérica surge como uma estratégia para aprimorar a previsão de falhas, a assertividade em projetos de ferramentais e a redução dos índices de refugo de chapas. A correlação entre resultados experimentais e simulados pode ultrapassar 90% quando as condições de contorno são bem selecionadas e os efeitos da linha de solda são considerados (ANDRADE, 2019; HABIBI *et al.*, 2016).

Esta pesquisa ganha relevância ao investigar pontos críticos tanto na confecção do blank por TWB quanto na simulação, abrangendo uma nova definição de parâmetros do processo e a seleção cuidadosa dos dados de entrada e saída das simulações. Um novo enfoque é apresentado, detalhando a linha de solda no programa de elementos finitos, buscando uma

correlação robusta com os resultados experimentais. O objetivo foi continuar estudos anteriores para elevar a consistência dos ensaios mecânicos, como o ensaio de tração e curva limite de conformação, em relação às simulações, considerando também os critérios de falha das chapas durante o processo de estampagem (ANDRADE, 2019; SANTOS, 2021; SANTOS *et al.*, 2020).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A conformação mecânica desempenha um papel crucial na fabricação de componentes metálicos, abrangendo processos diversos, desde a estampagem geral até técnicas avançadas como a estampagem profunda, também conhecida como embutimento. O comportamento dos aços utilizados nesses processos é influenciado por fatores como anisotropia e as Curvas Limite de Conformação (CLCs), que definem as condições de deformação (propriedades mecânicas variam de acordo com a orientação cristalográfica e deformações planas máximas suportadas, respectivamente). No contexto da soldagem, o Tailor Welded Blank (TWB) surge como um desafio, unindo diferentes chapas por meio de soldagem a laser para otimizar propriedades mecânicas e geométricas. O ensaio de tração e a análise por elementos finitos desempenham papéis essenciais na avaliação do desempenho desses blanks soldados, envolvendo uma formulação matemática complexa e considerações sobre tipos de elementos. Nesta revisão bibliográfica, explora-se a interseção desses temas, destacando a integração de conhecimentos essenciais para compreender a fabricação e o comportamento estrutural dos TWBs.

### 2.1 Conformação Mecânica

O processo de conformação é definido como sendo aquele no qual, por meio de solicitações mecânicas impostas a um material, provoca-se sua mudança permanente de dimensões, com conseqüente alteração de suas propriedades mecânicas. Solicitações mecânicas podem implicar em deformações elásticas ou plásticas no material conformado. A primeira refere-se a deformações pequenas e reversíveis e a segunda, implica em alterações permanentes (CETLIN; HELMAN, 2005).

Segundo Hosford (2011), em um processo de conformação mecânica, o desenvolvimento do projeto baseia-se em:

- Especificação dos requisitos do produto: dimensões, tolerâncias, propriedades mecânicas, acabamento superficial e outras características importantes.
- Seleção do material: escolhe-se um material adequado para as condições de serviço, levando em consideração as propriedades mecânicas, a resistência à corrosão, a resistência à temperatura, a soldabilidade e outras propriedades relevantes.
- Escolha do processo de conformação: com base nos requisitos do produto e no material selecionado, deve-se escolher o processo de conformação mais

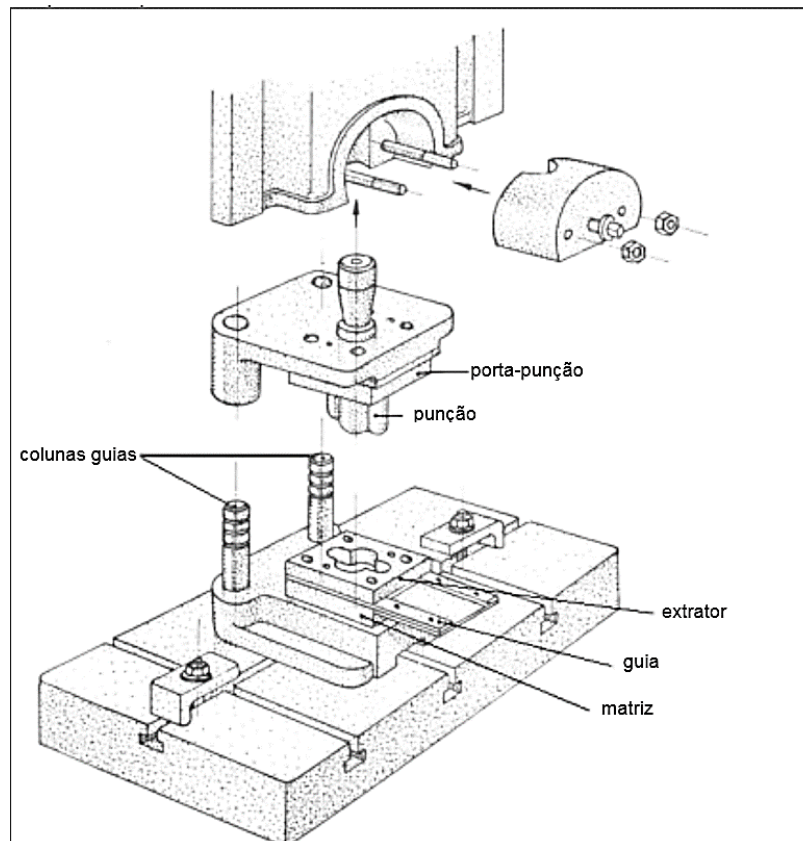
adequado.

- Projeto da ferramenta: para cada processo de conformação, projeta-se a ferramenta que será usada para moldar o material. A ferramenta deve ser projetada para suportar as forças e as tensões envolvidas no processo de conformação e garantir a precisão dimensional do produto final.
- Análise de simulação: antes de fabricar a ferramenta, realiza-se análises de simulação para verificar a viabilidade do projeto e garantir que o processo de conformação produza um produto final dentro das especificações desejadas. Prioriza-se os limiares de conformabilidade, ou seja, determinar que o produto a ser conformado suportará os carregamentos sem apresentar afinamentos, enrugamentos, fratura, etc.
- Fabricação da ferramenta: com base no projeto da ferramenta, deve-se fabricar a ferramenta, que será usada para moldar o material no processo de conformação.
- Produção do produto: o material é moldado usando a ferramenta e o produto final é produzido. É importante realizar inspeções regulares para garantir que o produto final esteja dentro das especificações desejadas.

A conformação pode ser por laminação, forjamento, trefilação, extrusão e estampagem. Cada um desses métodos é adequado para diferentes aplicações e tipos de materiais. Na laminação, o material é deformado entre dois rolos para produzir chapas, tiras ou folhas. No forjamento, o material é moldado em uma forma específica por meio da aplicação de pressão, podendo este ser a quente. Na extrusão, o material é empurrado através de um orifício para produzir uma forma contínua, como tubos ou perfis. Na trefilação, o material é puxado através de um orifício para reduzir o diâmetro e produzir fios ou barras. Na dobra, o material é dobrado em uma forma específica por meio de uma dobradeira. No corte, o material é cortado em uma forma específica por meio de uma máquina de corte. Na estampagem, utilizada no presente trabalho, o material é cortado ou moldado em uma forma específica por meio de uma prensa (CETLIN; HELMAN, 2005).

Na Figura 2.1 apresenta-se o equipamento básico para realizar a conformação por estampagem composto pelo punção, porta-punção, colunas guias, extrator, guia e matriz.

Figura 2.1 – Equipamento básico para estampagem



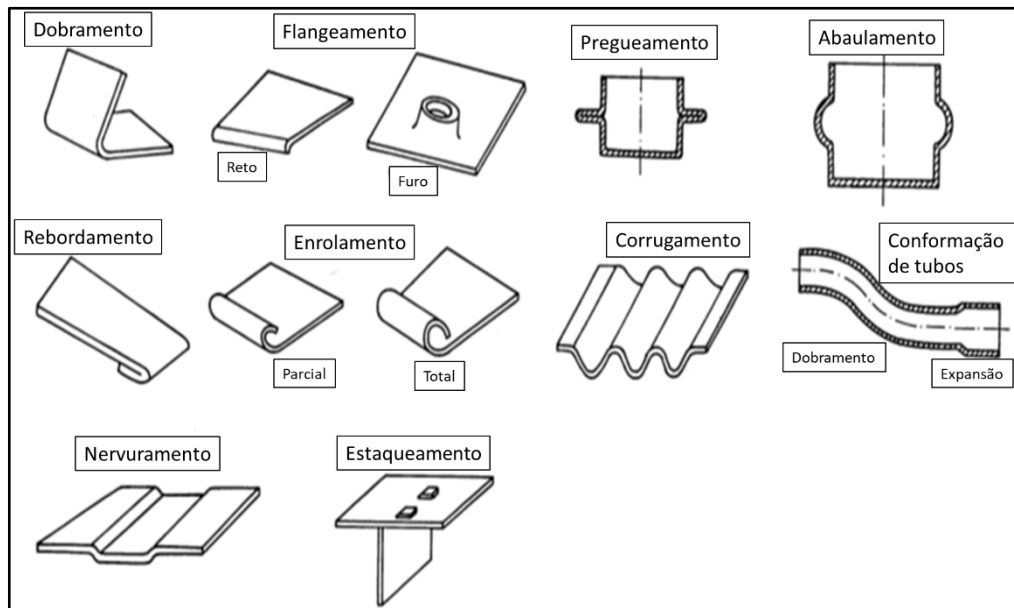
Fonte: Penteadó, 2018.

Para o presente trabalho foca-se na conformação por estampagem profunda que é definida pelo modelamento de chapas planas, comumente utilizadas para estruturas automotivas (portas, para-lamas, capô). A estampagem profunda é realizada mediante a alocação do blank na matriz na qual o punção comprime-o até que se atinja a forma final da matriz (DIETER, 1981).

### 2.1.1 Conformação geral

Segundo Bresciani *et.al* (2011), os processos por conformação geral são peças que serão dobradas ou rebordadas que envolvem corte, dobramento, repuxo, estiramento, flangeamento, enrolamento, nervuramento, abaulamento, rebortamento, gravação, conformação de turbos, dentre outros, conforme apresentado na Figura 2.2.

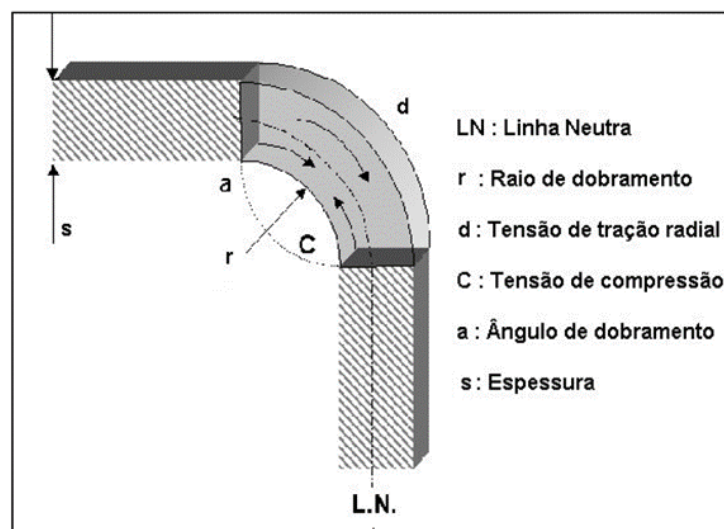
Figura 2.2 - Exemplos de estampagem por conformação em geral



Fonte: BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011.

Cada um desses processos é utilizado para produzir uma forma específica da peça (HOSFORD, 2011). Nos exemplos de conformação em geral, verifica-se na zona de deformação da chapa, tensões de tração numa superfície e de compressão na superfície oposta, criados a partir dos esforços de flexão que dobras na área deformada, conforme apresentado na Figura 2.3. Tais tensões podem provocar fissuramento na parte externa e enrugamento na interna quando essas atingem o limite de resistência a tração e compressão da chapa (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011).

Figura 2.3 - Esforços de tensão durante o dobramento



Fonte: Pereira (2005, p.7).

### 2.1.2 Estampagem

A estampagem é um processo de conformação mecânica, utilizado normalmente para dar forma a chapas metálicas planas por meio da aplicação de força em uma ferramenta (DIETER, 1981). Um punção impulsiona o blank contra uma matriz com uma forma desejada, podendo ser mecânico ou hidráulico, e a espessura da chapa de metal utilizada pode variar de alguns milímetros a menos de um milímetro, dependendo da aplicação, e do tipo de estampagem realizada (HOSFORD, 2011).

Os moldes de estampagem podem ser projetados para criar formas diversas, e a técnica é frequentemente utilizada para produzir peças em larga escala e com alta precisão dimensional. Durante a estampagem, determina-se o comportamento da chapa de acordo com o estado de tensão e deformação que varia com tempo e região da peça (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011).

Cada tipo de estampagem requer ferramentas e técnicas específicas, bem como diferentes materiais e parâmetros de processo. A escolha a ser utilizada depende da aplicação e das propriedades desejadas da peça final. Segundo Guidi (2009), a estampagem de chapas metálicas pode ser a quente ou a frio e pode ser dividida conformação geral e embutimento (estampagem profunda) (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011).

#### 2.1.2.1 Aços para Estampagem

Os aços para estampagem são aços que apresentam desempenho mecânico suficiente para fabricar peças com geometrias complexas com boa integridade estrutural. Os aços para conformação são classificados de acordo com sua resistência mecânica: baixa, média e alta, e possuem graus de estampabilidade segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Os aços de baixa resistência são utilizados em aplicações que exigem boa conformabilidade e soldabilidade, como a fabricação de peças metálicas de carrocerias automotivas como painéis laterais, paralamas, portas, capô e teto. Os aços de média e alta resistência são utilizados em aplicações que exigem maior resistência mecânica, como na fabricação de peças estruturais e de segurança para automóveis.

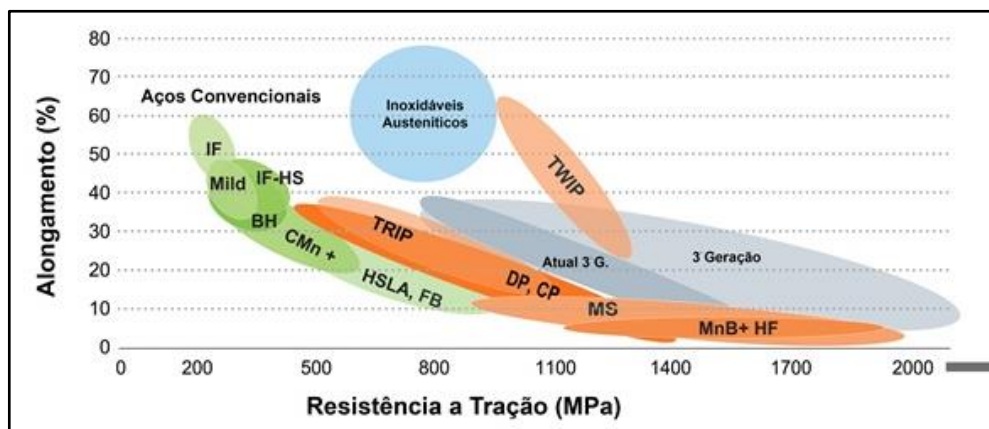
Segundo Altan (2012), as principais características que um aço para estampagem deve apresentar são:

- Boa ductilidade: capacidade de deformação sem fraturar ou apresentar trincas.
- Alta resistência mecânica: suportar as cargas de conformação.

- Boa tenacidade: resistir a impactos e choques durante o processo.
- Baixa anisotropia: propriedades mecânicas sejam uniformes em todas as direções.
- Boa soldabilidade: muitas vezes as peças estampadas precisam ser unidas por soldagem.
- Boa usinabilidade: facilidade de trabalho após o processo de estampagem.

Segundo Bresciani *et.al* (2011), essas características podem ser obtidas por meio do controle adequado da composição química do aço, tratamentos térmicos específicos e processos de conformação adequados. A seleção de um aço para estampagem pode ser definida inicialmente pela caracterização do alongamento que reflete o quanto o material é capaz de deformar sem romper no ensaio de tração, como apresentado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Alongamento em relação a resistência a tração dos principais tipos de aço



Fonte: Adaptado de Giancesini; Schaeffer (2018).

A escolha do aço para estampagem depende das características exigidas pela aplicação em questão, como a geometria da peça, as condições de uso e as propriedades mecânicas requeridas. Segundo Altan (2012), a seleção adequada do material é fundamental para garantir a qualidade e a eficiência do processo de estampagem. Alguns exemplos de aços para estampagem são:

- Aços IF (Interstitial Free): aços de baixa resistência com boa conformabilidade e soldabilidade, utilizados em aplicações como a fabricação de peças de carrocerias automotivas.
- Aços BH (Bake Hardening): aços de média resistência que apresentam aumento

de resistência mecânica após tratamento térmico, utilizados em aplicações como a fabricação de peças estruturais e de segurança para automóveis.

- Aços DP (Dual Phase): aços de alta resistência que apresentam boa conformabilidade e tenacidade, utilizados em aplicações como a fabricação de peças de segurança para automóveis.

Segundo Kuziak *et.al* (2008), os aços livres de intersticiais são uma classe especial utilizados em aplicações em que a alta conformabilidade é necessária, como na estampagem profunda. Eles são caracterizados pela ausência ou baixíssima concentração de elementos intersticiais, como carbono, oxigênio e nitrogênio, que podem formar compostos duros e frágeis que dificultam a deformação plástica do material e podem levar à formação de defeitos como trincas e porosidades durante o processo de conformação.

Os aços livres de intersticiais são tipicamente ligas de baixo carbono, com teores de carbono na faixa de 0,001% a 0,1%. Também podem conter adições de elementos como manganês, silício e alumínio, que ajudam a melhorar a conformabilidade e a resistência à corrosão. Esses aços apresentam uma microestrutura fina e homogênea que conferem as principais características como alta conformabilidade, baixa fragilização por hidrogênio, boa soldabilidade e boa resistência à corrosão. Segundo Lobão 2003, o percentual de carbono em chapas para boa estampagem é de 0,10% ou menos, o que torna o aço IF ideal para a aplicação.

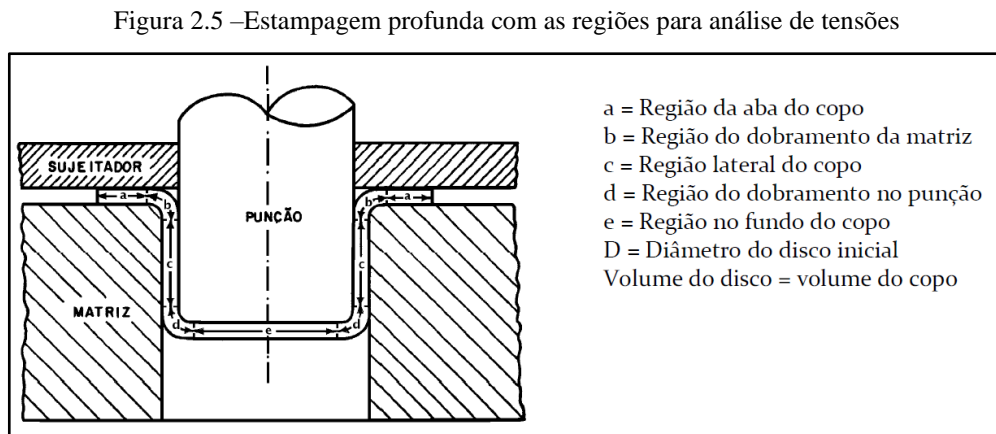
Segundo Assunção (2019), o aço IF é amplamente utilizado na indústria automotiva para a fabricação de peças estampadas com alta precisão dimensional e acabamento superficial, incluindo em TWB. Na produção de TWB, o uso de aços IF é vantajoso porque apresentam boa conformabilidade e soldabilidade, além de proporcionar redução de peso e aumento da resistência à colisão em componentes automotivos.

#### 2.1.2.2 Estampagem profunda (Embutimento)

A estampagem profunda é um processo de conformação em que uma chapa metálica é submetida a deformação plástica em uma matriz especial, que é projetada para formar a chapa com uma cavidade em forma de copo, sujeita a tensões e deformações específicas. O copo é formado a partir de um disco, quando sujeito as forças da matriz, apresenta tensões uniformes em qualquer plano vertical que passa pelo eixo de simetria (CASTRO, 2005)

As tensões geradas durante o embutimento são complexas e podem afetar a qualidade da peça final, especialmente no que diz respeito a defeitos como enrugamento, rachaduras e

falhas por fadiga (HU *et al.*, 2002). Para análise das tensões, divide-se a chapa em cinco regiões conforme apresentado na Figura 2.5.

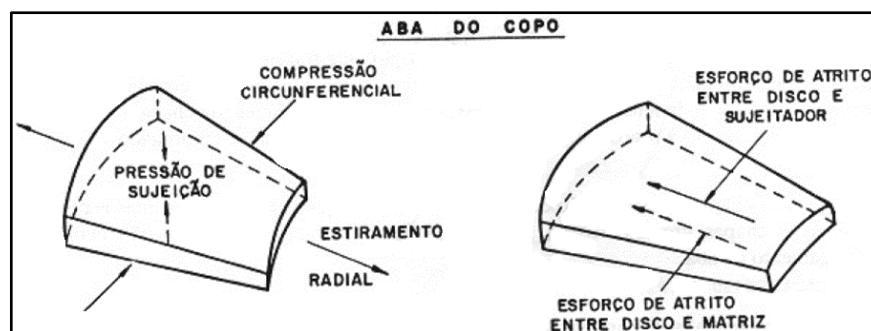


Fonte: Bresciani Filho *et al.*, 2011

Segundo Hu *et al.* (2002), as principais tensões na estampagem profunda incluem: tração, cisalhamento, radial, circunferencial e de atrito. A tração é maior no centro da chapa e diminui em direção as bordas. A de cisalhamento, é máxima na interface entre a chapa e a matriz. A radial, ocorre na direção do centro da chapa, sendo alta no centro da peça e diminui em direção as bordas. A circunferencial, ocorre ao longo da circunferência, sendo alta na borda da peça e diminui em direção ao centro.

Na aba do copo, conforme apresentado na Figura 2.6, apresentam-se as tensões circunferencial, radial/tração e de atrito. Segundo Hosford (2011), a força da prensa chapas deve manter o equilíbrio entre ser alta para evitar a formação de rugas e baixa para permitir o escorregamento da chapa na direção central.

Figura 2.6 - Esforços de tensão na aba do copo da chapa submetida ao embutimento.

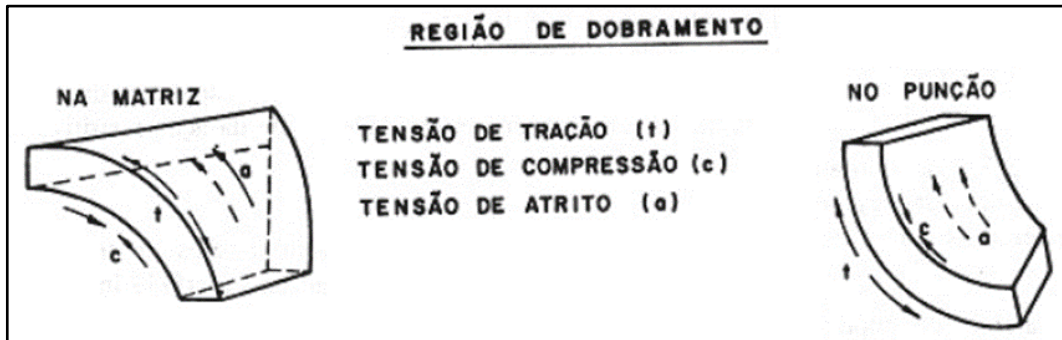


Fonte: Adaptado de Bresciani Filho *et al.*, 2011

Na região de dobramento, conforme apresentado na Figura 2.7, causada pela geometria da matriz na parte superior e pelo punção na parte inferior, a chapa fica sob tensão de tração na

parte externa e compressão na parte interna, associadas a tensão atrito entre a chapa e o punção e a chapa e a matriz. Segundo Hu *et al.* (2002), a deformação plástica na região de dobras pode levar à ocorrência de defeitos como rugas, fissuras e delaminações.

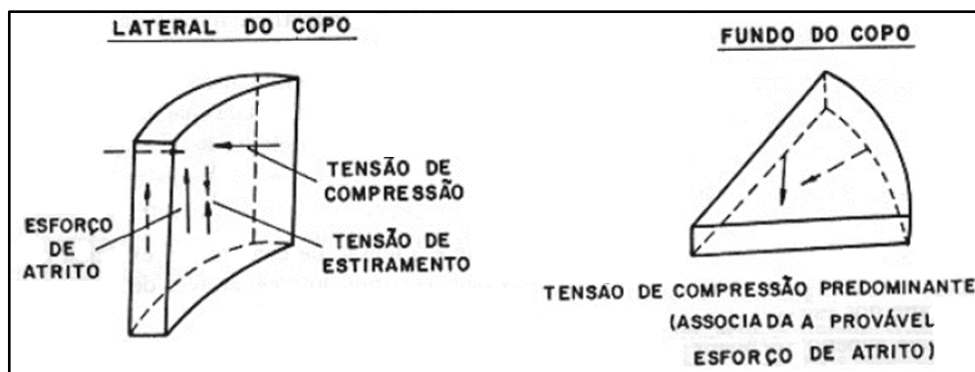
Figura 2.7 - Esforços de tensão na região de dobramento da chapa submetida ao embutimento.



