

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

**PPGEM**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS SOLDADAS EM ALTA  
VELOCIDADE PELO PROCESSO DE FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA**

**Tiago Samuel Renck**

Dissertação para obtenção do Título de Mestre  
em Engenharia

Porto Alegre

2005

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

**PPGEM**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS SOLDADAS EM ALTA  
VELOCIDADE PELO PROCESSO DE FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA**

**TIAGO SAMUEL RENCK**

Engenheiro Mecânico

Dissertação para obtenção do Título de Mestre  
em Engenharia

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

2005

II

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Co-orientador: Dr. Jorge Fernandez. Dos Santos

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Afonso Reguly, PPGEM/UFRGS

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro, DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. Inácio da Fontoura. Limberger, UFSM

Prof. Dr. Antonio Cezar Faria Vilela

Coordenador do PPGEM, 2005

“Vá até onde puder ver, quando lá chegar poderá ver ainda mais longe.”

Goethe

## AGRADECIMENTOS

Gostaria agradecer a todo mundo que me ajudou a chegar até aqui. Alguns nomes não podem deixar de ser lembrados.

Mãe, pai, irmãos e irmãs que sempre ajudaram, desde o início da carreira acadêmica, até as aventuras no exterior.

Ao Prof. Telmo Strohaecker por acreditar, dar força e incentivo desde os tempos da graduação. Por possibilitar a realização do sonho de estudar e trabalhar na Alemanha.

Ao Dr. Jorge dos Santos que possibilitou a realização do estágio no GKSS de Geesthacht/Alemanha, na época de graduação e assegurou a vaga para que também do trabalho de mestrado pudesse ser realizado.

Todos os colegas do GKSS que participaram da realização deste trabalho. Ao Dipl. Ing Shahram Sheikhi que lado a lado ensinou, ajudou, e se esforçou para entender meu precário idioma alemão. Ao querido Volker Leiser que possibilitou a construção de muitos componentes projetados inclusive em folhas de papel toalha. Ao grande Matthias Beyer que sempre ajudava a resolver os problemas de informática. As colegas que, pouco ou muito, ajudaram de alguma forma, alguns deles também conhecidos carinhosamente como delinqüentes: Antonio Blanco, César Oléa, Toni Montana, Carlos D'avila, Sergio Amâncio, Gustavo Mendes, Carlos Cunha, Antonio Mônaco, Gui-Pierre Couvrat, Maykel Barlavento, Gustavo Ardito, Gabriel Petry, Charles Sebaldo Kunh e tantos outros que acabam passando nesta hora.

No LAMEF sempre prontos ajudar estavam o Marcio, o Sandro, Prof. Afonso e muitos outros.

A minha querida Tani que sempre ajudou com aquele pensamento positivo que algumas vezes fez até milagres.

A todos estes, meu muito obrigado.

## SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO.....	1
2.0	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Alumínio e suas ligas.....	4
2.1.1	Classificação dos Tratamentos das Ligas de Alumínio.....	7
2.2	Considerações Especiais sobre a Soldabilidade das Ligas de Alumínio.....	8
2.2.1	Tratáveis Termicamente.....	8
2.2.2	Não tratáveis termicamente.....	8
2.3	Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica.....	9
2.3.1	Etapas do Processo de Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica.....	12
2.3.2	Características Microestruturais da SFMM.....	12
2.4	Tailor Welded Blanks (TWB) e sua utilização na Indústria Automobilística.....	14
2.5	Estampabilidade de Tailor Welded Blanks.....	15
2.6	Métodos para Avaliação da Estampabilidade de Chapas Metálicas.....	17
2.6.1	Curva Limite de Conformação (CLC).....	17
2.6.2	Principais testes utilizados para determinação das CLC.....	19
	Ensaio Erichsen e suas variações.....	19
	Ensaio de Tração Uniaxial.....	20
	Ensaio de Pressão Hidráulica.....	22
	Ensaio Keeler.....	22
	Ensaio Hecker.....	23
	Ensaio Marciniak.....	23
	Ensaio Nakazima.....	24
	Ensaio Hasek.....	25
2.6.3	Comparação entre os testes.....	26
2.6.4	Fatores influenciando uma CLC.....	26
2.6.5	Curva Limite de Conformação aplicada a Tailor Welded Blanks.....	27
2.6.6	Curva Limite de Conformação Aplicada a TWB em Ligas de Alumínio.....	29
3.0	Procedimentos Experimentais.....	31
3.1	Material.....	31

3.2	Procedimento de soldagem.....	32
3.3	Ensaio de Dobramento .....	34
3.4	Análise Metalográfica.....	34
3.5	Ensaio de Microdureza .....	36
3.6	Medição de Deformações via Sistema Óptico.....	37
3.7	Captura e processamento de imagens via sistema óptico .....	42
3.8	Ensaio de Tração.....	44
3.9	Ensaio de tração em corpos de prova entalhados.....	46
3.10	Ensaio de Estampabilidade .....	47
4.0	RESULTADOS .....	50
4.1	Procedimento de soldagem.....	50
4.2	Ensaio de dobramento .....	51
4.3	Análise Metalográfica.....	52
4.3.1	Liga 6181 T4 .....	53
4.3.2	Liga 5754 H22 .....	57
4.4	Ensaio de Microdureza .....	62
4.5	Ensaio de Tração.....	63
4.5.1	Liga 6181 T4 .....	64
4.5.2	Liga 5754 H22 .....	66
4.6	Ensaio de Tração Corpos de Prova Entalhado .....	68
4.7	Ensaio de Estampabilidade.....	69
5.0	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	72
6.0	CONCLUSÕES .....	78
7.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	81
8.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	82

## Lista de Figuras

Figura 2.1	Ferramenta utilizada no processo de SFMM.....	9
Figura 2.2	Princípio do processo SFMM.....	10
Figura 2.3	Algumas geometrias onde o processo SFMM pode ser utilizado. ....	11
Figura 2.4	Etapas do processo de SFMM. ....	12
Figura 2.5	Esquema mostrando as zonas microestruturais da SFMM onde: A, material de base não afetado; B, zona termicamente afetada (ZTA); C, zona termomecanicamente afetada (ZTMA); D, centro da solda (CS).....	13
Figura 2.6	Alguns exemplos da aplicação de TWB's em automóveis de passeio .....	14
Figura 2.7	Esquema mostrando o comportamento de linha se solda antes e depois do processo de estampagem. ....	16
Figura 2.8	Posição da fratura em TWB de materiais e espessuras semelhantes (esquerda) e no caso de materiais ou espessuras diferentes (direita). ....	17
Figura 2.9	Estados de deformações que formam um DLC.....	18
Figura 2.10	Esquema do dispositivo utilizado no ensaio Erichsen.....	19
Figura 2.11	Corpos de prova entalhados para ensaio de tração uniaxial. Dimensões em mm. ....	21
Figura 2.12	Esquema mostrando o ensaio de pressão hidráulica com matrizes elípticas... ..	22
Figura 2.13	Seqüência de punções utilizados no ensaio Keeler. ....	23
Figura 2.14	Esquema ilustrando o ensaio Marciniak. Prensa chapas (A e A'), Punção (B). ....	24
Figura 2.15	Seqüência de corpos de prova utilizados no ensaio Nakazima. ....	24
Figura 2.16	Geometria dos corpos de prova desenvolvidos por Hasek.....	25
Figura 2.17	CLC á partir de diferentes métodos: 1 Hasek; 2 Nakazima, 3 Tração Entalhado; 4 Keeler; 5 Pressão Hidráulica.....	26
Figura 2.18	Comparação entre diferentes razões de espessura e o efeito na CLC. ....	28
Figura 2.19	CLC para a liga AL 5185-H00, material de base e TWB.....	30
Figura 3.1	Esquema mostrando o posicionamento dos termopares.....	33
Figura 3.2	Ensaio de dobramento guiado.....	34
Figura 3.3	Perfil de microdureza abrangendo o material de base do lado de avanço (esquerda) ao lado de recuo (direita), passando pela solda. ....	36
Figura 3.4	Elementos em disposição 3x3. Deformados na disposição Single facet e Multifacet. ....	39



Figura 3.5	Primeira imagem com detalhe para a identificação do elemento inicial. ....	39
Figura 3.6	Última imagem com detalhe do mesmo elemento agora no estado deformado. ....	39
Figura 3.7	Mapa de deformações sobreposto em uma imagem de corpo de prova (TWB) de tração (esquerda). Ao centro o mapa de deformações com escala das deformações principais. À direita em detalhe a região da linha de solda com a malha sobreposta á imagem original. ....	40
Figura 3.8	Definição de uma secção de 50 mm que abrange toda a região de interesse num corpo de prova de tração entalhado. ....	41
Figura 3.9	Gráfico mostrando as diferentes etapas de uma secção e seus resultados de deformação principal. ....	42
Figura 3.10	Superfície dos corpos de prova preparados para captura de imagens. ....	43
Figura 3.11	Ilustração do critério de medição das deformações principais. ....	44
Figura 3.12	Geometria dos corpos de prova de tração . Dimensões em mm. ....	45
Figura 3.13	Variação de espessura da região central do corpo de prova. ....	46
Figura 3.14	Imagem mostrando o teste dos corpos de prova de tração entalhados e o posicionamento da câmera CCD. Em detalhe observa-se a condição superficial. ....	46
Figura 3.15	Desenho dos corpos de prova utilizados nos ensaios de estampabilidade propostos por Hasek. Dimensões em mm. ....	47
Figura 3.16	Desenho esquemático dos dispositivos utilizados no ensaio. ....	48
Figura 3.17	Máquina de ensaios triaxial com os dispositivos e câmeras instalados. À direita uma vista de um corpo de prova pronto para o teste. ....	48
Figura 4.1	Forças de soldagem durante o processo medidas para uma velocidade de soldagem de 1 m/min numa junta da liga Al 5754 H22. ....	50
Figura 4.2	Perfil de temperaturas medido durante a soldagem. Liga Al 6181 T4 com velocidade de soldagem de 1 m/min. ....	51
Figura 4.3	Perfil de temperaturas medido durante a soldagem. Liga Al 6181 T4 com velocidade de soldagem de 10 m/min. ....	51
Figura 4.4	Amostras do ensaio de dobramento da liga 6181 1 m/min (esquerda) e 10 m/min (direita). ....	52
Figura 4.5	Amostras do ensaio de dobramento da liga 5754 1 m/min (esquerda) e 5 m/min (direita). ....	52
Figura 4.6	Micrografia mostrando à esquerda o material de base do lado de avanço (1 mm) e à direita o lado de recuo (2 mm) da liga 6181 T4. Ataque químico: Barker. ....	53

Figura 4.7 Macrografia de uma junta 6181 T4 soldada com 1 m/min. Ataque químico: Barker. ....	54
Figura 4.8 Macrografia de uma junta 6181 T4 soldada com 10 m/min. Ataque químico: Barker. ....	54
Figura 4.9 Microestrutura da zona de transição entre o material de base e o centro da solda no lado de avanço da liga 6181 T4. Ataque químico: Barker. ....	55
Figura 4.10 Microestrutura da zona de transição entre o material de base e o centro da solda no lado de recuo da liga 6181 T4. À direita, em detalhe, a região marcada pelo retângulo. Ataque químico: Barker. ....	55
Figura 4.11 Microestrutura da liga 6181 T4 na região central formada por grãos pequenos e recristalizados. Ataque químico: Barker. ....	55
Figura 4.12 Microestrutura da liga 6181 T4 mostrando a zona de transição entre o material de base e o centro da solda no lado de avanço. Ataque químico: Barker. ....	56
Figura 4.13 Microestrutura da liga 6181 T4 mostrando em detalhe grãos levemente arredondados (esquerda) e ZTMA (direita). Ataque químico: Barker. ....	56
Figura 4.14 Microestrutura da zona de transição entre o material de base e o centro da solda no lado de recuo da liga 6181 T4. À direita, em maior aumento a região indicada pelo retângulo. Ataque químico: Barker. ....	57
Figura 4.15 Microestrutura da liga 6181 T4 mostrando a zona do centro da solda com grãos equiaxiais pequenos. Ataque químico: Barker. ....	57
Figura 4.16 Microestrutura do material de base da liga 5754 H22. À esquerda o lado de avanço (1 mm) e a direita o lado de recuo (2 mm). Ataque químico: Barker. ....	58
Figura 4.17 Macrografia de uma junta 5754 H22 soldada com 1 m/min. Ataque químico: Barker. ....	58
Figura 4.18 Macrografia de uma junta 5754 H22 soldada com 5 m/min. Ataque químico: Barker. ....	58
Figura 4.19 Microestrutura da liga 5754 H22 mostrando a região de transição entre MB do lado de avanço e CS. Em detalhe ZTMA (direita). Ataque químico: Barker. ....	59
Figura 4.20 Microestrutura da liga 5754 H22 mostrando a região de transição entre MB do lado de recuo e CS. Em detalhe (direita) a região da ZTMA indicada pelo retângulo. Ataque químico: Barker. ....	60
Figura 4.21 Microestrutura da liga 5754 H22 mostrando a região CS formada por grãos pequenos e recristalizados. Ataque químico: Barker. ....	60

Figura 4.22	Microestrutura da liga 5754 H22 mostrando a região de transição entre MB do lado de avanço e CS. Em detalhe ZTA/ZTMA (direita). Ataque químico: Barker.....	61
Figura 4.23	Microestrutura da liga 5754 H22 mostrando a região de transição entre MB do lado de recuo e CS. Em detalhe (direita) a região indicada mostrando ZTA/ZTMA. Ataque químico: Barker. ....	61
Figura 4.24	Vista em grande aumento das microestruturas das ZTA e ZTMA do lado de avanço (esquerda) e lado de recuo (direita) da liga 5754 H22. Ataque químico: Barker. ....	62
Figura 4.25	Microestrutura refinada e recristalizada da região CS da liga 5754 H22. Ataque químico: Barker. ....	62
Figura 4.26	Perfil de microdureza das soldas da liga 6181 T4. Velocidades de soldagem 1 m/min à esquerda e 10 m/min à direita. ....	63
Figura 4.27	Perfil de microdureza das soldas da liga 5754 H22. Velocidades de soldagem 1 m/min à esquerda e 5 m/min à direita. ....	63
Figura 4.28	Diagramas tensão deformação para a liga 6181 T4 nas condições: material de base e velocidades de soldagem 1 e 10 m/min como indicado.....	65
Figura 4.29	Posição de ruptura nas juntas da liga 6181 T4 soldadas com velocidades de 1 m/min (esquerda) e 10 m/min (direita).....	65
Figura 4.30	Diagramas tensão deformação para a liga 5754 H22 nas condições: material de base e velocidades de soldagem 1 e 5 m/min como indicado.....	67
Figura 4.31	Local de ruptura das condições 1 m/min(esquerda) e 5 m/min(direita) da liga 5754 H22. ....	67
Figura 4.32	Curva limite de conformação do material de base e as duas condições de soldagem da liga 6181 T4.....	68
Figura 4.33	Curva limite de conformação das duas condições de soldagem da liga 5754 H22. ....	69
Figura 4.34	CLC obtida dos ensaios de estampabilidade. Liga 6181 T4. ....	70
Figura 4.35	CLC obtida dos ensaios de estampabilidade. Liga 5754 H22. ....	70
Figura 4.36	Comparação dos deslocamentos em Y entre um corpo de prova do material de base (esquerda) e um TWB (direita). As setas indicam aproximadamente as proporções dos deslocamentos. ....	71

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Classificação das ligas de alumínio.....	5
Tabela 3.1	– Composição química das ligas utilizada nos testes.....	31
Tabela 3.2	Velocidades de soldagem.....	32
Tabela 4.1	Propriedades mecânicas da liga 6181 T4.....	64
Tabela 4.2	Propriedades mecânicas da liga 5754 H22.....	66

## Lista de Abreviaturas e Símbolos

AA	Aluminum Association
TWB	Tailor Welded Blanks
Nd:YAG	Neodimium-Yttrium Aluminum Garnet
FSW	Friction Stir Welding
SFMM	Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica
UNS	Unified Numbering System
SAE	Society of Automotive Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
ISO	International Standard Organisation
TWI	The Welding Institute
DIN	Deutsches Institut für Normung
LDH	Limit Dome Height
IDDRG	International Deep-Drawing Research Group
$\sigma_e$	Tensão de escoamento [MPa]
$\sigma_{max}$	Tensão máxima [MPa]
MB	Material de Base
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZTMA	Zona Termomecanicamente Afetada
CS	Centro da Solda
CLC	Curva Limite de Conformação
DLC	Diagrama Limite de Conformação
$\varphi_1$	Deformações Principais

$\varphi_2$	Deformações Secundárias
$\varphi_3$	Redução de espessura
$d$	Diâmetro inicial do elemento
$d_1$	Diagonal Maior da Elipse
$d_2$	Diagonal Menor da Elipse
$b$	Largura do Corpo de Prova de Tração [mm]
$r_e$	Raio de Concordância do Entalhe [mm]
$r$	Índice de Anisotropia
$n$	Grau de Encruamento
SPCC	Aço de Baixa Liga Laminado a Frio
$e_{\text{maior}}$	Espessura da Chapa Maior [mm]
$e_{\text{menor}}$	Espessura da Chapa Menor [mm]
HSS	High Strength Steel
BH	Bake Hardening
DDQ	Deep Drawing Quality
HSLA	High Strength Low Alloy
$r_d$	Raio de Concordância da Aresta do Ensaio de Dobramento
ccd	Charge-Coupled-Device
$l_0$	Comprimento Inicial para Cálculo da Elongação do Corpo de Prova de Tração
G	Tamanho de grão segundo a norma ASTM E112

## Resumo

Na tentativa de produzir componentes cada vez mais leves e seguros a indústria automotiva vem continuamente atualizando seus produtos no que diz respeito à associação de materiais, uso de uniões por solda, utilização de ligas leves em substituição de ligas de aço e etc. Três são os motivos básicos para estas mudanças: aumento da segurança dos passageiros, diminuição do consumo de combustível e redução os custos de produção.

As ligas de alumínio, em sua maioria desenvolvidas para uso em tecnologia aeronáutica, vêm ganhando espaço também na produção de automóveis de passeio. Um dos maiores problemas apresentados pelas ligas de alumínio é a baixa soldabilidade dificultando a produção de componentes como os conhecidos Tailor Welded Blanks (TWB). TWB consiste em unir através de solda materiais de espessura e ou propriedades mecânicas diferentes formando uma geratriz para posterior estampagem de um componente.

Este trabalho inova confeccionando juntas a partir de chapas de espessuras diferentes (TWB) através de soldagem por fricção e mistura mecânica (SFMM) a partir de ligas de alumínio com velocidades de soldagem convencionais (1m/min) e em altas velocidades atingindo 5 e 10m/min dependendo da liga. Duas ligas de alumínio foram utilizadas, AA5754 (não tratável termicamente) e AA6181 (tratável termicamente). Foram realizados ensaios metalográficos, perfis de microdureza, ensaios de tração. Foram realizados também ensaios para levantamento de curvas limite de conformação através de ensaios de tração em corpos de prova etalhados e ensaios de estampabilidade. Os resultados mostram que o processo SFMM é adequado para soldas de espessuras diferentes em altas velocidades. Os ensaios de microdureza não apresentam as típicas variações observadas em processos de soldagem convencional, os testes mecânicos apresentam bons resultados, especialmente para as juntas da liga AA6181 que em ambas as condições de soldagem apresentaram valores de tensão próximos aos valores do material de base. Os testes de estampagem mostram que as juntas da liga AA5754 apresentam desempenho superior ao material de base quando conformadas, desta forma provando que essa técnica pode ser utilizada para fabricação de geratrizes para estampagem de componentes.

## Abstract

The automotive industry, willing to produce lighter and safer vehicles, is continually updating the components in terms of associating different materials, use of welded joints, lightweight materials replacing steel alloys and etc. Basically three are the reasons guiding to this changes. Increase passengers' safety, decrease fuel consumption and reduce manufacturing costs.

Aluminum alloys, generally developed to aero spatial industry, are taking place also in the production lines of passenger vehicles. The low weldability presented by aluminum alloys is the most harmful problem to face with when producing Tailor Welded Blanks (TWB), for an example. TWB consists in joining by weld two different materials in thickness and or mechanical properties generating a panel for further forming.

This job innovates while associating Aluminum TWB made from different thickness material welded by Friction Stir Welding (FSW) in conventional speed (1 m/min) and high travel speed reaching 5 or 10 m/min depending on each alloy. Two different aluminum alloys were used, AA 5754 (non heat-treatable) and AA 6181 (heat treatable). Metallographic tests, hardness profiles and tensile tests were performed. Forming limit diagrams were also constructed through notched tensile and formability tests. The results have shown the FSW process is applicable even for high speed and different thickness joints. The hardness profile hasn't shown the typical variation observed in conventional welding processes. The mechanical tests have shown good results, specially the AA 6181 joints that have shown excellent strength results, close to the base material, in both welded conditions. The formability test showed that the AA 5754 alloy when formed can resist to even bigger strain than its base material evidencing this technology is applicable for generating TWB panels.



## 1.0 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva atual está passando por diversas mudanças nos conceitos básicos de produção de automóveis. A motivação para mudanças está intrinsecamente ligada às necessidades de fazer com que os novos automóveis se encaixem nas regras de emissão de poluentes e segurança de passageiros.

As reduções de emissões se aplicam não somente aos motores dos automóveis produzidos mas também as indústrias que devem produzir com cada vez menor consumo de energia e baixos níveis de poluentes. Como grande parte da carroceria de um automóvel é construída a partir de componentes estampados há a tentativa de realizar este processo com maior economia. O uso de materiais de menores espessuras, por exemplo, diminui as forças de estampagem aumentando a economia do processo. Materiais que adquirem dureza no decorrer do processo também trazem grandes vantagens pois podem ser conformados enquanto menos resistentes e posteriormente, por deformação ou tratamento térmico atingem os valores de resistência mecânica desejados.

Muitas pesquisas foram e estão sendo realizadas na tentativa de construir um automóvel mais seguro, menos poluente, conceito esse intimamente ligado com o peso total do veículo<sup>1</sup>. A segurança dos passageiros está diretamente relacionada com a estrutura do automóvel. A indústria metal mecânica em parceria com as montadoras vem desenvolvendo novas ligas que apresentem alta resistência e possam ser manufaturadas com facilidade pelas montadoras. À medida que se utilizam materiais mais resistentes há a possibilidade de redução nas espessuras resultando assim em menor peso total da carroceria.

A carroceria de um automóvel de passeio representa, aproximadamente, 30% do seu peso total, desta forma é de grande importância a sua otimização. Novas tecnologias como a fabricação de painéis (laterais, portas, etc.) e também componentes estruturais a partir de chapas soldadas vem apresentando bons resultados. O intenso uso de alumínio, por exemplo, pode também reduzir o peso médio de um veículo em torno de 300kg<sup>2</sup>. Pesquisas mostram que a redução de 100 kg no peso total de um automóvel representa em média uma economia de 0,6 l a cada 100 km<sup>2</sup>.

A técnica conhecida como “Tailor Welded Blanks” (TWB) vem apresentando ótimos resultados. Esta técnica consiste na fabricação de componentes a partir materiais diferentes unidos por solda. Os materiais podem variar em espessura, resistência mecânica, acabamento superficial e até mesmo composição química (com restrições). O princípio básico é simples: utilização de materiais adequados para as regiões que os necessitam. Por exemplo, quando determinadas regiões de um componente sofrem solicitações críticas, utiliza-se então uma maior espessura de parede ou um material mais resistente somente onde é necessário. Além da possibilidade de reduzir excesso de material há também a redução de retalhos (restos de processos de corte) e, naturalmente, em alguns casos redução nos esforços de estampagem.

Além de utilizar processos de soldagem, que introduzem severas alterações nos materiais de base, os painéis de TWB ainda passarão por processos de estampagem para adquirirem suas formas finais. Desta forma, é de suma importância que inicialmente os materiais apresentem boas propriedades de estampabilidade e que após o processo de soldagem estas propriedades continuem adequadas.

Muitas pesquisas mostram vantagens na utilização de TWB em aço. As chapas de aço podem ser soldadas por vários métodos porém os mais utilizados são os a Laser CO<sub>2</sub> e Nd:YAG (Neodimium-Yttrium Aluminum Garnet). TWB fabricados a partir de ligas de aço soldados via laser apresentam tipicamente cordão de solda de maior dureza e resistência mecânica e menor ductilidade<sup>3</sup>. Em geral há uma queda na estampabilidade dos TWB em relação ao metal de base. Esta queda está relacionada não somente as alterações de propriedades induzidas pelo processo de soldagem como também a razão de espessura entre as chapas<sup>4</sup>.

Existe grande motivação para a produção de TWB's a partir de ligas de alumínio, unindo, assim, todas as vantagens da técnica com as vantagens das ligas de alumínio que podem apresentar, em alguns casos, os mesmos patamares de resistência com grande redução de peso. Porém poucos pesquisadores apresentam resultados de trabalhos nesta área. É conhecido que as ligas de alumínio não são tão facilmente soldáveis como as ligas de aço e suas propriedades de estampabilidade depois de soldadas também não são tão conhecidas como nos aços.

Inúmeras pesquisas na área de soldagem de ligas de alumínio através de uma nova tecnologia de soldagem por fricção vêm sendo realizadas. Conhecida originalmente por

“Friction Stir Welding” (FSW), em português denominada como Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica (SFMM) apresenta bons resultados em ligas de alumínio, inclusive naquelas até então consideradas não soldáveis como no caso das ligas 2000 e 7000. A grande diferença é que esta técnica trabalha a baixas temperaturas não fundindo os materiais evitando assim problemas de porosidade, contração na solidificação, etc.

Existem alguns, porém poucos, resultados publicados sobre a aplicação desta técnica de soldagem associada com a fabricação de TWB's ou na área de estampabilidade das juntas. Inicialmente esta técnica apresentava grande desvantagem em relação às técnicas convencionais em relação a velocidade de soldagem, porém hoje em dia este problema foi, na maioria dos casos, superado<sup>5 - 7</sup> (como visto também neste trabalho). Os resultados em termos de resistência mecânica são comparáveis ou melhores que os apresentados pelas técnicas convencionais<sup>3,8</sup>.

O objetivo deste trabalho é estudar as propriedades mecânicas de TWB fabricados em ligas de alumínio soldados pela técnica SFMM em altas velocidades de soldagem. Os materiais utilizados foram as ligas 6181 no estado T4 (tratável termicamente) e a 5754 no estado H22 (não tratável termicamente). Os TWB são soldados com velocidades normais (1 m/min) e em alta velocidade (10 m/min para a liga 6181 T4 e 5 m/min para a liga 5754 H22) com razão de espessura igual a 2 (chapas de 2 mm com chapas de 1 mm).

Os testes realizados para caracterização destes TWB's foram inicialmente ensaios metalográficos, ensaios de microdureza, testes de tração simples para caracterização e qualificação das juntas, especialmente nas condições de alta velocidade. Posteriormente, para estudo da estampabilidade destes TWB's foram realizados ensaios de tração entalhados e ensaios de estampabilidade segundo o método proposto por Hasek para medição das deformações na superfície e construção das Curvas Limite de Conformação (CLC).

## 2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### Alumínio e suas ligas

As ligas de alumínio têm apresentando crescimento constante em utilização nas indústrias automotiva, aeroespacial, em uso estrutural e também de decoração.

O alumínio e suas ligas possuem densidade de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , o que representa aproximadamente  $1/3$  da densidade dos aços. Somando-se a isso os valores de resistência mecânica, tem-se um material atrativo que em muitos casos substituem ligas ferrosas com muitas vantagens. Adicionalmente a camada de óxido de alumínio estável que se forma na superfície das ligas de alumínio oferece uma boa proteção contra corrosão, além de possuir uma superfície brilhante que valoriza o aspecto estético.

As ligas de alumínio podem ser fundidas ou trabalhadas mecanicamente. As ligas trabalháveis mecanicamente, utilizadas neste trabalho, estão divididas em dois grandes grupos: Tratáveis termicamente, capazes de adquirir dureza por tratamento térmico de solubilização e envelhecimento; Não tratáveis termicamente, adquirem dureza apenas através de endurecimento por solução sólida, conseqüente da deformação, encruamento. Dentro destes dois grupos as ligas são subdivididas em séries que diferem basicamente pelos elementos de liga que lhes são adicionados<sup>9,10</sup>. A nomenclatura utilizada para identificar as ligas e seus tratamentos térmicos ou mecânicos segue o aprovado pelas instituições como “Aluminum International Organization”, AA (Aluminum Association) UNS (Unified Numbering System) que é amparada/desenvolvida pelas organizações SAE, ASTM e ISO.

