



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

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ANÁLISE
MICROESTRUTURAL DE CHAPAS OBTIDAS PELO PROCESSO
DE TAILOR WELDED BLANK (TWB)

ETIENE PEREIRA DE ANDRADE

Belo Horizonte, 28 de junho de 2019.

Etiene Pereira de Andrade

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ANÁLISE
MICROESTRUTURAL DE CHAPAS OBTIDAS PELO PROCESSO
DE TAILOR WELDED BLANK (TWB)**

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

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense (UFMG)

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
 PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
 ENGENHARIA MECÂNICA
 Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
 31270-901 - Belo Horizonte - MG
 Tel.: +55 31 3409.5145
 E-mail: cpemes@demec.ufmg.br

**"CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ANÁLISE MICROESTRUTURAL
 DE CHAPAS OBTIDAS PELO PROCESSO DE TAILOR WELDED
 BLANK (TWB)"**

ETIENE PEREIRA DE ANDRADE

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "ENGENHARIA DE MANUFATURA E MATERIAIS".

Dissertação aprovada no dia 28 de junho de 2019.

Por:


 Prof. Alexandre Quadroz Bracarense
 Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG


 Prof. Bruno Silva Cota
 Universidade Federal de Itajubá


 Prof. Ivunilza Feijardo
 Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais


 Prof. Ariel Rodríguez Arias
 Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

A553c	<p>Andrade, Etiene Pereira de. Caracterização mecânica e análise microestrutural de chapas obtidas pelo processo de Tailor Welded Blank (TWB) [recurso eletrônico] / Etiene Pereira de Andrade. – 2019. 1 recurso online (116 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 115.</p> <p>Bibliografia: f. 103-114. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem - Teses. 3. Indústria automobilística - Teses. 4. Chapas de aço - Teses. I. Bracarense, Alexandre Queiroz, 1959-. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p>
	CDU: 621(043)

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço ao Pai Celestial, que me ajudou quando eu mais precisava e, nem em face de minha pior versão, foi capaz de me abandonar. Obrigado, Jesus Cristo, meu Senhor!

“Se nomes eu fosse citar, poderia me esquecer de alguém” (LOPES, 2009).

Quero agradecer à minha família, por estar sempre presente e conviver não apenas com minha glória, mas me ajudar a suportar meus momentos de fraqueza. Papai (Sérgio Silva de Andrade) e Mamãe (Débora Silene Fonseca de Andrade), obrigado pelo orgulho e confiança que sentem e depositam em mim. Aos maiores “jacus” da minha vida, meus irmãos, também agradeço pela paciência, carinho, amor e compreensão.

Ao Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense, pela oportunidade, orientação, auxílio e confiança e à Prof^a Dr^a Ivanilza Felizardo, também pela oportunidade e auxílio.

À toda equipe do Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS), por estarem aqui e respeitarem meu espaço e minha necessidade. Por suportarem minhas chatices e me darem apoio técnico. Vale aqui ressaltar os nomes de Bruno Cota (grande e louco amigo), Andrés, Gedael, Sheron (grande tutora e mestre em Soldagem por Fricção).

Ao meu “pupilo”, Guilherme Assunção, a quem tive a honra de orientar durante o estágio do Projeto da FCA e também durante o Trabalho de Graduação (TG). Ele me ajudou a não desanimar e a preparar amostras sem fim. Manteve-se firme até o fim do projeto, sempre fazendo o melhor possível. Obrigado por confiar na minha técnica mesmo quando eu pensei que tudo fosse dar errado.

Aos amigos do CEFET que me acompanharam durante a graduação e permanecem presentes, sempre que preciso. Agradecimentos especiais ao caro Lucas Fuscaldi (“Fusca”), o qual me ajudou a preparar amostras sem fim, me deu apoio moral, ouviu meus “dramas” de pós-graduação e me auxiliou durante uma parte difícil do projeto.

Aos meus amigos e colegas do Projeto FIAT/FCO. Aqui, cito mais uma vez o camarada Bruno Cota. Agradeço também ao Rafael Átila e a todos os meus estagiários/bolsistas, que contribuíram, ainda que indiretamente, para meu sucesso e caminhada.

À equipe técnica do Instituto SENAI de Tecnologia Metal Mecânica (ISTMM), pela realização dos ensaios de tração e colaboração técnica ao projeto.

À Fabíola, minha companheira, pela compreensão e por saber que as ausências temporárias não eram em vão.

Agradeço à FIAT Chrysler Automóveis do Brasil LTDA pela seção de material e dados técnicos para realização deste trabalho. Agradecimentos especiais ao colega João Paulo, de prensas, pela prestatividade, paciência e ajuda na recepção do material doado. Outro grande amigo, Wellington Augusto dos Santos, merece meus sinceros cumprimentos. Sempre disposto a aprender e a me ensinar, compartilhou informações, materiais e auxílio técnico em todas as minhas dificuldades. Ponto chave para execução desta dissertação e para proposição e resolução de desafios técnicos relacionados ao Tailor Welded Blank.

A todos os meus grandes amigos e aqueles que estiveram comigo até então e, sei, continuarão comigo.

Guardo esse espaço em especial para mais familiares, como meu querido avô, amigão e companheiro (José Esteves – Quinzote, *In Memoriam*), que teria orgulho de estar aqui, mas infelizmente não pôde. Não me perdoaria se me esquecesse da minha Tia Noêmia, que tanto confiou e me apoiou e, igualmente, à minha avó, Ilda.

Agradeço também à minha querida psicóloga, Débora Livia, pelo apoio emocional e incentivo (ainda que com puxões de orelha necessários) para que eu finalizasse esta dissertação.

Agradeço, enfim, a todos aqueles que me ajudaram, fisicamente ou não, a conquistar mais essa vitória, que espero ser mais uma de muitas, em minha trajetória.

“Seja quem você for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa. Tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá. ”

Ayrton Senna *in* Pensador

“Quando vem o orgulho, chega a desgraça; mas a sabedoria está com os humildes. ”

Salomão *in* Provérbios 11:2

“Se os fatos não se enquadram à teoria, mude-a”

Albert Einstein *in* Pensador

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS E QUADROS	14
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
RESUMO	17
1.INTRODUÇÃO	18
1.1.Objetivos Gerais.....	22
1.2.Objetivos Específicos.....	22
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1.Conformação Mecânica na Indústria Automobilística.....	23
2.2.Aços para estampagem.....	31
2.3.Tailor Blanks (TBs)	36
2.3.1.Tailor Welded Blanks (TWBs)	40
2.3.2.Soldagem de Tailor Welded Blanks.....	44
2.3.3.Testes aplicados a TWBs	58
3.METODOLOGIA	74
3.1.Materiais.....	75
3.2.Métodos.....	78
3.2.1.Ensaio de tração uniaxial.....	78
3.2.2.Determinação de perfil de microdureza	82
3.2.3.Análises metalográficas	83
4.RESULTADOS E DISCUSSÕES	86
4.1.Ensaio de tração uniaxial.....	86
4.2.Perfil de microdureza	93
4.3.Análises metalográficas	94
4.4.Análise da chapa conformada	98
5.CONCLUSÕES	100
6.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
ABSTRACT.....	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
APÊNDICE A	115

NOMENCLATURA

Letras Latinas

Al	Alumínio
Ti	Titânio
Cr	Cromo
R	Coefficiente de anisotropia
K	Coefficiente de resistência mecânica
n	Expoente de encruamento
e	Espessura
Ar	Argônio
Nd	Neodímio
k	Quilo
W	Watt
Se	Selênio
n	Nano
m	Metro

Letras Gregas

λ	Comprimento de onda
ρ	Massa específica ou densidade
σ	Tensão
ϵ	Deformação
α	Razão de tensões na CLC
β	Razão de deformações na CLC
μ	Micro
τ	Tensão cisalhante
Θ	Ângulo do plano de corte
δ	Ângulo de inclinação relativa da solda

Subscritos

S_{YB}	<i>Yeld Strength for material B</i>	Tensão limite de escoamento do material B
S_{TA}	<i>Tensile Strength for material A</i>	Tensão limite de resistência à tração do material A
t_{0A}	<i>Initial thickness of material A</i>	Espessura inicial do material A
t_{0B}	<i>Initial thickness of material B</i>	Espessura inicial do material B
A_s	Área ocupada pela solda	
L_{CP}	Largura útil do corpo de prova	
e_s	Espessura da solda	
σ_w	Tensão limite de resistência da solda	
K_1	Coeficiente de resistência mecânica do material 1 do TWB	
ε_1	Deformação verdadeira do material 1 do corpo de prova do TWB	
A_1	Área da seção transversal do material 1 do corpo de prova do TWB	
K_2	Coeficiente de resistência mecânica do material 2 do TWB	
ε_2	Deformação verdadeira do material 2 do TWB	
A_2	Área da seção transversal do material 2 do corpo de prova do TWB	
A_w	Área da seção transversal da solda do corpo de prova do TWB	

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Utilização de aços nas indústrias automobilísticas da América do Norte e União Europeia	18
FIGURA 1.2 - BIW e seus principais componentes e materiais para um Volvo XC90	19
FIGURA 1.3 - Estrutura típica de uma porta veicular, destacando-se o batente reforçante (A) e a estrutura estampada da porta (B)	20
FIGURA 1.4 - Representação esquemática de um corpo de prova de dobramento extraído de uma chapa obtida com TWB, evidenciando linha de solda e orientação relativa de 45°	20
FIGURA 2.1 - Variação da pressão normalizada com a deformação efetiva para um material com $n = 2,25$, em diferentes regiões do copo estampado	23
FIGURA 2.2 - Variação da tensão aplicada de acordo com o plano de corte	25
FIGURA 2.3 - Representação esquemática que mostra as tensões normal (σ') e cisalhante (τ') que atuam num plano orientado segundo um ângulo em relação ao plano perpendicular de atuação da tensão σ	26
FIGURA 2.4 - Representação esquemática de um copo estampado e das forças que nele atuam	28
FIGURA 2.5 - Representação esquemática de um sistema molde-punção com prensa chapas, calibrado.....	28
FIGURA 2.6 - Alongamento x resistência à tração de aços avançados de alta resistência	31
FIGURA 2.7 - Representação esquemática da relação entre o coeficiente de anisotropia (R) e a classificação de estampagem de aços ao carbono	32
FIGURA 2.8 - Micrografias de (a) metal base, aço IF e (b) seção transversal de um TWB feito com o mesmo aço IF. Ambas possuem aumento de 200X e ataque feito com Nital.....	34
FIGURA 2.9 - Perfil de microdureza do TWB feito com aços IF	35
FIGURA 2.10 - Microestruturas típicas de aços IF soldados a laser	35
FIGURA 2.11 - Micrografias ópticas mostrando a mudança da microestrutura da junta soldada: (a) vista geral da seção transversal (b) MB (c) ZTA e (d) ZF (F: ferrita B: bainita)	36
FIGURA 2.12 - Diferentes processos de fabricação de Tailor Blanks. (A) Patchwork Blanks; (B) Tailor Welded Blanks; (C) Tailor Rolled Blank e (D) Tailor Heat Treated Blanks.	37
FIGURA 2.13 - Patchwork Blanks (A) etapas de conformação e (B) exemplo de componentes obtidos por meio dessa técnica.	37
FIGURA 2.14 - Representação esquemática do processo de TRB.....	38
FIGURA 2.15 - Representação esquemática do processo de THTBs.....	38
FIGURA 2.16 - Representação esquemática de um processo de fabricação de TWBs.....	39
FIGURA 2.17 - Exemplo de Tailor Machined Blank.....	39
FIGURA 2.18 - Vista explodida de aplicações correntes ou potenciais do TWB em automóveis....	41
FIGURA 2.19 - Representação esquemática da carroceria de um automóvel, evidenciando suas principais estruturas de reforço e colunas ou pilares	41
FIGURA 2.20 - Chapa plana e produto estampado, oriundo de TWB, com destaque para região da solda	42
FIGURA 2.21 - Resultado comparativo de massa entre um blank convencional e um TWB para o pilar “B” de um automóvel, evidenciando regiões de solda	42
FIGURA 2.22 - Representação esquemática de um painel interno de porta em TWB.....	43

FIGURA 2.23 - Elementos de um sistema típico para soldagem a laser	45
FIGURA 2.24 - Representação esquemática da relação entre a densidade de potência e a penetração para diferentes processos de soldagem	46
FIGURA 2.25 - Representação esquemática da relação entre a densidade de potência do feixe de laser e o modo de soldagem aplicado	47
FIGURA 2.26 - Comparativo entre os principais tipos de feixe de laser adotados na indústria automobilística.....	48
FIGURA 2.27 - Representação esquemática do fenômeno de movimentação da linha de solda após conformação, evidenciando também um domo de embutimento e sua altura	49
FIGURA 2.28 - Blank inicial e três copos estampados com diferentes combinações de espessuras. a) blank inicial b) espessuras de 0,85mm e 1mm c) espessuras de 0,75mm e 1mm d) espessuras de 0,5mm e 1mm.	49
FIGURA 2.29 - Exemplo de painel lateral soldado a laser e estampado, com diferentes dimensões num mesmo blank	50
FIGURA 2.30 - Representação esquemática de elemento de balanço de forças na transversal, próximo à região soldada do blank, com espessuras distintas “ e_A ” e “ e_B ”.....	51
FIGURA 2.31 - Esquemática dos dois principais modos de falha em TWBs.....	52
FIGURA 2.32 - Representação esquemática de configurações de amostras do metal de base e dos TWBs com diferentes orientações da linha de solda, antes do teste de dobramento.....	53
FIGURA 2.33 - Representação esquemática de uma curva CLC, destacando-se as curvas CLCIP e CLCF (FLCN e FLCF, respectivamente)	54
FIGURA 2.34 - Condições de carga e limite para a rigidez da porta automotiva: (a) análise de flexão vertical; (b) análise na lateral superior; e (c) análise na lateral inferior.....	56
FIGURA 2.35 - Designs ideais para painel interno TWB de uma porta automotiva sob vários casos de carga: (a) caso a; (b) caso b; (c) caso c; e (d) caso d.....	57
FIGURA 2.36 - (a) Corpo de prova DIC; (b) Ampliação sobre a superfície analisada do corpo de prova e (c) campo de deformações do corpo de prova durante execução do teste DIC	59
FIGURA 2.37 - Aparato utilizado para realização do Ensaio de Embutimento Erichsen	60
FIGURA 2.38 - Relação típica entre a largura dos corpos de prova e o caminho de deformação (largura em mm), caracterizando uma CLC.....	61
FIGURA 2.39 - Influência da razão entre a resistência mecânica dos materiais do blank e o LSR na altura limite do domo para amostras de TWB com diferentes larguras.....	61
FIGURA 2.40 - Representação esquemática de análise de deformações num TWB	62
FIGURA 2.41 - Amostras de TWB após serem submetidas ao ensaio de conformação, com orientação da solda de (a) 0° (b) 45° e (c) 90° , com destaque para os domos formados	63
FIGURA 2.42 - Variação da altura limite de domo em função da razão de espessura das chapas que compõem o TWB.....	63
FIGURA 2.43 - Dimensões dos corpos de prova utilizados para testes nos TWBs	65
FIGURA 2.44 - Diferentes padrões e orientações da linha de solda em corpos de prova circulares de tração de TWB.	65
FIGURA 2.45 - Exemplo de chapa soldada curvilínea com curva de solda colocada à uma distância pré-determinada do centro do TWB, para posterior retirada de corpos de prova.	66
FIGURA 2.46 - Representação esquemática de amostras retiradas para realização de ensaios de tração, com diferentes orientações em relação à DL.	67

FIGURA 2.47 - Corpos de prova de tração, retirados diretamente do TWB. As setas em destaque indicam a direção de laminação (DL)	68
FIGURA 2.48 - Curvas força x deslocamento dos materiais de base e do TWB. Também está incluída, na coloração alaranjada, a média ponderada das curvas dos TWBs em relação à DL.	68
FIGURA 2.49 - Representação esquemática dos corpos de prova de tração de TWBs (a) dimensões da amostra com solda longitudinal e (b) solda transversal e amostras com (c) com 90°DL (d) 60°DL (e) 45°DL (f) 30°DL (g) 0°DL e (h) metal base. Unidades em mm.	69
FIGURA 2.50 - Corpos de prova utilizados para realização de ensaios de embutimento (norma ASTM E643), com linha de solda (a) no centro (b) deslocada em 5mm do centro, em direção à chapa mais espessa e (c) deslocada 1,6mm do centro, em direção à chapa de menor espessura	70
FIGURA 2.51 - Exemplos de corpos de prova de tração extraídos dos TWB confeccionados para correlação entre resultados do modelo computacional e testes físicos (Potência do laser de 550W e velocidade de soldagem de 5mm/s)	71
FIGURA 2.52 - Corpo de prova de tração, padrão ASTM E8, extraído de um TWB, após o teste ..	72
FIGURA 3.1 - Fluxograma de etapas desenvolvidas na presente pesquisa.	74
FIGURA 3.2 - Dimensões do blank utilizado no estudo, para extração de amostras	76
FIGURA 3.3 - Foto com escala da chapa confeccionada por meio do processo de TWB, utilizada para retirada de amostras	76
FIGURA 3.4 - Foto com escala da chapa confeccionada por meio do processo de TWB, utilizada para retirada de amostras, com destaque para região de corte	77
FIGURA 3.5 - (A) Painel interno de porta, com detalhe para região de corte (B) peça cortada, sobreposta à chapa plana de TWB e (C) peça após estampagem e corte, com destaque para regiões analisadas	78
FIGURA 3.6 - Dimensões do corpo de prova padrão para ensaios de tração segundo norma ASTM E-8M	79
FIGURA 3.7 - Corpos de prova de tração utilizados para caracterização mecânica do material de base FEP 05.....	79
FIGURA 3.8 - Corpos de prova de tração utilizados para caracterização mecânica do material de base FEE 210.....	80
FIGURA 3.9 - Representação esquemática de retirada de corpos de prova de tração das chapas ainda não conformados	81
FIGURA 3.10 - Corpos de prova utilizados para execução dos ensaios de tração, com destaque para região da linha de solda.....	81
FIGURA 3.11 - Discretização das três regiões de espessuras distintas num corpo de prova de tração extraído na região da linha de solda.....	82
FIGURA 3.12 - Representação esquemática do método utilizado para coleta de dados de microdureza	83
FIGURA 3.13 - Exemplo de amostras para análise metalográfica, com indicação relativa de diferentes ângulos aleatórios.....	84
FIGURA 3.14 - Molde utilizado para embutimento a frio e exemplos de amostras metalográficas, já embutidas, identificadas.....	84
FIGURA 3.15 - Equipamentos utilizados para preparação metalográfica. (A) Lixadeira politriz automática (B) lixadeira de bancada manual e (C) politriz automática para uso de discos com alumina (Al ₂ O ₃)	85

FIGURA 4.1 - Relação entre a carga média de ruptura e o ângulo de inclinação relativa da linha de solda	87
FIGURA 4.2 - Relação entre a carga de ruptura puramente de tração e o ângulo de inclinação relativa da linha de solda.....	88
FIGURA 4.3 - Relação entre a carga cisalhante de ruptura e o ângulo de inclinação relativa da linha de solda	89
FIGURA 4.4 - Relação entre a deformação verdadeira e o ângulo de inclinação relativa da linha de solda	91
FIGURA 4.5 - Mapas de deformação dos corpos de prova de tração dos TWBs e do MB (a) 90°, (b) 60°, (c) 45°, (d) 30°, (e) 0° e (f) MB.....	91
FIGURA 4.6 - Aspecto visual da fratura de diferentes corpos de prova cujos ângulos relativos de inclinação da solda são complementares	92
FIGURA 4.7 - Perfil médio de microdureza, com delimitação de regiões da solda do TWB segundo perfil médio de microdureza	93
FIGURA 4.8 - Vista de topo de amostra não conformada.....	94
FIGURA 4.9 - Vista de perfil de amostra não conformada	94
FIGURA 4.10 - Vista de perfil de amostra não conformada, com solda angulada a 20°	95
FIGURA 4.11 - Vista de perfil de amostra não conformada, com solda angulada a 25°	95
FIGURA 4.12 - Vista de perfil de amostra não conformada, com solda angulada a 30°	96
FIGURA 4.13 - Vista de perfil de amostra não conformada, com solda angulada a 40°	96
FIGURA 4.14 - Vista de perfil de amostra não conformada, com solda angulada a 45°	96
FIGURA 4.15 - Vista de perfil de amostra não conformada, com solda angulada a 60°	97
FIGURA 4.16 - Vista de perfil de amostra não conformada, com solda angulada a 75°	97
FIGURA 4.17 - Vista de topo de amostras conformadas. (A) Região 1, (B) Região 2 e (C) Região 3	98

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 2.1 - Relação de volume, massa e torque, para diferentes casos e iterações, em simulações utilizando TWBs	58
TABELA 2.2 - Combinações de espessuras para confecção dos corpos de prova de tração circulares	66
TABELA 2.3 - Propriedades mecânicas dos materiais de base e resultados obtidos por meio de Regra das Misturas para um TWB	72
TABELA 3.1 - Composição química dos aços IF utilizados no TWB	75
TABELA 3.2 - Propriedades mecânicas dos aços IF utilizados no TWB	75
TABELA A.1 - Dados de tração dos corpos de prova ensaiados.....	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

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)
BESO	<i>Bidirectional Evolutionary Structural Optimization</i> (Otimização estrutural evolutiva bidirecional)
BIW	<i>Body In White</i> (Corpo em branco, carroceria veicular propriamente dita)
CIMM	Centro de Informação Metal Mecânica
CLC	Curva Limite de Conformação
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Corpo de prova
CQ	Composição Química
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
D:YAG	<i>Doped Yttrium Aluminum Garnet</i> (Cristal mineral sintético de Alumínio dopado com Ítrio)
DIC	Correlação digital de imagem (<i>Digital Image Correlation</i>)
DL	Direção de laminação
DOE	<i>Design of Experiments</i> (<i>Design</i> de Experimentos)
DP	<i>Dual Phase</i> (Duplas fases)
EDD	<i>Extra-deep Drawing</i> (Estampagem extra profunda)
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)
FLCF	<i>Forming Limit Curve at Fracture</i> (Curva Limite de Conformação na Fratura (CLCF))
FLCN	<i>Forming Limit Curve at Necking</i> (Curva Limite de Conformação na Instabilidade Plástica (CLCIP))
FSW	<i>Friction Stir Welding</i> (Soldagem por fricção)

GM	<i>General Motors</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i> (Soldagem a arco com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio)
HSLA	<i>High Strength & Low Alloy</i> (Aço de alta resistência e baixa liga)
HSS	<i>High Strength Steel</i> (Aço de alta resistência)
IF	<i>Interstitial Free</i> (Livre de Intersticiais)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> (Amplificação da luz por emissão estimulada de radiação)
LBW	<i>Laser Beam Welding</i> (Soldagem por feixe de laser)
LDH	<i>Limiting Dome Height</i> (Altura limite do domo)
LRT	Limite de Resistência à Tração
LSR	<i>Limit Strength Ratio</i> (Razão limite de resistência mecânica)
LTR	<i>Limiting Thickness Ratio</i> - (Razão de espessura limitante)
MSFLD	<i>Müschelborn-Sonne Failure Limit Diagram</i> (Diagrama Limite de Falha de Müschelborn-Sonne)
OSU	<i>Ohio State University</i> (Universidade do Estado de Ohio)
P	Carga total suportada pelo corpo de prova
PHS	<i>Press Hardenable Steel</i> (Aço endurecido por prensagem)
ROM	<i>Rule of Mixtures</i> (Regra das Misturas)
RSEW	<i>Resistance Seam Welding</i> (Soldagem de costura por resistência)
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
THTB	<i>Tailor Heat Treated Blanks</i>
TMB	<i>Tailor Machined Blank</i>
TRB	<i>Tailor Rolled Blanks</i>
TTPS	Tratamento térmico pós soldagem
TWB	<i>Tailor Welded Blank</i>
TWIP	<i>Twin Induced Plasticity</i> (Plasticidade induzida por maclação)
ULSAB	<i>Ultra Light Steel Auto Body</i> (Carroceria automotiva ultraleve de aço)
WL	<i>Weld Line</i> (Linha de solda)
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

RESUMO

Um dos maiores desafios da indústria automobilística, a nível global, trata-se de desenvolver veículos que sejam, simultaneamente, leves e resistentes mecanicamente. Empregam-se materiais de ultra alta resistência mecânica, mas há limitações quanto aos custos e à redução máxima de espessura que se pode obter. O Tailor Welded Blank (TWB) surge como solução; trata-se de um processo que permite a soldagem de topo de chapas de diferentes especificações (material, espessura e/ou revestimento), antes da conformação.

Este trabalho trata da caracterização mecânica e da análise microestrutural de chapas de painéis internos de portas veiculares fabricadas utilizando a técnica de TWBs. Trabalhou-se com chapas de aço livre de intersticiais (IF – *Intertitial Free*), da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), com materiais de códigos FEE 210 de 1,2mm de espessura e IF CSN FEP 05 de 0,7mm de espessura, soldadas a laser. Essas chapas foram cedidas, já soldadas, pela empresa FIAT Chrysler Automóveis (FCA) Brasil.

Para caracterização mecânica do conjunto pesquisado fez-se ensaios de tração uniaxial e de microdureza. A técnica de TWB foi aplicada com linha de solda orientada de 0° a 70° (variando de 5° em 5°). Todos os ensaios foram feitos em triplicata, visando maior confiabilidade dos resultados. A análise microestrutural foi feita por meio de microscopia óptica. Também se avaliou os efeitos da solda, em diferentes regiões, sobre a conformabilidade dos materiais envolvidos nessa pesquisa, a partir da estampagem de uma chapa do painel interno da porta.

Quanto à tração, verificou-se um aumento abrupto da carga de ruptura ao se aumentar a inclinação relativa da solda de 10° para 15°, sendo maior valor registrado para cerca de 25°. A microestrutura dos aços IF apresenta matriz ferrítica e a zona fundida (ZF) é predominantemente bainítica. Ao se angular a linha de solda, os grãos tendem a se orientar preferencialmente segundo essa angulação.

Uma constatação já esperada é de que quanto maior a deformação plástica equivalente do processo de conformação maior o encruamento dos materiais. Concluiu-se que ainda que não haja um consenso quanto aos efeitos da orientação da linha de solda no desempenho e na conformabilidade de TWBs, a carga de ruptura dos corpos de prova testados aumenta à medida que se aumenta a angulação relativa da linha de solda.

Palavras chave: Conformação; Soldagem a laser; Tailor Welded Blank; Indústria automobilística

1. INTRODUÇÃO

Um das indústrias mais importantes para o desenvolvimento tecnológico global é a automobilística. Trabalha-se com pesquisas de novos materiais, tecnologias e processos. Busca-se, a cada dia, atender demandas mais restritivas de emissão de poluentes e de consumo energético e de combustível. Exige-se de forma crescente redução de massa e aumento de desempenho estrutural dos automóveis.

Apesar do crescente uso de materiais alternativos e da disseminação de novas tecnologias e processos de fabricação, os aços e suas ligas ainda são os metais mais utilizados na fabricação da carroceria dos automóveis.

Para isso, a indústria de aços tem desenvolvido a chamada ULSAB (*Ultra Light Steel Auto Body* – carroceria de aço ultraleve), a qual utiliza ligas de aço mais resistentes mecanicamente, de melhor desempenho estrutural e conformabilidade, como os aços HSLA (*High Strength & Low Alloy* (Aço de alta resistência e baixa liga) e HSS (*High Strength Steel* - Aço de alta resistência) avançados (SINGH, 2016; CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Na FIG. 1.1 apresenta-se um gráfico referente à utilização de diferentes materiais metálicos na carroceria automobilística, na América do Norte e na União Europeia.

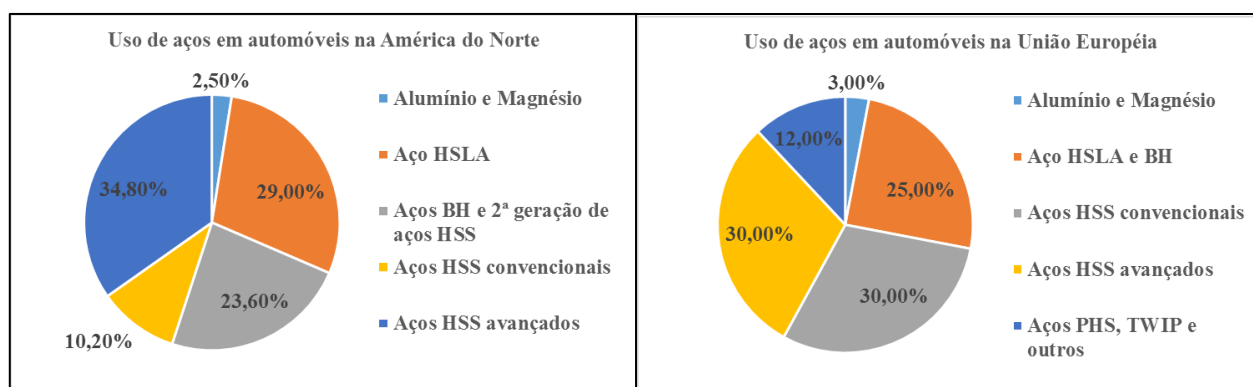


FIGURA 1.1 - Utilização de aços nas indústrias automobilísticas da América do Norte e União Europeia
FONTE: Adaptado de SINGH, 2016.

Os mercados europeu e norte-americano, apesar de considerados extremamente avançados no que tange ao desenvolvimento de veículos e tecnologias, ainda avançam gradualmente no emprego de ligas não ferrosas na carroceria automobilística.

Quanto aos processos mecânicos, no ramo automobilístico o mais empregado é a conformação por estampagem, sendo um dos mais antigos processos de fabricação de materiais, nas

suas mais diversas técnicas e formas (SURESH; REGALLA; GUPTA, 2016; DUAN et al, 2016; LI et al, 2015; MOHEBBI; AKBARZADEH, 2012).

De modo geral, a conformação é definida como sendo o conjunto de técnicas e processos nos quais há aplicação de força externa ao material a ser conformando, o que o obriga a assumir, por meio de deformação plástica, uma forma pré-determinada (DIETER, 1988).

A maioria das peças que compõem a carroceria de um automóvel são obtidas por meio de estampagem e unidas por soldagem. Ainda que não aparente, a estrutura de um veículo, conhecida por *Body in White* (BIW), é formada por um complexo número de componentes e diferentes materiais, conforme se apresenta na FIG. 1.2.



FIGURA 1.2 - BIW e seus principais componentes e materiais para um Volvo XC90
 FONTE: Adaptado de LINDBERG, 2016.

Via de regra, para se reduzir a massa, acaba-se perdendo em desempenho estrutural. Prima-se, para garantir segurança e conforto dos ocupantes, pelo desempenho e integridade. Uma alternativa para que se minimize o ganho de peso é, apenas em regiões de maiores solicitações mecânicas, utilizar reforços ou batentes (GAIED et al, 2009; LI et al, 2015).

No caso de portas dianteiras, por exemplo, como a região da dobradiça é mais sujeita à fadiga e suporta, em si, todo o peso da porta, são soldados reforços, conforme apresentado na FIG. 1.3.

Ainda que se reforce apenas as regiões de maior solicitação mecânica, o acréscimo de massa ainda é prejudicial à eficiência energética do veículo. Uma das maneiras de conciliar esses conceitos antagônicos (redução de massa x desempenho estrutural) é utilizar o processo de fabricação por *Tailor Welded Blanks* (TWBs), conforme apontam estudos mais recentes (GAUTAM; RAUT; KUMAR, 2016; LIU et al, 2015; GAN et al, 2014; KUMAR; REDDY, 2015; WANG et al, 2016; PARENTE et al, 2015).

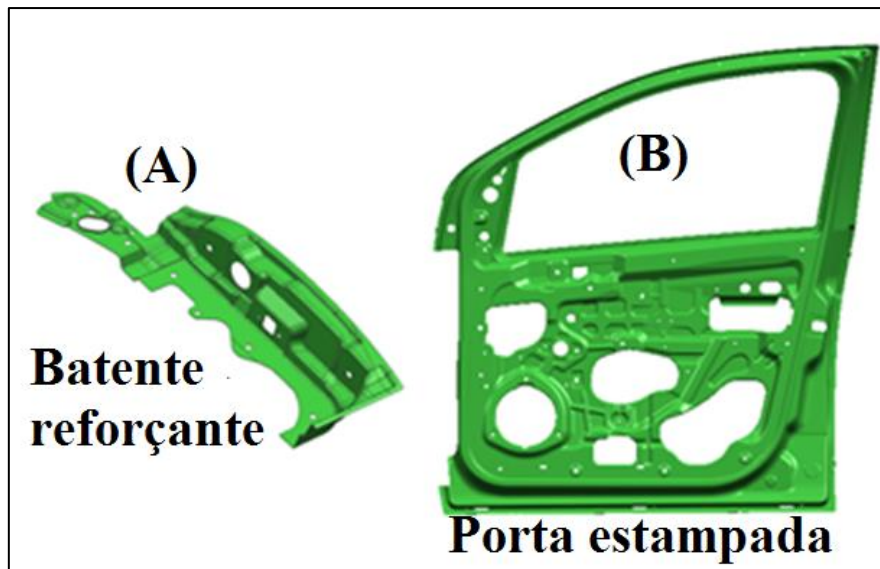


FIGURA 1.3 - Estrutura típica de uma porta veicular, destacando-se o batente reforçante (A) e a estrutura estampada da porta (B)
 FONTE: Autor, 2019.

A técnica de TWBs consiste basicamente em fabricar blanks semiacabados, compostos por ao menos duas chapas distintas (em termos de material, espessura, revestimentos e outras propriedades física e/ou químicas), antes da etapa de conformação final para obtenção do produto acabado (ZHANG, 2006; LI et al, 2013; SAUNDERS; WAGONER, 1997; LEE; FELTHAM; VAN DEVENTER, 1996).

A soldagem de TWBs normalmente é feita a laser, principalmente quando se trabalha com produção em série. Para esse processo há alguns termos técnicos diferentes dos comumente utilizados nos demais processos de soldagem. Um deles se trata de “linha de solda” (*Weld Line – WL*), que seria similar ao termo “cordão de solda” (*Weld Bead*). Isso porque a solda resultante é muito estreita se comparada aos cordões convencionais. Outro termo, focado em TWBs, é “orientação da linha de solda”, que diz respeito ao ângulo de inclinação da linha de solda em relação à condição de paralelismo das chapas soldas. Esses conceitos encontram-se esquematizados na FIG. 1.4.

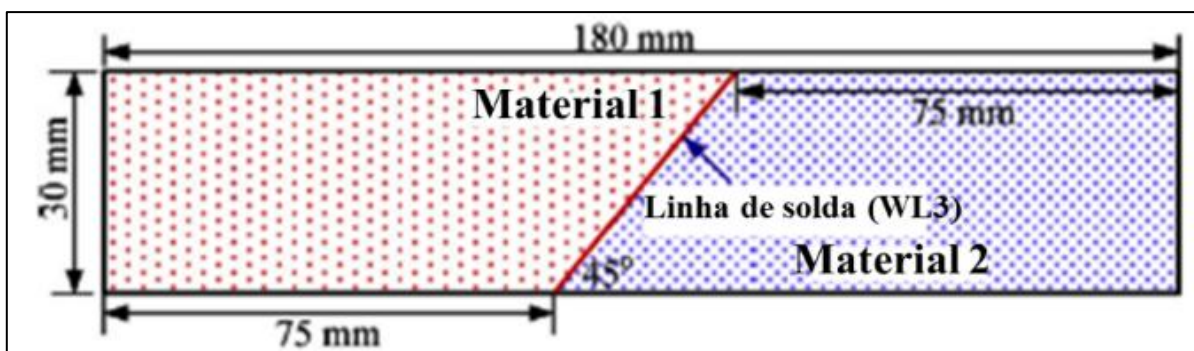


FIGURA 1.4 - Representação esquemática de um corpo de prova de dobramento extraído de uma chapa obtida com TWB, evidenciando linha de solda e orientação relativa de 45°
 FONTE: Adaptado de XU et al, 2014.

Quanto ao ângulo geralmente adotado, trabalha-se principalmente com 0° a 10° de inclinação com relação à direção perpendicular de laminação. 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, 2003). O fator crucial para validação das chapas obtidas por meio de TWBs é, portanto, a qualidade da linha de solda. É necessário que se tenha penetração total, ausência de porosidades e bom aspecto superficial (CHENG; CHAN; CHOW, 2007; PANDA; KUMAR, 2009; ZADPOOR; SINKE; BENEDICTUS, 2007).

No caso convencional de trabalho, apresentado na FIG. 1.3, além do grande número de operações de manufatura, gera-se gradativo aumento de massa nos componentes, à medida que se demanda maior resistência mecânica das peças confeccionadas (AHMETOGLU et al, 1995).

O emprego de tailor blanks permite, além da redução de massa dos componentes do veículo, diminuição da quantidade de material necessário à fabricação de peças (MIN, KIN, KANG, 1998; ASSUNÇÃO; QUINTINO; MIRANDA, 2009). As pesquisas são conduzidas no sentido de se determinar qual o processo de soldagem mais adequado para união das chapas que irão compor o blank (isso é feito avaliando-se tanto a produtividade do processo quanto a extensão da Zona Termicamente Afetada (ZTA) e da Zona Fundida (ZF), além das propriedades mecânicas da junta soldada); os efeitos da ZTA em sua conformabilidade; o sentido mais adequado para o cordão de solda (paralelo ou transversal à linha de aplicação dos esforços mecânicos de conformação), dentre outros (MIYAZAK; SAKIYAMA; KODAMA, 2007; ABDULLAH et al, 2001; KINSEY; LIU; CAO, 2000).

Pesquisas dessa natureza tornam-se cada vez mais relevantes, uma vez que o uso de TWBs vem substituindo as chapas convencionais em um número cada vez maior de aplicações automotivas (ABDULLAH et al, 2001). Muitos estudos, como os desenvolvidos por Jie et al, 2007, Chan et al, 2005, Leitão et al, 2009; Sheng, 2008 e Korouyeh et al, 2013, são centrados apenas na avaliação da conformabilidade em si, sem levar em consideração os efeitos da solda ou sua qualidade e demais parâmetros. Foca-se na razão de espessura das chapas, no limite de resistência à tração dos materiais e em múltiplos *designs* possíveis, visando maior redução de massa.

Não se trabalha, na maioria dos casos, com a orientação da linha de solda e sua relação de otimização entre comportamento mecânico, redução de massa e de custos do blank (RIAHI et al, 2012). O presente estudo firma-se, portanto, na necessidade de conferir mais técnica e ciência ao processo de fabricação por TWBs, que muitas vezes é feito de forma empírica (LI et al, 2015; PALLETT; LARK, 2001).

Pretende-se então avaliar o comportamento de diferentes chapas obtidas pelo processo de Tailor Welded Blank (soldadas a laser), antes e após o processo de conformação. A resistência à tração, o perfil de microdureza (HVM) e a orientação da solda serão levadas em consideração, nas

chapas ainda não conformadas. Pretende-se, por meio de microscopia óptica, verificar qualitativamente os efeitos da conformação na microestrutura das chapas e na linha de solda.

1.1. Objetivos Gerais

Verificar a influência do posicionamento da linha de solda nas respostas mecânica e metalúrgica de chapas não conformadas e conformada, de *Tailor Welded Blanks* feitos de aços livres de intersticiais (IF), correlacionando o ângulo de inclinação da solda à resposta mecânica e à microestrutura das zonas fundida (ZF) e termicamente afetada (ZTA). Pretende-se então, em função da resposta mecânica, determinar qual o ângulo ótimo de inclinação relativa da linha de solda, o qual possibilitará melhor conformabilidade às chapas.

1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos dessa pesquisa consistem em:

- a) Avaliar o comportamento mecânico em tração, de corpos de prova obtidos a partir de chapas de TWB, sob diferentes angulações da linha de solda em relação à direção normal de tração uniaxial (0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° , 55° , 60° e 65°);
- b) Avaliar a uniformidade da linha de solda e a extensão da ZF e da ZTA por meio de ensaios de microdureza Vickers;
- c) Analisar a microestrutura da chapa obtida por meio de TWB, em diferentes regiões;
- d) Investigar o efeito da inclinação relativa da solda na microestrutura do TWB;
- e) Investigar a microestrutura de uma chapa obtida por meio do processo de TWB, após conformação, em diferentes locais (sujeitos, portanto, a diferentes deformações) e correlacionar o aspecto microestrutural (orientação e deformação dos grãos) à operação de conformação e à orientação relativa da linha de solda;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Conformação Mecânica na Indústria Automobilística

Segundo Cetlin; Helman (2005), os metais, em especial o aço, mantém extraordinária importância na vida do ser humano. Produzidos a partir de minérios, em sua maioria, é essencial a mudança de forma, até uma peça/componente final, para que se aplique os metais no cotidiano das pessoas.

Às operações nas quais a forma de uma peça metálica é alterada por deformação plástica dá-se o nome de conformação (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Durante essas operações deve-se atentar para que não se ultrapasse o Limite de Resistência à Tração (LRT) do material conformado e ocorram falhas.

Em geral, a falha da chapa é caracterizada por um fenômeno de “empescoçamento” quantificado pela ocorrência de deformações limite. Esse fenômeno é denominado de instabilidade e pode, em termos práticos, ser entendido como a condição de máxima pressão e/ou força durante a conformação (HOSFORD; CADDELL, 2007).

Essa condição nem sempre é trivial de ser prevista e pode variar a depender da localização de análise da peça (copo estampado), conforme se apresenta na FIG. 2.1.

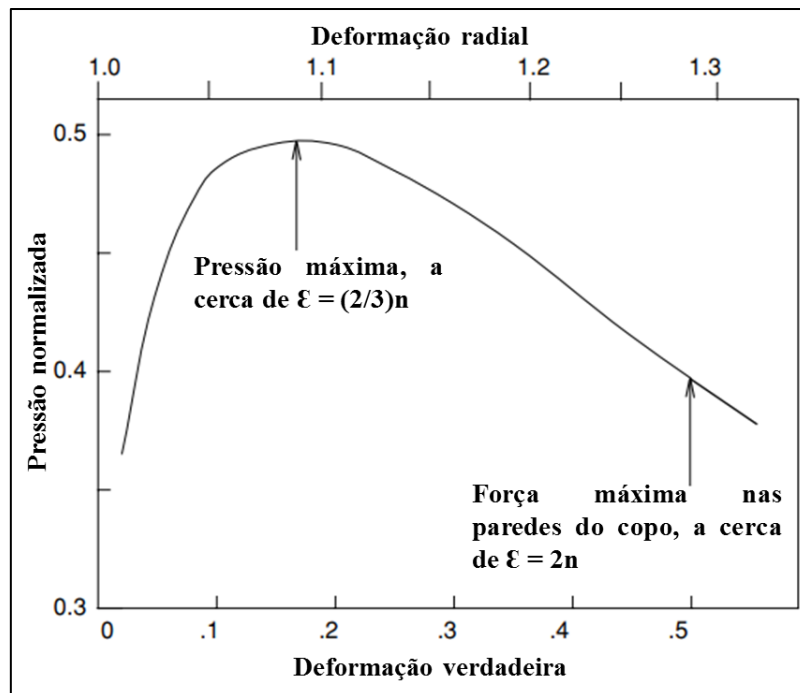


FIGURA 2.1 - Variação da pressão normalizada com a deformação efetiva para um material com $n = 2,25$, em diferentes regiões do copo estampado
FONTE: Adaptado de HOSFORD; CADDELL, 2007.