Fonte: Adaptado de Bresciani Filho *et al.*, 2011

Na lateral do copo, conforme apresentado na Figura 2.8, agem tensões combinadas de compressão, estiramento e atrito. Segundo Bresciani 2011, as tensões de tração causam o estiramento das paredes do copo, enquanto as tensões compressivas causam o afinamento da espessura parede. As tensões de atrito agem nas duas superfícies, interna e externa do copo, e afinam as paredes do copo quando a folga entre matriz e o punção são menores que a espessura da chapa.

Figura 2.8 - Esforços de tensão na região lateral e do fundo do copo da chapa submetida ao embutimento.



Fonte: Adaptado de Bresciani Filho *et al.*, 2011.

No fundo do copo, apresentado na Figura 2.8, a tensão exercida é de compressão pela extremidade do punção. Segundo Bresciani 2011, essa tensão é transmitida para o resto do copo em forma de tensão radial e a redução de espessura nessa região é mínima.

O esforço de estampagem é igual à soma de todas as tensões atuantes no copo, se esse somatório for maior que o limite de resistência mecânica da chapa, esta será rompida. Segundo

Hu *et al.* (2002), os esforços máximos ocorrem logo no início da operação, quando o punção toca a chapa e a tira da inércia, será durante essa etapa que provavelmente ocorrerão as possíveis falhas de enrugamento da aba e rompimento da lateral em formação.

### 2.1.3 Anisotropia

A anisotropia, uma característica intrínseca dos materiais metálicos, desempenha um papel crucial nos processos de conformação, estampagem e estampagem profunda, bem como na fabricação de Tailor Welded Blanks (TWBs). É a característica de um material ter propriedades físicas diferentes em diferentes direções. Essa propriedade se deve a textura que é a orientação preferencial cristalográfica em diferentes direções macroscópicas do componente metálico. Isso ocorre devido ao processamento dos metais, que envolvem a solidificação, deformação plástica e recristalização, orientando os eixos cristalográficos em determinada posição (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011).

Em contextos de conformação, como a estampagem, a resposta do material à deformação é fortemente influenciada pela orientação específica da carga aplicada em relação à sua microestrutura (MARCONDES, 2019). Isso se torna particularmente evidente na estampagem profunda, onde a capacidade do material de se deformar em regiões complexas é diretamente afetada pela anisotropia. Quando se trata de TWB, a anisotropia desempenha um papel crucial na soldagem de diferentes materiais, influenciando a uniformidade da junta soldada e suas propriedades mecânicas (ANDRADE, 2019).

Um material metálico que apresenta comportamento anisotrópico reflete que as propriedades mecânicas variam de acordo com a orientação cristalográfica dos agregados policristalinos. A anisotropia é influenciada também por defeitos como poros, trincas e inclusões. Além disso, fatores externos como a direção da carga aplicada, a temperatura e a taxa de deformação também podem afetar a anisotropia (DIETER, 1981).

A textura formada por deformação plástica começa a ser notada com aproximadamente 30% de redução e é induzida até cerca de 90% de redução. A texturização inicial tem pouco impacto na textura final, o que é mais relevante é o processo de deformação que está sendo aplicado (trefilação, laminação e etc). Em exemplos práticos, o controle de textura é utilizado na formação de orelhas na estampagem profunda, aproveitamento em propriedades elásticas em molas metálicas, aproveitamento de propriedades mecânicas em dada direção e redução das perdas elétricas e magnéticas em chapas de transformadores e máquinas elétricas (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011).

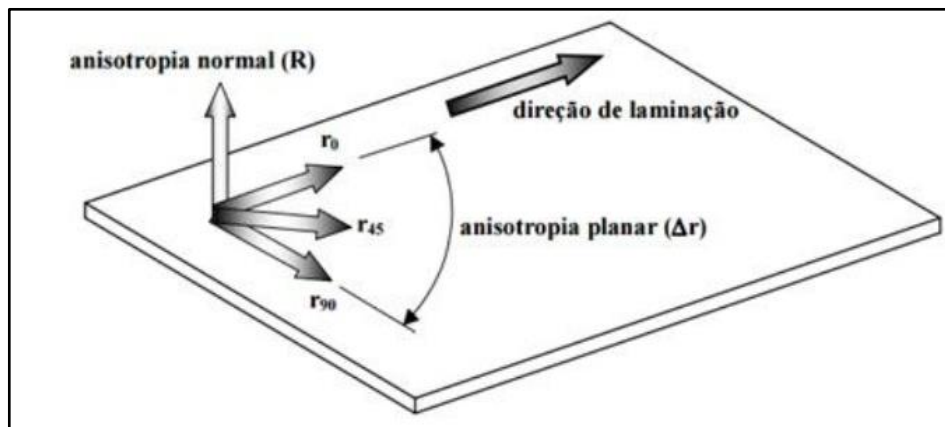
Na estampagem, a anisotropia pode ser uma propriedade desejável ou indesejável, dependendo do objetivo do processo. Por exemplo, em alguns casos, é desejável ter um material anisotrópico que seja mais resistente em uma direção do que em outras, que reduz a possibilidade de ruptura no afinamento de espessura nessa dada direção. Em outros casos, a anisotropia pode causar problemas, como variações na espessura da peça, deformações indesejadas ou falhas estruturais (formação de orelhas e afinamento das regiões laterais adjacentes ao fundo do corpo) (SANTOS, 2017).

Para avaliar a estampabilidade de chapas, utiliza-se o coeficiente de anisotropia médio  $|R|$  definido pela Equação 1:

$$|R| = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (1)$$

Os parâmetros são retirados a partir de ensaio de tração que utiliza três corpos de prova segundo a direção de laminação (ângulo  $0^\circ$ ,  $R_0$ ), a direção transversal (ângulo  $90^\circ$ ,  $R_{90}$ ) e a direção de  $45^\circ$  ( $R_{45}$ ) com a direção de laminação, conforme apresentado na Figura 2.9.

Figura 2.9 - Corpos de prova para obtenção do coeficiente de anisotropia



Fonte: Adaptado de Reis (2002).

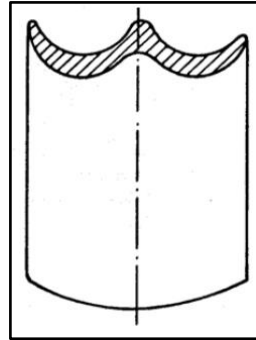
Cada parâmetro  $R$  é definido como a razão entre a deformação na direção da largura ( $\epsilon_w$ ) e a direção da espessura ( $\epsilon_t$ ), conforme apresentado pela Equação 2.

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (2)$$

Outro parâmetro avaliado é o cálculo do coeficiente de anisotropia planar, conforme a Equação 3, que está associado a formação de orelhas, apresentada na Figura 2.10.

$$\Delta R = \frac{R_0 + 2R_{90} - 2R_{45}}{2} \quad (3)$$

**Figura 2.10 - Formação de orelhas na estampagem profunda.**



Fonte: Adaptado de Bresciani Filho *et al.*, (2011).

A avaliação do coeficiente de anisotropia médio e planar refletem na texturização da chapa, isto é, se  $R_0 = R_{90} = R_{45} = 1$  ela é perfeitamente isotrópica e os grãos são orientados por acaso ( $|R|=1$  e  $\Delta R=0$ ). Para chapas anisotrópicas,  $|R|>1$  reflete uma direção de maior resistência mecânica perpendicular ao plano da chapa, reduzindo o afinamento de espessura que leva a ruptura. Já  $|R|<1$ , apresenta maior resistência à deformação na direção transversal à laminação, a chapa tende a afinar na espessura o que pode levar a ruptura nessa direção. Portanto, para uma chapa de boa estampabilidade, busca-se altos valores de coeficiente de anisotropia médio e baixos para o coeficiente planar (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011).

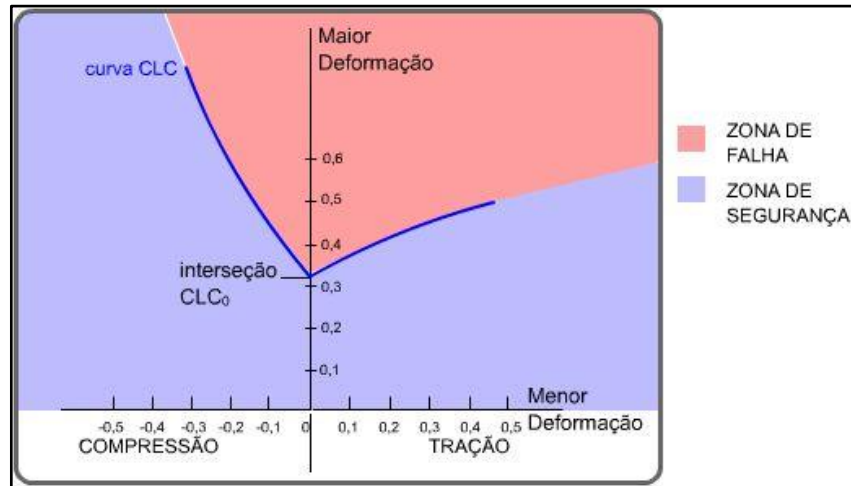
#### 2.1.4 Curvas Limite de Conformação (CLC)

A curva limite de conformação (CLC) representa a relação entre tensão e deformação em diferentes direções, fornecendo uma representação visual das propriedades anisotrópicas do material. Ao considerar a estampagem profunda, por exemplo, onde a capacidade do material de se deformar sem romper é essencial, compreender as CLCs é fundamental para evitar defeitos como enrugamento e rasgamento. No contexto dos Tailor Welded Blanks, a anisotropia dos materiais de base e a compreensão das CLCs são cruciais para prever e otimizar o desempenho das soldas conforme observado no trabalho de Santos (2021), garantindo uniformidade nas propriedades mecânicas ao longo das diferentes regiões soldadas.

A CLC é utilizada para avaliar a conformabilidade de materiais metálicos, também conhecida como curva limite de embutimento. Durante o ensaio de embutimento, a chapa metálica fica sujeita a tração, compressão e cisalhamento (SILVA *et al.*, 2015). Na CLC,

representa-se esses esforços máximos, apresentando o limiar de deformação entre o aceitável e a formação de defeitos como rasgo e enrugamento, conforme apresentado na Figura 2.11 (CIMM, 2023).

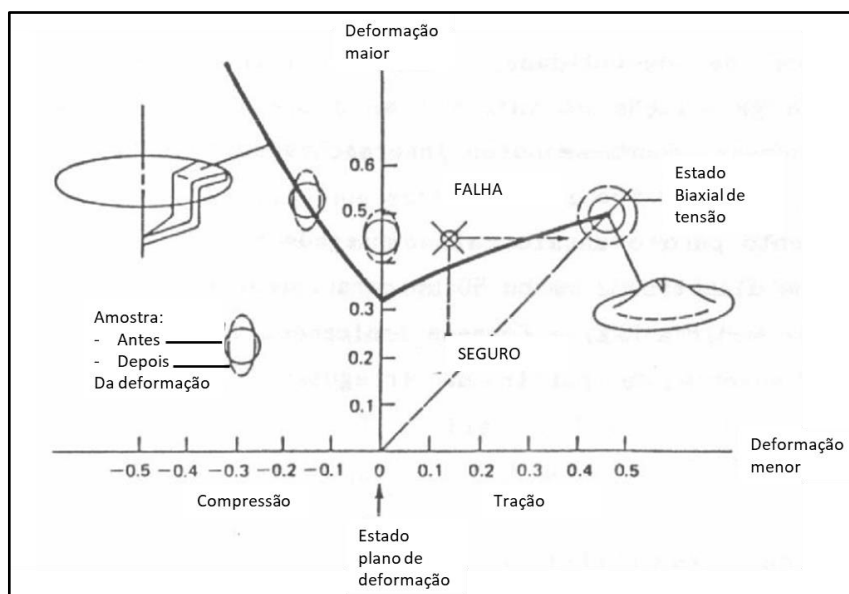
Figura 2.11 - Curva Limite de Conformação (CLC) padrão



Fonte: CIMM (2023)

A curva limite de conformação é influenciada por diversos fatores, como a anisotropia do material, a espessura da chapa, a geometria do estampo, a lubrificação e a temperatura de conformação (NETTO, 2004). A geometria do corpo de provas varia de acordo com as tensões aplicadas, e são representadas segundo regiões do gráfico da CLC, conforme apresentado na Figura 2.12.

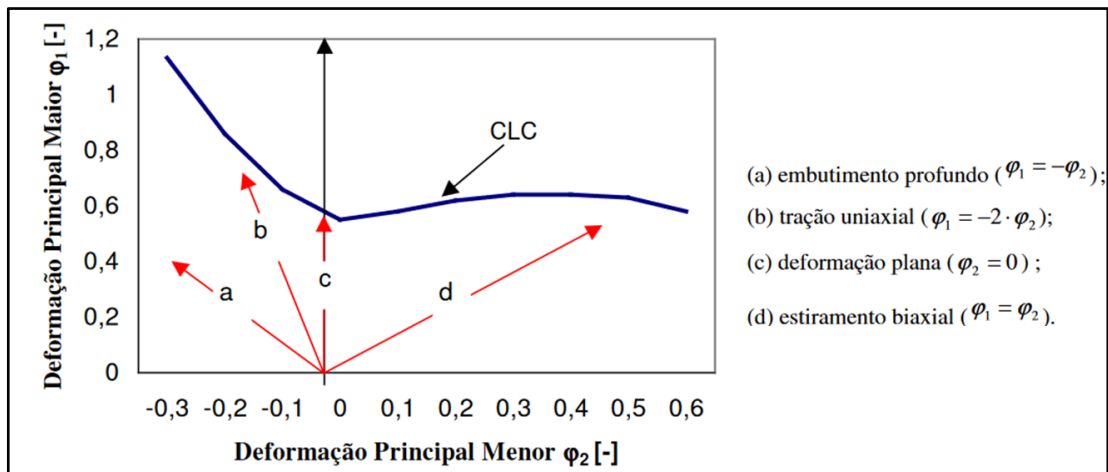
Figura 2.12 - Gráfico CLC com as diferentes geometrias obtidas de acordo com a tensão.



Fonte: Adaptado MARCONDES (2023)

Segundo a norma ISO12004-2, no gráfico CLC tem-se 4 principais regiões que apresentam características definidas de tensão e deformação, apresentadas na Figura 2.13. As deformações são: deformação principal maior ( $\varphi_1$ ) corresponde ao eixo das ordenadas e o eixo das abscissas a deformação principal menor ( $\varphi_2$ ).

Figura 2.13 - Principais regiões de deformação CLC



Fonte: Adaptado ISO12004-2 (2021)

A primeira região (a) é a de embutimento profundo na qual a deformação maior é igual ao inverso da deformação menor, no sentido da espessura não há deformação. A região (b), de tração uniaxial, apresenta-se com a deformação maior igual duas vezes ao inverso da direção menor, já na espessura apresenta compressão de mesmo módulo da deformação menor. A região (c), direção vertical, apresenta a deformação plana, é conhecida também como  $CLC_0$ , a deformação menor e no sentido da espessura são nulas, sendo a região fratura na deformação maior máxima igual a duas vezes o coeficiente de encruamento ( $n$ ) do material. E a quarta região (d), é o estiramento biaxial, na qual a amostra é deformada igualmente nas duas direções, o que é refletido pela igualdade da deformação menor e maior e a deformação na espessura é compressiva e igual ao dobro da deformação maior (NETTO, 2004).

Um material com alta conformabilidade terá uma curva limite de conformação mais elevada, o que significa que ele pode suportar maior deformação sem que ocorram defeitos (ALTAN, 2012). Segundo Batalha (2003), o embutimento é o principal ensaio utilizado para construção da curva CLC, sendo os ensaios mais relevantes: de Erichsen, Olsen, Swift, Nakazima e Fukui. Os ensaios podem ser conduzidos de acordo com diversas normas, tais como ASTM E643-84 (1995), NBR5902 e ISO 20482 (2003)

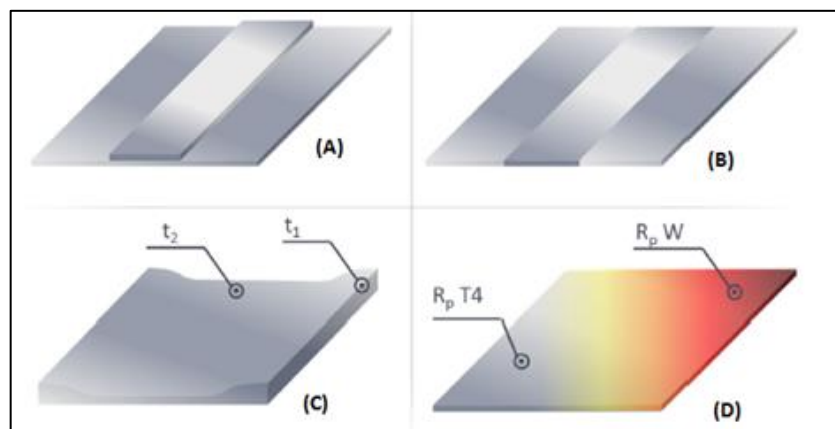
## 2.2 Tailor Welded Blanks

O processo de fabricação por *Tailor Blank* consiste na união de blanks semiacabados, normalmente por soldagem, compostos por ao menos duas chapas distintas, antes da etapa de conformação final para obtenção do produto acabado. Essa distinção pode ser em termos de material, espessura, revestimentos e outras propriedades física e/ou químicas. Destaca-se que a região soldada não precisa ser necessariamente linear, permitindo o trabalho com peças das mais diversificadas geometrias (MERKLEIN *et al.*, 2013; KUMAR, REDDY, 2015; CHAN, CHAN, LEE, 2002).

Na Figura 2.14 apresentam-se os quatro processos principais de fabricação de Tailor Blanks (MERKLEIN *et al.*, 2013):

- *Patchwork Blanks*: duas chapas distintas, soldadas de maneira sobreposta uma à outra.
- *Tailor Welded Blanks*: duas ou mais chapas, de materiais similares ou completamente diferentes (em termos de espessura ou propriedades físicas e químicas) são soldadas, no mesmo plano, formando um blank único.
- *Tailor Rolled Blank*: uma mesma chapa é submetida, em diferentes regiões, a esforços distintos de laminação, conferindo-lhe regiões com espessuras distintas, mas mesmo material.
- *Tailor Heat Treated Blanks*: consiste em tratar termicamente os blanks obtidos com intuito de melhorar sua conformabilidade, otimizando a obtenção do produto final.

Figura 2.14 - Diferentes processos de fabricação de Tailor Blanks. (A) Patchwork Blanks; (B) Tailor Welded Blanks; (C) Tailor Rolled Blank e (D) Tailor Heat Treated Blanks



Fonte: Marklein et al, 2014

Uma das principais aplicações dessa tecnologia está na fabricação de peças estruturais para automóveis, visando a redução de peso e a obtenção de alta resistência mecânica.

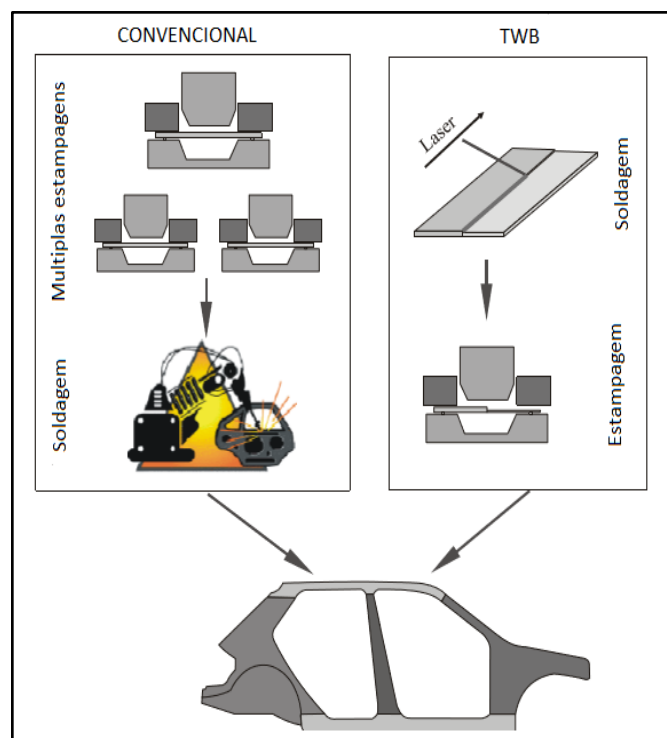
Tradicionalmente, os componentes estruturais de um veículo são produzidos separadamente de acordo com as demandas de esforços na carroceria e, posteriormente, são unidos por soldagem. Esse processo aumenta o número de operações de fabricação, o volume de material utilizado e pode comprometer a qualidade devido à soldagem de vários componentes, o que pode resultar em imprecisões dimensionais (AHMETOGLU *et al.*, 1994).

Como alternativa, o processo de TWB tem por definição a junção por soldagem de diferentes materiais, espessuras e revestimentos, conferindo regiões de maior sollicitação materiais mais robustos (alta resistência e espessos) e para as outras áreas chapas mais finas e leves. Dessa forma, cria-se uma única estrutura homogênea, de menor peso, resistência adequada e com processo com menor número de operações e resíduos do que a comumente utilizada (AHMETOGLU *et al.*, 1994).

Para realizar a união de chapas por TWB pode-se utilizar como processos de soldagem: TIG (*Tungsten Inert Gas*), MIG (*Metal Inert Gas*), feixe de elétrons ou laser. Dentre estes, os que geram menor ZTA e ZF são os processos a laser e feixe de elétrons. Porém, o processo a laser é mais comumente utilizado devido ao menor custo relativo e flexibilidade quando comparado ao feixe de elétrons (KINSEY, WU, 2011).

Na Figura 2.15 apresenta-se a comparação entre o processo convencional e o processo por TWB (BABIC, 2002).

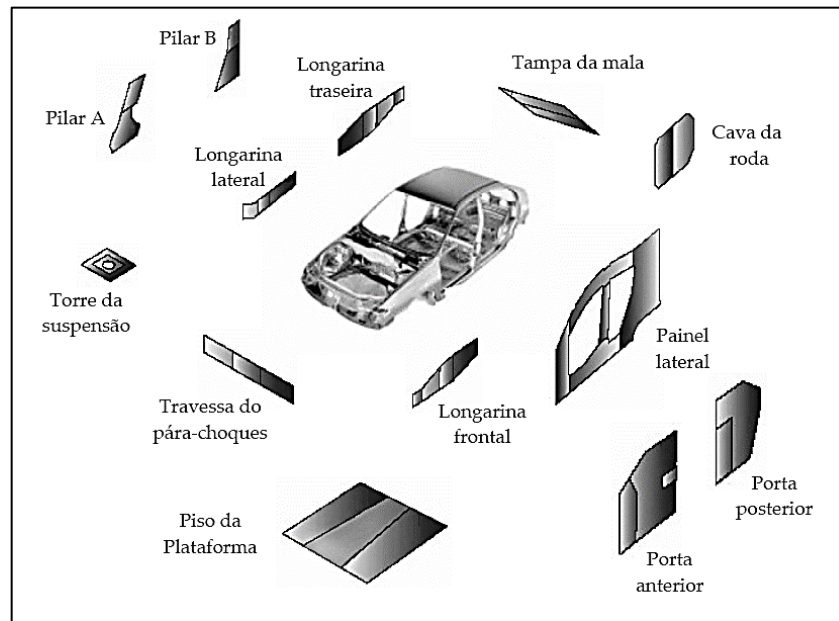
Figura 2.15 – Comparação entre o processo convencional e TWB



Fonte: Babic, 2002.

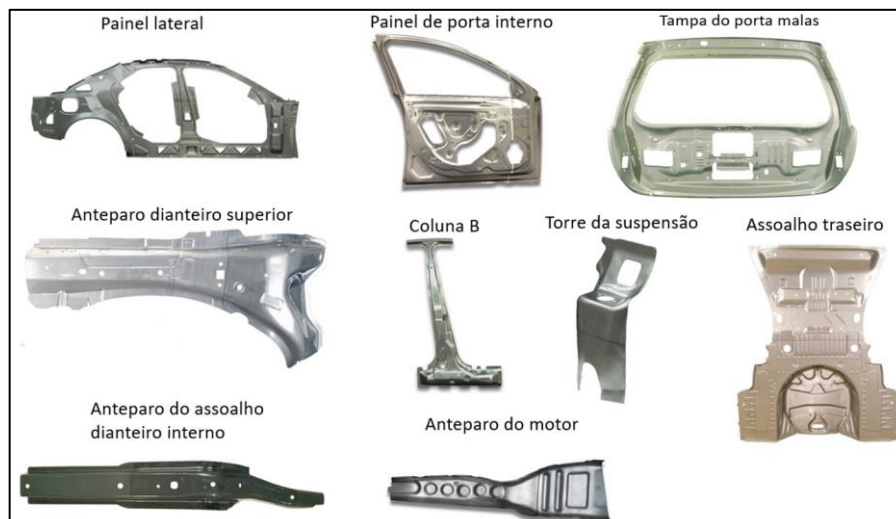
Outras aplicações em veículos, de componentes obtidos a partir chapas confeccionadas por meio do TWB, estão apresentadas nas Figura 2.16 e Figura 2.17 (BAPTISTA, 2006; TWB COMPANY, 2019).