Uma designação numérica de 4 dígitos é utilizada para descrever as ligas de alumínio. O primeiro dígito indica o grupo pelo principal elemento de liga, como visto na Tabela 2.1.

As ligas de alumínio que podem ser tratadas termicamente pelos processos de solubilização e envelhecimento são as das séries 2000, 6000 e 7000.

As ligas da série 2000 possuem Cobre como o principal elemento de liga e apresentam resistência mecânica elevada. Estas ligas devem ser beneficiadas por

tratamento de solubilização e envelhecimento e, nesta condição, alcançam propriedades mecânicas ótimas. Para algumas ligas da série 2000 as propriedades mecânicas são superiores as apresentadas por alguns aços de baixo carbono.

Tabela 2.1 Classificação das ligas de alumínio

Elemento	Grupo
Alumínio Puro (Al $\geq$ 99,0%)	1xxx
Cobre	2xxx
Manganês	3xxx
Silício	4xxx
Magnésio	5xxx
Magnésio e Silício	6xxx
Zinco	7xxx
Outros elementos	8xxx
Série reservada para uso futuro	9xxx

Estas ligas foram desenvolvidas em sua maioria para uso aeroespacial. Em alguns meios apresentam baixa resistência à corrosão e, em geral, não permitem serem soldadas por procedimentos convencionais. Em geral são unidas por rebites, como no uso em aeronaves.

As ligas da série 6000 possuem Silício e Magnésio como principais elementos de liga na proporção necessária para formação de Silicato de Magnésio ( $Mg_2Si$ ). São provavelmente as ligas mais encontradas na montagem de estruturas. Apresentam resistência mecânica média/alta (inferiores as ligas 2000 e 7000), baixa temperabilidade e boa resistência à corrosão.

As ligas tratáveis termicamente são as mais importantes, facilmente encontradas em perfis extrudados, e também em chapas e barras. Embora todas as ligas desta série tenham tendência a ser susceptíveis à trinca são consideráveis de boa soldabilidade e são realmente amplamente soldadas na indústria. A escolha exata dos metais de adição deve ser cuidadosamente realizada para evitar trincas pois normalmente os problemas ocorrem quando soldadas sem metal de adição ou com adição insuficiente.

As ligas da série 7000 possuem Zinco como principal elemento de liga e apresentam resistência mecânica variando de média a alta. Alguns elementos como Cobre e Cromo são também adicionados em baixas concentrações para aumento das propriedades mecânicas.

Algumas ligas desta série apresentam alta resistência mecânica e são regularmente utilizadas na indústria aeroespacial. São encontradas na forma de folhas, chapas, forjados, barras e também perfis extrudados. Geralmente são consideradas como não soldáveis por processos convencionais, exceto as ligas 7003, 7005 e 7039. As ligas 7000 de alta resistência mecânica apresentam baixa resistência à corrosão sob tensão e são geralmente superenvelhecidas na tentativa de obter melhores combinações de resistência mecânica, resistência a corrosão e tenacidade à fratura.

As ligas de alumínio que adquirem dureza através de trabalho mecânico pertencem as séries 1000, 3000, 4000 e 5000. Estas ligas apresentam facilidade de superenvelhecimento acarretando em perda de dureza, mesmo em temperatura ambiente, desta forma um tratamento a baixa temperatura é aplicado na tentativa de estabilizar as propriedades mecânicas.

As ligas da série 1000 são essencialmente alumínio puro (99% de pureza). São caracterizadas por propriedades mecânicas relativamente baixas, facilmente trabalháveis, boa resistência à corrosão e boa condutividade elétrica. São utilizadas também em indústrias químicas nas aplicações onde alta resistência a corrosão se faz necessária. Todas as ligas desta série são consideradas facilmente soldáveis por processos convencionais

As ligas da série 3000 possuem níveis de Manganês de até 1,5% que aumentam suas propriedades mecânicas e aumentam a resposta à deformação a frio. Possuem resistência mecânica mediana, boa resistência à corrosão e são facilmente soldáveis por processos convencionais. São normalmente utilizadas para sistemas de ar condicionado, refrigeração, acabamentos não estruturais de construções, entre outras aplicações.

As ligas da série 4000 possuem Silício como elemento de liga e tem pouca aplicação para trabalho mecânico. São utilizadas como metais de adição, arames ou varetas, também como metal de adição em juntas brazadas e também na fundição em matrizes ou moldes de areia.

As ligas da série 5000 possuem Magnésio como elemento de liga adicionado para aumentar sua resistência e endurecimento por deformação a frio. Geralmente possuem excelente resistência à corrosão e apresentam as melhores propriedades mecânicas de todas as ligas não tratáveis termicamente. À medida que se aumenta o teor de Mg há um aumento na resistência mecânica.

Estas ligas são normalmente encontradas na forma de folhas, chapas e tiras sendo as mais comumente utilizadas em estruturas de alumínio. São soldáveis por processos convencionais e podem ser soldadas com ou sem metal de adição. Porém há um pico de susceptibilidade à trinca a aproximadamente 2,5% Mg, dificultando a soldagem da ligas como 5052. Este problema é solucionado com a escolha de um metal de adição que reduza o risco de trincas.

### 2.1.1 Classificação dos Tratamentos das Ligas de Alumínio

A classificação dos tratamentos é realizada utilizando uma letra maiúscula seguida da designação da liga. Cada letra maiúscula descreve o tratamento ou seqüência de tratamentos para obter certos níveis de propriedades. As designações básicas são descritas a seguir<sup>9,10</sup>:

F, (como fabricado): é aplicado a produtos em suas condições originais. Trabalhados a frio, a quente, fundidos e etc, sem especificação das propriedades mecânicas.

O, (recozido): recozimento é aplicado aos produtos manufaturados e fundidos com o objetivo de obter baixa resistência mecânica e aumentar ductilidade.

H, (endurecido por trabalho a frio): Usado para descrever que os produtos trabalhados (somente) são endurecidos por trabalho mecânico a frio, seguidos ou não de algum tratamento térmico complementar.

W (solubilizado): Tratamento instável utilizado apenas para ligas com capacidade de envelhecimento natural, quando a resistência pode mudar durante um período de tempo (meses, anos). É específico somente quando o período de envelhecimento natural é indicado.

T (têmpera diferente de F, O ou H): Aplicado a ligas em que a resistência é estável com ou sem trabalho mecânico adicional, é dividido em 10 condições diferentes, variando de T1 até T10.

## 2.2 Considerações Especiais sobre a Soldabilidade das Ligas de Alumínio

### 2.2.1 Tratáveis Termicamente

As ligas de alumínio tratáveis termicamente possuem características inerentes a todas as ligas de alumínio que devem ser observadas antes de um procedimento de soldagem bem sucedido. Estas características incluem uma aderente camada de óxido, alta condutividade térmica, alto coeficiente de expansão térmica, contração na solidificação quase duas vezes maior que nas ligas ferrosas, relativamente alta faixa de temperatura de solidificação e alta solubilidade do Hidrogênio no metal fundido.

Os primeiros dois itens são relacionados a preparação para soldagem e o processo em si. Na tentativa de minimizar o óxido e proceder a soldagem por fusão são empregadas altas correntes e altas velocidades de soldagem para garantir a penetração adequada. Porém as demais características devem ser observadas, pois podem desqualificar o procedimento.

O alto coeficiente de expansão térmica e contração na solidificação combinados com a relativamente alta faixa de temperatura de solidificação faz com que estas ligas sejam susceptíveis a trincas de solidificação.

A alta solubilidade do Hidrogênio no material fundido pode resultar na presença de porosidade no interior da solda.

Somando-se a isso, a degradação da ZTA nestas ligas pode variar consideravelmente dependendo dos parâmetros do procedimento de soldagem<sup>7</sup>, pode haver também dissolução ou crescimento de precipitados.

### 2.2.2 Não tratáveis termicamente

Quando ligas de alumínio não tratáveis termicamente são soldadas haverá comprometimento microestrutural das regiões afetadas. O dano nas ZTA é limitado a recuperação, recristalização e crescimento de grão, isto faz com que as conseqüências não sejam tão graves quanto nas ligas tratáveis termicamente. Isso possibilita a utilização de algumas ligas diretamente sem tratamento térmico após soldagem.

Normalmente o metal de adição é o ponto mais fraco de uma solda destas ligas e é o ponto onde ocorre a falha em caso de solicitações de tração. A microestrutura na região



do metal de adição é grosseira apresentando grãos epitaxiais com subestrutura celular ou colunar dendrítica.

É importante salientar que a eficiência das juntas é normalmente maior em chapas recozidas e decrescem continuamente com o grau de trabalho mecânico<sup>7</sup>.

### 2.3 Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica

O processo de soldagem por fricção e mistura mecânica (SFMM) é um processo desenvolvido na Inglaterra, patenteado pelo instituto TWI (The Welding Institut) em 1991.

A ferramenta e o princípio do processo são mostrados nas Figuras 2.1 e 2.2. É um processo de soldagem linear que através do calor gerado por uma ferramenta rotativa (pino) inserida numa junta provoca a plastificação do material possibilitando assim a mistura de ambos os lados da junta. O ombro da ferramenta, além de produzir calor por atrito, tem função a de conter o material plastificado que é forçado para trás da ferramenta. Pelo fato de não haver fusão do material este processo é caracterizado como sendo um processo de união no estado sólido.

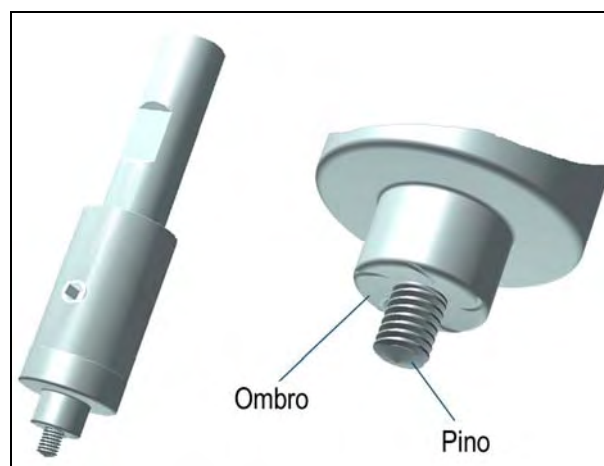


Figura 2.1 Ferramenta utilizada no processo de SFMM.

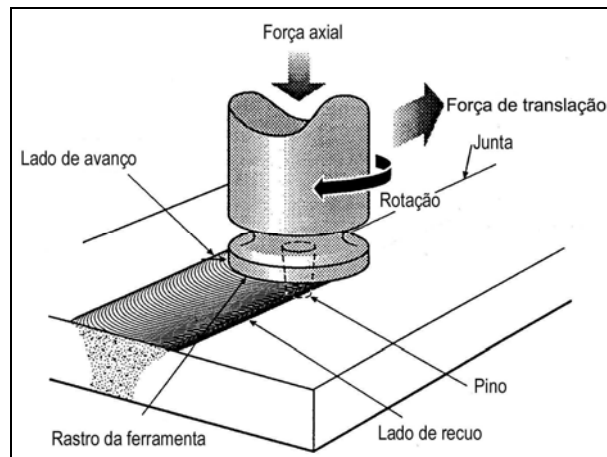


Figura 2.2 Princípio do processo SFMM<sup>6</sup>.

O processo apresenta muitas vantagens quando comparado com processos de soldagem convencional (por arco), algumas destas vantagens são listadas a seguir:

- Soldagem no estado sólido evitando problemas de trincas de solidificação ou porosidades.
- Baixa distorção
- É possível trabalhar em qualquer posição
- Não é necessário o uso de metal de adição ou proteção gasosa
- Sem respingos, fumos, radiação
- Utiliza máquinas ou robôs, desta forma facilmente automatizada reduzindo a necessidade de soldadores habilidosos
- Boas propriedades mecânicas, que para ligas alumínio na maioria das vezes excede as propriedades obtidas por soldagem convencional

Algumas limitações também devem ser citadas:

- Presença de furo de saída ao final de um cordão de solda, porém existem pesquisas na área fechamento do furo ou utilização de pino retrátil
- Altas forças são necessárias no processo.

- Não é tão flexível quanto um processo manual.

A possibilidade de realizar soldas de boa qualidade em ligas de alumínio até então consideradas não soldáveis, como as ligas Al-Cu (2000), Al-Zn (7000) e Al-Li (8090, 2090 e 2195), fez com que o processo SFMM se desenvolvesse tão rapidamente de 1991 até os dias de hoje. A indústria aeroespacial, principal usuária das ligas acima citadas, passou a aceitar o conceito de juntas soldadas em aeronaves, propiciando assim mais estímulo para o desenvolvimento.

A possibilidade de realizar soldas em linha reta percorrendo grandes distâncias fez com que perfis de difícil extrusão pudessem ser produzidos pelo processo SFMM a partir de perfis planos ou chapas, como visto na Figura 2.3.

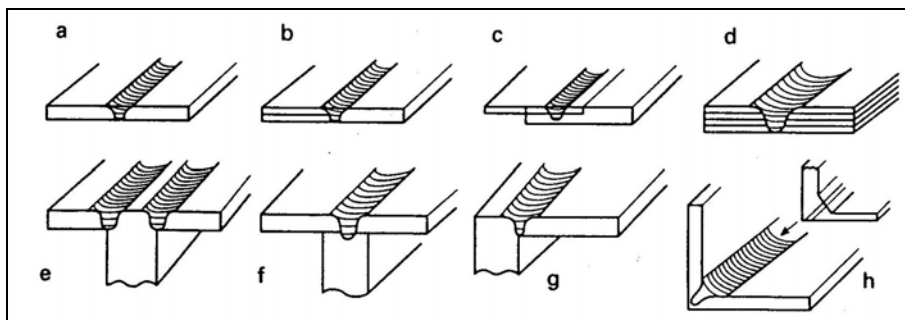


Figura 2.3 Algumas geometrias onde o processo SFMM pode ser utilizado<sup>6</sup>.

O processo SFMM é amplamente utilizado e de fato foi desenvolvida para soldagem de ligas de alumínio. O processo foi desenvolvido inicialmente para as ligas 1000, 2000, 5000, 6000, 7000 e 8000 em seções de 6-10 mm de espessura. Há pesquisas em soldagens de espessuras maiores, de até 50 mm em um único passe e 75 mm em dois passes (ambos os lados). Por outro lado muitas soldas nas ligas 5000 e 6000 têm sido realizadas em espessuras de 1 mm ou até mesmo inferiores<sup>5</sup>. Soldas dissimilares também têm sido obtidas sem grandes dificuldades<sup>6</sup>.

Outras ligas também apresentam bons resultados quando se utiliza SFMM, é o caso de ligas fundidas de Magnésio, Cobre, Titânio, Chumbo, Zinco e até mesmo ligas de Aço apresentaram resultados satisfatórios<sup>6</sup>.

### 2.3.1 Etapas do Processo de Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica

O procedimento seguido no processo SFMM é mostrado na Figura 2.4 e descrito brevemente nos itens a seguir<sup>6</sup>:

União das placas ou chapas a serem soldadas firmemente uma contra a outra evitando que as mesmas se separem ou desloquem durante o procedimento;

Uma ferramenta cilíndrica com um pino no meio (Figura 2.1) gira constantemente e é inserida na linha da junta até que o pino penetre completamente e o ombro toque a superfície das placas. A posição final da ponta do pino deve ser bem próxima da face inferior que está sobre a placa de apoio.

A ferramenta, em rotação, é deslocada transversalmente na linha da solda. Neste momento é aplicada a força de translação e também há um aumento na força de soldagem (recalque).

Ao final do percurso a ser soldado a ferramenta para, e ainda em rotação, é retirada da junta.



Figura 2.4 Etapas do processo de SFMM.

### 2.3.2 Características Microestruturais da SFMM

As soldas produzidas pelo processo SFMM em ligas de alumínio são geralmente divididas em quatro zonas visualmente distintas, como visto na Figura 2.5.

A zona distante da solda (zona A), que não sofreu nenhuma influência da temperatura, possui ainda as características do material de base (MB).

A zona B é descrita como a zona termicamente afetada (ZTA). Nesta região as propriedades e microestrutura são afetadas pela temperatura oriunda da soldagem, porém não se verifica deformação mecânica. Nesta região normalmente a dureza apresentará um decréscimo à medida que se segue em direção à solda. Embora não se observe claras mudanças na estrutura dos grãos usualmente é possível se observar mudanças microscópicas.

A zona C faz parte da zona termomecanicamente afetada (ZTMA). Nesta região o efeito da temperatura é mais severo, é provável que a temperatura alcançada seja suficiente para dissolver precipitados, ao menos os menores<sup>6</sup>. O material também sofre deformação mecânica considerável, como visto em estruturas laminadas, por exemplo, onde os grãos deformados podem ser girados em até 90°. São observados sinais de recristalização e alguns grãos equiaxiais formados nas regiões mais quentes.

A zona D é o centro da solda (CS), está inserida dentro da ZTMA porém apresenta diferenças marcantes. Na região CS o material é dinamicamente recristalizado durante o processo de soldagem. Normalmente o contorno entre CS e o resto da ZTMA é bastante distinto, porém quando examinado em altas magnificações pode não ser tão pronunciado. O tamanho de grão é sempre bem refinado e equiaxial. Em ligas de alumínio a temperatura atingida é tal que há dissolução de precipitados e, em caso de ligas com partículas intermetálicas, as mesmas são quebradas devido aos altos esforços cisalhantes, dissolvidas ou ainda dispersas homogeneamente. Durante o resfriamento a nucleação e crescimento de alguns precipitados pode ocorrer acarretando num aumento de dureza. Envelhecimento natural pode ocorrer em algumas ligas.

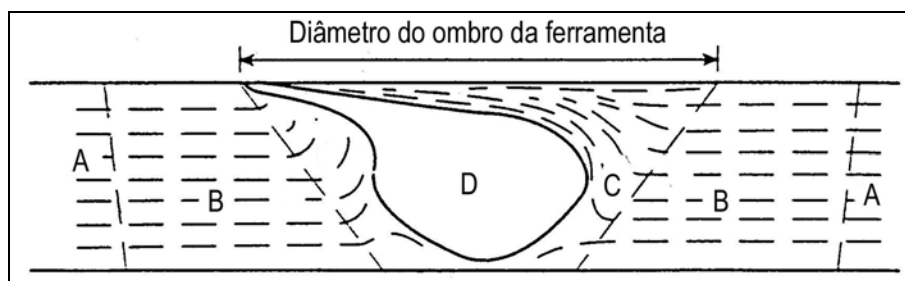


Figura 2.5 Esquema mostrando as zonas microestruturais da SFMM onde: A, material de base não afetado; B, zona termicamente afetada (ZTA); C, zona termomecanicamente afetada (ZTMA); D, centro da solda (CS)<sup>6</sup>.

## 2.4 Tailor Welded Blanks (TWB) e sua utilização na Indústria Automobilística.

Nas últimas duas décadas inúmeras mudanças foram introduzidas na produção de automóveis. Mudanças estas forçadas pelas novas leis de emissões e seguranças de passageiros que obrigam reduções nos níveis de emissão de poluentes e maior segurança para os usuários dos veículos. O mercado cada vez mais competitivo traz também a necessidade da redução nos custos de produção para que os produtos finais apresentem preços mais atraentes.

Muitas tentativas com diversos materiais diferentes, compósitos e ligas leve foram realizadas. Porém a utilização de métodos de modelamento matemático associada ao profundo conhecimento e experiência que se possuía na época sobre ligas de aço fizeram com que os projetistas trabalhassem como alfaiates, “costurando” através de soldas diferentes chapas de aço para obter um componente final com as devidas propriedades adequadas nas devidas regiões, originando assim o termo Tailor Welded Blank (TWB). A possibilidade de reduzir espessura nas regiões onde as solicitações são menores resulta em considerável economia de material.

Muitas são as aplicações dos Tailor Welded Blanks (TWB) em um automóvel de passeio, a Figura 2.6 mostra algumas das possibilidades de aplicação. A possibilidade de redução de custos de produção vem tornando a sua utilização cada vez mais atrativa e incentivando ainda mais o uso em novos propósitos/componentes.

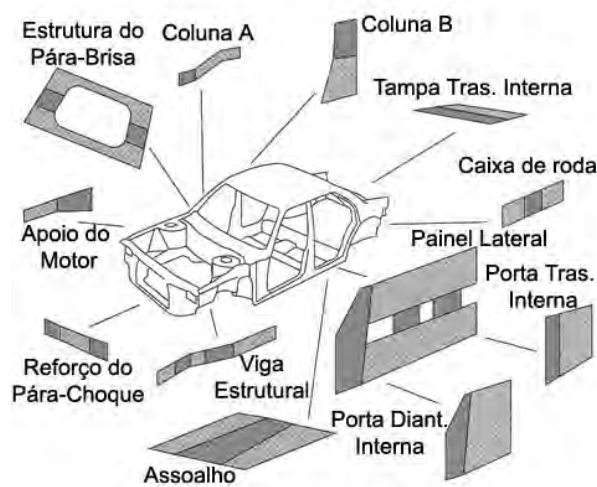


Figura 2.6 Alguns exemplos da aplicação de TWB's em automóveis de passeio <sup>11</sup>.

Na Europa o primeiro registro da utilização de TWB pela fabricante de automóveis Volvo, da Suécia<sup>11</sup>. Em 1979 a Volvo iniciou a produção de chapas soldadas por resistência elétrica. Atualmente outras empresas (Volkswagem, Seat) usam solda por resistência na fabricação de sub-chassi (estrutura de sustentação do motor), caixas de roda e vigas absorventes de impacto.

A empresa alemã Audi foi a primeira a utilizar solda laser, desde 1985, na fabricação do assoalho de alguns modelos. As chapas utilizadas para fabricação do assoalho eram de espessura inferior às mínimas espessuras necessárias para solda por resistência elétrica, o comprimento da solda também foi um fator decisivo para a mudança, na época o comprimento máximo admissível para a soldagem por resistência era de 1m.

No Japão há registros de uso de solda laser pela Toyota desde 1986 com ou sem metal de adição. O metal de adição é utilizado nas soldas que necessitem de boa aparência, no caso de painéis externos, no caso de partes estruturais onde a estética não é o mais importante as soldas são realizadas sem metais de adição. O uso da solda por feixe de ondas (beam waving) pode reduzir a contração devido a ausência de metal de adição, porém o acabamento ainda não é ideal para painéis externos. A utilização de feixe de ondas possibilitou a Toyota realização de soldas de qualidade em chapas cortadas por cisalhamento sem grande precisão dimensional, com este método próprio foi possível a soldagem de juntas com espaçamento de até 10% da espessura das chapas, reduzindo assim drasticamente o número de soldas rejeitadas<sup>11</sup>.

## 2.5 Estampabilidade de Tailor Welded Blanks

Em geral estas chapas são soldadas formando geratrizes para posteriores processos de estampagem formando assim o componente final. É de conhecimento geral que o processo de soldagem introduz severas mudanças nas propriedades das regiões termicamente afetadas, variando diretamente os valores de resistência mecânica e alongamento. Somando se a isso há também, em grande maioria dos casos, uma diferença de resistência mecânica ou de espessura entre os lados da junta o que modifica drasticamente o comportamento da peça quando estampada. É necessário um grande

controle das forças de estampagem, espaçamento entre as matrizes, pressão nos prensa chapas, lubrificação, entre outros fatores, para se obter uma estampagem segura.

As falhas que ocorrem quando TWB são estampados estão relacionadas as relações de resistência mecânica e de espessura dos materiais utilizados havendo assim um lado mais forte (maior espessura ou resistência mecânica) e um lado mais fraco (menor espessura ou resistência mecânica) que sob a ação de uma mesma força crítica apresentará defeito primeiramente. Estudos relacionam a ocorrência de fratura com a intensidade da movimentação da linha de solda na estampagem, em geral quando deformados a linha de solda move-se em direção ao material mais forte (mais espesso ou resistente)<sup>3,4,21,25</sup>, um exemplo é ilustrado na Figura 2.7. Isto acontece devido à tendência do material mais forte não deformar tanto quanto o material mais fraco intensificando assim as solicitações no lado mais fraco.

O simples posicionamento do cordão de solda em regiões neutras, desta forma evitando grandes movimentações, já reduz a chance de falha, porém em certos casos isso não é possível sendo assim indispensável o estudo das propriedades de estampabilidade na região.

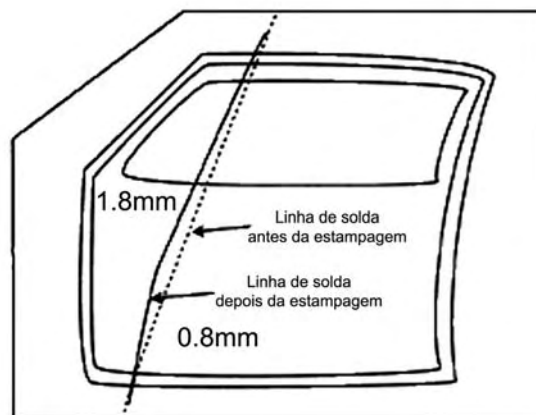


Figura 2.7 Esquema mostrando o comportamento de linha se solda antes e depois do processo de estampagem<sup>11</sup>.

Quando materiais de mesma espessura e de mesma resistência mecânica são soldados e estampados a deformação no sentido o cordão de solda provoca fratura perpendicular ao mesmo, como ilustrado na Figura 2.8. Isso se deve as alterações severas na microestrutura e propriedades mecânicas provocadas pelo processo de solda.



No caso de soldas dissimilares a fratura ocorre na região de menor espessura ou de menor resistência mecânica paralelo à linha de solda, como indicado na Figura 2.8. Nestes casos há uma movimentação da linha de solda em direção ao material mais forte (mais espesso ou mais resistente) que não se deforma tanto quanto o lado menos resistente<sup>3,4,11,16,21,23,25</sup>.

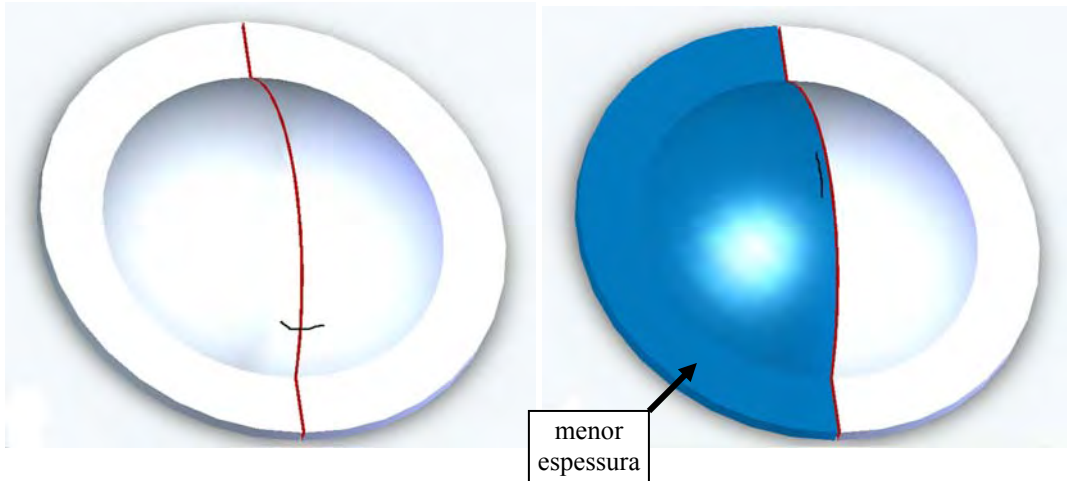


Figura 2.8 Posição da fratura em TWB de materiais e espessuras semelhantes (esquerda) e no caso de materiais ou espessuras diferentes (direita).

## 2.6 Métodos para Avaliação da Estampabilidade de Chapas Metálicas

Muitos métodos foram desenvolvidos para avaliação da estampabilidade e formabilidade de chapas metálicas. Neste trabalho serão descritos em detalhe somente os métodos mais utilizados para a construção das curvas limite de conformação.

### 2.6.1 Curva Limite de Conformação (CLC)

A curva limite de conformação é uma curva que delimita a região segura da região de ruptura no diagrama limite de conformação (DLC) onde são expressos graficamente os valores das deformações principais  $\varphi_1$ , versus deformações secundárias  $\varphi_2$ <sup>12</sup>.