A deformação máxima que se poderia alcançar para um material isotrópico, com comportamento plástico ideal e máxima eficiência do processo de conformação corresponderia a cerca de 63% (HOSFORD; CADDELL, 2007).

Ocorre, no entanto, que boa parte dos processos não possui tão elevada eficiência, principalmente a estampagem (em função do atrito entre o material e o ferramental). Além disso, não há uma rota de processamento que possibilite, a nível industrial, a criação de um material idealmente isotrópico. Deve-se ponderar também que em decorrência de defeitos primários de fabricação e afins, os metais também possuem limitações quanto à deformação máxima que podem atingir (KRAUSS, 1990).

Levando-se em consideração tais colocações, tem-se uma média de eficiência dos processos de conformação de cerca de 65% e uma deformação limite média para aços, de cerca de 65%, o que confere um máximo de 48% de redução de área por passe/golpe (CETLIN; HELMAN, 2005; HOSFORD; CADDELL, 2007).

Essa deformação limite relaciona-se à uma propriedade dos materiais denominada de conformabilidade. Segundo Cetlin; Helman (2005), essa propriedade pode ser relatada como sendo a capacidade de um material fluir ao longo do processo de conformação sem falhas prematuras, sendo limitada em muitos processos pela fratura dúctil.

O local de todos os valores limite de deformação correspondentes aos diferentes caminhos de tensão é referido como curva limite de conformação (CLC) (NARAYANAN; NAIK, 2010). Essas curvas são aplicadas para prever a conformabilidade de chapas metálicas.

Para encontrar a CLC experimentalmente, algumas amostras de chapas de metal de comprimento constante e largura variável são submetidas a diferentes condições de deformação usando um punção hemisférico (KARAJIBANI; HASHEMI; SEDIGHI, 2016).

O risco de fratura é determinado pela avaliação de quão próxima a condição de deformação é da CLC. Para determinar o limite de conformação em diferentes modos (estampagem profunda, deformação plana e alongamento), a largura da amostra é variada, sendo executados diferentes ensaios de embutimento (como Erichsen, por exemplo) (GAIED et al, 2009).

A CLC mostra a quantidade de deformação que um material de determinada chapa pode resistir em função do modo de deformação, que é uma relação entre a deformação maior e menor. Para evitar a fratura do material, é necessário que os níveis de tensão permaneçam abaixo da CLC em toda a peça estampada (CETLIN; HELMAN, 2005).

Deve-se atentar também para variáveis que se correlacionam mais ao processo de conformação em si, independentemente do material que será conformado. Segundo Karajibani et al (2016), essas variáveis são:

- Temperatura de trabalho
- Estado de tensões produzido
- Razão entre as deformações (ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3)
- Tensões mínima e máxima
- Tensão cisalhante

Outro aspecto importante é o ângulo do ferramental, visto que a tensão aplicada ao longo da peça muda segundo o plano de corte, conforme apresentado na FIG. 2.2.

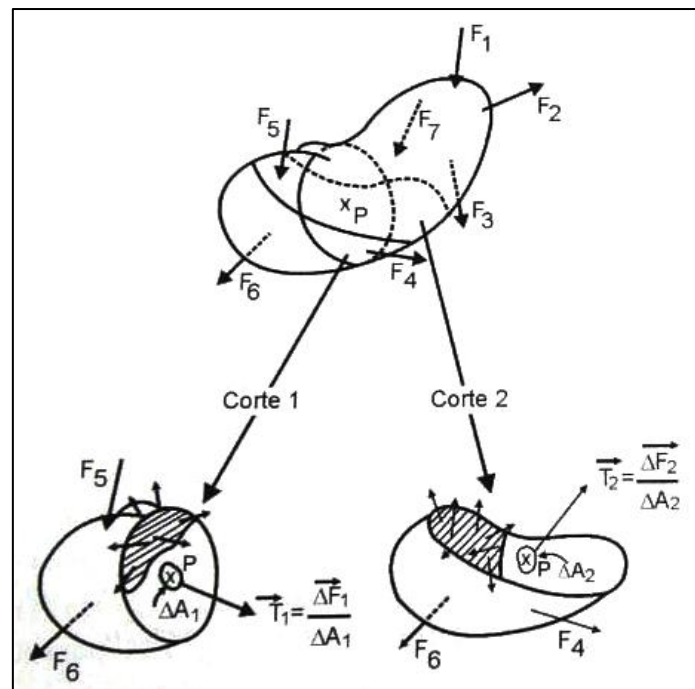


FIGURA 2.2 - Variação da tensão aplicada de acordo com o plano de corte

FONTE: CETLIN; HELMAN, 2005

Essa variação de tensões interfere na tensão cisalhante máxima à qual se submete a peça de trabalho. Consequentemente, pode-se levar o material à condição de fratura ainda que se aplique uma tensão que, normalmente, estaria abaixo do LRT (HOSFORD; CADDELL, 2007; CETLIN; HELMAN, 2005).

Há um ângulo ideal para o trabalho otimizado do ferramental e para o cálculo do plano de corte de tensão na peça estampada. Considerando que há diferentes critérios de decomposição de tensões (como critério de Tresca e de Von Mises, por exemplo) e que a fratura de materiais dúcteis pode ser baseada na tensão cisalhante máxima, deve-se analisar de forma criteriosa o plano de trabalho e a carga máxima aplicada aos materiais (CALLISTER; RETHWISCH, 2016; CETLIN; HELMAN, 2005).

Uma das formas mais simples, porém, precisa, de se trabalhar com esse fator é decompor apenas a tensão e/ou a carga, segundo o ângulo de orientação no qual se efetuou o plano de corte, conforme esquematizado na FIG. 2.3.

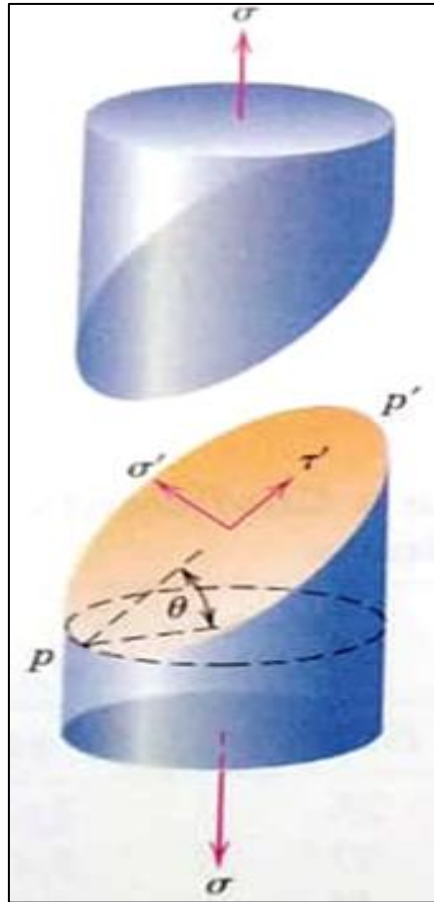


FIGURA 2.3 - Representação esquemática que mostra as tensões normal (σ') e cisalhante (τ') que atuam num plano orientado segundo um ângulo em relação ao plano perpendicular de atuação da tensão σ

FONTE: Adaptado de CALLISTER; RETHWISCH, 2016

A partir dessa decomposição obtém-se as EQ. (2.1) e EQ. (2.2):

$$\sigma' = \sigma \cos^2 \theta \quad (2.1)$$

$$\tau' = \sigma \sin \theta \cos \theta \quad (2.2)$$

Nas quais:

- σ – Tensão puramente de tração
- σ' - Tensão normal
- τ' - Tensão cisalhante
- Θ - Ângulo relativo de inclinação do plano de corte

O principal processo de conformação utilizado na indústria automobilística é a estampagem (LOPES, 2009). Durante essa operação, a deformação localizada ocorre após o processo de deformação uniforme e é o limitante da conformabilidade de chapas (DIETER, 1988).

A maior parte dos tailor blanks é submetida a esse processo de conformação (LI; LIN, 2015). Segundo Penteado (2019), por estampagem entende-se o processo de fabricação de peças por meio de corte e/ou deformação de chapas em operações de prensagem.

Por meio da estampagem, pode-se minimizar desperdícios de material e otimizar a forma de muitos componentes (PANDA et al, 2007).

Os processos de estampagem podem ser classificados de acordo com o principal conjunto de forças e o estado de tensões que atua sobre a chapa estampada. Segundo CIMM (2019), essa classificação tende a ser arbitrária e, em geral, é dividida em:

- Estampagem rasa
- Estampagem profunda ou embutimento
- Estampagem extra profunda

De modo geral, a estampagem rasa geralmente se refere à conformação de um copo com profundidade menor do que a metade do seu diâmetro com pequena redução de parede. Na estampagem extra profunda, o copo é mais profundo do que a metade do seu diâmetro (CIMM, 2019).

A análise das tensões que atuam sobre uma peça estampada é fundamental para que se compreenda seus modos de falha e se evite defeitos durante o processo. Isso, no entanto, nem sempre é trivial (PENTEADO, 2019).

Uma forma de se esquematizar o complexo processo de deformação e o estado de tensões atuante num copo estampado é apresentada na FIG. 2.4. As paredes verticais são sujeitas à tração uniaxial, a área plana submete-se à redução de área por meio de tensões de compressão. Nas regiões curvas tem-se ação de estiramento, uma combinação de tensão de compressão, de cisalhamento e de tração. Portanto, lida-se com estados de tensões uniaxiais, biaxiais e multiaxiais (CETLIN; HELMAN, 2005; DIETER, 1988).

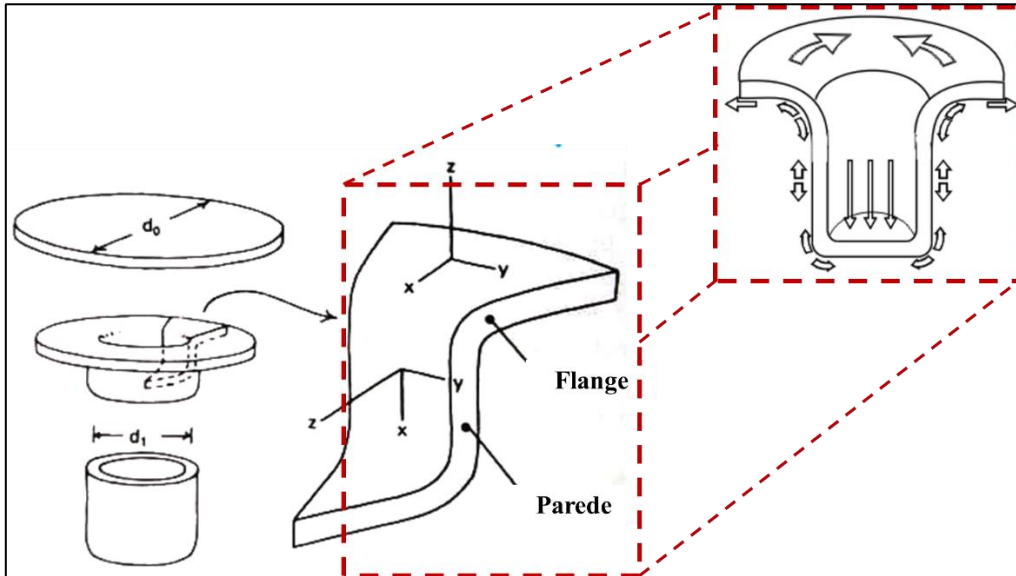


FIGURA 2.4 - Representação esquemática de um copo estampado e das forças que nele atuam
 FONTE: Adaptado de HOSFORD; CADDELL, 2007.

As tensões compressivas tendem a produzir esforços de flambagem na superfície superior da chapa estampada, o que exige a utilização de um dispositivo denominado prensa-chapas. Na FIG. 2.5 ilustra-se, de forma esquemática, um sistema molde-punção com prensa chapas, calibrado.

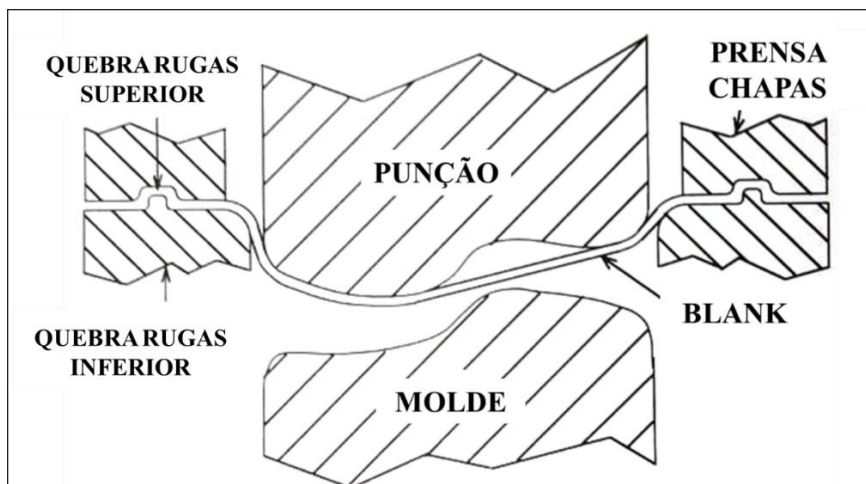


FIGURA 2.5 - Representação esquemática de um sistema molde-punção com prensa chapas, calibrado
 FONTE: Adaptado de HOSFORD; CADDELL, 2007

Na estampagem de peças automobilísticas trabalha-se com chapas planas (blanks), as quais são fabricadas por meio de um molde (ferramental), submetido à pressão de um punção e à pressão de sujeição do prensa-chapas. Pode-se fazer necessário, tanto para guiar o processo quanto para evitar falhas, o uso de quebra rugas. O quebra rugas é colocado junto ao ferramental para que se

tenha uma espécie de balanceamento de tensões. Previne-se o excesso de deformação, equilibrando-se as tensões atuantes na chapa, além de se prevenir a geração de rugas e asperezas irregulares.

Lida-se também com o atrito entre as peças, o ferramental e o blank. É importante, portanto, que se tenha boa lubrificação. Frisa-se novamente a questão do prensa-chapas, pois se a pressão aplicada for muito pequena, podem surgir rugas nas laterais da peça. E, se for muito elevada, pode ocorrer a ruptura da peça na prensa (CIMM, 2019; KRELLING, 2019).

Deve-se atentar para folgas que podem haver no ferramental, as quais não devem ser grandes o suficiente para permitirem que haja lubrificação em excesso ou falhas na chapa. Mas, devem ser de tamanho suficiente para possibilitar o escoamento do material para o interior da matriz, sem que surjam tensões cisalhantes (HOSFORD; CADDELL, 2007).

Não há uma regra quanto à quantidade exata de operações que uma peça deve passar até se obter seu formato final. Obviamente que se prima por qualidade superficial e precisão dimensional.

Segundo ASM (2006) e CIMM (2019), o número de operações de estampagem dependerá tanto do material conformado quanto da chapa e das relações entre as dimensões inicial e final da peça. Isso vai de encontro à eficiência máxima do processo e ao nível de encruamento e anisotropia dos materiais.

De forma resumida, as operações de estampagem podem ser assim classificadas (PENTEADO, 2019; KRELLING, 2019):

- Estampagem de corte ou puncionamento: operação na qual a chapa é cortada, submetendo-se principalmente a tensões de cisalhamento
- Estampagem de conformação: o material é submetido ao molde que conferir-lhe-á o formato final, sendo sujeito a tensões de tração e de compressão, principalmente. O estado de tensões pode ser multiaxial. É de suma importância que a chapa não se rompa. Esse processo aplica-se em geral a peças de menor complexidade, no que se chama de estampagem rasa.
- Estampagem de repuxo: essa etapa é aplicada principalmente a peças mais complexas e em situações nas quais faz-se necessária maior redução de área. O material sujeita-se a um grande estiramento e deve, portanto, possuir requisitos superiores de ductilidade e resistência mecânica
- Dobramento: trata-se de uma das mais simples operações de estampagem. Nesse caso, a peça/chapa é simplesmente dobrada, até que se atinja sua forma final. Aplica-se em geral a geometrias mais simples, como a carcaça de uma geladeira, por exemplo

Penteado (2019) diz que a estampagem é o processo de conformação mais adequado para produção em série de peças, das mais diversas e complexas geometrias. Daí seu amplo emprego em indústrias automobilísticas e de autopeças.

Quando se trabalha com peças mais complexas, como o painel interno de uma porta veicular, pode-se submeter o blank inicial a um conjunto que varia entre quatro a sete operações de estampagem. Pode ser necessário, muitas vezes, que uma operação seja repetida, em passos diferentes, para se obter a forma final desejada (RAO; MOHAN, 2003).

Num processo convencional, como o apresentado na FIG. 1.3, são estampados dois conjuntos diferentes de peças: a chapa principal (painel interno de porta, no caso) e o elemento de reforço (batente). Emprega-se então dois conjuntos distintos de ferramentais. Isso pode aumentar o número de operações de conformação, diminuir a precisão dimensional da peça final e exigir mais etapas de união, como soldagem a ponto por resistência (RSW – *Resistance Spot Welding*), por exemplo.

Essa é uma das principais questões que impulsionou o desenvolvimento de *Tailor Welded Blanks*. Consegue-se trabalhar com apenas um blank, sem a necessidade de se adicionar reforços à peça estampada final.

No caso da FIG. 1.3, por exemplo, espera-se que a chapa mais espessa e resistente mecanicamente se encontre no local que antes era destinado à soldagem do batente reforçante.

O que difere a estampagem de uma chapa simples para um TWB trata-se basicamente do ferramental. Isso porque, em virtude da diferença de espessura entre as chapas que compõem o blank, deve haver uma espécie de calço compensador (CHAN et al, 2005; SAFDARIAN et al, 2014).

Outro aspecto fundamental é que, enquanto num blank singular lida-se apenas com um material, no TWB pode-se lidar com diferentes materiais, o que demanda maior cuidado (MA; GUAN; YANG, 2015). O balanço de forças deve ser feito considerando as propriedades mecânicas (expoente de encruamento, LRT, LE e ductilidade) de todos os materiais envolvidos. Trabalha-se, na prática industrial, com simulações (sendo adotados diferentes *softwares* de estampagem), as quais têm como principais dados de entrada a espessura das chapas e as propriedades mecânicas dos materiais que as compõem.

A complexidade das operações de estampagem é elevada e isso se torna ainda mais evidente quando se trabalha com TWBs. Isso porque a linha de solda pode possuir diferentes orientações (que determinam planos de corte distintos) e as chapas podem ser de diferentes especificações (o que torna difícil a confecção de CLCs) (LIU et al, 2015; KUSUDA; TAKASAGO; NATSUMI, 1997). Frisa-se que essas determinações ainda são, em boa parte, feitas de modo empírico. Isso porque não há normas claras para orientar como exatamente proceder para fabricação

de um TWB, apenas para sua validação (as quais preveem testes de tração e de embutimento, porém apenas qualitativos).

É importante prever o comportamento sob deformação de tailor blanks antes que se faça sua conformação. Muitas CLCs são baseadas apenas nos materiais de base do blank, desconsiderando-se a soldagem e os efeitos que as diferentes operações de conformação podem produzir sobre o blank. Para isso, deve-se conhecer melhor os materiais empregados no TWB e os efeitos que a soldagem (e a orientação da linha de solda) produz.

2.2. Aços para estampagem

De acordo com Singh (2016), Lindberg (2016) e Schrek et al (2017), apesar do desenvolvimento de novos materiais, os aços ainda são os mais empregados na indústria automobilística. Trabalha-se no desenvolvimento de aços que sejam cada vez mais resistentes mecanicamente e que possuam bom alongamento, para emprego em estampagem.

Na FIG. 2.6 tem-se um gráfico clássico que apresenta, de forma esquemática, a relação entre alongamento e resistência mecânica dos mais diversos tipos de aço desenvolvidos até então.

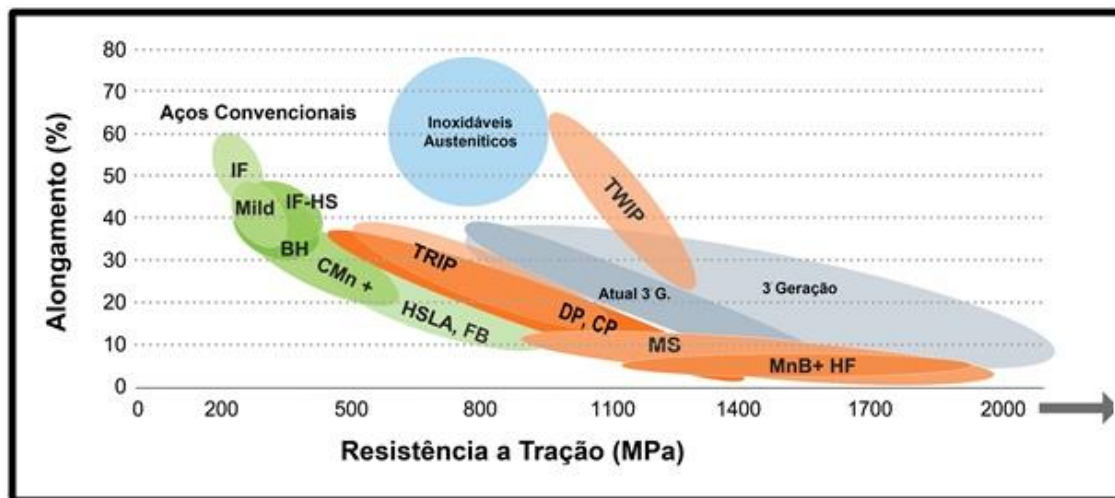


FIGURA 2.6 - Alongamento x resistência à tração de aços avançados de alta resistência
FONTE: Giancesini; Schaeffer, 2018.

Para estampagem de chapas planas aplicadas a componentes móveis da carroceria veicular (como portas, capôs e porta-mala), ainda se utiliza amplamente aços com baixo teor de carbono. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), esses materiais podem ser classificados de acordo com seu grau de estampagem. Essa classificação baseia-se, dentre outros aspectos, no limite de escoamento, no expoente de encruamento e, sobretudo, no coeficiente de anisotropia de Lankford (R) (MARCONDES, 2019).

Na FIG. 2.7 apresenta-se, de forma esquemática, uma relação entre as referidas propriedades e a classificação de aços para estampagem segundo as normas ABNT.

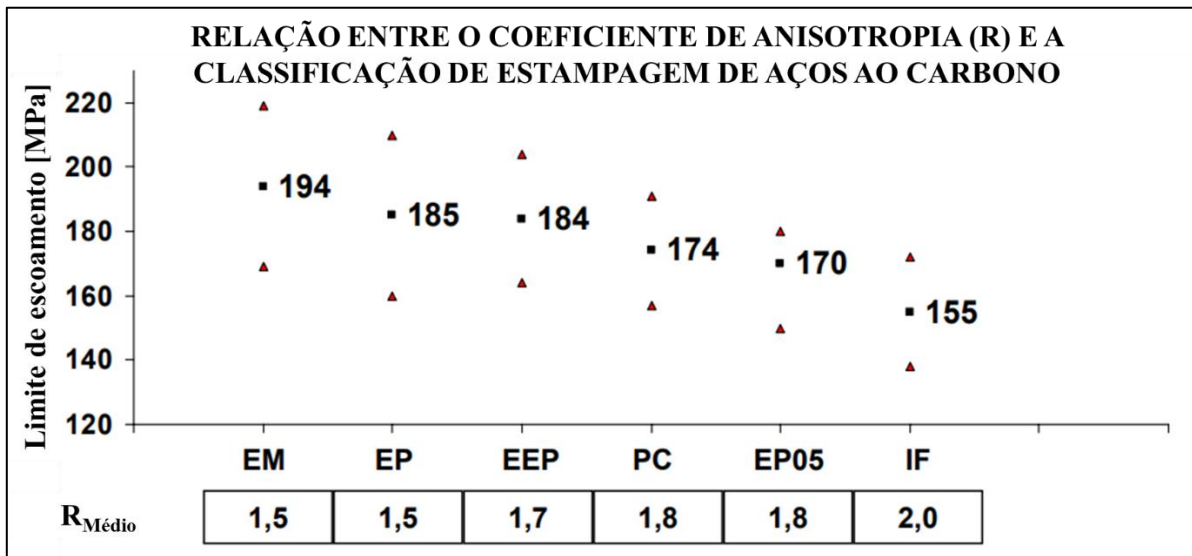


FIGURA 2.7 - Representação esquemática da relação entre o coeficiente de anisotropia (R) e a classificação de estampagem de aços ao carbono
 FONTE: MARCONDES, 2019

No gráfico presente na FIG. 2.7 tem-se no eixo vertical o limite de escoamento médio dos aços (assinalados com o “quadrado”) e as passíveis variações (assinaladas com “triângulos”). No eixo horizontal tem-se o coeficiente de anisotropia de Lankford (R) e as classificações adotadas pelas normas ABNT NBR 5906 (2008) e NBR 5915-1 (2013).

Basicamente as normas da ABNT utilizam os seguintes parâmetros de classificação:

- EM – Estampagem moderada
- EP - Estampagem profunda
- EEP – Estampagem extra profunda
- EEP-PC – Estampagem extra profunda em peças críticas
- EEP-IF - Estampagem extra profunda em aço IF (*Interstitial Free*)

Os aços para estampagem possuem, via de regra, microestrutura basicamente composta de ferrita e de perlita e, em alguns casos, carbonetos e precipitados (MARCONDES, 2019; CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Para melhoria de suas propriedades mecânicas podem ser utilizados mecanismos como endurecimento por solução sólida, encruamento (trabalho a frio e empilhamento de discordâncias), endurecimento por precipitação, refinamento de grão e transformação de fases induzida por deformação (CALLISTER; RETHWISCH, 2016; DIETER, 1988).

O principal fator que diferencia esses aços dos demais é, certamente, seu menor teor de carbono. Isso confere maior ductilidade e capacidade de se encruar, atrasando o início da instabilidade plástica. Destacam-se aqueles conhecidos como EDD (*Extra Deep Drawing* – Estampagem Extra Profunda) e IF (*Interstitial Free* – Livre de Intersticiais), em razão de sua boa soldabilidade e extrema conformabilidade (PANDA et al, 2007).

O uso desses aços deve-se principalmente à sua elevada capacidade de se deformar e por sua relativa resistência mecânica. Conseguem-se obter chapas de espessura consideravelmente reduzida e boa capacidade de absorção de energia, o que garante bom desempenho em caso de colisões.

Segundo Assunção; Quintino; Miranda (2009) na indústria automobilística são utilizados materiais de diferentes espessuras, em diversas combinações. Destacam-se os aços IF, como o FeP04 (amplamente utilizado em aplicações de estampagem profunda), utilizado em seu trabalho.

Conforme apresentado por Santos (2017), aços livres de intersticiais recebem esse nome em função da adição controlada de elementos intersticiais na matriz, resultando em um aço altamente dúctil.

As pesquisas sobre aços IF iniciaram-se na década de 70 (ELIAS; HOOK, 1970, apud MONTESANO, 2019) com o objetivo principal de fornecer a esses materiais características de maior conformabilidade para a aplicação em chapas. De acordo com Montesano (2019), o primeiro aço IF com características comerciais foi produzido por volta de 1970, com teor extra-baixo de carbono e estabilizado ao titânio. Sua matriz é ferrítica, com estrutura cúbica de corpo centrado (CALLISTER; RETHWISCH, 2016)

Santos (2017) afirma que o baixo teor de carbono e a estabilização da matriz (deixando-a livre de intersticiais) proporcionam elevada ductilidade, levando aos altos níveis de estampabilidade com baixo limite de escoamento e alto alongamento uniforme. No entanto, a ausência de elementos intersticiais pode levar ao comprometimento da resistência mecânica. A indústria faz esforços no sentido de aumentar a dureza e a resistência mecânica dos aços IF, especialmente por solução sólida e encruamento (FIETO, 2013).

Para que se alcance a composição química desejada, é necessário trabalhar com elementos de estabilização. Em alguns casos é preciso também fazer microligas. Os principais elementos utilizados são titânio e nióbio, que permitem a formação de precipitados, fazendo com que a matriz ferrítica do aço fique praticamente livre de carbono e nitrogênio (SANTOS, 2017).

Geralmente os aços IF são distinguidos pelo elemento que estabiliza os solutos intersticiais, sendo principalmente classificados em: estabilizados por titânio (IF-Ti), por nióbio (IF-Nb) e por titânio e nióbio (IF-TiNb).

Conforme mencionado, em função da estrutura ferrítica, pode-se perder em termos de resistência mecânica. A fim de contornar essa questão, podem ser utilizados elementos de liga

adicionais (como fósforo, silício e manganês, em solução sólida) ou serem feitos tratamentos térmicos que confirmam ao material maior dureza (COLPAERT, 2008; SANTOS, 2017; FIETO, 2013).

Diferenças na composição química e nos parâmetros utilizados no processamento, tais como temperatura, tempo e percentual de redução, causam efeitos nas propriedades finais de aços IF, sendo essenciais para determinar suas aplicações e conformabilidade (SANTOS, 2017).

Em função de sua versatilidade e de seus custos relativamente baixos, uma das recentes aplicações de aços IF é em tailor blanks. Na FIG. 2.8 apresenta-se a microscopia de um TWB de aço IF.

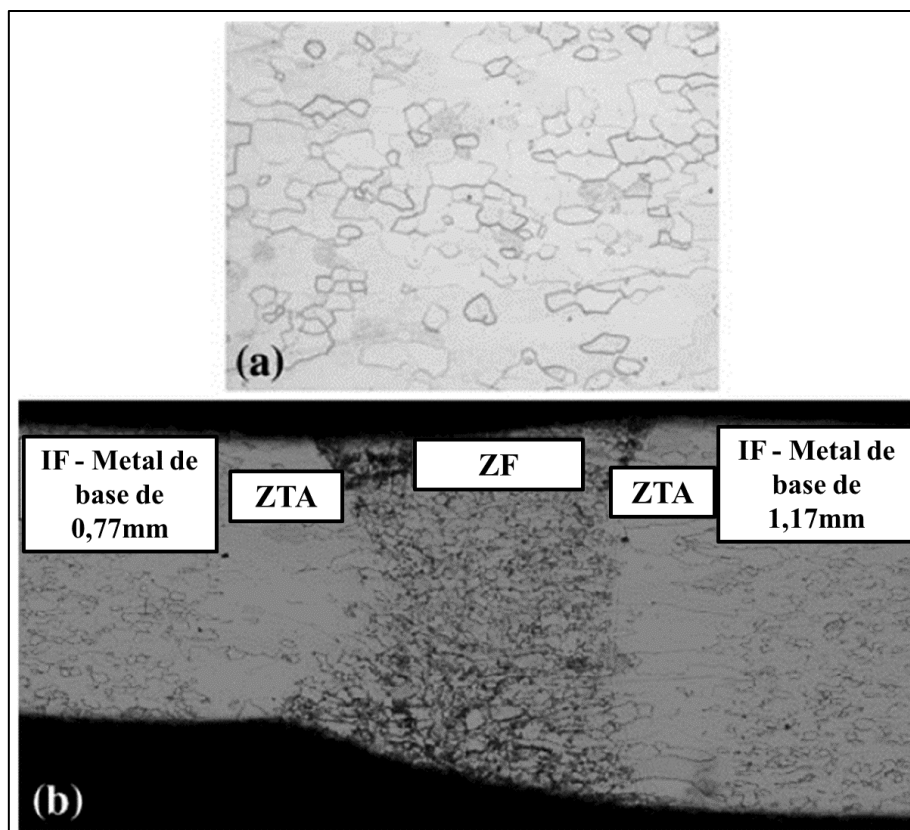


FIGURA 2.8 - Micrografias de (a) metal base, aço IF e (b) seção transversal de um TWB feito com o mesmo aço IF. Ambas possuem aumento de 200X e ataque feito com Nital.

FONTE: Adaptado de KOROUYEH; NAEINI; LIAGHAT, 2012

Por se tratar de um aço IF, grãos de ferrita são característicos. A microestrutura das três zonas da solda (MB, ZTA e ZF) são distintas, conforme esperado para soldagem a laser de aços IF, há significativo crescimento de grãos na ZTA. Na ZF, os grãos são irregulares quanto ao tamanho e ao formato e verifica-se ainda uma boa penetração da linha de solda.

Quanto à ZF, espera-se que haja aumento de dureza significativo, característico da formação de bainita e de outras formas de ferrita, além da presença de precipitados. O perfil de microdureza é apresentado na FIG. 2.9.

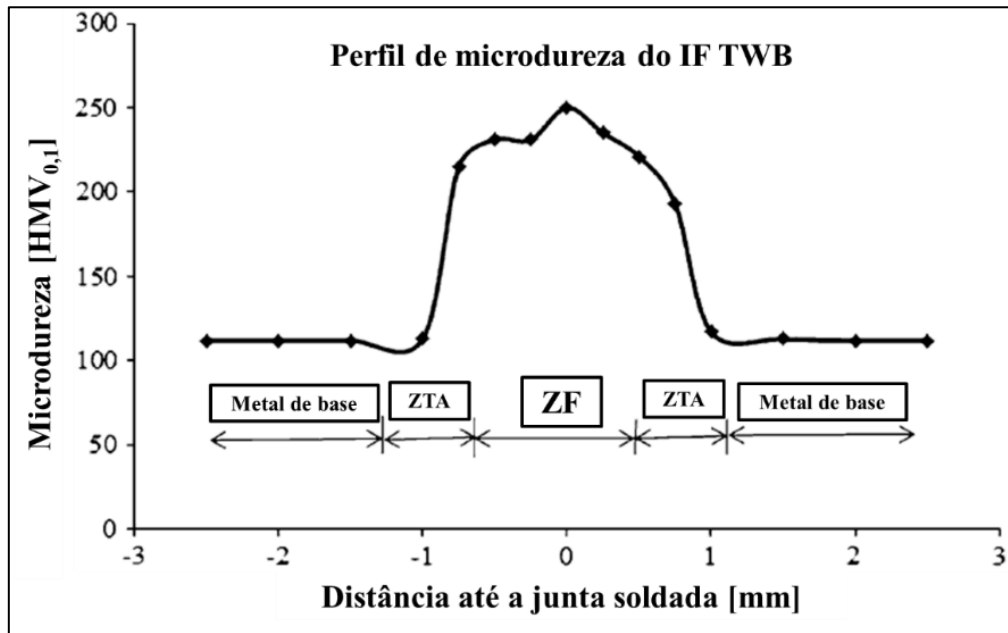


FIGURA 2.9 - Perfil de microdureza do TWB feito com aços IF
 FONTE: KOROUYEH; NAEIN; LIAGHAT, 2012

No estudo de Gautam; Raut; Kumar (2016) também foram utilizados aços IF, sendo a microestrutura típica apresentada na FIG. 2.10.

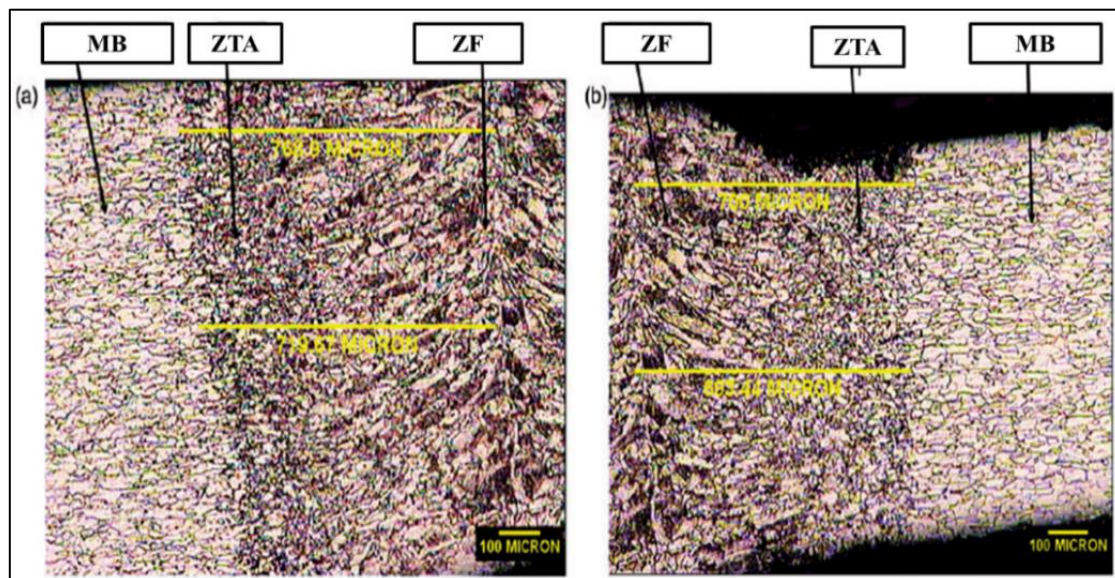


FIGURA 2.10 - Microestruturas típicas de aços IF soldados a laser
 FONTE: GAUTAM; RAUT; KUMAR, 2016

Espera-se, nesse que a microestrutura do blank exiba comportamento similar ao apresentado na FIG. 2.11.

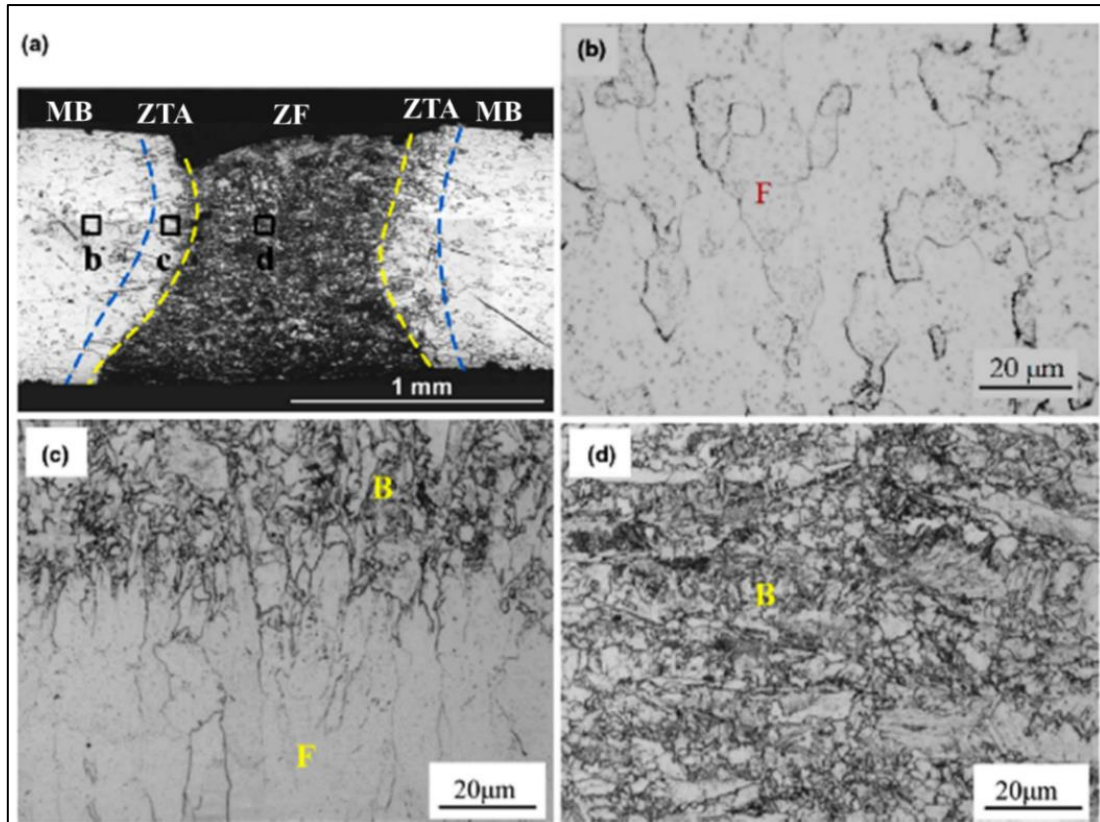


FIGURA 2.11 - Micrografias ópticas mostrando a mudança da microestrutura da junta soldada: (a) vista geral da seção transversal (b) MB (c) ZTA e (d) ZF (F: ferrita B: bainita)

FONTE: LI; LIN, 2015.

A ZTA apresenta um misto de ferrita e bainita, sendo esse constituinte presente numa fração aproximada de 25%. Na ZF tem-se praticamente apenas bainita. A diferença de propriedades mecânicas deve-se a esse fator, pois a bainita tem dureza muito superior à ferrita. (LI; LIN, 2015).

Pode-se dizer que o cordão de solda de um TWB composto por aços IF e soldado a laser apresenta, em geral, elevada tensão limite de escoamento e considerável dureza, porém baixo coeficiente de encruamento, quando comparado ao metal de base propriamente dito. Consequentemente, a deformação plástica é concentrada na zona do MB do TWB (LI; LIN, 2015).

Ainda que se possa trabalhar com inúmeros materiais nos tailor blanks e na indústria automobilística, um dos principais materiais adotados na conformação, por sua versatilidade e excelente conformabilidade, é o aço IF, em suas diferentes especificações (CALLISTER; RETHWISCH, 2016; DUAN et al, 2016; KOROUYEH; NAEINI; LIAGHAT, 2012).

2.3. Tailor Blanks (TBs)

Os principais processos de fabricação por Tailor Blanks encontram-se apresentados na FIG. 2.12.