Figura 2.16 – Aplicações de TWB na estrutura de um veículo



Fonte: Baptista, 2006

Figura 2.17 – Estruturas fabricadas por meio de TWB na estrutura de um veículo



Fonte: Adaptado TWB COMPANY, 2019

Para emprego por parte das indústrias automobilísticas são citados como pontos principais: o processo de TWB, quando empregado em componentes de reforço estrutural, pode gerar redução de massa da ordem de até 16% (MICHALSKA, ROJEK, FRUITOS, 2010); em

alguns casos, embora não se consiga diretamente redução de massa, diminui-se o número de subcomponentes e a necessidade de inclusão de reforços. Com isso, reduz-se a complexidade do processo produtivo e se ganha em produtividade (MIN, KIM, KANG, 1998).

Cita-se como vantagens do processo de fabricação por TWB além da redução de peso, a redução de custos de manufatura, melhor resistência ao choque e resistência da peça, redução de ruído e vibração oriundo da estrutura do automóvel, melhor resistência a corrosão e melhor consistência e precisão dimensional (KINSEY, WU, 2011).

Apesar das referidas vantagens e da versatilidade, deve-se atentar para o processo de soldagem. Isso porque o fluxo do material e sua conformabilidade ao longo do processo de estampagem são grandemente afetados pela orientação da linha de solda. Quando dois metais de espessura distinta são soldados, os requisitos para conformação dos mesmos e a resistência mecânica obtida podem ser diferentes ao longo do blank confeccionado (AHMETOGLU *et al.*, 1994).

Com isso, o processo de TWB apresenta desvantagens como: redução da conformabilidade do blank proveniente das mudanças das características mecânicas dos materiais (principalmente na ZTA), que surge com o processo de soldagem; movimentação da linha de solda durante a estampagem, criando uma tensão excessiva e redução do potencial de alongamento na ZTA do material de menor resistência, enrugamento da chapa de menor espessura durante o posicionamento das chapas para soldagem originando uma possível falha por rasgamento (KINSEY, WU, 2011).

Dessa forma, a soldabilidade e a conformabilidade são dois conceitos que devem ser levados em consideração (MIN, KIM, KANG, 1998). A influência do posicionamento do cordão de solda e da chamada razão de espessura (razão entre a maior e a menor espessura das chapas que compõe o blank) são frequentemente avaliadas, levando-se em consideração seus efeitos na conformação dos componentes, por meio das curvas limites de conformação (CLC) (CHAN, CHAN, LEE, 2002).

Para garantir controle efetivo do processo também são utilizados softwares de simulação computacional, sendo o método mais empregado o de elementos finitos (*Finite Element Analysis* – FEA). Auxilia-se a previsão do comportamento do TWB durante o processo de estampagem, focando-se em prováveis falhas relacionadas ao processo de soldagem (em geral trabalha-se com uma malha mais refinada na região do cordão de solda (AHMETOGLU *et al.*, 1994; MICHALSKA, ROJEK, FRUITOS, 2010).

Há diversas maneiras de avaliar a influência das variáveis do processo de soldagem na conformabilidade e nas propriedades mecânicas do blank: testes destrutivos e não destrutivos.

Os métodos destrutivos são feitos em componentes fora da linha de produção, pois demandam tempo. Usa-se um corpo de prova (fração do blank) para realizar a análise detalhada do material.

Os métodos não destrutivos, por sua vez, são avaliações rápidas, normalmente durante o processo produtivo, para determinar as dimensões, condições da superfície, geometria da seção transversal e continuidade do material. Comumente utiliza-se como base e experiência, os dados obtidos nos ensaios destrutivos (KINSEY, WU, 2011).

As análises destrutivas são: ensaio de tração, microdureza, ensaio de embutimento Erichsen, teste de rasgamento e análise microestrutural da seção transversal. As não destrutivas são divididas em inspeções da superfície (por meio de câmeras) verificação da largura da solda por falta de penetração e triangulação a laser.

Há também inspeções internas, por meio de ensaio de ultrassom, transdutor acústico eletromagnético (EMAT), detector de vazios por partículas magnéticas, raio X e emissão de luz (KINSEY, WU, 2011).

Dessa forma, o estudo do processo TWB, focado nas variáveis do processo de soldagem e nas operações posteriores de conformação é crescente, visando otimização e difusão da tecnologia. Busca-se o desenvolvimento de procedimentos e equipamentos para a produção de produtos de qualidade (KINSEY, WU, 2011).

### 2.2.1 Soldagem a Laser

A união de metais pode ser realizada de duas formas distintas, por ação de forças macroscópicas ou microscópicas. Cita-se como união por meio de forças macroscópicas a parafusagem e rebitagem, em que a força de junção dos materiais se dá por cisalhamento do componente (parafuso/rebite) mais o atrito das áreas em contato.

A união por meio de forças microscópicas se refere aos processos de brasagem, soldagem e colagem, em que a união é feita pela aproximação de átomos e moléculas das peças a serem unidas, formando ligações químicas (normalmente metálicas ou de *Van der Waals*), com a adição de um material intermediário ou não (MARQUES; MONDENESI; BRACARENSE, 2009).

A Associação Americana de Soldagem (*American Welding Society* – AWS) define soldagem como “processo de união de materiais usados para obter a coalescência localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição”.

O termo soldagem pode englobar não só a união de materiais, mas também processos de recuperação de peças desgastadas, revestimento de estruturas, deposição de material sobre uma superfície e corte de peças (MARQUES; MONDENESI; BRACARENSE, 2009).

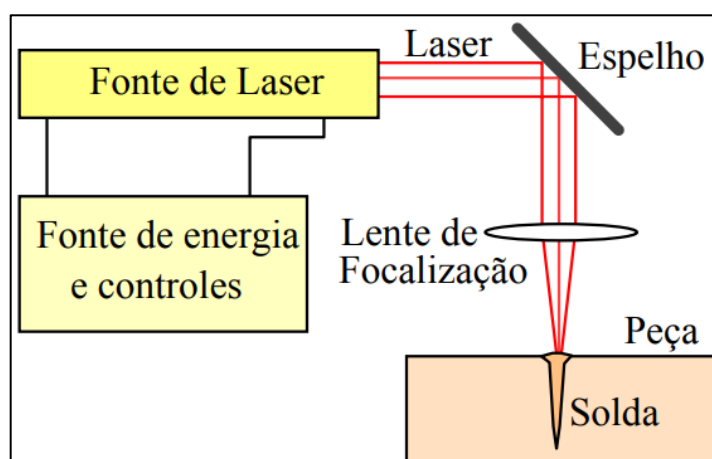
Os processos de soldagem podem ser divididos em dois grandes grupos: por deformação e por fusão. O primeiro grupo inclui soldagem por forjamento, ultrassom, fricção, difusão e explosão. O segundo, pode ser subdividido conforme o tipo de energia usada para fundir as peças, como arco elétrico (soldagem a arco submerso, eletrodo revestido, arame tubular, MIG/MAG, plasma, TIG), feixe de elétrons (soldagem a feixe de elétrons), aquecimento por resistência da escória líquida (soldagem por eletro-escória), feixe de luz (soldagem a laser) e chama oxi-acetilênica (soldagem a gás) (MARQUES; MONDENESI; BRACARENSE, 2009).

O presente trabalho trata do comportamento mecânico de TWB unidos por soldagem a laser. Define-se esse processo de soldagem como a fusão localizada da junta dos dois materiais por meio de um feixe de luz concentrada, de alta intensidade e em alta velocidade. A tecnologia utiliza basicamente dois tipos de laser: o de CO<sub>2</sub> e o de Nd:YAG (“*Neodymium – Yttrium Aluminium Garnet*”), que emitem radiação eletromagnética nas faixas de comprimento de onda ultravioleta e infravermelho (MARQUES; MONDENESI; BRACARENSE, 2009).

O laser de CO<sub>2</sub> é mais utilizado para corte e soldagem. Nesse tipo de equipamento é necessária a entrada contínua de gás e é possível variar a densidade de energia direcionada ao material, variando a potência e o foco do feixe de luz. O equipamento com laser Nd:YAG é destinado a aplicações que demandam menores temperaturas, produz um feixe de laser contínuo e apresenta menor consumo de energia (MARQUES; MONDENESI; BRACARENSE, 2009).

Na Figura 2.18 apresenta-se o desenho esquemático de um equipamento de solda a laser. Há uma fonte de energia e controles, fonte emissora de laser, espelho e lente de focalização.

Figura 2.18 – Desenho esquemático de um equipamento de solda a laser



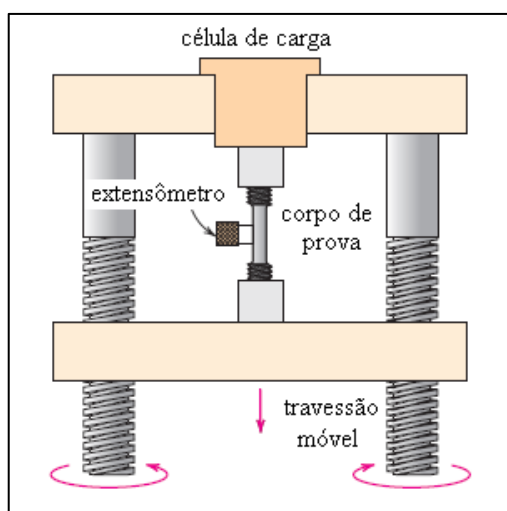
Fonte: Marques, Mondenesi, Bracarense, 2009

### 2.2.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração, usado para a caracterização mecânica de materiais, desempenha um papel crucial na avaliação do desempenho e da integridade estrutural de componentes (CALLISTER, 2016). Compreender como esses materiais respondem à carga uniaxial é essencial para garantir a segurança e a eficiência dos componentes automotivos que compõem a estrutura dos veículos. Neste contexto, esta revisão visa explorar as recentes pesquisas e desenvolvimentos relacionados aos ensaios de tração em Tailor-Welded Blanks na indústria automotiva.

Conforme a definição apontada por Callister (2016), no ensaio de tração, o corpo de prova é submetido a deformação até o ponto de ruptura, por meio de uma carga de tração gradualmente aumentada, que é aplicada uniaxialmente ao longo do eixo principal de um corpo de prova. O ensaio de tração de um eixo (uniaxial) é o método para determinar os valores característicos para limite de escoamento ou limite de elasticidade, resistência à tração e deformação de ruptura. A máquina de ensaios de tração é projetada para estender o corpo de prova a uma taxa constante, enquanto registra continuamente a carga aplicada instantaneamente (por meio de uma célula de carga) e as deformações resultantes (usando um extensômetro), como mostrado na Figura 2.19.

Figura 2.19 - Representação do ensaio de tração



Fonte: CALLISTER (2016)

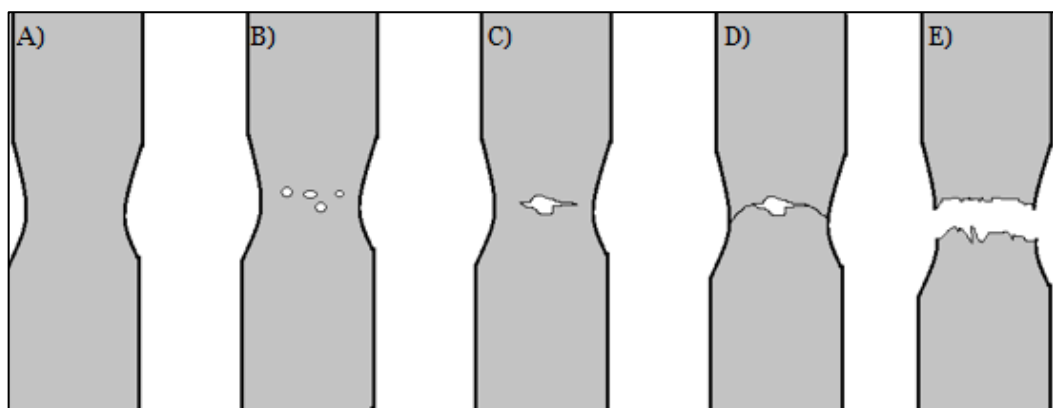
Os resultados de um ensaio de tração desse tipo são registrados por meio de um gráfico, que representa a carga ou força em relação ao alongamento. Essas características carga-

deformação estão intrinsecamente ligadas ao tamanho da amostra e são normatizadas as normas dominantes para esse tipo de ensaio são a DIN EN ISO 6892-1 e a ASTM E8. Neste trabalho, optou-se por adotar a norma ISO 6892-1 (2016) como padrão. Conforme Zwickroell (2022), o propósito das normas é descrever e definir o método de ensaio de modo que, mesmo com a utilização de diferentes sistemas de ensaio, os valores característicos a serem determinados permaneçam comparáveis e corretos.

Durante o experimento, a ruptura é precedida por fases de deformação, que são essencialmente a reorganização das moléculas do material à medida que ele é estirado. tensão aumenta gradualmente à medida que a peça varia de comprimento, e durante essa variação, as moléculas se rearranjam, já que as ligações químicas do material são inicialmente fortes o suficiente para suportar a carga aplicada. À medida que a peça continua a se alongar, torna-se mais desafiador manter a organização estrutural, o que dificulta ainda mais o suporte da carga, eventualmente levando à ruptura (GARCIA *et. al* 2012).

A ruptura, representada na Figura 2.20, pode ser representada em 5 fases: empençamento (Figura 2.20 A), micro cavidades na estrutura interna (Figura 2.20 B), trincas e fissuras (Figura 2.20 C), fratura visível (Figura 2.20 D) e ruptura final (Figura 2.20 E).

Figura 2.20 - Fases da fratura material no ensaio de tração



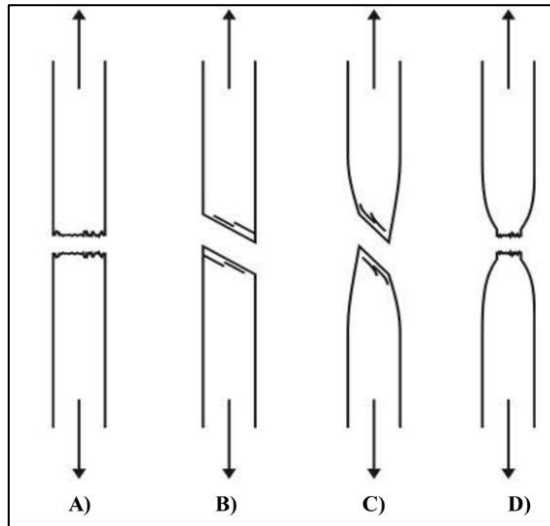
Fonte: Ralls *et. al* (1976) APUD Garcia *et. al* (2012)

Ao romper o corpo de prova, é possível estudar os mecanismos de fratura, os quais podem ser classificados como dúcteis, quando acompanhados por uma intensa deformação plástica, ou frágeis, nos quais não há deformação plástica significativa. Para compreender qualquer tipo de fratura, dois fenômenos devem ser analisados em sequência: a nucleação de trincas e o coalescimento ou crescimento dessas trincas (GARCIA *et. al* 2012).

Em metais, geralmente, são identificados quatro tipos distintos de fraturas representadas na Figura 2.21: A) Fratura reta (material frágil); B) Fratura em 45°, sem deformação lateral

(material CFC, frágil); C) Fratura em 45°, com deformação lateral (material CFC, dúctil) D) Fratura taça-cone (material CCC, dúctil).

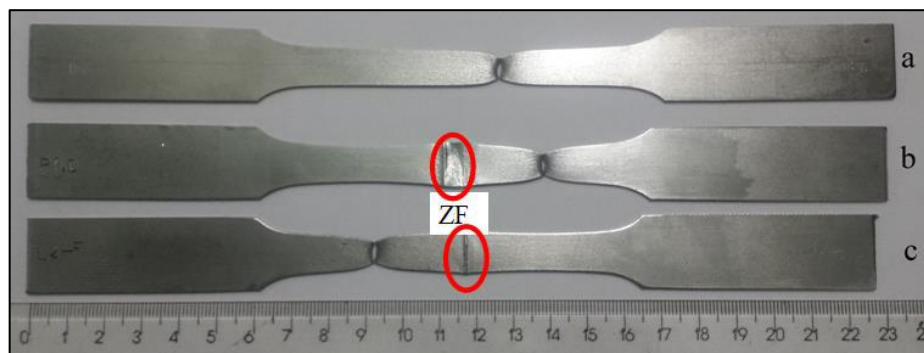
Figura 2.21 - Tipos de fraturas em metais submetidos a tensão uniaxial



Fonte: Garcia *et.al* (2012)

Esse padrão de fratura dúctil, que se desenvolve transversalmente à direção da força uniaxial, em aços com estrutura CCC, foi observado nos estudos de Dias *et. al* (2016), Figura 2.22, e também no de Fongaro *et. al* (2022), Figura 2.23. No primeiro estudo, é apresentada a caracterização das propriedades mecânicas e das tensões residuais em juntas soldadas de aço IF, utilizando os métodos de soldagem a laser e a plasma. Neste caso, a fratura ocorre na direção perfeitamente horizontal, tanto no material de base quanto nas zonas afetadas pelo calor nos cordões de solda, tanto para os TWBs soldados a plasma quanto a laser. Já o segundo estudo, que realizou ensaios de tração em chapas finas de aço, também observou esse mesmo comportamento em aço SAE 1006, o qual demonstrou ser dúctil.

Figura 2.22 - Corpos de prova fraturados após ensaio de tração. a) Metal base; b) Junta soldada a plasma; c) Junta soldada a laser.



Fonte: Dias *et. al* (2016)

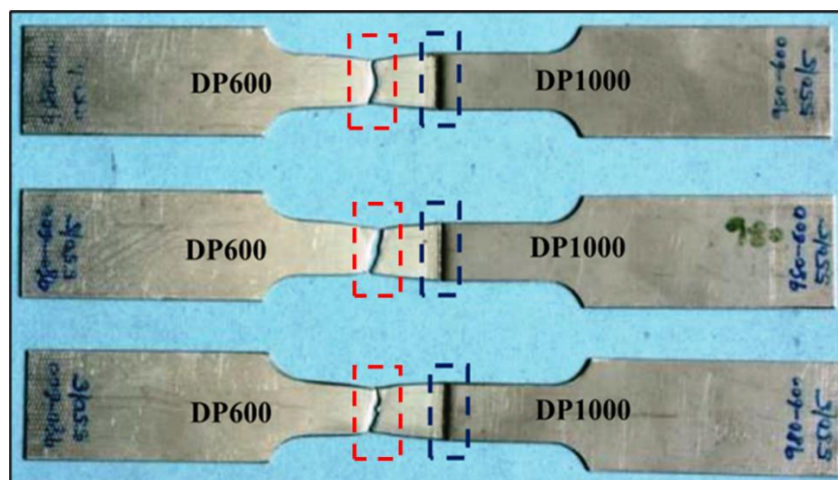
Figura 2.23 Comparativo dimensional dos corpos de prova antes e depois do ensaio de tração.



Fonte: Fongaro *et. al* (2022)

Em outros estudos, como o de Schrek *et. al* (2016), a fratura em aços DP (*Dual Phase - Bifásicos*), dúcteis, apesar de acontecer na horizontal, em relação a força de tração, não são retilíneas, representadas na Figura 2.24. Conforme a teoria da mecânica da fratura, apresentada por Dowling (2013) e Dharan, *et.al* (2016), a fratura em um material dúctil é determinada pelas tensões de cisalhamento que acumulam em regiões específicas do material como em seus planos de deslizamento ou interfaces entre grãos cristalinos, o que pode levar a alteração da propagação da trinca/fratura.

Figura 2.24 - Exemplos da amostra TWB com a junta de solda na combinação HCT980X – CT600 após teste de tração (potência de soldagem 550W, taxa 5mm/s)

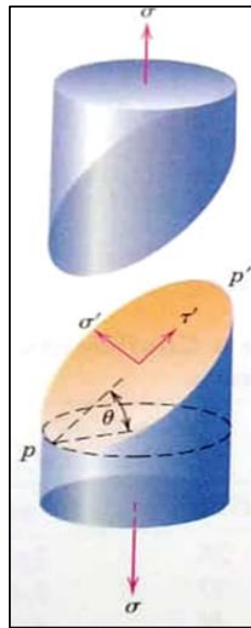


Fonte: Schrek *et. al* (2016).

Na pesquisa de Andrade (2019), apresenta-se como objetivo avaliar e caracterizar o impacto da orientação angular relativa da solda de TWBs no ensaio de tração. Para atender a

esse propósito, foram produzidas amostras seguindo as diretrizes da norma ASTM E-8M (2015), os corpos de prova foram orientados, em relação à posição inicial da solda, com angulação variando de 5° em 5° de 0° a 70°. O estudo empregou a decomposição da carga de ruptura em componentes puramente de tração e cisalhamento, baseada na variação da tensão/carga conforme a angulação na seção da área, conforme representado na Figura 2.25.

Figura 2.25 - Tensões normal ( $\sigma'$ ) e cisalhante ( $\tau'$ ) representadas em um plano orientado em relação a um ângulo em relação ao plano perpendicular de atuação da tensão  $\sigma$



Fonte: Adaptado de CALLISTER, RETHWISCH (2016)

A decomposição das tensões gera as seguintes Equações 4 e 5:

$$\sigma' = \sigma \cos^2 \theta \quad (4)$$

$$\tau' = \sigma \sin \theta \cos \theta \quad (5)$$

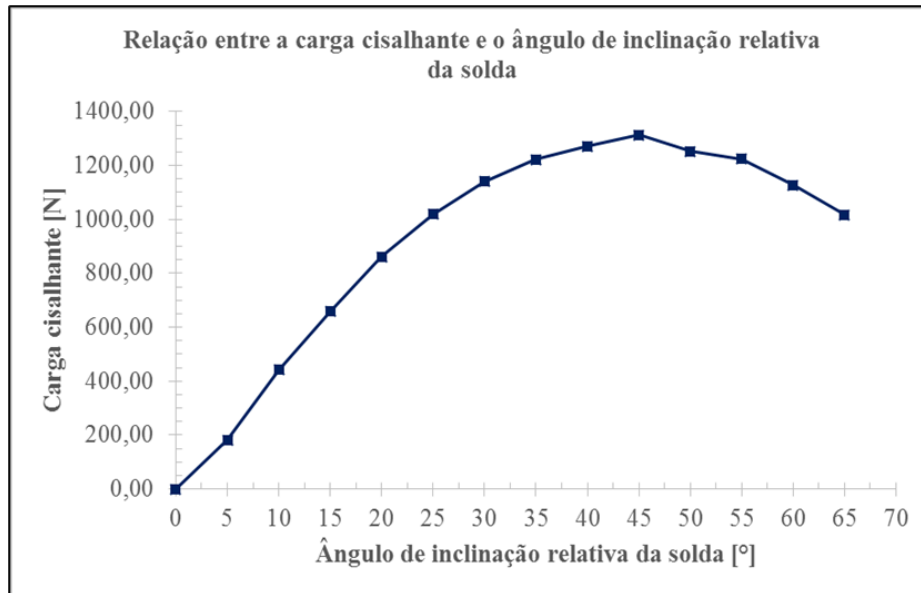
Onde:

- $\sigma$  = Tensão puramente de tração
- $\sigma'$  = Tensão normal
- $\tau'$  = Tensão cisalhante
- $\theta$  = Ângulo relativo de inclinação do ângulo de corte

As conclusões derivadas da pesquisa de Andrade (2019), sugerem a existência de um ângulo ideal para a direção da linha de solda. Esse ângulo demonstra proporcionar uma

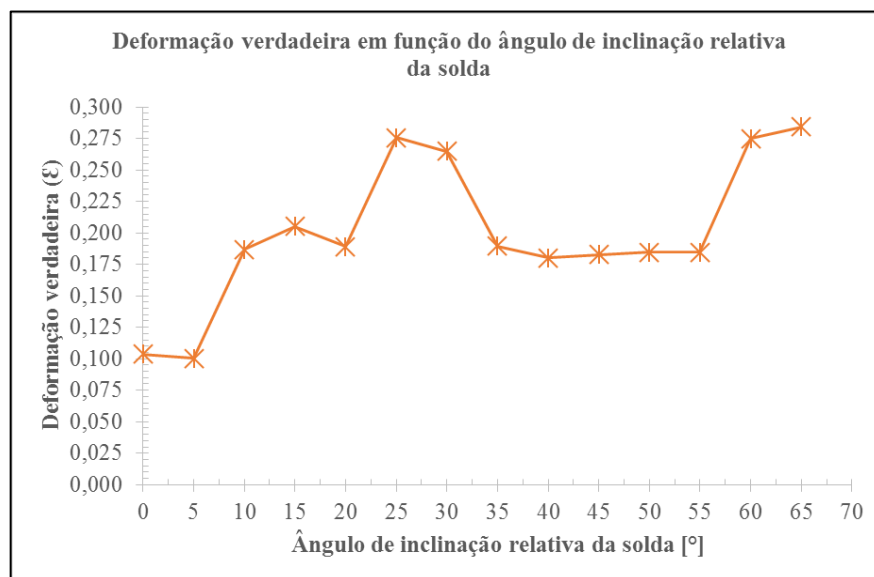
deformação adequada da chapa antes da ruptura, ao mesmo tempo em que melhora a resistência à tração e ao cisalhamento. De acordo com os resultados, apresentados na Figura 2.26, esse ângulo ideal situa-se em torno dos 30°. Comportamentos semelhantes em cisalhamento são observados para ângulos complementares, como 25° e 65°, enquanto o comportamento se agrava a 45°, conforme Figura 2.27.