Keeler<sup>13</sup> desenvolveu uma maneira de medir deformações através da marcação de uma malha de círculos de diâmetros conhecidos  $d$  na superfície de corpos de prova de ensaios de tração biaxial, medindo os mesmos após a ruptura. Após o ensaio os círculos adjacentes à fratura apresentavam forma elíptica, ou de diâmetro uniformemente maior (em

caso de estiramento biaxial puro), sendo realizada, então, a medição de forma que a maior diagonal é denominada de  $d_1$  e a menor diagonal  $d_2$ . São então calculadas deformações  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  de acordo com a equação 1 e graficamente expressas  $\varphi_1$  no eixo das ordenadas e  $\varphi_2$  no eixo das abscissas. Em se tratando de um ensaio de tração biaxial as deformações  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  são sempre positivas, sendo assim somente o quadrante positivo do gráfico é preenchido ( $\varphi_1 > 0$ ;  $\varphi_2 > 0$ ).

$$\varphi_1 = \ln \frac{d_1}{d}, \quad \varphi_2 = \ln \frac{d_2}{d} \quad (1) \quad \text{onde: } d_1 = \text{maior diagonal medida}$$

$$d_2 = \text{diagonal perpendicular a } d_1$$

Posteriormente Goodwin <sup>14</sup>, baseado no mesmo método de medição utilizado por Keeler <sup>13</sup>, desenhou a curva para o lado tração/compressão ( $\varphi_1 > 0$ ;  $\varphi_2 < 0$ ) obtendo resultados que representassem melhor as deformações ligadas ao processo de estampagem profunda.

O conjunto dos diagramas de Goodwin e Keeler é então conhecido como diagrama limite de conformação (DLC) expresso na Figura 2.9. Este diagrama, atualmente é desenhado em maneiras diferentes dependendo de que limites de deformação devem ser determinados; um para o momento da fratura e um para estrição.

Neste trabalho a curva limite de conformação é representada graficamente levando em conta a estrição. Isto significa que a metodologia de medição leva em conta sempre a segurança para que não haja deformação localizada que acarreta em redução localizada de espessura e visíveis defeitos na superfície das chapas.

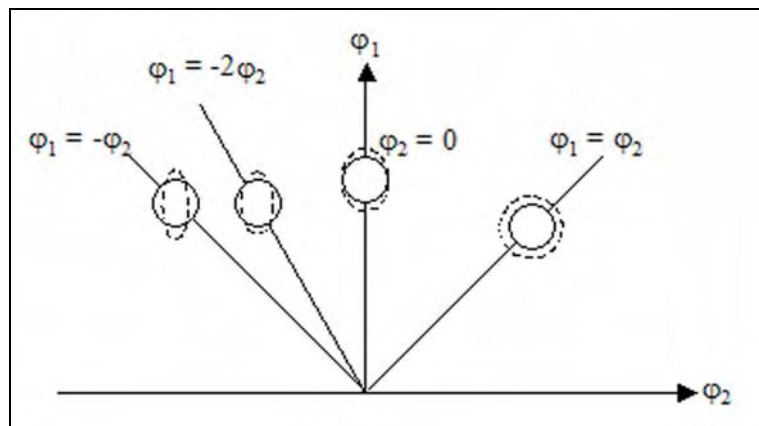


Figura 2.9 Estados de deformações que formam um DLC.

## 2.6.2 Principais testes utilizados para determinação das CLC

Uma CLC deve abranger da melhor maneira possível o campo de deformações que ocorre nos processos de conformação usualmente aplicados na indústria. Para determinar uma completa CLC um experimento deve fornecer valores de deformações variando de estiramento biaxial ( $\varphi_1 = \varphi_2$ ) passando por deformação plana ( $\varphi_2 = 0$ ), tração ( $\varphi_1 = -2\varphi_2$ ) e embutimento profundo ( $\varphi_1 = -\varphi_2$ ).

Os próximos parágrafos descrevem os principais testes dos quais se obtêm dados para construção de CLC. O ensaio Erichsen<sup>15</sup> é também descrito embora não seja diretamente utilizado para construção de CLC, porém trata-se de um dos testes pioneiros e deste foram derivados muitos outros.

### Ensaio Erichsen e suas variações

A primeira maneira de avaliar a conformabilidade de chapas de metal foi proposta por A.M. Erichsen<sup>13,15</sup> no início do século 20. O teste consiste no estiramento de uma chapa de metal por um punção hemisférico até que haja ruptura da mesma e é regido pela norma DIN 50101.

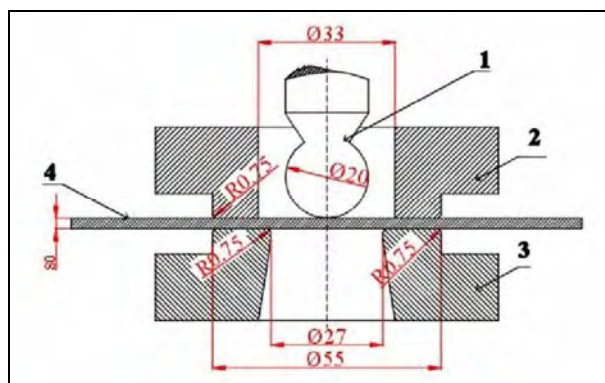


Figura 2.10 Esquema do dispositivo utilizado no ensaio Erichsen<sup>16</sup>.

O índice Erichsen (IE) é expresso pela profundidade em milímetros que o punção penetra na chapa, também chamado de embutimento. Este é o parâmetro mais utilizado para avaliar a conformabilidade de chapas metálicas.

O ensaio Erichsen tem sido usado por fornecedores de chapas soldadas como um teste rápido para conferir as propriedades das junções. O ensaio determina a relação ductilidade/tenacidade da mesma. O valor utilizado como referência para a relação do embutimento "Cordão de solda" x "Metal de base" é de 70%. Se o valor ficar abaixo a capacidade de deformação na junção (estampabilidade) fica comprometida. Quando as espessuras são de dimensões diferentes, o embutimento do metal de base deve ser sempre na parte com menor espessura<sup>17</sup>.

Muitos autores discordam da aplicabilidade, da precisão e dos fatores influenciando os resultados do teste proposto por Erichsen. Olsen, citado por Banabic<sup>12</sup> e Keeler<sup>13</sup>, propôs uma variação utilizando o mesmo princípio, porém em maiores dimensões. Hecker<sup>18</sup>, posteriormente, propôs um sistema em dimensões ainda maiores que o utilizado por Olsen na tentativa de estabelecer um teste mais confiável onde se possa ter melhores condições de lubrificação e maior controle. Assim como para o Erichsen e Olsen o índice de estampabilidade é obtido pela profundidade do embutimento do punção na chapa.

Ghosh, citado por Banabic<sup>12</sup>, após observar que a maioria dos defeitos em estampagem profunda ocorre na região de estiramento plano (deformação plana) propôs a utilização do equipamento de Hecker com amostras em forma de tiras com várias espessuras, forçando assim a obtenção do estado de deformação plana. Este teste foi então batizado de LDH<sup>13</sup>, do inglês "Limit Dome Height".

Muitos outros pesquisadores propuseram novas adaptações e diferentes geometrias para obtenção de resultados mais representativos, como exemplo pode-se citar o trabalho de Sachs com ensaios de tração em cunhas; Swift e Chung que elaboraram o primeiro modelo matemático completo confirmado por experimentos; Swift criou também um teste chamado estampagem de copo, do inglês "Cup-Drawing Test" que foi adotado com padrão pelo IDDRG (International Deep-Drawing Research Group)<sup>12</sup>.

### Ensaio de Tração Uniaxial

A utilização de corpos de prova de tração planos de variadas espessuras, com ou sem entalhes, possibilita a obtenção de diferentes estados de deformação. A variação na geometria dos entalhes possibilita o estudo da influência da triaxialidade de tensões na

ruptura. Porém somente o campo negativo das deformações secundárias ( $\varphi_2 < 0$ ) é abrangido.

A grande vantagem do uso de corpos de prova de tração é a simplicidade do teste. Pode ser realizado utilizando uma máquina universal de tração. A confecção dos corpos de prova é simples partindo de corpos de prova de tração planos variando apenas a geometria dos entalhes. Após o teste as amostras permanecem planas facilitando a medição, pois não há necessidade de contato com o punção como nos demais testes, evitando assim qualquer problema envolvendo atrito.

Proposto inicialmente por Brozzo et al., citado por Lange<sup>19</sup> e Banabic<sup>12</sup>, de uma série de cinco corpos de prova com entalhes variados é possível submeter o material, da região central da amostra, a esforços variando de deformação plana a embutimento profundo.

A geometria basicamente é descrita da seguinte forma. Sendo um corpo de prova de largura ( $b$ ) com entalhe reduzindo a metade da espessura ( $b/2$ ) e raios de concordância ( $r_e$ ) do entalhe variando entre:  $r_e=b$ ,  $r_e=b/2$ ,  $r_e=b/3$ ,  $r_e=b/4$  e  $r_e=b/8$ , como mostrado na Figura 2.11. Como desvantagem tem-se o fato de abranger apenas o quadrante de  $\varphi_2 < 0$ .

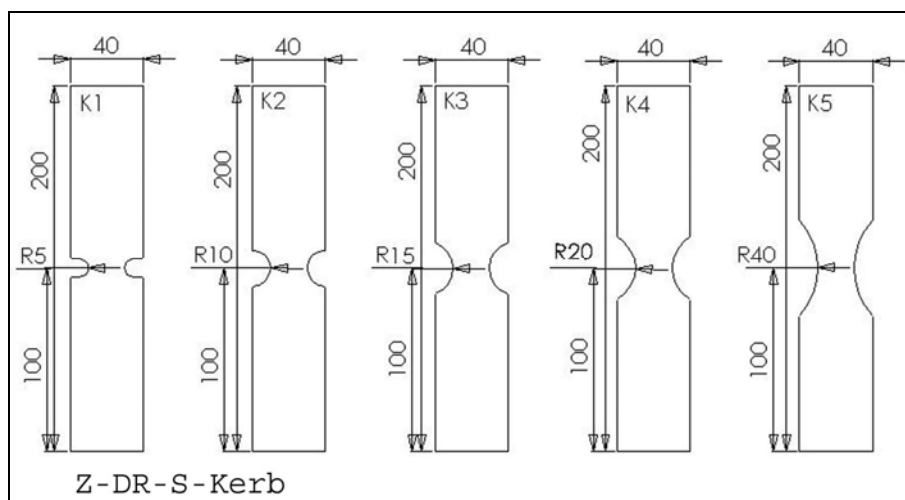


Figura 2.11 Corpos de prova entalhados para ensaio de tração uniaxial. Dimensões em mm.

## Ensaio de Pressão Hidráulica

Este ensaio proposto por Olsen<sup>12,19</sup>, originalmente do inglês “Bulge test”, para determinação de curvas limite de conformação no campo do estiramento.

Consiste em um sistema formado por corpos de prova em forma de disco que recebem por um dos lados uma pressão hidráulica fazendo que os mesmos se deformem até que ocorra ruptura. Para variar o campo de deformações diferentes matrizes elípticas são utilizadas, Figura 2.12. A maior vantagem deste teste é a ausência de atrito durante o teste, porém somente o quadrante das tensões biaxiais ( $\varphi_2 > 0$ ) é abrangido.

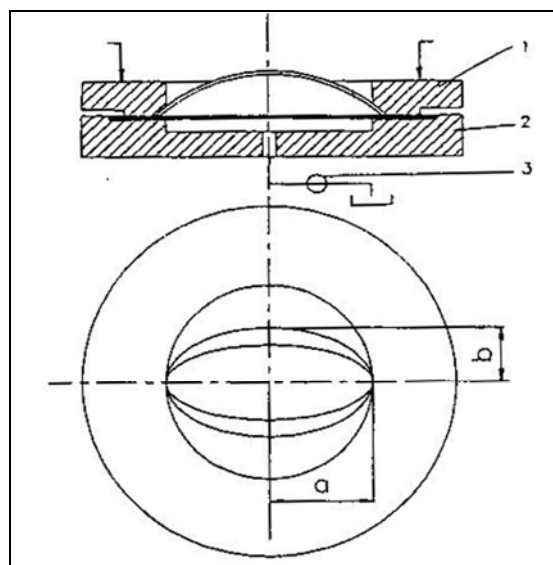


Figura 2.12 Esquema mostrando o ensaio de pressão hidráulica com matrizes elípticas<sup>12</sup>.

## Ensaio Keeler<sup>13</sup>

Este teste consiste no estiramento dos corpos de prova utilizando uma série de punções de raios variados, como visto na Figura 2.13. Os corpos de prova são presos através de prensa-chapas e o punção se desloca contra a amostra até a ruptura. A grande desvantagem deste procedimento é a grande quantidade de ferramental necessária e abrangendo apenas o lado positivo da CLC ( $\varphi_2 > 0$ ).

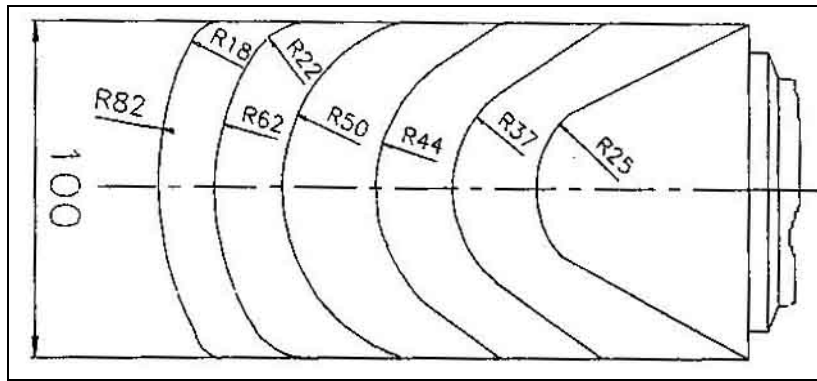


Figura 2.13 Sequência de punções utilizados no ensaio Keeler<sup>12</sup>.

### Ensaio Hecker

Este ensaio é realizado somente com um tamanho e geometria de punção e corpo de prova<sup>12</sup>. Apenas o regime de atrito é variado utilizando diversos meios lubrificantes com o objetivo de variar a trajetória de deformação. Como desvantagem tem-se o fato de abranger somente o quadrante positivo da CLC ( $\varphi_2 > 0$ ).

### Ensaio Marciniak

Com o objetivo de produzir o rasgamento na parte plana do fundo do corpo de prova Marciniak, citado por Banabic<sup>12</sup> propôs o uso de um punção oco e um espaçador de poliuretano vazado no centro entre a amostra e punção eliminando o efeito do atrito Figura 2.14. A variação das trajetórias de deformação é obtida utilizando punções de diferentes seções transversais (circular, elíptica, quadrada). A grande vantagem é que a estrição ocorre na face plana do corpo de prova eliminando, desta forma, os erros de medição oriundos da curvatura. Ainda assim há a desvantagem do teste abranger somente o quadrante positivo da CLC somada a complexidade do ferramental (matrizes e punção).

Para obtenção de uma CLC completa o teste pode ser modificado variando-se a geometria dos espaçadores e dos corpos de prova com a presença de entalhes. Utilizando somente uma geometria de punção e corpos de prova de entalhes de raios variados é possível a obtenção de uma completa CLC.

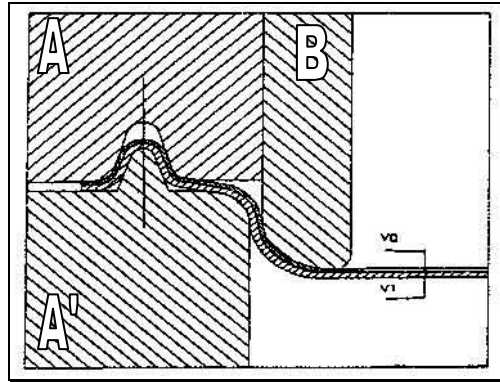


Figura 2.14 Esquema ilustrando o ensaio Marciniak<sup>19</sup>. Prensa chapas (A e A'), Punção (B).

### Ensaio Nakazima

O ensaio Nakazima<sup>19</sup> consiste na estampagem de corpos de prova retangulares de diferentes larguras, visto na Figura 2.15, em uma matriz circular utilizando um punção retangular. Variando a largura do corpo de prova e ou o lubrificante é possível obter resultados em ambos os domínios, positivo e negativo, da CLC.

A simplicidade dos dispositivos, formato simples dos corpos de prova e a total abrangência do campo de deformações torna este ensaio um dos mais utilizados na construção de CLC. Como desvantagem existe a possibilidade de enrugamento dos corpos de prova e possíveis erros de leitura devido à curvatura.

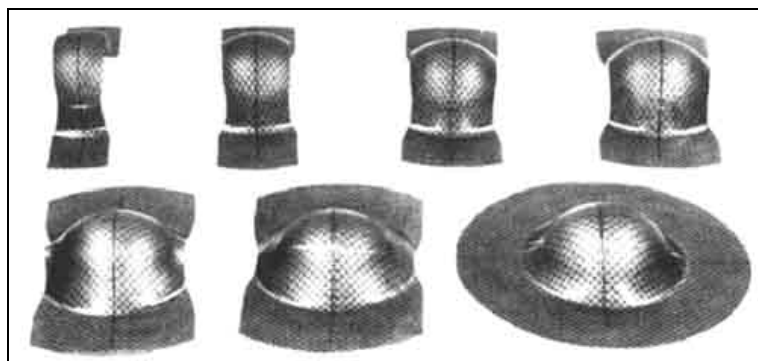


Figura 2.15 Sequência de corpos de prova utilizados no ensaio Nakazima<sup>16</sup>.



## Ensaio Hasek

Observando os defeitos, freqüentes nos demais métodos, tais como enrugamento e ruptura dos corpos de prova na periferia, próximo ao raio de concordância das matrizes ou prensa-chapas, Hasek <sup>12,20</sup> estudou uma maneira de induzir maiores deformações para a região central dos corpos de prova.

Utilizando um ferramental semelhante ao utilizado no ensaio Nakazima, com punção hemisférico de 100 mm de diâmetro, Hasek testou corpos de prova circulares com entalhes laterais de raios distintos. Com um total de sete corpos de prova, vistos na Figura 2.16, é possível abranger todos os estados de tensões necessários para o levantamento de uma CLC. A maior dificuldade neste tipo de ensaio é a necessidade de melhores recursos para a construção dos corpos de prova.

A possibilidade de cobrir ambos os lados da CLC e pequena probabilidade de ocorrer ruptura fora da área desejada foram os fatores decisivos para a escolha deste método como padrão para os testes deste trabalho.

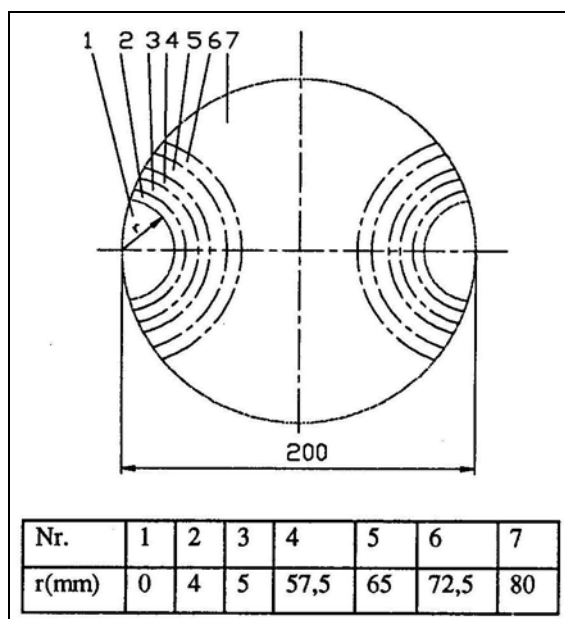


Figura 2.16 Geometria dos corpos de prova desenvolvidos por Hasek<sup>19</sup>.

### 2.6.3 Comparação entre os testes

Banabic<sup>12</sup> apresenta um apanhado geral sobre os principais ensaios e inclusive recomenda o uso dos seguintes: Marciniak ou Pressão Hidráulica para eliminar o efeito do atrito; Ensaio de tração uniaxial quando buscada simplicidade e Nakazima para cobertura da maior variedade de trajetórias de deformação. A Figura 2.17 mostra uma CLC estabelecida através dos métodos anteriormente apresentados.

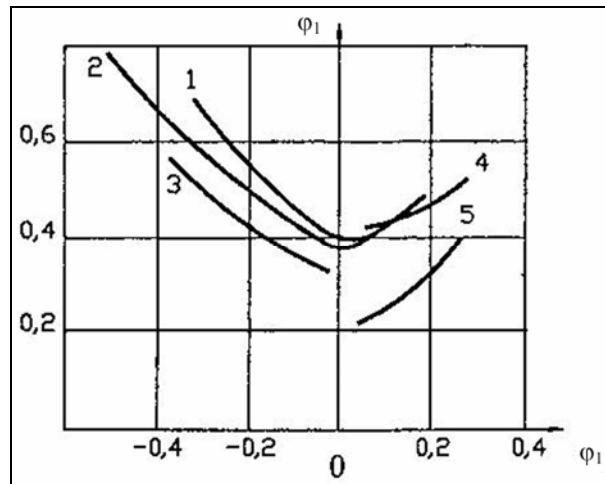


Figura 2.17 CLC á partir de diferentes métodos: 1 Hasek; 2 Nakazima, 3 Tração Entalhado; 4 Keeler; 5 Pressão Hidráulica<sup>12</sup>.

### 2.6.4 Fatores influenciando uma CLC

A espessura da chapa tem influência direta na estampabilidade das mesmas. Os valores de  $\phi_1$  e  $\phi_2$  crescem proporcionalmente com a espessura da chapa.

O tamanho da malha impressa na superfície dos corpos de prova afeta diretamente os resultados da leitura das deformações. À medida que se diminui o diâmetro dos círculos impressos na amostra tem-se um aumento na precisão das medidas.

A trajetória das deformações tem uma grande influência na CLC. Autores comprovam a influência mostrando que ao ser aplicado um esforço de tração seguido de esforço de compressão a curva apresenta limites de deformação inferiores. Porém ao aplicar um esforço compressivo seguido de esforço trativo os valores limite de deformação são maiores.

A trajetória das deformações é praticamente uma linha reta quando aplicado somente um tipo de sollicitação. A anisotropia do material ( $r$ ) tem influência direta na inclinação da curva quando se trata da trajetória correspondente ao ensaio de tração, de acordo com a equação 2 extraído do trabalho de Rault, citado por Banabic et al.<sup>12</sup>.

$$\varphi_1 = -\frac{1+r}{r}\varphi_2 \quad (2)$$

*onde*:  $\varphi_1$  = deformação principal  
 $\varphi_2$  = deformação secundária  
 $r$  = índice de anisotropia

Observando os inúmeros testes realizados desde os pioneiros Keeler e Goodwin pode se afirmar que materiais de propriedades mecânicas semelhantes apresentarão também CLC semelhantes<sup>12</sup>.

No caso de deformações relativas ao ensaio de tração a linha das trajetórias, regida pela equação 2, terá sua inclinação variada para esquerda à medida que haja um aumento no valor do índice de anisotropia ( $r$ ). Da mesma forma que para um dado valor de  $r$  o aumento do grau de encruamento ( $n$ ) acarreta em aumento na elongação uniforme e máxima, conseqüentemente aumentando assim o ponto de ruptura para valores maiores de  $\varphi_1$ .

#### 2.6.5 Curva Limite de Conformação aplicada a Tailor Welded Blanks

Muitas pesquisas realizadas no campo da conformação de chapas soldadas têm sido realizadas. O principal objetivo é a otimização dos processos de conformação facilitando assim a produção de componentes desfrutando das vantagens oferecidas pela técnica de TWB. Além dos fatores acima citados, outros fatores devem ser levados em conta quando na construção de CLC oriundas de TWB. Em se tratando de materiais distintos unidos por solda devem ser levados em consideração dados como a razão de espessura ( $e_{maior}/e_{menor}$ ) entre as chapas, propriedades mecânicas dos materiais envolvidos e influência dos parâmetros de soldagem nas propriedades, uma vez que a ruptura sempre ocorre na secção de menor resistência<sup>4,21 - 23</sup>.

Estudos como o de Chan et al.<sup>22</sup> ressaltam a importância da razão de espessura na estampabilidade do TWB. Neste trabalho Chan realiza a construção de CLC para chapas de aço SPCC (aço de baixa liga laminado a frio) soldadas via laser (Nd:YAG) com velocidade de soldagem de 2,5 m/min com várias razões de espessura e para o material de base menos

resistente. Chan comprova via testes de tração que a resistência do TWB não sofre nenhum decréscimo relacionado com o material de base, porém os ensaios de estampabilidade mostram que à medida que se aumenta a razão de espessura a deformabilidade diminui. Figura 2.18

Tanto nos ensaios de tração como nos ensaios de estampabilidade a ruptura de todos os corpos de prova ocorre na região adjacente à solda no lado do material de menor resistência.

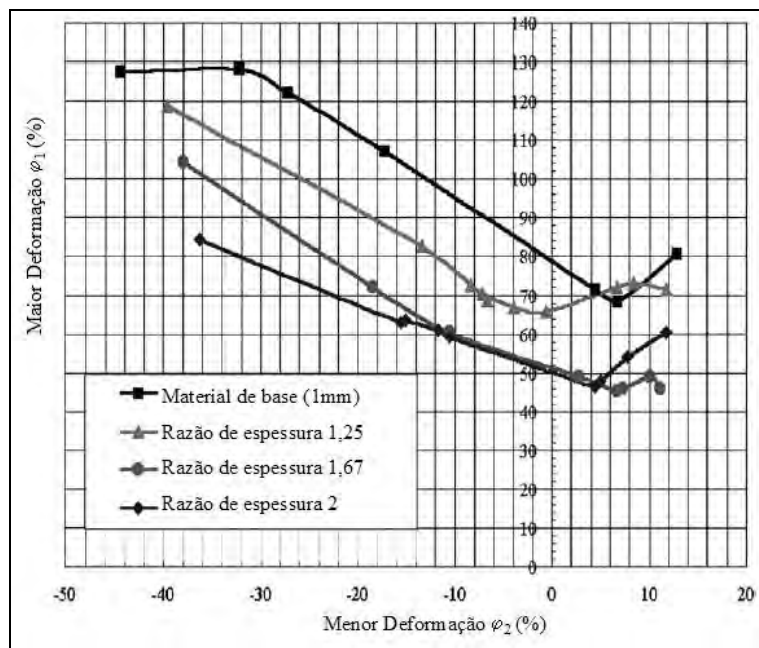


Figura 2.18 Comparação entre diferentes razões de espessura e o efeito na CLC<sup>22</sup>.

Cayssials<sup>4,21</sup> desenvolveu um estudo específico mostrando que a ruptura de chapas de aço soldadas é fortemente dependente da movimentação da solda e sua posição original e também afirma que não se pode prever o desempenho de TWB baseado nas CLC do material de base de menor resistência. Isto se deve ao fato da linha de solda se movimentar em direção ao material mais resistente causando, assim, uma concentração das tensões principais no material mais fraco, concentração essa igual ou maior a razão de espessura ( $e_{maior}/e_{menor}$ ). Um modelo matemático foi desenvolvido e mostrou-se bem eficiente para estimar a severidade do processo e estimar melhorias. Para evitar este tipo de problema é aconselhável o posicionamento do cordão de solda em uma região onde sua movimentação seja mínima diminuindo assim a concentração de deformação no material mais fraco.

Cayssials não comenta sobre a velocidade de soldagem adotada em seus experimentos. Os materiais utilizados são BH (bake hardening) com baixo carbono<sup>4</sup> e DDQ (deep drawing quality) com HSLA (high strength low alloy)<sup>21</sup>.

Larsson et al.<sup>23</sup> apresentam em seu trabalho CLC resultantes de testes realizados em TWB fabricados a partir de aço baixo carbono com HSS (high strength steel) onde se observa que as melhores propriedades são alcançadas quando sob deformações relacionadas a estampagem profunda. O que é contraditório ao fato do posicionamento do cordão de solda em uma região neutra. Neste trabalho é realizada, também, uma comparação do desempenho dos processos de soldagem utilizados mostrando os métodos a plasma e laser como melhores do que os processos de soldagem por indução, não comentando sobre as velocidades de soldagem utilizadas.

