

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 DA ESTAMPABILIDADE DE TAILORED BLANKS
SOLDADAS A LASER

Rafael Schilling Crivellaro
Engenheiro Mecânico

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2003

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 DA ESTAMPABILIDADE DE TAILORED BLANKS SOLDADAS A LASER

Rafael Schilling Crivellaro
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia 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 a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2003

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia na área de Processos de Fabricação. Ela foi aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Ing. Lírio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sérgio Tonini Button

Prof. Dr. Jaime Alvares Spim

Prof. Dr. Ivan Guerra Machado

Prof. Dr. Carlos Arthur Ferreira
Coordenador do PPGEM

*Dedico ao Brasil
e a minha família.*

AGRADECIMENTOS

Os meus sinceros agradecimentos ao LdTM pela possibilidade de desenvolver o trabalho nas suas dependências e ao Prof. Dr. Lírio Schaeffer pela orientação no trabalho.

Aos colegas do grupo de estampagem pelo apoio, incentivo, discussões (científicas) e pelas valiosas sugestões e observações.

Aos laboratórios LACER, LAFUM, LAMEF, LS&TC e de Usinagem da UFRGS pelo apoio logístico para preparação e análise do material estudado, bem como seus professores e colaboradores.

Ao Prof. Dr. Ivan Guerra Machado por esclarecer alguns tópicos do trabalho.

Ao Prof. Dr. Jaime Alvares Spim pelas dicas e ajuda prestada.

Ao CNPq pelo apoio financeiro recebido.

À Volkswagen do Brasil, GESTAMP, METAL BAGES, Rio Negro, Galvasud pela doação do material e a possibilidade de visita a suas unidades.

Aos funcionários da oficina do Centro de Tecnologia pela ajuda técnica.

À Jah por suportar alguns momentos difíceis e de reflexão.

E a todas as outras pessoas, amigos, professores que me incentivaram e ajudaram na conclusão desta etapa.

“O teu espírito é o verdadeiro escudo”
Morihei Ueshiba

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	v
Sumário.....	vi
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas.....	xi
Lista de Símbolos.....	xii
Resumo.....	xiv
Abstract.....	xv
1. Introdução.....	16
2. Revisão Bibliográfica.....	19
2.1 Tailored Welded Blanks.....	19
2.1.1 Cuidados Exigidos na Fabricação de Tailored Welded Blanks.....	22
2.1.2 Outras Aplicações ao uso de Tailored Welded Blanks.....	23
2.2 Tailored Rolled Blanks.....	23
2.2.1 Aplicação de Tailored Rolled Blanks.....	24
2.3 Patchwork.....	26
2.3.1 Aplicação Industrial da Técnica.....	28
2.3.2 Vantagens da Técnica Patchwork.....	28
3. Conformabilidade no Processo de Estampagem Profunda.....	30
4. Métodos e Testes para Avaliação das Propriedades Mecânicas de Chapas.....	35
4.3 Ensaio de Tração.....	35
4.2 Ensaio Erichsen.....	40
4.3 Ensaio sob Pressão Hidráulica (Bulge Teste)	41
4.4 Ensaio Nakajima.....	42
4.5 Ensaio Marciniak.....	43
5. Análise da Conformabilidade de Chapas Através da Curva Limite de Conformação.....	44
5.1 Curva Limite de Conformação.....	44
5.2 Curva Limite de Conformação Aplicada a Tailored Welded Blank.....	46
6. Procedimentos Experimentais.....	49
6.1 Material Base.....	49