Figura 2.26 - Razões entre a carga cisalhante e o ângulo de inclinação, para as amostras de tração de TWB.



Fonte: Andrade (2019).

Figura 2.27 - Razão entre a deformação verdadeira e o ângulo de inclinação, para as amostras de tração de TWB.

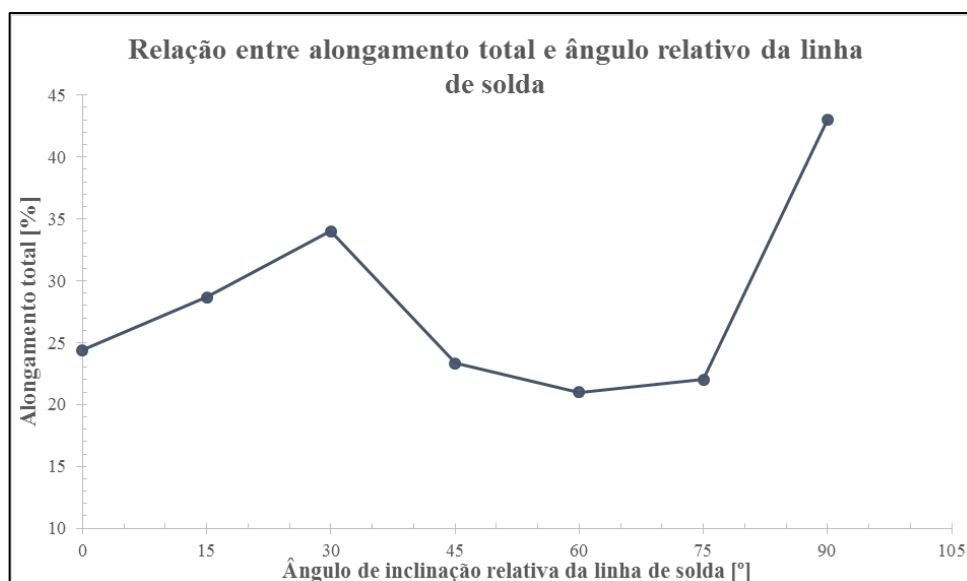


Fonte: Andrade (2019).

Esses resultados foram reafirmados na pesquisa de Santos (2021), trabalho no qual foram ensaiadas amostras de tração de TWBs e construído uma curva limite de conformação

(CLC) por meio das diferentes orientações da linha de solda em relação a direção de laminação (DL). Na análise da deformação referiu-se por dados de alongamento máximo das amostras ensaiadas, conforme apresentado na Figura 2.28. Observa-se uma tendência clara de aumento na deformação máxima suportada pelas amostras à medida que o ângulo de inclinação relativa da linha de solda é aumentado, alcançando um valor ótimo em torno de 30°.

Figura 2.28 - Ilustrativo entre a relação de alongamento e ângulo



Fonte: SANTOS (2021)

Em consonância com pesquisas relevantes, busca-se integrar diversas técnicas de experimentação e testes, oferecendo flexibilidade na avaliação do posicionamento da linha de solda. Portanto, o propósito deste trabalho é desenvolver uma metodologia e avaliar, por meio de simulações numéricas, o comportamento de TWB sob diferentes abordagens de posicionamento da linha de solda no ensaio de tração. Além disso, pretende-se estabelecer diretrizes para a definição, no programa de elementos finitos, da solda e de suas propriedades mecânicas.

### 2.3 Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um meio utilizado para resolver problemas de engenharia e ciência através dos princípios gerais da Mecânica do Contínuo, em que resolve equações diferenciais parciais de modo aproximado (RIBEIRO, 2004). Como vários fenômenos podem ser descritos por meio dessas soluções matemáticas, utiliza-se o método para análise de

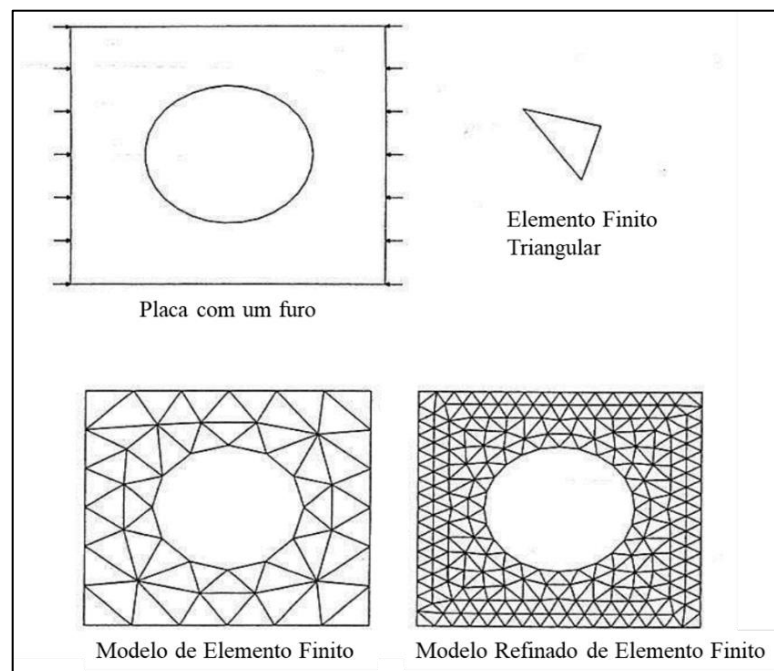
tensões, transferência de calor, escoamento de fluidos e eletromagnetismo (MOAVENI, 2015). Muitos desses problemas possuem alta complexidade ou não apresentam meios viáveis de análise via os métodos analíticos clássicos, com isso, o MEF apresenta-se como uma ferramenta numérica aproximada de forma a viabilizar estudos prévios de engenharia (FISH, 2009)

A base do MEF é dividir o corpo de análise em elementos, conectados por nós, conforme apresentado na Figura 2.29, e dessa forma apresentar uma solução aproximada. A representação do conjunto dos elementos chama-se de malha, que por meio de recursos computacionais consegue-se manipular a geometria dos elementos no processo conhecido como geração de malha. (FISH, 2009)

O MEF apresenta um método sistêmico, que por meio de programas computacionais, consegue-se obter soluções agilizadas. A primeira etapa na modelagem computacional consiste na descrição e representação dos fenômenos físicos que influenciam o problema a ser resolvido (FISH, 2009). Identifica-se dessa forma as variáveis dependentes e independentes que regem a situação, resultado no conjunto de equações diferenciais a serem resolvidas (RIBEIRO, 2004)

Em problemas lineares, determina-se a solução por meio de um sistema de equações lineares, em que o número de incógnitas é igual ao número nodal. Com isso, quanto maior o número de nós, maior é a exatidão do resultado, entretanto aumenta-se o tempo computacional e conseqüentemente o custo de projeto (FISH, 2009)

Figura 2.29 – Geometria e malhas de elementos finitos.



Fonte: Fish 2009

Na análise de tensões, como é o caso do presente trabalho, as variáveis de campo são os deslocamentos. No programa de elementos finitos, determina-se o deslocamento de cada nó por meio de cada elemento, no qual os resultados são representados como gráficos de contorno, indicando as regiões de maiores e menores deformações, deslocamentos ou qualquer outra variável em análise (FISH, 2009)

A aplicação de MEF linear para análise de tensões é aplicável em problemas que apresentam comportamento elástico e para pequenos deslocamentos. Para materiais com comportamento não linear ou grande deformações, como cargas de choque, uma análise não linear é necessária (FISH, 2009).

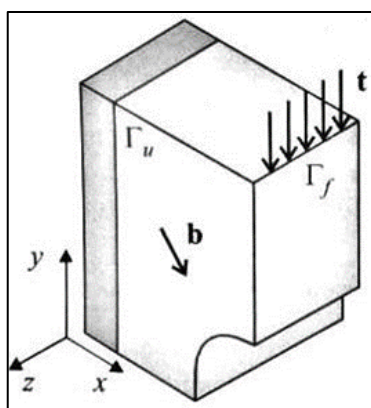
### 2.3.1 Formulação matemática

Para chegar na formulação matemática dos elementos finitos pode-se utilizar diferentes meios, como a formulação clássica, o princípio dos trabalhos virtuais (PTV), a energia potencial mínima, formula variacional, energia de deformação, dentre outras (RIBEIRO, 2004). Neste trabalho, apresenta-se o princípio dos trabalhos virtuais para um elemento tridimensional conforme o trabalho de Mendonça e Fancello (2019) e Dias (2022).

O PVT pode ser caracterizado da seguinte maneira: *"Seja um corpo em equilíbrio, submetido a um sistema de forças externas. Se a este corpo é imposto um campo de deslocamentos virtuais, compatível com os vínculos da estrutura, o trabalho das forças externas é igual ao trabalho das forças internas."*

É tomado em consideração um objeto arbitrário que preenche uma região  $\Omega$  no espaço tridimensional  $R^3$ , delimitado por condições de fronteira  $\Gamma$ , em que o vetor normal "n" está devidamente definido em quase todos os pontos, como ilustrado na Figura 2.30.

Figura 2.30 – Objeto tridimensional sob carregamento



Fonte: Mendonça e Fancello (2019) – Adaptado

A fronteira  $\Gamma$  é separada em duas áreas:  $\Gamma_u$  com deslocamentos com valores conhecidos ( $\bar{u}$ ) e  $\Gamma_f$  que são carregamentos superficiais conhecidos como  $\bar{t}$ . Além disso, tem-se a atuação de forças externas ( $b$ ). O cenário tridimensional de equilíbrio é abordado por meio do conjunto de equações diferenciais apresentadas nas Equações 5.

$$\begin{cases} \nabla \sigma + b = 0 \text{ em } x \in \Omega \\ \sigma n = \bar{t}(x) \text{ em } x \in \Gamma_f \\ u(x) = \bar{u}(x) \text{ em } x \in \Gamma_u \end{cases} \quad (5)$$

A equação baseada no princípio do trabalho virtual pode ser dividida em duas partes distintas. A primeira parte é identificada como trabalho virtual interno, relacionado às tensões e deformações internas. A segunda parte é referida como trabalho virtual externo, originado de forças externas atuando sobre o objeto em análise.

Ao considerar que o campo de deslocamentos virtuais por  $\hat{u}$ , as deformações virtuais por  $\varepsilon(\hat{u})$  e a tensão ( $\sigma$ ), o trabalho das forças internas ( $\delta U$ ) e externas ( $\delta W$ ) são dadas pelas Equações 6 e 7.

$$\delta U = \int \sigma \cdot \varepsilon(\hat{u}) d\Omega \quad (6)$$

$$\delta W = \int \bar{t} \cdot \hat{u} d\Gamma + \int b(\hat{u}) d\Omega \quad (7)$$

Igualando as Equações 6 e 7, e introduzindo as relações constitutivas das equações 3, tem-se o equilíbrio dado pela Equação 8:

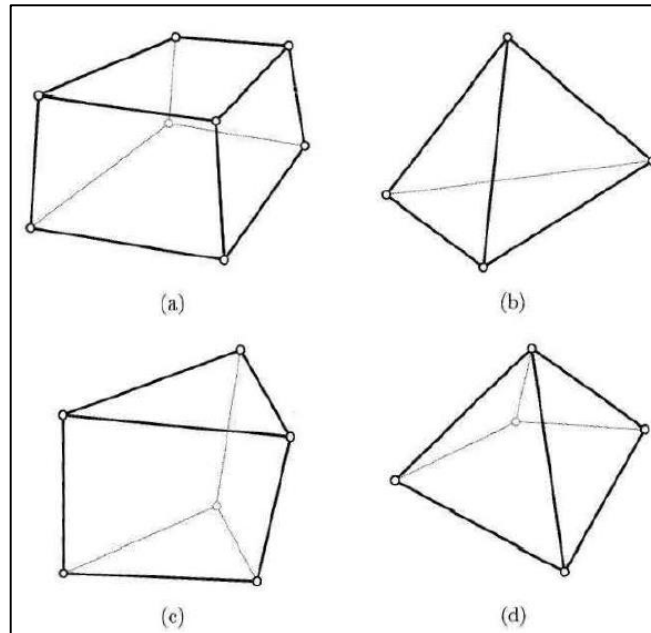
$$\int \sigma \cdot \varepsilon(\hat{u}) d\Omega - \int \bar{t} \cdot \hat{u} d\Gamma_f - \int b(\hat{u}) d\Omega = 0 \quad \forall \hat{u} \in \Omega \quad (8)$$

### 2.3.2 Tipos de elementos

Para modelar o sistema a ser estudado, os elementos são determinados com base em sua dimensionalidade, podendo ser de uma dimensão, duas ou três dimensões. Essa classificação pode ser refinada em elementos lineares (de ordem inferior) ou não lineares (de ordem superior). Este estudo, por sua vez, concentra-se especificamente nos elementos tridimensionais, uma vez que o modelo apresentado é um sólido complexo com diferentes características geométricas e de material.

Existem vários tipos de elementos finitos utilizados para simulação em três dimensões (3D) na análise por elementos finitos, conforme os exemplos apresentados na Figura 2.31. Cada tipo de elemento tem suas próprias características e aplicabilidades. Segundo Dias (2010), os elementos tridimensionais normalmente são apresentados na forma de hexaedros ou tetraedros.

Figura 2.31 - Tipos de elementos tridimensionais – (a) Hexaedro de oito nós (b) tetraedro de quatro nós (c) pentaedro de seis nós (d) Pirâmide de base quadrangular.



Fonte: DIAS *et al.* (2010)

Os tipos mais comuns de elementos finitos usados em simulações 3D:

- Tetraedros (4-nós ou 10-nós): os elementos tetraédricos são utilizados para modelar geometrias complexas e irregulares. Eles são amplamente usados em simulações de mecânica dos fluidos, engenharia biomédica e outras áreas.
- Hexaedros (8-nós ou 20-nós): elementos hexaedros, também conhecidos como elementos de tijolo ou cubos, são frequentemente usados para representar sólidos retangulares ou prismáticos. eles são bem adequados para análises de tensão e deformação em componentes estruturais.
- Pirâmides (5-nós ou 13-nós): elementos piramidais são usados em casos em que é necessário combinar tetraedros e hexaedros. Eles podem ser úteis para modelar geometrias complexas que requerem uma transição suave entre diferentes tipos de elementos.

Segundo Dias (2010), a escolha do tipo de elemento finito depende das características da sua geometria, das condições de contorno, das propriedades do material e dos resultados desejados. Cada tipo de elemento tem suas vantagens e limitações, e a seleção adequada é fundamental para obter resultados precisos e confiáveis em simulações 3D.

Dentre as duas categorias mais utilizadas, tetraedros e hexaedros, existem elementos que são de ordem inferior ou lineares, como o caso do hexaédrico de oito nós (também conhecido como tri linear) e o tetraédrico com quatro nós. Além disso, há elementos de ordem superior com faces curvadas ou planas, a exemplo do hexaedro de 20 nós e do tetraédrico de 10. Importante notar que os elementos de ordem superior oferecem uma precisão ampliada nas respostas, contudo acarretam uma demanda computacional mais elevada (GARIMELLA, 2002).

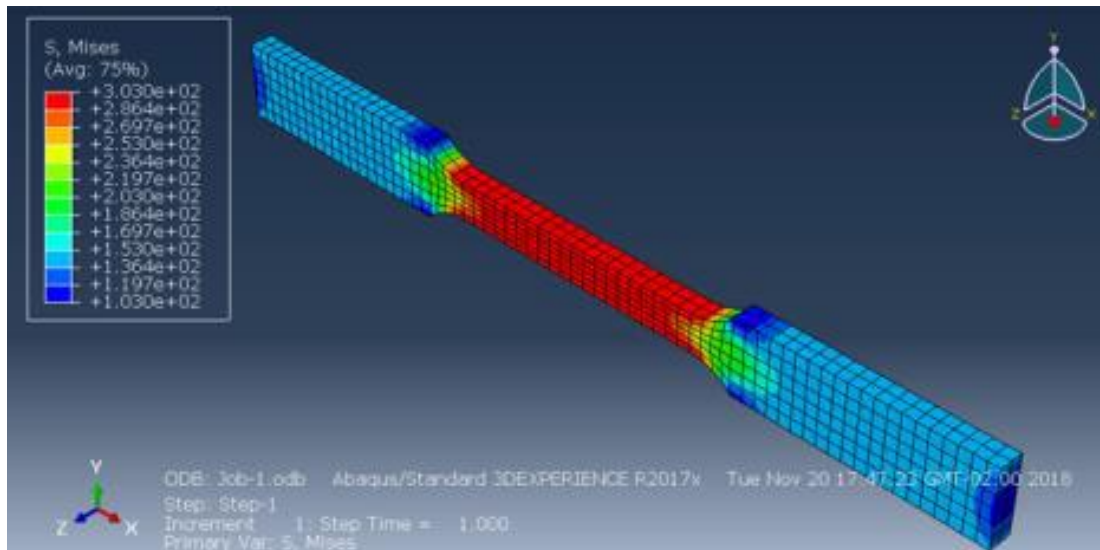
### 2.3.3 Simulação do ensaio de tração pelo método dos elementos finitos

A simulação de Tailor Welded Blanks (TWBs) em elementos finitos é uma técnica fundamental na engenharia, permitindo uma compreensão do comportamento estrutural da tecnologia de forma a investigar pontos críticos. A simulação permite entender como os TWBs se comportam sob diferentes condições de carga, incluindo tensões, deformações e modos de falha. Isso é crucial para garantir que os TWBs atendam aos requisitos de resistência e durabilidade em suas aplicações específicas.

Ao simular TWBs, é possível explorar várias configurações de *design* para determinar a melhor combinação de materiais, espessuras e geometrias. Isso pode levar a TWBs mais leves, mais fortes e mais econômicos. As principais simulações para caracterizar e avaliar o comportamento dos TWBs são ensaios de tração e de conformabilidade. O presente trabalho foca no ensaio de tração para avaliar o comportamento da angulação linha de solda em relação a direção de laminação (DL).

Não foram encontrados estudos direcionados para simulação de TWB no ensaio de tração, mas há estudos como por exemplo o de Araújo (2019), que apresenta a modelagem computacional de corpos de prova submetidos à tração usando Abaqus®. Nesse trabalho, os corpos de provas foram modelados de forma a reproduzir as condições experimentais, usado o modelo constitutivo de von Mises com endurecimento isotrópico, observando o comportamento elástico do material. Foi observada uma distribuição das tensões uniforme, como mostrada na Figura 2.32, sendo que os valores máximos estão distribuídos na região útil dos CPs aonde se espera que aconteça o rompimento nos ensaios de tração.

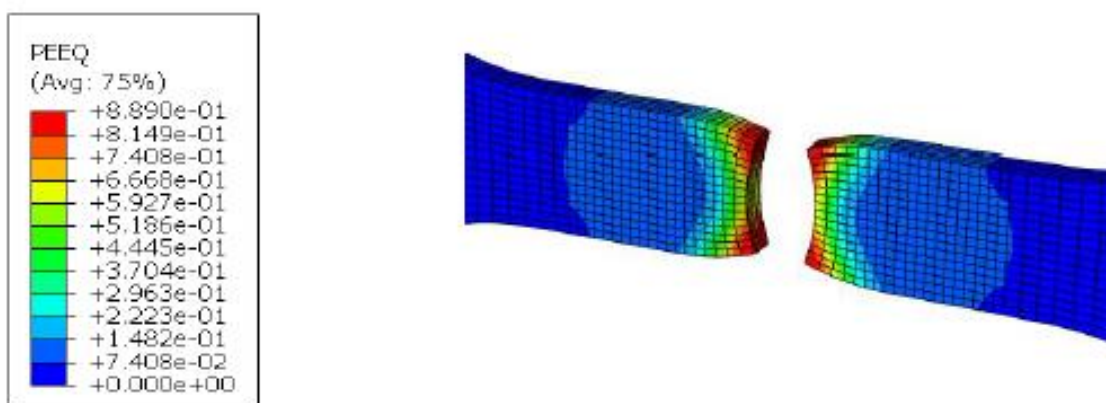
Figura 2.32 - Distribuição da tensão para o CP retangular



Fonte: Araújo et. al (2019)

Já o trabalho de Squeff (2021), demonstra via *software* Abaqus®, a calibração de um modelo de dano usando ensaios de tração para a simulação da ruptura dúctil em materiais metálicos. Apresenta-se na Figura 2.33 a deformação efetiva na fratura, em que é possível observar a fratura transversal a aplicação da força uniaxial, na região central do CP, fratura típica de materiais dúcteis (GARCIA *et.al* ,2012).

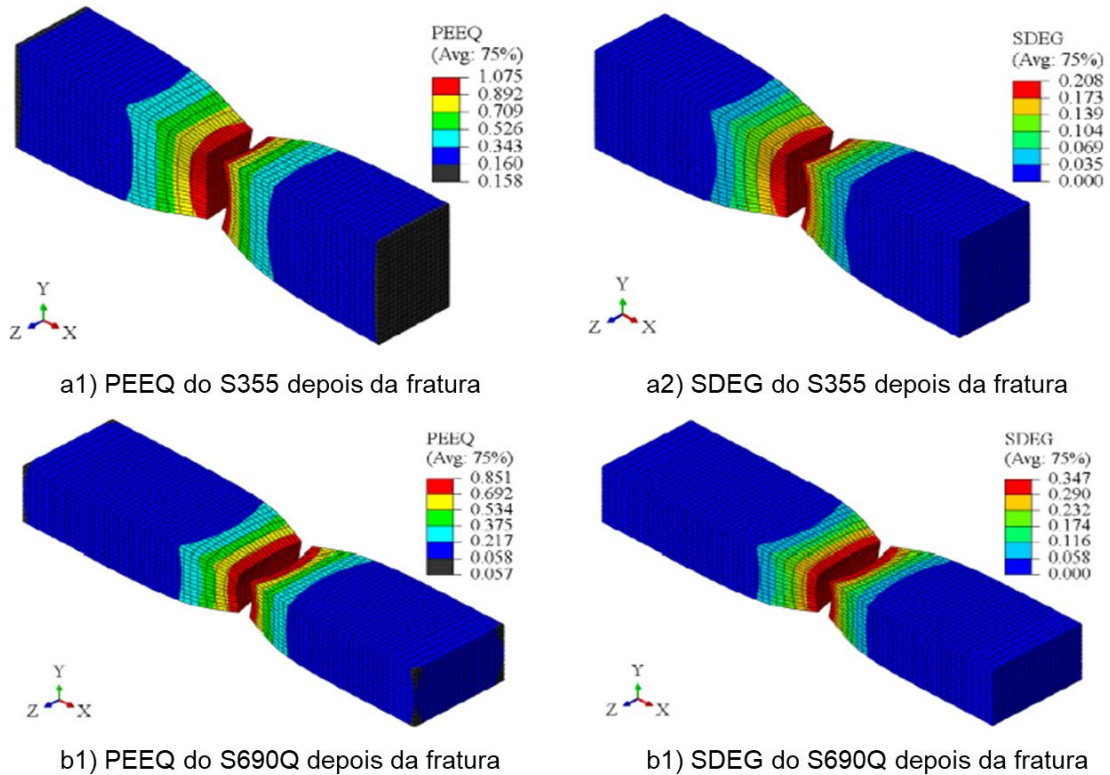
Figura 2.33 – Deformação efetiva em ensaio de tração de material dúctil.



Fonte: Squeff (2021)

Esse comportamento é observado também na avaliação de diferentes aços estruturais de alta resistência mecânica no trabalho de YANG et. al 2020, conforme apresentado na Figura 2.34.

Figura 2.34 - Gráficos de contorno de deformação efetiva (PEEQ) e variável de dano (SDEG) para cada aço após fratura.