Ono et al.<sup>24</sup> apresentam um trabalho mostrando ensaios Erichsen comparando propriedades de TWB soldados via laser (Nd:YAD) em altas velocidades de soldagem: 4 m/min e 7 m/min. As posições das fraturas no ensaio de estampagem seguem a seguinte regra: a fratura ocorre paralela ao cordão de solda na ZTA do material de menor resistência nas juntas soldadas com velocidade de 4 m/min (maior aporte térmico); nas juntas soldadas com velocidade 7 m/min (menor aporte térmico) a fratura inicia no cordão de solda e segue perpendicular ao mesmo em direção ao material de base. Mostrando assim a influência do calor transferido ao metal de base tornando a ZTA menos resistente e concentrando as deformações levando a ruptura prematura.

#### 2.6.6 Curva Limite de Conformação Aplicada a TWB em Ligas de Alumínio

Estudos na área de TWB fabricados a partir de ligas de alumínio ainda não são muito frequentes, ou pelo menos não muito divulgados.

Kinsey et al.<sup>25</sup> apresentam um levantamento de CLC no quadrante positivo utilizando ensaios LDH para a liga Al 5182-H00. As soldas foram realizadas via laser (YAG) com velocidade de soldagem de 6 m/min em chapas de espessura 2 e 1 mm. Esta liga apresenta boas condições para conformação e para soldagem. Há porém uma grande perda nas propriedades de conformação como é visto na CLC da Figura 2.19.

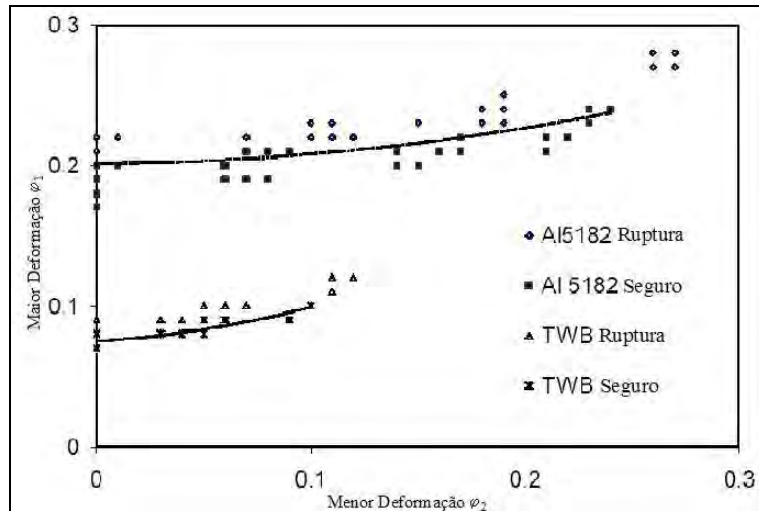


Figura 2.19 CLC para a liga AL 5185-H00, material de base e TWB<sup>25</sup>.

Na literatura recente há um estudo realizado por Sato et al.<sup>8</sup> que não apresenta curvas limite de conformação porém relaciona a conformabilidade de ligas de alumínio soldadas por FSW com a deformação limite e fratura em ensaios de deformação plana utilizando corpos de prova entalhados. Neste trabalho são realizadas soldas de velocidades diferentes, variando de 0,5 até 2 m/min resultando assim em diferentes tamanhos de grão na região do centro da solda. É mostrado que as soldas com tamanhos de grão de diâmetro 10 $\mu$ m apresentaram as maiores deformações na ruptura.

### 3.0 Procedimentos Experimentais

#### 3.1 Material

As chapas utilizadas neste trabalho são de duas ligas distintas, sendo cada liga pertencente ao grupo das tratáveis termicamente e das não tratáveis termicamente. Suas composições químicas estão expressas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química das ligas utilizada nos testes.

AA	ISO N°R209	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros Mn+Cr	Outros elementos	
											Não especificados	
5754	AlMg3	0.4	0.4	0.1	0.5	2.6	0.3	0.2	0.15	0.1	Cada	Total
						3.6				0.6	0.05	0.15
6181	AlSiMg0.8	0.8	0.45	0.1	0.15	0.6	0.1	0.2	0.1	-	Cada	Total
		1.2				1.0				0.05	0.15	

\* valores simples indicam valores máximos

A liga AA 5754 utilizada neste trabalho sofreu tratamento H22. O tratamento H2 indica que as chapas foram endurecidas por deformação até um valor máximo que significa 75% de deformação a frio e, então, foram parcialmente recozidas. O dígito 2 seguindo o índice H2 indica o grau de encruamento remanescente após o recozimento parcial. O que indica que o material está  $\frac{1}{4}$  mais duro que na condição O (original). A condição H2 é a condição que apresenta melhor resistência à corrosão e melhor estampabilidade combinados com resistência mecânica superior ao obtido na condição O.

O tratamento da liga AA 6181 utilizada neste trabalho é o T4. Este tratamento consiste em solubilização e envelhecimento natural até obtenção de uma condição substancialmente estável. O envelhecimento natural resulta em boas propriedades mecânicas (alto  $\sigma_e$  e  $\sigma_{max}$ ) assim como alta tenacidade à fratura e resistência à fadiga. O tempo de envelhecimento natural não excede 4 a 5 dias para atingir uma condição estável. Este tratamento é aplicado a produtos que não sofram trabalho a frio após a solubilização,

ou a aqueles que após aplainados ou endireitados não apresentem influência nas propriedades mecânicas.

### 3.2 Procedimento de soldagem

Os procedimentos de soldagem adotados neste trabalho estão divididos em quatro, sendo duas velocidades de soldagem para cada liga. Para cada material foi desenvolvido um procedimento de baixa velocidade de soldagem (convencional) e um procedimento de alta velocidade. A Tabela 3.2 mostra os parâmetros adotados.

Como descrito anteriormente, o objetivo do trabalho é a comparação das propriedades a diferentes velocidades e a definição destes parâmetros é baseada na repetibilidade do processo. Os procedimentos de alta velocidade foram desenvolvidos para realização deste trabalho. Cada liga apresenta um comportamento diferente perante o processo de soldagem, explicando assim as diferenças entre as velocidades máximas adotadas. A comparação entre os resultados das diferentes ligas não é realizada,

Tabela 3.2 Velocidades de soldagem.

Material	Baixa velocidade	Alta velocidade
	Velocidade/Rotação/Força	Velocidade/Rotação/Força
AA 5754 H22	1 m/min / 2000 RPM / 5500 kN	5 m/min / 2500 RPM / 14000kN
AA 6181 T4	1 m/min / 1600 RPM / 4500 kN	10 m/min / 4000 RPM / 15000kN

As juntas soldadas foram realizadas em chapas de 2 e 1 mm de espessura com 600 mm de comprimento e 150 mm de largura. As chapas foram confeccionadas de forma que o cordão de solda fosse realizado paralelo ao sentido de laminação. O lado de 1 mm de espessura corresponde ao lado de avanço (onde o sentido de rotação e sentido de translação são iguais) e conseqüentemente sendo o lado de 2 mm o lado de recuo.

A avaliação de um bom cordão de solda é realizada primeiramente de maneira visual. Ambas as superfícies devem apresentar bom acabamento e ausência de defeitos (porosidades, falta de penetração ou até mesmo excesso, quando o pino toca a placa de



apoio). A detecção destes defeitos depende basicamente da experiência dos operadores. Não sendo detectado nenhum defeito grave parte-se então para a confecção de corpos de prova de ensaio de dobramento. Ruídos excessivos durante o processo também indicam inconformidades nos parâmetros.

É realizada uma leitura das curvas que indicam força, rotação e velocidade de translação. Sendo uma boa fonte de dados para avaliar a repetibilidade do processo.

Ainda dentro do quesito repetibilidade foram avaliadas também as temperaturas envolvidas no processo via medição por termopares. Alguns dos termopares estavam inseridos nas placas a serem soldadas próximo a região do ombro da ferramenta, sendo assim o mais próximo possível sem que fossem destruídos no processo. Os demais foram inseridos na placa de apoio a diferentes distâncias da superfície. A Figura 3.1 mostra o posicionamento dos dois termopares citados que mediram as maiores temperaturas.

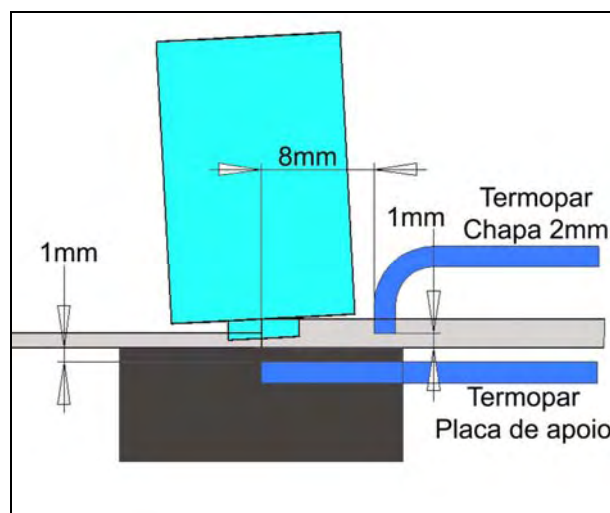


Figura 3.1 Esquema mostrando o posicionamento dos termopares.

A ausência de defeitos (metalografia) e por fim boa resistência mecânica (tração e microdureza) completam a inspeção para a comprovação de um procedimento adequado e repetível.

### 3.3 Ensaio de Dobramento

O ensaio de dobramento é um teste rápido que é realizado logo após a soldagem. Tem o objetivo de detectar possíveis defeitos como, principalmente, falta de penetração, uma vez que este não seja visivelmente detectado. Caso os resultados deste teste apresentem resultados insatisfatórios os parâmetros do procedimento são revistos para que os defeitos não sejam repetidos.

O ensaio de dobramento é realizado utilizando um dispositivo como descrito na Figura 3.2 de forma que o lado de 2 mm fique firmemente preso no dispositivo com o lado da raiz da solda fique sempre situado na região de maior deformação. O raio de concordância ( $r_d$ ) é de 1 mm para tornar o ensaio o mais crítico possível. É denominado também como dobramento guiado, uma vez que um simples dobramento a três pontos resultaria numa deformação fora da zona crítica devido a variação de espessura entre os lados da solda.

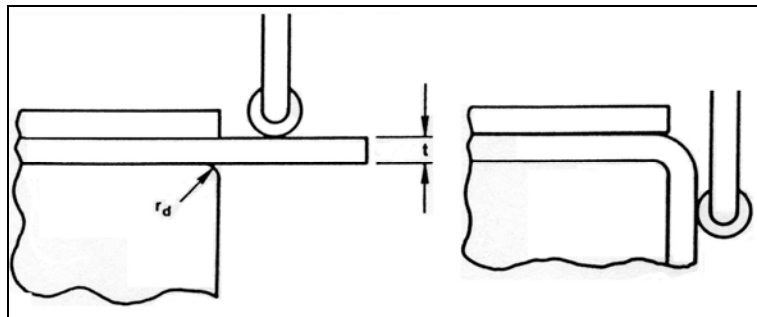


Figura 3.2 Ensaio de dobramento guiado.

### 3.4 Análise Metalográfica

Os ensaios metalográficos consistem na terceira parte da caracterização de um cordão de solda, seguindo uma ordem de simplicidade dos testes. Foram realizados ensaios metalográficos tanto para verificar a qualidade dos cordões de solda experimentais como as condições de soldagem definitivas para assegurar as boas condições.

Todos os corpos de prova foram preparados de acordo com o seguinte procedimento metalográfico:

Corte transversal ao cordão de solda nas regiões inicial e final em disco abrasivo adequado á dureza e espessura dos materiais;

Embutimento em resina plástica a frio;

Lixamento automático (lixas de granulometria 320, 500, 800, 1000, 1200, 2400 e alguns casos 4000), rotação da lixa de 300 rpm, carga de 10 N por corpo de prova e tempo de 1 mim por lixa;

Polimento inicial com pano de polimento “trident Buehler” e solução de pasta de diamante de 3 $\mu$ m de diâmetro;

Polimento final com pano de polimento “microcloth Buehler” com solução OPS (SiO<sub>2</sub> de diâmetro médio de 0,05  $\mu$ m)

Limpeza em banho ultrassônico para remoção de possíveis partículas aderidas

Ataque eletrolítico com reagente de Barker (HBF 4 e água) por aproximadamente 2 min.

Observação e documentação fotográfica em microscópio óptico Olympus PMG 3 com luz polarizada;

Foram realizadas macrografias para observação geral das regiões abrangendo do material de base do lado de avanço ao lado de recuo. Micrografias das distintas regiões foram realizadas com diferentes magnificações com o objetivo de identificar e detalhar as transformações microestruturais impostas pelo processo.

Medições de tamanho de grão foram realizadas nas regiões dos materiais de base 1 e 2 mm em ambas ligas e no centro da solda das quatro condições de soldagem. A determinação do tamanho de grão é baseada no método circular de Hilliard, descrito na norma ASTM E112-96<sup>26</sup>.

Este método é apropriado para materiais com grãos deformados, como o caso das chapas laminadas utilizadas neste trabalho, pois o a medição é realizada contando o número de grãos que interceptam o perímetro de uma circunferência de diâmetro conhecido. Desta forma o problema de grãos alinhados é evitado, pois a medição é feita em todas as dimensões do plano.

A análise estatística indica um valor limite de precisão relativa que depende do número de medidas e variação dos resultados. Uma vez que este valor não seja atingido aumenta-se o número de medidas até que o método seja validado.

### 3.5 Ensaio de Microdureza

Com o objetivo de avaliar as variações da dureza resultantes do processo de soldagem foram realizados perfis de microdureza. Os perfis de microdureza possibilitam uma avaliação das propriedades mecânicas a partir do material de base passando pelas zonas da solda e finalizando no material de base do lado oposto. Foram efetuados em corpos de prova semelhantes aos utilizados para metalografia, porém sem a necessidade de ataque químico, como visto na Figura 3.3.

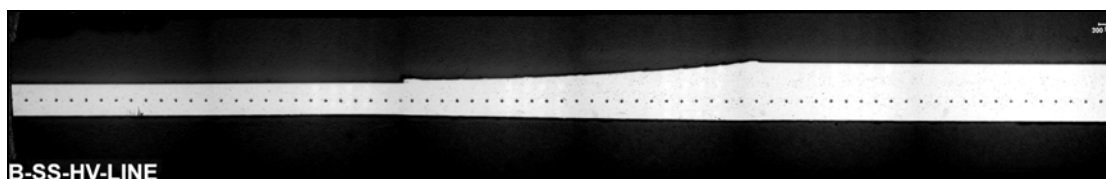


Figura 3.3 Perfil de microdureza abrangendo o material de base do lado de avanço (esquerda) ao lado de recuo (direita), passando pela solda.

Os resultados dos ensaios de microdureza são mostrados na forma de diagramas. Os perfis de 50 mm de comprimento foram iniciados no material de base do lado de recuo (2 mm) a aproximadamente 25 mm do centro da solda e passam por todas as zonas da solda finalizando no material de base do lado de avanço (1 mm).

O equipamento utilizado foi um microdurômetro ultrassônico UT-100 com passo de 0,5 mm entre indentações e carga 0,2 kg.

O procedimento está descrito a seguir:

Pré-calibração realizada manualmente em microdurômetro mecânico Zwick 3212.

Levantamento de um valor médio na região do material de base;

Posicionamento do corpo de prova paralelo a um dos eixos do microdurômetro ultrassônico;

Calibração do microdurômetro ultrassônico realizando-se um perfil de 5 indentações e ajustando o resultado de acordo com os dados obtidos da pré-calibração. É tomado o cuidado de realizar a pré-calibração numa região semelhante da calibração;

Ajuste das cargas, passo e número de indentações;

Início do teste;

Leitura do resultado em planilha eletrônica, formato de gráfico.

### 3.6 Medição de Deformações via Sistema Óptico

Os métodos convencionais de medição das deformações na superfície de peças ou corpos de prova são substituídos com sucesso por sistemas ópticos utilizando processamento de imagens. Os métodos convencionais são baseados na impressão ou pintura de uma malha de elementos na superfície da amostra. À medida que se aplica um esforço esta malha se deforma juntamente com o material. Os elementos, circulares ou quadrados, possuem dimensões iniciais conhecidas e, após o teste, são realizadas medições das deformações principais e secundárias. Calculando através da equação 1 têm-se, então, valores de  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$ .

Na construção de CLC em ensaios de estampagem este método é utilizado para uma medição local de uma célula fraturada, no caso de uma CLC de fratura, ou medindo uma célula ainda não fraturada próxima à região de fratura, no caso de uma CLC visando a segurança, sem deformações severas (estricção). Este método apresenta algumas deficiências uma vez que a preparação dos corpos de prova é de certa forma trabalhosa e as medições dependem muito da experiência do pesquisador.

O sistema de medição óptico é baseado na distribuição dos níveis de cinza de uma região uma vez que esta apresente a mesma distribuição antes e depois do teste. O princípio de medição das deformações é semelhante aos métodos convencionais, através da deformação superficial.

Neste caso não é necessária impressão de uma malha regular, porém uma distribuição randômica de pontos serve como padrão. Esta malha randômica pode ser facilmente criada por meio de aplicação de tinta spray criando um contraste entre um fundo branco e pontos pretos aleatórios. Esta camada superficial deve deformar juntamente com o material, não deve ser muito frágil, assim não deformando com o material ou até mesmo lascando devido a deformação. Uma (bidimensional) ou duas (tridimensional) câmeras CCD 8-bit, com resolução de 1028 x 1280 pixel “sensor array” fotografam a superfície da amostra desde o estado de repouso até a ruptura gravando assim todos os estados de tensões.

A primeira imagem, antes da aplicação da carga, define os parâmetros da malha e todas as demais são utilizadas para o cálculo preciso das deformações por comparação. Uma grande vantagem é que há a possibilidade de interação entre a célula de carga, sensores de deslocamento e o sistema de câmeras, possibilitando assim um melhor controle dos parâmetros envolvidos no teste. A cada imagem capturada é gravado também o deslocamento e a força no mesmo momento. É possível também analisar as deformações em toda a superfície visível da peça, o que no caso do método tradicional acarretaria em um trabalho exaustivo.

Após a realização do teste (captura das imagens) é realizado o processamento das imagens. Inicialmente é realizada divisão da superfície de interesse em elementos quadrados onde o número total de elementos depende do tamanho de aresta, em número de pixels, escolhido.

É estabelecida então uma malha inicial de elementos a partir da primeira imagem (repouso), o tamanho dos elementos é escolhido de maneira a otimizar os resultados e o tempo de processamento.

Para este trabalho foi escolhida a disposição 3x3 “multi facet”, visto na Figura 3.4 onde o elemento central apresenta a maior precisão de todos os demais. O tamanho da aresta de elemento escolhida foi 15 pixels. A precisão desta disposição está entre 0,1 e 0,01 pixel.

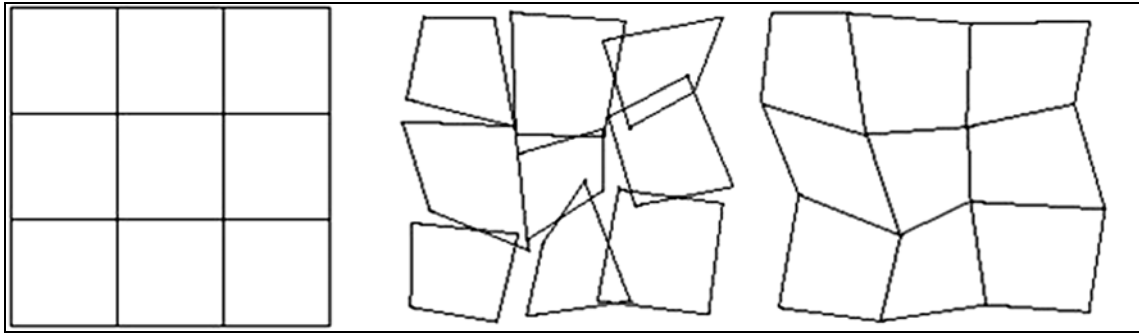


Figura 3.4 Elementos em disposição 3x3. Deformados na disposição Single facet e Multifacet.

O operador realiza a escolha de um ponto de origem e manualmente identifica este ponto em toda a seqüência de imagens, as Figuras 3.5 e 3.6 mostram um exemplo em corpos de prova de ensaio de flexão a três pontos. Nesta etapa o operador pode intervir auxiliando o programa na identificação do ponto nas etapas. Isso pode acontecer em caso de grandes deformações, é possível que seja necessária a repetição da escolha do ponto até o mesmo seja identificado sem problemas. Inicia-se então o processamento das imagens.

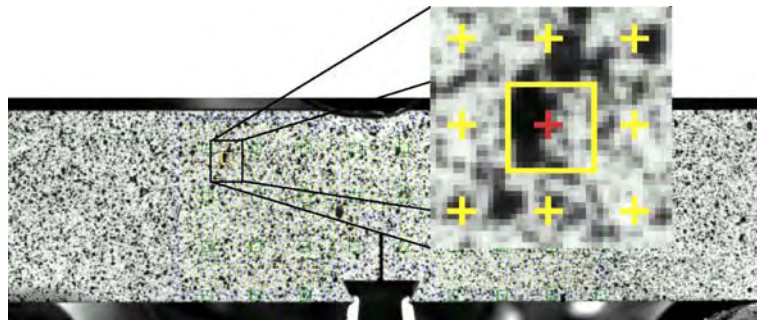


Figura 3.5 Primeira imagem com detalhe para a identificação do elemento inicial.

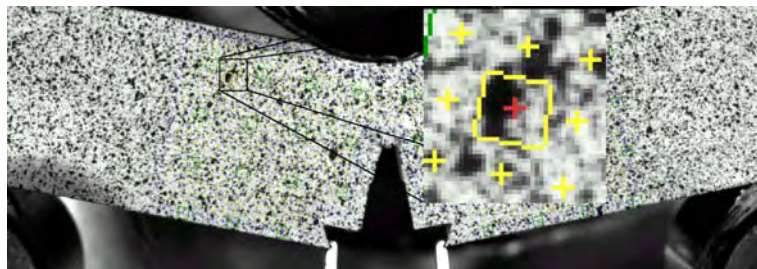


Figura 3.6 Última imagem com detalhe do mesmo elemento agora no estado deformado.

O programa pode realizar o cálculo das deformações por dois métodos, global e gradual. No método global é realizada uma comparação entre cada imagem e a inicial. No método gradual a comparação é feita entre uma imagem e sua imagem anterior (exceto a primeira).

Os cálculos deste trabalho foram realizados via método global, desta forma podem ser calculadas diretamente as imagens do final do teste quando o interesse é somente o valor final das deformações. Quando a interação é repetida para cada imagem do teste há a possibilidade do estudo da trajetória das deformações até a ruptura. Do processamento obtém-se um resultado em forma de mapa de deformações, semelhante a uma simulação por elementos finitos, como visto na Figura 3.7.

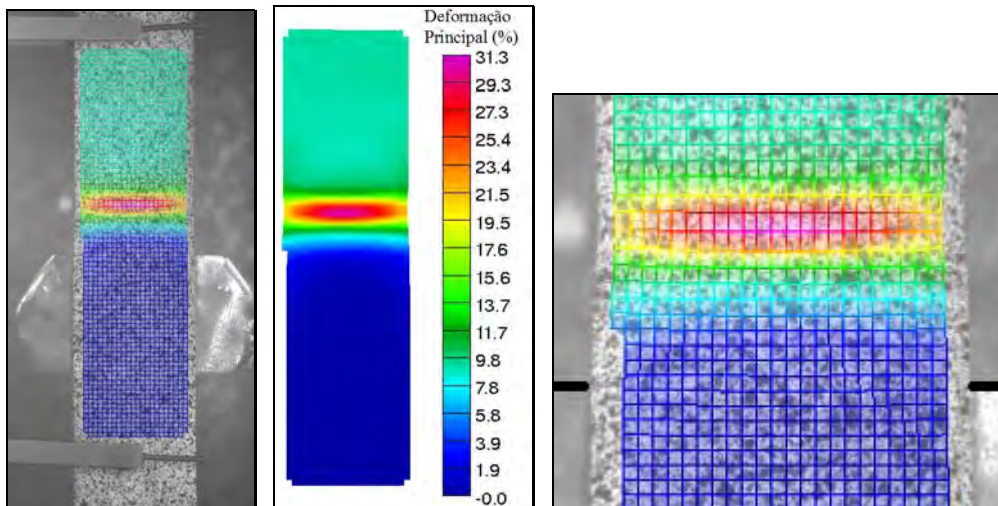


Figura 3.7 Mapa de deformações sobreposto em uma imagem de corpo de prova (TWB) de tração (esquerda). Ao centro o mapa de deformações com escala das deformações principais. À direita em detalhe a região da linha de solda com a malha sobreposta á imagem original.

O aplicativo oferece várias opções de escalas, tais como: Deformações de Von Mises e Tresca, deformações principais, deformações secundárias (reais ou de engenharia), redução de espessura, deslocamentos em x, y e z entre outras opções.

Visando obter resultados pontuais o programa oferece a possibilidade de levantamento dos valores de cada elemento ao longo de uma secção ou também de



somente um elemento a ser escolhido. A Figura 3.8 mostra um esquema de como esta secção é definida.

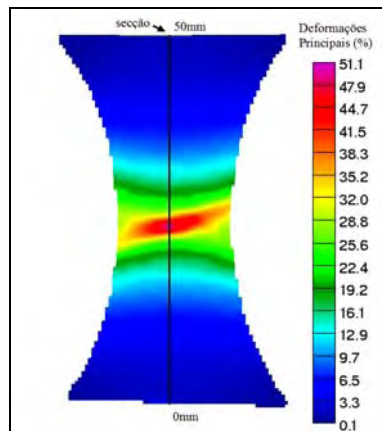


Figura 3.8 Definição de uma secção de 50 mm que abrange toda a região de interesse num corpo de prova de tração entalhado.

Os valores extraídos de cada elemento ao longo da secção são exportados em formato ASCII para tabelas onde é possível a análise mais detalhada. É possível a construção de diversos gráficos, como o da Figura 3.9, que mostra valores de deformações principais para cada ponto da secção durante todas as etapas da medição. Na etapa inicial não são observados valores de deformação e com o decorrer do teste os valores vão crescendo, neste caso, na zona central, até que haja ruptura e a leitura não seja mais possível.

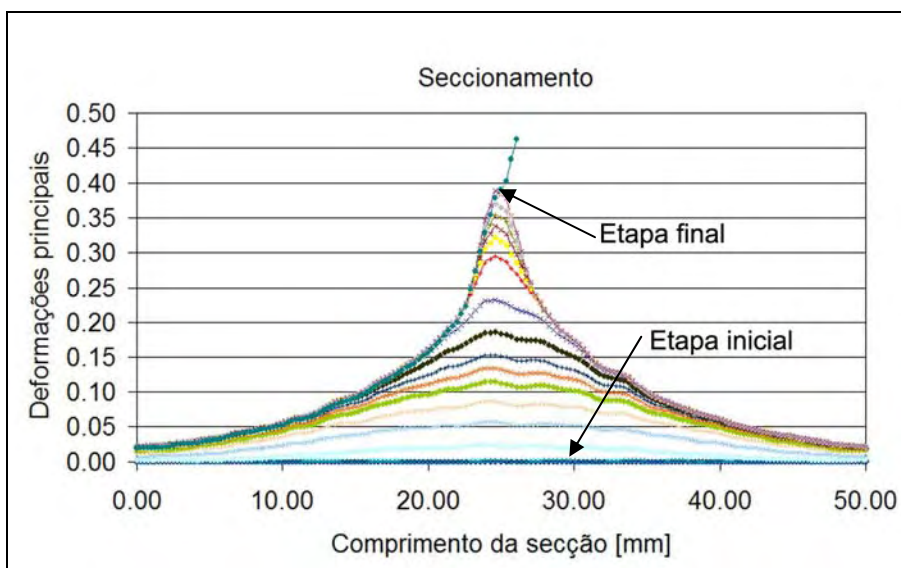


Figura 3.9 Gráfico mostrando as diferentes etapas de uma secção e seus resultados de deformação principal.

O presente trabalho tem como objetivo a construção de CLC da região segura, isto é, sem ocorrência de estricção (deformação localizada). Deste modo fica bastante claro que a medição dos valores de  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  deve ser realizada imediatamente antes do início da estricção, para obtenção de valores seguros e representativos. Uma vez que o material passe a deformar localmente há um decréscimo na força, ficando estabelecido assim o critério do momento de realização das medições.

O sistema de medição óptico utilizado foi o Aramis 1.3M<sup>27,28</sup>.