6.2 Processo de Soldagem.....	50
6.3 Corpos de Prova.....	50
6.4 Marcação da grade nos corpos de prova.....	52
6.5 Método Eletrolítico.....	52
6.6 Medição das deformações principais φ_1 e φ_2	52
7. Resultados Experimentais.....	57
7.1 Composição Química.....	57
7.2 Propriedades Mecânicas.....	57
7.3 Análise da Junta Soldada.....	63
7.4 Avaliação da conformabilidade através da CLC.....	70
7.4.1 Metodologia de ensaio.....	71
8. Conclusões.....	78
9. Sugestões para trabalhos futuros.....	80
10. Referências Bibliográficas.....	81
11. Bibliografia Complementar.....	87
12. Anexo.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Desenho representativo da fabricação de um componente Tailored Welded Blank.....	19
Figura 2.2 – Lateral de automóvel utilizando Tailored Welded Blank. Estudo do projeto ULSAB.....	20
Figura 2.3 - Possíveis partes de uma carroceria que pode ser empregada Tailored Welded Blank.....	21
Figura 2.4 – Representação esquemática da Laminação Flexível.....	24
Figura 2.5 – Barra transversal de um componente automotivo produzida em material base obtido por laminação flexível.....	25
Figura 2.6 – Desenho esquemático de chapas Patchwork.....	26
Figura 2.7 – Estudo da geometria para reforço em painel interno de porta objetivando a redução de peso.....	27
Figura 2.8 - Coluna Longitudinal com um reforço Patchwork (fish shape). Reforço fixado com 3 pontos de solda.....	28
Figura 3.1- Ilustração representativa da variação da espessura de uma geratriz durante a estampagem de um copo hemisférico.....	31
Figura 3.2 – Parte de um copo estampado representando os diferentes estados de deformação e tensão.....	32
Figura 3.2a - Tipos de tensões no flange de um copo estampado.....	33
Figura 3.2b - Tipos de tensões na parede de um copo estampado.....	33
Figura 3.2c - Tipos de tensões no fundo de um copo estampado.....	34
Figura 4.1 – Geometria típica de um corpo de prova para ensaio de tração.....	36
Figura 4.2 – Esboço de um diagrama tensão-deformação convencional.....	37
Figura 4.3 – Elemento de volume antes e depois de uma deformação plástica.....	39
Figura 4.4 – Ensaio Erichsen.....	40
Figura 4.5 – Ensaio sob pressão hidráulica – Bulge Test.....	41
Figura 4.6 – Geometria dos corpos de prova proposto por Nakajima.....	42
Figura 4.7 – Desenho esquemático para o ensaio Marciniak.....	43
Figura 5.1 - Curva Limite de Conformação.....	46
Figura 5.2 – Cordão de solda localizado em uma região segura e crítica.....	47

Figura 5.3 – Comparação da Curva limite de Conformação para diferentes razões de espessura de uma junta soldada.....	48
Figura 6.1 – Família de corpo de prova para determinar a CLC pelo ensaio Nakajima modificado.....	51
Figura 6.2 – Usinagem de um corpo de prova para o levantamento da CLC de uma chapa soldada.....	51
Figura 6.3 – Ilustração da malha utilizada para leitura das deformações.....	52
Figura 6.4 – Modelo esquemático para gravação da malha na superfície da chapa.....	53
Figura 6.5a – Corpo de prova antes do ensaio Nakajima apresentando a malha sem deformação.....	54
Figura 6.5b – Corpo de prova deformado após o ensaio Nakajima apresentando a malha deformada.....	54
Figura 6.6 – Fita flexível utilizada para leitura das deformações.....	55
Figura 6.7 – Representação esquemática da CLC.....	55
Figura 7.1 – Gráfico tensão vs. deformação relativa para o material ST 05.....	58
Figura 7.2 – Gráfico tensão vs. deformação relativa para o material ZSTE 220 P.....	59
Figura 7.3 – Cp's na forma de TWB após ensaio de tração.....	61
Figura 7.4 – Ensaio de tração comparando o comportamento do MB e TWB para o aço ST 05.....	62
Figura 7.5 - Ensaio de tração comparando o comportamento do MB e TWB para o aço ZSTE 220 P.....	62
Figura 7.6 – Análise comparativa do LE e LR dos materiais em estudo na forma de MB e TWB.....	63
Figura 7.7 - Macrografia indicando a geometria do cordão de solda na seção transversal para o aço ST 05.Aumento 50X.....	64
Figura 7.8 – Macrografia indicando a geometria do cordão de solda na seção transversal para o aço ZSTE 220P.Aumento 50X.....	65
Figura 7.9 – Micrografia ótica do material ST 05 atacado com Nital 4% com aumento de 100X.....	66
Figura 7.10 – Micrografia ótica do material ZSTE 220 P atacado com Nital 4% com aumento de 100X.....	66
Figura 7.11 – Pontos de indentação para mensurar a microdureza do MB e da junta soldada do	