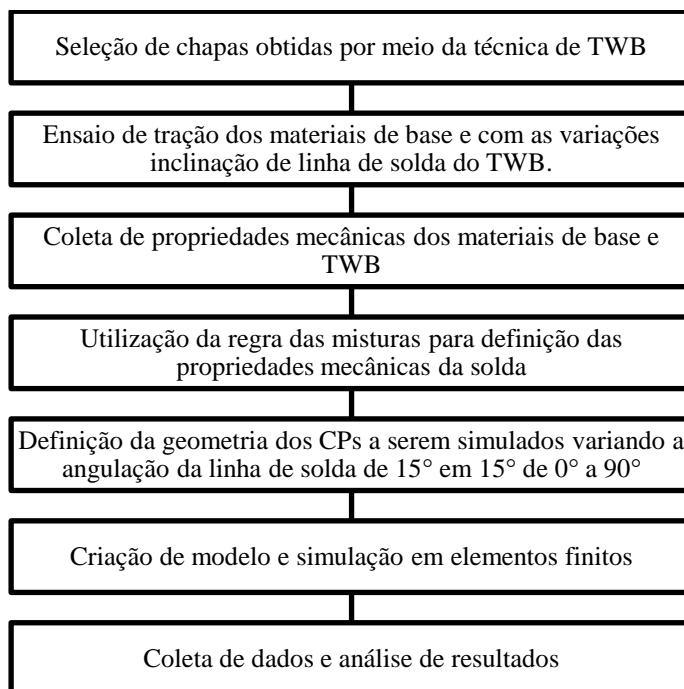
Fonte: Adaptado de Yang *et. al* (2020)

Nesta revisão bibliográfica, explorou-se conceitos fundamentais relacionados à conformação, estampagem, estampagem profunda, anisotropia, CLCs, TWBs, ensaio de tração, e elementos finitos. A compreensão integrada desses elementos é crucial para análise abrangente dos materiais metálicos utilizados, especialmente no contexto de TWBs. A integração com elementos finitos, exemplificada pelo software Abaqus, destaca-se como uma ferramenta poderosa para simulações numéricas. Com base nesses conceitos, o trabalho propõe o desenvolvimento de uma nova metodologia, com condições de contorno específica para o corpo de prova de tração de TWB, para a avaliação em ensaios de tração por meio de simulações em elementos finitos (Abaqus®). O objetivo é criar um modelo numérico capaz de validar o comportamento observado nos ensaios físicos, levando em consideração as propriedades mecânicas da solda, proporcionando uma comparação precisa entre os resultados experimentais e numéricos.

### 3 METODOLOGIA

Nesta seção serão abordados os materiais, equipamentos e a metodologia utilizados para alcançar os dados e os resultados do trabalho. Na Figura 3.1 apresenta-se o fluxograma das etapas de execução do trabalho.

Figura 3.1 – Etapas de execução do trabalho



Fonte: Elaborado pelo Autor.

#### 3.1 Materiais

As chapas utilizadas para análise foram cedidas 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 Tabela 3.1 as propriedades mecânicas, fornecidas pela CSN.

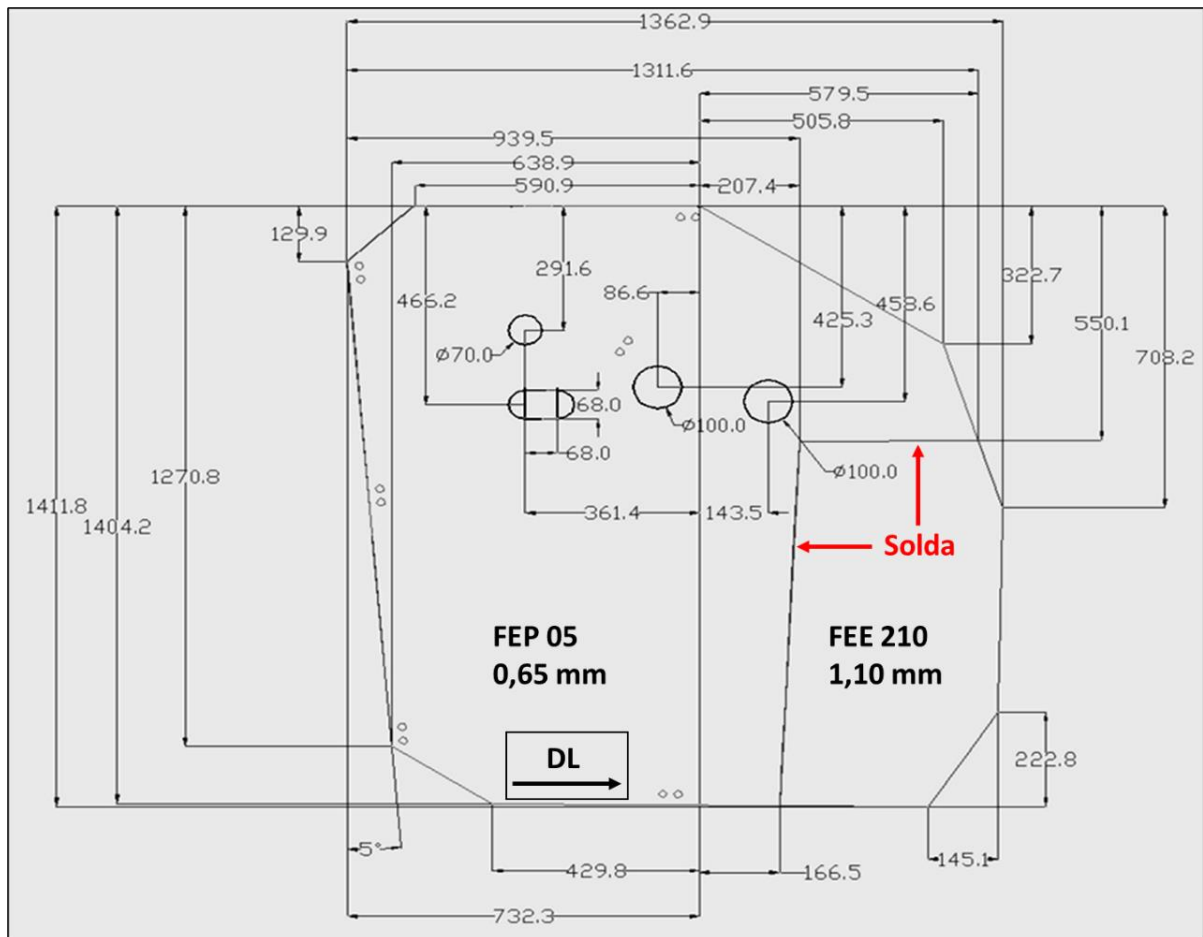
Tabela 3.1 - Composição química dos aços IF empregados ao TWB

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

Fonte: CSN (2019).

Na Figura 3.2 apresenta-se o desenho do blank utilizado no trabalho. A chapa obtida é empregada na fabricação do painel interno de portas veiculares dianteiras, com dois materiais distintos (FEP05 e FEE210). A soldagem foi feita perpendicularmente à direção de laminação (DL) das chapas.

Figura 3.2 – Blank utilizado para retirada de amostras



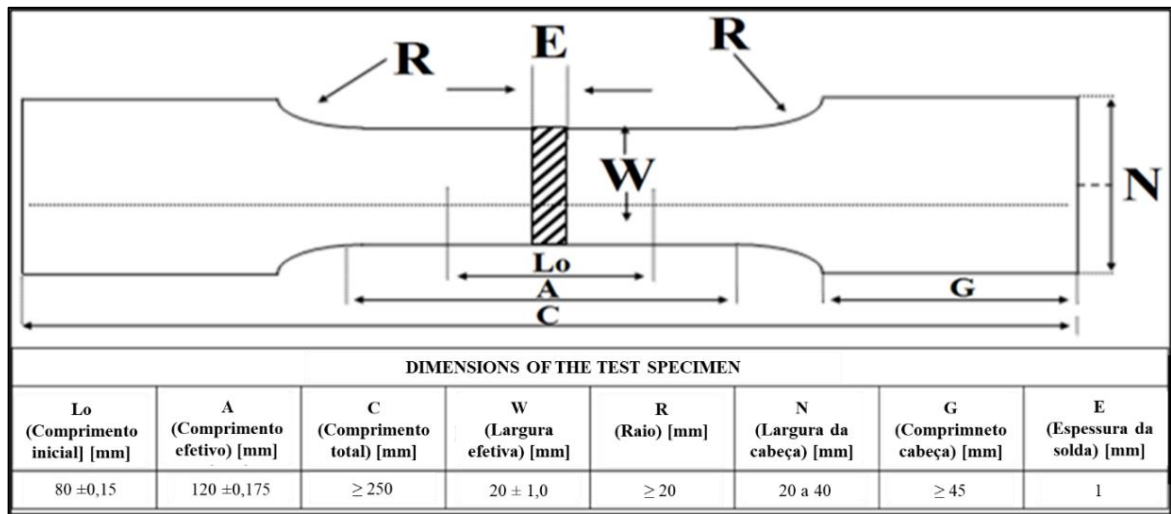
Fonte: Elaborada pelo autor.

O blank foi confeccionado utilizando o processo de soldagem a laser, em junta do tipo de topo. Na soldagem, utilizou-se o equipamento a laser CO2 SoundRonic®, com uma potência nominal de 8 kW, sendo a potência média utilizada de 65% (5,2 kW). Como gás de proteção, optou-se pelo hélio puro a uma taxa de 10,5 L/min. A velocidade de soldagem de 6,5 m/min.

### 3.2 Ensaios de Tração Uniaxial

A fim de realizar a caracterização mecânica dos materiais de base e da linha de solda, foram realizados ensaios de tração com base na norma ISO 6892-1 (2016), em que a Figura 3.3 apresenta as dimensões.

Figura 3.3 - Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração uniaxial

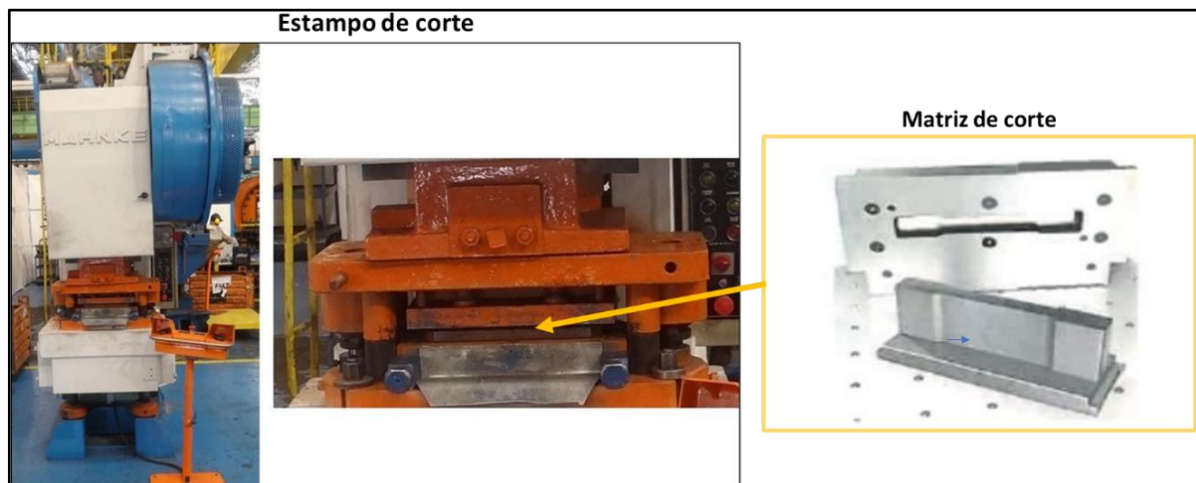


FONTE: Adaptado da norma ISO 6892-1 (ISO, 2016)

Pra realização do ensaio, 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 1,2 mm/s.

Para confecção dos CPs foram marcados os posicionamentos e ângulos, manualmente, por meio de um paquímetro e um goniômetro, e posteriormente realizado o corte mecânico em uma prensa Mahnke®, apresentada na Figura 3.4, que envolve o uso de uma matriz e um punção para cortar o CP na geometria definida específicas.

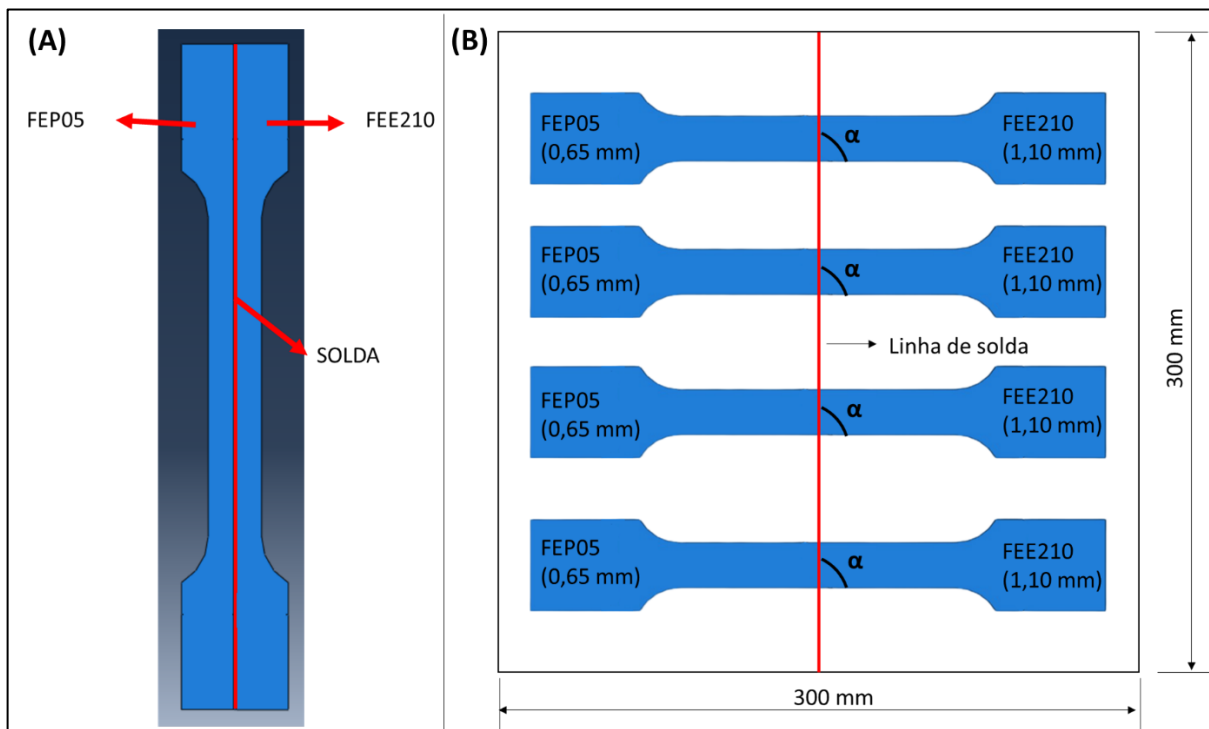
Figura 3.4 – Equipamento de corte dos corpos de prova de tração.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Confeccionaram-se corpos de prova para os dois materiais de base, FEP05 e FEE210, e para o TWB com a solda na transversal de todo o corpo de prova, Figura 3.5 (A), trabalhando-se com triplicata para maior confiabilidade e redução de erros experimentais. Para os TWBs com  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  e  $90^\circ$  de inclinação da linha de solda, conforme representado na Figura 3.5 (B), foram realizados seis CPs, selecionando os três resultados com menor desvio padrão. Isso foi feito devido ao processo de corte mecânico, conforme observado por Ortigara (2019) e Schaeffer (2004), durante o processo de corte, as tensões internas do material variam e ocorre o encruamento do material. Isso pode gerar deformações não previstas nas bordas e na linha de solda do CP, alterando o padrão de alongamento.

Figura 3.5 – Angulação representativa dos corpos de prova no blanche.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3 Simulação no programa de elementos finitos

A criação de um ensaio de tração no software de elementos finitos Abaqus® envolve desde a criação da geometria até a análise dos resultados, envolvendo três principais etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento. O passo a passo para criar um ensaio de tração no Abaqus® será descrito a seguir:

#### **Pré-processamento:**

1. **Criação da Geometria:** um novo modelo/amostra de tração é definido com as dimensões da geometria, incluindo comprimento, largura e espessura.
2. **Definição do Material:** são definidas as propriedades mecânicas do material da amostra, incluindo densidade, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, limite de escoamento, resistência à tração e curva de tensão e deformação. Posteriormente, são atribuídos os materiais à geometria criada.
3. **Malha da Geometria:** cria-se uma malha para a geometria da amostra. Isso envolve dividir a geometria em elementos finitos, como tetraedros, hexaedros ou outros tipos. A malha deve ser refinada na região na qual ocorrerão deformações significativas, no caso do ensaio de tração simulado é a região central da amostra que contempla a linha de solda.

#### **Processamento:**

4. **Condições de Contorno:** define-se as condições de contorno para simular o ensaio, como as restrições de deslocamento, tempo incremental, variáveis de saída e relações de contato.
5. **Definição do Carregamento:** aplica-se o carregamento desejado para a ocorrência do teste. Para o ensaio de tração, é aplicado um deslocamento controlado com base na taxa de deformação a ser utilizada. Geralmente, no ensaio de tração, aplica-se um deslocamento controlado na extremidade livre, enquanto a extremidade fixa é restringida em todas as direções.
6. **Análise:** configura-se as opções de análise, como critérios de convergência, critérios de parada e métodos de solução.
7. **Criação do *job*, submissão e execução:** cria-se um *job* para a análise, definindo o nome do *job*, a duração da simulação e outros parâmetros relacionados à análise. Submete-se o *job* para a execução no Abaqus®, desenvolvendo a simulação e resolvendo as equações definidas.

#### **Pós-processamento:**

8. **Resultados:** após a simulação ser concluída, tem-se o módulo de pós-processamento. Analisa-se os resultados, como distribuição de tensões, deformações e curva tensão-deformação. São plotados gráficos e visualizadas as animações de como a amostra se deforma durante o ensaio de tração.

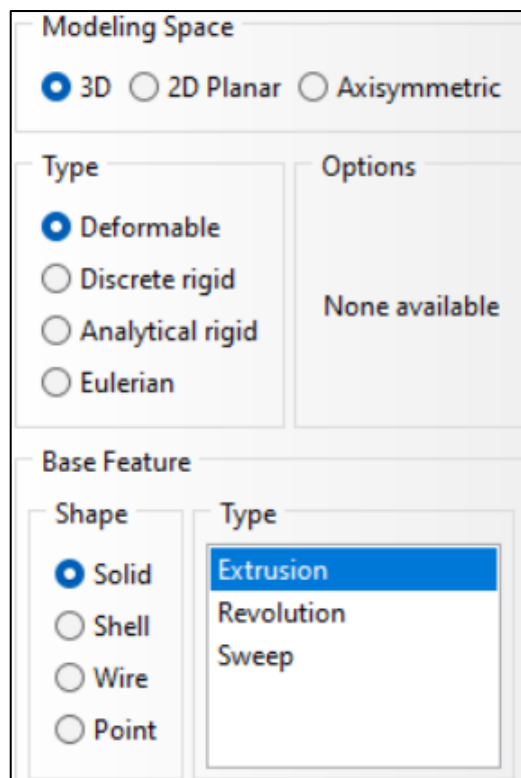
Para este trabalho, a metodologia proposta se destaca pela consolidação de técnicas pelo método dos elementos finitos, especialmente adaptadas para a análise de Tailor Welded Blanks

(TWBs). O diferencial reside na criação de condições de contorno específicas, desenvolvidas para contemplar as características da linha de solda nos TWBs. A abordagem leva em consideração não apenas as propriedades mecânicas da solda, mas também a complexidade da interação entre diferentes materiais na junção das chapas. Ao incorporar esses elementos na modelagem numérica, a metodologia visa proporcionar uma representação mais fiel e precisa do comportamento dos TWBs em ensaios de tração.

### 3.3.1 Pré-processamento

A definição do modelo no programa Abaqus® se inicia com a criação das três partes geométricas que compõe o ensaio de tração de um TWB: material de menor espessura (0,65 mm) com FEP05; 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, conforme a Figura 3.6.

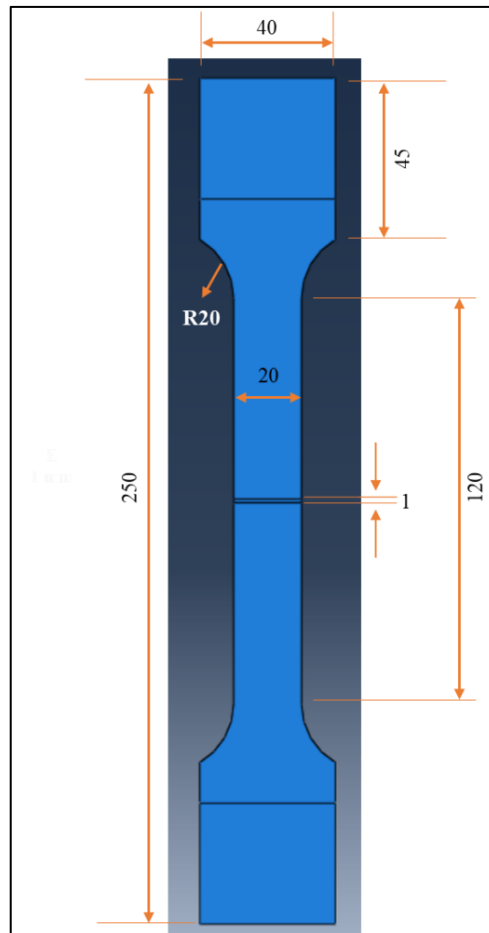
Figura 3.6 - Criação da geometria das partes que compõe o ensaio de tração



Fonte: Elaborado pelo autor.

O padrão geométrico utilizado para o ensaio de tração baseou-se na norma ISO 6892-1 (2016), conforme apresentado na Figura 3.7.

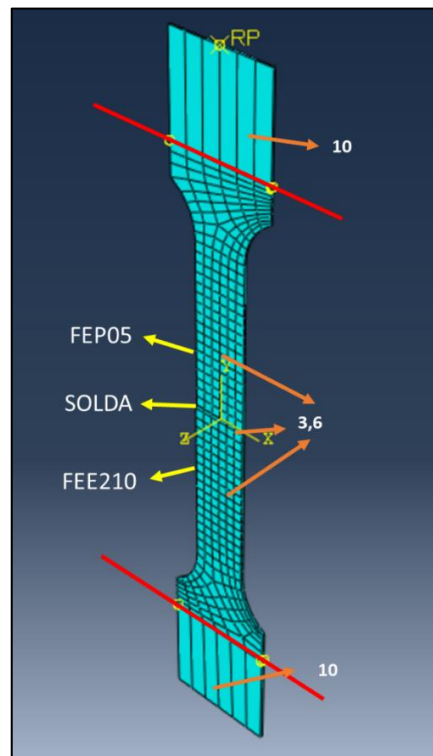
Figura 3.7 - Representação esquemática de dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração uniaxial com a solda inclinada a  $0^\circ$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

A malha determinada ao CP é distribuída de acordo com a relevância da região: na cabeça do corpo de prova o tamanho do elemento é de 10 mm e no meio do CP de 3,6 mm, para a amostra com a solda com  $0^\circ$  de inclinação, conforme apresentado na Figura 3.8. 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 (C3D8R), gerado por técnica de varredura (*sweep*) com algoritmo eixo medial. Os elementos hexaédricos são menos sensíveis às distorções e aos problemas de qualidade de malha do que elementos tetraédricos. Na técnica *sweep*, a geração de malhas leva a simulações mais estáveis e menos propensas a erros numéricos. Permite criar malhas mais refinadas com um número menor de elementos e nós (ABAQUS, 2023).

Figura 3.8 - Tamanho dos elementos da malha dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração uniaxial



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as demais inclinações, foram utilizadas o mesmo tamanho de malha podendo variar na cabeça do corpo de prova, visando otimizar a região de maior importância de análise, meio do CP, obedecendo a limitação de 1000 nós da versão estudantil do software Abaqus®.

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/cm<sup>3</sup>, 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 Equação 9, utilizado também no estudo de calibração modelo de dano dúctil de aços estruturais de alta resistência mecânica de Yang (2020), na qual os dados de coeficiente de resistência do material (K) e coeficiente de encruamento (n) foram baseados no ensaio experimental de tração.

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (9)$$

Na qual:

- K = Constante de resistência do material;

- $\sigma$  = Tensão a qual o material está submetido [MPa];
- $\epsilon$  = Deformação a qual se submete o material;
- $n$  = Expoente de encruamento.

Na representação do material da região soldada, foi utilizada a Regra das Misturas (ROM), apresentada na Equação 10. Define-se 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 solda está presente em todo comprimento vertical (ABDULLAH *et al.*, 2001; CIUBOTARIU, *et al.* 2011; LIAVOLI *et al.* 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®.

$$\sigma_W = \frac{P - \sigma_1 \cdot A_1 - \sigma_2 \cdot A_2}{A_w} \quad (10)$$

Na qual:

- $\sigma_w$  = Tensão limite de resistência da solda [MPa]
- $P$  = Carga total suportada pelo corpo de prova [N]
- $\sigma_1$  = Tensão limite de resistência no material 1 [MPa]
- $A_1$  = Área da seção transversal do material 1 do corpo de prova do TWB [mm<sup>2</sup>]
- $\sigma_2$  = Tensão limite de resistência no material 2 [MPa]
- $A_w$  = Área da seção transversal da solda do corpo de prova do TWB [mm<sup>2</sup>]

Para rompimento do corpo de prova no programa de elementos finitos, utilizou-se do critério de dano dúctil disponível no software Abaqus®. Este critério de dano é atrelado a deformação em que a fratura acontece, “*fracture strain*” e o deslocamento do elemento finito máximo quando o CP está prestes a romper, “*displacement at failure*”. O primeiro é definido no ensaio de tração físico com o dado de deformação máxima no momento da fratura. O segundo é definido como a multiplicação do tamanho do elemento, no caso deste trabalho 3,6 mm, multiplicado pela deformação máxima no momento da fratura, conforme definição apresentada pelo manual do usuário (ABAQUS, 2023).