### 3.7 Captura e processamento de imagens via sistema óptico

Todo o procedimento e metodologia descrito neste item segue o proposto pelo manual do usuário<sup>27</sup> e são válidos para medição dos valores de  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  tanto nos corpos de prova de tração entalhados quanto para os corpos de prova dos ensaios de estampabilidade.

Para que seja possível o processamento as amostras devem ser preparadas. A superfície dos corpos de prova foi inicialmente tratada com uma tinta spray de cor branca que serve com fundo evitando a reflexão direta da luz na superfície do alumínio.

Posteriormente foi realizada uma aspersão com tinta spray de cor preta de forma que fosse criada uma distribuição aleatória e homogênea de pontos, como visto na Figura 3.10.

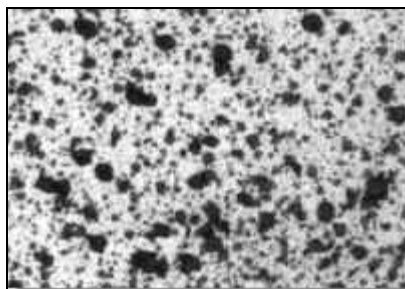


Figura 3.10 Superfície dos corpos de prova preparados para captura de imagens.

A seqüência de captura de imagens foi realizada de forma que fosse possível um controle das deformações durante o teste. Embora o programa ofereça a possibilidade de estabelecer uma freqüência de captura de imagens o comando realizado foi manual. Utilizando o controle de força é possível visualizar quando a taxa de crescimento diminui, a força estabiliza e então começa a decrescer. No momento que a taxa de crescimento diminui a freqüência da captura de imagens é aumentada com o objetivo de diminuir o erro de medição. A captura de imagens continua até a ruptura, para que seja possível também o levantamento de uma CLC de fratura.

Após o teste é realizado, então, o processamento das imagens. Uma vez que o programa finalize o processamento se pode partir para a análise dos dados de interesse, neste ponto já estão disponíveis todos os resultados que o programa pode oferecer em forma de mapas de tensões, deformações e deslocamentos. Neste caso foram definidas secções que cruzem a região de ruptura (para cada teste é necessário que seja repetida a definição das seções) e então os dados de deformações  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  e  $\varphi_3$  são exportados para tabelas ASCII possibilitando a medição de acordo com o critério definido.

Uma vez que todos os dados são exportados em formato de arquivos de texto, foi possível a análise via planilha eletrônica onde um programa foi desenvolvido para reconhecimento dos valores de  $\varphi_1$  e seu correspondente  $\varphi_2$ .

A Norma ISO 12004<sup>29</sup> descreve a metodologia para determinação de DLC baseado no método de medição visual dos elementos da malha impressa na superfície da amostra. A norma estabelece que a medição deve ser realizada no momento do aparecimento do

primeiro vestígio de deformação localizada. Neste trabalho se aplica o mesmo princípio descrito na norma, porém a medição é realizada como descrito nos próximos parágrafos.

Ficou decidido que o último dado que antecede o início do decréscimo da força representa o estado de tensões equivalente ao  $\varphi_1$  precedente à estricção, visando a região de segurança da CLC. De posse do valor de  $\varphi_1$  é realizada, então, a medição do  $\varphi_2$  equivalente no mesmo elemento, daí obtêm-se as coordenadas do ponto na CLC.

Para facilitar o entendimento do critério, a Figura 3.11 mostra um gráfico dos valores de  $\varphi_1$  em relação a força, onde é possível identificar visualmente o ponto escolhido. Também se pode observar que embora as curvas sejam procedentes de dois ensaios distintos a mesma metodologia pode ser aplicada. Cabe salientar que para um ensaio de tração simples o comportamento da curva se assemelha ao ensaio de tração entalhado. Como visto no gráfico o programa realiza a escolha de um ponto anterior ao ponto de força máxima como sendo o valor de  $\varphi_1$  válido.

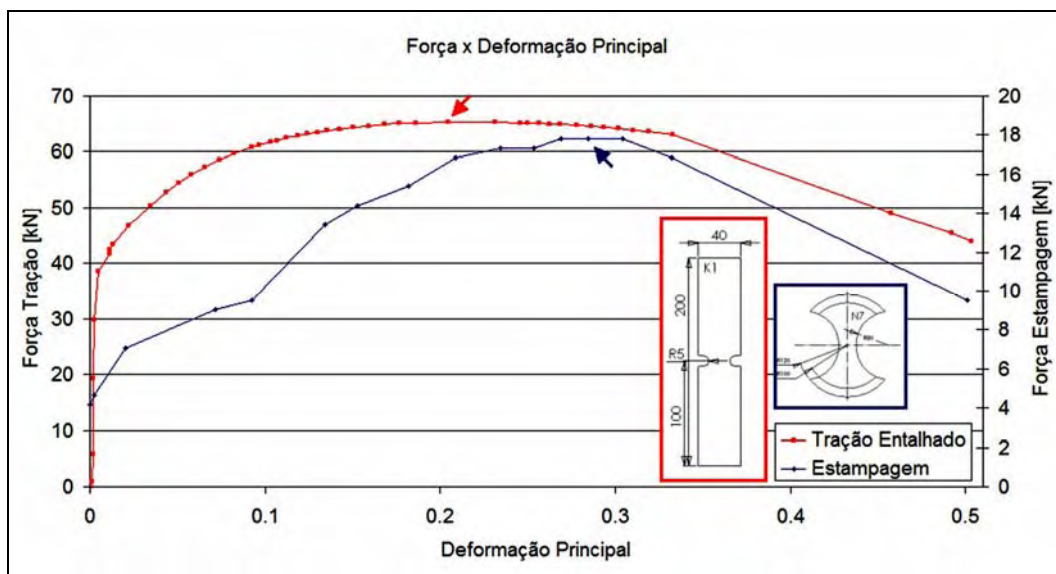


Figura 3.11 Ilustração do critério de medição das deformações principais.

### 3.8 Ensaio de Tração

Para obtenção dos dados de resistência mecânica foram realizados ensaios de tração nos materiais de base e nas juntas soldadas nas quatro condições.

Nos materiais de base os corpos de prova foram confeccionados no sentido de laminação ( $0^\circ$ ) e, transversais ao mesmo ( $90^\circ$ ) seguindo a Norma DIN 10002-1<sup>30</sup> como visto na Figura 3.12. Os corpos de prova soldados foram confeccionados na direção transversal a direção de soldagem, consequentemente transversal ao sentido de laminação, de forma que o centro da solda esteja sempre situado no centro do  $l_0$ . Como os corpos de prova são soldados a partir de espessuras diferentes há uma diferença na seção transversal ao longo do corpo de prova. Isto implica numa diferença no estado de tensões e deformações, havendo inclusive um gradiente de tensões na região do ombro devido ao ângulo da ferramenta, visto na Figura 3.13. No capítulo de resultados este efeito é bem visualizado quando se analisa as imagens obtidas do sistema óptico.

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de tração Zwick 1484 com capacidade de 200 kN e velocidade de deslocamento transversal de 1 mm/min. A medição da elongação foi realizada via sensor de deformação “cilp gauge” conectado ao corpo de prova em um  $l_0$  de 60 mm.

É importante salientar que deste ensaio de tração uniaxial foram medidas também as deformações principais  $\varphi_1$  e secundárias  $\varphi_2$  para todas as condições. Como descrito anteriormente as medições das deformações na superfície dos corpos de prova foram realizadas utilizando sistema um óptico. Foi seguido o procedimento já descrito no item anterior.

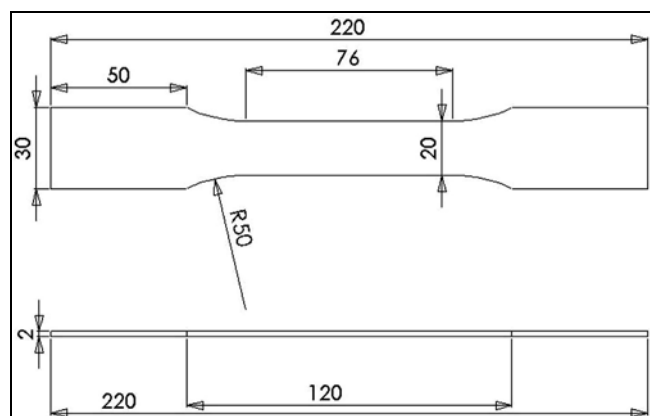


Figura 3.12 Geometria dos corpos de prova de tração<sup>30</sup>. Dimensões em mm.

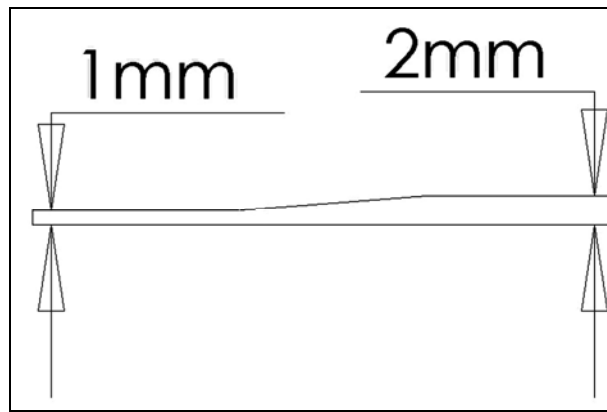


Figura 3.13 Variação de espessura da região central do corpo de prova.

### 3.9 Ensaio de tração em corpos de prova entalhados

O teste e a análise dos resultados foram realizados segundo o procedimento proposto por Brozzo et al descrito por Lange<sup>20</sup>.

Os ensaios de tração em corpos de prova entalhados foram realizados seguindo a mesma metodologia dos ensaios de tração convencionais e o mesmo equipamento, como visto na Figura 3.14. Destes ensaios foram analisados somente os valores de deformações principais e secundárias, embora curvas de tensão deformação também tenham sido gravadas.

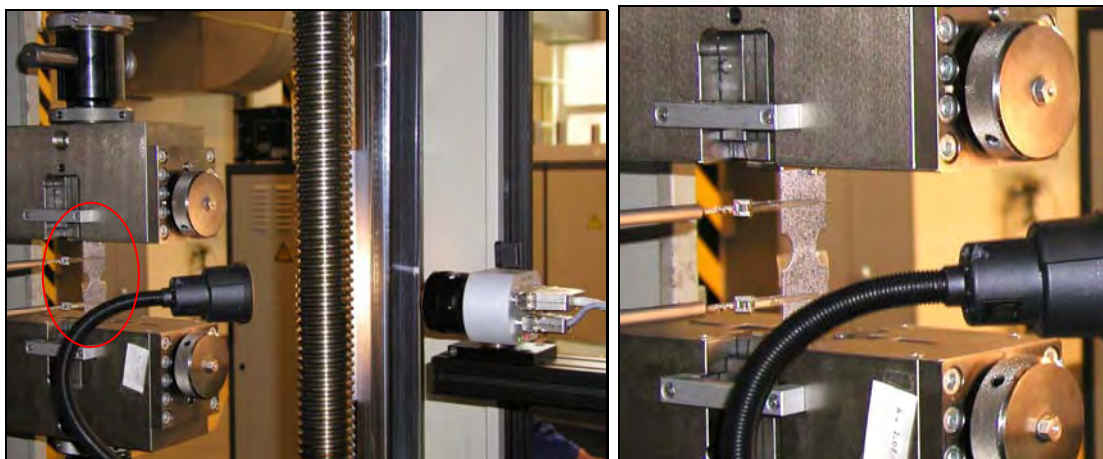


Figura 3.14 Imagem mostrando o teste dos corpos de prova de tração entalhados e o posicionamento da câmera CCD. Em detalhe observa-se a condição superficial.

### 3.10 Ensaio de Estampabilidade

Os ensaios de estampabilidade foram realizados segundo o proposto por Hasek, que introduziu alterações na geometria dos corpos de prova utilizados por Nakazima evitando ruptura dos corpos de prova fora da região central.

Os corpos de prova foram construídos a partir do desenho da Figura 3.15, tanto para o material de base (chapas de 1 mm) como para as juntas soldadas. No caso das soldas o cordão de solda foi posicionado de forma que estivesse sempre centralizado à amostra cruzando a mesma na menor secção, entre os entalhes. Obviamente na amostra número 1 a solda apresenta-se somente centralizada.

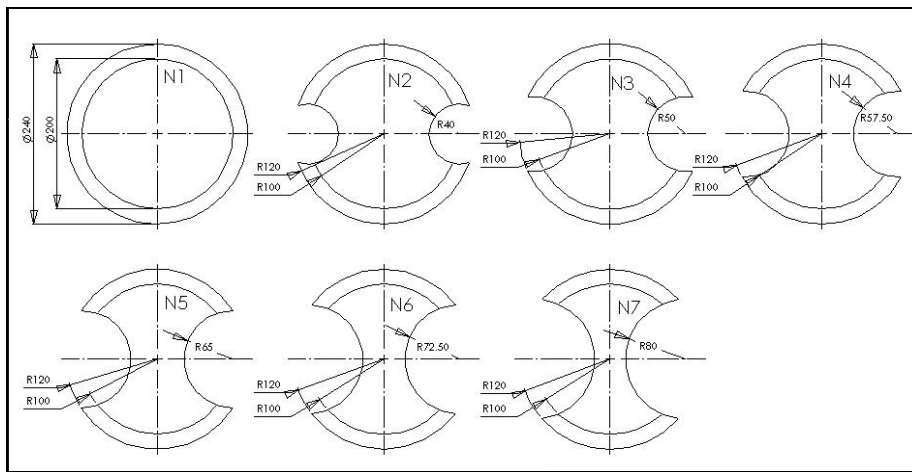


Figura 3.15 Desenho dos corpos de prova utilizados nos ensaios de estampabilidade propostos por Hasek<sup>20</sup>. Dimensões em mm.

Os testes foram realizados utilizando um ferramental construído segundo o proposto por Nakazima, composto de um punção hemisférico de raio 50 mm e duas matrizes (prensa chapas) que evita o escorregamento dos corpos de prova, como visto na Figura 3.16. O ferramental foi acoplado a uma máquina de ensaios servo assistida triaxial, como visto na Figura 3.17, que possibilita o controle total de força e deslocamento e também a fixação das câmeras CCD para captura das imagens. É importante salientar que para este teste foram necessárias duas câmeras CCD para captura das imagens, uma vez que as deformações acontecem em três dimensões.

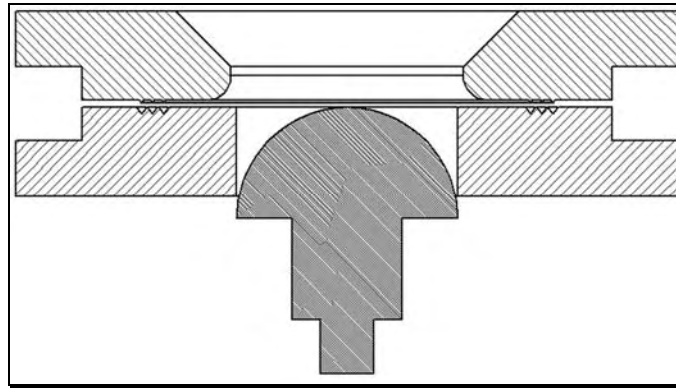


Figura 3.16 Desenho esquemático dos dispositivos utilizados no ensaio.

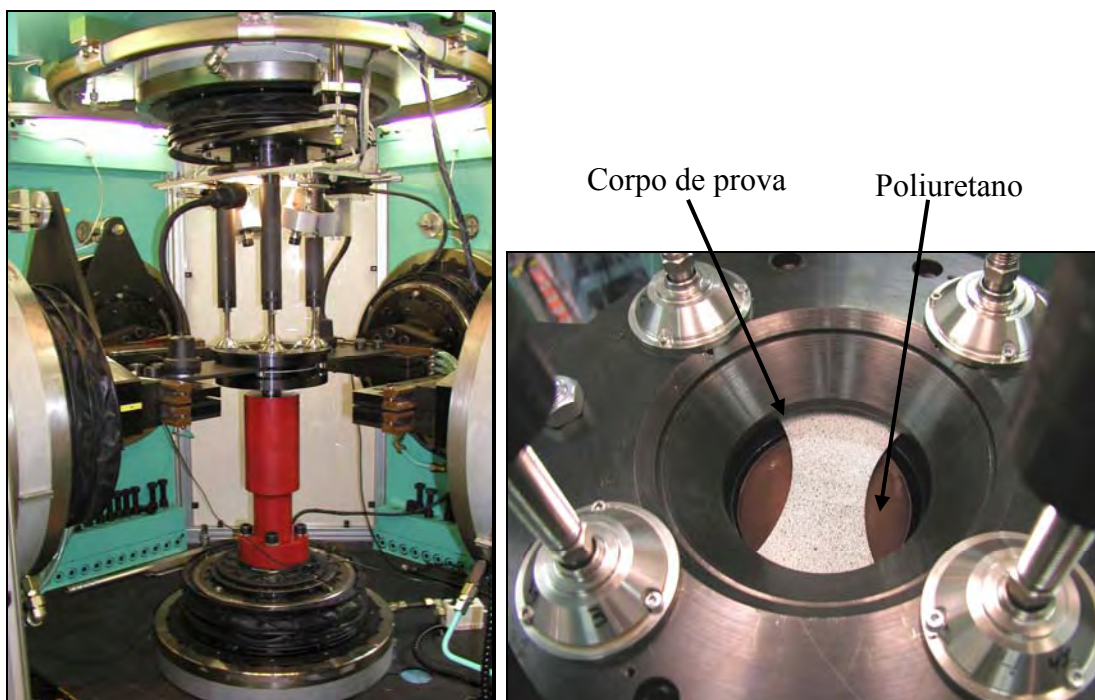


Figura 3.17 Máquina de ensaios triaxial com os dispositivos e câmeras instalados. À direita uma vista de um corpo de prova pronto para o teste.

Nos corpos de prova construídos a partir de TWB, devido à variação de espessura, foi necessária a utilização de um anel que possibilitasse uma pressão homogênea em toda a periferia dos corpos de prova.

A velocidade de ensaio, caracterizada pelo deslocamento vertical do punção, foi de 1 mm/min. Em todos os testes foram utilizados lubrificante e uma lâmina de poliuretano entre o punção e a amostra a ser testada com objetivo de diminuir a influência do atrito.



Foram realizados três séries de ensaios para cada condição de soldagem, sendo que cada série de ensaios necessita sete corpos de prova de geometrias diferentes nas seguintes condições:

Material de base 1 mm espessura Al 6181 T4

Material de base 1 mm espessura Al 5754 H22

TWB Al 6181 T4 (2:1 mm) com velocidade de soldagem de 1 m/min

TWB Al 6181 T4 (2:1 mm) com velocidade de soldagem de 10 m/min

TWB Al 5754 H22 (2:1 mm) com velocidade de soldagem de 1 m/min

TWB Al 5754 H22 (2:1 mm) com velocidade de soldagem de 5 m/min

Totalizando assim 126 testes de estampabilidade.

## 4.0 RESULTADOS

### 4.1 Procedimento de soldagem

Durante o processo de soldagem são monitorados os dados de força de soldagem, rotação da ferramenta, reações na placa de apoio, velocidade de translação, etc. A análise destes dados permite verificar a repetibilidade do processo. Na Figura 4.1 é apresentado um dos gráficos das forças de soldagem, onde  $F_x$  representa a força no sentido de soldagem,  $F_y$  representa a força lateral e  $F_z$  a força de soldagem (normal a chapa).

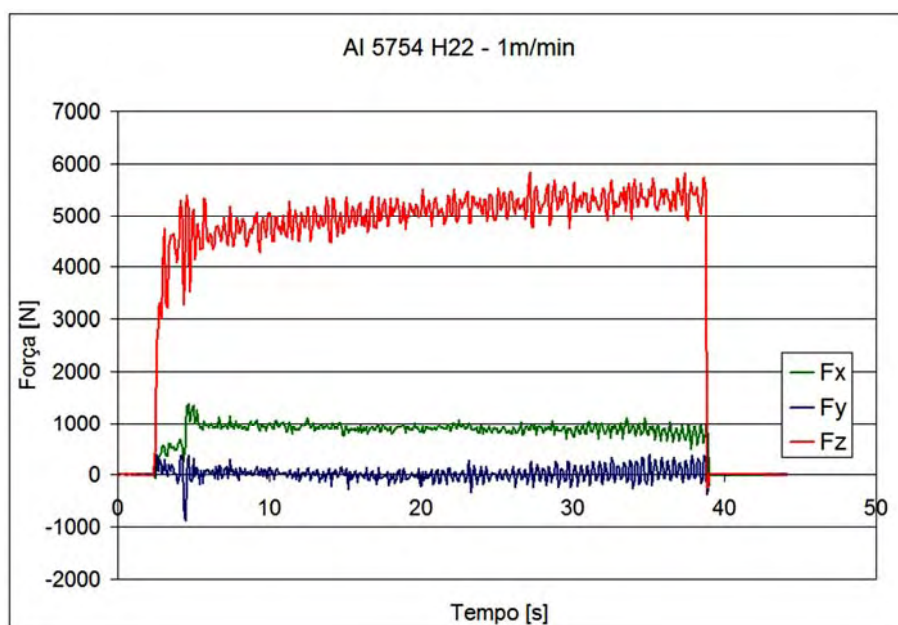


Figura 4.1 Forças de soldagem durante o processo medidas para uma velocidade de soldagem de 1 m/min numa junta da liga Al 5754 H22.

Foram realizados também medidas de temperatura em algumas das juntas para se avaliar os níveis atingidos. Não é do escopo deste trabalho um estudo aprofundado das temperaturas porém é interessante uma breve análise onde observa-se, nas Figuras 4.2 e 4.3, a diferença das temperaturas máximas atingidas. Para a velocidade de 1 m/min, máxima temperatura medida na placa de apoio sob a superfície chega próximo aos 250°C e o termopar inserido na chapa de 2 mm à 8 mm do centro da solda mediu uma temperatura máxima de 208°C. Enquanto que para a velocidade de 10 m/min a temperatura máxima na

placa de apoio não passa de 120°C e o termopar inserido na chapa de 2 mm a 8 mm do centro da solda mediu uma temperatura máxima de 110°C.

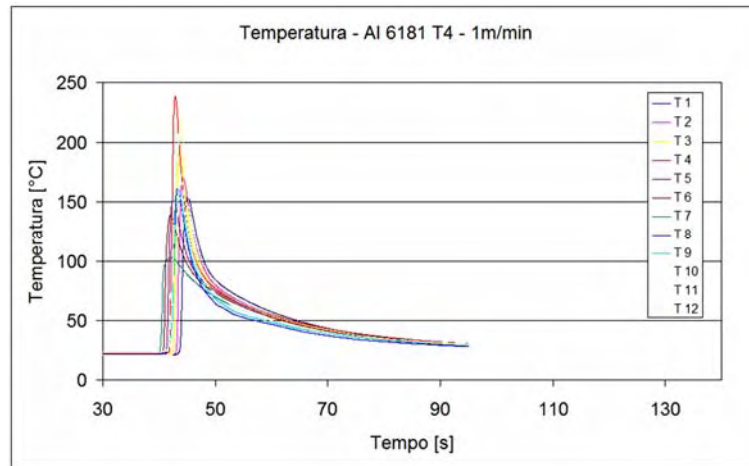


Figura 4.2 Perfil de temperaturas medido durante a soldagem. Liga Al 6181 T4 com velocidade de soldagem de 1 m/min.

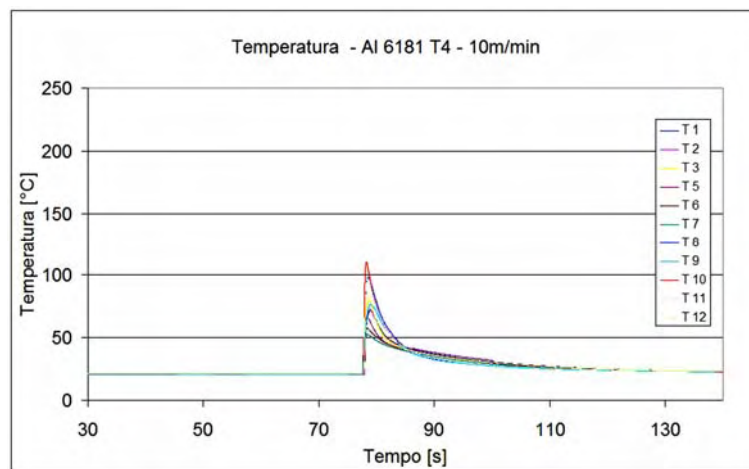


Figura 4.3 Perfil de temperaturas medido durante a soldagem. Liga Al 6181 T4 com velocidade de soldagem de 10 m/min.

#### 4.2 Ensaio de dobramento

Todas as quatro condições de soldagem foram testadas nas regiões de início, meio e final do comprimento do cordão de solda apresentando resultados satisfatórios, como visto nas Figuras 4.4 e 4.5, sendo este o requisito básico para prosseguir com as próximas análises.

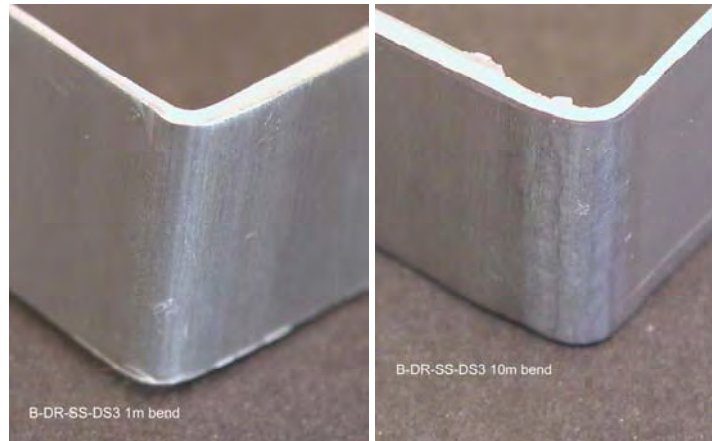


Figura 4.4 Amostras do ensaio de dobramento da liga 6181 1 m/min (esquerda) e 10 m/min (direita).

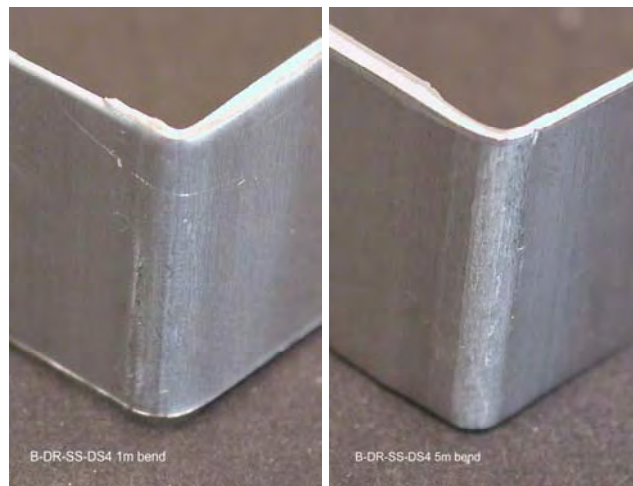


Figura 4.5 Amostras do ensaio de dobramento da liga 5754 1 m/min (esquerda) e 5 m/min (direita).

#### 4.3 Análise Metalográfica

Os resultados macrográficos e micrográficos estão divididos por tipo de liga e são mostrados nos seguintes itens. Embora se tratando de ligas distintas as condições apresentadas são semelhantes. A identificação das quatro zonas (CS, ZTMA, ZTA e MB) em certos casos não é tão simples, especialmente se tratando da separação de ZTMA e ZTA.

#### 4.3.1 Liga 6181 T4

Esta liga apresenta condições levemente diferentes comparando o material de base de 1 mm de espessura com o de 2 mm, como visto na Figura 4.6. As chapas de 1 mm de espessura apresentaram grãos levemente deformados devido à laminação e um tamanho médio de grão de  $31,8\mu\text{m}$ , o que corresponde a  $G$  (tamanho de grão ASTM) = 7,0.

As chapas de 2 mm de espessura apresentaram grãos equiaxiais de tamanho médio  $26,7\mu\text{m}$ , correspondente a  $G=7,2$ .