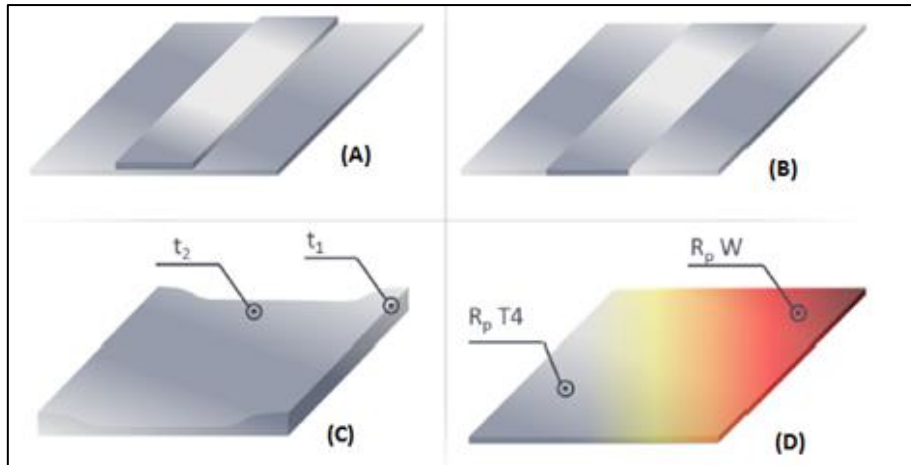


FIGURA 2.12 - Diferentes processos de fabricação de Tailor Blanks. (A) Patchwork Blanks; (B) Tailor Welded Blanks; (C) Tailor Rolled Blank e (D) Tailor Heat Treated Blanks.

FONTE: Adaptado de Marklein et al, 2014.

São basicamente quatro processos principais de fabricação (MERKLEIN et al, 2013):

- **Patchwork Blanks:** Duas chapas distintas, soldadas de maneira sobreposta uma à outra. A ideia chave de se trabalhar com patchworks blanks é reforçar apenas parcialmente uma chapa principal por meio de um ou mais blanks (patches), conforme apresentado na FIG. 2.13.

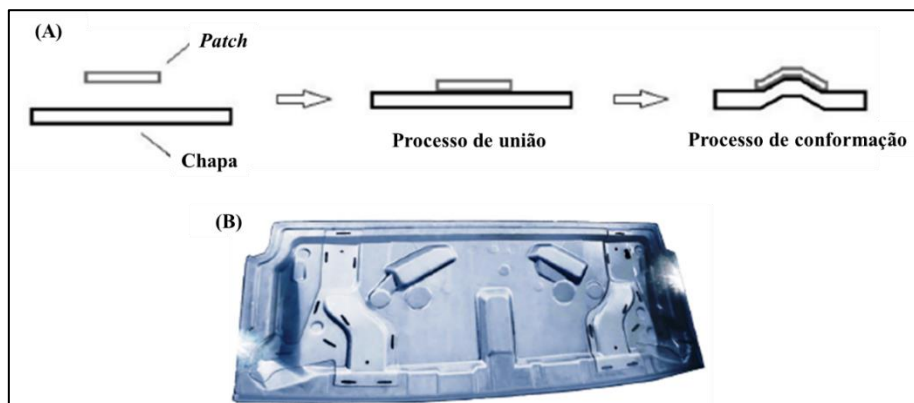


FIGURA 2.13 - Patchwork Blanks (A) etapas de conformação e (B) exemplo de componentes obtidos por meio dessa técnica.

FONTE: MERKLEIN et al, 2013.

- **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. Tem-se uma transição contínua entre as regiões de maior e de menor espessura. Consegue-se boa conformabilidade relativa e melhor acabamento superficial. As diferenças de propriedades mecânicas são obtidas com base no princípio de encruamento: a região de menor espessura foi mais encruada, tendendo a apresentar maior limite de resistência à tração. A

maior desvantagem desse fenômeno é o retorno elástico diferenciado no caso da conformação. A produção de um TRB encontra-se esquematizada na FIG. 2.14.

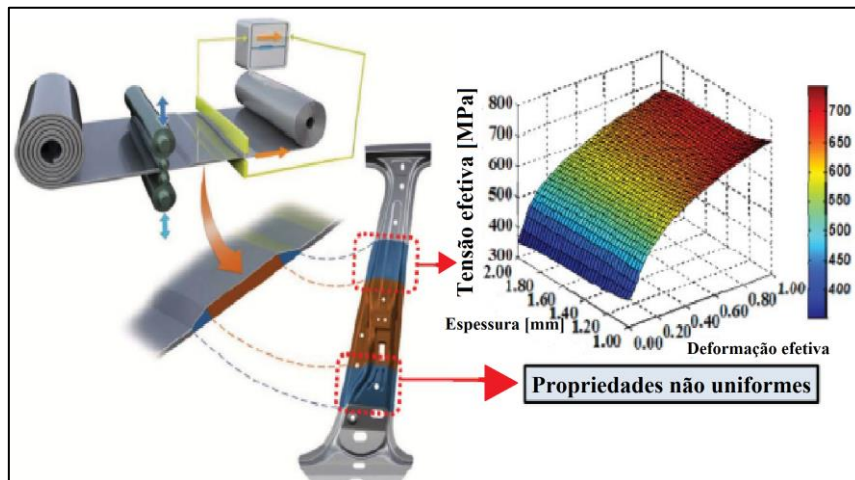


FIGURA 2.14 - Representação esquemática do processo de TRB
 FONTE: DUAN et al, 2016.

- **Tailor Heat Treated Blanks:** Consiste em tratar termicamente os blanks obtidos com intuito de melhorar sua conformabilidade, otimizando a obtenção do produto final. O THTB encontra-se esquematizado na FIG. 2.15.

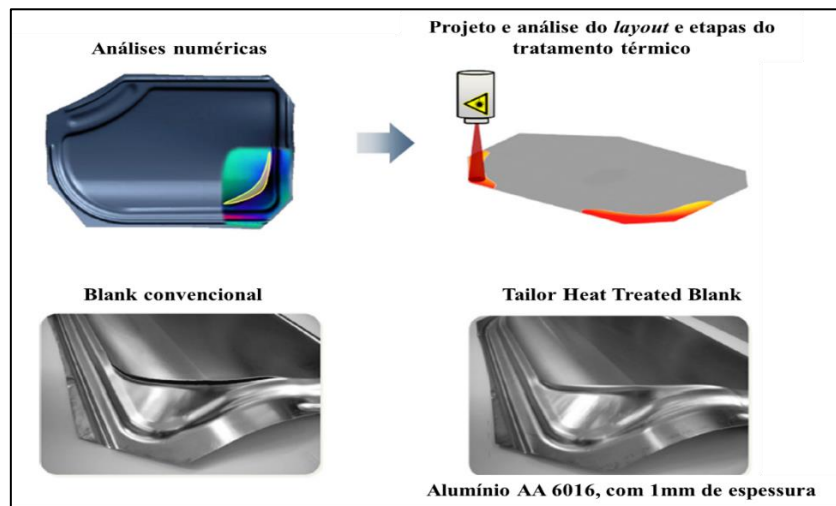


FIGURA 2.15 - Representação esquemática do processo de THTBs
 FONTE: Adaptado de MERKLEIN et al, 2013.

Trata-se de um processo de relevância e importância principalmente para produção de veículos mais leves, sendo aplicado em aços AHSS e ligas de alumínio. Por meio da realização dos tratamentos térmicos, os blanks possuem diferentes distribuições de propriedades mecânicas.

- **Tailor Welded Blanks:** duas ou mais chapas (blanks semiacabados), de materiais similares ou completamente diferentes (em termos de espessura ou propriedades físicas e químicas) são soldadas, no mesmo plano, formando um blank único, antes da etapa de conformação final, conforme esquematizado na FIG. 2.16.

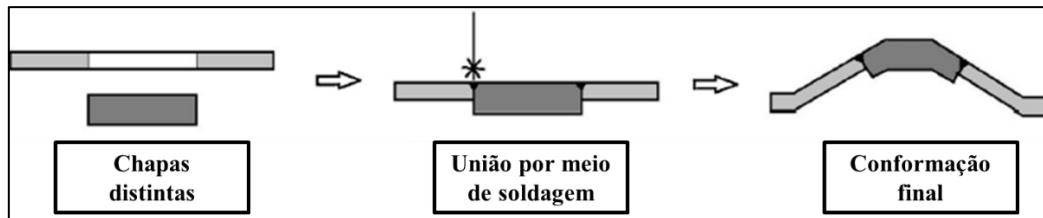


FIGURA 2.16 - Representação esquemática de um processo de fabricação de TWBs
 FONTE: Adaptado de ZHANG et al, 2016.

Há ainda um quinto processo, mais recente, denominado de Tailor Machined Blank (TMB). Parte-se de uma chapa inicial (blank), com espessura pré-determinada (e_2). Seleciona-se uma determinada região do blank para usinagem (por meio de fresamento, retífica ou processos similares), até se atingir uma espessura (e_1), menor que e_2 .

Pode-se ainda, conforme necessário, realizar algum tipo de preparo posterior da superfície (SAFARI; MOSTAAN; FARZIN, 2016). No TMB apresentado, optou-se por irradiar laser sobre a chapa de menor espessura, gerando sua deflexão (por dobramento). Um exemplo desse processo é apresentado na FIG. 2.17.

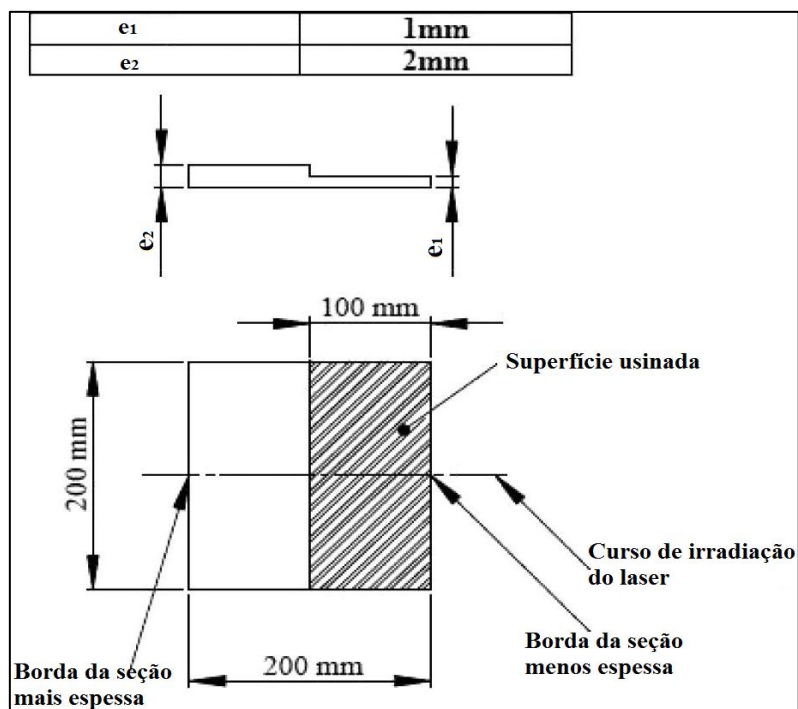


FIGURA 2.17 - Exemplo de Tailor Machined Blank
 FONTE: Adaptado de SAFARI; MOSTAAN; FARZIN, 2016.

O presente estudo é focado em TWBs, os quais serão abordados mais profundamente na próxima seção.

2.4. Tailor Welded Blanks (TWBs)

Ao se trabalhar com Tailor Welded Blanks, Gaied et al (2009) definem que há três principais possibilidades:

- Chapas de mesma espessura, porém de materiais distintos
- Chapas de mesmo material, porém espessuras diferentes
- Chapas de diferentes materiais e espessuras

Montadoras estão constantemente pesquisando meios inovadores e tecnológicos para reduzir o peso e os custos de seus automóveis. Busca-se atender a requisitos de emissões de combustíveis cada vez mais restritos e a um mercado mais competitivo. O TWB surge como uma alternativa, pois se tende a otimizar a massa dos veículos, conciliando essa redução à diminuição de custos, sem perda de desempenho estrutural (KHAN; SURESH; REGALLA, 2014; LI; LIN, 2015).

Como referência às possíveis economias de custos de fabricação disponíveis, a GM obteve uma redução de US\$ 4,9 milhões e eliminou catorze moldes ao adotar o TWB em painéis internos de portas (KINSEY; LIU; CAO, 2000).

Apesar dos avanços na indústria automobilística, pode-se considerar a aplicação de TWBs relativamente recente. A primeira aplicação de TWBs, ainda em escala de testes, se deu na produção dos painéis internos de porta dos automóveis Honda® nos anos 60, visando principalmente redução de custos (GONG et al, 2016; PALLET; LARK, 2001).

A primeira patente referente ao processo foi depositada em 1964 (MOHRBACHER, 2001, apud MERKLEIN et al, 2014), mas apenas quatro anos depois foram produzidas longarinas de caminhões nos EUA. Esses componentes foram fabricados por meio de soldagem com feixe de elétrons.

Na Europa, a Volvo introduziu o uso de TWBs em 1979. Mas, apenas nos anos 80 passou-se a utilizar a tecnologia de soldagem a laser para obtenção de TWBs. Em 1983, a Audi, em parceria com a Thyssen Krup, fabricou os primeiros painéis de pavimento com TWB, para o Audi 100. Apesar do sucesso nas aplicações iniciais, o uso de TWBs não foi muito aceito pelas montadoras, passando a ser utilizado em larga escala apenas nos anos 90 (PALLET; LARK, 2001).

O blank pode ser desenvolvido de forma que determinadas regiões possam ter materiais mais nobres e resistentes mecanicamente (para aumento local da rigidez) ou com revestimentos

diferenciados (para aumento da resistência à corrosão), ou ainda, com espessura maior ou menor (para propagação direcionada da energia absorvida durante uma colisão) (AHMETOGLU et al, 1995).

Na FIG. 2.18 tem-se alguns exemplos de aplicação dessa tecnologia em componentes veiculares.

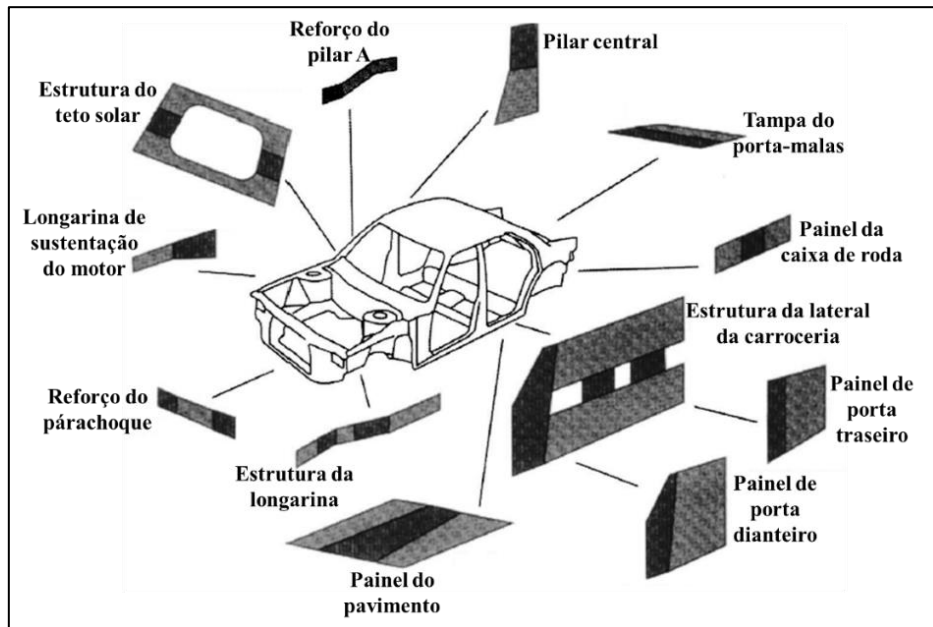


FIGURA 2.18 - Vista explodida de aplicações correntes ou potenciais do TWB em automóveis

FONTE: Adaptado de KINSEY; WU, 2011

Tratam-se de estruturas complexas, as quais seriam fabricadas em mais de uma operação de conformação e soldagem. Na FIG. 2.19 exemplificam-se as principais estruturas de reforço presentes num automóvel e seus pilares ou colunas.

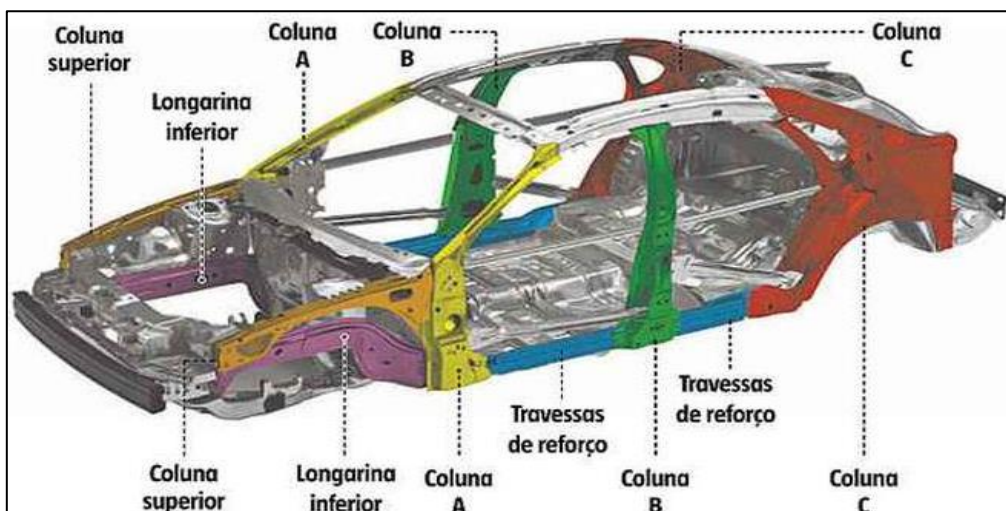


FIGURA 2.19 - Representação esquemática da carroceria de um automóvel, evidenciando suas principais estruturas de reforço e colunas ou pilares

FONTE: CONFIAR - CONSULTORIA TÉCNICA AUTOMOTIVA, 2014

É justamente nas peças supracitadas que as chapas obtidas por meio de TWBs encontram maior potencial de aplicação. Na FIG. 2.20 tem-se um exemplo da chapa plana de TWB e do produto estampado (neste caso, pilar “B”).

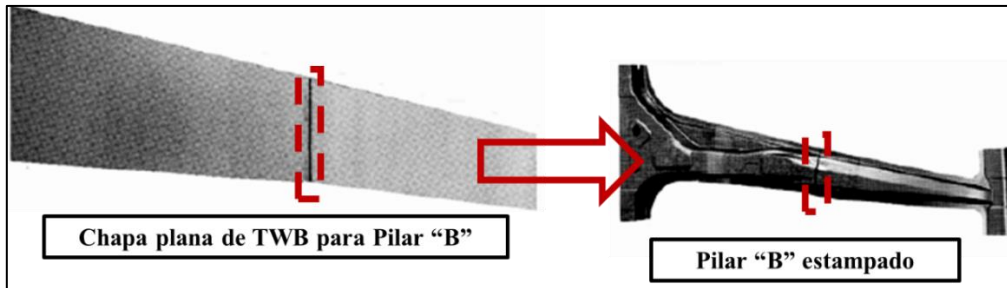


FIGURA 2.20 - Chapa plana e produto estampado, oriundo de TWB, com destaque para região da solda

FONTE: Adaptado de MEINDERS; HUETINK; BERG, 1998.

Quanto ao desempenho estrutural, um fabricante de automóveis relatou uma melhoria de 9% na flexão elástica e 30% de melhoria no regime plástico quando uma carga de 90kg foi aplicada ao trinco de uma porta montada com TWB (KINSEY; LIU; CAO, 2000).

Um exemplo do potencial de redução de massa mediante aplicação de TWBs é apresentado na FIG. 2.21.


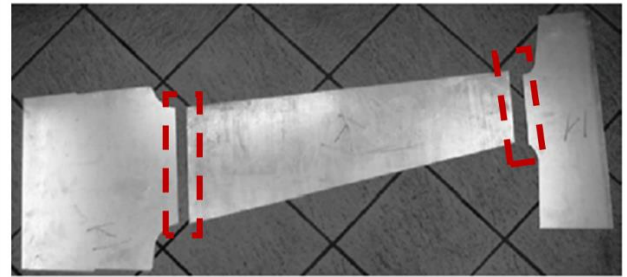
Tipo de blank selecionado para o pilar “B”	Massa
Blank típico – 2mm de espessura 	11,50kg
TWB (2,0mm – 1,2mm – 2,0mm de espessura) 	9,61kg
Resultado de redução de massa total – 16%	

FIGURA 2.21 - Resultado comparativo de massa entre um blank convencional e um TWB para o pilar “B” de um automóvel, evidenciando regiões de solda

FONTE: HYRCZA-MICHALSKA; ROJEK; FRUITOS, 2010.

Na FIG. 2.22 tem-se uma representação esquemática de um painel interno de porta, com destaque para região das linhas de solda do TWB.

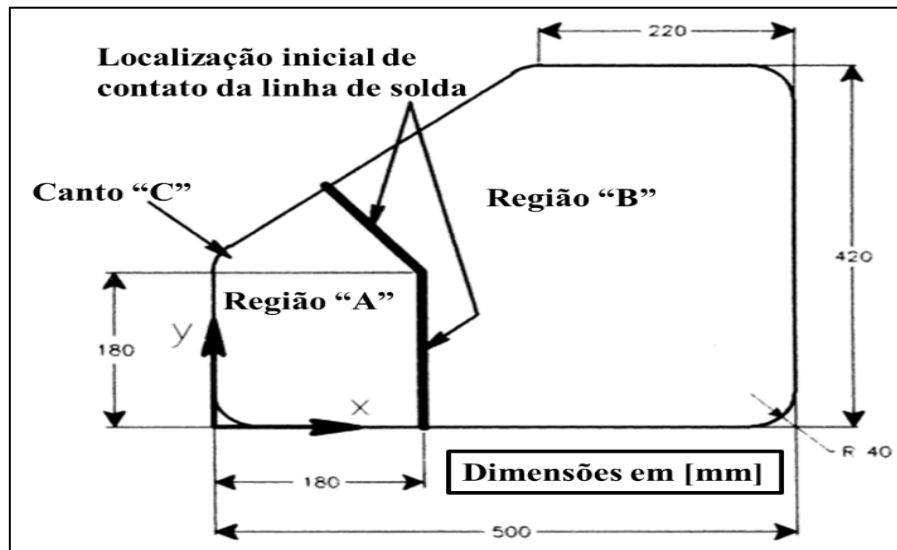


FIGURA 2.22 - Representação esquemática de um painel interno de porta em TWB
 FONTE: Adaptado de KINSEY; LIU; CAO, 2000.

Segundo Korouyeh; Naeini; Liaghat (2012), Kumar; Reddy (2015) e Meinders; Huetink; Berg (1998) as principais vantagens de se trabalhar com TWB são:

- Redução de custos, por se reduzir a complexidade e o número de moldes necessários e de operações de conformação e de montagem (dispensa-se os reforços e batentes, os quais demandam ferramentais específicos e operações adicionais de fabricação e montagem);
- Redução global de massa de veículos;
- Melhoria de tolerâncias dimensionais, por se trabalhar com um processo único e contínuo de soldagem;
- Melhoria de resistência à corrosão;
- Melhoria global de resistência mecânica;
- Melhoria de desempenho em colisões, em virtude da melhor utilização de materiais e suas propriedades, o que permite maior absorção de energia pela estrutura do veículo;
- Redução da quantidade de refugos e sucatas, por meio da otimização do uso de materiais;
- Redução do número de partes a serem montadas;
- Redução dos custos de mão de obra e de produção;

A soldagem é um fator crucial para determinação das propriedades mecânicas e da aplicabilidade de TWB. Para avaliação da qualidade da linha de solda e do material de base são feitas também análises metalográficas.

Quando aplicado a TWBs, o que se nota é que os grãos na ZTA são bastante irregulares e que há formação de bainita na ZF, o que explica a elevação de dureza nessa região. Caso a soldagem seja bem executada e qualificada, o que se percebe é que o teste de embutimento Erichsen exhibe pouca diferença entre o TWB e os metais de base (SURESH et al, 2015)

Além da orientação da linha de solda, há ainda efeitos relativos ao tamanho de grão na ZF. Devido à refusão local na solda, o tamanho dos grãos pode ser diferente do tamanho do metal de base. Essa disparidade pode resultar em diferentes tensões de escoamento e, portanto, redução da resistência mecânica, conforme previsto na relação de Hall-Petch (o limite de resistência à tração de um material é inversamente proporcional ao seu tamanho de grão) (CALLISTER; RETHWISCH, 2016; DIETER, 1988).

Pode-se dizer então que a soldagem é um dos principais fatores que determinará o sucesso da conformação e posterior aplicação em componentes automotivos de chapas obtidas a partir da técnica de *Tailor Welded Blanks*. Por esse motivo estudos focados na influência do processo de soldagem e na orientação e posição relativa da linha de solda são tão importantes.

2.4.1. Soldagem de Tailor Welded Blanks

Um dos principais fatores que determinará o comportamento mecânico e a conformabilidade de um tailor blank é sua soldagem. Além do processo a laser aplica-se também soldagem por fricção (FSW – *Friction Stir Welding*) e, eventualmente (em escala laboratorial), soldagem de costuras por resistência (*Resistance Seam Welding*– RSEW) e GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding* – Soldagem a arco com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio) (SURESH et al, 2015).

Os processos de soldagem por feixe de elétrons e a plasma, embora apresentem boa eficiência, não costumam ser utilizados para este fim. O feixe de elétrons, por ainda não possuir aplicações em larga escala (devido à necessidade do uso de um canhão de vácuo e de aparatos mais específicos e restritos); o plasma, por seu elevado aporte térmico e elevada extensão relativa da ZTA e da ZF.

Assim, embora seja possível aplicar diferentes processos de união, desde os anos 90 a tecnologia de soldagem a laser tem sido usada majoritariamente pelas indústrias automobilísticas, para manufaturar TWBs (PALLETT; LARK, 2001).

Os equipamentos utilizados podem ser diversos e se diferenciam basicamente quanto à fonte de emissão do feixe de laser. Trabalha-se, além dessa fonte, com uma unidade de energia e

controles, para acompanhamento do processo, uma peça de trabalho, espelhos para focalização do feixe (KURYNTSEV; GILMUTDINOV, 2015).

Na FIG. 2.23 apresenta-se de forma esquemática um processo de soldagem a laser.

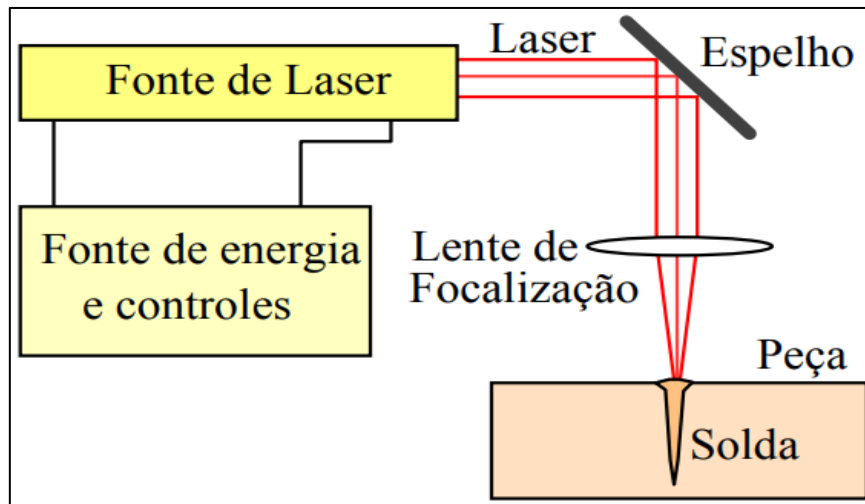


FIGURA 2.23 - Elementos de um sistema típico para soldagem a laser
 FONTE: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2016.

Duas das principais razões de aplicar esse processo são a ZTA relativamente estreita e a elevada produtividade. Soma-se a isso o fato de que o laser pode ser ajustado e se conseguir superar as dificuldades de técnicas convencionais de soldagem para chapas galvanizadas (SCHREK; ŠVEC; BRUSILOVÁ, 2017).

Para a soldagem a laser de uma chapa empregada em automóveis ser considerada de qualidade deve-se basicamente atender a apenas dois requisitos fundamentais: penetração completa e ausência de porosidades (ZHOU; TSAI, 2007).

Os estudos desenvolvidos mostraram que os principais fatores nos quais se deve trabalhar para se obter uma soldagem de qualidade, com penetração total e minimização do amaciamento na ZTA são potência do feixe e velocidade de soldagem (SHI et al, 2017; KIM; KI, 2014; LU et al, 2015).

Segundo Chen et al (2013) e Walsh (2002), dentre os principais parâmetros a serem levados em consideração no processo LBW pode-se citar:

- Ângulo de incidência do feixe de laser
- Velocidade de soldagem
- Espessura das chapas
- Largura do feixe de laser
- Espaçamento (“gap”) entre as chapas/peças de trabalho
- Tipo, potência e tamanho (diâmetro) do feixe de laser

- Formato da peça de trabalho
- Posição focal do feixe
- Densidade de potência
- Gás de proteção: composição e vazão

Quanto às imperfeições típicas da soldagem a laser, caso não se trabalhe de forma adequada com os parâmetros, que devem ser evitadas, tem-se: (a) falta de fusão, (b) porosidades, (c) penetração incompleta, (d) mordedura (e) inclusões (MIYAZAK; SAKIYAMA; KODAMA, 2007).

Esse processo se torna atrativo em virtude dos muitos problemas, como deformação e tensões residuais que surgem nos processos convencionais de soldagem, decorrentes da larga ZTA e da ZF (ZHANG et al, 2017). Dentre as principais vantagens de se trabalhar com a soldagem a laser pode-se destacar: mínimas distorções oriundas da soldagem, relativa facilidade de instalação do equipamento, feixe estreito e focado e *setup* mais robusto (o que garante maior controle do processo e capacidade de robotização).

Obtém-se elevada razão penetração/largura, ainda se mantendo ZTA estreita. Na FIG. 2.24 apresenta-se, de forma esquemática, a relação entre a densidade de potência e a penetração para diferentes processos de soldagem, evidenciando as vantagens de se trabalhar com feixes de laser.

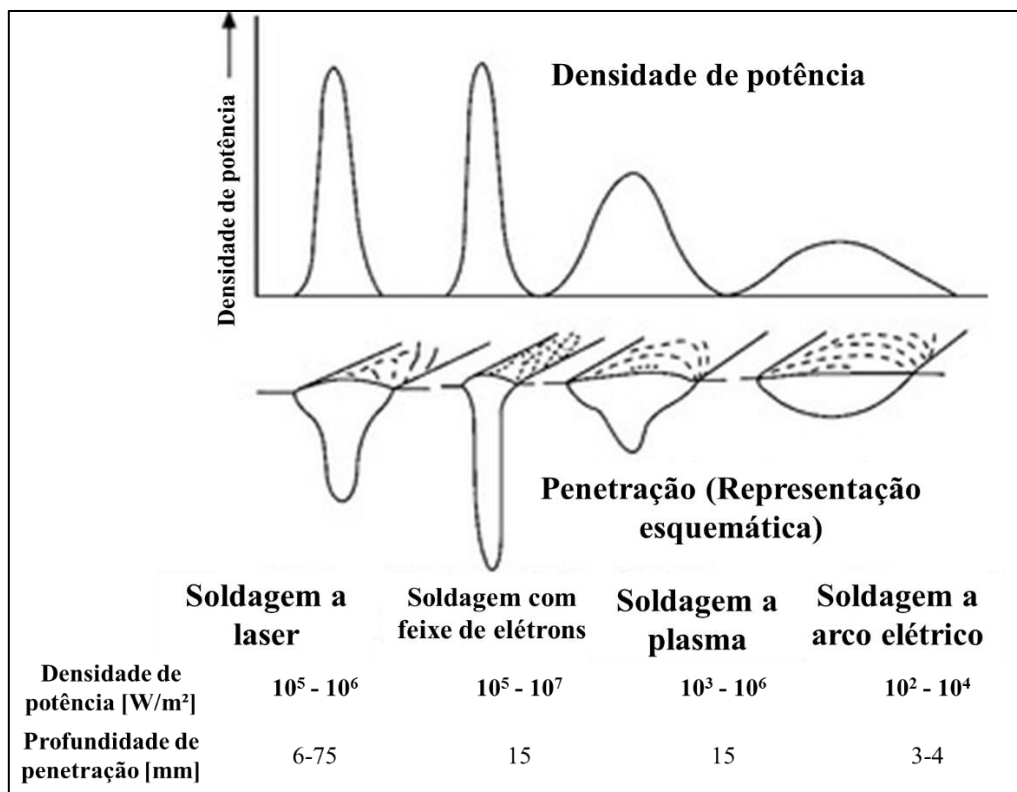


FIGURA 2.24 - Representação esquemática da relação entre a densidade de potência e a penetração para diferentes processos de soldagem

FONTE: Adaptado de KATAYAMA, 2013

Evita-se, ao utilizar a soldagem a laser, perda acentuada de propriedades mecânicas das juntas soldadas (WANG et al, 2016; ZHANG et al, 2017). Para fabricação de TWBs trabalha-se com o modo de soldagem a laser por *keyhole*. O principal fator que difere as condições de trabalho com os feixes de laser é a densidade de potência, conforme apresentado na FIG. 2.25.

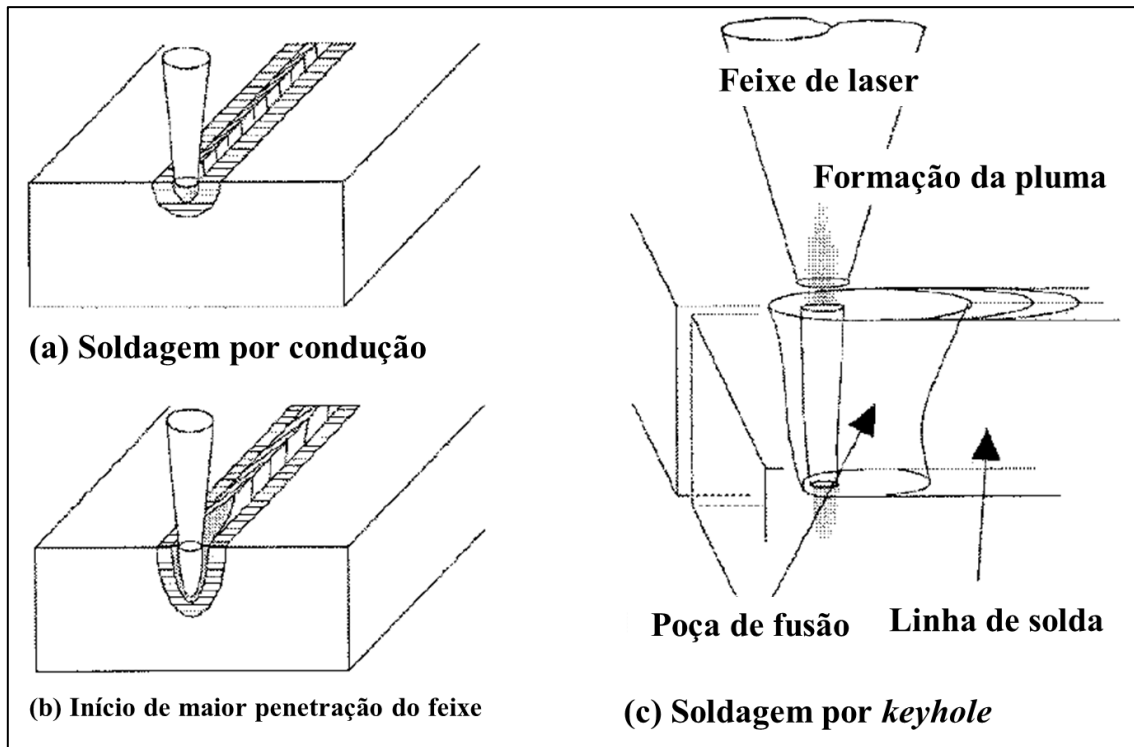


FIGURA 2.25 - Representação esquemática da relação entre a densidade de potência do feixe de laser e o modo de soldagem aplicado

FONTE: Adaptado de MIYAZAK; SAKIYAMA; KODAMA, 2007.

Segundo Miyazak; Sakiyama; Kodama (2007), tem-se:

- Quando se trabalha com menores densidades de potência, numa região limiar entre a temperatura e o aporte necessários apenas para aquecimento da chapa, tem-se soldagem por condução.
- Quando a densidade de potência do laser começa a aumentar ainda mais, a temperatura da superfície da poça de fusão pode exceder os 3.000 K, temperatura de ebulição do ferro. À medida que o ferro vaporiza, uma pressão de recuo atua sobre a superfície da poça de fusão, fazendo com que a superfície do aço fundido se curve de tal forma que a pressão se equilibre com a tensão superficial. Como resultado, aumenta-se a penetração do feixe, formando um orifício na peça. Isso ocorre desde que viscosidade do aço fundido seja baixa o suficiente a ponto da pressão de recuo gerada pelo vapor metálico ser capaz de criar o orifício (*beam hole welding*).

- Caso a densidade de potência continue aumentando, haverá um momento no qual o feixe será suficientemente potente para penetrar toda a extensão da chapa. Tem-se então a soldagem por *keyhole*. O feixe de laser é absorvido principalmente pela parede interna do *keyhole*, transferindo calor para dentro da chapa de aço.

Podem ser utilizados diferentes tipos de laser, sendo o comparativo entre os principais tipos de feixe de laser adotados na indústria automobilística apresentado na FIG. 2.26.

	Potência	Qualidade do feixe	Comprimento de onda	Manutenção	Diâmetro	Custos
Laser de fibra	●	●	●	●	●	●
CO ₂ (gás)	◐	◑	◐	◑	○	◑
Lâmpadas pulsadas Nd:YAG	◐	◐	◐	◐	◐	◐
Diodos pulsados Nd:YAG	◐	◐	◐	◐	◐	◐
Discos de laser Yb:YAG	◐	◑	◐	◐	◑	◐

FIGURA 2.26 - Comparativo entre os principais tipos de feixe de laser adotados na indústria automobilística

FONTE: Adaptado de ASSUNÇÃO; QUINTINO; MIRANDA, 2009

Ainda que se garanta uma boa soldagem, lida-se também com aspectos relacionadas à conformação.

2.4.2. Conformação de TWBs

Apesar da praticidade, Safdarian (2016) ressalta que o maior desafio dos TWBs se trata da conformação. Isso porque pode haver um fenômeno conhecido como “movimentação da linha de solda”, levando a deformidades no produto conformado ou mesmo à sua ruptura. Esse fenômeno, apresentado na FIG.2.27, é mais pronunciado quanto maior for a razão de espessuras entre as chapas envolvidas no TWB, conforme se apresenta na FIG. 2.28.

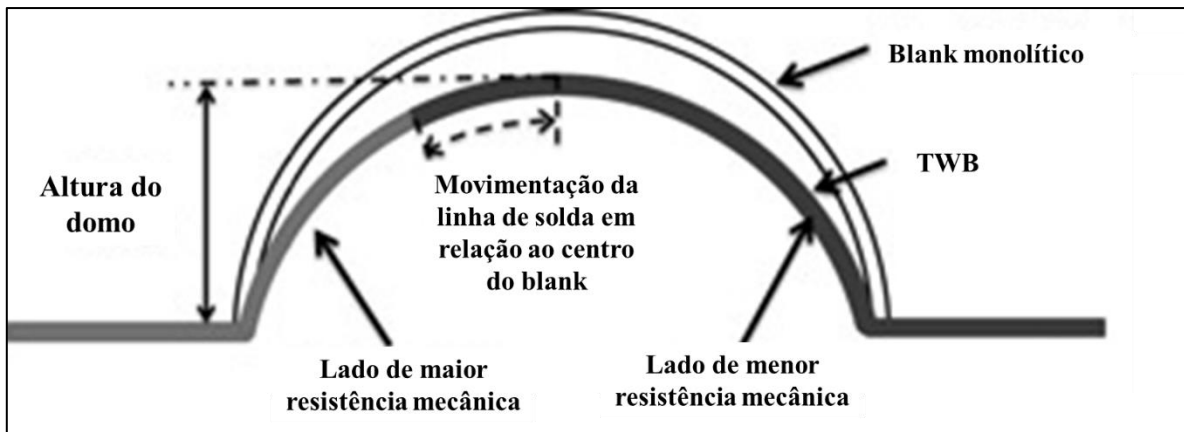


FIGURA 2.27 - Representação esquemática do fenômeno de movimentação da linha de solda após conformação, evidenciando também um domo de embutimento e sua altura
 FONTE: Adaptado de HARIHARAN et al, 2014

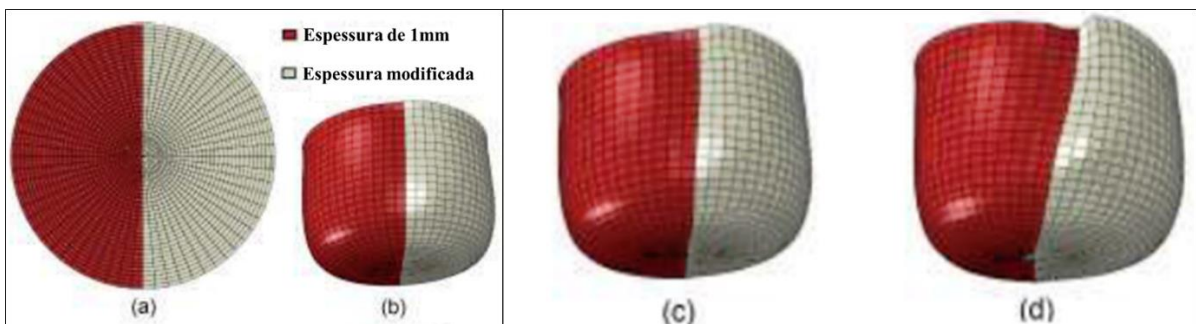


FIGURA 2.28 - Blank inicial e três copos estampados com diferentes combinações de espessuras. a) blank inicial b) espessuras de 0,85mm e 1mm c) espessuras de 0,75mm e 1mm d) espessuras de 0,5mm e 1mm.
 FONTE: FAZLI, 2016.

Há, portanto, muitos desafios envolvendo o processo de fabricação e aplicação de TBs, sendo o principal deles relativo à conformabilidade. O deslocamento da linha de solda durante a operação de conformação e a formação de estruturas complexas na região da ZTA e ZF são os fenômenos responsáveis por essa redução de conformabilidade dos TWBs (LEE; FELTHAM; VAN DEVENTER, 1996).

A conformabilidade do blank diminui à medida que a localização da linha de solda se move em direção a áreas de estampagem profundas críticas, por exemplo, cantos do produto. Este fenômeno é mais pronunciado à medida que a razão de limites de resistência à tração e de escoamento entre os materiais de base aumenta (MEINDERS; HUETINK; BERG, 1998).

Estudos são desenvolvidos para contornar essa situação, sendo uma alternativa o desenvolvimento de ferramentais que possibilitem o controle diferenciado da pressão aplicada ao longo do blank, de forma a compensar as diferenças de espessura, por exemplo. Para isso, a pressão requerida não se mantém a mesma em diferentes pontos do blank/ferramenta (AHMETOGLU et al, 1995).