Ainda para definir o dano, tem-se a taxa de deformação e a triaxiliidade das tensões. A taxa de deformação do ensaio de tração do trabalho é de  $0,01 \text{ s}^{-1}$ , e como o ensaio é de tração uniaxial,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ , a triaxiliidade das tensões é de 0,33, conforme Equação 11.

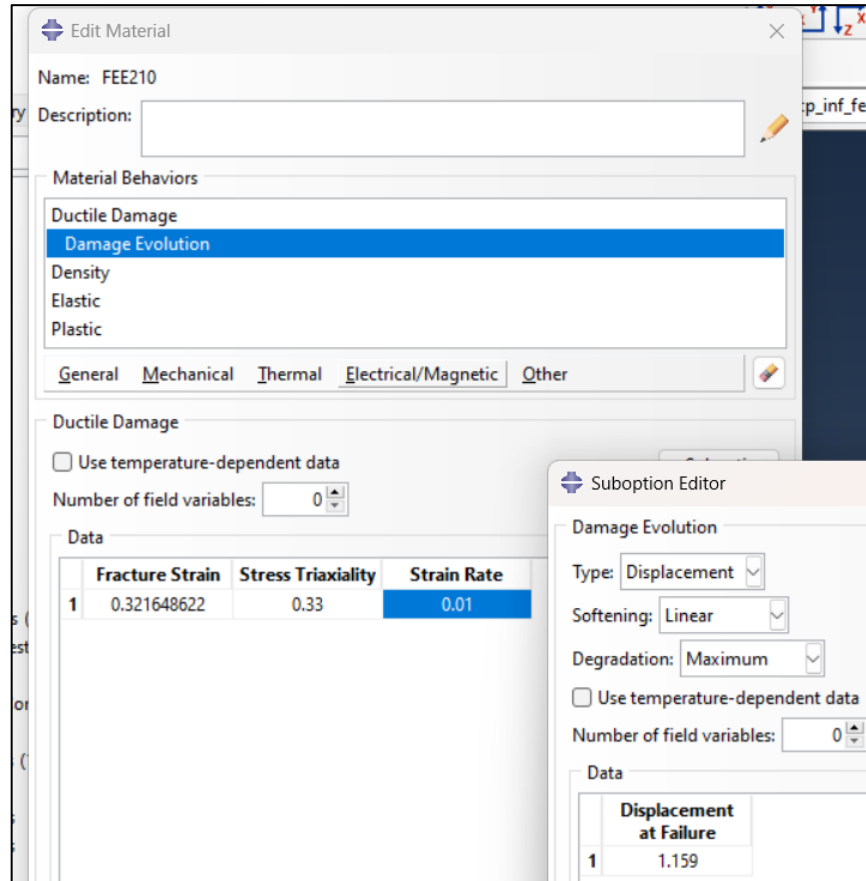
$$-\eta = \frac{p}{q} = \frac{\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}} \quad (11)$$

Onde:

- $\eta$  = Triaxiliidade das tensões
- $p$  = Tensão hidrostática
- $q$  = Tensão equivalente de Von Mises
- $\sigma_1$  = Tensão máxima principal
- $\sigma_2$  = Tensão na direção 2
- $\sigma_3$  = Tensão na direção 3

Dentro do programa, a característica de dano é definida na concepção do material, conforme apresentado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Critério de dano atribuído no Abaqus®



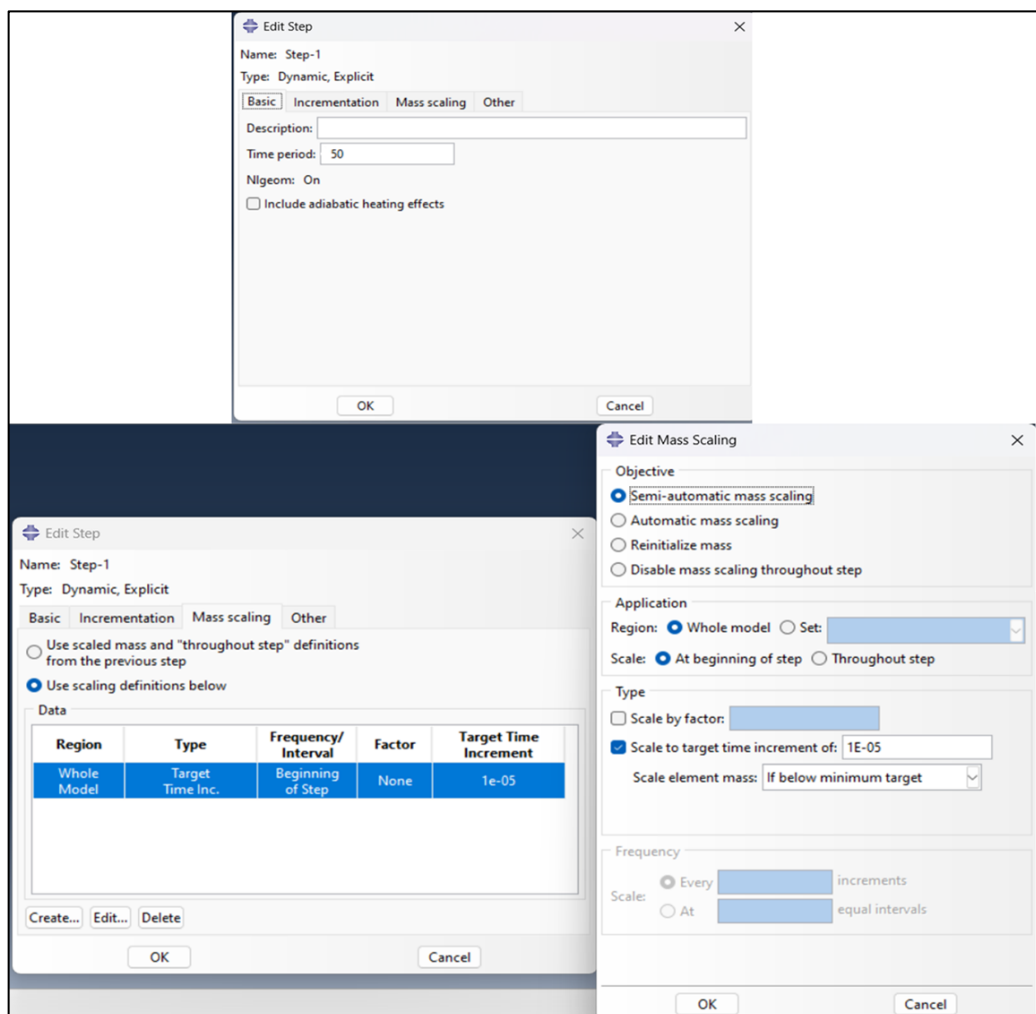
Fonte: Elaborado pelo autor.

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).

### 3.3.2 Processamento

Na definição do tempo incremental (*step*), apresentado na Figura 3.10, ajusta-se o tempo total da simulação. Utilizou-se o tipo de procedimento como dinâmico explícito, com período de 30s com incremento automático, exceto para a inclinação de 90° que demanda maior período e foi definido como 50s o seu período. No dimensionamento de massa, define-se como semiautomático com escala de tempo alvo de  $1 \times 10^{-5}$ s sendo aplicado logo no início do ensaio.

Figura 3.10 – Definição do tempo incremental (*step*)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros de saída da simulação foram de tensão, deformação, deslocamento, dano 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). Para o dano tem-se a falha por dano progressivo (DMICRT) e as forças de reação (RF).

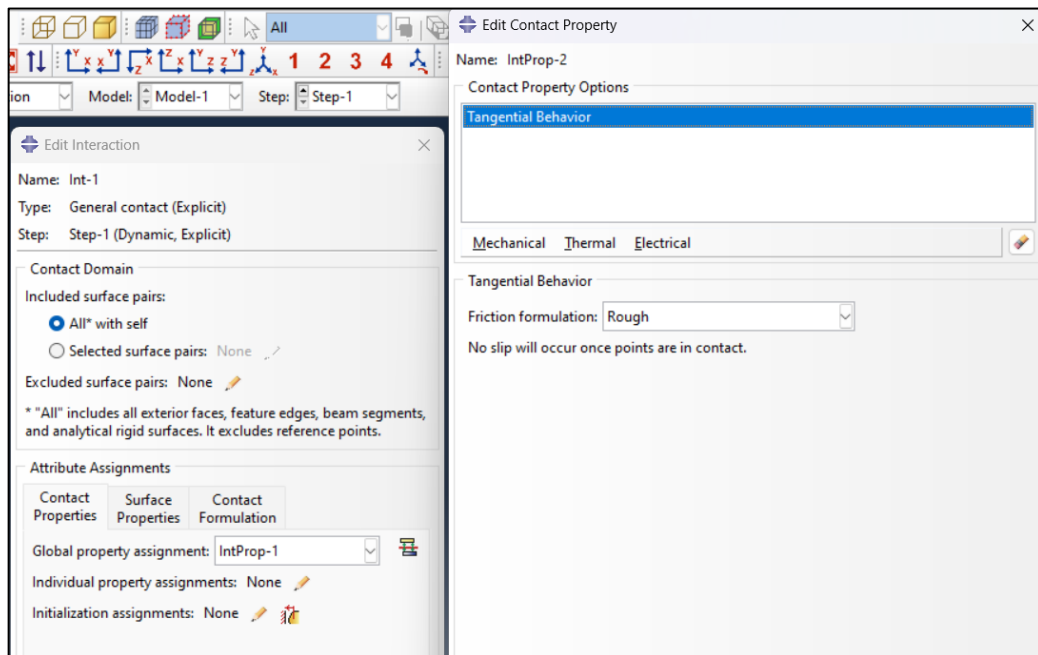
Figura 3.11 - Parâmetros de saída da simulação.

The screenshot shows the 'Edit Field Output Request' dialog box. The 'Name' is 'F-Output-1', 'Step' is 'Step-1', and 'Procedure' is 'Dynamic, Explicit'. The 'Domain' is set to 'Whole model' with an 'Exterior only' checkbox. The 'Frequency' is 'Every x units of time' with 'x' set to '0.2'. The 'Timing' is 'Output at approximate times'. The 'Element output position' is 'Integration points'. Under 'Output Variables', the radio button 'Select from list below' is selected. A search box contains 'A,DMICRT,PE,PEEQ,RF,S,U,V'. A list of categories is shown with checkboxes: Stresses (checked), Strains (checked), Displacement/Velocity/Acceleration (checked), Forces/Reactions (checked), Contact (unchecked), Energy (unchecked), Failure/Fracture (checked), Thermal (unchecked), Porous media/Fluids (unchecked), Acoustics (unchecked), and Volume/Thickness/Coordinates (unchecked). At the bottom, 'Output for rebar' is unchecked, 'Output at shell, beam, and layered section points' has 'Use defaults' selected, 'Include local coordinate directions when available' is checked, and 'Apply filter' is set to 'Antialiasing'. 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom.

Fonte: Elaborado pelo autor.

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*), conforme apresentado na Figura 3.12.

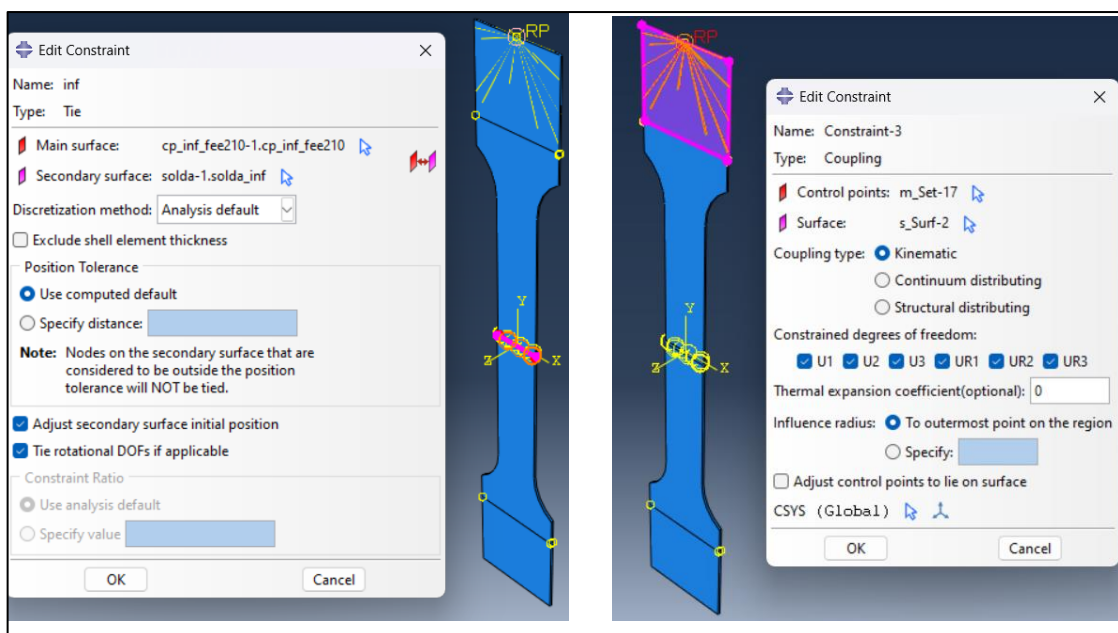
Figura 3.12 - Propriedades de contato



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram impostas duas restrições para unir as três regiões com os diferentes materiais, conforme apresentada na Figura 3.13. A primeira restrição é tipo ligação/nó e que conectam o material FEP05 à solda e o FEE210 à solda por meio das superfícies de contato. A segunda 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.

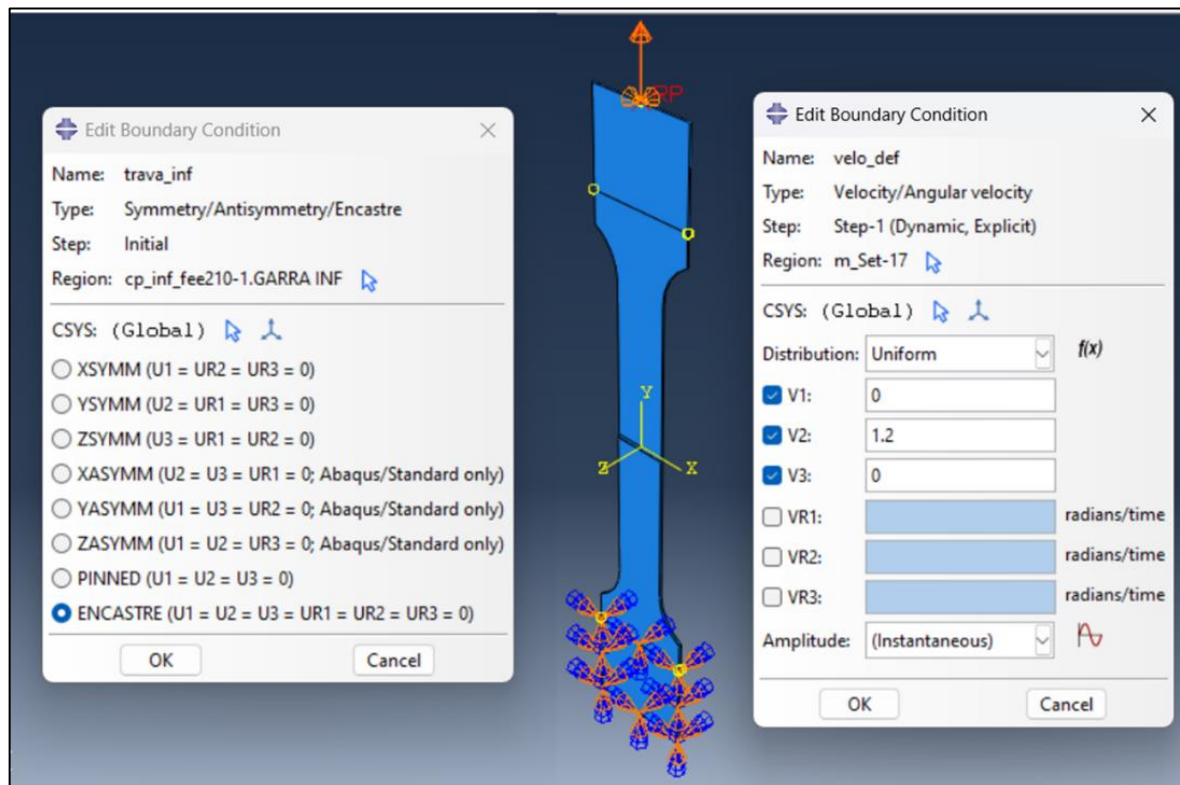
Figura 3.13 - Restrições de contato



Fonte: Elaborado pelo autor.

Selecionou-se duas condições de carregamento: a velocidade de deslocamento do cabeçote da máquina do ensaio de tração assim que começa o “step-1” (etapa em que se inicia o ensaio dinâmico explícito) e o travamento da base do CP na máquina de tração desde o *step* inicial, conforme apresentado na Figura 3.14. A velocidade é aplicada no ponto de referência na cabeça do corpo de prova, sentido positivo da direção Y (V2), com velocidade de 1,2 mm/s que representa a taxa de deformação de  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ . O travamento restringe todos os movimentos de translação e rotação na parte inferior do CP desde o início do ensaio.

Figura 3.14 - Condições de carregamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

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

### 3.3.3 Pós-processamento

Após a conclusão da simulação, acessa-se no módulo de pós-processamento do Abaqus® para visualizar, analisar e interpretar os resultados.

Esta etapa envolve as seguintes atividades:

- Visualização dos resultados: ocorre o carregamento dos resultados da simulação, que geralmente estão armazenados em um arquivo específico de saída (*output database*). Utiliza-se as ferramentas de visualização para exibir os dados de interesse da amostra, como as tensões e as deformações resultantes e os locais de falha.
- Curva tensão-deformação: extrai-se a curva tensão-deformação da simulação. Isso envolve traçar a tensão (força por unidade de área) em relação à deformação (variação no comprimento original por unidade de comprimento). Analise a curva para identificar o ponto de escoamento, a resistência máxima e a fratura.
- Relatórios e gráficos: geração de relatórios e gráficos para documentar os resultados e conclusões. Produção de gráficos que mostrem a variação das propriedades mecânicas, como tensão, deformação, força e alongamento ao longo da amostra.
- Comparação com resultados experimentais: compara-se os resultados da simulação com os dados experimentais para validar a precisão do modelo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Ensaios de Tração

Os primeiros resultados obtidos foram dos ensaios de tração dos materiais de base e do corpo de prova com a linha de solda com inclinação relativa de 90° (paralela à direção de tração), apresentados no Apêndice A. O ensaio de tração forneceu o limite de escoamento (LE), limite de resistência a tração (LRT) e a deformação de engenharia (e). A partir da deformação de engenharia, obteve-se a deformação verdadeira ( $\epsilon$ ). Como parâmetros em comum, utilizou-se o módulo de elasticidade (E) de 210 GPa e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) de 0,30, que são comuns para aços de baixo carbono conforme os utilizados. O coeficiente de encruamento (n) foi obtido por meio da linearização da equação de Hollomon na curva do ensaio de tração e o coeficiente de resistência do material (K) utilizando também a Equação (9) de Hollomon. Com a manipulação dos dados obteve-se as propriedades mecânicas dos dois aços e da solda conforme apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Propriedades mecânicas dos materiais (FEE210 e FEP05) e do CP com a solda orientada a 90°.

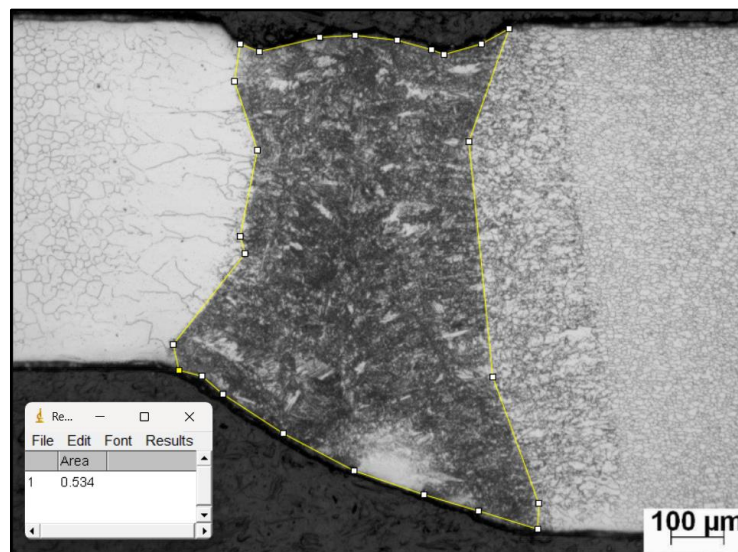
	FEE 210		FeP05		CP com a solda a 90°		Unidade
		Desvio padrão		Desvio padrão		Desvio padrão	
Limite de escoamento (LE)	250	11	183	4	196	18	(MPa)
Limite de resistência a tração (LRT)	370	8	314	3	358	21	(MPa)
Deformação de engenharia no LRT (e)	0,247	0,079	0,280	0,017	0,210	0,010	-
Deformação verdadeira no LRT ( $\epsilon$ )	0,221	0,076	0,247	0,016	0,191	0,010	-
Coefficiente de encruamento (n)	0,186	0,011	0,206	0,012	0,180	0,010	-
Coefficiente de resistência (K)	611,00	8,97	535,75	3,60	482,02	22,12	(MPa)
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,300	-	0,300	-	0,300	-	-
Módulo de elasticidade (E)	2,10E+11	-	2,10E+11	-	2,10E+11	-	(Pa)
Área cp90		-		-	17,159	-	(mm <sup>2</sup> )
Alongamento fase plástica	37,9	0,9	44,2	0,7	37,0	6,7	%
Deformação verdadeira na fratura ( $\epsilon$ )	0,322	0,009	0,366	0,007	0,315	0,064	-
Deslocamento na fratura (Crit. Dano)	1,159	-	1,318	-	1,133	-	-
Deslocamento na fratura 90° (Crit. Dano)	1,288	-	1,465	-	1,259	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para obter as propriedades mecânicas puramente da junta soldada, foram utilizados parâmetros intermediários e formulações empíricas. O LRT foi obtido por meio da regra das misturas, Equação (9), e o limite de escoamento foi obtido por meio da interpolação dos dados do material de base e do LRT calculado pela regra das misturas. Os parâmetros como deformação de engenharia, deformação verdadeira, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, foram definidos conforme os dados da Tabela 4.2.

A área da secção transversal foi calculada a partir da medição da área da solda com auxílio do software ImageJ, Figura 4.1. Sendo assim, foi possível mensurar por meio da Regra das Misturas o quanto cada material contribuiu para o LRT do corpo de prova com inclinação relativa de 90°. A área da contribuição dos materiais de base foi definida com a eliminação da largura da solda, que é de cerca de 1mm, restando 19 mm de largura no CP, no qual se obteve a área a partir da multiplicação da largura de 9,5 mm, de cada material de base, por sua espessura (0,65 mm e 1,1 mm).

Figura 4.1 – Área da junta soldada no corpo de prova com orientação relativa de 90°.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado das propriedades mecânica puramente da solda estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas da junta soldada

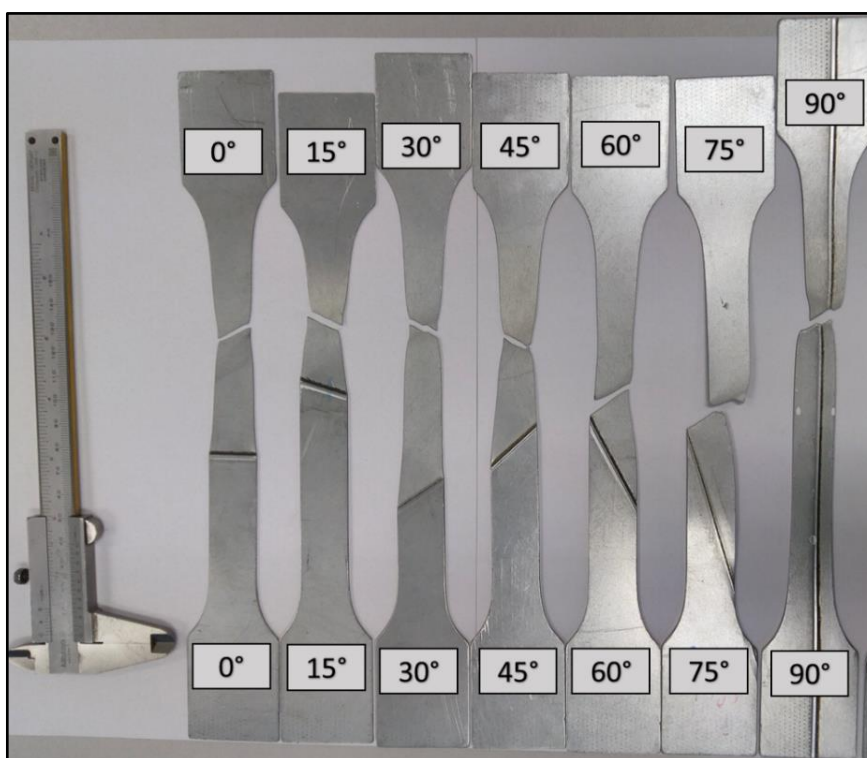
Propriedades mecânicas da solda			
		Desvio padrão	Unidade
<b>Propriedades mecânicas da solda</b>	554	14	(MPa)
<b>Limite de resistência a tração (LRT)</b>	626	11	(MPa)
<b>Deformação de engenharia (e)</b>	0,210	0,035	-
<b>Deformação verdadeira (E)</b>	0,191	0,035	-
<b>Coefficiente de encruamento (n)</b>	0,180	0,010	-
<b>Coefficiente de resistencia (K)</b>	1020,48	11,63	(MPa)
<b>Coefficiente de Poisson (v)</b>	0,300	-	-
<b>Modulo de elasticidade (E)</b>	2,10E+11	-	(Pa)
<b>Area da solda</b>	0,534	-	(mm <sup>2</sup> )
<b>Área FEE210</b>	10,450	-	(mm <sup>2</sup> )
<b>Área FEP05</b>	6,175	-	(mm <sup>2</sup> )

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para tornar a representação das propriedades da solda mais fiel a realidade, tem-se a possibilidade do uso de corpos de prova *sub-size*, conforme apontado também nos trabalhos de Assunção *et al.* 2023 e Andrade *et al.* 2019. Entretanto, devido à dificuldade de extração do CP e a ausência de normas que levam em consideração uma largura do CP tão estreita (junta soldada com largura de 1 mm), não foi possível realizar este ensaio para o presente trabalho.