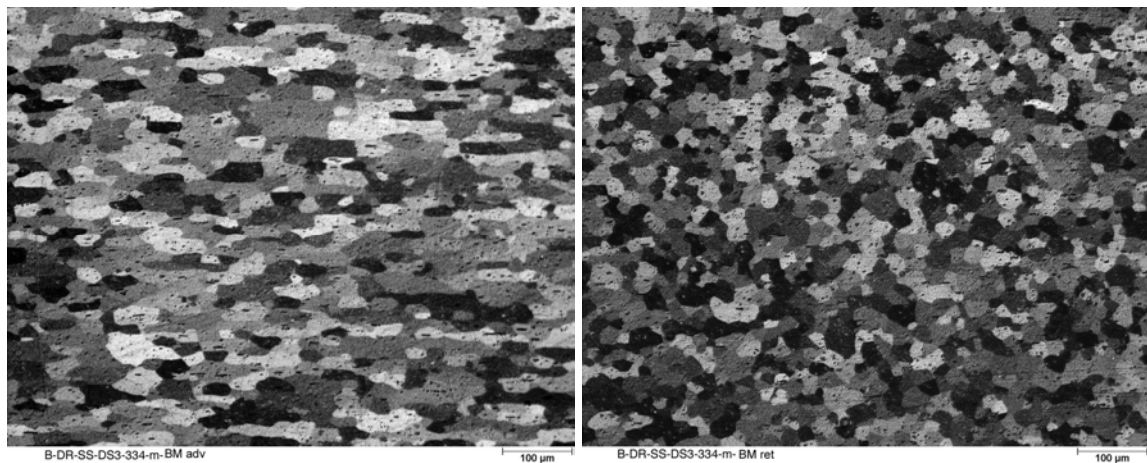


Figura 4.6 Micrografia mostrando à esquerda o material de base do lado de avanço (1 mm) e à direita o lado de recuo (2 mm) da liga 6181 T4. Ataque químico: Barker.

As macrografias realizadas na secção transversal as soldas de 1 m/min e 10 m/min, respectivamente, são apresentadas a seguir.

A Figura 4.7 mostra a secção transversal de uma junta soldada com velocidade de 1 m/min. É possível observar um formato trapezoidal da região do centro da solda sem muitas distinções entre os lados de avanço e recuo, e que a superfície de contato com o ombro da ferramenta apresenta-se regular. Já a Figura 4.8 mostra a mesma secção de uma junta soldada com velocidade de 10 m/min onde pode ser observado um formato mais estreito da região mediana do centro da solda.

As Figuras 4.9 a 4.11 mostram a microestrutura das distintas zonas das juntas soldadas com velocidade de 1 m/min, as indicações (retângulos) mostram as regiões analisadas microscopicamente.

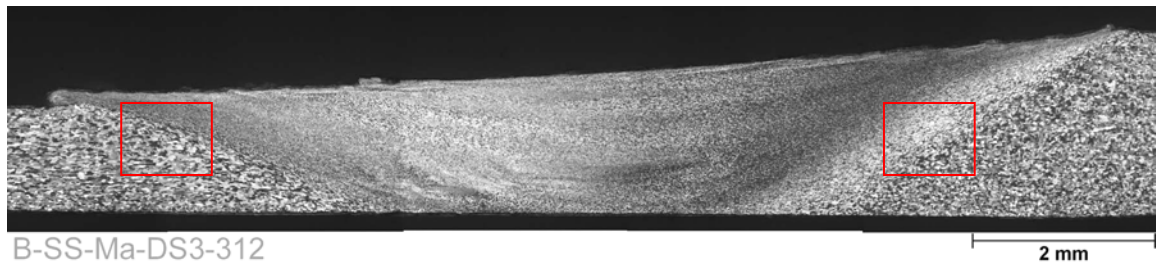


Figura 4.7 Macrografia de uma junta 6181 T4 soldada com 1 m/min. Ataque químico: Barker.

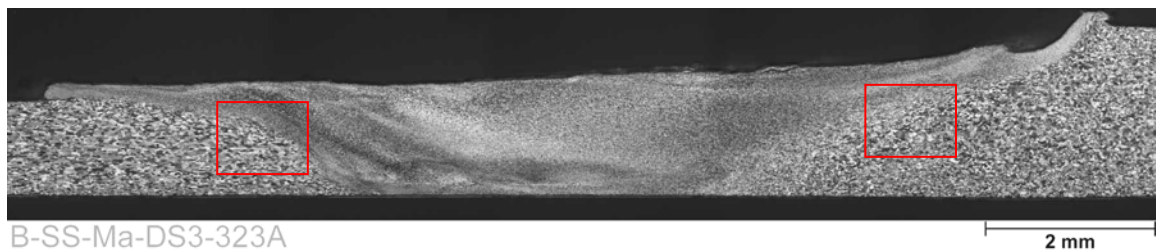


Figura 4.8 Macrografia de uma junta 6181 T4 soldada com 10 m/min. Ataque químico: Barker.

A Figura 4.9 mostra as regiões onde se pode observar a microestrutura não deformada do material de base (MB) do lado de avanço até o centro da solda (CS), estas duas bem distintas. Não tão fácil, porém, é distinguir a diferença entre zona termicamente afetada (ZTA) e zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA). Há uma pequena região onde os grãos não estão tão alongados quanto no material de base.

A Figura 4.10 mostra a mesma região descrita no parágrafo anterior. Aqui fica ainda mais difícil diferenciar a ZTA e ZTMA, pois o material de base no lado de recuo (2 mm) já apresenta grãos equiaxiais.

A região do centro da solda, mostrada na Figura 4.11, apresenta grãos pequenos e recristalizados. No CS o tamanho de grão medido foi de 11,3  $\mu\text{m}$ , equivalente a  $G=9,97$ . Devido à pequena área apresentada pelas ZTA e ZTMA não foi possível a medição do tamanho de grão.

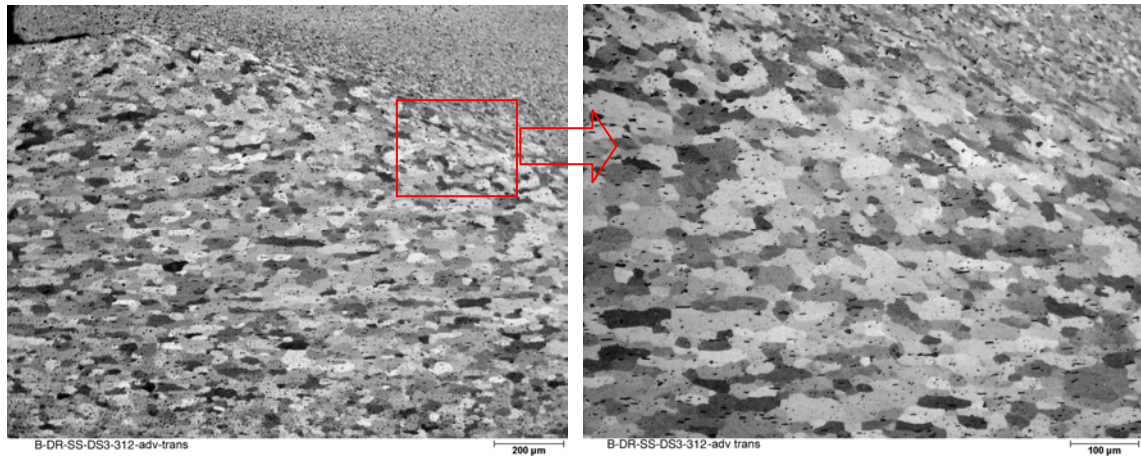


Figura 4.9 Microestrutura da zona de transição entre o MB e o CS no lado de avanço da liga 6181 T4. Ataque químico: Barker.

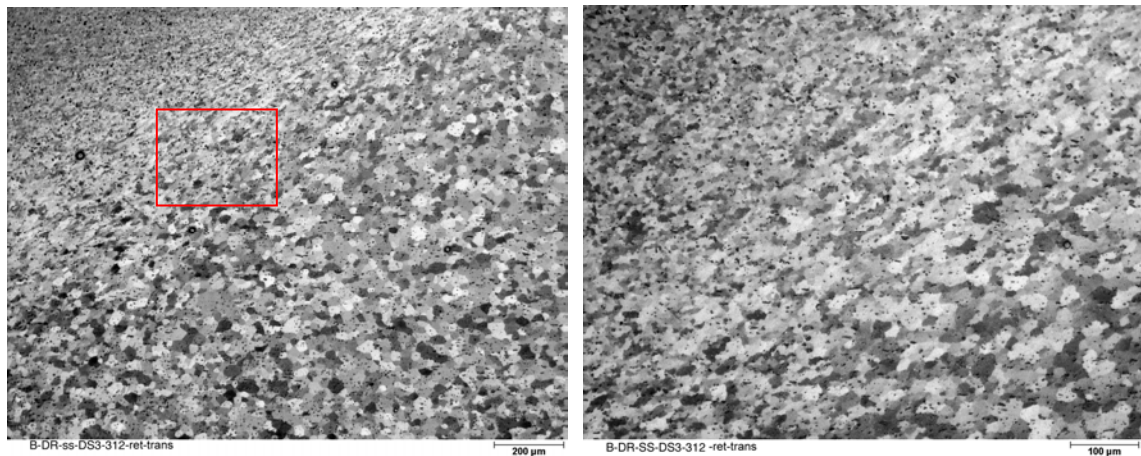


Figura 4.10 Microestrutura da zona de transição entre o MB e o CS no lado de recuo da liga 6181 T4. À direita, em detalhe, a região marcada pelo retângulo. Ataque químico: Barker.

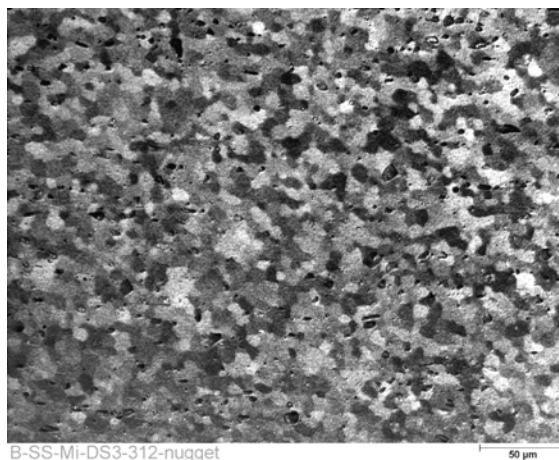


Figura 4.11 Microestrutura da liga 6181 T4 na região central formada por grãos pequenos e recristalizados. Ataque químico: Barker.

As Figuras 4.12 a 4.15 mostram a microestrutura das distintas zonas das juntas soldadas com velocidade de 10 m/min.

O material de base apresenta as mesmas condições descritas anteriormente. A ZTMA é caracterizada nas Figuras 4.12 e 4.13 por uma mistura de pequenos grãos recristalizados e grãos de tamanho original deformados, uma pequena região de grãos levemente arredondados é observada (ZTA). A Figura 4.14 também mostra uma mistura de grãos de tamanho original e pequenos grãos recristalizados no lado de recuo, neste caso é ainda mais difícil definir a presença de ZTA.

A região do centro da solda apresentou grãos de tamanho médio  $10,0 \mu\text{m}$ , equivalente a  $G=10,3$ .

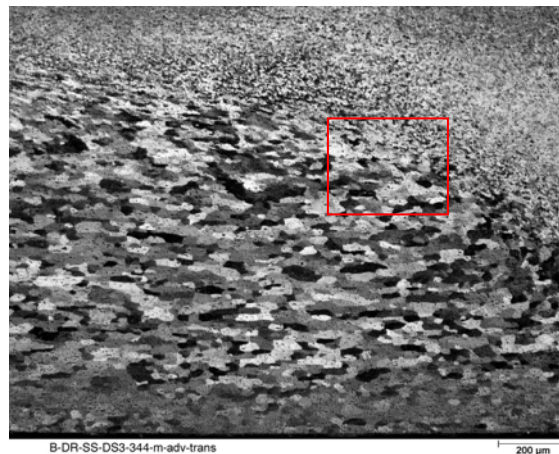


Figura 4.12 Microestrutura da liga 6181 T4 mostrando a zona de transição entre o MB e CS no lado de avanço. Ataque químico: Barker.

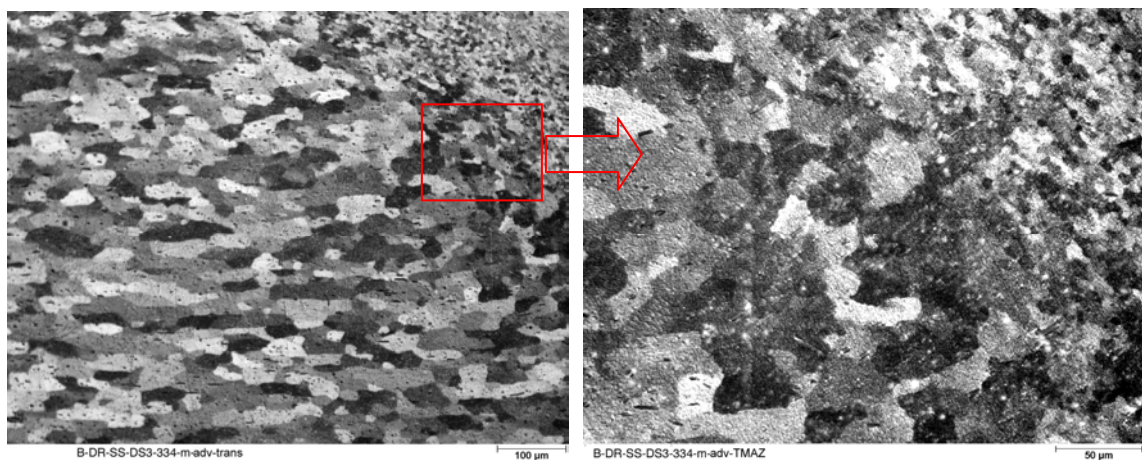


Figura 4.13 Microestrutura da liga 6181 T4 mostrando em detalhe grãos levemente arredondados (esquerda) e ZTMA (direita). Ataque químico: Barker.



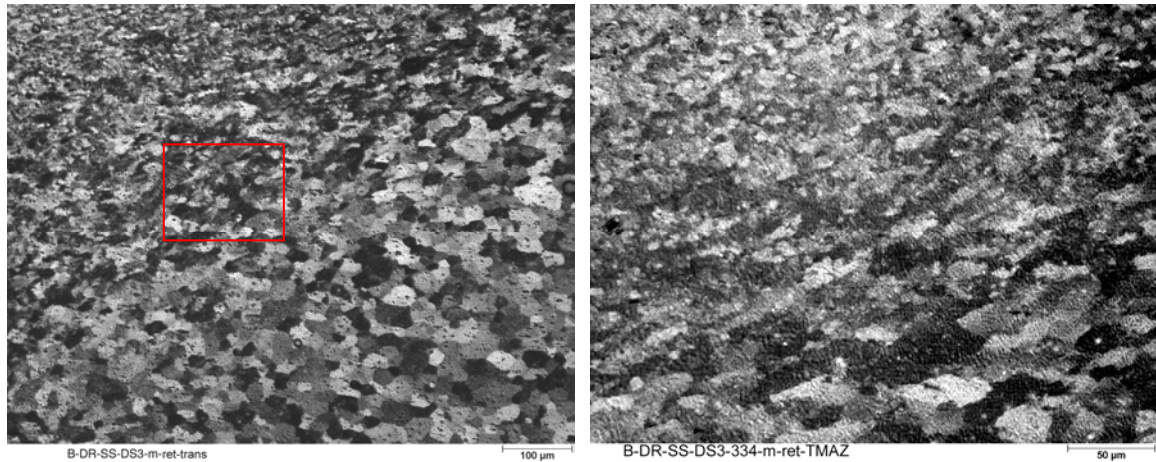


Figura 4.14 Microestrutura da zona de transição entre o MB e CS no lado de recuo da liga 6181 T4. À direita, em maior aumento a região indicada pelo retângulo. Ataque químico: Barker.

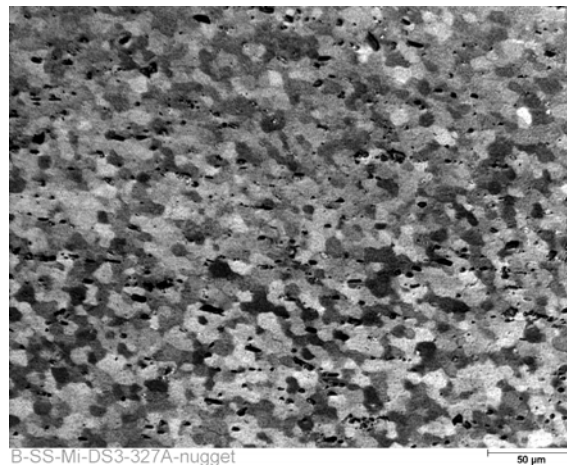


Figura 4.15 Microestrutura da liga 6181 T4 mostrando a zona do CS com grãos equiaxiais pequenos. Ataque químico: Barker.

#### 4.3.2 Liga 5754 H22

Este material, para as chapas de 1 mm de espessura (condições originais), visto na Figura 4.16, apresenta uma microestrutura formada pela mistura de grãos em maioria equiaxiais e alguns grãos alongados devido à laminação. O tamanho de grão médio medido é de 13,08µm, correspondente a  $G=9,9$ . As chapas de 2 mm de espessura apresentam grãos altamente deformados, desta forma não são expressos valores de tamanho de grão devido a grande dificuldade de medição.

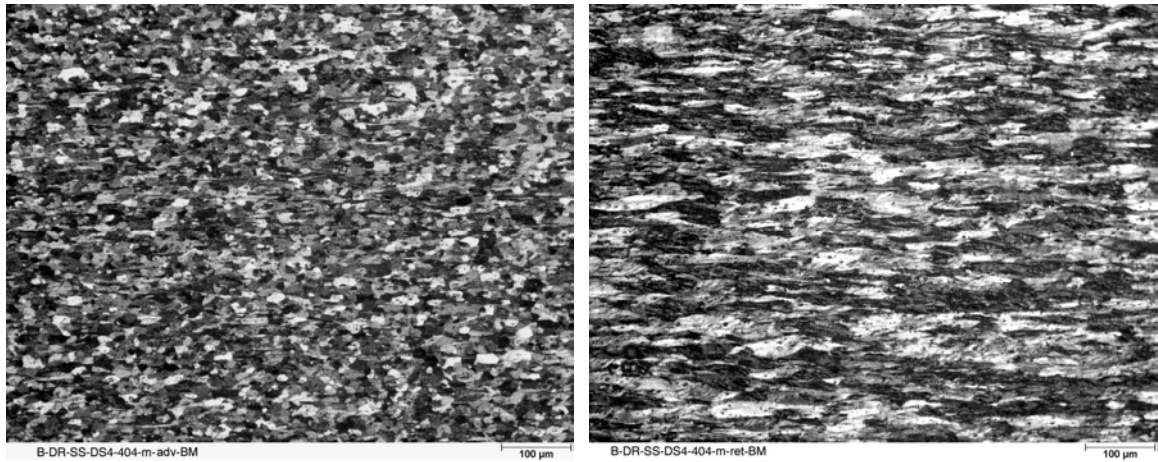


Figura 4.16 Microestrutura do material de base da liga 5754 H22. À esquerda o lado de avanço (1 mm) e a direita o lado de recuo (2 mm). Ataque químico: Barker.

O formado do centro da solda da junta soldada com velocidade de 1 m/min é trapezoidal semelhante ao apresentado pela mesma condição na outra liga como visto na Figura 4.17, as indicações mostram as regiões analisadas microscopicamente. Já a Figura 4.18 mostra a tendência também semelhante ao visto na condição de alta velocidade (10 m/min) da outra liga, o mesmo estreitamento abrupto, porém logo abaixo da superfície e não ao centro da altura.

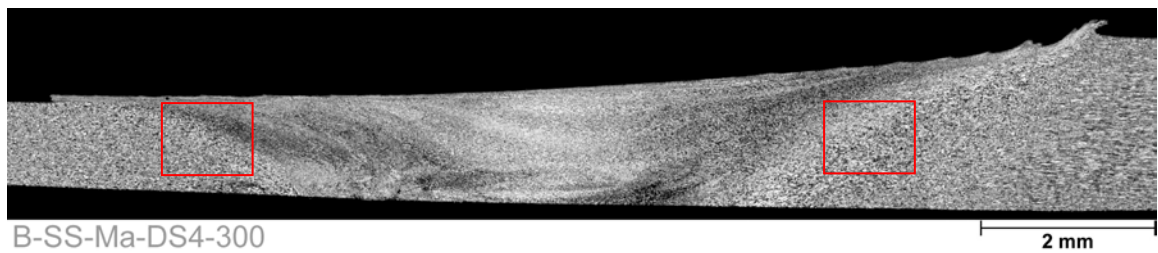


Figura 4.17 Macrografia de uma junta 5754 H22 soldada com 1 m/min. Ataque químico: Barker.

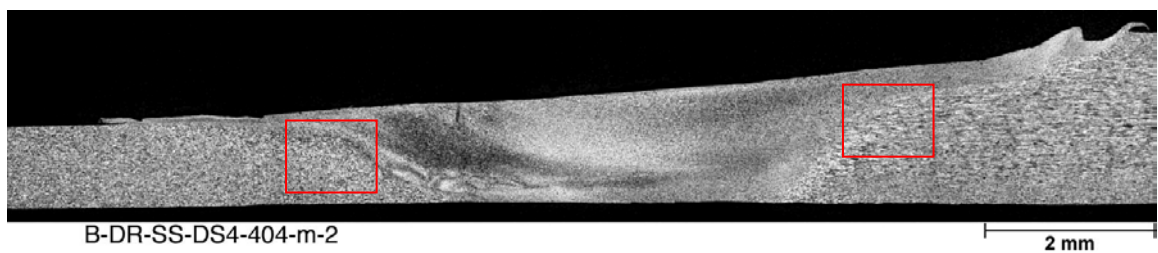


Figura 4.18 Macrografia de uma junta 5754 H22 soldada com 5 m/min. Ataque químico: Barker.

As microestruturas das juntas soldadas com velocidade de 1 m/min são apresentadas nas Figuras 4.19 a 4.21.

Neste caso é possível observar a formação de uma pequena variação microestrutural nos lados de avanço e recuo, possivelmente consiste na ZTA. No lado de avanço é visto uma região formada apenas por grãos equiaxiais, sem a presença dos grãos alongados vistos no material de base.

O lado de recuo mostra uma região mais pronunciada formada apenas por grãos arredondados, neste caso fica mais fácil a identificação, pois o MB apresenta grãos altamente encruados. De qualquer forma é difícil observar a presença de crescimento de grão. A ZTMA é caracterizada pela região formada pela mistura de grãos deformados e refinados oriundos do CS.

O centro da solda apresenta grãos equiaxiais refinados de tamanho médio 10,45  $\mu\text{m}$ , equivalente a  $G=10,2$ .

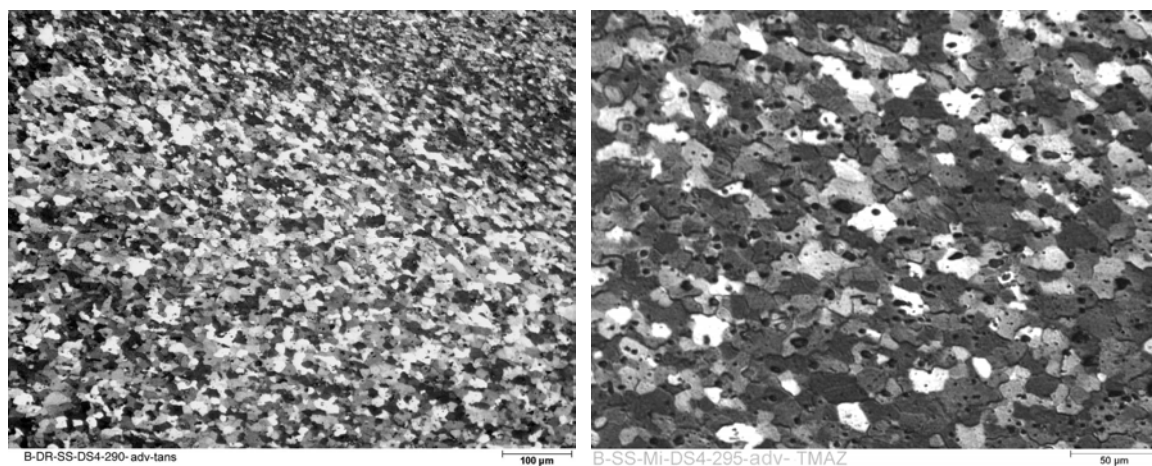


Figura 4.19 Microestrutura da liga 5754 H22 mostrando a região de transição entre MB do lado de avanço e CS. Em detalhe ZTMA (direita). Ataque químico: Barker.

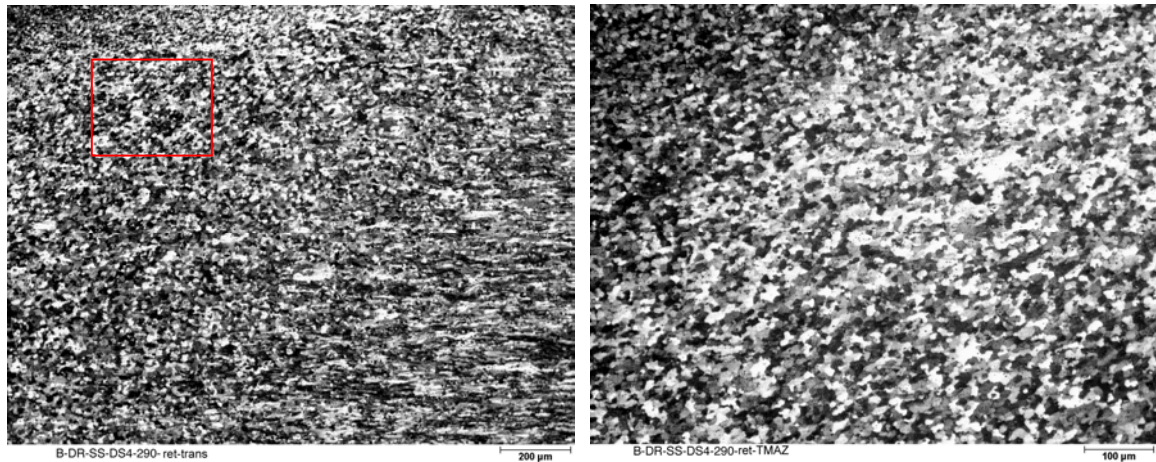


Figura 4.20 Microestrutura da liga 5754 H22 mostrando a região de transição entre MB do lado de recuo e CS. Em detalhe (direita) a região da ZTMA indicada pelo retângulo. Ataque químico: Barker.

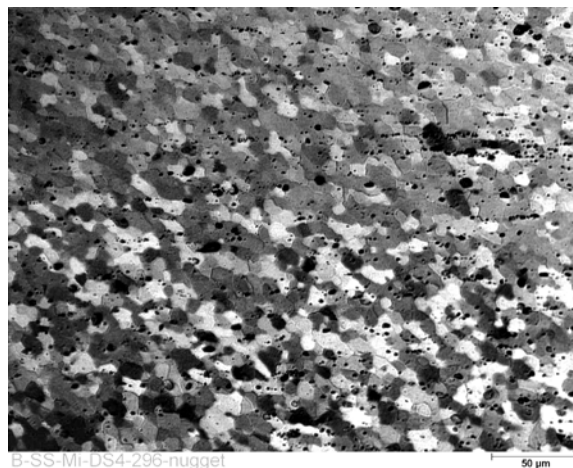


Figura 4.21 Microestrutura da liga 5754 H22 mostrando a região CS formada por grãos pequenos e recrystalizados. Ataque químico: Barker.

As microestruturas apresentadas nas Figuras 4.22 a 4.25 são oriundas das juntas soldadas com velocidade de 5 m/min.

A formação de ZTA neste caso se resume a uma região muito estreita, onde não se detectam os grãos deformados pela laminação, que dificilmente se distingue da ZTMA. A Figura 4.22 mostra esta transição, em detalhe a região formada pela mistura de grãos arredondados e refinados, visto novamente em detalhe também na Figura 4.24.

O lado de recuo, mostrado na Figura 4.23, apresenta uma região de grãos ligeiramente espessos que consiste na ZTA. Uma vista detalhada das ZTA e ZTMA é

apresentada na Figura 4.24 formada novamente pela mistura de grãos refinados (CS) e alongados espessos. Neste caso, assim como para a velocidade de 1 m/min, fica mais evidente a presença de grãos mais espessos, pois o MB apresenta alto grau de deformação.

O centro da solda apresenta grãos bem refinados de tamanho médio de 7,86  $\mu\text{m}$ , o que corresponde a  $G=11,0$ .