Sabe-se ainda que a tendência é de que a maior deformação/fluxo se concentre na chapa menos espessa e/ou menos resistente mecanicamente (SURESH; REGALLA; GUPTA, 2016). Meinders et al (2000) chegaram à conclusão de que o deslocamento da linha de solda pode ser minimizado por sua alocação em regiões nas quais as menores deformações concentram-se perpendicularmente à linha de solda.

Sujeita-se os materiais, nas regiões da linha de solda, a um estado plano de tensões e sabe-se que a resistência mecânica e, sobretudo, a conformabilidade, estão diretamente associadas ao material de menor espessura (CHAN et al, 2005). O deslocamento da linha de solda tende a gerar erosão localizada do molde, desgaste acentuado do ferramental e não conformidades no produto final, podendo gerar refugos.

Além dos referidos efeitos mecânicos, lida-se ainda com questões microestruturais relativas à solda ZF. As alterações, a depender dos materiais utilizados, podem ser consideráveis. Gera-se desde um amaciamento localizado da martensita a complexas transformações de fases em condições fora do equilíbrio (CALLISTER; RETHWISCH, 2016; KRAUSS, 1990).

Num estudo desenvolvido por Nalli et al (2017) foram utilizados aços TRIP (*Transformation Induced Plasticity* – Transformação de fases induzida por deformação) e DP (*Dual Phase* – Duplas fases). A microestrutura dos dois aços é completamente modificada após o processo de soldagem. A ZF consiste em uma microestrutura martensítica, com largura máxima de cerca de 2mm. As transformações de fase que ocorrem nas ZTAs são bastante semelhantes em ambos os aços, pois ambos são aços carbono de baixa liga.

Quando se trabalha com TWBs, pode-se ter mais de uma espessura no mesmo blank, conforme se apresenta na FIG. 2.29, o que faz com que se tenha diferentes soldas (representadas, na FIG. 2.29 pelas linhas amarelas), cada qual com suas alterações microestruturais e propriedades mecânicas.

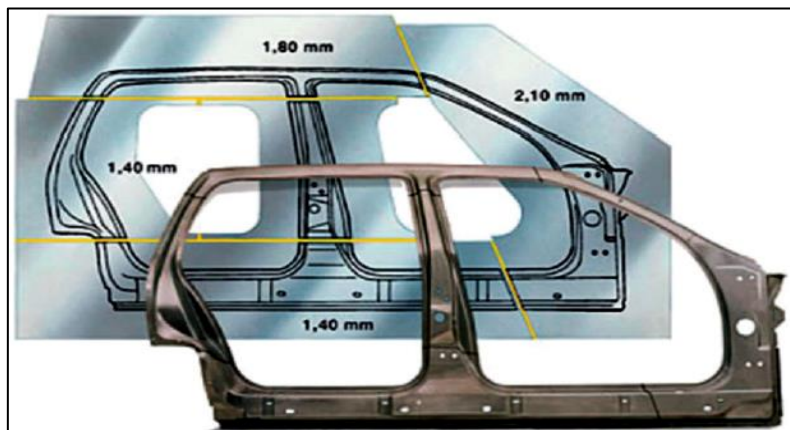


FIGURA 2.29 - Exemplo de painel lateral soldado a laser e estampado, com diferentes dimensões num mesmo blank
 FONTE: GAUTAM; RAUT; KUMAR, 2016

A tecnologia empregada para conformação de TWBs é muito diferente daquela utilizada na conformação de chapas únicas (MA; GUAN; YANG, 2015; KOROUYEH; NAEINI; LIAGHAT, 2012). Um método que pode ser utilizado para prever a conformabilidade de um TWB trata-se da avaliação da razão entre o LRT das chapas que compõem o blank. Há, segundo Safdarian (2016), um limiar que essa razão pode assumir, a fim de que o material de menor resistência não se deforme quase que de forma única, o que não justificaria a utilização do TWB. Esse limiar não é padronizado e varia de acordo com os materiais que serão empregados no blank.

Para o cálculo do referido limiar, dado pelo momento no qual um material inicia a deformação plástica (tensão atuante superior ao limite de escoamento), enquanto o outro material atinge seu limite de conformabilidade, utiliza-se o balanço de forças atuantes no blank, conforme esquematizado na FIG. 2.30.

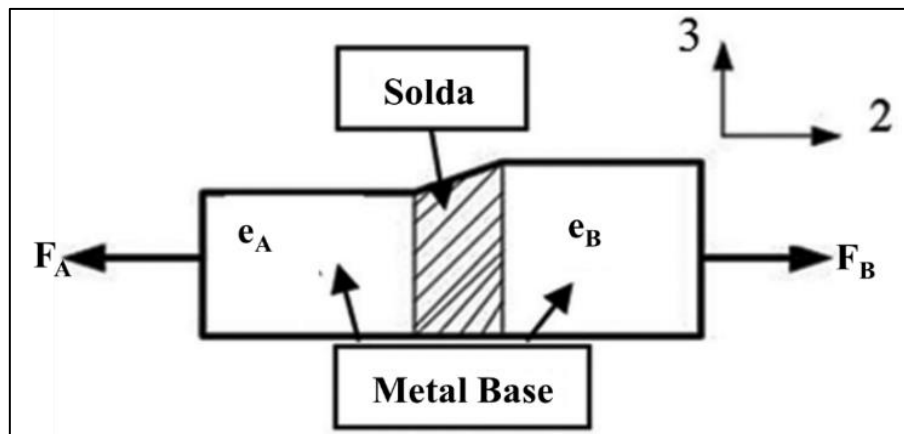


FIGURA 2.30 - Representação esquemática de elemento de balanço de forças na transversal, próximo à região soldada do blank, com espessuras distintas “ e_A ” e “ e_B ”
 FONTE: Adaptado de SAFDARIAN (2016)

De acordo com Nalli et al (2017), Safdarian (2016) e Ahmetoglu et al (1995), considerando que F_A e F_B tem de ser balanceadas, chega-se à conclusão de que, desconsiderados efeitos metalúrgicos (como descontinuidades e anisotropia), o limiar pode ser obtido a partir da EQ. (2.3):

$$LSR = \left(\frac{\sigma_{YB}}{\sigma_{TA}} \right) = \left(\frac{t_{0A}}{t_{0B}} \right) \quad (2.3)$$

Na qual:

- $LSR = \text{Limit Strength Ratio} = \text{Razão limite de resistência mecânica}$

- σ_{YB} = *Yield Strength for material B* = Tensão limite de escoamento do material B
- σ_{TA} = *Tensile Strength for material A* = Tensão limite de resistência à tração do material A
- t_{0A} = *Initial thickness of material A* = Espessura inicial do material A
- t_{0B} = *Initial thickness of material B* = Espessura inicial do material B

Caso não se respeite o limiar de espessuras dos materiais que compõem o blank ou, ainda, se trabalhe com materiais com propriedades mecânicas muito distintas, pode-se promover ruptura das chapas durante a conformação, deslocamento acentuado da linha de solda ou, em casos mais graves, falhas do produto final estampado, em serviço.

Há dois modos principais de falha possíveis, os quais diretamente relacionados à orientação da linha de solda em relação à direção de aplicação do esforço principal e à qualidade do blank como um todo (ABASSI et al, 2012; MEINDERS; BERG; HUÉTINK, 2000):

- Modo 1 - Falha iniciada na linha de solda: a deformação e a tensão principais são paralelas à linha de solda, que se rompe devido à sua menor ductilidade. Nesse caso, pode-se dizer que provavelmente a solda não foi bem executada. Como a conformabilidade dependerá diretamente da qualidade da solda, a falha ocorre.
- Modo 2 - Falha iniciada na região de menor resistência mecânica: o esforço principal se concentra perpendicularmente à linha de solda. Ocorre porque, via de regra, a solda tende a ser mais resistente mecanicamente que os metais de base. A falha dependerá então das propriedades mecânicas e do estado dos metais de base.

Os modos de falha supracitados encontram-se esquematizados na FIG. 2.31.

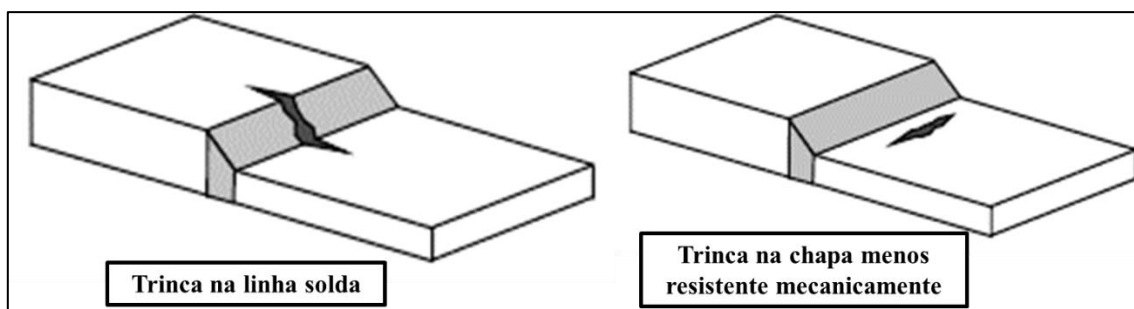


FIGURA 2.31 - Esquematização dos dois principais modos de falha em TWBs.
 FONTE: Adaptado de MEINDERS; HUETINK; BERG, 1998.

De acordo com Zadpoor; Sinke; Benedictus (2008), há três condições do fluxo de metal que são mais prováveis de ocorrer, a saber:

- Primeiramente, a linha de solda pode se mover em direção ao material mais espesso. Isso pode resultar em ruptura do material mais fino.
- Em segundo lugar, a condição do material mais fino pode causar seu enrugamento. Isso demanda ajustes no ferramental, sendo necessária uma “folga” para acomodação da diferença de espessura entre material mais espesso e mais fino.
- A terceira condição ocorre somente em alguns processos de estampagem extra profunda. Há movimentação da linha de solda em direção ao material mais fino, o que pode causar falha por ruptura.

Um dos muitos estudos realizados com TWBs para prever esses modos de falha trata-se da avaliação do comportamento de chapas obtidas por esse processo mediante ensaios de dobramento. A resposta das chapas pode variar de acordo com a direção de laminação e gerar resultados similares aos do MB ou totalmente distintos, a depender da orientação do corpo de prova e do cordão de solda.

No trabalho de Xu et al (2014), avaliou-se a influência da orientação da linha de solda na resistência à flexão de TWBs formados de HSS. A linha de solda foi orientada a 0° , 45° e 90° em relação ao momento de dobramento, conforme apresentado na FIG. 2.32.

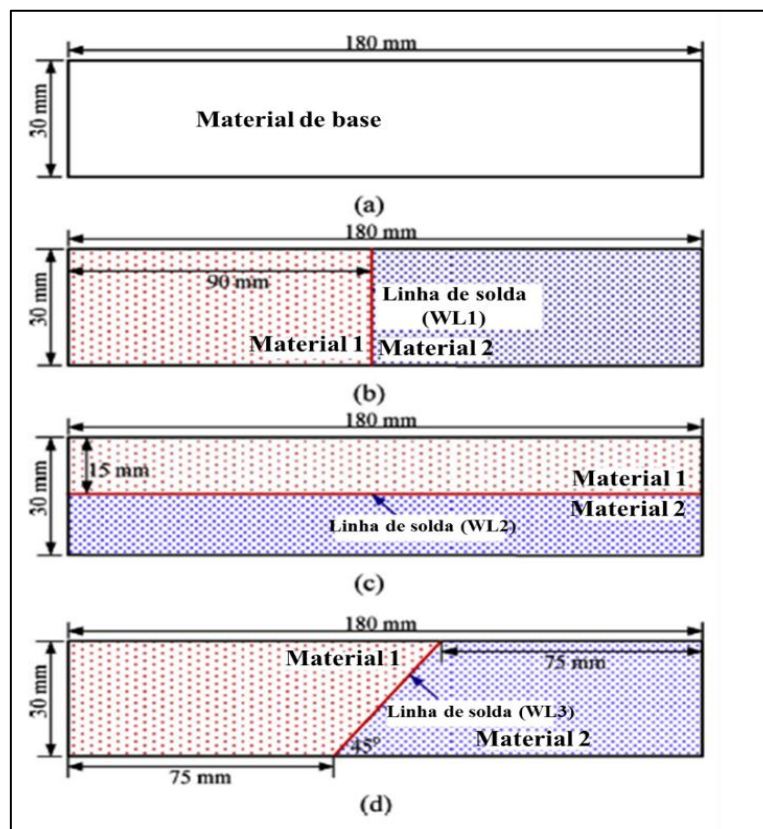


FIGURA 2.32 - Representação esquemática de configurações de amostras do metal de base e dos TWBs com diferentes orientações da linha de solda, antes do teste de dobramento.

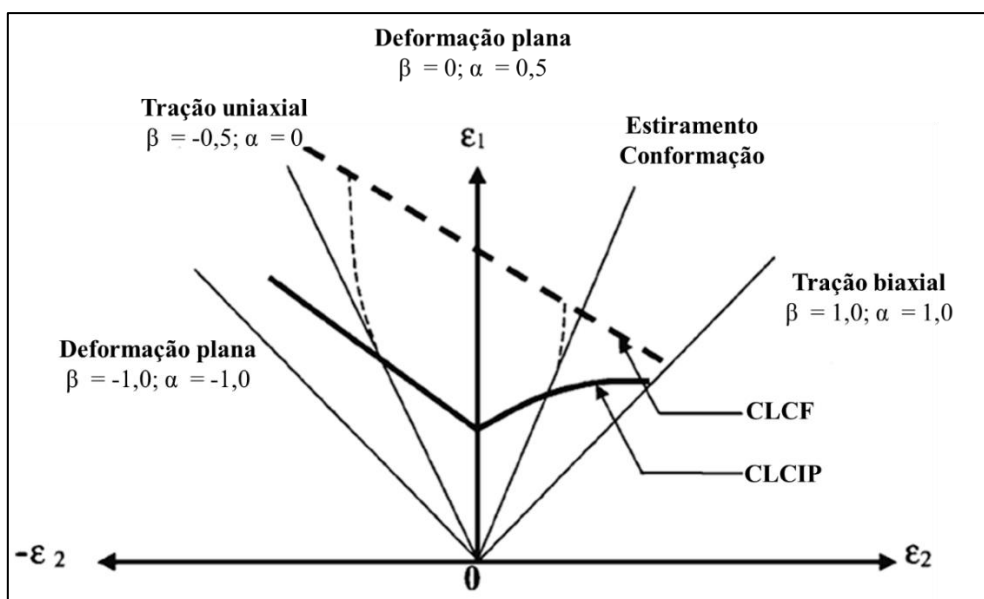
FONTE: Adaptado de XU et al, 2014.

Ainda que se trabalhe com diferentes testes, a maneira mais adequada de se representar o comportamento dos blanks mediante as mais diversas operações de conformação é, conforme já mencionado, por meio de CLCs. Essa estimativa, segundo Korouyeh et al (2013), é importante no projeto dos ferramentais. Essa mesma questão foi levantada por Safdarian et al (2014), que defenderam que a traçagem de uma boa curva CLC permite identificar previamente condições que levariam à instabilidade plástica ou mesmo à falha do material.

Há basicamente três maneiras de se obter tais curvas:

- Numérica
- Analítica
- Experimental

Na FIG. 2.33 tem-se um exemplo de uma dessas curvas.



Legenda

FLCN – *Forming Limit Curve at Necking* – Curva Limite de Conformação na Instabilidade Plástica (CLCIP)

FLCF – *Forming Limit Curve at Fracture* - Curva Limite de Conformação na Fratura (CLCF)

ϵ – Deformação

α – Razão de tensões na CLC

β – Razão de deformações na CLC

FIGURA 2.33 - Representação esquemática de uma curva CLC, destacando-se as curvas CLCIP e CLCF (FLCN e FLCF, respectivamente)

FONTE: Adaptado de SAFDARIAN et al, 2014.

Em virtude da complexidade e do aspecto qualitativo de muitos testes, o uso de simulações tem sido adotado, mas para que haja boa correlação, as propriedades da região da linha de solda devem ser incorporadas ao modelo e não serem consideradas como algo a parte.

Simulações e demais critérios levam em consideração o chamado “empescoçamento” da amostra, caracterizado pela instabilidade plástica do material. Esse fenômeno ocorre em função da alteração no estado de deformação do material (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

O grande objetivo ao se aplicar ferramentas computacionais é calcular a movimentação da linha de solda e a profundidade de conformação para aplicação de uma força uniforme pelo pistão. A localização da seção transversal seria tomada perpendicularmente à linha de solda e em uma posição em que a análise de seu movimento é de interesse (KINSEY; CAO, 2003).

No entanto, se a simulação convencional de estampagem de chapas singulares já pode ser complexa, ao se trabalhar com TWBs o número de variáveis aumenta e o processo se torna ainda mais difícil de ser analisado (GHOO; KEUM; KIM, 2001). Nos métodos convencionais, utilizando *softwares* de estampagem (como o PAMSTAMP®, por exemplo), há correlação superior a 94%, o que é considerado ótimo. Ao se trabalhar com a estampagem de TWBs, essa correlação se reduz a 78%, o que explica a dificuldade de predição de falhas (GAN et al, 2014; KARAJIBANI et al, 2016).

Segundo Shi et al (2017) há basicamente dois métodos utilizados na modelagem de TWBs: o primeiro leva em consideração a linha de solda (ZTA e ZF), com um *mesh* muito mais refinado e preciso; o segundo, negligencia os efeitos da soldagem. O primeiro só se aplica em situações nas quais não há deformações localizadas de grande intensidade na linha solda (WANG et al, 2016).

É necessário desenvolver mais técnicas experimentais e métodos analíticos para avaliar quantitativamente as características mecânicas do metal soldado e a conformabilidade de TWBs. Efeitos como o encruamento durante a conformação e a anisotropia do metal soldado, por exemplo, devem ser levados em consideração (GHOO; KEUM; KIM, 2001).

Karajibani; Hashemi; Sedighi (2016) afirmam que na maioria das simulações as propriedades mecânicas e elastoplásticas da linha de solda muitas vezes não são consideradas. Isso ocorre em função da complexidade que poderiam conferir ao modelo e até mesmo pela dificuldade de obtenção de tais dados pelos métodos diretos e convencionais de caracterização de materiais.

As simplificações realizadas podem fazer, no entanto, com que haja relativa discrepância entre os resultados práticos e os simulados. Torna-se então um desafio prever de forma precisa os efeitos locais e globais da soldagem (KOROUYEH; NAEINI; LIAGHAT, 2012).

Via de regra, o cálculo das propriedades mecânicas da linha de solda é feito considerando-se o local uniforme. Zhao et al (2001) comprovaram que essa consideração influencia grandemente

os resultados. Isso faz com que, conforme apontado por Hycza-Michalska; Rojek; Fruitos (2010), não se explore na totalidade o potencial de aplicação das chapas obtidas pelo processo de TWB.

Para maior exploração e aplicação é preciso desenvolver métodos de simulação mais precisos e práticos. É necessário também entender de forma mais clara os efeitos do posicionamento e da orientação da linha de solda no desempenho mecânico e na conformabilidade das chapas obtidas por meio de TWBs.

São necessários, portanto, avanços na tecnologia de simulação, desenvolvimento de técnicas exploratórias e metodologias que possibilitem maior correlação entre o que de fato se obtém na prática e o que é simulado/ensaiado. Com isso, reduz-se o tempo e o custo dos projetos e melhora-se a qualidade e a segurança dos automóveis (ABASSI et al, 2012; CHOI et al, 2000).

Hycza-Michalska; Rojek; Fruitos (2010) apontam que há quesitos relativos ao processo de fabricação e não somente ao TWB em si, que devem ser precisamente mapeados para que se obtenha maior previsibilidade do processo:

- Pressão de sujeição do prensa-chapas
- Velocidade de movimentação dos elementos de fixação do prensa-chapas
- Velocidade de avanço e retrocesso do punção
- Coeficientes de atrito
- Coeficientes de amortecimento

Outra ferramenta computacional útil que pode ser aplicada ao TWB é o chamado DOE (*Design of Experiments – Design de Experimentos*), que foca na otimização. Quando utilizado na confecção de portas veiculares dianteiras, é direcionado às principais cargas às quais uma porta é submetida.

No estudo desenvolvido por Li et al (2015) trabalhou-se conforme apresentado na FIG. 2.34.

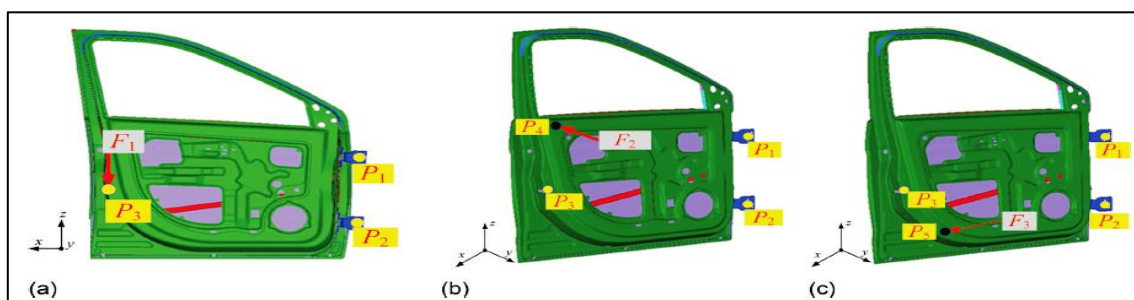


FIGURA 2.34 - Condições de carga e limite para a rigidez da porta automotiva: (a) análise de flexão vertical; (b) análise na lateral superior; e (c) análise na lateral inferior
 FONTE: LI et al, 2015.

No trabalho desenvolvido por Li et al (2015) as portas dianteiras do veículo e seus múltiplos componentes e reforços foram modelados a partir da técnica de elementos finitos. Para a otimização trabalhou-se com o chamado BESO (*Bidirectional Evolutionary Structural Optimization* - Otimização estrutural evolutiva bidirecional). Os principais parâmetros de entrada foram os vetores de forças/cargas aplicadas à porta (apresentadas, de forma esquemática, na FIG. 2.34), a matriz de rigidez estrutural dos componentes e os vetores de deslocamento.

A otimização nem sempre é viável, pois pode se ter diversas espessuras e materiais, o que dificulta a obtenção do blank. Ainda assim, pode ser muito útil análise das inúmeras orientações possíveis para linha de solda. Na FIG. 2.35 apresenta-se, para o caso estudado por Li et al (2015), quatro diferentes *designs* considerados ótimos.

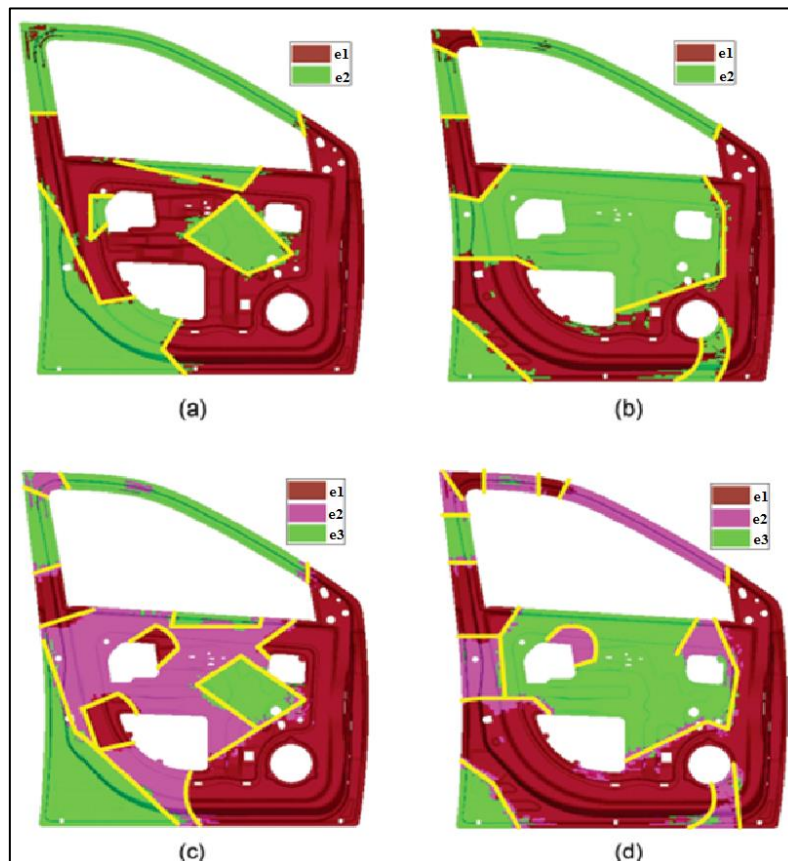


FIGURA 2.35 - Designs ideais para painel interno TWB de uma porta automotiva sob vários casos de carga: (a) caso a; (b) caso b; (c) caso c; e (d) caso d
FONTE: LI et al, 2015.

Na TAB. 2.1 apresenta-se o grande potencial de redução de massa que se pode obter utilizando a otimização associada ao TWB. Para o caso do DOE não se foca em questões como conformabilidade e localização da falha, tendo como objetivo principal a redução de massa.

TABELA 2.1 - Relação de volume, massa e torque, para diferentes casos e iterações, em simulações utilizando TWBs

Número	Iterações	Volume total [%] V _{e1} :V _{e2} :V _{e3}	Torque máximo [N.mm]		Massa [kg]	
			Inicial	Final	Inicial	Final
Caso “a”	34	40:60:0	4493,95	4514,17	8,124	6,516
Caso “b”	43	50:50:0	341,92	378,71	9,749	7,455
Caso “c”	53	40:30:30	3359,62	3394,62	10,560	7,459
Caso “d”	43	50:20:30	275,56	300,12	11,370	8,951

FONTE: LI et al, 2015

Ainda que se possa trabalhar com diferentes espessuras e que o processo de soldagem a laser seja considerado extremamente versátil, deve-se ponderar a viabilidade técnica e produtiva de alguns *designs* criados para o TWB. No caso descrito na TAB. 2.1 e na FIG. 2.35, há múltiplos recortes e espessuras, o que torna a otimização inviável. Assim, além de ferramentas computacionais, deve-se verificar a possibilidade de se manufaturar os blanks conforme requerido e de se aplicar os devidos testes para sua validação.

2.4.3. Testes aplicados a TWBs

Para assegurar a redução de custos e o desempenho mais adequado, é necessário compreender a conformabilidade do TWB e as propriedades e características específicas das regiões soldadas (CHAN et al, 2005).

A caracterização mecânica direta de TWBs, no entanto, não é uma tarefa fácil, uma vez que a área ocupada pela linha de solda é muito pequena se comparada à extensão total dos corpos de prova padrão utilizados nos testes de tração, cisalhamento e dobramento.

Os resultados dos ensaios e suas análises nem sempre são triviais. O material mais fino e menos resistente no blank pode ser mais deformado que o mais espesso e resistente, por exemplo. A maior movimentação da linha de solda ocorre, em geral, no material menos resistente mecanicamente (KHAN; SURESH; REGALLA, 2014; FAZLI, 2016).

O perfil de microdureza pode ser utilizado, ainda que indiretamente, para mensurar a extensão de cada uma das diferentes regiões da solda. Uma outra técnica que pode ser aplicada com esse fim e também para se mapear as distribuições de tensões ao longo do corpo de prova durante a deformação é a chamada correlação digital de imagem (DIC – *Digital Image Correlation*), conforme se apresenta na FIG. 2.36.

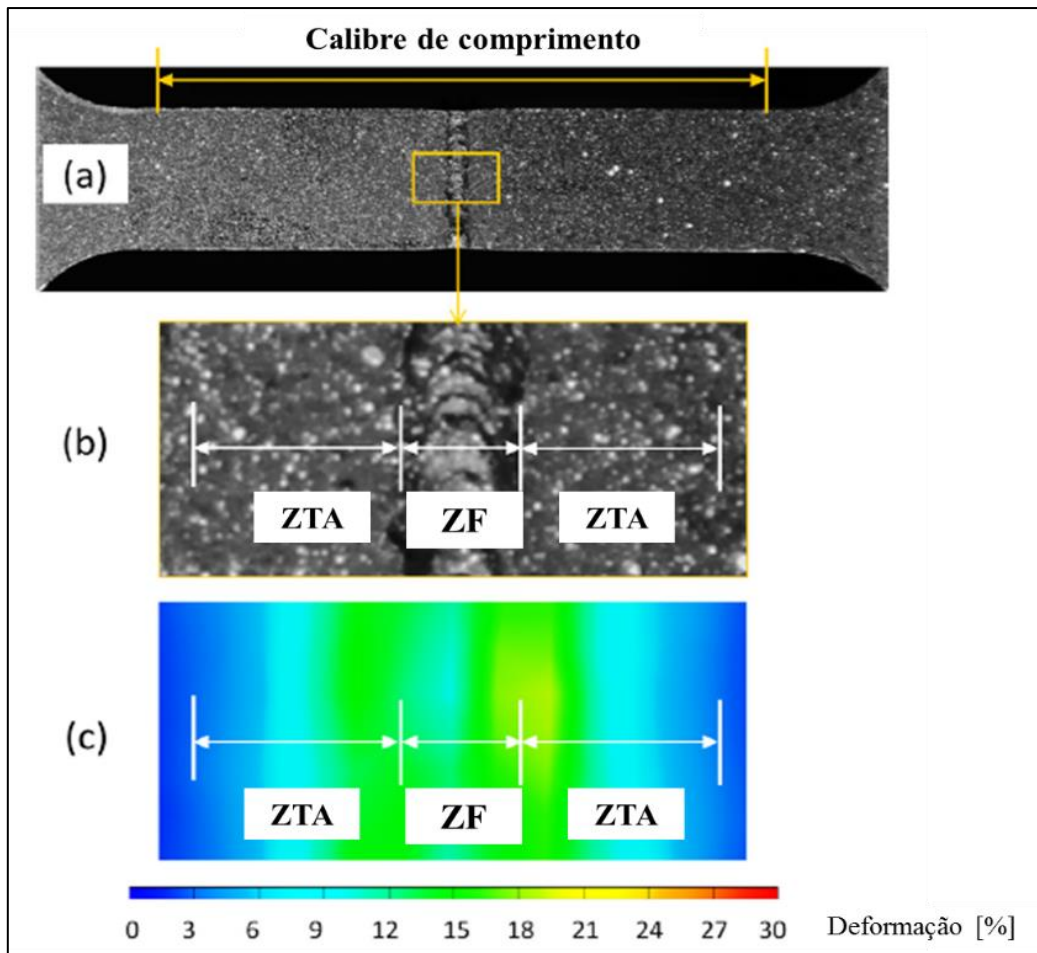


FIGURA 2.36 - (a) Corpo de prova DIC; (b) Ampliação sobre a superfície analisada do corpo de prova e (c) campo de deformações do corpo de prova durante execução do teste DIC
 FONTE: Adaptado de LIU et al, 2015

Boa parte das técnicas de caracterização adotadas muitas vezes apresentam limitações e possuem caráter meramente qualitativo, revelando somente alguns aspectos críticos da conformação do TWB (KINSEY; WU, 2011).

No trabalho desenvolvido por Assunção; Quintino; Miranda (2009), por exemplo, foram feitos tanto ensaios de tração quanto de embutimento. Na tração, a ruptura sempre ocorreu na região de menor espessura (menor resistência mecânica). A falha ocorreu longe da ZTA e paralela à linha de solda. Nos ensaios de embutimento a falha também ocorre relativamente distante da ZTA e no material de menor resistência mecânica.

Os principais testes utilizados para determinação do comportamento mecânico das chapas obtidas por meio do TWB são, portanto, ensaio de embutimento Erichsen e de tração uniaxial (KOROUYEH; NAEIN; LIAGHAT, 2012), os quais serão abordados com aplicações práticas e mais detalhamentos nas próximas seções deste trabalho.

2.4.3.1. Ensaios de embutimento

Quanto às maneiras de se analisar a conformabilidade de TWBs, os métodos não diferem muito daqueles utilizados em blanks singulares. Há o ensaio de embutimento *Swift*, o de altura limite do domo (LDH – *Limit Dome Height*) e o da Universidade do Estado de Ohio (OSU – *Ohio State University*) (ZADPOOR et al., 2008).

Podem ser usados também testes nos quais as chapas são submetidas a estiramento, com um estado de deformação que corresponde aproximadamente à deformação plana, testes de dobramento e ensaios de embutimento Erichsen (testes de estampagem profunda e extra profunda) (MERKLEIN et al, 2014).

Em todos os casos, gera-se um produto estampado que recebe o nome de “copo” ou “domo”. O chamado LDH (*Limit Dome Height* – Altura Limite do Domo) é um dos mais utilizados para melhor prever a conformabilidade de TWBs, especificamente (SCRIVEN et al, 1996 apud CHAN; CHAN; LEE, 2003). Os corpos de prova se diferem do tradicional ensaio de embutimento Erichsen e possuem 101,6mm x 177,8mm, sendo a espessura variável de acordo com o blank a ser analisado. Busca-se simular um estado plano de deformação, capaz de reproduzir as menores tensões necessárias à falha do TWB, além de ser uma condição comum na falha de painéis veiculares.

O aparato utilizado para execução dos ensaios de embutimento Erichsen encontra-se esquematizado na FIG. 2.37.

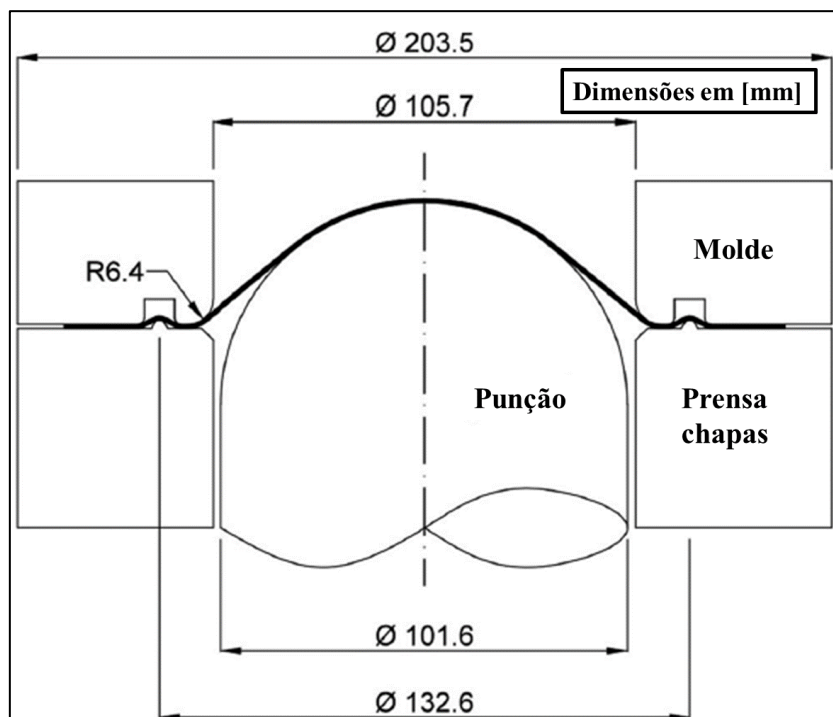


FIGURA 2.37 - Aparato utilizado para realização do Ensaio de Embutimento Erichsen

FONTE: Adaptado de PARENTE et al, 2015.

Na FIG. 2.38 apresenta-se a CLC de um TWB típico, composto de aço HSLA, obtida por meio de ensaios LDH.

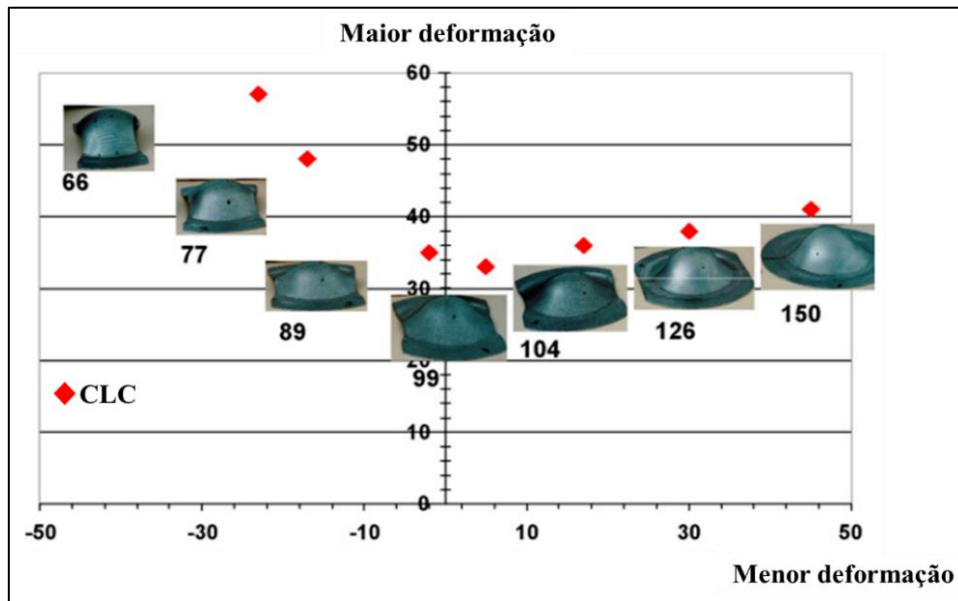


FIGURA 2.38 - Relação típica entre a largura dos corpos de prova e o caminho de deformação (largura em mm), caracterizando uma CLC.
 FONTE: Adaptado de GAIED et al, 2009.

Na FIG. 2.39 são apresentados os resultados obtidos para o referido teste, em TWBs de diferentes larguras, em que se pode verificar que o *Limit Strength Ratio* - LSR (Razão limite de resistência mecânica) depende não apenas dos materiais em si, mas também da largura dos corpos de prova. Consequentemente, aumenta-se a altura limite do domo, o que contribui para melhoria de conformabilidade do TWB.

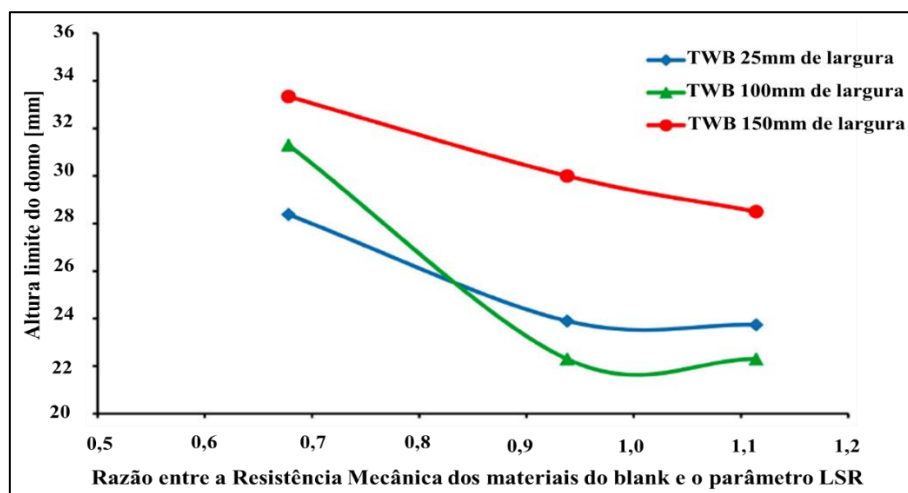


FIGURA 2.39 - Influência da razão entre a resistência mecânica dos materiais do blank e o LSR na altura limite do domo para amostras de TWB com diferentes larguras
 FONTE: Adaptado de SAFDARIAN, 2016.

Independentemente do ensaio de embutimento escolhido, o que se nota é que a falha ocorre sempre na direção perpendicular à linha de solda do TWB. Isso é função do estado de deformações imposto em estiramento, esquematizado na FIG. 2.40.

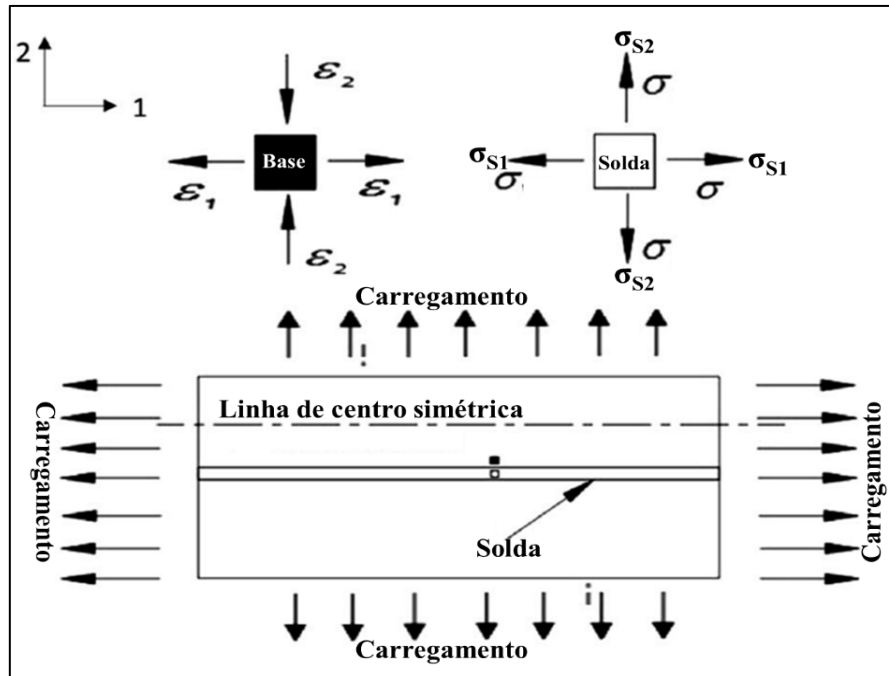


FIGURA 2.40 - Representação esquemática de análise de deformações num TWB
 FONTE: (LI; LIN, 2015)

Considerando que o TWB é deformado sob condição de deformação por estiramento biaxial, devido à restrição de compatibilidade na direção 1, a deformação é a mesma na linha de solda e no blank de metal base. No entanto, na zona próxima à linha de solda, a deformação do MB na direção 2 é maior que na direção 1 (LI; LIN, 2015).

Essa questão configura uma deficiência dos tailor blanks. Pode haver concentrações localizadas de tensões nas interfaces das superfícies que foram soldadas, além do fato de que as linhas de solda podem conter microestruturas complexas em suas ZF e ZTA e razoável perda de ductilidade, o que reduz a estampabilidade dos blanks (DUAN et al, 2016).

Não há consenso nem quanto ao teste mais preciso de embutimento, nem quanto à influência do posicionamento e da orientação da linha de solda nos resultados obtidos. Há pesquisas, como a desenvolvida por Parente et al (2015), que dizem que a 45° piora-se a condição, a qual é otimizada a 90°. No entanto, outros pesquisadores, como Duan et al (2016) e Ghoo et al (2001) que dizem que há pouca ou nenhuma influência da orientação da linha de solda no estiramento.

No estudo desenvolvido por Cheng; Chan; Chow (2007), com aços inoxidáveis, a orientação da solda pouco ou quase nada influenciou na altura limite do domo, conforme se apresenta na FIG. 2.41.