Com a definição das propriedades mecânicas dos materiais de base e da linha de solda, foram ensaiados corpos de prova para verificar o comportamento de deformação e local de ruptura do CP, no qual variou-se a inclinação da linha de solda em 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°, conforme as amostras ensaiadas e rompidas apresentadas na Figura 4.2.

Figura 4.2 – CPs rompidos variando a inclinação da linha de solda de 0° a 90°.



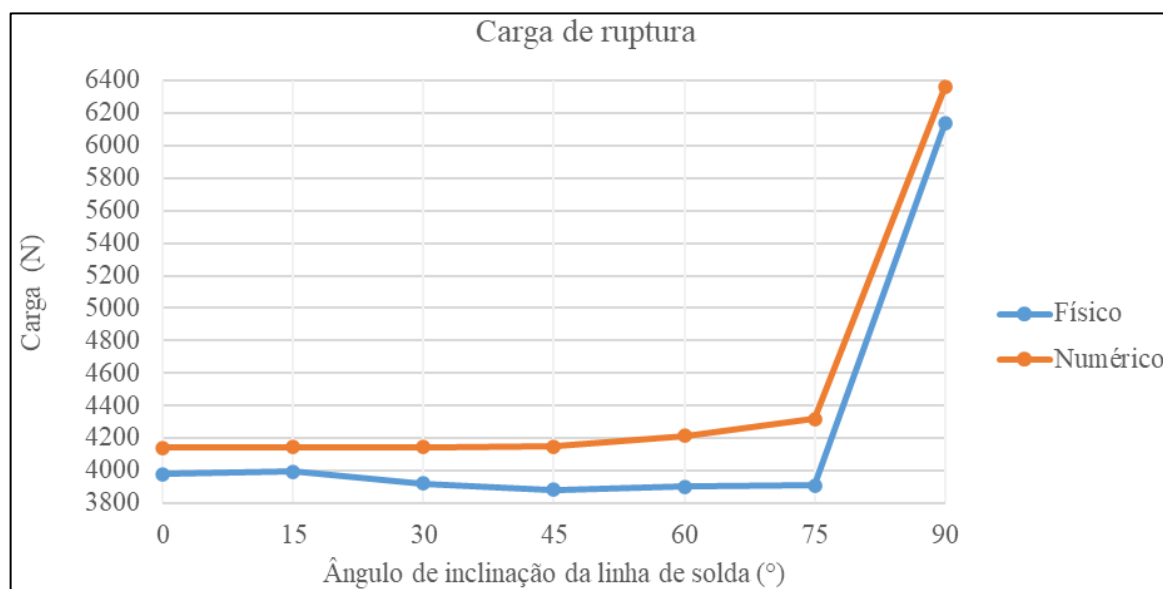
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2 Simulação por elementos finitos do Ensaio de Tração

Na simulação numérica do ensaio de tração no programa de método dos elementos finitos (Abaqus®), variou-se a inclinação da linha de solda de 15° em 15° entre 0° e 90°. Como resultados a serem avaliados, foram retirados os dados de carga de ruptura, alongamento, o comportamento da linha de ruptura em cada CP e a avaliação da concentração da tensão da linha de solda no momento de ruptura.

Apresenta-se na Figura 4.3 a carga de ruptura com a variação da inclinação da linha de solda, dados sumarizados no Apêndice B e C, comparando assim a diferença entre os resultados obtidos no ensaio físico e no programa de elementos finitos.

Figura 4.3 - Carga de ruptura com a variação da inclinação da linha de solda.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A carga de ruptura apresentou comportamento semelhante para ambos os ensaios, nos quais a carga máxima é aproximadamente a mesma com a variação da inclinação da linha de solda. Isso ocorre porque o corpo de prova tende a romper no material de menor espessura e resistência mecânica, exceto para o corpo de prova com inclinação de 90°, que exibe uma carga de ruptura mais alta devido à contribuição total da solda e do material de base de maior espessura no ensaio de tração. Esses comportamentos estão alinhados com outras pesquisas, como a de Assunção *et al.* (2019), Santos (2021) e Andrade (2019). Vale ressaltar que essa afirmação é válida desde que a solda não apresente defeitos, conforme indicado por Safdarian (2016), Fazli (2016) e Gautam *et al.* (2018).

A diferença entre as cargas obtidas no ensaio físico e no ensaio numérico, apresentada na Tabela 4.3, variou entre 3,6% e 10,5%, sendo associada à simplificação do modelo, que considera um material isotrópico. É importante observar que os aços IF apresentam um coeficiente de anisotropia acentuado (HAMIDINEJAD *et al.*, 2012). No modelo físico, as chapas estão soldadas na direção anisotrópica de maior resistência mecânica, o que levou a uma leve redução da carga de ruptura, cerca de 2%, ao aumentar a angulação da linha de solda no CP de acordo com a direção de laminação.

Tabela 4.3- Comparação percentual da carga de ruptura entre o teste físico e numérico

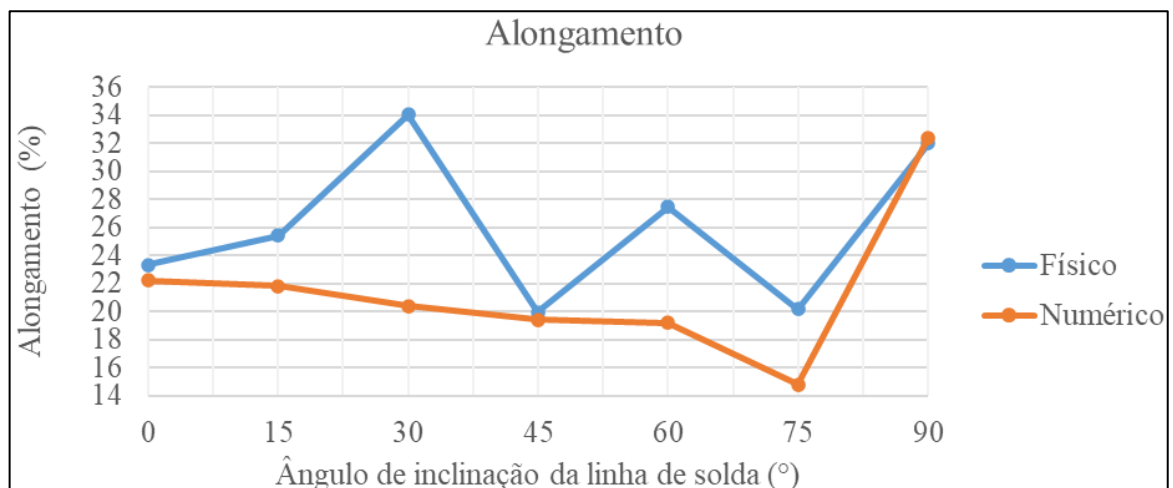
Comparação percentual para a Carga de ruptura	
	Numérico/Físico
Ângulo de inclinação relativa da solda [°]	Diferença percentual
0	4,0%
15	3,8%
30	5,7%
45	6,8%
60	8,1%
75	10,5%
90	3,6%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o aumento da inclinação da linha de solda, principalmente para 45°, 60° e 75°, a solda tende a ocupar uma área útil maior no sentido vertical do CP de tração, explicando assim um pequeno aumento na carga de tração para essas inclinações no modelo simulado (Assunção, 2023). Observa-se que, para essas angulações, o modelo simulado apresentou menor concordância com o ensaio real, 6,8% a 10,5%, explicado pela anisotropia. Entretanto, para 0°, 15° e 90°, teve-se ótima correção, 3,6% a 4,0%, pois nessas angulações, há pouca interferência das tensões cisalhantes e o material se comporta de forma homogênea sob tensão uniaxial, tanto no modelo físico quanto no numérico. Destaca-se a correlação para 90°, indicando uma boa caracterização da solda a partir das regras das misturas.

Para avaliar a deformação total em função da variação da inclinação da linha de solda, utilizou-se o alongamento máximo dos CPs, conforme apresentado na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Alongamento com a variação da inclinação da linha de solda.



Fonte: Elaborado pelo autor.

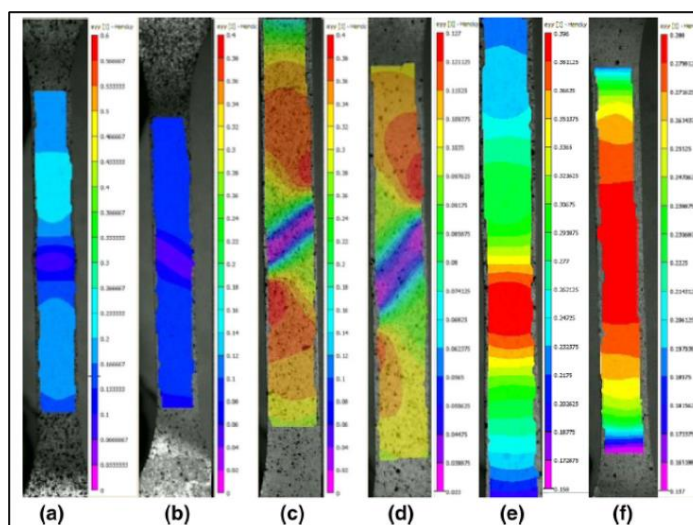
Durante o ensaio físico, foi observado um aumento do alongamento de 0° até 30°, apresentando de 23,3% até 34,0% de deformação máxima, evidenciando um desempenho superior para 30° nessa característica mecânica. Essa tendência coincide com estudos anteriores, como os de Andrade *et al.* (2019) e Santos (2021), que também apontaram a inclinação em cerca de 30° como favorável para maior alongamento e consequente conformabilidade. A complexidade na definição do ângulo ótimo para a orientação da linha de solda é destacada, dada a falta de consenso nessa questão. Além dos desafios associados à anisotropia, há concentradores de tensão e outros fatores relacionados aos materiais de base e à solda (WANG *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2020).

Seguindo o aumento da inclinação, a 45°, nota-se uma redução significativa do alongamento. Com essa inclinação, tem-se o estado máximo de tensão de cisalhamento combinada a tensão de tração, favorecendo o deslizamento dos planos cristalinos e consequente ruptura (ANDRADE, 2019). Como as chapas do presente trabalho são muito finas, pode-se aproximar a análise do estado plano de tensões e deformações, onde a 45° tem-se exatamente a mesma tensão normal e de cisalhamento, sendo está última, máxima (HELMAN, 2005).

Para os ângulos de 60° e 75°, era esperado um comportamento semelhante aos de 30° e 15°, respectivamente. Conforme indicado por Andrade (2019), há um padrão típico para ângulos complementares (como 15° e 75°, por exemplo) determinado pelo círculo de Mohr, no qual a tensão de cisalhamento é análoga. No entanto, esse padrão não foi observado neste estudo. Notou-se que o alongamento de 30° para 60° reduz, assim como de 15° para 75°, indicando que à medida que a inclinação da junta soldada aumenta, a área útil da solda também aumenta, resultando em maior rigidez do CP e menor deformação máxima.

Uma vez que a solda ocupa uma posição diagonal mais pronunciada no corpo de prova em inclinações mais acentuadas, isso resulta em diferentes concentrações de tensão e, conseqüentemente, variações no alongamento. Os efeitos do aumento das diferentes concentrações de tensão e deformações devido ao aumento da angulação da linha de solda são também destacados no mapa de deformações do estudo de Li *et al.* (2015), conforme apresentado na Figura 4.5. Esse estudo concentrou-se na utilização da técnica de correlação digital de imagens para destacar a deformação do CP em relação à inclinação da linha de solda.

Figura 4.5 - Mapas de deformação dos CPs de tração dos TWBs e do MB (a) 90°, (b) 60°, (c) 45°, (d) 30°, (e) 0° e (f) MB



Fonte: Adaptado de Li et.al 2015 APUD Andrade (2019)

Para o corpo de prova com 90°, registrou-se o maior alongamento, conforme previsto, devido à contribuição da solda para a elevação da resistência mecânica da seção transversal, sem gerar diferentes pontos de concentração de tensão ao longo do comprimento útil, conforme observado nos trabalhos de Andrade (2019) e Santos (2021).

No contexto do ensaio numérico, foi obtida uma curva de alongamento diferente da observada no ensaio físico. O alongamento máximo para ângulos menores que 90° foi encontrado em 0° e 15°, com valores de 22,2% e 21,8%, enquanto para os demais ângulos, de 30° a 75°, houve uma queda iniciando em 20,4% até 14,8%, no qual há uma tendência de redução no alongamento constante até 60° e uma queda acentuada para 75°. Isso sugere que a variação do alongamento observada no ensaio físico está associada à anisotropia do material, bem como a pontos específicos de fragilidade nos CPs. Esses pontos podem incluir descontinuidades na região de retirada dos CPs e encruamento causado pelo corte mecânico (ANANTHAPADMANABAN *et al.*, 2020).

Esse comportamento observado no ensaio numérico sugere que o aumento na inclinação da linha de solda contribui para um aumento na tensão cisalhante e deformações concentradas em regiões específicas do CP, como mostrado na Figura 4.5 no trabalho de Li *et al.* (2015), resultando em uma diminuição no alongamento do material quando sujeito a esses esforços específicos. Isso também é justificado pela teoria da mecânica da fratura, apresentada por Dowling (2013) e Dharan, *et.al* (2016): em um material dúctil, sua fratura é determinada predominantemente pelas tensões de cisalhamento que acumulam em regiões específicas do material como em seus planos de deslizamento ou interfaces entre grãos cristalinos.

Apesar da diferença entre as curvas, destaca-se a alta correlação do alongamento para  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , de -4,7% a 1,3%. O percentual de comparação do resultado do alongamento entre o ensaio físico e numérico está apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Comparação percentual do alongamento entre o teste físico e numérico

Comparação percentual para a Alongamento	
	Numérico/Físico
Ângulo de inclinação relativa da solda [ $^\circ$ ]	Difereça percentual
0	-4,7%
15	-14,2%
30	-40,1%
45	-2,7%
60	-30,1%
75	-26,6%
90	1,3%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A boa correlação observada para  $0^\circ$  e  $90^\circ$  é devido ao plano de tensão normal máximo e de tensão cisalhante mínimo. Para esses CPs, há um estado puro de tensão uniaxial, no qual o modelo apresenta o maior nível de correlação possível com as condições de contorno impostas, material isotrópico. Para  $0^\circ$ , a solda não influencia outras tensões internas no CP, e a solicitação da microestrutura em apenas uma direção se mostrou válida.

No CP a  $90^\circ$ , tem-se os dois materiais de base, um em cada lado da solda central, perfazendo toda a extensão vertical do CP. Similarmente a  $0^\circ$ , há uma solicitação uniaxial em relação à direção de laminação, tornando o modelo isotrópico eficaz. Essa boa aproximação para  $90^\circ$  reflete a eficiência das propriedades da junta soldada obtida pela regra das misturas.

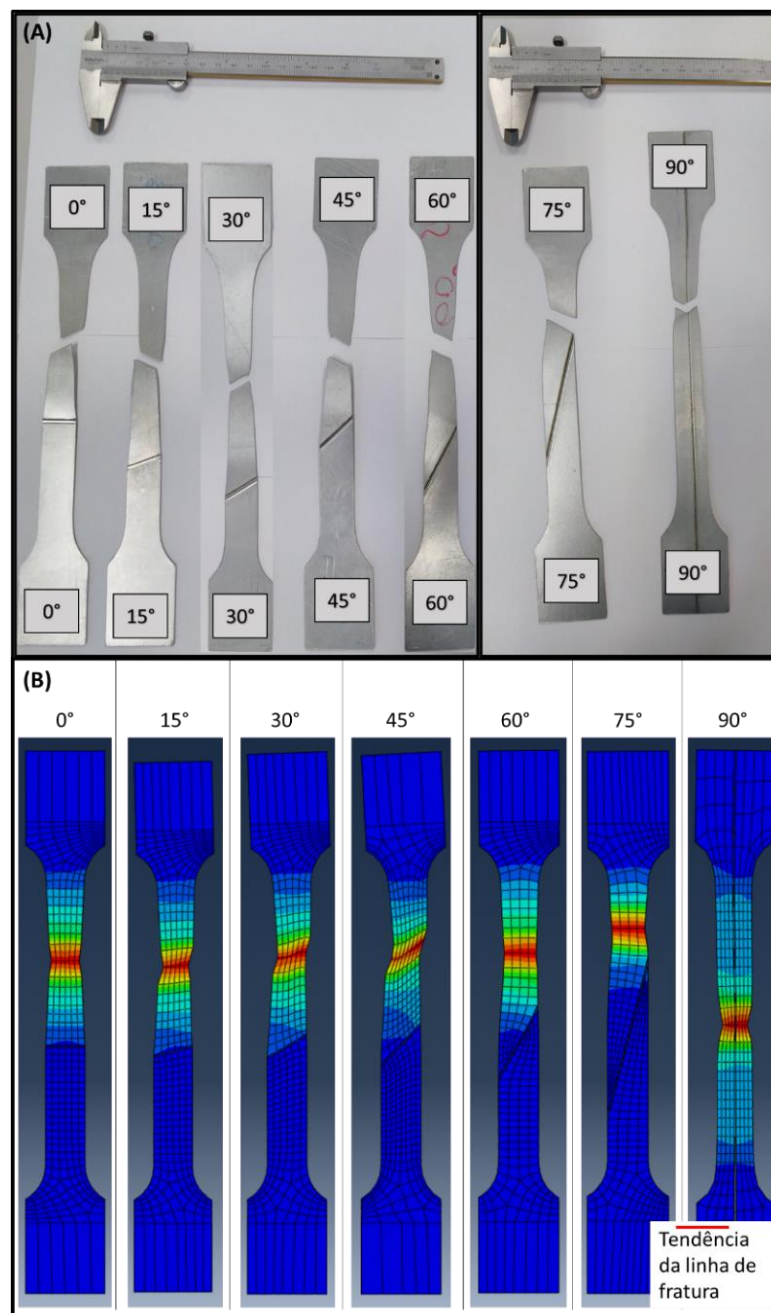
A angulação à  $45^\circ$ , apresentou um desvio percentual de 2,7% entre os ensaios físicos e numéricos. Essa correlação é atribuída à tensão cisalhante máxima, e a tensão no plano Z antes da triaxialidade de tensões ser nula, resultando na igualdade entre a tensão normal e a tensão cisalhante, conforme análise do plano de tensões no círculo de Mohr (Helman *et al.*, 2005). Essa combinação gera efeitos de deslizamento dos planos internos de cisalhamento associados à tensão normal, sendo "idealizada" nesse plano, o que faz com que o efeito anisotrópico das chapas se não gere interferências, aproximando do modelo isotrópico.

Para as angulações intermediárias,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $75^\circ$ , observou-se uma baixa correlação entre os alongamentos físicos e numéricos, distorções de 14,2% a 40,1%. Essa disparidade pode ser atribuída à maior dispersão entre as tensões normais e cisalhantes, a anisotropia passa a ter mais influência e os fenômenos internos e microestruturais não são

adequadamente representados na simulação isotrópica. O padrão descrito não foi identificado em outros estudos revisados, no qual à maioria das pesquisas em se restringirem às análises com 0°DL, 45°DL e 90°DL.

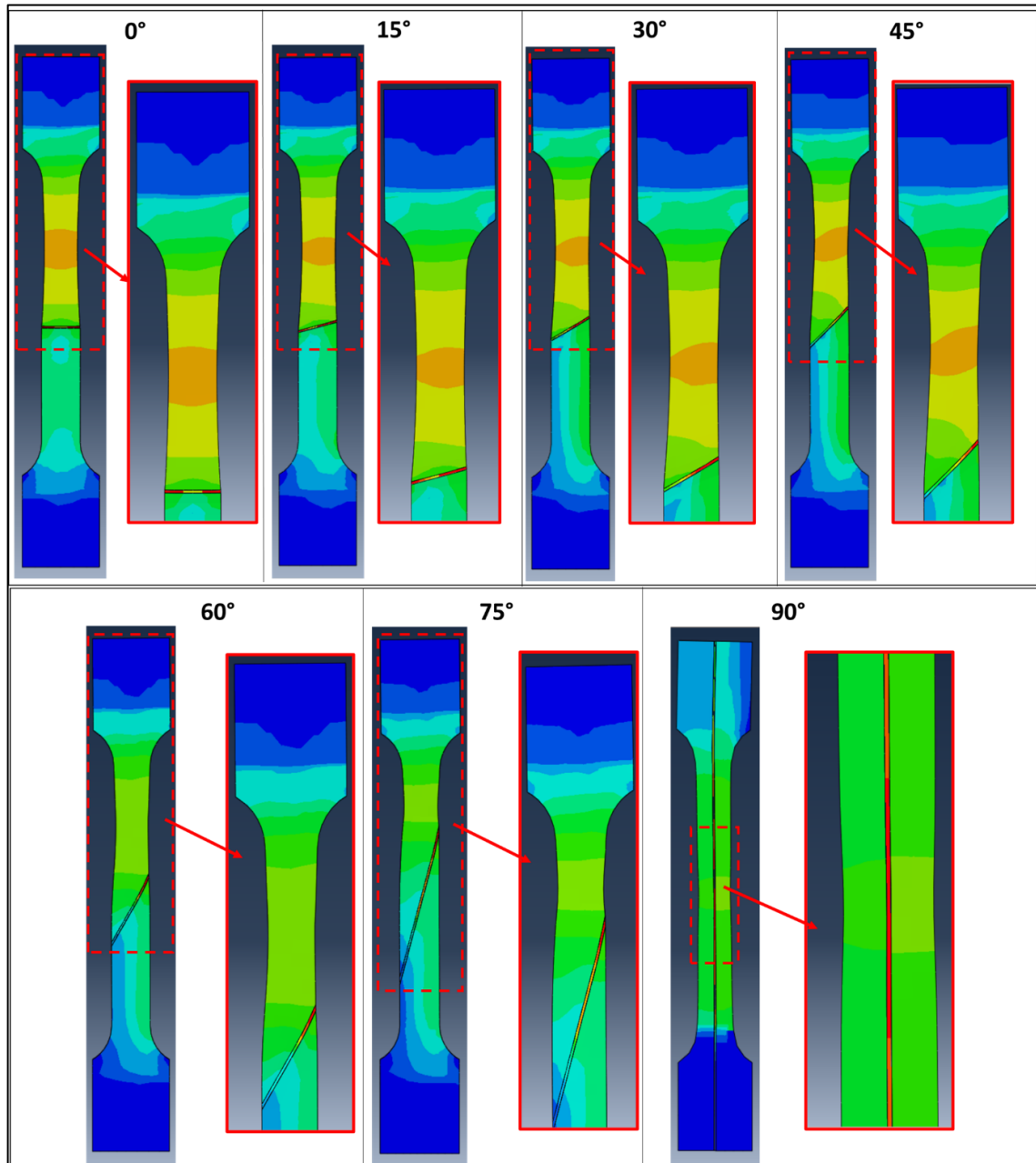
Em relação à fratura, apresenta-se na Figura 4.6 os CPs variando a inclinação da linha de solda rompidos no ensaio de tração físico e simulados. Na Figura 4.6 (A) tem-se os CPs físicos de 0° a 90° e na Figura 4.6 (B) os CPs simulados com a diferenciação de cores de acordo com a deformação local. Na Figura 4.7, apresenta-se a concentração de tensão (Mises) na linha de solda.

Figura 4.6 - Corpos de prova (0° a 90°) rompidos no ensaio de tração uniaxial (A)Físico (B) Numérico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.7 - Avaliação sob tensão da linha de solda dos CPs (0° a 90°) no ensaio de tração uniaxial numérico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.6, verifica-se que, no CP com inclinação de 0° na amostra física, há uma leve inclinação da fratura, enquanto no ensaio numérico a tendência é que a fratura ocorra de forma completamente transversal ao CP. A fratura perfeitamente horizontal vai de encontro ao estudo de calibração de um modelo de dano usando ensaios de tração para a simulação da ruptura dúctil em materiais metálicos de Squeff (2021). A fratura transversal é resultado da distribuição homogênea de tensão no material e na linha de solda, conforme apresentado na Figura 4.7, na qual a solda é mais solicitada em ambas as extremidades. Esse comportamento é

esperado para aços IF que são dúcteis e com estrutura cristalina do tipo CCC (Cúbica de Corpo Centrada), conforme apontado por Garcia *et al.* 2012.