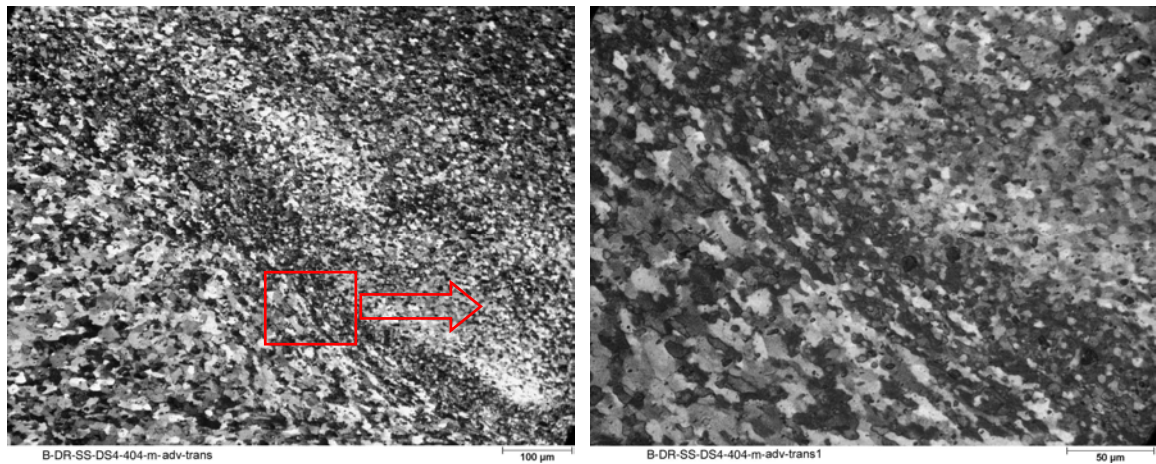


Figura 4.22 Microestrutura da liga 5754 H22 mostrando a região de transição entre MB do lado de avanço e CS. Em detalhe ZTA/ZTMA (direita). Ataque químico: Barker.

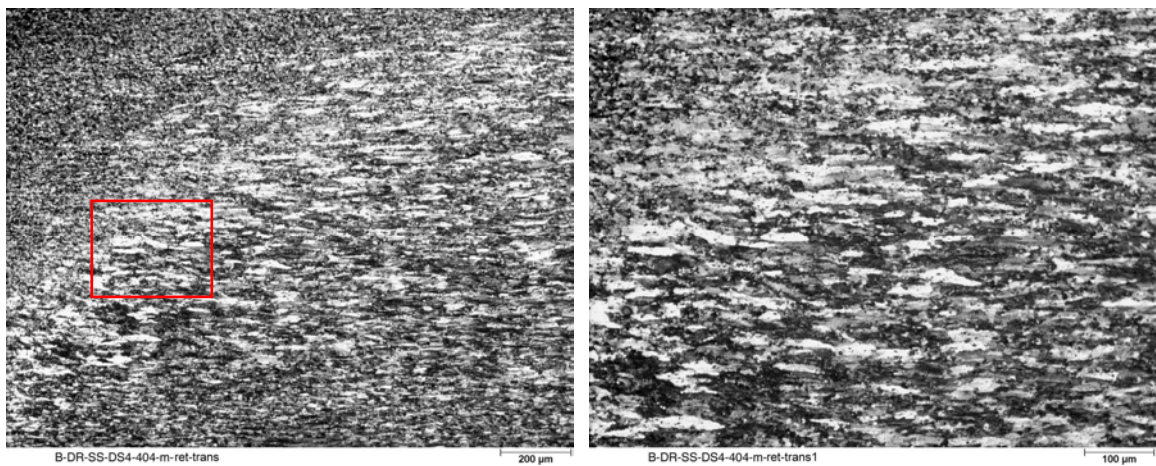


Figura 4.23 Microestrutura da liga 5754 H22 mostrando a região de transição entre MB do lado de recuo e CS. Em detalhe (direita) a região indicada mostrando ZTA/ZTMA. Ataque químico: Barker.

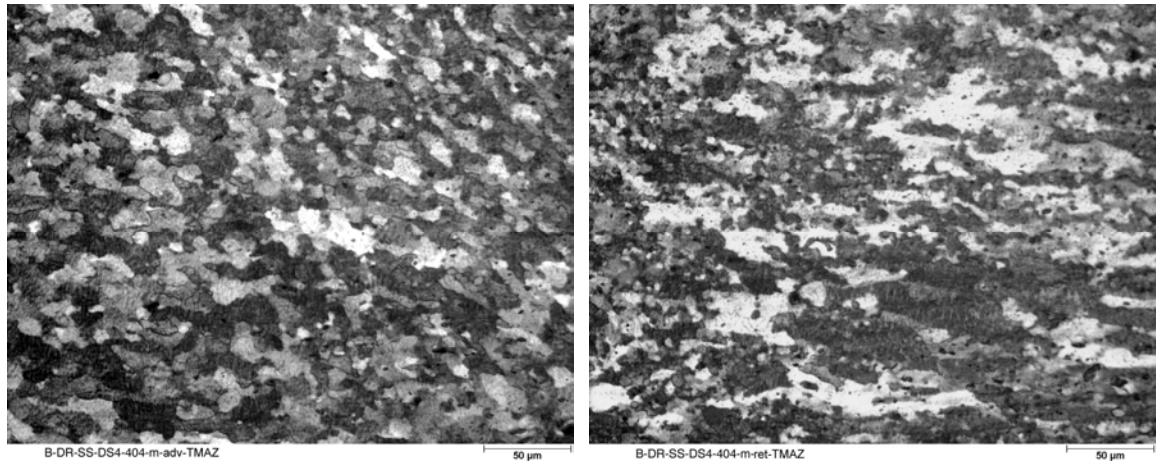


Figura 4.24 Vista em grande aumento das microestruturas das ZTA e ZTMA do lado de avanço (esquerda) e lado de recuo (direita) da liga 5754 H22. Ataque químico: Barker.

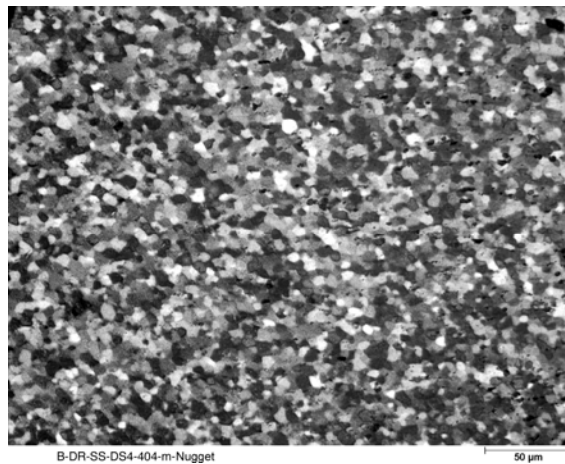


Figura 4.25 Microestrutura refinada e recristalizada da região CS da liga 5754 H22. Ataque químico: Barker.

#### 4.4 Ensaio de Microdureza

A Figura 4.26 mostra os perfis de dureza de ambas as condições de soldagem da liga 6181 T4, cada gráfico apresenta resultado de dois testes. Como pode ser visto não há grande variação no perfil e o decréscimo característico nos valores de dureza na ZTA não é observado aqui.

Os perfis de microdureza da liga 5754 H22 são mostrados na Figura 4.27, com dois testes em cada gráfico, onde se observa que em ambas as condições de soldagem há um decréscimo nos valores quando comparados os lados de recuo e avanço. Este fato está

relacionado com a condição microestrutural apresentada pelas chapas. Pode ser visto também que a queda de dureza ocorre na ZTA, que para a condição 5 m/min é mais estreita (próxima ao centro da solda).

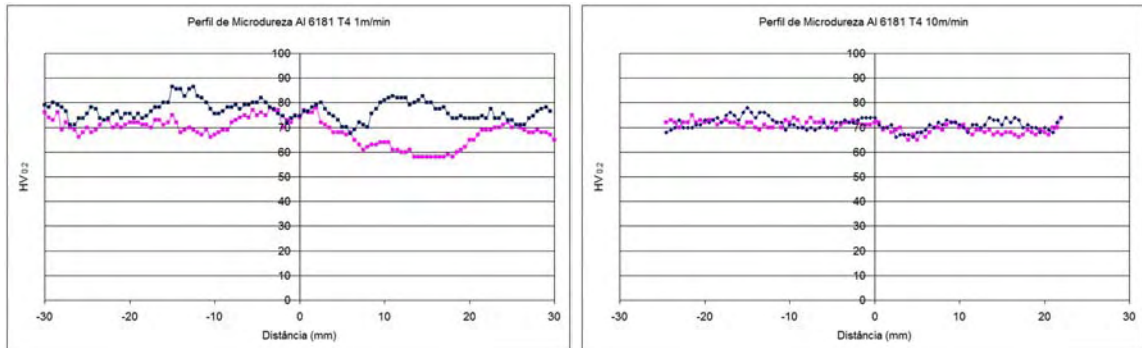


Figura 4.26 Perfil de microdureza das soldas da liga 6181 T4. Velocidades de soldagem 1 m/min à esquerda e 10 m/min à direita.

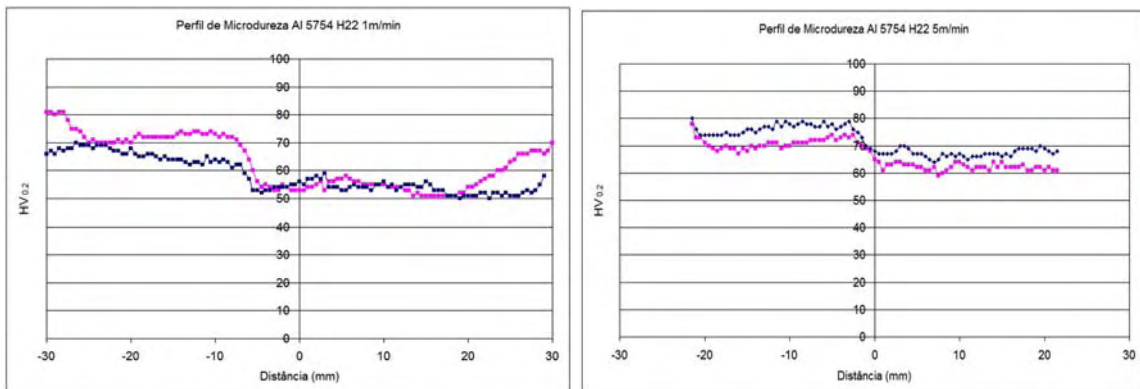


Figura 4.27 Perfil de microdureza das soldas da liga 5754 H22. Velocidades de soldagem 1 m/min à esquerda e 5 m/min à direita.

#### 4.5 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração são mostrados separadamente nos próximos parágrafos. É importante citar algumas considerações antes da análise destes resultados:

Os ensaios do material de base foram realizados somente com as chapas de 1 mm, sendo que é o material menos resistente das juntas;

O cálculo da secção transversal é realizado levando em conta a espessura do material de menor espessura (1 mm) visto que em nenhum dos casos a ruptura

ocorreu no lado mais espesso (2 mm) ou até mesmo na região da solda, onde há um gradiente de espessura;

Os valores entre parênteses mostrados nas tabelas indicam o decréscimo de resistência em relação ao material de base;

Em todas as condições foram testados no mínimo três corpos de prova e os resultados das tabelas é uma média dos valores obtidos.

#### 4.5.1 Liga 6181 T4

A Tabela 4.1 mostra os resultados médios obtidos dos ensaios de tração da liga 6181 T4. Os diagramas tensão deformação são apresentados na Figura 4.28.

Tabela 4.1 Propriedades mecânicas da liga 6181 T4.

Propriedades Mecânicas	Material de Base	Velocidade de soldagem 1 m/min	Velocidade de soldagem 10 m/min
$\sigma_{\max}$ (MPa)	252,9	233,2 (92,2%)	239,8 (94,8%)
$\sigma_e$ (MPa)	138,4	136,4 (98,5%)	136,1 (90,3%)
Elongação Total (%)	25,3	9,8 (38,7%)	12,2 (48,3%)
$r_0/r_{90}$	0,6/0,5		

Para este material é possível observar um pequeno decréscimo nos valores de  $\sigma_{\max}$  e que quase não houve variação nos valores de  $\sigma_e$ . Entre as duas velocidades de soldagem não se observa grandes variações nos valores de tensão.

Em termos de alongamento é possível observar um grande decréscimo nos valores obtidos das juntas soldadas. É importante observar que os corpos de prova do material de base apresentam um  $l_0$  de espessura homogênea e as juntas soldadas apresentam um  $l_0$  dividido em metade 2 mm e metade 1 mm. Analisando os valores de  $\sigma_e$  e  $\sigma_{\max}$  fica claro que a parte mais espessa não atinge valores de deformação permanente e, estando somente no campo elástico, não contribui para a elongação total.



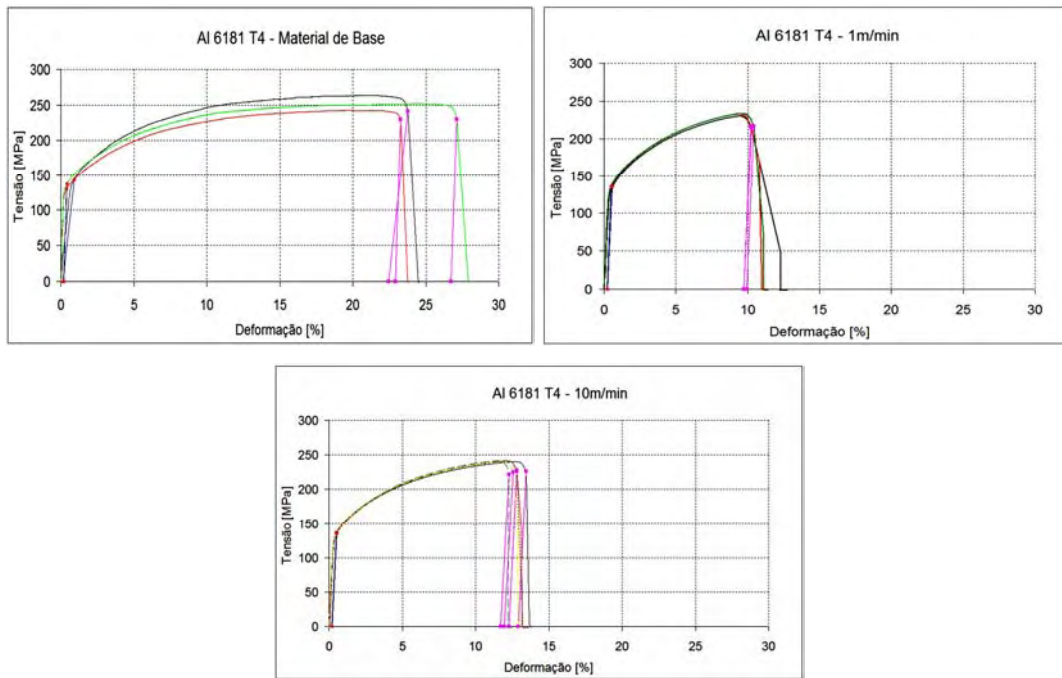


Figura 4.28 Diagramas tensão deformação para a liga 6181 T4 nas condições: material de base e velocidades de soldagem 1 e 10 m/min como indicado.

A ruptura dos corpos de prova soldados ocorreu sempre no lado de menor espessura (1 mm). A Figura 4.29 mostra uma comparação da distância da posição da ruptura e o centro da solda. A distância média do centro da solda à ruptura foi medida e o resultado obtido nas juntas de velocidade 1 m/min é de 9,5 mm. Já nas juntas soldadas com 10 m/min esta distância média é de 6,5 mm. Este resultado comprova que o processo de soldagem não apresenta descontinuidades, uma vez que não ocorreram falhas na região CS, e também auxilia a identificação de uma zona de redução das propriedades mecânicas (possivelmente ZTA) que não foi observada na microscopia óptica nem nos ensaios de microdureza.



Figura 4.29 Posição de ruptura nas juntas da liga 6181 T4 soldadas com velocidades de 1 m/min (esquerda) e 10 m/min (direita).

#### 4.5.2 Liga 5754 H22

A Tabela 4.2 mostra os resultados médios obtidos dos ensaios de tração da liga 5754 H22. Os diagramas tensão x deformação são expressos na Figura 4.30.

Tabela 4.2 Propriedades mecânicas da liga 5754 H22.

Propriedades Mecânicas	Material de Base	Velocidade de soldagem 1 m/min	Velocidade de soldagem 5 m/min
$\sigma_{\max}$ (MPa)	243,8	226,8 (93%)	215,1 (88,2%)
$\sigma_e$ (MPa)	165,3	128,1 (77,5%)	129,8 (78,5%)
Elongação Total (%)	20,3	15,3 (77,6%)	11,4 (56,4%)
$r_0/r_{90}$	0,96/0,96		

A comparação dos resultados da Tabela 4.2 mostra neste caso uma leve redução de  $\sigma_{\max}$  para a condição 1 m/min e uma redução mais acentuada para a condição 5 m/min. Os valores de  $\sigma_e$  para as duas condições apresentam um decréscimo semelhante.

Os valores de alongamento nesta liga não apresentaram um decréscimo tão acentuado como para a outra liga. A condição de soldagem 1 m/min, especialmente, apresenta um valor de alongação bem superior as outras condições atingindo 77,6% da alongação total do material de base.

As soldas de velocidade 5 m/min apresentaram uma condição especial de ruptura, como visto na Figura 4.31. Todos os corpos de prova apresentaram ruptura numa região bem distante á solda e a 45° com o eixo da força, comportamento semelhante ao apresentado pelos materiais de base.

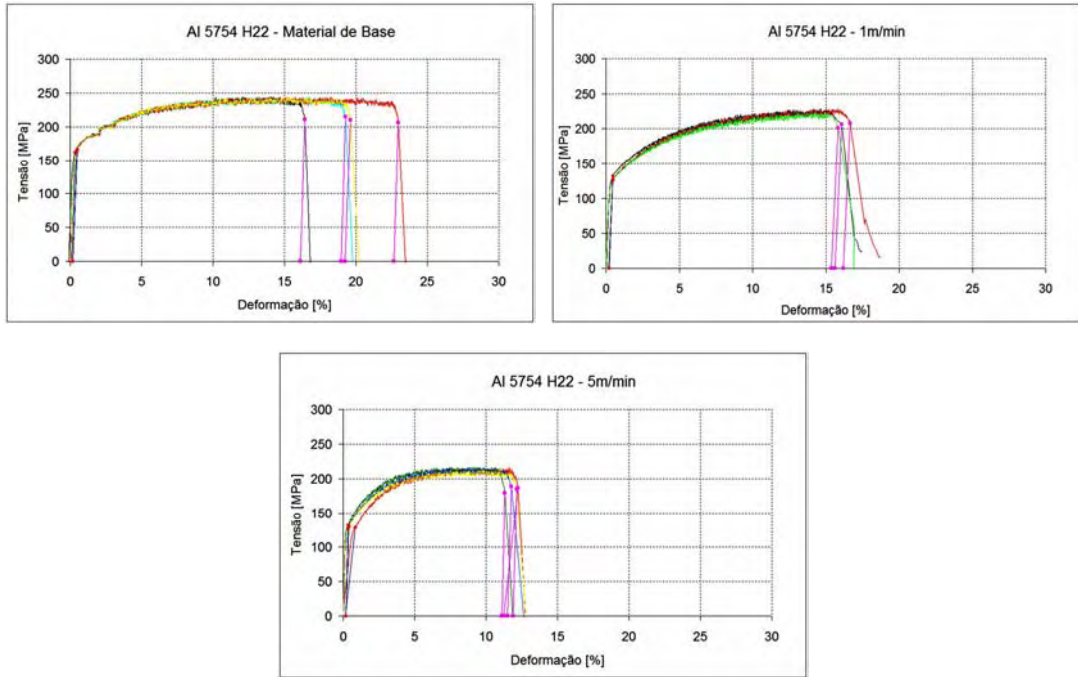


Figura 4.30 Diagramas tensão deformação para a liga 5754 H22 nas condições: material de base e velocidades de soldagem 1 e 5 m/min como indicado.

A posição de fratura apresentada pela condição 1 m/min foi em média 7,5 mm distante do centro da solda. O que representa somente 1 mm distante da linha do ombro da ferramenta. Aqui também é observada uma região de degradação das propriedades na condição de 1 m/min que não foi vista na metalografia nem nos testes de microdureza.

Mais uma vez pôde se observar a boa qualidade do processo de soldagem não apresentando ruptura na região do centro da solda, especialmente na condição de 5 m/min.

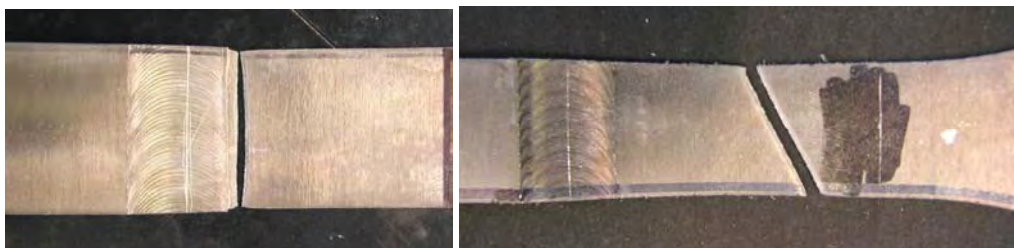


Figura 4.31 Local de ruptura das condições 1 m/min (esquerda) e 5 m/min (direita) da liga 5754 H22.

#### 4.6 Ensaio de Tração Corpos de Prova Entalhado

Os resultados destes ensaios, expressos em formato de curvas limites de conformação (CLC), relacionam os dados obtidos do material de base com as condições de soldagem, vistos nas Figuras 4.32 e 4.33. Nos diagramas são apresentados também os pontos oriundos dos ensaios de tração simples para comparação com os valores dos corpos de prova número 5 (entalhe mais suave).

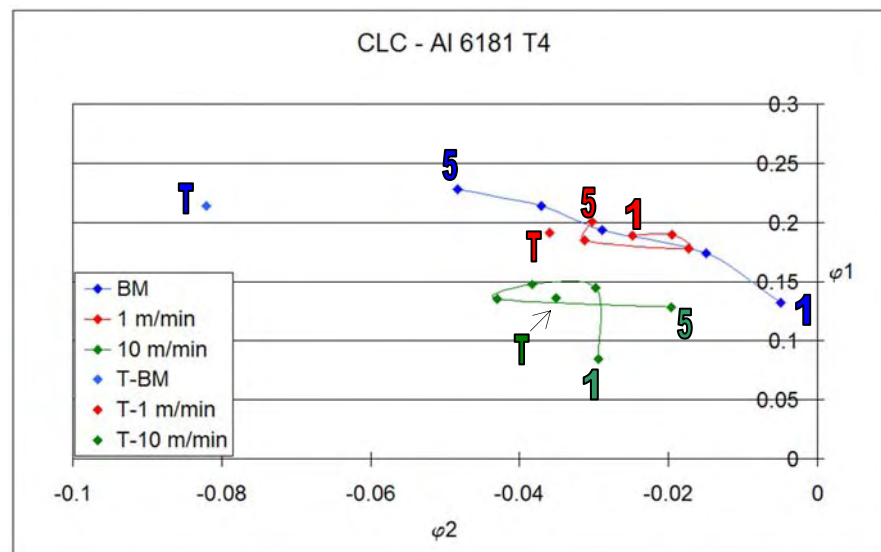


Figura 4.32 Curva limite de conformação do material de base e as duas condições de soldagem da liga 6181 T4.

A curva obtida do material de base da liga 6186 T4 representada acima se assemelha a uma linha reta partindo da região de deformação plana ( $\varphi_1=0$ ), cp n°1, seguindo em direção da região de tração ( $\varphi_1=-2\varphi_2$ ), cp n°5, porém ainda distante do ponto oriundo ao ensaio de tração (T).

Já as curvas oriundas dos corpos de provas soldados apresentaram valores distorcidos de  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$ , inclusive para os corpos de prova de tração. Este fato pode estar relacionado com a variação de espessura que ocorre justamente na região de interesse dos corpos de prova.

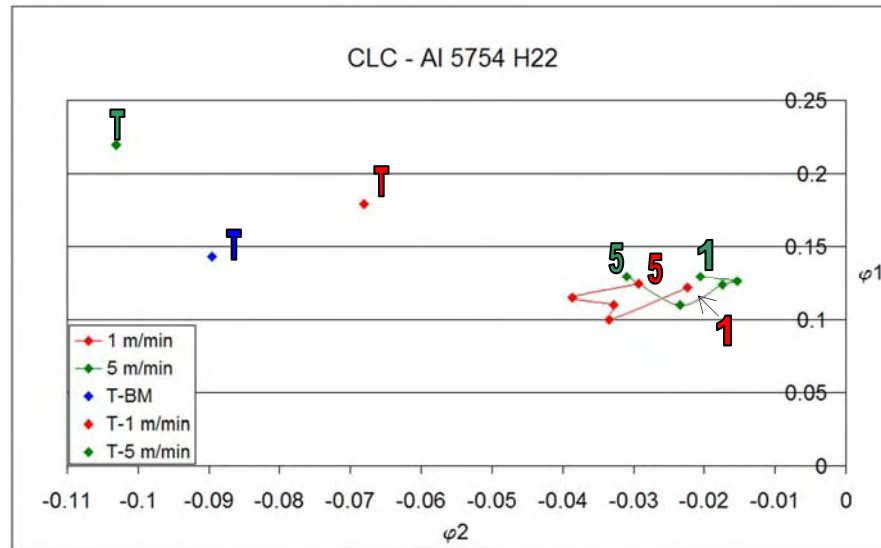


Figura 4.33 Curva limite de conformação das duas condições de soldagem da liga 5754 H22.

No caso da liga 5754 H22 não foi possível o teste das amostras do material de base, porém as amostras soldadas apresentaram o mesmo comportamento observado na liga anterior. Neste caso os valores dos corpos de prova de tração apresentaram valores assemelhados ao de tração do material de base. O comportamento distorcido dos valores de  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  deve estar relacionado da mesma forma com a variação de espessura da junta soldada

#### 4.7 Ensaio de Estampabilidade

Os resultados dos ensaios de estampabilidade estão expressos também como curvas limite de conformação nas Figuras 4.34 e 4.35. Todos os dados foram medidos e calculados via sistema óptico.

Os resultados obtidos do material de base formam uma curva semelhante aos dados de literatura, iniciando na região de estiramento biaxial ( $\varphi_1 = \varphi_2$ ) e seguindo na direção de deformação plana ( $\varphi_1 = 0$ ), porém o estado de deformações de tração e de estampagem profunda (lado  $\varphi_2$  negativo do diagrama) não foram alcançados.

Aqui é visto também uma grande diferença nos valores de  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  dos corpos de prova das juntas soldadas.

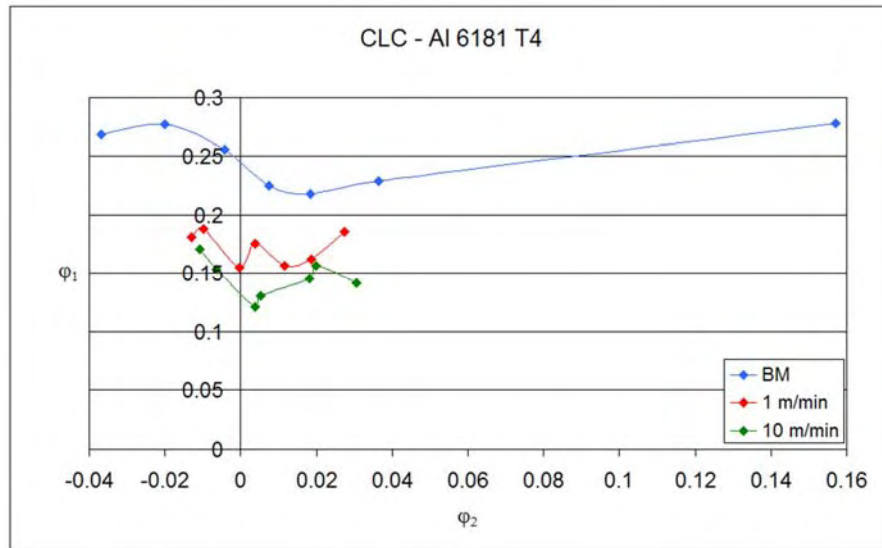


Figura 4.34 CLC obtida dos ensaios de estampabilidade. Liga 6181 T4.