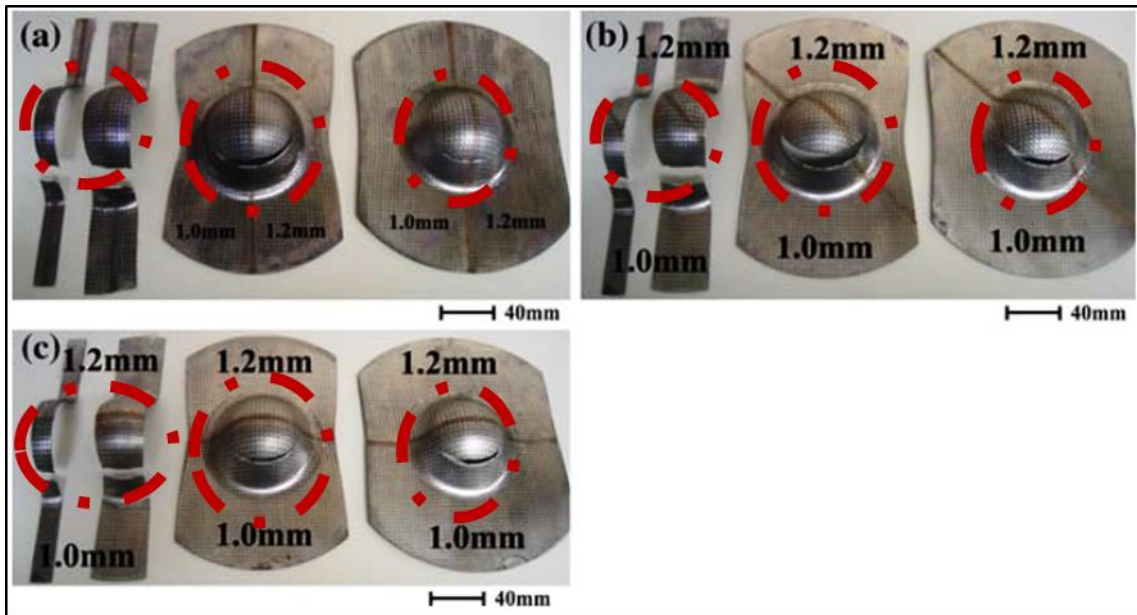


FIGURA 2.41 - Amostras de TWB após serem submetidas ao ensaio de conformação, com orientação da solda de (a) 0° (b) 45° e (c) 90°, com destaque para os domos formados
FONTE: CHENG; CHAN; CHOW, 2007.

A diferença mais perceptível nos resultados dos ensaios de embutimento relaciona-se mais à razão de espessuras do que à linha de solda em si. Isso foi constatado por Chan; Chan; Lee (2003), cujos resultados do trabalho, para o ensaio de LDH, encontram-se apresentados na FIG. 2.42.

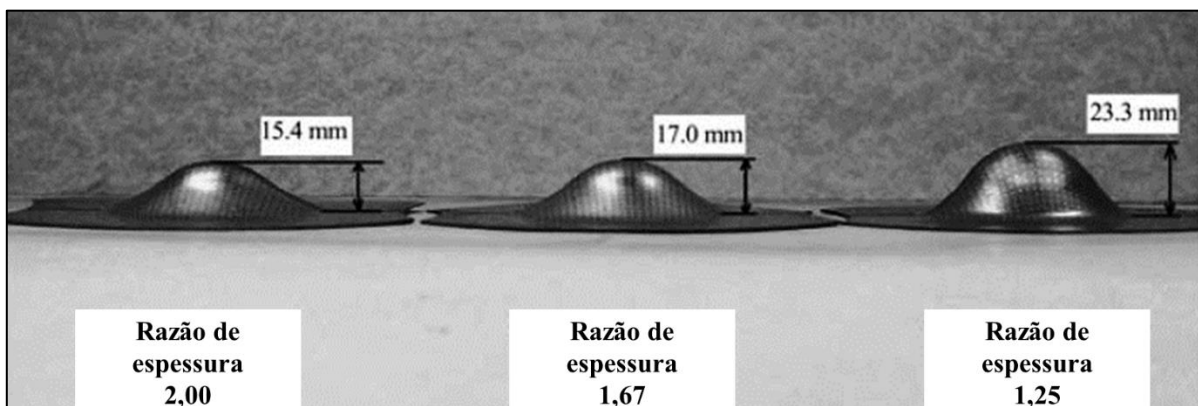


FIGURA 2.42 - Variação da altura limite de domo em função da razão de espessura das chapas que compõem o TWB
FONTE: Adaptado de CHAN; CHAN; LEE, 2003.

Isso ocorre, segundo Chan; Chan; Lee (2003), porque uma ampla razão de espessura representa maior diferença de espessura ao longo do blank. Implica-se em uma maior diferença de deformação plástica, o que acarreta em deformidades e até mesmo falhas prematuras durante a conformação.

Pode-se se reduzir em cerca de 30% a conformabilidade cuja razão entre as espessuras é 1,00. Para uma direção de carregamento perpendicular à linha de solda, pode-se reduzir em até 10%

o desempenho mecânico do TWB, sendo encontrado que, em situações de estiramento a linha de solda de comporta melhor se orientada a 45° em relação à direção de laminação (DL) (ZADPOOR et al, 2008).

Deve-se trabalhar, portanto, de forma a se obter resultados quantitativos e qualitativos. Para isso, podem ser feitos ensaios de embutimento variando tanto a razão de espessura das chapas do TWB quanto a orientação de sua linha de solda. Objetivando maior correlação e determinação mais precisa das propriedades mecânicas, não se pode abrir mão dos ensaios de tração (MEINDERS; HUETINK; BERG, 1998; TAN; MORIE; ABE, 2008; XU et al, 2014)

2.4.3.2. Ensaios de tração uniaxial

Para caracterização mecânica de *Taylor Welded Blanks*, testes de tração têm sido adotados, com corpos de prova de diferentes configurações, para alimentarem simulações e terem os resultados do ensaio confrontados com a chamada Regra das Misturas, apresentada na EQ. (2.4) (KHAN; SURESH; REGALLA, 2014).

$$\sigma_w = \frac{P - (K_1 \cdot \varepsilon_1^{n_1}) \cdot A_1 - (K_2 \cdot \varepsilon_2^{n_2}) \cdot A_2}{A_w} \quad (2.4)$$

Na qual:

- σ_w = Tensão limite de resistência da solda [MPa]
- P = Carga total suportada pelo corpo de prova [N]
- K_1 = Coeficiente de resistência mecânica do material 1 do TWB [MPa]
- ε_1 = Deformação verdadeira do material 1 do corpo de prova do TWB
- A_1 = Área da seção transversal do material 1 do corpo de prova do TWB [mm²]
- K_2 = Coeficiente de resistência mecânica do material 2 do TWB [MPa]
- ε_2 = Deformação verdadeira do material 2 do TWB
- A_2 = Área da seção transversal do material 2 do corpo de prova do TWB [MPa]
- A_w = Área da seção transversal da solda do corpo de prova do TWB [mm²]

Nesse caso, trabalha-se com a norma ASTM E-8M (ASTM, 2016). Na FIG. 2.43 apresenta-se, de forma esquemática, as dimensões das principais configurações possíveis para corpos de prova (CPs) de tração.

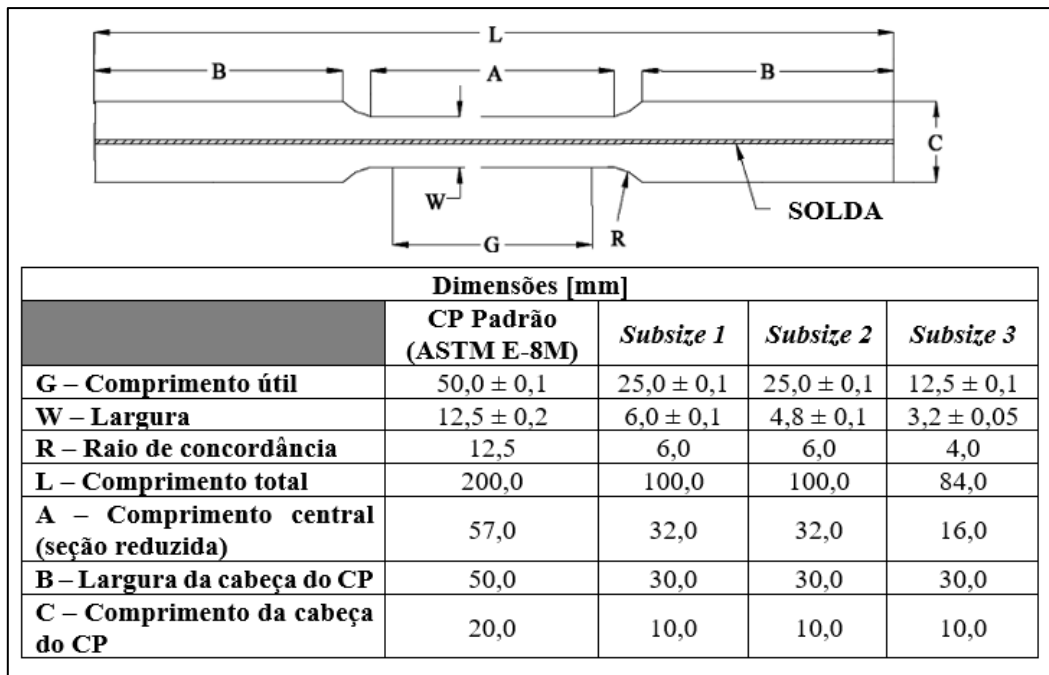


FIGURA 2.43 - Dimensões dos corpos de prova utilizados para testes nos TWBs
 FONTE: Adaptado de ABDULLAH et al, 2001.

Podem ser utilizados diferentes tipos de corpos de prova para avaliação das propriedades mecânicas de TWBs, que não apenas os padrões da ASTM, conforme pesquisado por Abdullah et al (2001). No trabalho desenvolvido por Chan et al (2005), por exemplo, foram adotados corpos de prova conforme se apresenta na FIG. 2.44.

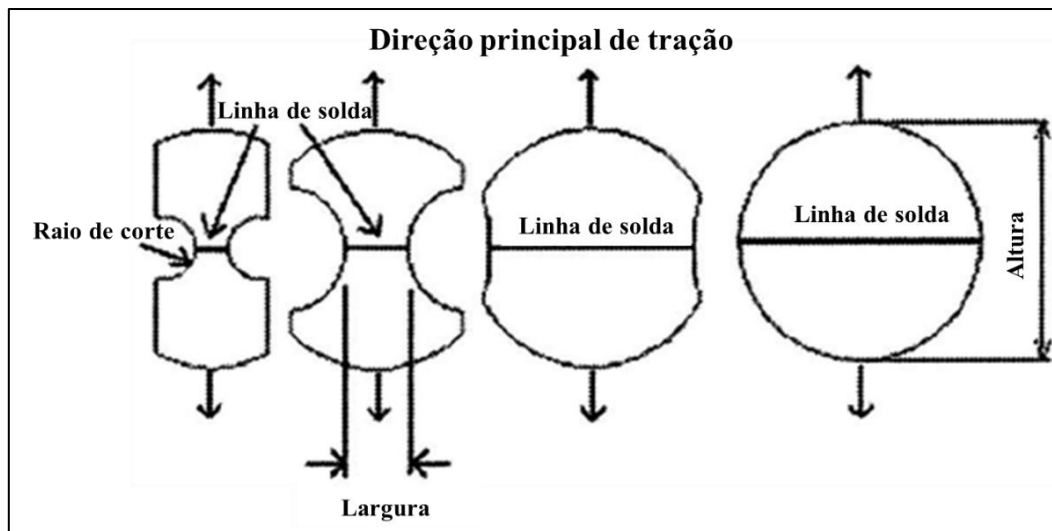


FIGURA 2.44 - Diferentes padrões e orientações da linha de solda em corpos de prova circulares de tração de TWB.
 FONTE: Adaptado de CHAN et al, 2005.

Na TAB. 2.2 apresentam-se as configurações de espessura dos corpos de prova, os quais foram confeccionados em aço carbono laminado a frio.

TABELA 2.2 - Combinações de espessuras para confecção dos corpos de prova de tração circulares

Combinações de espessuras para confecção dos corpos de prova de tração					
Combinação de espessuras	1,0mm/ 0,5mm	1,0mm/ 0,6mm	1,0mm/ 0,7mm	1,0mm/ 0,8mm	1,0mm/ 0,9mm
Razão de espessuras	2	1,67	1,43	1,25	1,11
Combinação de espessuras	0,8mm/ 0,5mm	0,7mm/ 0,5mm	0,8mm/ 0,7mm	0,9mm/ 0,8mm	
Razão de espessuras	1,6	1,4	1,14	1,13	

FONTE: Adaptado de CHAN et al, 2005

Outro estudo que trabalhou com corpos de prova de diferentes formatos e com a linha de solda relativamente deslocada do centro das amostras foi desenvolvido por Li et al (2013). Todas as linhas de solda eram perpendiculares à direção de laminação, sendo posicionadas a 0mm, 15mm e 30mm do centro da peça bruta.

Na FIG. 2.45 evidencia-se um corpo de prova do referido estudo, com linha de solda previamente deslocada, a fim de controlar sua movimentação durante a conformação.

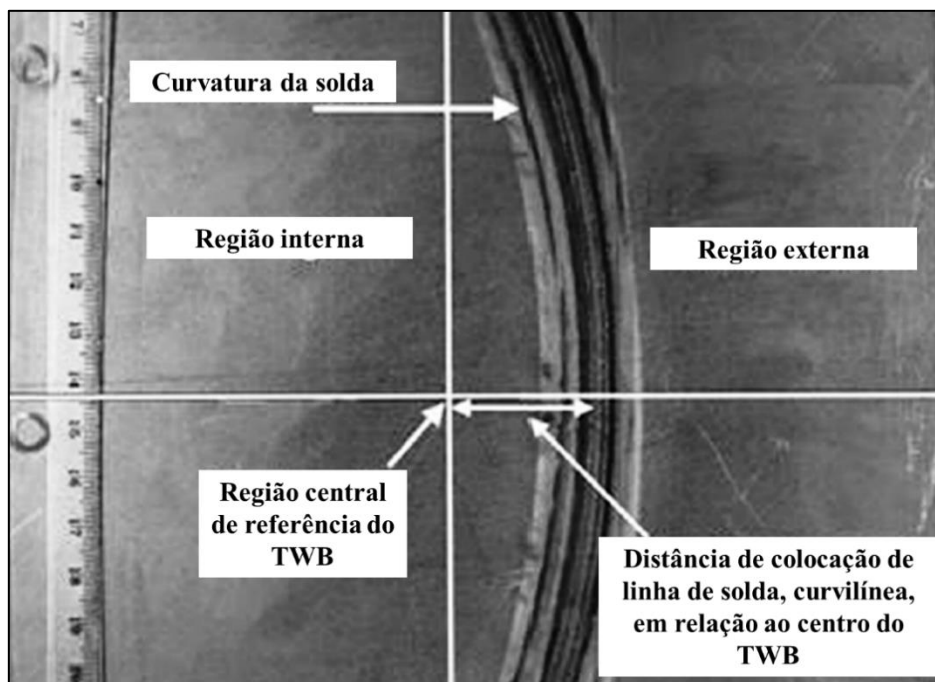


FIGURA 2.45 - Exemplo de chapa soldada curvilínea com curva de solda colocada à uma distância pré-determinada do centro do TWB, para posterior retirada de corpos de prova. FONTE: Adaptado de LI et al, 2013.

Não há, portanto, uma norma que indique qual o formato específico de corpos de prova de tração para se trabalhar com TWBs, mesmo que se utilize (para fins de dimensionamento), a ASTM

E-8M (ASTM, 2016). O posicionamento da linha de solda pode variar, bem como as espessuras dos materiais que comporão o blank. A seleção do formato do CP e de como a linha de solda será posicionada dependerá do que exatamente se deseja avaliar e em como os resultados se refletirão na prática.

No trabalho desenvolvido por Gong et al (2016), por exemplo, foram extraídos corpos de prova de tração a 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação. Isso também foi feito no trabalho de Schrek; Švec; Brusilová (2017). Essa técnica de extração de corpos de prova é uma das maneiras mais comuns de se avaliar a anisotropia e a textura de laminação, conforme se apresenta na FIG. 2.46.

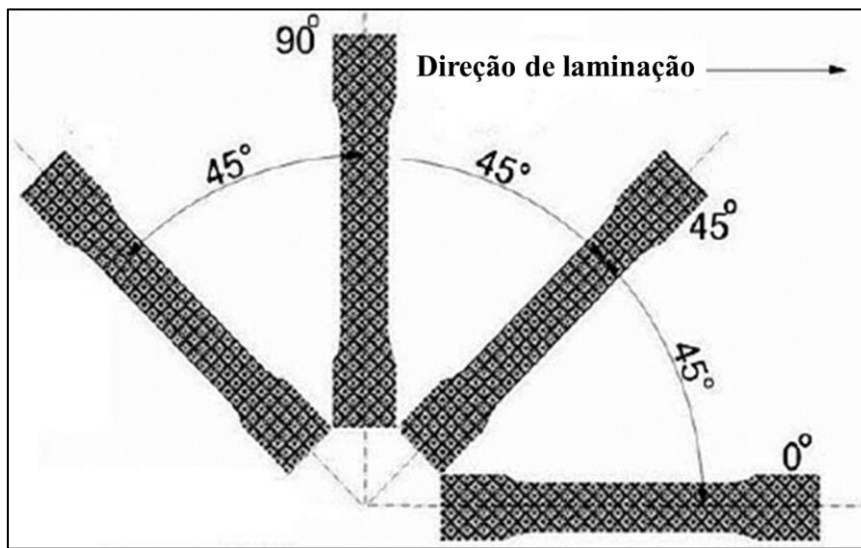


FIGURA 2.46 - Representação esquemática de amostras retiradas para realização de ensaios de tração, com diferentes orientações em relação à DL.
 FONTE: Adaptado de SCHREK; ŠVEC; BRUSILOVÁ, 2017.

No estudo desenvolvido por Safdarian et al (2014) também se frisou a importância de se trabalhar com a anisotropia. Utilizou-se o critério de falha de Müschenborn-Sonne (*MSFLD - Müschenborn-Sonne Failure Limit Diagram*). A influência do caminho de deformação no limite de conformação de chapas metálicas baseia-se na deformação plástica equivalente. Isso pode ser constatado por meio das CLCs ou, de forma mais prática e rápida, pelos ensaios de tração.

Num trabalho de Gong et al (2016), a soldagem dos blanks foi feita de forma que as direções de laminação dos materiais de base fossem paralelas entre si e entre a linha de solda. Na FIG. 2.47 apresentam-se os corpos de prova rompidos após execução dos ensaios.

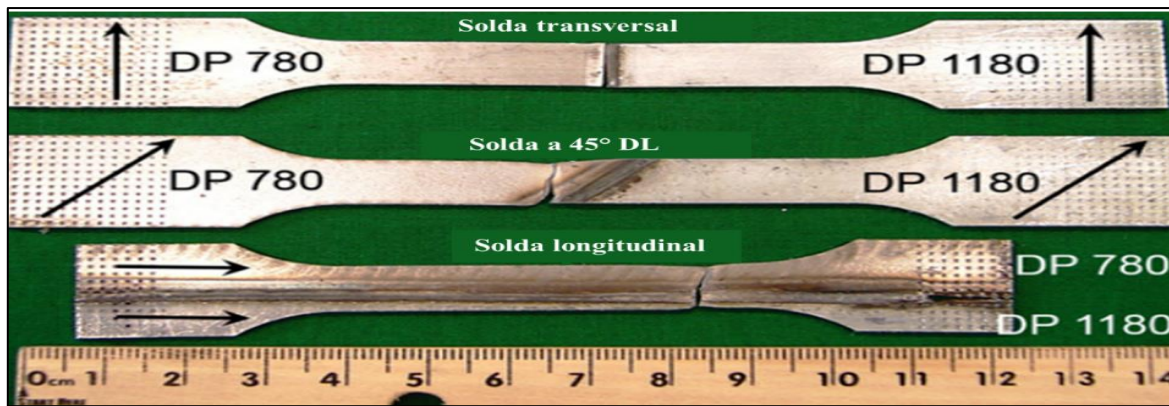


FIGURA 2.47 - Corpos de prova de tração, retirados diretamente do TWB. As setas em destaque indicam a direção de laminação (DL)

FONTE: Adaptado de GONG et al, 2016.

Os resultados obtidos encontram-se apresentados no gráfico força x deslocamento apresentado na FIG. 2.48.

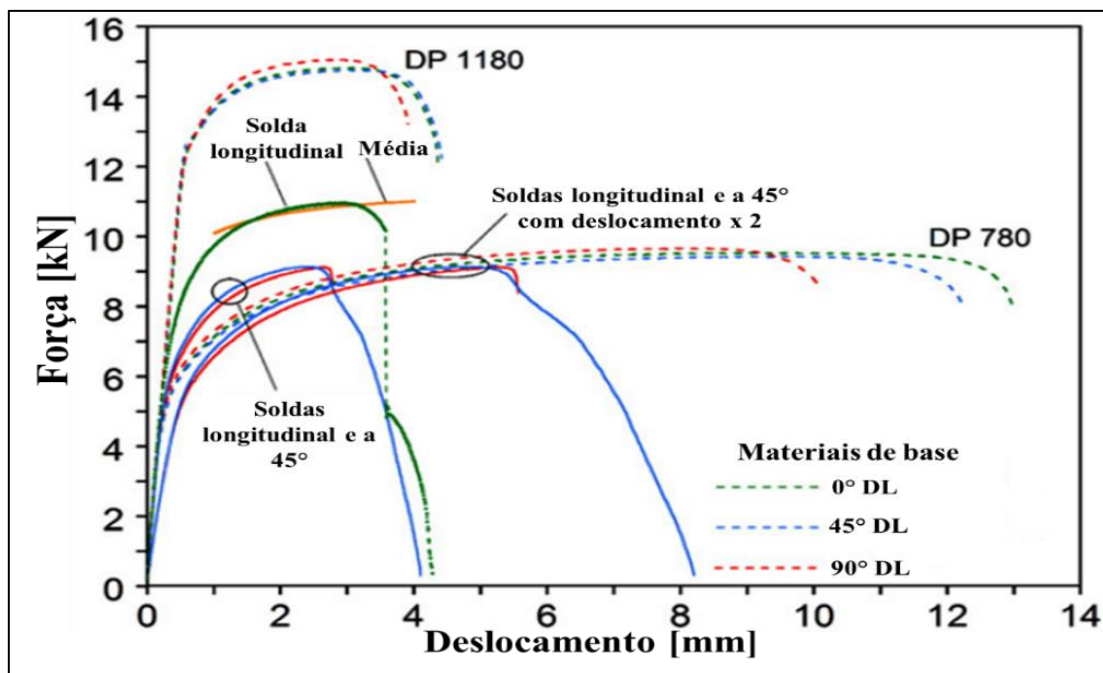


FIGURA 2.48 - Curvas força x deslocamento dos materiais de base e do TWB. Também está incluída, na coloração alaranjada, a média ponderada das curvas dos TWBs em relação à DL.

FONTE: Adaptado de GONG et al, 2016.

De acordo com os dados apresentados na FIG. 2.48, no caso dos corpos de prova de tração nos quais a solda se encontrava a 45° em relação à direção de laminação, constatou-se um estado de tensões multiaxiais. Somente o aço DP780 está se deformando plasticamente, o que provoca uma concentração de tensão significativa próximo à solda, região na qual o cordão de solda se encontra com a borda lateral da amostra. A ruptura é iniciada nesse local e depois se propaga para o aço DP780,

ao longo da ZTA. Como a ZTA é mais rígida, a trinca iniciada rapidamente se propaga para o aço DP 780. A peça DP 1180 permanece deformada apenas em regime elástico durante todo o experimento.

Quanto aos corpos de prova cuja solda foi longitudinal, a deformação ocorreu de maneira completamente diferente da dos demais. Neste caso, os dois materiais de base são forçados a se deformarem igualmente e, por isso, desenvolvem diferentes tensões axiais, proporcionalmente às suas áreas de seção transversal. Verificou-se que o deslocamento em deformação plástica do aço DP780 é aproximadamente metade do que no ensaio de tração, se essas curvas são multiplicadas por dois no eixo x, elas são quase idênticas à resposta do DP 780 do material de base

Em outro estudo, desenvolvido por Li; Lin (2015), foram extraídos corpos de prova de tração, com base na norma ASTM E-8M, com diferentes orientações da linha de solda, em relação à direção de laminação, conforme apresentado na FIG. 2.49.

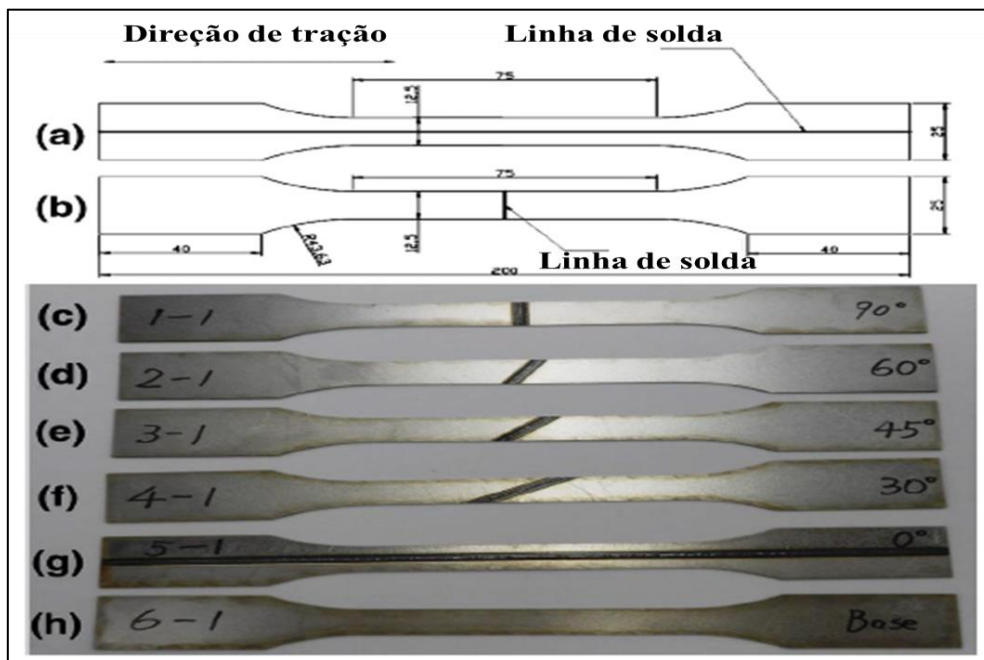


FIGURA 2.49 - Representação esquemática dos corpos de prova de tração de TWBs (a) dimensões da amostra com solda longitudinal e (b) solda transversal e amostras com (c) com 90°DL (d) 60°DL (e) 45°DL (f) 30°DL (g) 0°DL e (h) metal base. Unidades em mm.

FONTE: Adaptado de LI; LIN, 2015

A dependência da conformabilidade em relação à orientação da linha de solda pode ser explicada pela deformação heterogênea do blank. Se a direção da deformação principal estiver ao longo da linha de solda, tanto a chapa menos espessa quanto a mais espessa experimentam a mesma deformação principal (LI; LIN, 2015).

Apesar dessa constatação parecer relativamente simples, não há um consenso quanto ao ângulo da linha de solda em relação à direção de laminação e sua influência na resposta mecânica de TWBs.

Riahi et al (2012) estudaram a influência do posicionamento da linha de solda (mantendo fixo o ângulo de sua orientação) na conformabilidade de TWBs, conforme apresentado na FIG. 2.48.

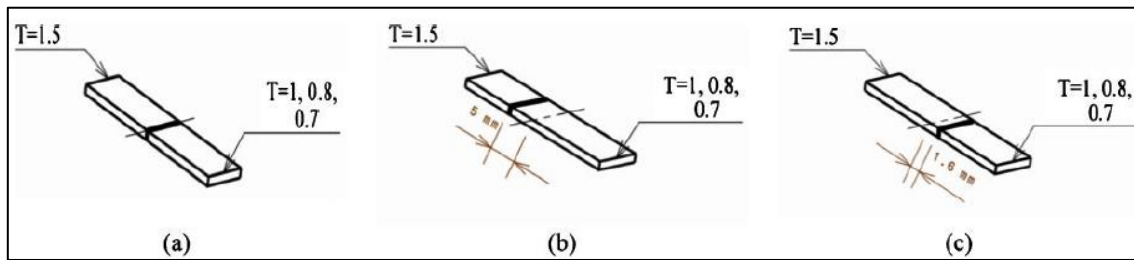


FIGURA 2.50 - Corpos de prova utilizados para realização de ensaios de embutimento (norma ASTM E643), com linha de solda (a) no centro (b) deslocada em 5mm do centro, em direção à chapa mais espessa e (c) deslocada 1,6mm do centro, em direção à chapa de menor espessura
 FONTE: RIAHI et al, 2012

As principais constatações do estudo de Riahi et al (2012) foram que ao se reduzir a razão de espessura entre as chapas que compõem o blank, aumenta-se sua conformabilidade. Percebeu-se também que ao se deslocar a linha de solda em direção à chapa mais espessa, também se aumenta a conformabilidade.

Essa linha de raciocínio vai de encontro ao princípio de balanço de forças. Nos blanks há, portanto, o mesmo nível de tensão, o que leva mais força atuando na chapa mais espessa. À medida que se aumenta a razão de espessuras, a fratura caminha para mais próximo da solda, até ocorrer nessa região. Quando a linha de solda é mais homogênea e a razão de espessuras se aproxima da unidade, a falha ocorre na chapa de menor resistência mecânica (mais fina), distante da linha de solda (ASSUNÇÃO; QUINTINO; MIRANDA, 2009).

Essa razão de espessuras chega a um limite, definido como o ponto no qual o material de maior resistência mecânica ainda está se deformando elasticamente, enquanto o outro material já se encontra no regime plástico. Esse limite pode ser definido como razão de espessura limitante (LTR – *Limiting Thickness Ratio*) (KOROUYEH et al, 2013).

O valor da LTR pode ser determinado por meio da EQ. (2.5), assumindo que o material “B” é mais espesso/resistente que o material “A” (KOROUYEH et al, 2013; ASSUNÇÃO; QUINTINO; MIRANDA, 2009; RIAHI et al, 2012):

$$LTR = \left(\frac{t_{0B}}{t_{0A}} \right)_{limite} = \frac{S_{TA}}{S_{YB}} \quad (2.5)$$

Na qual:

- t_{0B} : Espessura inicial do material B

- t_{0A} : Espessura inicial do material A
- S_{TA} : Limite de resistência à tração para o material A
- S_{YB} : Limite de escoamento para material B.

Se, por outro lado, a deformação principal for colocada perpendicularmente à linha de solda, a mesma força atua em ambas as chapas do blank, bem como na linha de solda. Isso leva à uma distribuição heterogênea de tensões, acarretando em maior esforço na chapa fina e um forte movimento da linha de solda (MERKLEIN et al, 2014; ZADPOOR et al, 2008).

Na FIG. 2.49 apresenta-se corpos de prova de tração demonstrando a integridade da solda após a execução do ensaio, comprovando que a tendência para TWBs, sob tração, é que a falha ocorra na chapa de menor resistência mecânica.

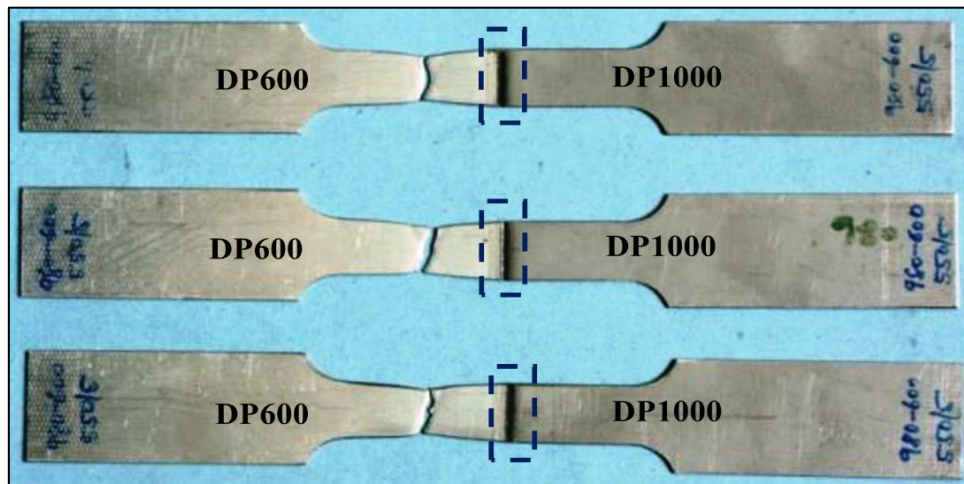


FIGURA 2.51 - Exemplos de corpos de prova de tração extraídos dos TWB confeccionados para correlação entre resultados do modelo computacional e testes físicos (Potência do laser de 550W e velocidade de soldagem de 5mm/s)
 FONTE: SCHREK; ŠVEC; GAJDOLOVÁ, 2016

Esse fenômeno é esperado, desde que a solda esteja previamente qualificada. A ruptura no material de menor espessura e resistência mecânica foi encontrada nos trabalhos de Kinsey et al (2000), Cheng et al (2007), Korouyeh et al (2012), Abassi et al (2012), Gong et al (2016) e Andrade et al (2017). Vale ressaltar que, apesar dos três CP's apresentarem esse comportamento, isso não é obrigatório, uma vez que a posição da fratura é randômica, podendo ocorrer desde as proximidades da solda até em regiões vizinhas à cabeça do CP; porém, sempre no material de menor resistência mecânica (ANDRADE; SANTOS; BRACARENSE, 2017).

Ainda que se trabalhe com materiais de excelente conformabilidade e bom desempenho mecânico, como os aços IF, a ruptura ainda continuará ocorrendo no material de menor resistência mecânica. Na FIG. 2.52 apresenta-se um exemplo de corpo de prova de tração de TWB desses aços

após a ruptura. Como se trabalha com o mesmo material, variando apenas a espessura, a falha ocorre na chapa menos espessa.

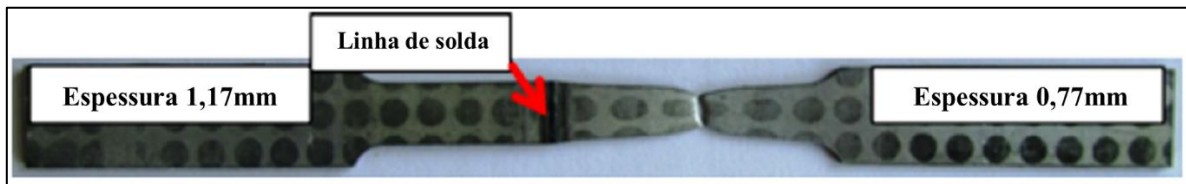


FIGURA 2.52 - Corpo de prova de tração, padrão ASTM E8, extraído de um TWB, após o teste
FONTE: KOROUYEH; NAEIN; LIAGHAT, 2012

Para estimativa das propriedades mecânicas da linha de solda e comportamento do blank em serviço, costuma-se utilizar, a partir dos resultados obtidos nos ensaios de tração, a Regra das Misturas (ROM – *Rule of Mixtures*), apresentada na EQ. (2.4) e cujos resultados, para o trabalho de Khan et al (2014) são apresentados na TAB. 2.3.

TABELA 2.3 - Propriedades mecânicas dos materiais de base e resultados obtidos por meio de Regra das Misturas para um TWB

Propriedade do Material	AA 6016	DP600	HSLA-340	Propriedades da solda baseada na regra das misturas	
				AI-DP	AI-HSLA
E [GPa]	70,0	210,0	210,0	126,0	126,0
Y₀ [MPa]	127,9	330,3	365,3	208,9	222,9
ε₀	0,0042	0,0017	0,0094	0,0030	0,0096
η	0,22	0,19	0,13	0,21	0,19
K [MPa]	429,1	1093,0	673,0	694,7	526,7

FONTE: KHAN; SURESH; REGALLA, 2014

De acordo com os resultados apresentados, pode-se perceber que ainda que se trabalhe com materiais diferentes, os resultados em termos de comportamento mecânico podem ser similares. Isso ocorre porque a ROM leva em consideração apenas as propriedades mecânicas dos materiais soldados e a diluição. Não há, portanto, considerações metalúrgicas acerca da ZTA e ZF, por exemplo (KHAN; SURESH; REGALLA, 2014).

Quanto à linha de solda, faz-se presente na Regra das Misturas, porém sem se considerar sua orientação. No entanto, essa consideração deveria ser feita, pois ao se aumentar a inclinação relativa da linha de solda, mantendo-se sua espessura, há um aumento de área. Logo, sua contribuição passa a ser mais significativa (PARENTE et al, 2015; ZHANG, 2016)

Para fins de exemplificação, os valores de LE e LRT de corpos de prova soldados longitudinalmente podem chegar a ser 12% melhores que os soldados transversalmente (ZADPOOR; SINKE; BENEDICTUS, 2007).

É necessário, portanto, conjugar os diferentes métodos de ensaios e formatos de corpos de prova, a fim de se aproximar do que ocorre na prática. Dessa forma, conforme mencionado, abandona-se o empirismo e confere-se maior ciência ao processo. Este se trata de um dos objetivos do presente estudo.

3. METODOLOGIA

Nesta seção são abordados os materiais e técnicas de caracterização adotadas no presente estudo, que tem por objetivo verificar a influência do posicionamento da linha de solda nas respostas mecânica e metalúrgica de chapas não conformadas e conformada, de Tailor Welded Blanks feitos de aços livres de intersticiais (IF), correlacionando o ângulo de inclinação da solda à resposta mecânica e à microestrutura das zonas fundida (ZF) e termicamente afetada (ZTA).

Foram executados ensaios de tração uniaxial (para determinação das propriedades mecânicas) e de microdureza (para avaliação da uniformidade da solda e da extensão da ZTA e da ZF). Trabalhou-se com amostragem em triplicata, para maior confiabilidade dos resultados. As análises microestruturais foram feitas com auxílio de microscópio óptico. Uma das chapas cedidas foi estampada, também pela FCA Brasil, para fins de análise dos efeitos da solda, em diferentes regiões, sobre a conformabilidade dos materiais.

Na FIG. 3.1 apresenta-se um fluxograma das etapas executadas nesta pesquisa.

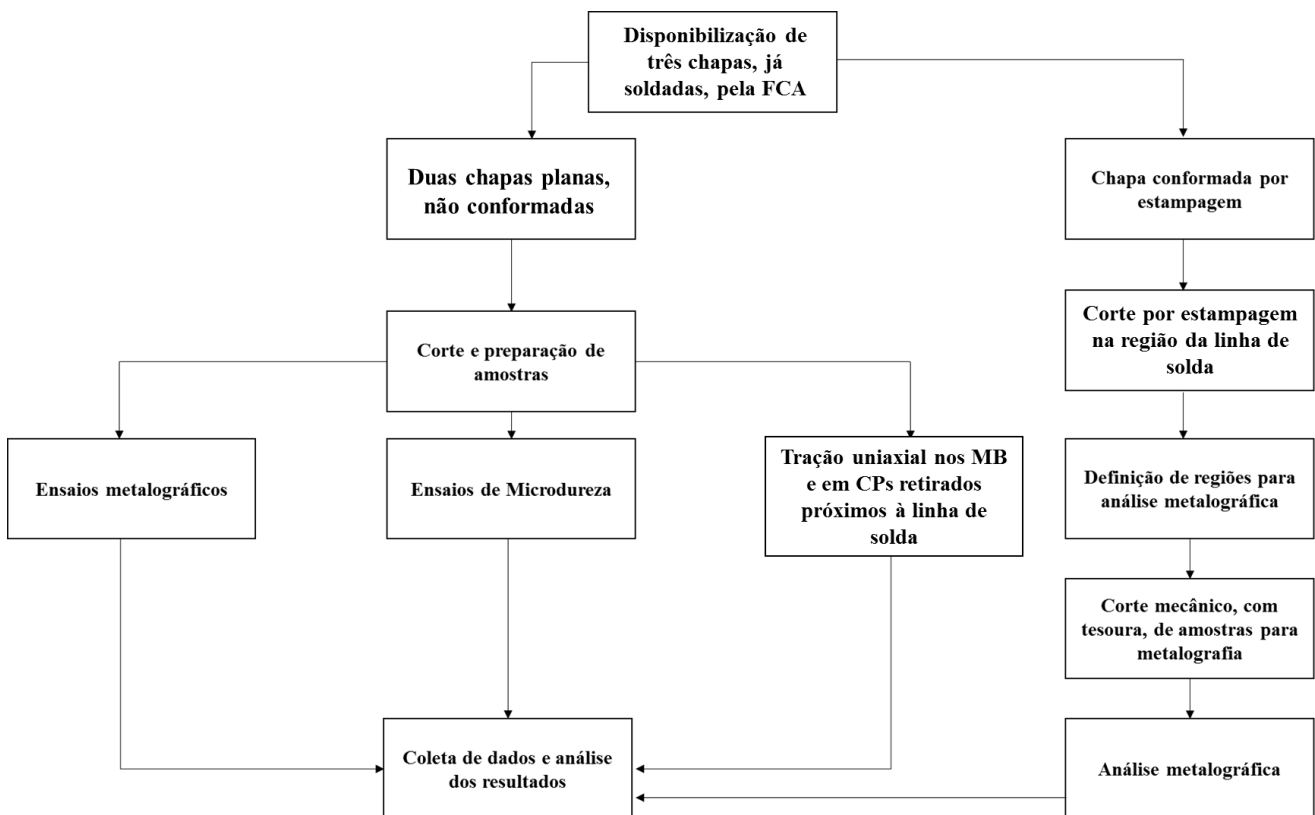


FIGURA 3.1 - Fluxograma de etapas desenvolvidas na presente pesquisa.
FONTE: Autor, 2019.

3.1. Materiais

Foram utilizadas chapas de aços livre de intersticiais (IF – *Intertitial Free*), da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), com materiais de códigos FEE 210 de 1,2mm de espessura (e) e IF CSN FEP 05 de 0,7mm de espessura, soldadas a laser. Essas chapas foram cedidas, já soldadas, pela FIAT Chrysler Automóveis (FCA) Brasil. Os parâmetros de soldagem utilizados foram:

- Equipamento: CO₂ SoundRonic® com potência nominal de 8kW
- Potência média utilizada: 65%
- Gás de proteção: He puro (10,5L/min)
- Velocidade de soldagem: 6,5m/s

Na TAB. 3.1 apresenta-se a composição química dos referidos aços, fornecida pela Companhia Siderúrgica Nacional e na TAB. 3.2, suas propriedades mecânicas.