Assim, a trajetória no ensaio físico está associada à não homogeneidade do material, o que faz com que a trinca se propague em uma direção não retilínea (ARHUMAH, 2019; SEPASI *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2021). Em outros estudos, como o de Fongaro *et al.* (2022), que utiliza corte das amostras a laser, gerando menos distorções no material, a fratura ocorre de forma retilínea no centro do CP. No trabalho de Andrade (2019), foi utilizado jato de água para corte, e foram observadas pequenas inclinações na fratura. Isso indica que o corte mecânico por estampagem no presente trabalho pode ter influenciado na direção da fratura, devido à indução de deformação plástica nas regiões de contorno do CP (Schaeffer (2004); Ortigara, 2019).

Esse comportamento observado para  $0^\circ$  no ensaio físico estende-se até  $75^\circ$ , o que reforça a teoria da mecânica da fratura citada anteriormente, onde a fratura está relacionada aos planos de cisalhamento do material, determinando a fratura dúctil de aços IF, mesmo quando soldados (ANANTHAPADMANABAN *et al.*, 2020).

No ensaio numérico, a relação da fratura com os planos de cisalhamento do material fica evidente da inclinação de  $15^\circ$  a  $45^\circ$ . Nessas angulações, a concentração de tensão no momento da fratura não é mais uniforme, como observado na Figura 4.7, e a solda passa a ser solicitada de modo mais efetivo na sua porção superior, a direita do CP, levando a angulação da fratura, representada na Figura 4.7.

Com a inclinação da solda para  $60^\circ$  e  $75^\circ$ , as fraturas em ambos os ensaios ocorrem na mesma direção, não acompanhando a direção da linha de solda. Esse comportamento da fratura pode ser justificado pela maior restrição de movimentação da linha de solda em sua porção superior, gerando concentração de tensão, de modo que o início da fratura se dá próximo a essa região, destacada na cor vermelho na Figura 4.7. Esse fenômeno, dadas as condições de contorno, simplificações e restrições do modelo, é explicado porque, 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 e LI *et al.* 2015).

Com a solda transversal no CP, inclinação relativa de  $90^\circ$ , no ensaio físico, observou-se aleatoriedade na nucleação da trinca, ocorrendo na porção superior do CP, conforme visível na Figura 4.6. Conforme destacado por Andrade *et al.* (2017), Schrek *et al.* (2017) e Safdarian (2019), embora a falha ocorra sempre no material de menor resistência mecânica (geralmente o menos espesso), sua localização é randômica. No ensaio simulado, por sua vez, a fratura ocorreu no meio do CP, em direção perfeitamente horizontal devido a tensão uniaxial sem

heterogeneidade na amostra, como pode ocorrer no ensaio físico. A concentração de tensão no momento da fratura, apresentada na Figura 4.7, evidencia que no LRT a concentração de tensão é direcionada à linha de solda, a qual possui maior resistência mecânica, justificando, junto a contribuição do material de maior espessura e LRT (FEE210), a maior carga de ruptura do CP com essa inclinação.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou uma forma de modelar e caracterizar mecanicamente a região soldada de chapas fabricadas por Tailor Welded Blanks (TWB) por meio do método dos elementos finitos utilizando o software Abaqus®. 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 aproximar os dados do real indica-se o uso de corpos de prova sub-size, fazendo com que a contribuição dos materiais de base diminua no ensaio de tração com corpo de prova com inclinação de 90°, dando prioridade as propriedades mecânicas da solda em si.

- A metodologia proposta para o método de elementos finitos via Abaqus® com condições de contorno impostas: modelo 3D levando em consideração a linha de solda e critério de falha dúctil, obteve boa correlação com a carga de ruptura (3,6% a 10,5%). Para o alongamento, houve uma ótima correlação para 0°, 45° e 90° (-4,7% a 1,3%), que são condições ideais de tração. Por outro lado, observou-se uma baixa correlação (14,2% a 40,1%) para angulações que dependem da anisotropia da chapa (15°, 30°, 60° e 75°).

- As diferenças observadas na comparação entre os ensaios físicos e numéricos da carga de ruptura e alongamento estão ligadas a anisotropia dos aços livre de intersticiais e as diversas variáveis que podem afetar o ensaio físico como: descontinuidades e possíveis irregularidades no material dos CPs.

- No ensaio numérico e físico, a variação da inclinação da linha de solda tem pouco impacto na carga de ruptura dos corpos de prova. A carga máxima foi aproximadamente constante para inclinações até 75°, refletindo o rompimento no material de menor espessura e resistência. Para 90° a solda ocupa o centro da seção vertical do CP e há a contribuição do material de maior espessura e resistência mecânica, aumentando a carga de ruptura.

- O ângulo de 30° demonstrou o melhor desempenho em termos de alongamento para ângulos menores que 90° no ensaio físico. No entanto, o modelo numérico isotrópico não foi capaz de representar essa correlação, evidenciando que a anisotropia é essencial para avaliar o alongamento do TWB com ângulos de inclinação relativa da linha de solda intermediários (15°, 30°, 60° e 75°).

- O padrão de fratura é fortemente influenciado pela concentração de tensão na linha de solda, evidenciando a importância da direção da solda no TWB para melhor distribuição de esforços de forma a evitar solicitações com cargas cisalhantes na solda as quais tendem a reduzir o alongamento do material.

## 6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Realização de novas validações numéricas levando em consideração novos critérios de falha e a anisotropia dos aços IF para aumentar a correlação entre os ensaios físicos e simulados em elementos finitos (Abaqus®)

- Utilização da metodologia de caracterização mecânica dos materiais de base e da solda via regra das misturas para fazer simulação em elementos finitos da CLC (Curvas Limite de Conformação).

- Novas simulações do ensaio de tração uniaxial utilizando de corpos de prova sub-size no ensaio de tração com solda a 90° para comparar os resultados das propriedades mecânicas com o obtido via regra das misturas.

## 7 REFERÊNCIAS

ABAQUS Analysis User's Manual (v6.6): Damage evolution and element removal for ductile metals. Damage evolution and element removal for ductile metals. 2023. Disponível em: [classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt05ch19s02abm39.html](https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt05ch19s02abm39.html). Acesso em: 03 dez. 2023.

ALTAN, Taylan; TEKKAYA, A. Erman. Sheet Metal Forming: Processes and Applications. Ohio: Asm International, 2012.

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, Etienne 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, Etienne 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>.

ANDRADE, Etienne Pereira de; SANTOS, Wellington Augusto dos; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. Caracterização mecânica e análise de falhas de chapas fabricadas pelo processo de Tailor Welded Blank submetidas a estampagem profunda. Anais do 54º Seminário de Laminação e Conformação, p. 293-301, out. 2017.

ARAÚJO, Lara C P; MORALES, Leonel Leonardo Delgado. Modelagem Computacional De Corpos De Prova Submetidos À Tração Usando Abaqus. XIV Congresso Iberoamericano De Ingeniería Mecánica – CIBIM 2019. Bucaramanga: nov. 2019.

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.

ASSUNÇÃO, Guilherme Souza. Caracterização Mecânica Indireta da Região Soldada de Tailor Welded Blanks (TWB). 2019. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

ASSUNÇÃO, Guilherme Souza., Andrade, Etienne Pereira de., Santos, Wellington Augusto dos., Bracarense, Alexandre Queiroz. Numerical and Experimental Analysis of the Behavior of

Tailor Welded Blanks to the Uniaxial Tensile Test. In: de Oliveira, D., Ziberov, M., Rocha Machado, A. (eds) ABCM Series on Mechanical Sciences and Engineering. COBEF 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering(). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-43555-3\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-43555-3_7)

BATALHA, Gilmar Ferreira. Processos de fabricação: Junção, soldagem e brasagem. Laboratório de Engenharia de Fabricação-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/pmr/lefa/download/PMR2202-Estampagem.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2023.

BRESCIANI FILHO, Ettore (coord. rev.); SILVA, Iris Bento da; BATALHA, Gilmar Ferreira; BUTTON, Sérgio Tonini. Conformação plástica dos metais. 6. ed. Campinas: Epusp, 2011. 254 p.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G.. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 9. ed. São Paulo: LTC: GEN - Grupo Editorial Nacional, 2016. 912 p.

CASTRO, Frederico de Magalhães. Estudo numérico e analítico das evoluções da força e da espessura em chapas de aço livre de intersticiais durante processamento por embutimento e ironing. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

CETLIN, Paulo Roberto; HELMAN, Horacio. Fundamentos da conformação: Mecânica dos metais. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2005. 265 p.

DHARAN, C. K. H.; KANG, B. S.; FINNIE, Iain. Cleavage and Ductile Fracture Mechanisms: The Microstructural Basis of Fracture Toughness. In: DHARAN, C. K. H.; KANG, B. S.; FINNIE, Iain. Finnie's Notes on Fracture Mechanics: Fundamental and Practical Lessons. Nova Iorque: Springer, 2016. Cap. 7. p. 201-213.

DIAS, Filipe Teixeira Método Dos Elementos Finitos: Técnicas De Simulação Numérica Em Engenharia. Lisboa: Etep, 2010.

DIAS, Joanes Silva; CHUVAS, Tatiane Campos; FONSECA, Maria da P. Cindra. Evaluation of Residual Stresses and Mechanical Properties of IF Steel Welded Joints by Laser and Plasma Processes. Materials Research, [S.L.], v. 19, n. 3, p. 721-727, 29 abr. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2015-0558>.

DIAS, Leonardo do Carmo Lelis. Estudo paramétrico e análise de configurações alternativas para feixes de molas objetivando a redução de massa. 2022. 193 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/51810>. Acesso em: 29 abr. 2023.

DIETER, George E.. Metalurgia Mecânica. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 660 p.

DOWLING, Norman E.. Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. 4. ed. Londres: Pearson Education, 2013. 977 p.

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.

FONGARO, Luiz Felipe; LUDWIG, Gustavo Alberto. ENSAIO DE TRAÇÃO EM CHAPAS FINAS DE AÇO. In: NASCIMENTO, Jéssica Barbosa da Silva do. *Engenharias: qualidade, produtividade e inovação tecnológica 2*. Ponta Grossa: Atena, 2023. p. 102-114.

GARIMELLA, R. V. "Mesh data structure selection for mesh generation and FEA applications", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 55, n. 4, p. 451–478, 10 out. 2002. DOI: 10.1002/nme.509. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/nme.509>.

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.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. *Ensaios dos materiais*. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012. 365 p.

GUIDI, Erick Siqueira. Desenvolvimento de um programa paramétrico para simulação do processo de estampagem utilizando elementos finitos. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

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>.

HOSFORD, William F.; CADDELL, Robert M.. *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. 4. ed. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2011.

HU, Jack, MARCINIAK, Zdzislaw, DUNCAN, John. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. 2nd ed, Butterworth-Heinemann, 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION for STANDARD. *Metallic Materials – Guidelines for the Determination of Forming-Limit Diagram: ISO 12004-2*. Suisse, 2021.

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, p. 103-117, jan. 2008. Springer Science and Business Media LLC.

LI, Yanhua; LIN, Jianping. Experimental and Numerical Investigations of Constraint Effect on Deformation Behavior of Tailor-Welded Blanks. *Journal Of Materials Engineering And Performance*, [s.l.], v. 24, n. 8, p.2957-2969, 30 jun. 2015. Springer Nature.

MARCONDES, Paulo. Aços para Estampagem. Curitiba: UFPR - Labconf, 2019. 44 slides, color.

MARCONDES, Paulo. Curvas Limite de Conformação CLC. DEMEC / UFPR. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EMEC7005/aulas/4 - Curvas CLC.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2023.

NETTO, Sergio Eglan Silveira. Desenvolvimento do processo de construção de curvas limite de conformação. 2004. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

ORTIGARA, Tiago Trevisan. Projeto de ferramenta de estampagem de corpos de prova para ensaios de tração em alumínio corrugado. 2019. 25 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre., 2019.

PENTEADO, Fernando. Processos de Estampagem. Disponível em < [http://bmalbert.yolasite.com / resources / Estampagem.pdf](http://bmalbert.yolasite.com/resources/Estampagem.pdf)>. Acesso em: 12 set. 2018.

PEREIRA, Rodrigo Barcelos. Estudo da estampabilidade de chapas de aço na indústria automobilística utilizando a tecnologia de Tailored blanks. 2005. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2005.

RALLS, K.; COURTNEY, T. H.; WULFF, J. Introduction to Materials Science and Engineering. John Wiley & Sons, 1976.

RIBEIRO, Fernando L. B. Introdução Ao Método Dos Elementos Finitos: Notas De Aula Do Prof. Fernando L. B. Ribeiro. 2004. Disponível em: [https://www.professores.uff.br/rbrunow/wp-content/uploads/sites/99/2017/08/Curso\\_MEF1.pdf](https://www.professores.uff.br/rbrunow/wp-content/uploads/sites/99/2017/08/Curso_MEF1.pdf). Acesso em: 21 ago. 2023.

SAFDARIAN, Rasoul. Forming Limit Diagram Prediction of AISI 304–St 12 Tailor Welded Blanks Using GTN Damage Model. Journal of Testing and Evaluation, [S.L.], v. 48, n. 6, p. 20180069, 15 jan. 2019.

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.

SANTOS, Andrea Pedroza da Rocha. Análise de textura cristalográfica por difração de raios x em aços IF com diferentes adições de titânio, nióbio e fósforo - 2017 Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SANTOS, Wellington Augusto dos; ANDRADE, Etienne Pereira de; ASSUNÇÃO, Guilherme Souza; SILVA, Gilmar Cordeiro da. Finite and numerical simulations applied in Tailor Welded Blank. Global Journal of Research in Engineering, July 2020. ISSN 2249-4596. Disponível em: < <https://engineeringresearch.org/index.php/GJRE/article/view/2030>>

SANTOS, Wellington Augusto dos. Caracterização do comportamento mecânico na conformação de chapas em Tailor Welded Blank (TWB) por curva CLC, 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

SCHAEFFER, L.; “Conformação de chapas metálicas”. Imprensa Livre, 2004.

SCHREK, Alexander.; ŠVEC, Pavol.; BRUSILOVÁ, Alena. Formability of Tailor-Welded Blanks From Dual-Phase and Bake-Hardened Steels with a Planar Anisotropy Influence. *Strength of Materials*, v. 49, n. 4, p.550-554, jul. 2017.

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.

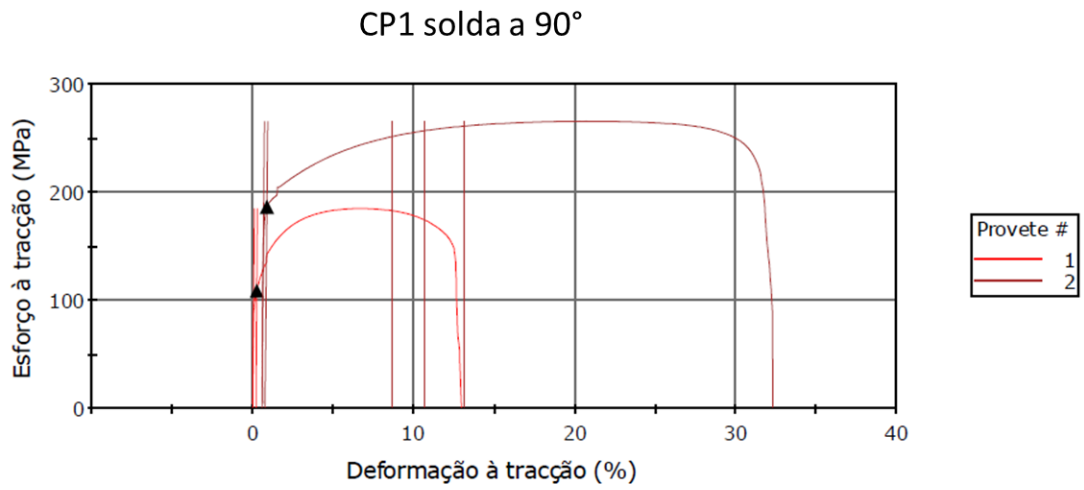
SILVA, M.B.; MARTÍNEZ-DONAIRE, A.J.; CENTENO, G.; MORALES-PALMA, D.; VALLELLANO, C.; MARTINS, P.A.F.. Recent Approaches for the Determination of Forming Limits by Necking and Fracture in Sheet Metal Forming. *Procedia Engineering*, [S.L.], v. 132, p. 342-349, 2015. Elsevier BV.

SQUEFF, Bernardo Affonso. Calibração de um modelo de dano usando ensaios de tração para a simulação da ruptura dúctil em materiais metálicos. 2021. 21 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

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>.

YANG, Fei, Veljkovic, Milan, & Liu, Yuqing. Ductile damage model calibration for high-strength structural steels. *Construction and Building Materials*, 263, 120632. (2020). doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120632

## APÊNDICE A – ENSAIO DE TRAÇÃO DOS TWB COM SOLDA A 90°

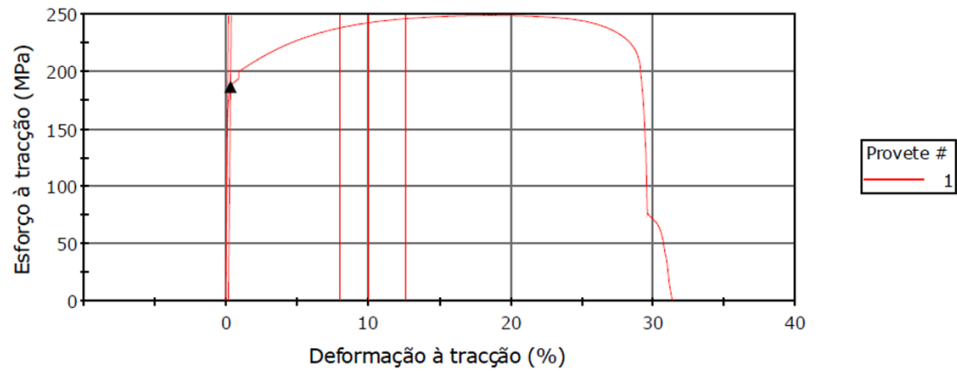


	Espessura (mm)	Largura (mm)	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
1	1,11	20,20	< 109	< 185	< 13
2	1,10	20,20	< 186	< 265	< 32
Máximo	1,11	20,20	186	265	32
Mínimo	1,10	20,20	109	185	13
Média	1,10	20,20	148	225	22
Desvio Padrão	0,00707	0,00000	54,38150	57	13,23733

	Valor r (°)	Valor n (°)
1	-----	-----
2	1,8	0,19
Máximo	1,8	0,19
Mínimo	1,8	0,19
Média	1,8	0,19
Desvio Padrão	-----	-----

- 1) Solda em L
- 2) CP1 solda a 90°

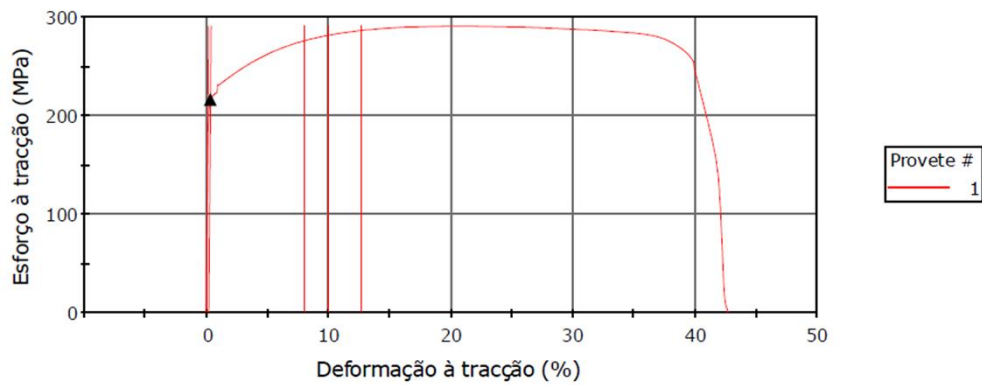
CP2 solda a 90°



	Espessura (mm)	Largura (mm)	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
1	1,11	20,20	< 186	< 248	< 31
Máximo	1,11	20,20	186	248	31
Mínimo	1,11	20,20	186	248	31
Média	1,11	20,20	186	248	31
Desvio Padrão	-----	-----	-----	-----	-----

	Valor r (°)	Valor n (°)
1	2,6	0,17
Máximo	2,6	0,17
Mínimo	2,6	0,17
Média	2,6	0,17
Desvio Padrão	-----	-----

CP3 solda a 90°



	Espessura (mm)	Largura (mm)	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
1	1,11	20,10	216	< 290	43
Máximo	1,11	20,10	216	290	43
Mínimo	1,11	20,10	216	290	43
Média	1,11	20,10	216	290	43
Desvio Padrão	-----	-----	-----	-----	-----

	Valor r (°)	Valor n (°)
1	2,1	0,18
Máximo	2,1	0,18
Mínimo	2,1	0,18
Média	2,1	0,18
Desvio Padrão	-----	-----

## APÊNDICE B – DADOS DE TRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE TWB ENSAIADOS

- Ensaio dos 6 corpos de provas avaliados

DADOS DE TRAÇÃO - CORPOS DE PROVA DO TWB COM VARIAÇÃO DA INCLINAÇÃO DA LINHA DE SOLDA						
Ângulo	Carga de Ruptura [N]	Carga Média de Ruptura [N]	Alongamento total [%]	Desvio padrão dos 6 CPs	Desvio padrão dos 3 CPs selecionados	Alongamento total médio [%]
0°	3989,41	3978,2	23,10	2,3	0,5	23,3
0°	3985,28		23,90			
0°	3973,60		26,30			
0°	3977,50		19,60			
0°	3982,10		25,20			
0°	3961,51		22,90			
15°	4072,33	4010,4	6,00	9,6	1,6	25,4
15°	4045,49		17,30			
15°	3966,41		27,20			
15°	3967,26		34,00			
15°	4037,03		25,00			
15°	3973,92		24,00			
30°	3898,36	3951,9	34,10	11,5	2,0	34,0
30°	3964,81		36,00			
30°	3920,51		16,80			
30°	4020,19		20,10			
30°	3898,36		32,00			
30°	4009,11		7,00			
45°	3809,77	3850,7	23,90	3,1	0,2	19,9
45°	3809,77		19,10			
45°	3831,92		27,00			
45°	3924,30		20,10			
45°	3877,80		20,00			
45°	3850,40		19,70			
60°	3835,74	3855,3	23,60	3,9	0,5	27,5
60°	3876,30		26,90			
60°	3916,50		27,70			
60°	3909,70		27,80			
60°	3795,47		18,20			
60°	3798,09		21,20			
75°	3876,21	3920,3	20,50	8,6	1,0	20,2
75°	3940,10		29,00			
75°	3935,60		21,00			
75°	3918,00		19,00			
75°	3969,07		13,60			
75°	3883,03		3,40			
90°	5727,40	6168,1	17,10	8,8	1,0	32,0
90°	6413,20		23,80			
90°	6993,00		33,00			
90°	5898,90		32,00			
90°	6455,40		43,00			
90°	5520,48		31,00			

\*\*Em vermelho estão os dados descartados devido à ausência de padrão.

- Ensaio dos 3 corpos de provas selecionados para o trabalho

DADOS DE TRAÇÃO - CORPOS DE PROVA DO TWB COM VARIAÇÃO DA INCLINAÇÃO DA LINHA DE SOLDA					
Ângulo	Carga de Ruptura [N]	Carga Média de Ruptura [N]	Alongamento total [%]	Desvio padrão	Alongamento total médio [%]
0°	3989,41	3978,73	23,10	0,5	23,30
0°	3985,28		23,90		
0°	3961,51		22,90		
15°	3966,41	3992,45	27,20	1,6	25,40
15°	4037,03		25,00		
15°	3973,92		24,00		
30°	3898,36	3920,51	34,10	2,0	34,03
30°	3964,81		36,00		
30°	3898,36		32,00		
45°	3924,30	3884,17	20,10	0,2	19,93
45°	3877,80		20,00		
45°	3850,40		19,70		
60°	3876,30	3900,83	26,90	0,5	27,47
60°	3916,50		27,70		
60°	3909,70		27,80		
75°	3876,21	3909,94	20,50	1,0	20,17
75°	3935,60		21,00		
75°	3918,00		19,00		
90°	6993,00	6137,46	33,00	1,0	32,00
90°	5898,90		32,00		
90°	5520,48		31,00		

**APÊNDICE C – DADOS DE TRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA SIMULADOS**

Ângulo de inclinação relativa da solda [°]	Físico		Numérico	
	Carga média de ruptura [N]	Alongamento total médio [%]	Carga de ruptura 2 [N]	Alongamento total médio [%]
<b>0</b>	3978,73	23,30	4139,60	22,20
<b>15</b>	3992,45	25,40	4145,80	21,80
<b>30</b>	3920,51	34,03	4145,21	20,40
<b>45</b>	3884,17	19,93	4147,87	19,40
<b>60</b>	3900,83	27,47	4216,04	19,20
<b>75</b>	3909,94	20,17	4320,09	14,80
<b>90</b>	6137,46	32,00	6360,35	32,40