Os resultados obtidos para os corpos de prova da liga 6186 T4 mostram que há uma queda considerável nos valores de  $\varphi_1$ , em alguns casos de até 50%. Adicionalmente observa-se que os valores de  $\varphi_2$  estão expressos em uma faixa muito menor. De qualquer forma a curva apresenta um formato seguindo a tendência esperada, ao contrário do apresentado pelos corpos de prova de tração entalhados.

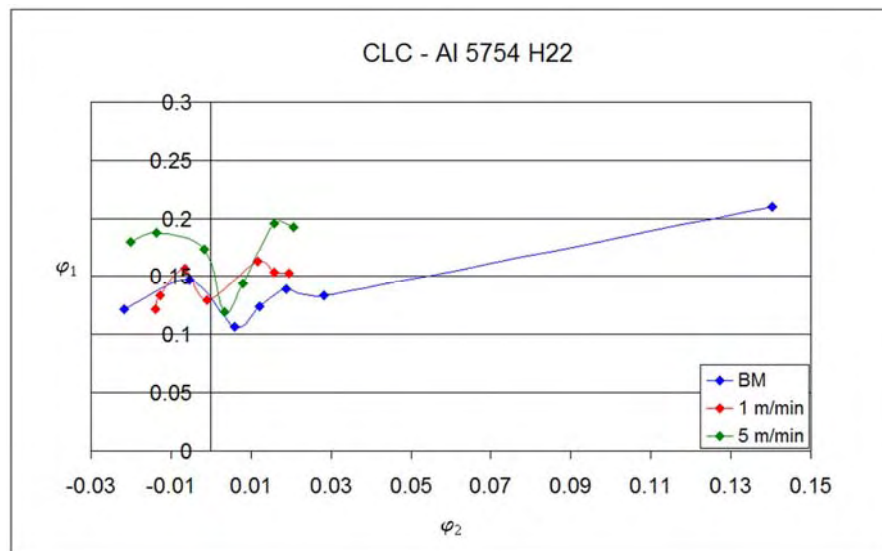


Figura 4.35 CLC obtida dos ensaios de estampabilidade. Liga 5754 H22.

No material 5754 H22 as mesmas características da outra liga são apresentadas em relação ao formato da curva e a faixa de valores de  $\varphi_2$ . Porém os valores de  $\varphi_1$  não apresentam decréscimo acentuado, de forma contrária os valores em média são maiores que os apresentados pelo material de base.

Em ambos os materiais foi observado, também, o deslocamento da linha de solda para o lado do material mais forte. O sistema óptico permite que sejam estudados os mapas de deslocamentos mostrando esta movimentação. A Figura 4.36 mostra uma comparação dos deslocamentos nos corpos de prova semelhantes com e sem a presença de solda.

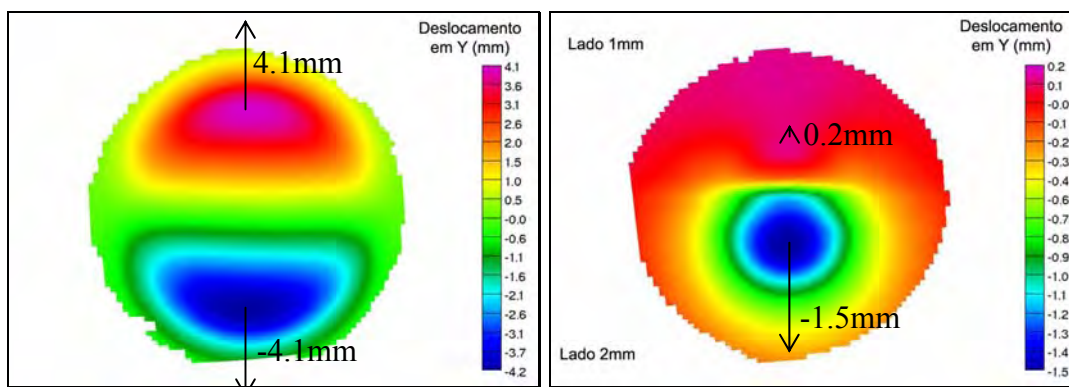


Figura 4.36 Comparação dos deslocamentos em Y entre um corpo de prova do material de base (esquerda) e um TWB (direita). As setas indicam aproximadamente as proporções dos deslocamentos.

Observa-se que a imagem correspondente a um corpo de prova sem solda os deslocamentos são simétricos, de mesmo valor em módulo. Já no corpo TWB não se observa a mesma simetria e os valores apresentados são em geral negativos com uma pequena região no material de 1 mm se deslocando para o lado positivo. Observa-se também que a região central apresenta valores negativos de Y, isto significa que inclusive a linha de solda move se para o lado o material mais forte (2 mm).

## 5.0 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O objetivo principal das análises até aqui realizadas é de caracterizar as propriedades mecânicas e de estambabilidade das juntas soldadas pelo processo de fricção e mistura mecânica. A comparação entre os materiais originais e as condições de soldagem de velocidades normal e alta é realizada em todo o procedimento experimental assim como o estudo do efeito da variação de espessura, por tratar-se de Tailor Welded Blanks.

O primeiro passo para a obtenção de uma solda com boa qualidade está no procedimento adequado de soldagem. Por tratar-se de um processo robotizado foi possível fazer a leitura e controle das variáveis envolvidas no processo. Como o processo de soldagem com altas velocidades ainda não é muito difundido e dominado, o controle, análise e possibilidade de repetição dos parâmetros de soldagem foi de suma importância. As curvas de velocidade, rotação e força, serviram de base para o bom andamento do processo.

A temperatura de soldagem se apresenta bem abaixo dos níveis conhecidos dos processos convencionais, pois o processo se dá totalmente sem fusão de material. A influência da velocidade de soldagem é claramente observada, sendo que à medida que se aumenta a velocidade a temperatura máxima atingida diminui. Este fato está diretamente relacionado com a quantidade de energia absorvida pelo material.

Os ensaios de dobramento, requisito básico para seguir em frente com o procedimento de soldagem, ajudaram a detectar defeitos como falta de penetração do pino, causados ou por comprimento inadequado ou por insuficiente de força de soldagem nas primeiras tentativas. Porém os procedimentos adotados neste trabalho foram aperfeiçoados e apresentaram resultados satisfatórios nestes testes iniciais.

Os aspectos macrográficos observados indicam uma diferença básica entre as velocidades de soldagem. Para ambas as ligas o formato do cordão de solda apresenta uma geometria trapezoidal nas baixas velocidades e um estreitamento logo abaixo da superfície nos casos de alta velocidade. Isto se deve ao fato do tempo de interação entre o pino e o material adjacente diminuir, à medida que a velocidade de soldagem aumenta a quantidade



de material “misturada” pelo pino é menor formando assim uma região menor de grãos refinados e recristalizados.

No caso do material 6181 T4 soldado com 1 m/min as mudanças microestruturais, exceto na região CS foram de difícil identificação. Uma região caracterizada por grãos levemente arredondados pôde apenas ser vista no lado de avanço (1 mm) em uma faixa muito estreita, caracterizando assim uma ZTA. Pois os grãos estavam originalmente alongados devido à laminação e desta maneira uma pequena quantidade de energia foi suficiente para induzir um leve crescimento. Há também a possibilidade destes grãos arredondados serem somente grãos que foram girados 90° devido à passagem da ferramenta, caracterizando então uma ZTMA de acordo com o citado por Threadgill <sup>6</sup>. No lado de recuo, que já apresentava grãos equiaxiais esta constatação não foi possível, foi observada somente uma pequena ZTMA composta por uma mistura de grãos de tamanho original e grãos refinados.

A condição 6181 T4 10 m/min apresenta mudanças ainda mais difíceis de serem observadas. O que se pode observar no lado de avanço (1 mm) é semelhante à condição anterior porém numa faixa ainda mais estreita. Pode se dizer que a área modificada não passa de duas ou três camadas de grãos que apresentaram formato mais arredondado e imediatamente ao lado já encontram-se os grãos refinados oriundos da recristalização no CS. No lado de recuo só se pode observar que à medida que se aproxima do CS surgem os grãos refinados misturando-se aos grãos originais.

O material 5754 H22 originalmente já apresentava uma condição microestrutural com alguns grãos deformados da laminação mistos com grãos equiaxiais, no lado de avanço (1 mm), e grãos altamente deformados no lado de recuo (2 mm). Desta forma a visualização de formação de ZTA na condição 5754 H22 1 m/min ficou facilitada. No lado de avanço a ZTA é caracterizada por uma região estreita onde não se observa a presença dos grãos deformados da laminação (alongados) e imediatamente a ZTMA formada pela mistura de grãos refinados com grãos que compõem a ZTA. No lado de recuo a ZTA apresenta, numa região não tão estreita, grãos equiaxiais pequenos (porém não tão pequenos quanto no CS). Neste caso fica difícil de identificar a ZTMA, pois o tamanho e geometria dos grãos não são tão distintos entre ZTA e CS.

Na condição 5754 H22 5 m/min a ZTA do lado de avanço (1 mm) não é tão clara quando para a condição anterior devido ao estreitamento da mesma, ficando assim difícil a

distinção de ZTA e ZTMA (mista de grãos refinados do CS e grãos maiores equiaxiais). No lado de recuo se observa apenas uma região de grãos pouco mais espessos (ZTA) que logo se mistura com os grãos oriundos da região CS formando a ZTMA.

Em ambos os materiais fica clara a influência da velocidade de soldagem na formação das zonas características de solda, embora nestes casos, devido às baixas energias/temperaturas e pequenas espessuras dos materiais, ficaram muito difíceis de serem identificadas via microscopia óptica.

Os perfis de microdureza apresentados pela liga 6181 T4 em ambas as condições de soldagem não mostram grandes variações de valores nas distintas regiões da solda. As temperaturas atingidas não influenciaram na condição de tempera desta liga com respeito à dureza.

Os valores de microdureza dos materiais da liga 5457 H22 apresentaram uma diferença inicial entre as chapas 2 mm (maior dureza) e 1 mm (menor dureza). Nas duas condições de solda foi observado que obviamente há uma queda quando se atravessa do MB 2 mm para o MB 1 mm. A diferença entre as duas condições é a posição (distância do CS) onde a queda de dureza ocorre. Nas juntas soldadas com 1 m/min observa-se uma queda de dureza iniciada um pouco mais distante que na condição 5 m/min em relação ao CS. Este fato está relacionado com o visto nas metalografias que evidenciam a presença de uma ZTA mais pronunciada no lado de recuo (2 mm).

As tensões de escoamento e de ruptura das 2 condições de soldagem da liga 6181 T4 quando comparadas com o material de base apresentam valores satisfatórios uma vez que em todos os casos os resultados estão acima da faixa de 90% da resistência do material de base.

Os valores de alongação, para a mesma liga, por sua vez apresentaram uma queda considerável. Cabe lembrar que, por tratar-se de juntas de espessuras diferentes, haverá uma maior solicitação no material menos espesso. Pode-se considerar que o comprimento inicial  $l_0$  é dividido por dois nestes casos, uma vez que o lado mais forte (2 mm) se deforma somente na região elástica. Desta forma tem-se que a alongação total nos TWB nunca exceda a faixa dos 50%. Naturalmente há a influência das alterações metalográficas que podem propiciar maiores ou menores deformações. Ao analisar novamente os valores

de 38,7% e 48,3% pode-se afirmar que a queda não é tão acentuada uma vez comparando com um valor máximo admissível de 50%.

As condições da liga 5754 H22 não apresentaram valores de tensão de escoamento tão atrativos quanto o material anterior, porém a tensão máxima permanece na casa dos 90% (88-93%). Especial atenção para a condição 5 m/min que em todos os casos apresentou ruptura bem distante da região soldada, no material de base de 1 mm, a 45° com a direção principal da força, apresentando, porém o menor valor de  $\sigma_e$ .

Os valores de alongamento apresentados por este material estão bem acima dos apresentados pela liga anterior. Neste caso as modificações introduzidas pela deformação mecânica e temperatura propiciaram maiores valores de alongamento, inclusive superiores a 50%. Ao variar as condições de têmpera da liga 5754 é possível obter valores muito diferentes de alongação mesmo que não sejam observadas grandes variações nos valores de dureza<sup>31</sup>.

Dos ensaios de tração foram identificadas e medidas as posições da ruptura e é possível identificar uma relação entre a velocidade de soldagem e a região de ruptura, assim como o observado no trabalho de Strombeck et al<sup>5</sup>, com exceção da condição 5754 H22 5 m/min que em todos os casos rompeu a 45° no material de base de 1 mm. Esta posição de fratura identifica uma região de degradação das propriedades mecânicas, embora nem os perfis de microdureza nem a metalografia tenham mostrado claramente esta variação.

Os ensaios de tração entalhados do material 6181 T4 MB apresentaram valores dentro da tendência esperada, embora não abrangendo uma região tão ampla do diagrama como o proposto inicialmente e estudado no capítulo de revisão bibliográfica. É importante salientar que estes ensaios foram desenvolvidos para materiais ferrosos e não se tem referências destes testes para ligas de alumínio.

Já os resultados apresentados pelas quatro condições de soldagem, nos ensaios de tração entalhados, estão bem fora do esperado pois não seguem a tendência apresentada pelo material de base. Este fato se deve basicamente ao efeito geométrico dos corpos de prova de espessura variada. A variação nos raios dos entalhes dos corpos de prova tem por objetivo induzir os vários níveis de deformações na região central dos mesmos. A linha de solda foi posicionada centrada ao eixo dos corpos de prova, desta forma há um gradiente

de espessura na região de interesse. Sendo assim, a menor secção resistente também não se encontra mais no centro dos corpos de prova. O efeito geométrico somados a alteração das propriedades do material resultaram numa grande dispersão dos valores de deformações principais e secundárias invalidando o teste.

Os ensaios de estampabilidade apresentaram resultados dentro do esperado para os materiais de base. Foi observado que, em ambos os casos, as regiões correspondentes a tração ( $\varphi_1 = -2\varphi_2$ ) e estampagem profunda ( $\varphi_1 = -\varphi_2$ ) não foram atingidas. Isto pode ser alterado com a utilização de corpos de prova com entalhes de raios maiores, diminuindo a largura na região central, sendo assim uma adaptação à proposta inicial.

Os resultados das duas condições de soldagem da liga 6181 T4 apresentaram valores muito semelhantes. Em geral é observada, nos valores de  $\varphi_1$ , a tendência dos resultados dos ensaios de tração simples. Houve uma diminuição nos valores das deformações principais ( $\varphi_1$ ) que pode ser relacionado com a queda na elongação vista nos ensaios de tração. Os valores de  $\varphi_2$  também apresentaram grande alteração, porém serão comentados juntamente com os materiais da outra liga por terem a mesma tendência.

No material 5754 H22 a mesma tendência de  $\varphi_1$  é observada. Os valores das deformações principais são em média superiores ao apresentado pelo material de base assim como o observado nos ensaios de tração (valores de elongação superiores a 50%).

Para as quatro condições de soldagem foi observado que os valores das deformações secundárias ( $\varphi_2$ ) estão dispostos numa faixa muito mais estreita, de acordo com o observado nos trabalhos de Cayssials<sup>4,21</sup> e Kinsey et al.<sup>25</sup>. Este fato está relacionado a presença de um material de espessura superior, na região adjacente, que além de induzir uma condição mais severa em termos de deformações principais ainda restringe as deformações secundárias. Visto que o material mais forte (2 mm) não se deforma tanto quanto o mais fraco (1 mm) acaba por deslizar sobre a superfície do punção puxando o material mais fino e a linha de solda para o seu lado aumentando assim o esforço na direção de  $\varphi_1$ . Ocorre que a deformação secundária do material mais forte também é menor resultando numa restrição da deformação do material mais fraco na região adjacente a solda.

A movimentação do cordão de solda em direção ao material mais forte foi verificada em todos os ensaios de estampagem, comprovando assim a tendência já

estudada por Cayssials<sup>4,21</sup>. A análise dos deslocamentos mostra que quando ensaiados os materiais de base os deslocamentos são simétricos e já nas juntas soldadas isto não foi verificado.

## 6.0 CONCLUSÕES

As juntas soldadas produzidas nas quatro condições apresentaram resultados satisfatórios e repetitivos, esta afirmação é baseada nos estudos dos esforços de soldagem, aspectos visuais, temperaturas medidas, ensaios de dobramento e no fato de que nenhum dos ensaios mecânicos realizados apresentou ruptura na região do cordão de solda.

Das macrografias estudadas observou-se uma tendência de estreitamento da zona definida como centro da solda a medida que aumenta a velocidade de soldagem. Fato este que está relacionado com o aporte térmico e o tempo de interação/contato da ferramenta com o material plastificado, ambos diminuindo com o aumento da velocidade de soldagem.

As alterações microestruturais das soldas da liga 6181 T4 foram de difícil identificação, somente a região central formada por grãos refinados equiaxiais é facilmente identificada. As alterações na ZTMA e ZTA, no lado de 1 mm de espessura, por apresentar originalmente grãos levemente alongados devido a laminação, foi possível identificar uma zona muito pequena de grãos tendendo a equiaxiais, zona essa que fica mais estreita ainda nas soldas de alta velocidade.

Na liga 5754 H22 as alterações metalográficas são mais facilmente identificadas devido às condições originais, onde as chapas de 1 mm apresentam alguns grãos deformados e 2 mm apresentam somente grãos altamente deformados. A ZTA fica caracterizada pela ausência de grãos deformados porém sem a presença de crescimento de grãos. A mesma tendência de estreitamento ZTA com o aumento da velocidade foi aqui também identificada. Nas duas condições a ZTMA é formada pela mistura dos grãos refinados oriundos da região CS e grãos arredondados da ZTA.

Do ensaio de microdureza não foram observadas as grandes variações típicas de processos de soldagem convencionais. Somente a liga 5754 H22, por ter durezas distintas nas chapas de 1 e 2 mm, apresentou pequena variação no perfil. Observou-se que a queda de dureza repete a tendência apresentada pelo tamanho da ZTA, ocorrendo mais próximo ao centro da solda no caso de alta velocidade de soldagem. As baixas temperaturas atingidas não alteram as condições de têmpera da liga 6181 T4 no que diz respeito a dureza, leves variações foram observadas.

Os valores de propriedades mecânicas oriundos dos ensaios de tração da liga 6181 T4 mostraram excelente desempenho uma vez que comparando com o material de base todos os valores estão acima dos 90%. Em termos de alongamento os resultados também são satisfatórios pois permanecem perto dos 50% do material de base com os melhores valores sendo atingidos pelas juntas soldadas em alta velocidade (48,3%). Visto que o lado mais espesso da solda não se deforma plasticamente somente o lado de 1 mm é responsável por 50% da deformação total.

Já o material 5754 H22 apresenta uma queda maior nos valores de resistência mecânica especialmente nos valores de tensão de escoamento, decrescendo para faixa dos 78% e trazendo consigo um aumento considerável nos valores de alongamento ultrapassando a faixa dos 50% nas duas condições de soldagem, especialmente no caso da condição 5754 H22 1 m/min que atingiu um valor médio de 77,6%.

Dos ensaios de tração entalhados somente os realizados no material de base da liga 6181 T4 apresentaram resultados satisfatórios, mesmo assim não abrangendo toda a região esperada. Os demais testes nas juntas soldadas não corresponderam às expectativas devido as variações de espessura justamente na região de interesse alterando assim o estado de tensões no centro da região entalhada. De certa forma este teste serviu para caracterizar a integridade do cordão de solda por forçar a ruptura a ocorrer na região central da solda. Na presença de defeitos a falha ocorreria na região CS, o que em nenhum caso foi observado.

Os ensaios de estampabilidade apresentaram resultados dentro do esperado, os testes dos materiais de base não atingiram uma área tão ampla como o proposto pelo método porém, em geral o desenvolvimento e pesquisa nesta área e realizado para aços, desta forma é natural que alguns fatores tenham que ser alterados na a adaptação para ligas de alumínio.

Os ensaios das quatro condições de soldagem apresentaram resultados semelhantes e seguindo a mesma tendência dos testes de tração simples quando comparados valores de alongamento com os valores de deformação principal medidos. Foi observada uma queda nos valores de  $\phi_1$  para os corpos de prova da liga 6181 T4 e um aumento para a liga 5754 H22 assim como no teste de tração.

Os valores de deformação secundária não abrangem uma área sequer tão ampla como o material de base, apresentam-se concentrados bem próximo do zero. Isto está

relacionado com a variação de espessura dos dois lados dos corpos de prova, uma vez que o material mais espesso se deforma menos e ainda tende a restringir, impedindo que a região adjacente no material menos espesso se deforme livremente.

As modificações impostas pela variação de espessura afetaram fortemente os resultados dos ensaios para levantamento da curva limite de conformação, tanto no caso dos testes de tração quanto os de estampagem. Porém, nos testes de estampagem, os resultados das deformações principais ( $\phi_1$ ) são satisfatórios e apresentaram uma clara tendência, que quando relacionada com os ensaios de tração simples permite identificar a melhor condição de soldagem para estampagem.

Mesmo com a presença destes problemas os resultados mostraram que as juntas soldadas pelo processo de ficção e mistura mecânica de espessuras variadas podem satisfazer com certas restrições as solicitações impostas nos processos de estampagem freqüentemente utilizados na indústria automotiva. Especialmente o material 5754 H22 que apresenta valores de  $\phi_1$  superiores ao material de base com destaque para as soldas em alta velocidade (5 m/min) que apresentaram o melhor resultado das quatro condições.

Quando comparados os valores de todos os testes com relação as duas velocidades de soldagem pode se concluir que os procedimentos em alta velocidade não apresentaram decréscimos consideráveis podendo assim trazer grandes benefícios devido aos ganhos no tempo de operação. Desta maneira comprovando que os procedimentos em altas velocidades são adequados.



## 7.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Aprofundar a investigação metalográfica com objetivo de identificar mais claramente as zonas de soldagem. Com os métodos convencionais de microscopia óptica pôde se observar que as zonas em alguns casos não apresentam diferenças muito claras.

Estudar uma possível variação de geometria para os corpos de prova de tração entalhados visando atingir o estado crítico de deformações numa região que não sofra os efeitos do gradiente de espessura e ainda assim obtendo resultados representativos. O estudo via simulação por elementos finitos já vem sendo estudado como uma opção para otimizar este teste. Acredita-se que é válido tal esforço por se tratar de um teste rápido podendo ser realizado em qualquer máquina universal de tração e ainda sem a influência do atrito.

Variar a geometria dos corpos de prova do ensaio de estampabilidade de forma que sejam atingidos os estados de deformação correspondentes aos esforços de tração ( $\varphi_1 = -2\varphi_2$ ) e embutimento profundo ( $\varphi_1 = -\varphi_2$ ), correspondente ao lado esquerdo de uma CLC. Isso pode ser obtido aumentando o raio do entalhe dos corpos de prova utilizados, diminuindo assim a largura da região central.

Construção da curva limite de conformação, também, para o material de base mais espesso assim como para soldas de topo de mesma espessura e comparar com os resultados obtidos nas juntas tipo TWB. O estudo de soldas similares (mesmo material e espessura) pode auxiliar no entendimento da influência do processo de soldagem, desta forma isolando a variável espessura.

## 8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- <sup>1</sup> Senuma, T. **Physical Metallurgy of Modern High Strength Steel**, ISIJ International, Vol. 41, No. 6, pp. 520–532. 2001
- <sup>2</sup> European Aluminum Association: **Aluminum for Future Generations**. <http://eaa.net/>  
Acesso em 03.11.2004
- <sup>3</sup> Wagoner, R. H., Stasik, M. C. **Forming of Tailor-Welded Aluminum Blanks**. Summary report N° SR97, EWI Project N° 13/33OSF1207, The Ohio State University. 1997
- <sup>4</sup> Cayssials, F. **Specific Forming Limit Curves for Tailored Blanks**. 40<sup>TH</sup> Mechanical Working and Steel Processing-ISS, 1998
- <sup>5</sup> Strombeck, A. von. et al. **Effect of Welding Speed on the Properties of Friction Stir Welded Tailored Blanks**. 4th International Friction Stir Welding Symposium Prospectors Lodge & Conference Center, Park City, Utah, USA - 14-16 May 2003
- <sup>6</sup> Threadgill, P.L. **Friction Stir Welding – the state of the art**. The Welding Institute report 678/1999. My 1999
- <sup>7</sup> ASM Handbook: **Welding, Brazing and Soldering** Vol 6. American Society of Materials, p.1337-1371, USA, 1993
- <sup>8</sup> Sato, Y. **Post-weld formability of friction stir welded Al alloy 5052**. Materials Science and Engineering A369, p 138-143, 2004
- <sup>9</sup> Hatch, J. E. **Aluminium Properties and Physical Metallurgy**. American Society of Materials, USA 1996
- <sup>10</sup> ASM Special Handbook, **Aluminum and Aluminum Alloys**, American Society of Materials, p. 8-31, 231-247, 376-420, USA, 1993
- <sup>11</sup> **Auto/Steel Partnership: Tailor Welded Blank Design and Manufacturing Manual**. <<http://www.a-sp.org>> Acesso em 21 de novembro de 2004

- <sup>12</sup> Banabic, D. et al. **Formability of Metallic Materials**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2000
- <sup>13</sup> Keeler, S. P. **Automotive Sheet Metal Formability – A State of the Art Report**. Automotive Applications Committee, American Iron and Steel Institute. 1989
- <sup>14</sup> Goodwin, G. M. **Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop**. Society of automotive engineers, N°.680093, 380-387, 1968
- <sup>15</sup> Erichsen, A. M. **A new metal test for thin sheets** (em alemão). Stahl und Eisen 34, p.879-882. 1914
- <sup>16</sup> Crivellaro, Rafael C. **Estudo da Estampabilidade de Tailored Blanks a Laser**. Dissertação. PPGEM:UFRGS,2003
- <sup>17</sup> **Thyssen Krupp: Tailored Blanks**. <[http://www.thyssenkrupp.com/ml/search/index.htmx/tailored\\_blanks](http://www.thyssenkrupp.com/ml/search/index.htmx/tailored_blanks)> Acesso em 28 de agosto de 2003
- <sup>18</sup> Hecker, S. S. **A cup test for assessing stretchability**. Met. Eng. Quart. 2 p.30-36. 1974
- <sup>19</sup> Lange, K. Handbook of Metal Forming. Estados Unidos , McGraw-Hill, p.18.3-18-17, 1985
- <sup>20</sup> Lange, K. **Bericht aus dem Institut für Umformtechnik**. Universität Stuttgart. Teil 1 p.213-291 1978
- <sup>21</sup> Cayssials,F. **An industrial Application of Specific Forming Limit Curves for Tailor Welded Blanks**. 21<sup>ST</sup> Biennial Congress International Deep Drawing Research Group, 2000
- <sup>22</sup> Chan, S.M. et al. **Tailor-welded blanks of different thickness ratios effects on forming limit diagrams**. Journal of Materials Processing Technology 132, 2003, p 95-101
- <sup>23</sup> Larsson, H. et al. The Formability of Tailor-Welded Blanks Depending on Welding methods and Material Combinations. 21<sup>ST</sup> Biennial Congress International Deep Drawing Research Group, 2000

- <sup>24</sup> Ono, M. et al. Laser Weldability of High Strength Steel Sheets in Fabrication of Tailor Welded Blanks. NKK International Review n°86, 2002
- <sup>25</sup> Kinsey, B. et al. **Forming of Aluminum Tailor Welded Blanks.** Journal of Materials & Manufacturing. Vol.110, Section 5, p.673-679.
- <sup>26</sup> American Society of Testing Materials. **ASTM E 112-96:** Standard Test Methods for Determining Grain Size. United States, 1996
- <sup>27</sup> ARAMIS Handbook, Version 4.7.2, GOM, Germany
- <sup>28</sup> Galanulis, K., Hoffmann A. **Determination of forming limit diagrams using an optical measurement system.** 7th International Conference on Sheet Metal - SheMet'99, Bamberg, Meisenbach, September 27-28 1999
- <sup>29</sup> International Organization for Standardization, ISO 12004, Metallic materials – Guidelines for the Determination of Forming-Limit Diagrams, Switzerland, 1997
- <sup>30</sup> Deutsches Institut für Normung DIN 10002-1, Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of testing at ambient temperature; Germany, 2001
- <sup>31</sup> ASM Handbok, **Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials.** Vol 2 American Society of Materials, p. 23-109, USA, 1990