TABELA 3.1 - Composição química dos aços IF utilizados no TWB

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

FONTE: CSN, 2019.

TABELA 3.2 - Propriedades mecânicas dos aços IF utilizados no TWB

Material	LE [MPa]	LRT [MPa]
IF CSN FEE 210	217	346
IF CSN FEP05	157	284

FONTE: CSN, 2019.

3.1.1. Chapas não conformadas

Para execução deste trabalho foram utilizadas três chapas obtidas por meio do processo de Tailor Welded Blank, doadas pela FCA Brasil. As dimensões dessas chapas estão apresentadas na FIG. 3.2.

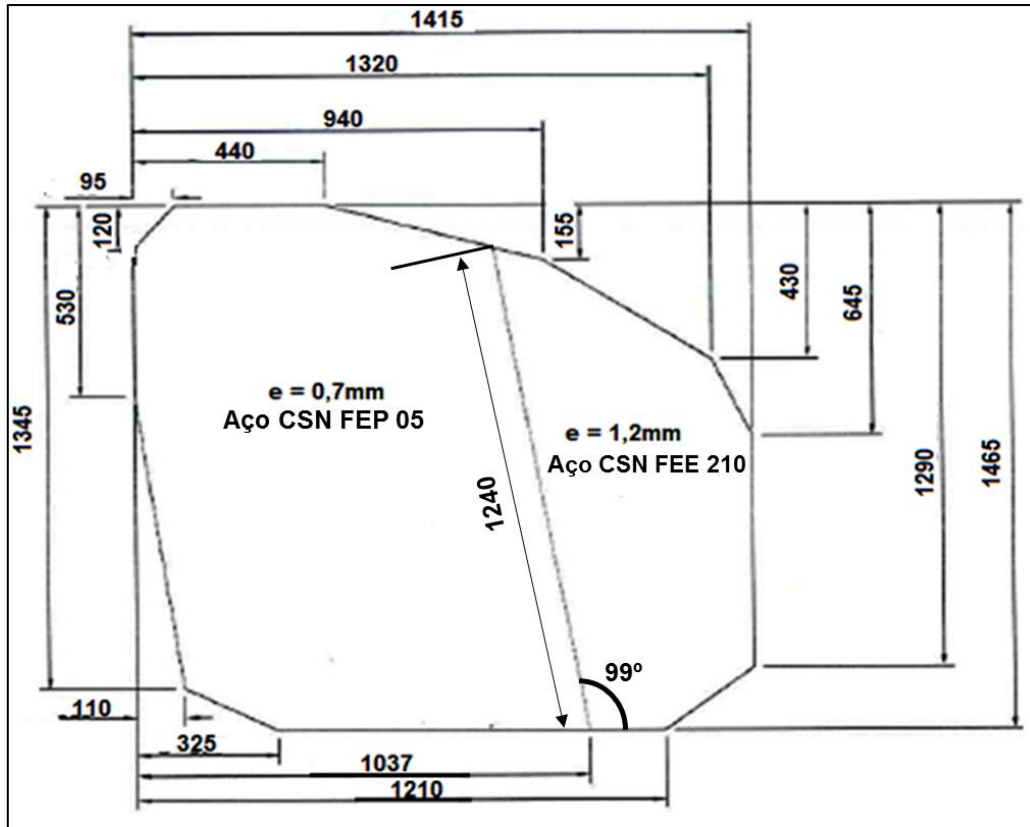


FIGURA 3.2 - Dimensões do blank utilizado no estudo, para extração de amostras
 FONTE: Autor, 2019

Para seleção das chapas a serem utilizadas trabalhou-se por amostragem. Foram retiradas uma chapa no início do fardo, uma no meio e outra no fim. Na FIG. 3.3 apresenta-se uma das chapas utilizadas.

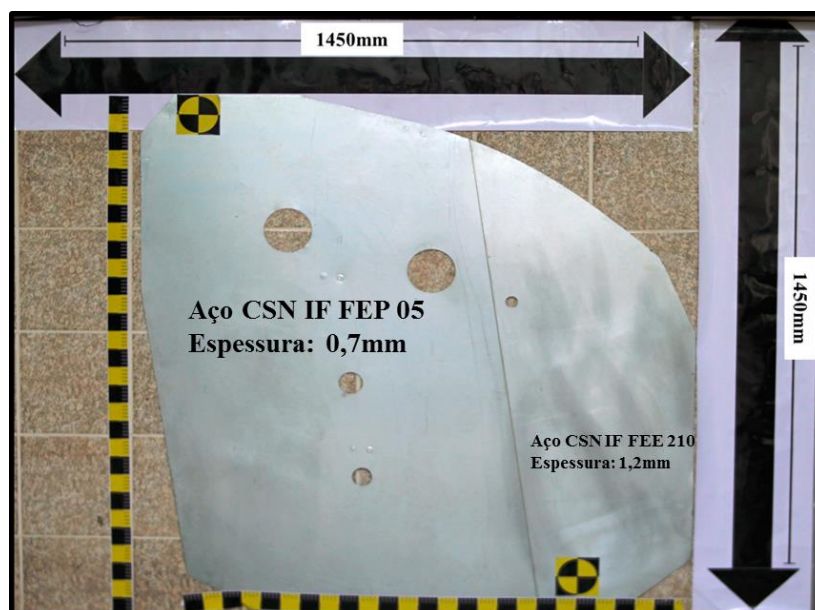


FIGURA 3.3 - Foto com escala da chapa confeccionada por meio do processo de TWB, utilizada para retirada de amostras
 FONTE: Autor, 2019

Na região destinada à ancoragem da dobradiça da porta dos veículos soldava-se um batente/ reforço. Por esse motivo, optou-se por trabalhar, nesse local, com uma chapa mais espessa e de maior resistência mecânica.

Para a retirada de amostras o blank foi cortado, com utilização de uma guilhotina mecânica FERMASA[®] Safan, a 300mm paralelamente à linha de solda, à esquerda e à direita. Na FIG. 3.4 apresenta-se, sobreposta à uma chapa sem cortes, uma das chapas após passagem pela guilhotina.

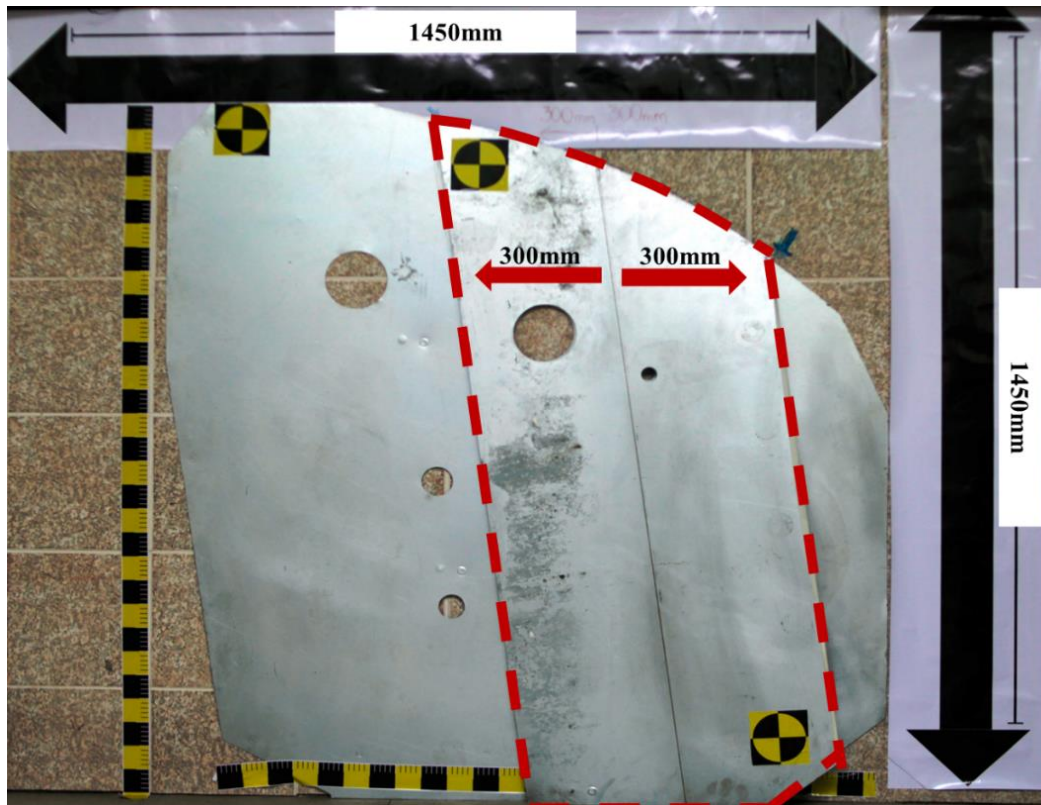


FIGURA 3.4 - Foto com escala da chapa confeccionada por meio do processo de TWB, utilizada para retirada de amostras, com destaque para região de corte
FONTE: Autor, 2019

3.1.2. Chapa conformada

Uma das chapas planas foi selecionada e submetida ao processo de conformação por estampagem. Foram executadas cinco etapas de estampagem, a saber: repuxo (confere a forma inicial do produto); corte primário (recorta o perímetro do vão de vidro, com auxílio de uma cunha); corte secundário e furação (recorta detalhes e executa furações); calibração (calibra e ajusta dimensões e detalhes do produto) e furação final (recorta últimos retalhos, confere detalhes e furações finais).

Após essas operações, a fim de avaliar a linha de solda e seu entorno, o painel interno de porta foi recortado a 80mm à direita e à esquerda do centro da linha de solda. A chapa foi inicialmente dividida em três regiões distintas, conforme apresentado na FIG. 3.5.

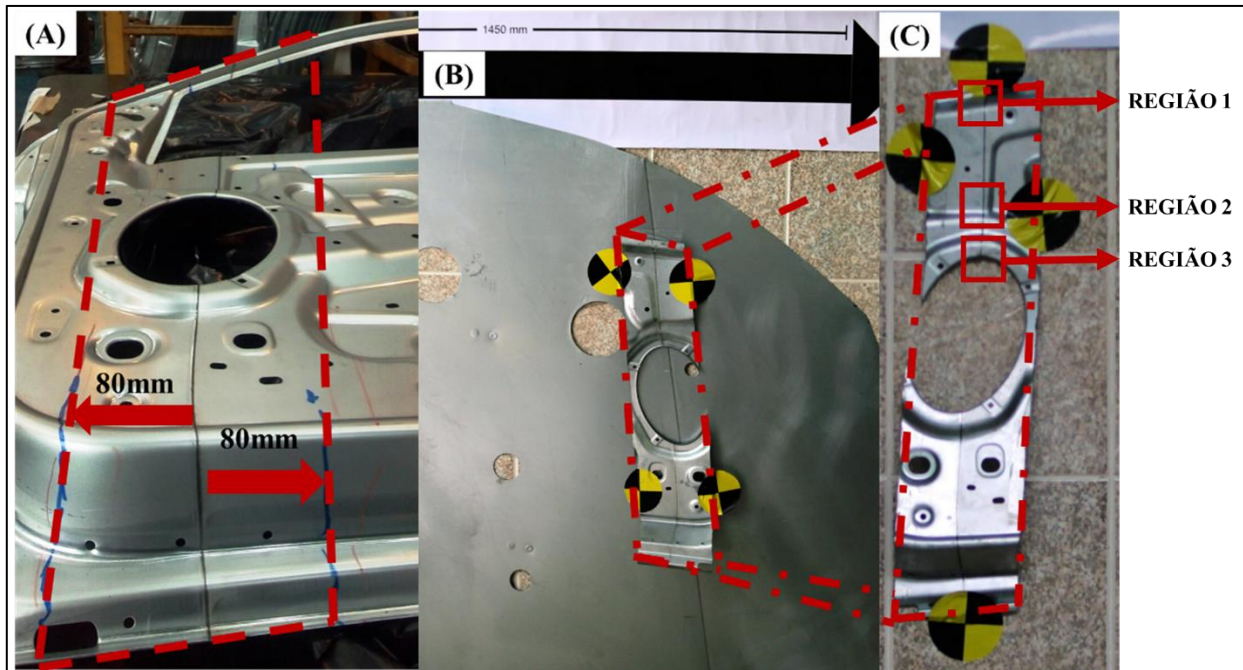


FIGURA 3.5 - (A) Painel interno de porta, com detalhe para região de corte (B) peça cortada, sobreposta à chapa plana de TWB e (C) peça após estampagem e corte, com destaque para regiões analisadas
 FONTE: Autor, 2019.

As regiões foram delimitadas de acordo com os níveis de deformação máxima a que se sujeitaram durante a operação de conformação. Optou-se pela seguinte divisão:

- Região 1 – Submetida basicamente à pressão de sujeição do prensa-chapas
- Região 2 – Submetida à deformação intermediária, próximo à região do alto-falante, com tensões de compressão e de tração
- Região 3 – Submetida a maiores deformações, trata-se da dobra do alto-falante. Há maior atrito e tensões de tração, compressão e cisalhamento

3.2. Métodos

3.2.1. Ensaio de tração uniaxial

Todos os corpos de prova utilizados para execução dos ensaios de tração uniaxial foram extraídos das chapas ainda não conformadas. Os corpos de prova foram cortados por meio de jato de

água. Essa escolha foi feita a fim de minimizar os efeitos do calor que o corte a plasma ou a laser poderia causar na linha de solda. Os CPs dos materiais foram extraídos distantes da linha de solda, em regiões próximas às bordas das chapas não conformadas. Todos os corpos de prova de tração foram cortados no tamanho padrão ASTM E8M (ASTM, 2016), cujas dimensões são apresentadas na FIG.3.6.

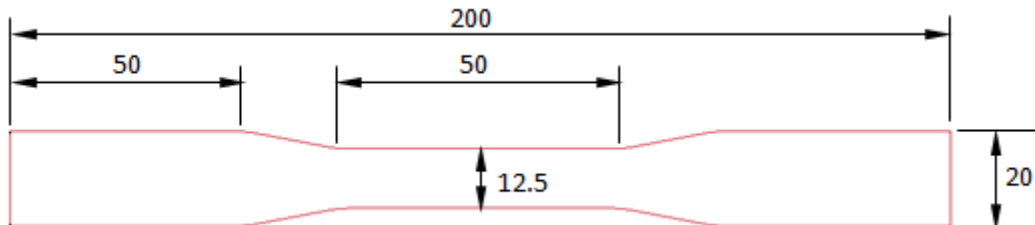


FIGURA 3.6 - Dimensões do corpo de prova padrão para ensaios de tração segundo norma ASTM E-8M

FONTE: Adaptado de ASTM (2016)

3.2.1.1. Materiais de base

Os ensaios de tração uniaxial foram realizados conforme previsto na norma ASTM E-8M (ASTM, 2016). Foram caracterizados primeiramente os materiais de base que compõem o Tailor Welded Blank, conforme apresentados nas FIG. 3.7 e FIG. 3.8.

Para os ensaios do material de base trabalhou-se com uma máquina de ensaios universal Instron[®] 5582, com célula de carga de 10kN, extensômetro óptico e velocidade de deformação de $0,001s^{-1}$. Esses testes foram realizados em conjunto com a FCA Brasil.

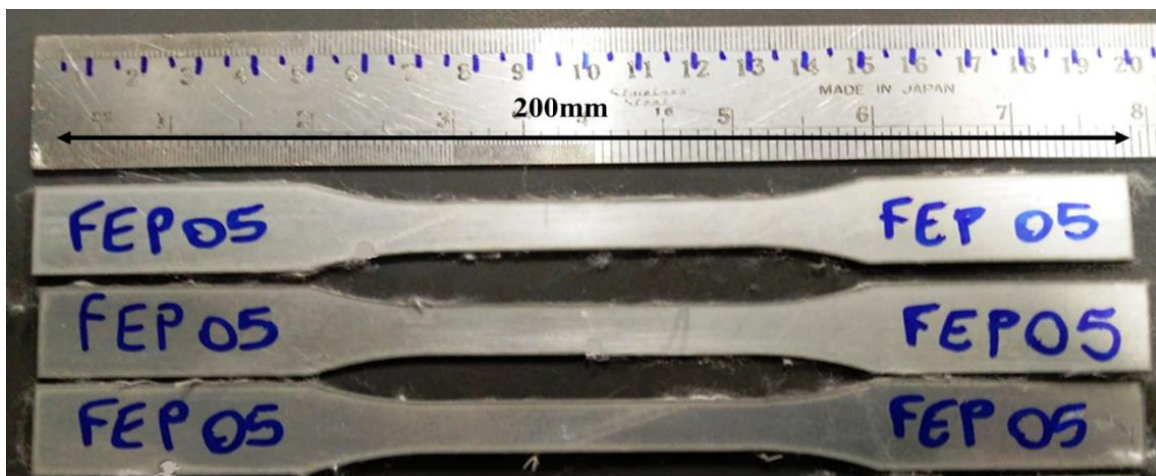


FIGURA 3.7 - Corpos de prova de tração utilizados para caracterização mecânica do material de base FEP 05

FONTE: Autor, 2019

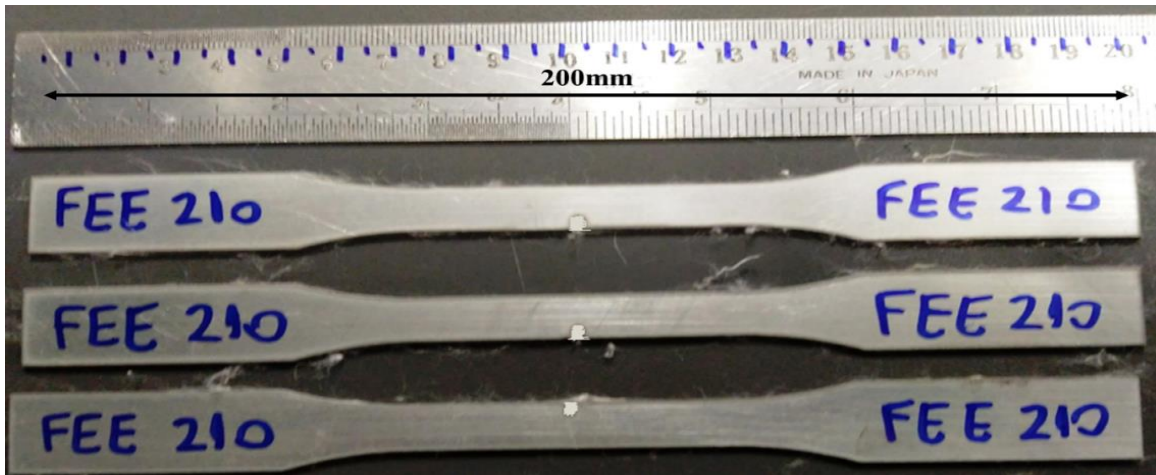


FIGURA 3.8 - Corpos de prova de tração utilizados para caracterização mecânica do material de base FEE 210

FONTE: Autor, 2019

3.2.1.2. Linha de solda

Para caracterização mecânica da linha de solda foram feitos ensaios de tração, também conforme determina norma ASTM E-8M (ASTM, 2016). Optou-se pelo tamanho padrão. Os testes foram executados em conjunto ao Instituto SENAI de Tecnologia Metal Mecânica (ISTMM).

Utilizou-se uma máquina de ensaios da marca KRATOS[®], modelo KE, com célula de carga de 5kN. Trabalhou-se com extensômetro óptico e taxa de deformação de $0,001s^{-1}$.

Todos os corpos de prova foram cortados em dimensões padrão ASTM-E8M (ASTM, 2016). Conforme mencionado, muitos dos testes realizados ou são meramente qualitativos ou focam apenas na conformabilidade, em si. O presente trabalho focou na avaliação da influência da orientação da linha de solda nas propriedades mecânicas do TWB.

Ghoo; Keum; Kim (2001), Xu et al (2014) e Kim et al (2010) defendem que os ensaios de tração podem ser significativos. Caso se opte por orientar a linha de solda em ângulos diferentes dos padrões ($0^{\circ}DL$, $45^{\circ}DL$ e $90^{\circ}DL$), os resultados se tornam mais complexos e representativos.

Os corpos de prova foram orientados, em relação à posição inicial da solda, com angulação variando de 0° a 70° , com valores dos ângulos aumentando a cada 5° . Na FIG. 3.9 apresenta-se, de forma esquemática, como foi programada a extração dos corpos de prova a partir das chapas ainda não conformadas e na FIG. 3.10, apresentam-se alguns CPs utilizados, com destaque para região de angulação da solda.

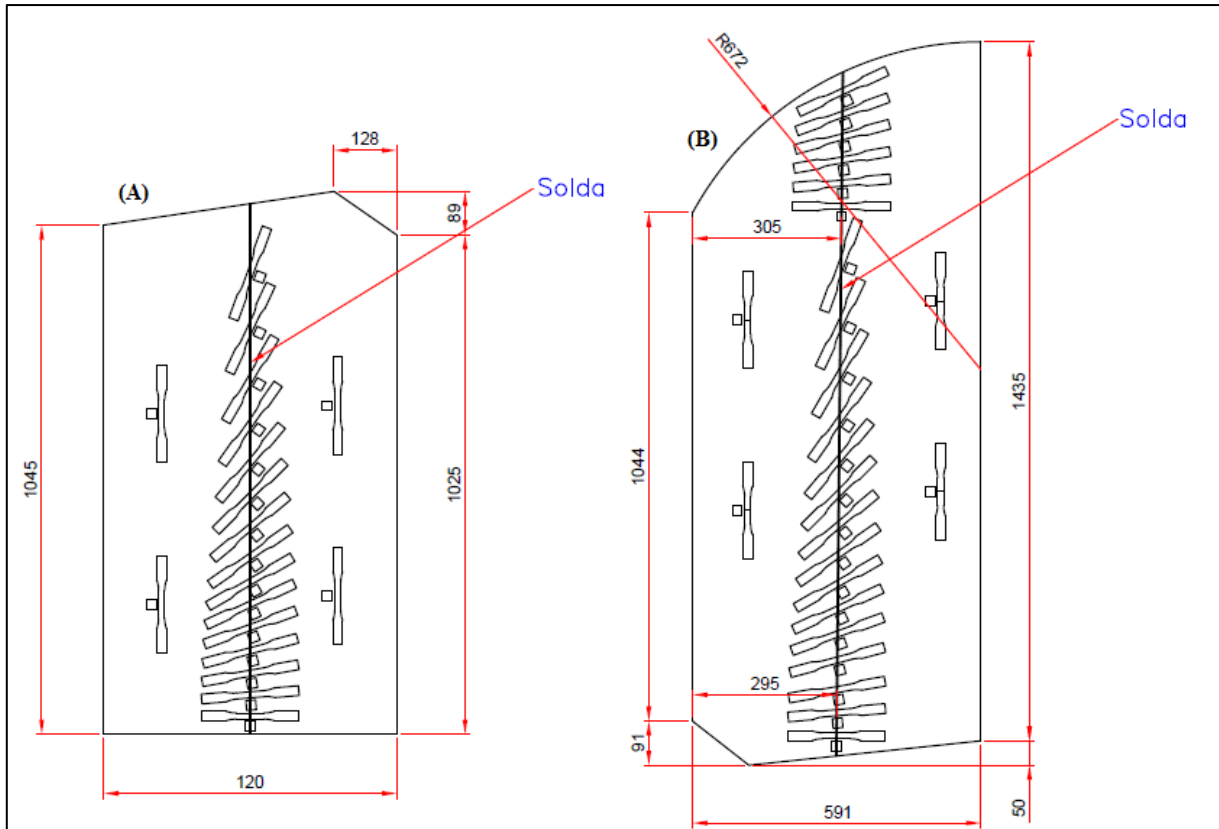


FIGURA 3.9 - Representação esquemática de retirada de corpos de prova de tração das chapas ainda não conformados
 FONTE: Autor, 2019

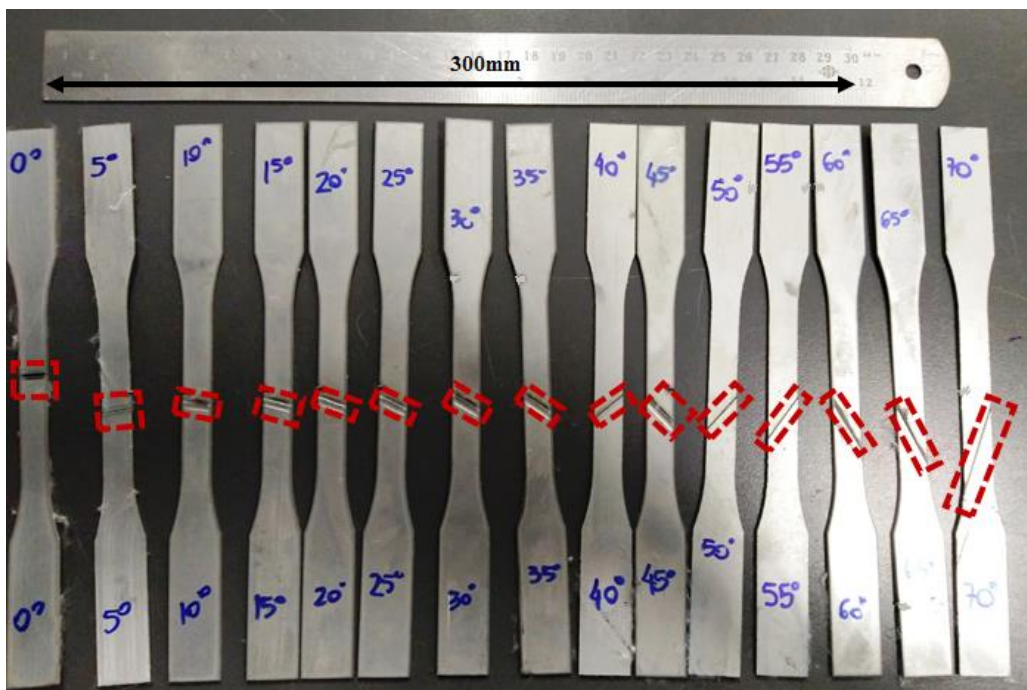


FIGURA 3.10 - Corpos de prova utilizados para execução dos ensaios de tração, com destaque para região da linha de solda
 FONTE: Autor, 2019

Todos os ensaios foram realizados em triplicata. Não se optou por um ângulo superior a 70°, pois conforme apresentado na FIG. 3.9, houve limitações quanto à disponibilidade da chapa para que se fizesse os ensaios em triplicata e se extraísse os corpos de prova da melhor forma possível. Quanto à disposição dos resultados, boa parte dos artigos pesquisados não deixa claro como são calculados os limites de escoamento e de resistência mecânica. Como se tem três espessuras distintas no mesmo corpo de prova (chapa de menor espessura, ZF e chapa mais espessa), não fica claro qual a área da seção transversal utilizar. Essas regiões encontram-se apresentadas na FIG. 3.11.

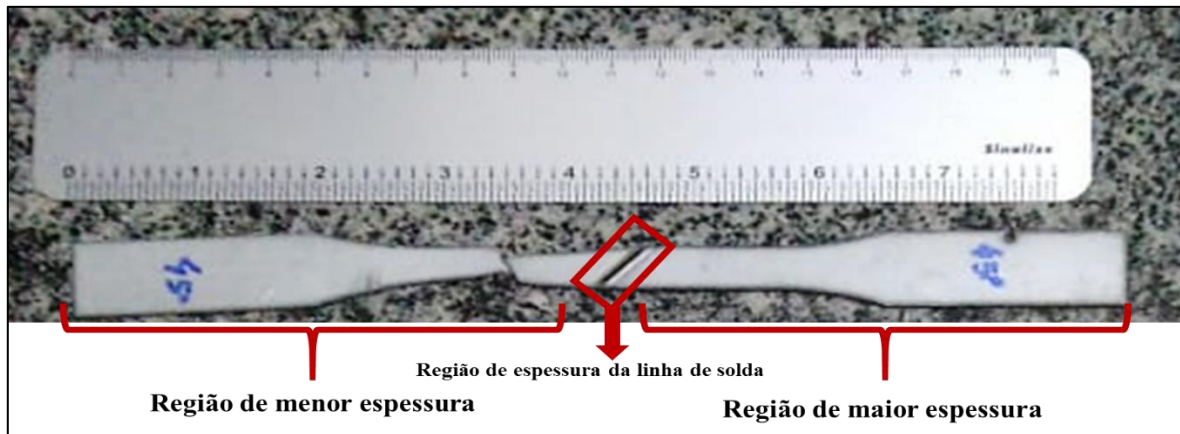


FIGURA 3.11 - Discretização das três regiões de espessuras distintas num corpo de prova de tração extraído na região da linha de solda
 FONTE: Autor, 2019

Embora a ruptura seja esperada na chapa menos espessa, isso nem sempre acontece. Em virtude dessas dificuldades optou-se por tratar os resultados apenas em função da carga máxima suportada por cada corpo de prova. Nos artigos e demais referências estudadas e aqui abordadas, os autores não deixam claro a forma como fizeram os cálculos para LE e LRT. Como os resultados são dispostos já em MPa e não se informa a carga de ruptura [N], não foi possível obter com clareza qual exatamente o método adotado para tais cálculos (como, por exemplo, utilização da espessura média dos corpos de prova).

3.2.2. Determinação do perfil de microdureza

Os ensaios de microdureza foram realizados conforme previsto nas normas ASTM E-92 (ASTM, 2017) e ASTM E384 (ASTM, 2017). Com base nos trabalhos de Panda et al (2007) e de Li et al (2013) e em testes preliminares determinou-se carga de indentação de 300g.f, por um período de 15s.

Na FIG. 3.12 apresenta-se, de forma esquemática, o método utilizado para coleta de dados e traçagem do perfil de microdureza do TWB. Os ensaios também foram realizados em triplicata, sobre a mesma amostra. Inferiu-se a extensão das ZTAs e da ZF e avaliou-se a homogeneidade dos materiais de base.

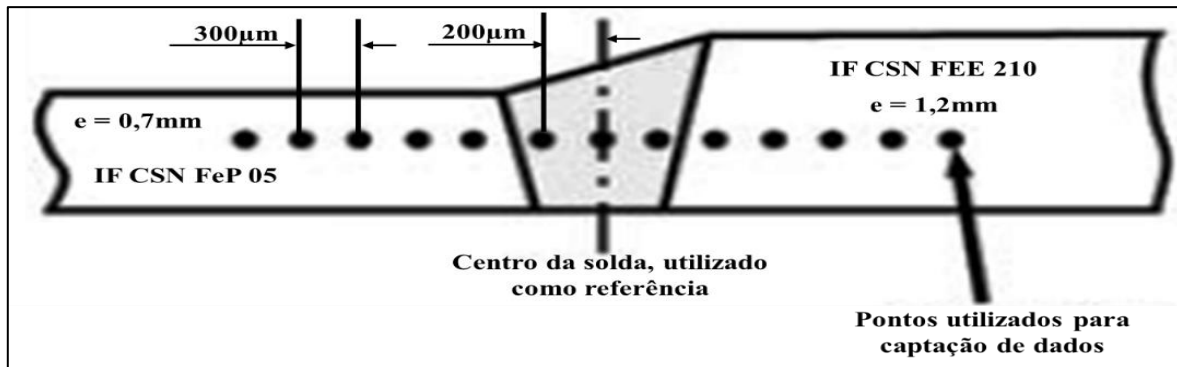


FIGURA 3.12 - Representação esquemática do método utilizado para coleta de dados de microdureza
 FONTE: Adaptado de CHENG; CHAN; CHOW, 2007

As amostras para execução desse ensaio foram cortadas de uma pequena região do blank, entre os corpos de prova de tração. O corte foi feito mecanicamente, por meio de tesouras. Optou-se pelo embutimento a frio, com resina poliéster Cristal[®] 5061. Posteriormente, foram lixadas com lixas #80, #150, #320, #600, #1200 e #2000.

Após o lixamento, optou-se pelo polimento com alumina em suspensão de 1µm. O ataque foi feito com Nital a 5%. Os ensaios de microdureza foram realizados com auxílio de um microdurômetro Shimadzu[®] HMV 2T. Para realização da triplicata nas amostras, partiu-se da metade da espessura da chapa mais fina. A partir de então, as novas medições foram feitas a cerca de 350µm acima e abaixo das primeiras endentações.

3.2.3. Análises metalográficas

As análises metalográficas foram feitas seguindo recomendações da norma ASTM E-3 (ASTM, 2017), do livro “Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns” (COLPAERT, 2008) e de artigos científicos utilizados para elaboração das referências (CHENG; CHAN; CHOW, 200; MA; GUAN; YANG, 2015; KOROUYEH; NAEINI; LIAGHAT, 2012; SAFDARIAN, 2016; XU et al, 2014; KINSEY; CAO, 2003; KINSEY; WU, 2011; KOROUYEH; NAEIN; LIAGHAT, 2012).

Foram retiradas amostras diretamente do blank, de perfil e de topo. A fim de avaliar o efeito da angulação relativa da linha de solda na microestrutura e da área da linha de solda, foram confeccionadas amostras com diferentes ângulos de inclinação em relação à posição inicial da solda.

Essas amostras foram analisadas de perfil, com ângulos relativos de 15°, 20°, 25°, 30°, 40°, 45° e 60°. A extração de amostras, de forma manual, era dificultada e não houve, dentre as referências pesquisadas neste estudo, metodologia similar para tal análise. Os ângulos foram selecionados tanto de acordo com a disponibilidade das chapas cedidas quanto pela relativa possibilidade de extração de amostras sem danificar a região de análise. Essa angulação e algumas das amostras encontram-se apresentadas na FIG. 3.13.

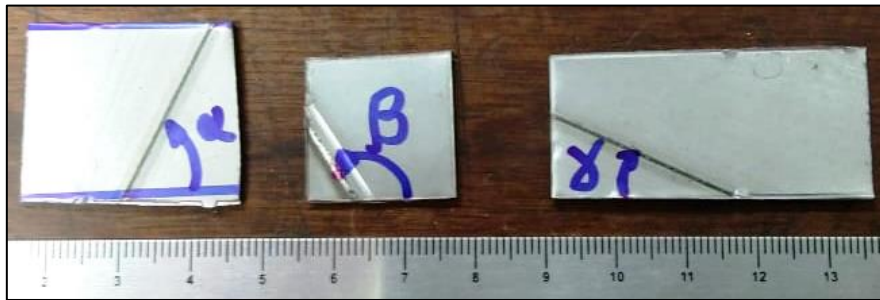


FIGURA 3.13 - Exemplo de amostras para análise metalográfica, com indicação relativa de diferentes ângulos aleatórios
 FONTE: Autor, 2019.

Após a retirada das amostras, optou-se pelo método de embutimento a frio, com resina epóxi. Trabalhou-se com a resina Cristal 5061 e com o catalisador MEK. A resina foi preparada na proporção de 30 gotas de catalisador para cada 100g de resina. Para pesagem das quantidades utilizou-se uma balança de precisão BEL Engineering® M214.

Na FIG. 3.14 apresentam-se o molde utilizado para embutimento das amostras e algumas amostras, identificadas, após a preparação inicial.



FIGURA 3.14 - Molde utilizado para embutimento a frio e exemplos de amostras metalográficas, já embutidas, identificadas
 FONTE: Autor, 2019

Para preparação das amostras após o embutimento foram utilizadas lixadeiras automáticas circulares e manuais de bancada. O lixamento com lixas #80, #150 e #320 ocorreu nas lixadeiras automáticas e com as lixas #600, #1200, #1500 e #2000, na de bancada.

Em seguida prosseguiu-se, com auxílio de politriz circular automática, o polimento com alumina em suspensão de 1 μ m. Após o polimento as amostras foram lavadas com auxílio de álcool isopropílico e água e secadas com secador.

O ataque químico foi realizado com Nital a 5%, utilizando a técnica de esfregaço, com cerca de 10 esfregaços em cada sentido. Logo após o ataque as amostras foram limpas também com auxílio de álcool isopropílico e água e secas com secador.

Na FIG. 3.15 apresentam-se os equipamentos utilizados para preparação metalográfica.



FIGURA 3.15 - Equipamentos utilizados para preparação metalográfica. (A) Lixadeira politriz automática (B) lixadeira de bancada manual e (C) politriz automática para uso de discos com alumina (Al_2O_3)
FONTE: Autor, 2019

As análises microestruturais foram realizadas com auxílio de um microscópio óptico modelo Olympus[®] BX 60MF5. Sobre o microscópio foram acopladas uma lente objetiva de 10X de aumento Olympus[®] U-TV 0.5XC e uma câmera digital de alta definição TOUPCAM[™] UCMOS 03100KPA.

A coleta de dados ocorreu através de um cabo USB diretamente acoplado à lateral da câmera de alta definição. Utilizou-se o *software* ToupTek[®] ToupView x64 para tratamento inicial das imagens. Para cada amostra selecionada, a fim de percorrer os metais de base, a ZTA e a ZF foram extraídas cerca de 30 imagens.

Para a correção, tratamento e união das imagens trabalhou-se com o *software* Adobe[®] PhotoShop CS5. O *software* ImageJ[®] foi utilizado para análises dimensionais e inserção e calibração de barras de escala.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos por meio da caracterização mecânica (ensaios de tração) e das análises micrográficas e de microdureza das chapas obtidas por meio da técnica de *Tailor Welded Blanks*

4.1. Ensaios de tração uniaxial

Na TAB. 4.1 apresenta-se a média dos resultados obtidos para caracterização mecânica dos materiais de base.

TABELA 4.1 - Relação dos valores médios de propriedades mecânicas dos materiais de base do TWB

Material	LE [MPa]		LRT [MPa]		R		Alongamento [%]		n	
	Fornecido	Encontrado	Fornecido	Encontrado	Fornecido	Encontrado	Fornecido	Encontrado	Fornecido	Encontrado
IF CSN FEE 210	217	219	346	344	2,00	1,90	40	39	0,20	0,21
IF CSN FEP 05	157	145	284	279	2,50	2,63	50	46	0,23	0,25

FONTE: Autor, 2019

Os valores encontrados são compatíveis com os fornecidos pela CSN (2019) e também com o que se define pela norma NBR 5906 (ABNT, 2008) e NBR 5915-1 (2013). Tratam-se, portanto, de aços IF, de elevada estampabilidade e adequados para fabricação de peças críticas, como os painéis de porta, dos quais fazem parte.

Os maiores valores de resistência mecânica do aço IF FEE 210 devem-se a seus maiores percentuais de carbono e manganês, que tornam a matriz relativamente mais dura (KRAUSS, 1990; CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Isso é refletido também na menor ductilidade relativa (menor valor de alongamento) e no menor expoente de encruamento (HOSFORD; CADDELL, 2007).

Quanto aos corpos de prova obtidos a partir da técnica de TWB, os resultados detalhados dos ensaios encontram-se apresentados na TAB. A.1, no Apêndice A.

Na FIG. 4.1 apresenta-se a relação entre a carga média de ruptura e o ângulo de inclinação relativa da linha de solda dos diferentes corpos de prova de tração de TWB testados.

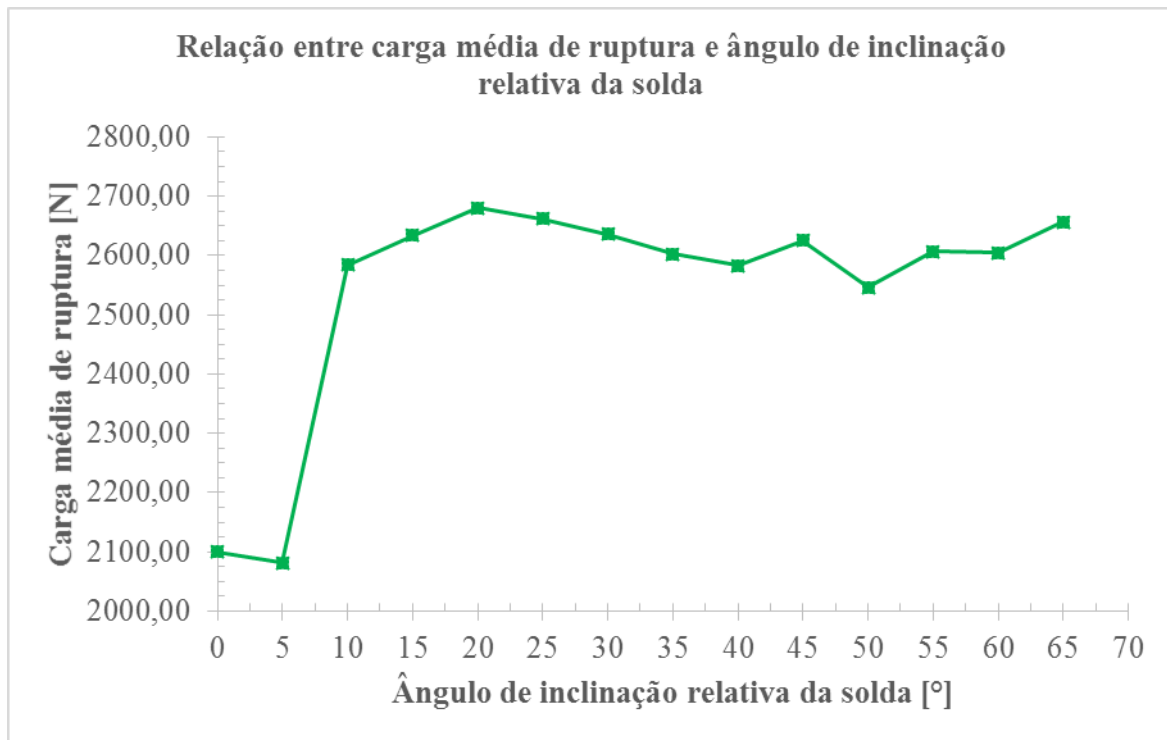


FIGURA 4.1 - Relação entre a carga média de ruptura e o ângulo de inclinação relativa da linha de solda
 FONTE: Autor, 2019.

Verifica-se que um aumento abrupto de carga limite de ruptura quando o ângulo de inclinação relativa da linha de solda ultrapassa os 10°. Como os corpos de prova destes ângulos não foram retirados sempre da mesma chapa e na mesma região, além dos ensaios terem sido feitos em triplicata, descarta-se influências do blank e erros experimentais que poderiam, num primeiro momento, explicar esse padrão.

O valor máximo de carga é atingido por volta dos 20° de inclinação, a partir do instante em que há leve queda. Entre 45° e 50° tem-se uma relativa piora. Os valores de carga para os ângulos subsequentes são similares aos seus ângulos complementares. Para 70°, por exemplo, tem-se uma carga muito similar a de 20°.

Aparentemente, o aumento da carga ao se aumentar o ângulo pode ser explicado pela maior área ocupada pela linha de solda, de acordo com a EQ. (4.1).

$$A_s = \frac{L_{CP}}{\cos \delta} \cdot e_s \quad (4.1)$$

Na qual:

- A_s = Área ocupada pela linha de solda [mm²]
- L_{CP} = Largura útil do corpo de prova de tração [mm]

- δ = Ângulo de inclinação relativa da solda [°]
- e_s = Espessura média da linha de solda [mm]

Sendo assim, quanto maior o ângulo de inclinação relativa, maior tende a ser a área ocupada pela linha de solda. Como se espera que a solda apresente maior limite de resistência à tração que ambos os materiais de base, a carga de ruptura tende então a aumentar.

No entanto, esse comportamento não é linear. Conforme apontado por Gong et al (2016), Kim et al (2016) e Wei et al (2015), a solda nem sempre é homogênea, tampouco o material. A inclinação relativa pode induzir no corpo de prova outras tensões que não a puramente de tração, o que também contribui com a não linearização do comportamento. Lida-se com anisotropia e extensão e microestrutura relativa da Zona Termicamente Afetada (ZTA).

Não há, no entanto, consenso quanto aos fatores que podem gerar aumento ou redução da resistência mecânica de *TWBs* com o posicionamento relativo da linha de solda. Isso é apontado nos trabalhos de Gong et al (2016), Li et al (2013), Assunção; Quintino; Miranda (2009) e reafirmado por Riahi et al (2013).

Quanto à questão da indução de tensões que não as puramente de tração, optou-se por decompor a carga limite de ruptura em carga trativa e carga cisalhante. Partiu-se do princípio da variação das tensões que atuam num material acordo com o plano de corte, apresentado na FIG. 2.2.

As cargas atuantes no CP foram decompostas com base na FIG. 2.3 e nas EQ. (2.1) e EQ. (2.2). Na FIG. 4.2 apresenta-se a relação entre a carga de ruptura puramente de tração e o ângulo de inclinação relativa da solda.

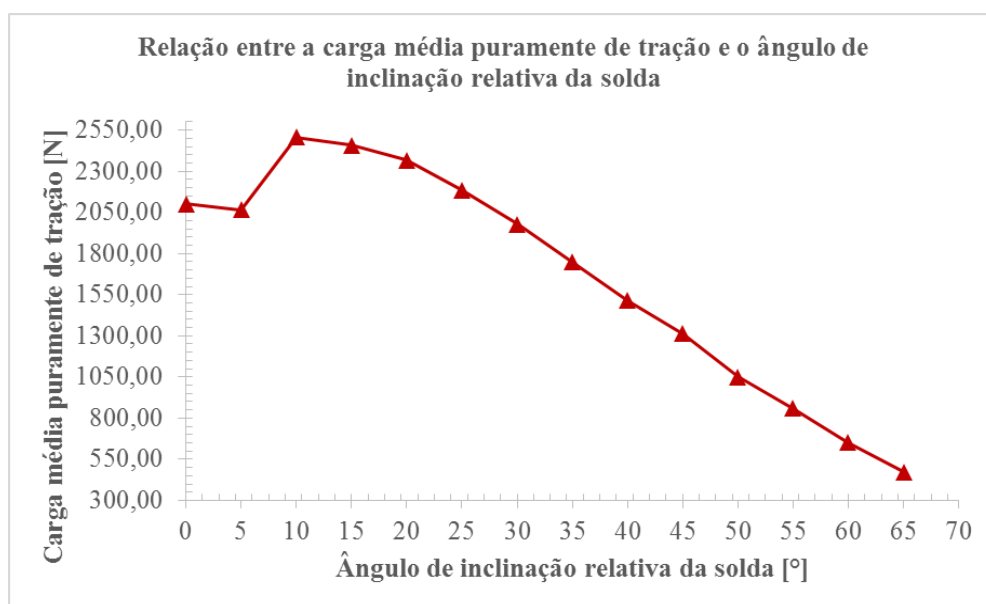


FIGURA 4.2 - Relação entre a carga de ruptura puramente de tração e o ângulo de inclinação relativa da linha de solda
 FONTE: Autor, 2019.

Verifica-se, conforme previsto por Cetlin; Helman (2005), Callister; Rethwisch (2016) e Hosford; Caddell (2007), que há uma tendência de que, à medida que se inclina a solda, a tensão puramente de tração diminua. Isso porque, conforme a EQ. (2.1), um aumento no ângulo gera uma diminuição em seu cosseno, chegando-se à um limiar de nulidade para tração puramente dita, ao se trabalhar com um plano de corte a 90°. Esses resultados estão condizentes com os trabalhos realizados por Li; Lin (2015), Riahi et al (2013) e Zadpoor; Sinke e Benedictus (2007).

Porém, esperava-se que a pior condição ocorresse com um ângulo de 45°, conforme apontado Narayanan; Naik (2010), porque nos referidos trabalhos executaram-se apenas testes de embutimento, nos quais o material sujeita-se ao estiramento e à uma condição multiaxial de tensões. Esse estado de tensões e deformações tende a ser agravado com a solda orientada a 45°.

De acordo com Parente et al (2015), um ângulo que seria favorável à resistência mecânica e à conformabilidade de TWBs seria o de 90° em relação à direção de laminação. No entanto, os resultados mostram que, caso continue-se com a tendência apresentada na FIG. 4.1 e na FIG. 4.2, isso não seria verdade.

Essa afirmativa contraria também as boas práticas de soldagem e os trabalhos apresentados por Riahi et al (2012), Kinsey; Liu e Cao (2000) e Li et al (2015), os quais orientam que a solda não deve ser posicionada paralelamente à direção de laminação. Caso isso ocorra, trincas podem se propagar com mais facilidade, percorrendo todo o entorno da linha de solda, sem encontrar obstáculos.

Quanto às tensões de cisalhamento, na FIG. 4.3 apresenta-se a relação entre a carga cisalhante e o ângulo de inclinação relativa da linha de solda.

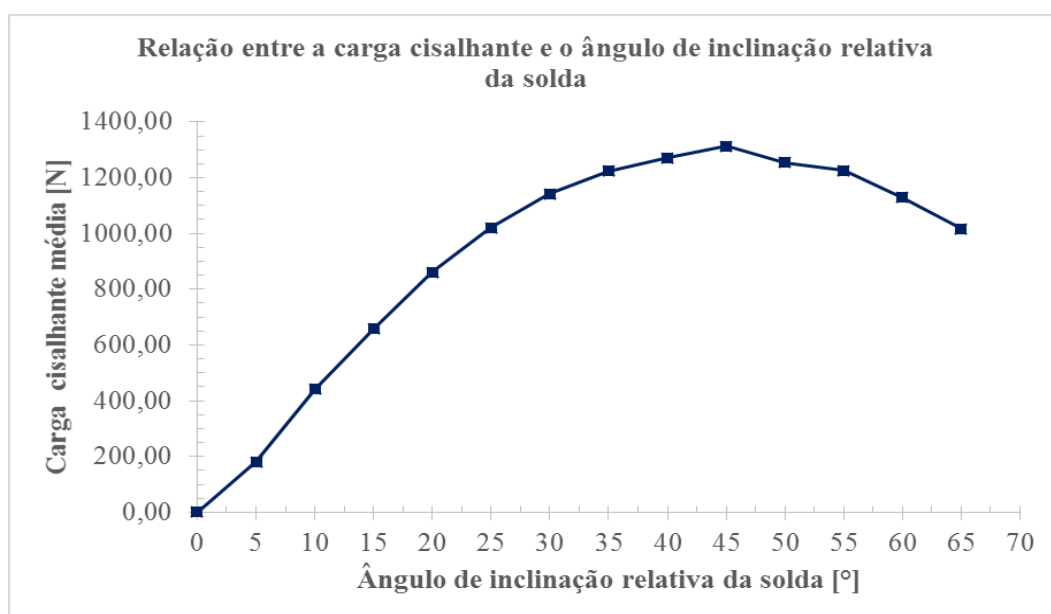


FIGURA 4.3 - Relação entre a carga cisalhante de ruptura e o ângulo de inclinação relativa da linha de solda

FONTE: Autor, 2019.

Verifica-se que a carga cisalhante, conforme indicado pela EQ. (2.2), assume seu valor de máximo para um ângulo de 45° . Apesar de aparentemente simples, essa constatação não é trivial. Matematicamente, ângulos complementares possuem valores inversos de cosseno e de seno ($\sin 30^\circ = \cos 60^\circ$). Daí, de acordo com a EQ. (2.2), o produto $\sin\Theta \cdot \cos\Theta$ é idêntico para ângulos complementares. Ocorre, no entanto, que há também a dependência da carga aplicada sobre o plano de corte, o que aparentemente independe do ângulo de inclinação relativa da solda.

Porém, de acordo com os resultados apresentados na FIG. 4.1, esses valores de carga seguem um comportamento similar ao produto $\sin\Theta \cdot \cos\Theta$. Em decorrência disso a tensão cisalhante exibe o padrão apresentado na FIG. 4.3.

Esse padrão não foi encontrado em nenhum dos artigos pesquisados. Talvez porque a maioria dos trabalhos não ultrapasse as análises com 0° DL, 45° DL e 90° DL. No estudo desenvolvido por Li et al (2015) foram feitos corpos de prova com ângulos de 30° e 60° . No entanto, não se focou na análise da tensão cisalhante, apenas na deformação, para a alimentação da técnica de correlação digital de imagem.

Outras pesquisas similares, como as desenvolvidas por Riahi et al (2012) e por Safdarian (2016), deslocaram a linha de solda em relação ao centro do TWB. Constatou-se que, em termos de tração, praticamente não há diferença perceptível entre os resultados. No entanto, em ambos os trabalhos se observou relativa redução de conformabilidade ao se trabalhar com o teste de altura limite do domo (LDH), quando se desloca a linha de solda em direção ao material de menor resistência mecânica.

Para análise do padrão apresentado na curva de tensão cisalhante da FIG. 4.3 verificou-se a tendência da deformação verdadeira exibida pelos diferentes corpos de prova, conforme se apresenta na FIG. 4.4.

Pode-se verificar que os menores valores de deformação são obtidos quando a solda praticamente não exibe inclinação relativa (0° e 5°). Esse comportamento é similar ao da carga limite de ruptura. Isso porque, como se trabalha com materiais relativamente dúcteis, espera-se que quanto maior a carga de ruptura, maior tenderá a ser a deformação.

Nota-se mais uma vez a similaridade de valores de deformação para ângulos complementares. Conforme apontado por Dowling (2013), Dharan, Kang e Finnie (2016), Affonso (2007), na teoria da Mecânica da Fratura, quando um material apresenta matriz relativamente dúctil, sua fratura é determinada primordialmente pelas tensões de cisalhamento que atuam em seus planos de deslizamento.

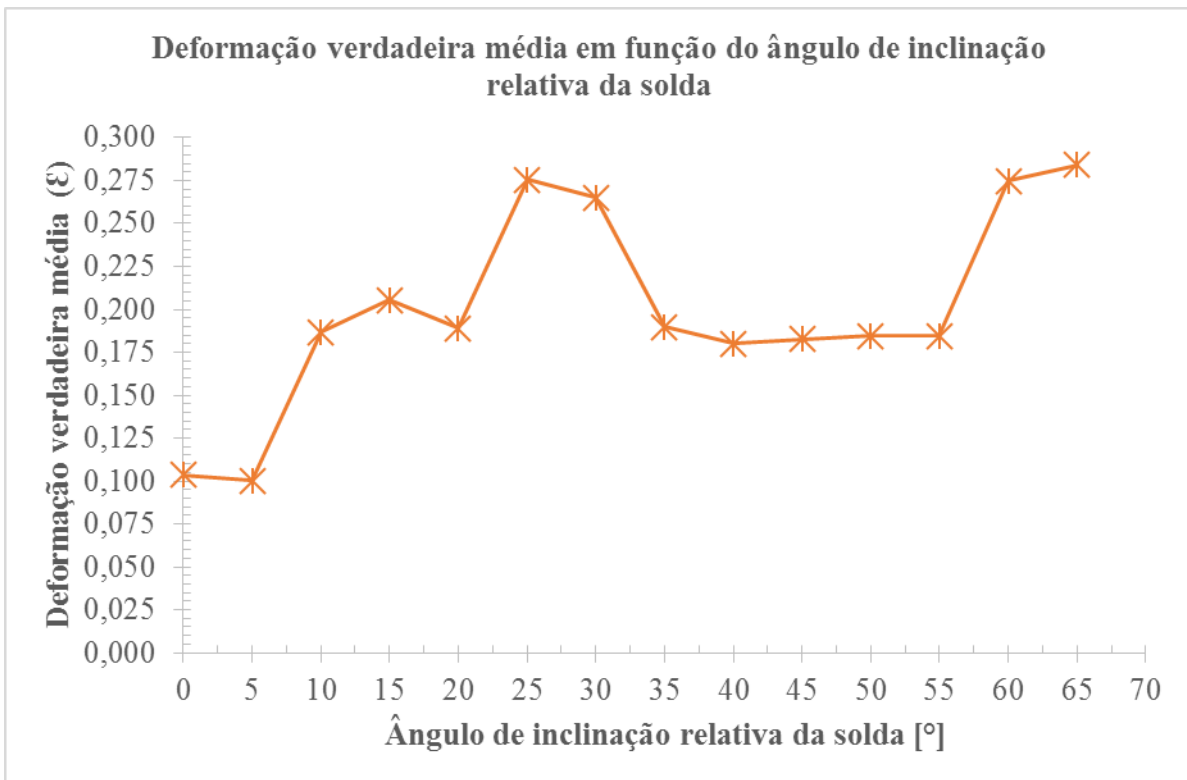


FIGURA 4.4 - Relação entre a deformação verdadeira e o ângulo de inclinação relativa da linha de solda
 FONTE: Autor, 2019.

Ressalta-se que observações similares foram constatadas por Li; Lin (2015), trabalhando com a solda orientada a 30°, 45°, 60° e 90°, em que o foco do trabalho foi o emprego da técnica de correlação digital de imagens. Os resultados encontrados por Li et al (2015), apresentados na FIG. 4.5 são similares ao do presente estudo.

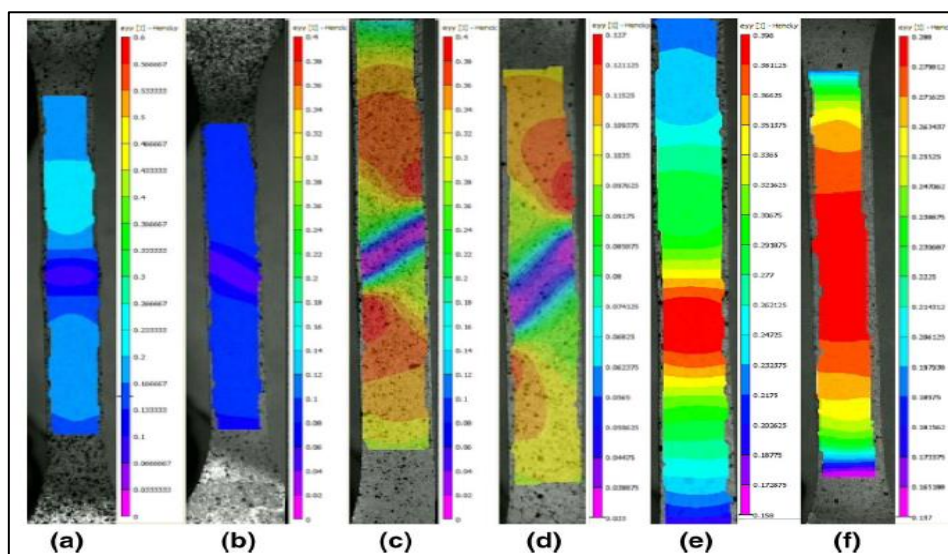


FIGURA 4.5 - Mapas de deformação dos corpos de prova de tração dos TWBs e do MB
 (a) 90°, (b) 60°, (c) 45°, (d) 30°, (e) 0° e (f) MB
 FONTE: Adaptado de Li; Lin (2015)

Há aumento da deformação máxima dos corpos de prova à medida que o ângulo de inclinação relativa da solda aumenta. Percebe-se também leve aumento da área ocupada pela linha de solda. Na FIG 4.6 evidencia-se a similaridade do aspecto geométrico da fratura dos corpos de prova cuja orientação relativa da linha de solda é composta por ângulos complementares. Reafirma-se então o que é apontado por Dowling (2013), Dharan, Kang e Finnie (2016), Affonso (2007), na teoria da Mecânica da Fratura: a carga cisalhante que atua em materiais tipicamente dúcteis é a que determinará a movimentação de seus planos de cisalhamento microscópicos, governando o aspecto macrográfico (geométrico) da fratura.

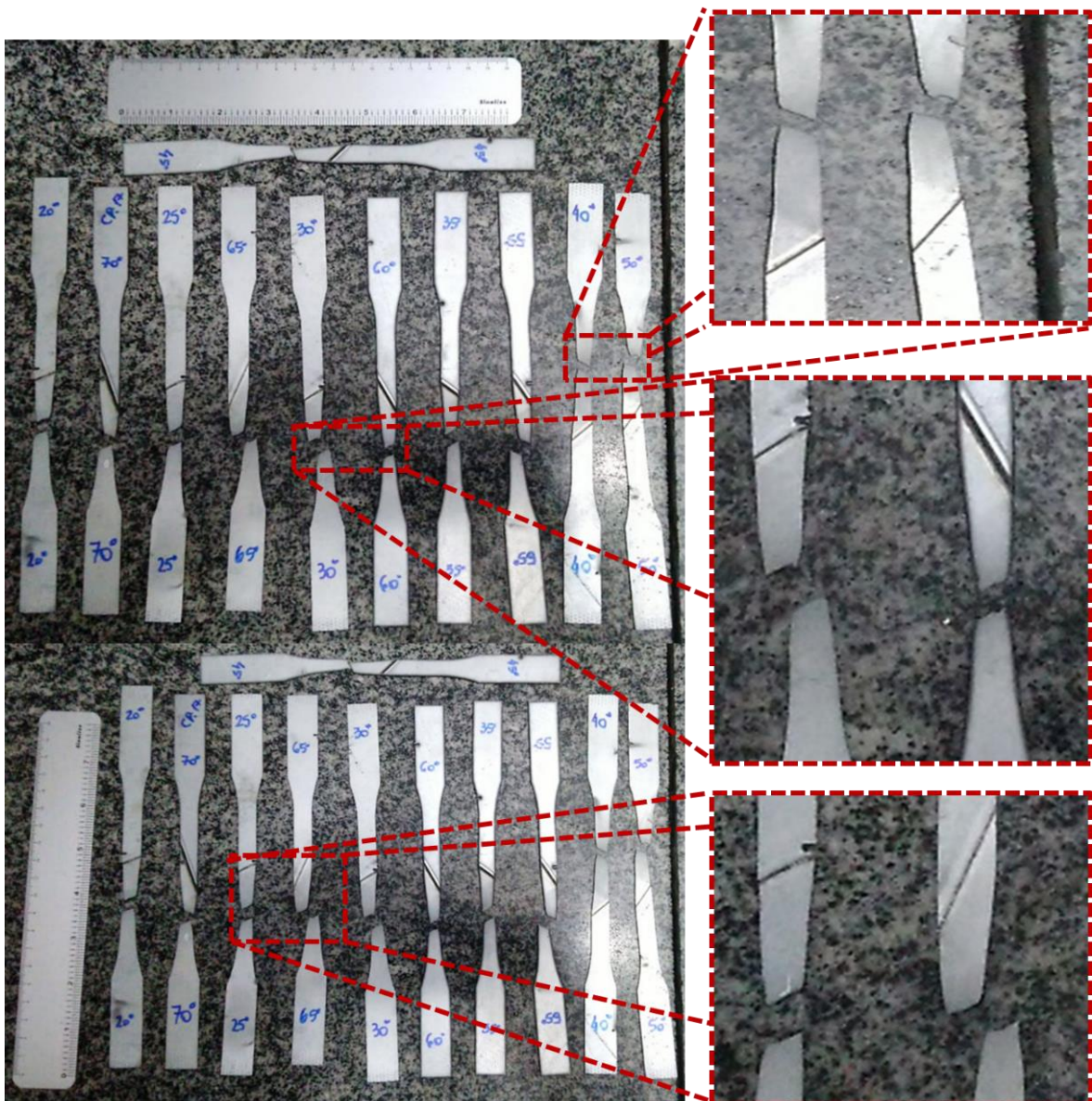


FIGURA 4.6 - Aspecto visual da fratura de diferentes corpos de prova cujos ângulos relativos de inclinação da solda são complementares

FONTE: Autor, 2019.

4.2. Perfil de microdureza

Na FIG. 4.7 apresenta-se o perfil médio de microdureza das chapas analisadas.

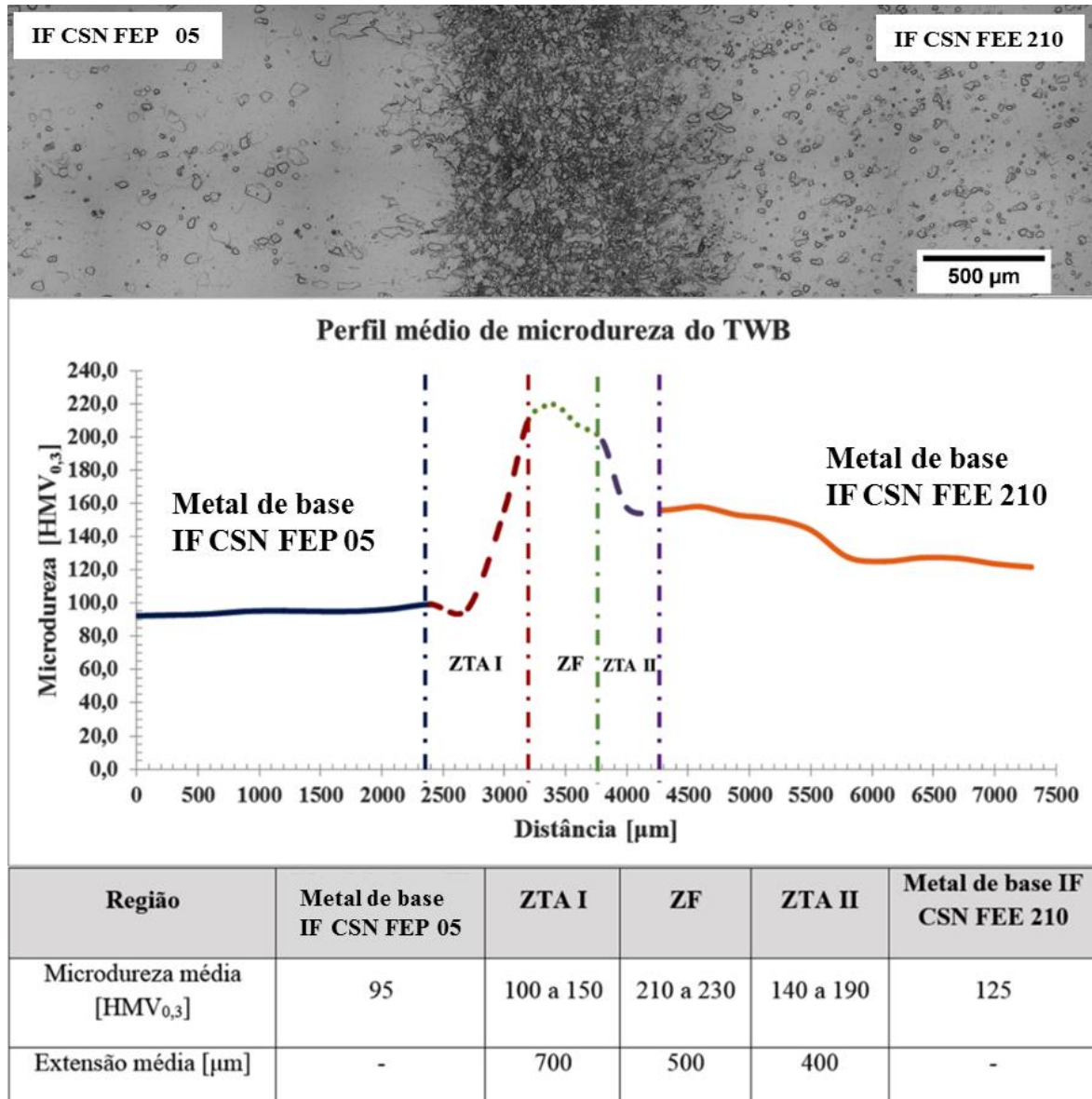


FIGURA 4.7 - Perfil médio de microdureza, com delimitação de regiões da solda do TWB segundo perfil médio de microdureza
 FONTE: Autor, 2019.

O comportamento apresentado é típico de um TWB composto de aços IF, soldado a laser. Perfis similares foram encontrados nos trabalhos de Korouyeh; Naeini e Liaghat (2012) e Min; Kim e Kang (1998). A relativa distorção presente no gráfico a partir de 5500µm deve-se provavelmente a três fatores: erros de medição, heterogeneidades do material e método de corte manual utilizado para preparação da amostra.

Embora os artigos apresentados não façam essa estimativa, optou-se por fazê-la a fim de analisar o efeito da soldagem em ambos os materiais de base. Pode-se verificar que o material de base IF CSN FEE 210 é, de fato, mais resistente mecanicamente. Talvez por esse fator o crescimento de grão seja mais limitado e sua ZTA tenha menor extensão que a do IF CSN FEP05.

A ZF apresenta extensão média de 500 μ m e sua maior dureza deve-se, conforme apontado pelos trabalhos de Min; Kim e Kang (1998) e Korouyeh; Naeini e Liaghat e por Krauss (1990) e Callister; Rethwisch (2016) à formação de bainita e de precipitados duros de Ti, Nb e TiNb.

4.3. Análises metalográficas

Na FIG. 4.8 apresenta-se a vista de topo de uma de amostra não conformada.

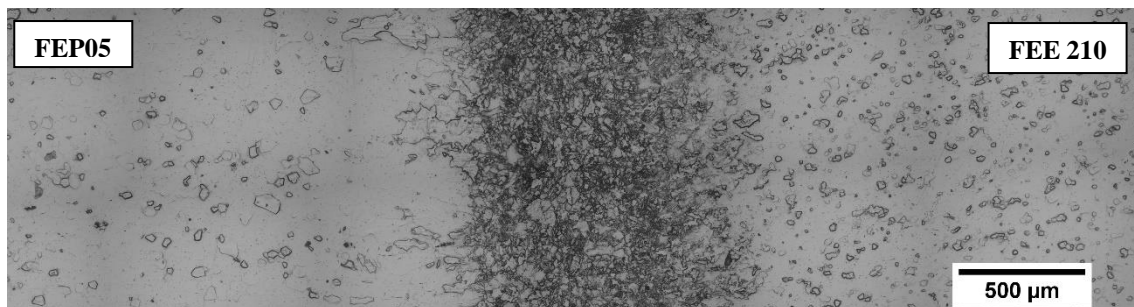


FIGURA 4.8 - Vista de topo de amostra não conformada
FONTE: Autor, 2019.

Na FIG. 4.9 apresenta-se a vista de perfil, da mesma amostra não conformada.

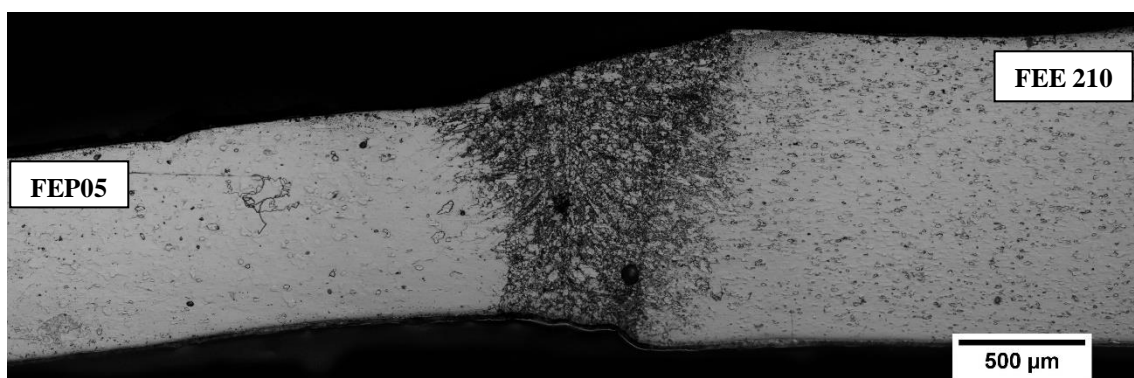


FIGURA 4.9 - Vista de perfil de amostra não conformada
FONTE: Autor, 2019

A microestrutura exibe, em ambos os materiais de base, matriz ferrítica. Verifica-se também que a soldagem, como apresentado na Metodologia, foi feita perpendicularmente à direção de laminação de ambos os materiais.

O material da chapa menos espessa, IF CSN FEP05, apresenta grãos ligeiramente maiores e marcações de microdureza menores. Isso é compatível com o apresentado por Colpaert (2008) e Callister; Rethwisch (2016) e com o observado nos trabalhos de Min; Kim e Kang (1998) e Korouyeh; Naeini e Liaghat (2012).

Quanto maiores os teores de carbono e de manganês, maior tende a ser a dureza do aço IF. O IF CSN FEE 210 também apresenta maior quantidade de fósforo e menores teores de titânio e de nióbio. Esse conjunto de fatores pode ser o responsável pelo menor tamanho de grão, maior dureza e propriedades mecânicas relativamente superiores desse material em relação ao IF CSN FEP 05.

A fim de avaliar os efeitos da angulação relativa da linha de solda foram feitas amostras metalográficas com diferentes ângulos para solda. Essas amostras, com ângulos de inclinação de 20°, 25°, 30°, 40°, 45°, 60° e 75° encontram-se apresentadas nas FIG. 4.10, FIG. 4.11, FIG. 4.12, FIG. 4.13, FIG. 4.14, FIG. 4.15 e FIG. 4.16, respectivamente.

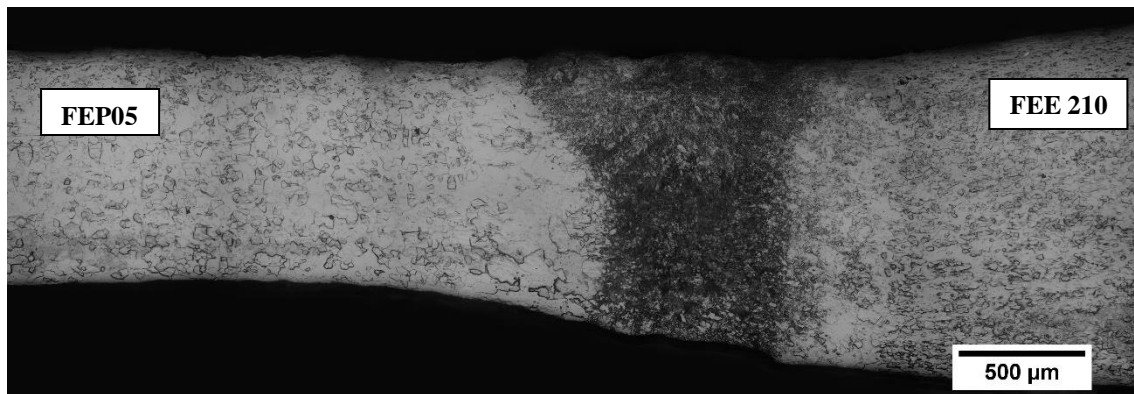


FIGURA 4.10 - Vista de perfil de amostra não conformada, com solda angulada a 20°
FONTE: Autor, 2019

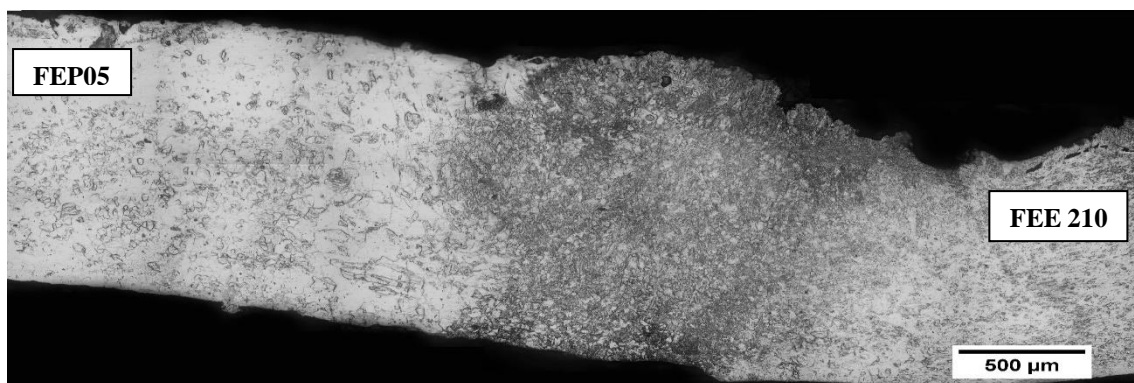


FIGURA 4.11 - Vista de perfil de amostra não conformada, com solda angulada a 25°
FONTE: Autor, 2019

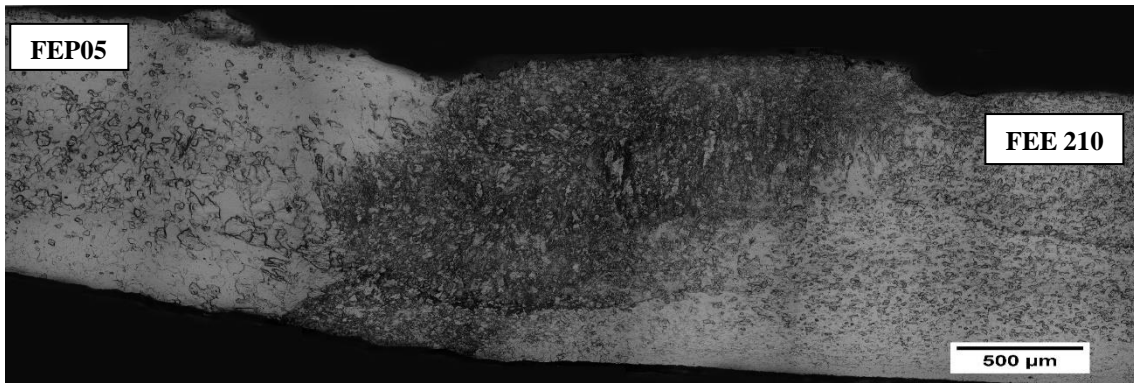


FIGURA 4.12 - Vista de perfil de amostra não conformada, com solda angulada a 30°
FONTE: Autor, 2019

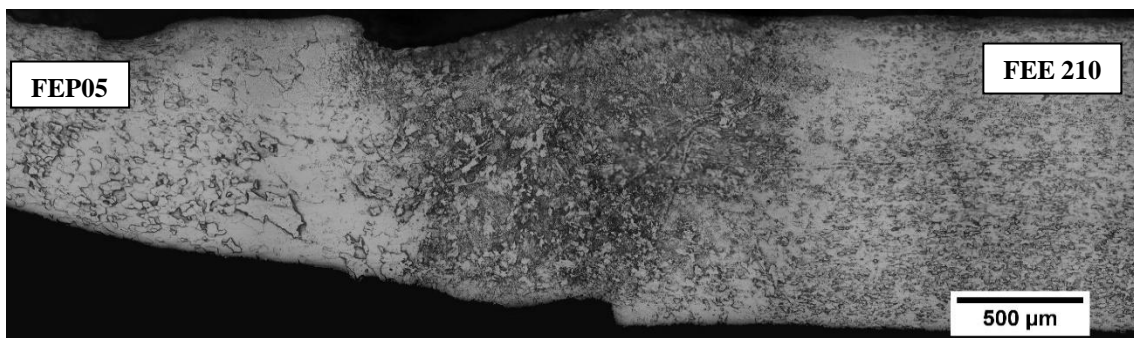


FIGURA 4.13 - Vista de perfil de amostra não conformada, com solda angulada a 40°
FONTE: Autor, 2019

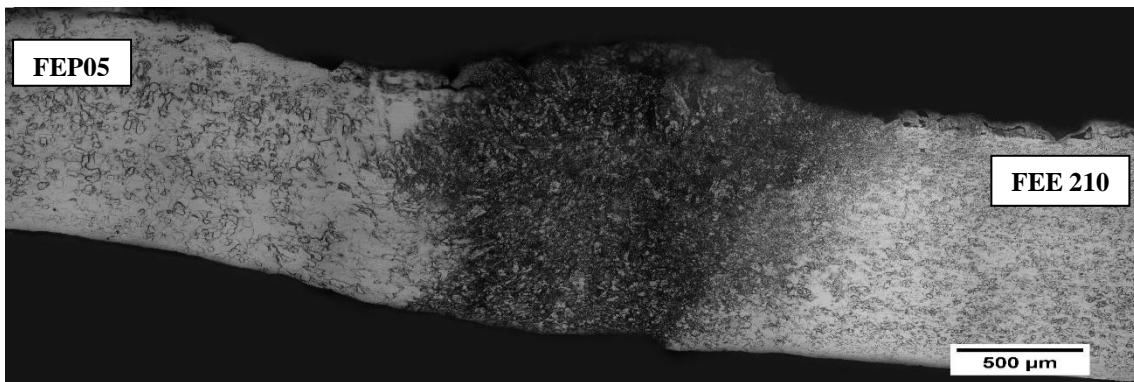


FIGURA 4.14 - Vista de perfil de amostra não conformada, com solda angulada a 45°
FONTE: Autor, 2019

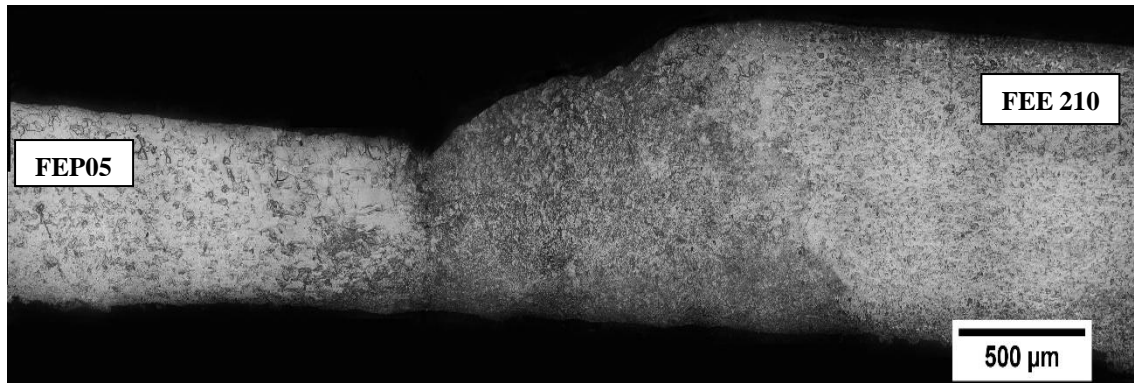


FIGURA 4.15 - Vista de perfil de amostra não conformada, com solda angulada a 60°
 FONTE: Autor, 2019

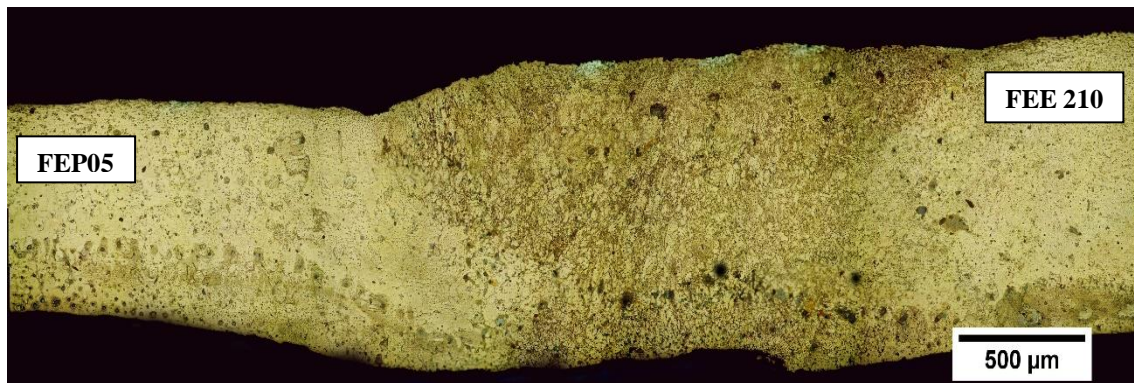


FIGURA 4.16 - Vista de perfil de amostra não conformada, com solda angulada a 75°
 FONTE: Autor, 2019

Conforme apontado pela técnica de correlação digital de imagem nos trabalhos de Li et al (2015) e de Liu et al (2015), nota-se um aumento da área ocupada pela solda à medida que se aumenta sua inclinação relativa, conforme apresentado na FIG. 4.5. Segundo descrito pelas técnicas metalográficas de Colpaert (2008), há a tendência de que, ao se angular a amostra, em relação à direção de laminação, os grãos sigam a orientação média dessa angulação.

Essa tendência foi percebida, visualmente, nas amostras apresentadas nas FIG. 4.10 a 4.16. Isso indica, conforme constatado nos ensaios de tração, que haverá também uma orientação preferencial para fratura. Como consequência, o *blank* poderá agravar (ou atenuar, a depender do material), sua anisotropia.

Sugere-se, conforme apontado por Chan et al (2003) e por Xu et al (2014), que a linha de solda seja, então, angulada para que se tenha melhor desempenho mecânico do *blank*. Essa teoria vai de encontro ao que defende o DOE conforme apresentado por Li et al (2015).

Ressalta-se, no entanto, que não há ainda um consenso quanto aos efeitos da orientação da linha de solda no comportamento mecânico e no desempenho de TWBs, não apenas na estampagem, mas em outras operações e técnicas de processamento também. Há estudos, como o

desenvolvido por Cheng et al (2007), que defendem que a orientação da solda pouco ou quase nada influencia na conformabilidade.

No entanto, Parente et al (2015), Min et al (1998) e Korouyeh et al (2012) defendem que se deve analisar a solda em condições não triviais, diferentes dos comumente utilizados (0° DL, 45° DL e 90° DL). Segundo esses estudos, a área da solda poderá aumentar (como constatado neste trabalho) e, com isso, aumentar também a carga limite de fratura.

Sugere-se então, diante dos resultados apresentados, que a linha de solda possa ser orientada em direções complementares (15° DL e 75° DL, por exemplo), a fim de se obter tanto melhorias na resposta mecânica do blank quanto otimização de massa e redução de custos. Para melhor avaliação pode-se trabalhar com uma amostragem maior de corpos de prova e/ou com ensaios de conformabilidade, como LDH e embutimento, por exemplo.

4.4. Análise da chapa conformada

Na FIG. 4.17 apresentam-se as vistas de topo das amostras conformadas de diferentes regiões do painel de porta interno, próximo à solda do TWB.

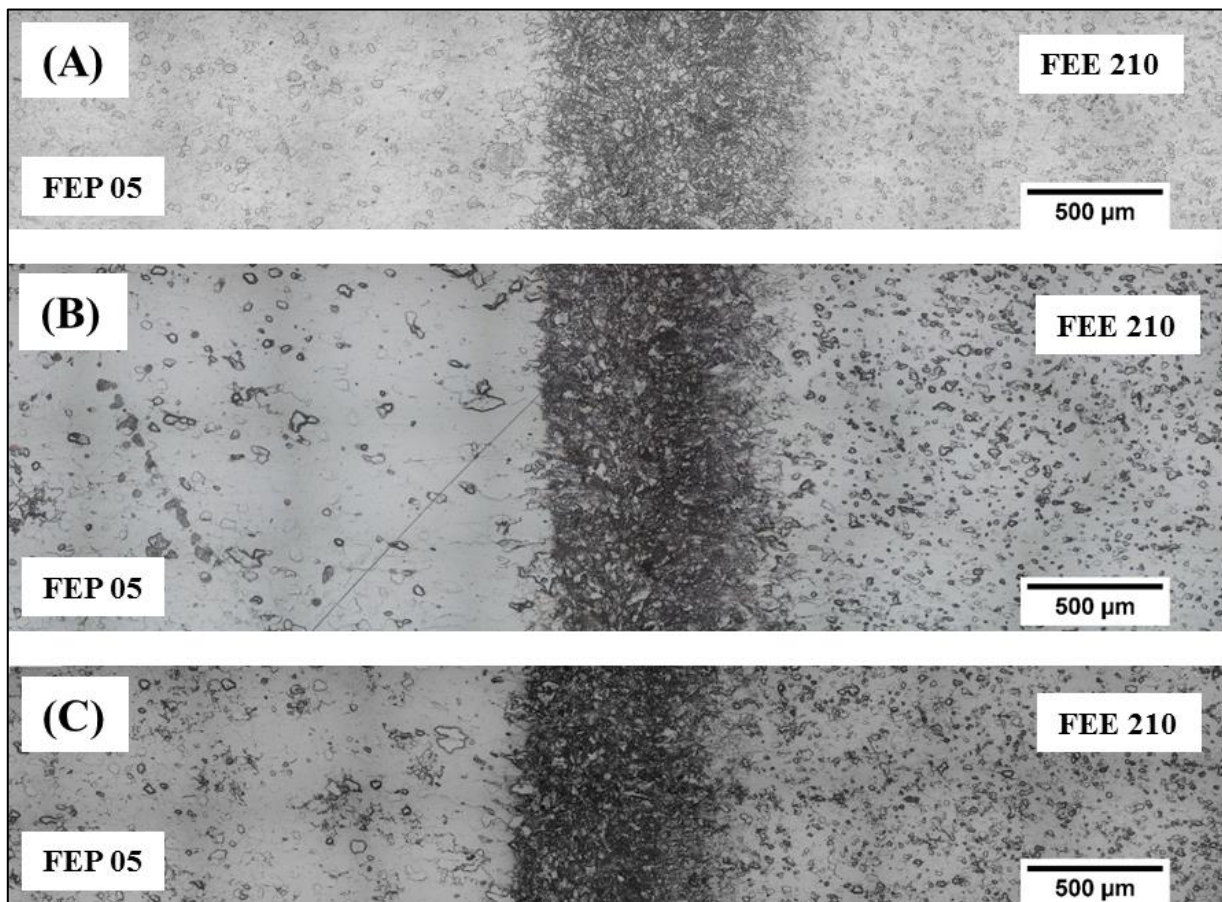


FIGURA 4.17 - Vista de topo de amostras conformadas. (A) Região 1, (B) Região 2 e (C) Região 3
FONTE: Autor, 2019

De acordo com Hosford; Caddell (2007) e Dieter (1988), quanto maior o expoente de encruamento, maior tende a ser o encruamento do material. Apesar da ligeira diferença entre os expoentes de encruamento do aço IF CSN FEP 05 ($n = 0,25$) e do IF CSN FEE 210 ($n = 0,21$), pode-se notar essa diferença durante a conformação.

Isso porque a chapa menos espessa, feita de IF CSN FEP 05 flui muito mais do que a chapa mais espessa. Esse fenômeno ocorre porque, durante a conformação, ambas as chapas se sujeitam à mesma pressão de estampagem. Como o FEP 05 possui menor resistência mecânica que o FEE 210, acaba se deformando mais.

Nota-se também que os grãos se deformam mais à medida que há maior solicitação mecânica durante a conformação. Isso pode ser percebido por meio da diferença entre o tamanho médio dos grãos à medida que se muda da região 1 (submetida praticamente apenas à sujeição do prensa-chapas) para região 3 (submetida a um maior número de operações de estampagem e à maior deformação plástica).

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo propor novas metodologias de análise e validação de *Tailor Welded Blanks*. Boa parte dos trabalhos desenvolvidos foca apenas em conformabilidade, não sendo feitas análises do procedimento de soldagem, de sua posição e angulação relativas e, conseqüentemente, seu efeito nas propriedades mecânicas do *blank*.

Por meio de ensaios de tração com diferentes ângulos relativos da solda, análise de perfis de microdureza e ensaios metalográficos, pôde-se concluir que:

- À medida que se aumenta a angulação da solda tende-se a aumentar a carga de ruptura dos corpos de prova de tração;
- O aumento da carga de ruptura dos corpos de prova de tração deve-se principalmente à diminuição da carga normal de tração, a qual depende principalmente do cosseno do ângulo de inclinação do corpo de prova de tração;
- Corpos de prova com ângulos complementares apresentam perfil geométrico da fratura e deformação semelhantes. Isso indica que, para fins de aumento da redução de massa e otimização da utilização de material pode-se optar por ângulos complementares, sendo as cargas equivalentes;
- Ao se angular a solda, os grãos da ZTA também seguem tal perfil de angulação. Isso pode explicar o aumento da carga cisalhante e da carga de ruptura: aumenta-se a extensão da solda, a qual tende a retardar o início da instabilidade plástica do TWB.

Por meio da revisão bibliográfica, percebeu-se que o posicionamento relativo da linha de solda em chapas obtidas por meio de TWBs é feito de forma empírica. Busca-se primordialmente que a chapa não falhe e que se tenha a menor massa possível, aliada à redução de custos de fabricação.

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa espera-se que se possa consolidar uma metodologia para avaliação do melhor ângulo possível para a linha de solda de um TWB. Como se constatou que a carga necessária à ruptura das chapas aumenta à medida que se inclina a linha de solda (até um determinado limite) e que ângulos complementares de inclinação geram cargas cisalhantes similares, espera-se que isso seja levado em consideração em projetos futuros.

Deve-se trabalhar com ângulos que permitam otimização de resistência mecânica, melhor conformabilidade e maior redução de massa e de custos. A seleção do melhor ângulo de inclinação relativa da linha de solda ficará atrelada a questões de projeto e não mais apenas a tentativas e erros.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aumentar a quantidade de corpos de prova e realizar ensaios de tração uniaxial com TWB dos mesmos aços IF utilizados neste trabalho, a fim de verificar o padrão de fratura e de comportamento mecânico do TWB, quando se trabalhar com lotes de chapas que serão aplicados na indústria automobilística;
- Variar a espessura do TWB e refazer os ensaios de tração, com orientação da solda variando de 15° em 15°, a fim de verificar qual o fator é dominante no desempenho de TWB: a orientação da solda, a razão de espessuras ou uma combinação de ambos;
- Executar ensaios de conformabilidade do tipo Erichsen, com solda orientada a diferentes ângulos, a fim de verificar se o comportamento sob estiramento de TWB se distancia muito do comportamento em tração;
- Traçar a CLC de um TWB variando-se não apenas a largura dos corpos de prova, mas também a orientação da linha de solda, a fim de verificar seus efeitos nessa curva;

ABSTRACT

One of the major challenges of the automobile industry, globally, is to develop vehicles that are both light and mechanically resistant. Ultra high mechanical strength materials are used, but there are limitations on costs and the maximum thickness reduction that can be obtained. Tailor Welded Blank (TWB) comes as a solution; it is a process that allows the top welding of sheets of different specifications (material, thickness and / or coating), prior to forming.

This work deals with the mechanical characterization and microstructural analysis of internal panel panels of vehicular doors manufactured using the TWB technique. The work was performed with interstitial-free (IF-Intertitial Free) steel sheets from Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), with materials of FEE 210 of 1.2mm thickness and IF CSN FEP 05 of 0.7mm thickness, welded to laser. These plates were transferred, already welded, by FIAT Chrysler Automobiles (FCA) Brazil.

For the mechanical characterization of the studied set, uniaxial traction and microhardness tests were performed. The TWB technique was applied with a solder line oriented from 0° to 70° (ranging from 5° to 5°). All the tests were done in triplicate, aiming for greater reliability of the results. Microstructural analysis was performed using light microscopy. We also evaluated the effects of welding, in different regions, on the formability of the materials involved in this research, from the stamping of a plate of the internal panel of the door.

As for traction, an abrupt increase of the rupture load was observed by increasing the relative inclination of the weld from 10 ° to 15 °, with a higher value being recorded at about 25 °. The microstructure of the IF steels presents ferritic matrix and the molten zone (ZF) is predominantly bainitic. When the weld line is angulated, the grains tend to orient themselves preferably at this angle.

An already expected finding is that the greater the equivalent plastic deformation of the forming process, the greater the hardening of the materials. It was concluded that although there is no consensus on the effects of weld line orientation on the performance and conformance of TWBs, the bursting load of the tested specimens increases as the relative angulation of the weld line increases.

Keywords: Forming; Laser welding; Tailor Welded Blank; Auto Industry

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABBASI, M.; KETABCHI, M.; LABUDDEBU, T.; PRAHL; BLECK, W.. New attempt to wrinkling behavior analysis of tailor welded blanks during the deep drawing process. *Materials & Design*, [s.l.], v. 40, p.407-414, set. 2012. Elsevier BV.
2. ABBASI, Mahmoud; KETABCHI, M.; RAMAZANI, A.; ABBASIC, Mohammad; PRAHL, U.. Investigation into the effects of weld zone and geometric discontinuity on the formability reduction of tailor welded blanks. *Computational Materials Science*, [s.l.], v. 59, p.158-164, jun. 2012. Elsevier BV.
3. ABDULLAH, K.; WILD, P.M.; JESWIET, J.J.; GHASEMPOOR, A. Tensile testing for weld deformation properties in similar gage tailor welded blanks using the rule of mixtures. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 112, n. 1, p.91-97, maio 2001. Elsevier BV.
4. AFFONSO, Luiz Otávio Amaral. Ductile and Brittle Fractures. In: AFFONSO, Luiz Otávio Amaral. *Machinery Failure Analysis Handbook: Sustain Your Operations and Maximize Uptime*. Houston: Gulf Publishing Company, 2007. Cap. 4. p. 33-42.
5. AHMETOGLU, Mustafa A; BROUWERS, Dirk; SHULKIN, Leonid; TAUPIN, Laurent; KINZEL, Gary L.; ALTAN, Taylan. Deep drawing of round cups from tailor-welded blanks. *Journal Of Material Processing Technology*, [s.l.], v.53, p.684-694, mar. 1995.
6. ALVES, P.H.O.M.; LIMA, M.S.F.; RAABE, D.; SANDIM, H.R.Z.. Laser beam welding of dual-phase DP1000 steel. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 252, p.498-510, fev. 2018. Elsevier BV.
7. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E3: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. 11 ed. West Conshohocken: ASTM Internacional, 2017. 12p.
8. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E384: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. 17 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2017. 40 p.
9. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E8/E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 16 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2016. 30 p.
10. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E92: Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials. 17 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2017. 27 p.

11. 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. ABM Proceedings, [s.l.], p.293-301, out. 2017. Editora Blucher.
12. ASM, American Society For Metals (Org.). ASM Handbook: Forming and Forging. 16. ed. Ohio: ASM International, 2006. 2110 p. vol. 14.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5906: Bobinas e chapas laminadas a quente de aço-carbono para estampagem - Especificação. 1 ed. São Paulo: ABNT, 2008. 4 p.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5915-1: Chapas e bobinas de aço laminadas a frio Parte 1: Requisitos. 1 ed. São Paulo: ABNT, 2013. 4 p.
15. ASSUNÇÃO, Eurico; QUINTINO, Luisa; MIRANDA, Rosa. Comparative study of laser welding in tailor blanks for the automotive industry. The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, [s.l.], v. 49, n. 1-4, p.123-131, 17 nov. 2009. Springer Nature.
16. 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.
17. CETLIN, Paulo Roberto; HELMAN, Horacio. Fundamentos da conformação: Mecânica dos metais. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2005. 265 p.
18. CHAN, L. C.; CHAN, S.M.; CHENG, C.H.; LEE, T.C.. Formability and Weld Zone Analysis of Tailor-Welded Blanks for Various Thickness Ratios. Journal Of Engineering Materials And Technology, [s.l.], v. 127, n. 2, p.179-185, 2005. ASME International.
19. CHAN, S.M; CHAN, L.C; LEE, T.C. Tailor-welded blanks of different thickness ratios effects on forming limit diagrams. Journal Of Materials Processing Technology, [s.l.], v. 132, n. 1-3, p.95-101, jan. 2003.
20. CHEN, Genyu; LIFANG, Mei; ZHANG, Mingjun; ZHANG, Yi; WANG, Zujian. Research on key influence factors of laser overlap welding of automobile body galvanized steel. Optics & Laser Technology, [s.l.], v. 45, p.726-733, fev. 2013. Elsevier BV.
21. CHENG, C. H.; CHAN, L. C.; CHOW, C. L.. Weldment properties evaluation and formability study of tailor-welded blanks of different thickness combinations and welding orientations. Journal Of Materials Science, [s.l.], v. 42, n. 15, p.5982-5990, 6 abr. 2007.
22. CHOI, Youho; HEO, Youngmoo; KIM, Heon Young; SEO, Daegyo. Investigations of weld-line movements for the deep drawing process of tailor welded blanks. Journal Of Materials Processing Technology, [s.l.], v. 108, n. 1, p.1-7, dez. 2000. Elsevier BV.

23. CIMM - CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL-MECÂNICA. O que é efeito mola. 2019. Disponível em: <<https://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/319-efeito-mola>>. Acesso em: 25 abr. 2019
24. CIMM - CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL-MECÂNICA. Operações de estampagem profunda ou embutimento. 2019. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6486-operacoes-de-estampagem-profunda-ou-embutimento#.XMnax7dKjIU>. Acesso em: 02 mai. 2019.
25. COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 672 p. Revista e atualizada por André Luiz V. da Costa e Silva.
26. CONFIAR - CONSULTORIA TÉCNICA AUTOMOTIVA (Belo Horizonte). Segurança Veicular. 2014. Disponível em: <<https://bateuvida.com.br/seguranca-veicular>>. Acesso em: 20 maio 2019.
27. CSN - COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL (Araucária). Galvanizados: Descrição Geral. 2019. Disponível em: <http://www.csn.com.br/conteudo_pti.asp?idioma=0&conta=45&tipo=59673>. Acesso em: 01 maio 2019.
28. 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.
29. DIETER, G. E. Mechanical metallurgy. 3 Ed. Boston: McGraw-Hill, 1988.
30. DOWLING, Norman E.. Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. 4. ed. Londres: Pearson Education, 2013. 977 p.
31. DUAN, Libin; XIAO, Ning-Cong; LI, Guangyao; XU Fengxiang; CHEN, Tao; CHENG, Aiguo. Bending analysis and design optimization of tailor-rolled blank thin-walled structures with top-hat sections. International Journal Of Crashworthiness, [s.l.], v. 22, n. 3, p.227-242, 8 nov. 2016. Informa UK Limited.
32. DUAN, Libin; SUN, Guangyong; CUI, Junjia; CHEN, Tao; CHENG, Aiguo; LI, Guangyao. Crashworthiness design of vehicle structure with tailor rolled blank. Structural And Multidisciplinary Optimization, [s.l.], v. 53, n. 2, p.321-338, 30 set. 2015. Springer Nature.
33. 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, [s.l.], v. 9, n. 2, p.45-52, abr. 2016. TWB.

34. FIETO, Bárbara Matos. Evolução da microestrutura e das propriedades mecânicas de aços IF tratados termomecanicamente. 2013. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
35. FYSIKOPOULOS, Apostolos; PASTRAS, George; STAVRIDIS, John; STAVROPOULOS, Panagiotis; CHRYSSOLOURIS, George. On the Performance Evaluation of Remote Laser Welding Process: An Automotive Case Study. *Procedia Cirp*, [s.l.], v. 41, p.969-974, 2016. Elsevier BV.
36. GAIED, Sadok; ROELANDT, Jean-Marc; PINARD, Fabrice; SCHMIT, Francis; BALABANE, Mikhael. Experimental and numerical assessment of Tailor-Welded Blanks formability. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 209, n. 1, p.387-395, jan. 2009. Elsevier BV.
37. GAN, Yong; LI, Jiaying; CHEN, Yang; LI, Hongzhao.. The Optimization Method of Tailor Welded Blank Forming Process Based on Numerical Simulation. *Applied Mechanics And Materials*, [s.l.], v. 721, p.135-139, dez. 2014. Trans Tech Publications.
38. GAUTAM, Vijay; RAUT, Vinayak Manohar; KUMAR, D Ravi. Analytical prediction of springback 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*, [s.l.], v. 232, n. 4, p.294-306, 4 jan. 2016. SAGE Publications.
39. GHOO, B.Y; KEUM, Y.T; KIM, Y.S. Evaluation of the mechanical properties of welded metal in tailor steel sheet welded by CO₂ laser. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 113, n. 1-3, p.692-698, jun. 2001. Elsevier BV.
40. GIANESINI, Giciano; SCHAEFFER, Lírio. Forjamento de aços avançados de alta resistência (AHSS) para redução de peso em automóveis. *Revista do Parafuso*, [s.l.], v. 68, n. 1, abr. 2019. Disponível em: < <http://www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=1073>>. Acesso em: 05 mai. 2019.
41. GONG, Hongying; WANG, Sifan; KNYSH, Paul; KORKOLIS, Yannis P.. Experimental investigation of the mechanical response of laser-welded dissimilar blanks from advanced- and ultra-high-strength steels. *Materials & Design*, [s.l.], v. 90, p.1115-1123, jan. 2016. Elsevier BV.
42. HARIHARAN, Krishnaswamy; NGUYEN, Ngoc-Trung; CHAKRABORTI, Nirupam; LEE, Myoung-Gyu. Multi-Objective Genetic Algorithm to Optimize Variable Drawbead Geometry for Tailor Welded Blanks Made of Dissimilar Steels. *Steel Research International*, [s.l.], v. 85, n. 12, p.1597-1607, 8 abr. 2014. Wiley.

43. HE, Sijun; WU, Xin; HU, S. Jack. Formability Enhancement for Tailor-Welded Blanks Using Blank Holding Force Control. *Journal Of Manufacturing Science And Engineering*, [s.l.], v. 125, n. 3, p.461-467, 2003. ASME International.
44. HOSFORD, William F.; CADDELL, Robert M.. *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. 3. ed. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2007. 312 p.
45. HYRCZA-MICHALSKA, M.; ROJEK, J.; FRUITOS, O.. Numerical simulation of car body elements pressing applying tailor welded blanks – practical verification of results. *Archives Of Civil And Mechanical Engineering*, [s.l.], v. 10, n. 4, p.31-44, jan. 2010. Elsevier BV.
46. JIE, M.; CHENG. C. H.; CHAN, L.C.; CHOW, C. L.; TANG, C. Y.. Experimental and Theoretical Analysis on Formability of Aluminum Tailor-Welded Blanks. *Journal Of Engineering Materials And Technology*, [s.l.], v. 129, n. 1, p.151-158, 2007. ASME International.
47. KARAJIBANI, Ehsan; HASHEMI, Ramin; SEDIGHI, Mohammad. Determination of forming limit curve in two-layer metallic sheets using the finite element simulation. *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials*, [s.l.], v. 230, n. 6, p.1018-1029, 3 ago. 2016. SAGE Publications.
48. KATAYAMA, S.. Introduction: fundamentals of laser welding * *The content of this chapter has been reprinted with permission from the article ‘laser welding’ in the McGraw Hill Encyclopedia of Science & Technology, Vol. 9 (2012), pp. 707–714, written by Seiji Katayama. The author would like to express his gratitude to this company.. *Handbook Of Laser Welding Technologies*, [s.l.], p.3-16, 2013. Elsevier.
49. KHAN, Arman; SURESH, V.V.N.Satya; REGALLA, Srinivasa Prakash. Effect of Thickness Ratio on Weld Line Displacement in Deep Drawing of Aluminium Steel Tailor Welded Blanks. *Procedia Materials Science*, [s.l.], v. 6, p.401-408, 2014. Elsevier BV.
50. KIM, Daeyong; Wonoh Lee; KIM, Junehyung; CHUNG, Kyung-Hwan; KIM, Chongmin; OKAMOTO, Kazutaka; WAGONER, R.H.; CHUNG, Kwansoo. Macro-performance evaluation of friction stir welded automotive tailor-welded blank sheets: Part II – Formability. *International Journal Of Solids And Structures*, [s.l.], v. 47, n. 7-8, p.1063-1081, abr. 2010. Elsevier BV.
51. KIM, Jaehun; KIM, Sanseo; KIM, Keunug; JUNG, Wonyeong; YOUN, Deokhyun; LEE, Jangseok; KI, Hyungson. Effect of beam size in laser welding of ultra-thin stainless steel foils. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 233, p.125-134, jul. 2016. Elsevier BV.

52. KIM, Jaehun; KI, Hyungson. Scaling law for penetration depth in laser welding. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 214, n. 12, p.2908-2914, dez. 2014. Elsevier BV.
53. KINSEY, Brad L.; CAO, Jian. An Analytical Model for Tailor Welded Blank Forming. *Journal Of Manufacturing Science And Engineering*, [s.l.], v. 125, n. 2, p.344-354, 2003. ASME International.
54. KINSEY, Brad L.; LIU, Zhihong; CAO, Jian. A novel forming technology for tailor-welded blanks. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 99, n. 1-3, p.145-153, mar. 2000. Elsevier BV.
55. KINSEY, Brad L.; WU, Xin. Tailor welded blanks for advanced manufacturing. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011. 217 p.
56. KOROUYEH, R. Safdarian; NAEINI, H. Moslemi; TORKAMANY, M.J.; LIAGHAT, Gh.. Experimental and theoretical investigation of thickness ratio effect on the formability of tailor welded blank. *Optics & Laser Technology*, [s.l.], v. 51, p.24-31, out. 2013. Elsevier BV.
57. KOROUYEH, Rasoul Safdarian; NAEINI, Hassan Moslemi; LIAGHAT, Gholamhosein. Forming Limit Diagram Prediction of Tailor-Welded Blank Using Experimental and Numerical Methods. *Journal Of Materials Engineering And Performance*, [s.l.], v. 21, n. 10, p.2053-2061, 10 fev. 2012. Springer Nature.
58. KRAUSS, G.. *Steels: Heat Treatment and Processing Principles*. 2. ed. Ohio: ASM International, 1990. 497 p
59. KRELLING, Anael. Estampagem. Santa Catarina: IFSC, 2019. 20 slides, color.
60. KUMAR, T. Kishore; REDDY, K. Jayasimha. Tailor Welded Blanks. *Ijret: International Journal of Research in Engineering and Technology*, [s.l.], v. 4, n. 2, p.63-72, abr. 2015.
61. KURYNTSEV, S.V.; GILMUTDINOV, A. K. H.. Welding of stainless steel using defocused laser beam. *Journal Of Constructional Steel Research*, [s.l.], v. 114, p.305-313, nov. 2015. Elsevier BV.
62. KUSUDA, Hisashi; TAKASAGO, Toshiyuki; NATSUMI, Fumiaki. Formability of tailor blanks. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 71, n. 1, p.134-140, nov. 1997. Elsevier BV.
63. LEE, Andy P.; FELTHAM, Erick; VAN DEVENTER, Jon. Tailor Welded Blank Technology for Automotive Applications. *Sae Technical Paper Series*, [s.l.], p.1-14, 1 fev. 1996. SAE International.

64. LEITÃO, C.; EMÍLIO, B.; CHAPARRO, B.M.; RODRIGUES, D.M. . Formability of similar and dissimilar friction stir welded AA 5182-H111 and AA 6016-T4 tailor blanks. *Materials & Design*, [s.l.], v. 30, n. 8, p.3235-3242, set. 2009. Elsevier BV.
65. LI, Guangyao; XU, Fengxiang; HUANG, X.; SUN, Guangyong. Topology Optimization of an Automotive Tailor-Welded Blank Door. *Journal Of Mechanical Design*, [s.l.], v. 137, n. 5, p.055001-055008, 5 mar. 2015. ASME International.
66. LI, J.; NAYAK, S.S.; BIRO, E.; PANDA, S.K.; GOODWIN, F.; ZHOU, Y. Effects of weld line position and geometry on the formability of laser welded high strength low alloy and dual-phase steel blanks. *Materials & Design (1980-2015)*, [s.l.], v. 52, p.757-766, dez. 2013. Elsevier BV.
67. 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.
68. LINDBERG, Henric. Advanced high strength steel technologies in the 2016 Volvo XC90. In: GREAT DESIGNS IN STEEL, 14., 2016, Washington. Great Designs in Steel 2016 PowerPoint Presentations. Washington: Autosteel, 2016. p. 1 - 31. Disponível em: <<https://www.autosteel.org/-/media/files/autosteel/great-designs-in-steel/gdis-2016/track-2---volvo-xc90.ashx>>. Acesso em: 23 out. 2018.
69. LIU, Jun; WANG, Li-Liang; LEE, Junyi; CHEN, Ruili; EL-FAKIR, Omer; CHEN, Li; LIN, Jianguo; DEAN, Trevor A.. Size-dependent mechanical properties in AA6082 tailor welded specimens. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 224, p.169-180, out. 2015. Elsevier BV.
70. LOPES, Wellington. Estudo do encruamento dos aços AISI 304 e AISI 409 com uso da técnica de cisalhamento planar simples. 2009. 207 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
71. LU, Fenggui; LI, Xibin; LI, Zhuguo; TANG, Xinhua; CUI, Haichao. Formation and influence mechanism of keyhole-induced porosity in deep-penetration laser welding based on 3D transient modeling. *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, [s.l.], v. 90, p.1143-1152, nov. 2015. Elsevier BV.
72. MA, Xiangdong; GUAN, Yingping; YANG, Liu. Determination of elastoplastic mechanical properties of the weld and heat affected zone metals in tailor-welded blanks by nanoindentation test. *Chinese Journal Of Mechanical Engineering*, [s.l.], v. 28, n. 5, p.911-918, 27 abr. 2015. Chinese Journal of Mechanical Engineering.

73. MARCONDES, Paulo. Aços para Estampagem. Curitiba: UFPR - Labconf, 2019. 44 slides, color.
74. MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. 392 p.
75. MEINDERS, T; BERG, A Van Den; HUÉTINK, J. Deep drawing simulations of Tailor Blanks and experimental verification. Journal Of Materials Processing Technology, [s.l.], v. 103, n. 1, p.65-73, jun. 2000. Elsevier BV.
76. MEINDERS, Vincent T.; HUETINK, Han; BERG, Albert van Den. Deep drawing simulations of Tailor Blanks and experimental verification. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SHEET METAL, SHEMET 1998, 6., 1998, Netherlands (Enschede). Proceedings of the The 6th International Conference on Sheet Metal (SheMet '98). Netherlands (Enschede): Shemet '98, 1998. p. 235 - 246.
77. MERKLEIN, Marion; JOHANNES, Maren; LECHNER, Michael; KUPERT, Andreas. A review on tailor blanks—Production, applications and evaluation. Journal Of Materials Processing Technology, [s.l.], v. 214, n. 2, p.151-164, fev. 2014. Elsevier BV.
78. MIN, K.B.; KIM, K.S.; KANG, S.S.. A study on resistance welding in steel sheets using a tailor-welded blank (1st report): Evaluation of upset weldability and formability. Journal Of Material Processing Technology, [s.l.], v. 2000, n. 101, p.186-192, 1998.
79. MIYAZAK, Yasunobu; SAKIYAMA, Tatsuya; KODAMA, Shinji. NIPPON Steel Technical Report: Welding Techniques for Tailor Blanks. 95. ed. Japão (Tóquio): NSSM, 2007. 7 p.
80. MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Vilani; SANTOS, Dagoberto Braga. Introdução à Metalurgia da Soldagem. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 209 p.
81. MOHEBBI, M.s.; AKBARZADEH, A.. Prediction of formability of tailor welded blanks by modification of MK model. International Journal Of Mechanical Sciences, [s.l.], v. 61, n. 1, p.44-51, ago. 2012. Elsevier BV.
82. MONTESANO, João Augusto. Influência do processamento termomecânico nas propriedades de estampabilidade de um aço IF. 2019. 13 f. Seminário - Curso de Engenharia Mecânica, DEM, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.
83. NALLI, F.; SPENA, P. Russo; CORTESE, L.; REITERER, D.. Global-local characterization and numerical modeling of TWB laser welded joints. In: International Mechanical Engineering Congress and Exposition - IMECE, 5., 2017, Flórida (Tampa). Proceedings of the ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Flórida (Tampa): ASME, 2017. p. 1 - 8.

84. NARAYANAN, R. Ganesh; NAIK, B. S.. Assessing the Validity of Original and Modified Failure Criteria to Predict the Forming Limit of Unwelded and Tailor Welded Blanks with Longitudinal Weld. *Materials And Manufacturing Processes*, [s.l.], v. 25, n. 11, p.1351-1358, 3 dez. 2010. Informa UK Limited.
85. PALLETT, R.J; LARK, R.J. The use of tailor blanks in the manufacture of construction components. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 117, n. 1-2, p.249-254, nov. 2001. Elsevier BV.
86. PANDA, Sushanta Kumar; KUMAR, D. Ravi; KUMAR, Harish; NATH, A.K.. Characterization of tensile properties of tailor welded IF steel sheets and their formability in stretch forming. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 183, n. 2-3, p.321-332, mar. 2007. Elsevier BV.
87. PANDA, Sushanta Kumar; KUMAR, D. Ravi. Study of formability of tailor-welded blanks in plane-strain stretch forming. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, [s.l.], v. 44, n. 7-8, p.675-685, 9 jan. 2009. Springer Nature.
88. PARENTE, Marco; SAFDARIAN, R.; SANTOS, Abel D.; LOUREIRO, Altino; VILACA, Pedro; NATAL JORGE, R. M.. A study on the formability of aluminum tailor welded blanks produced by friction stir welding. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, [s.l.], v. 83, n. 9-12, p.2129-2141, 15 out. 2015. Springer Nature.
89. PENTEADO, Fernando. *Processos de Estampagem*. 2019. Disponível em: <<http://bmalbert.yolasite.com/resources/Estampagem.pdf>>. Acesso em: 01 maio 2019.
90. RAO, K.P.; MOHAN, Emani V.R.K. An Investigation of the Influence of Pre-Strain on Material Properties of Sheet Brass. *Key Engineering Materials*, [s.l.], v. 233-236, p.815-820, jan. 2003. Trans Tech Publications.
91. RIAHI, M; AMINI, A.; SABBAGHZADEH, J.; TORKAMANI, M.J.. Analysis of weld location effect and thickness ratio on formability of tailor welded blank. *Science And Technology Of Welding And Joining*, [s.l.], v. 17, n. 4, p.282-287, maio 2012. Informa UK Limited.
92. SAFARI, Mehdi; MOSTAAN, Hosein; FARZIN, Mahmoud. Laser bending of tailor machined blanks: Effect of start point of scan path and irradiation direction relation to step of the blank. *Alexandria Engineering Journal*, [s.l.], v. 55, n. 2, p.1587-1594, jun. 2016. Elsevier BV.
93. SAFDARIAN, R.; NATAL JORGE, R. M; SANTOS, Abel D.; NAEINI, H. Moslemi; PARENTE, M. P. L.. A comparative study of forming limit diagram prediction of tailor welded blanks. *International Journal Of Material Forming*, [s.l.], v. 8, n. 2, p.293-304, 8 abr. 2014. Springer Nature.

94. SAFDARIAN, R.. 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. Informa UK Limited.
95. 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. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017
96. SAUNDERS, F.I.; WAGONER, R.H.. Forming of Tailor-Welded Blanks. *Metallurgical And Materials Transactions*, [s.l.], v. 27, n. 9, p.2605-2616, set. 1997.
97. SCHREK, A.; ŠVEC, P.; BRUSILOVÁ, A.. Formability of Tailor-Welded Blanks From Dual-Phase and Bake-Hardened Steels with a Planar Anisotropy Influence. *Strength Of Materials*, [s.l.], v. 49, n. 4, p.550-554, jul. 2017. Springer Nature.
98. SCHREK, Alexander; ŠVEC, Pavol; GAJDOĽOVÁ, Veronika. Deformation Properties of Tailor Welded Blank Made of Dual Phase Steels. *Acta Mechanica Et Automatica*, [s.l.], v. 10, n. 1, p.38-42, 1 mar. 2016.
99. SHENG, Z.Q.. Formability of tailor-welded strips and progressive forming test. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 205, n. 1-3, p.81-88, ago. 2008. Elsevier BV.
100. SHI, Ming F.; PICKETT, Ken M.; BHATT, Kumar K.. Formability Issues in the Application of Tailor Welded Blank Sheets. *Sae Technical Paper Series*, [s.l.], p.1-11, 1 mar. 1993. SAE International.
101. SINGH, Mayank Kumar. Application of Steel in Automotive Industry. *International Journal Of Emerging Technology And Advanced Engineering*, [s.l.], v. 6, n. 7, p.246-253, jul. 2016.
102. SURESH, V. V. N. Satya; REGALLA, Srinivasa Prakash; GUPTA, Amit Kumar. Combined effect of thickness ratio and selective heating on weld line movement in stamped tailor-welded blanks. *Materials And Manufacturing Processes*, [s.l.], v. 32, n. 12, p.1363-1367, 10 nov. 2016. Informa UK Limited.
103. SURESH, V.V.N. Satya; REGALLA, Srinivasa Prakash; GUPTA, Amit Kumar; PADMANABHAM, G.. Weld Line Shift in the Case of Tailor Welded Blanks Subjected to Differential Strengths with Respect to TIG and Laser Welding. *Materials Today: Proceedings*, [s.l.], v. 2, n. 4-5, p.3501-3510, 2015. Elsevier BV.

104. TAN, C.J.; MORI, K.; ABE, Y.. Forming of tailor blanks having local thickening for control of wall thickness of stamped products. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 202, n. 1-3, p.443-449, jun. 2008. Elsevier BV.
105. WALSH, C.A.. Laser Welding: A literature review. *Phase Transformations & Complex Properties Research Group: Materials Science and Metallurgy Department, Inglaterra (Cambridge)*, v. 1, n. 1, p.1-21, jul. 2002.
106. WANG, H.; ZHOU, J.; ZHAO, T.S.; LIU, L.Z.; LIANG, Q. et al. Multiple-iteration springback compensation of tailor welded blanks during stamping forming process. *Materials & Design*, [s.l.], v. 102, p.247-254, jul. 2016.
107. WANG, Jinfeng; YANG, Lijun; SUN, Mingsheng; LIU, Tong; LI, Huan. A study of the softening mechanisms of laser-welded DP1000 steel butt joints. *Materials & Design*, [s.l.], v. 97, p.118-125, maio 2016.
108. XU, Fengxiang; SUN, Guangyong; LI, Guangyao; LI, Qing. Experimental investigation on high strength steel (HSS) tailor-welded blanks (TWBs). *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 214, n. 4, p.925-935, abr. 2014. Elsevier BV.
109. ZADPOOR, A.A.; SINKE, J.; BENEDICTUS, R.. Mechanics of Tailor Welded Blanks: An Overview. *Key Engineering Materials*, [s.l.], v. 344, p.373-382, jul. 2007. Trans Tech Publications.
110. ZADPOOR, Amir Abbas; SINKE, Jos; BENEDICTUS, Rinze; PIETERS, Raph. Mechanical properties and microstructure of friction stir welded tailor-made blanks. *Materials Science And Engineering: A*, [s.l.], v. 494, n. 1-2, p.281-290, out. 2008. Elsevier BV.
111. ZHANG, Hua-Wei; LIU, Xiang-Hua; LIU, Li-Zhong; HU, Ping; WU, Jia-Lu. Forming Limit and Thickness Transition Zone Movement for Tailor Rolled Blank during Drawing Process. *Journal Of Iron And Steel Research, International*, [s.l.], v. 23, n. 3, p.185-189, mar. 2016. Springer Nature.
112. ZHANG, Jun. Optimization of contact forces in tailor-welded blanks forming process. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, [s.l.], v. 33, n. 5-6, p.460-468, 30 mar. 2006. Springer Nature.
113. ZHANG, Yan-Xi; HAN, Sang-Woo; CHEON, Jason; NA, Suck-Joo; GAO, Xiang-Dong. Effect of joint gap on bead formation in laser butt welding of stainless steel. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 249, p.274-284, nov. 2017
114. ZHAO, K.M; CHUN, B.K; LEE, J.K. Finite element analysis of tailor-welded blanks. *Finite Elements In Analysis And Design*, [s.l.], v. 37, n. 2, p.117-130, fev. 2001. Elsevier BV.

115. ZHOU, Jun; TSAI, Hai-lung. Porosity Formation and Prevention in Pulsed Laser Welding. *Journal Of Heat Transfer*, [s.l.], v. 129, n. 8, p.1014-1024, 2007. ASME International.

APÊNDICE A

TABELA A.1 – Dados de tração dos corpos de prova ensaiados

Ângulo de inclinação da solda em relação à tração [°]	Ângulo de inclinação da solda em relação à tração [rad]	Carga de ruptura [kgf]	Carga de ruptura [N]	Carga normal de ruptura [N]	Carga cisalhante de ruptura [N]	Média de carga de ruptura [N]	Desvio padrão [N]	Média de carga normal de ruptura [N]	Média de carga cisalhante de ruptura [N]	Desvio padrão [N]	Deformação convencional (ε)	Deformação verdadeira (ε)	Média de Deformação verdadeira (ε)	Desvio padrão
0,000	0,000	215,63	2114,63	2114,63	0,00	2100,33	12,76	2100,33	0,00	0,00	0,1096	0,1040	0,104	0,001
0,000	0,000	213,75	2096,25	2096,25	0,00						0,1085	0,1030		
0,000	0,000	213,13	2090,12	2090,12	0,00						0,1092	0,1036		
5,000	0,087	209,38	2053,34	2037,74	178,28	2081,94	27,64	2066,13	180,76	2,40	0,1033	0,0983	0,100	0,002
5,000	0,087	212,50	2083,99	2068,16	180,94						0,1059	0,1007		
5,000	0,087	215,00	2108,51	2092,49	183,07						0,1076	0,1022		
10,000	0,175	262,50	2574,34	2496,71	440,24	2584,55	17,69	2506,62	441,98	3,03	0,2068	0,1880	0,187	0,005
10,000	0,175	265,63	2604,98	2526,43	445,48						0,1986	0,1812		
10,000	0,175	262,50	2574,34	2496,71	440,24						0,2106	0,1911		
15,000	0,262	268,75	2635,63	2459,08	658,91	2633,59	27,64	2457,17	658,40	6,91	0,2260	0,2038	0,205	0,002
15,000	0,262	265,63	2604,98	2430,48	651,25						0,2306	0,2075		
15,000	0,262	271,25	2660,15	2481,95	665,04						0,2268	0,2044		
20,000	0,349	275,00	2696,93	2381,44	866,77	2680,58	33,76	2367,01	861,52	10,85	0,2064	0,1876	0,189	0,002
20,000	0,349	269,38	2641,76	2332,73	849,05						0,2106	0,1911		
20,000	0,349	275,63	2703,05	2386,86	868,74						0,2068	0,1880		
25,000	0,436	268,75	2635,63	2164,89	1009,51	2662,19	31,45	2186,71	1019,68	12,05	0,3168	0,2752	0,276	0,007
25,000	0,436	270,63	2654,02	2180,00	1016,55						0,3084	0,2688		
25,000	0,436	275,00	2696,93	2215,24	1032,98						0,3265	0,2825		
30,000	0,524	265,63	2604,98	1953,74	1127,99	2635,63	28,09	1976,72	1141,26	12,16	0,2968	0,2599	0,265	0,005
30,000	0,524	271,25	2660,15	1995,11	1151,88						0,3106	0,2705		
30,000	0,524	269,38	2641,76	1981,32	1143,92						0,3028	0,2645		
35,000	0,611	262,50	2574,34	1727,41	1209,54	2602,94	30,85	1746,60	1222,98	14,49	0,2078	0,1888	0,190	0,001
35,000	0,611	265,00	2598,86	1743,86	1221,06						0,2102	0,1908		
35,000	0,611	268,75	2635,63	1768,54	1238,34						0,2082	0,1891		
40,000	0,698	259,38	2543,69	1492,70	1252,52	2582,51	33,76	1515,48	1271,64	16,62	0,1968	0,1797	0,180	0,002
40,000	0,698	265,00	2598,86	1525,07	1279,69						0,1956	0,1786		
40,000	0,698	265,63	2604,98	1528,67	1282,70						0,2000	0,1823		
45,000	0,785	262,50	2574,34	1287,17	1287,17	2625,42	46,81	1312,71	1312,71	23,41	0,2012	0,1833	0,183	0,001
45,000	0,785	271,88	2666,28	1333,14	1333,14						0,1996	0,1820		
45,000	0,785	268,75	2635,63	1317,82	1317,82						0,2002	0,1825		
50,000	0,873	256,25	2513,04	1038,33	1237,43	2545,73	33,76	1051,84	1253,53	16,62	0,2020	0,1840	0,184	0,004
50,000	0,873	263,13	2580,47	1066,19	1270,63						0,1978	0,1805		
50,000	0,873	259,38	2543,69	1050,99	1252,52						0,2080	0,1890		
55,000	0,960	262,50	2574,34	846,93	1209,54	2607,03	33,76	857,69	1224,90	15,86	0,2082	0,1891	0,185	0,009
55,000	0,960	265,63	2604,98	857,01	1223,94						0,2096	0,1903		
55,000	0,960	269,38	2641,76	869,11	1241,22						0,1902	0,1741		
60,000	1,047	265,63	2604,98	651,25	1127,99	2604,98	0,00	651,25	1127,99	0,00	0,3098	0,2699	0,275	0,004
60,000	1,047	265,63	2604,98	651,25	1127,99						0,3200	0,2776		
60,000	1,047	265,63	2604,98	651,25	1127,99						0,3196	0,2773		
65,000	1,134	268,75	2635,63	470,74	1009,51	2656,06	35,39	474,39	1017,33	13,55	0,3286	0,2841	0,284	0,000
65,000	1,134	275,00	2696,93	481,69	1032,98						0,3290	0,2844		
65,000	1,134	268,75	2635,63	470,74	1009,51						0,3278	0,2835		

FONTE: Autor, 2019