aço ST 05.....	67
Figura 7.12 – Pontos de indentação para mensurar a microdureza do MB e da junta soldada aço ZSTE 220P.....	68
Figura 7.13 – Gráfico representando a distribuição da dureza ao longo da seção transversal do aço ST 05.....	68
Figura 7.14 – Gráfico representando a distribuição da dureza ao longo da seção transversal do aço ZSTE 220P.....	69
Figura 7.15 – Corpos de prova após ensaio Nakajima utilizados para levantamento da CLC de TWB.....	71
Figura 7.16 – Centragem do corpo de prova antes do ensaio.....	72
Figura 7.17 – Conjunto ferramenta - material utilizado no ensaio com identificação dos itens.....	72
Figura 7.18 – Tipo de fissura nos corpos de prova do ensaio Nakajima modificado.....	73
Figura 7.19 – CLC correspondente ao material TWB do aço ST05.....	74
Figura 7.20 – CLC correspondente ao material TWB do aço ZSTE 220P.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação entre tecnologia de solda vs. parâmetros para chapas.....	22
Tabela 6.1 – Composição química dos materiais utilizados nos ensaios.....	49
Tabela 6.2 – Propriedades Mecânicas dos materiais utilizados nos ensaios.....	50
Tabela 7.1 – Composição química dos materiais em estudo levantadas em laboratório.....	57
Tabela 7.2 – Propriedades mecânicas do material ST 05 levantada em laboratório.....	60
Tabela 7.3 - Propriedades mecânicas do material ZSTE 220 P levantada em laboratório.....	60
Tabela 7.4 - Valores referentes a ϕ_1 para a ruptura que originaram as curvas da figura 7.19.....	76
Tabela 7.5 – Valores referentes a ϕ_2 para a ruptura que originaram as curvas das figuras 7.20.....	76

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

- Ag* – alongamento total, [%]
BH – aço “*Bake-Hardening*”
b_o – largura inicial, [mm]
b_f – largura final, [mm]
CLC – curva limite de conformação
C – constante do material, [-]
DP – aço “*Dual Phase*”
E – módulo de elasticidade, [MPa]
F – força instânea, [N]
h₀ – espessura inicial, [mm]
h_f – espessura final, [mm]
IF – aço “*Interstitial Free*”
k_f – tensão de escoamento real, [MPa]
l – comprimento instantâneo, [mm]
l₀ – comprimento inicial, [mm]
l₁ – medida do lado de maior deformação, [mm]
l₂ – medida do lado de menor deformação, [mm]
l_f – comprimento final, [mm]
 Δl – variação do comprimento da zona de referência, [mm]
LE – Limite de Escoamento, [N/mm²]
LACER – laboratório de cerâmica [-]
LAFUM – laboratório de fundição [-]
LAMEF – Laboratório de metalurgia física [-]
LdTM – laboratório de transformação mecânica [-]
LS&TC – laboratório de solda e técnicas conexas [-]
LR – Limite de Resistência, [N/mm²]
MB – metal base, [-]
N – número de pontos medidos, [-]
n – grau de encruamento, [-]
r – índice de anisotropia, [-]

Δr – anisotropia planar, [-]

r_{90}^0 – índice de anisotropia na direção perpendicular ao sentido de laminação, [-]

S_0 – área inicial da seção transversal, [mm²]

S_1 – seção deformada instantânea, [mm²]

TWB – tailored welded blank, [-]

ULSAB – ultralight steel auto body, [-]

ULSAC – ultralight steel auto closures, [-]

v_0 – velocidade de entrada, [mm/s]

v_1 – velocidade de saída, [mm/s]

ε - deformação relativa, [%]

ε_1 - deformação relativa na direção de maior deformação, [%]

ε_2 - deformação relativa na direção de menor deformação, [%]

φ - deformação verdadeira, [-]

φ_1 – deformação verdadeira principal maior, [-]

φ_2 - deformação verdadeira principal menor, [-]

φ_3 - deformação verdadeira principal na espessura, [-]

φ_l – deformação no comprimento [-]

φ_b - deformação na largura [-]

σ_c – tensão convencional, [MPa]

σ_n – tensão normal, [MPa]

σ_r – tensão radial, [MPa]

σ_t – tensão tangencial, [MPa]

ZAC – Zona Afetada pelo Calor, [-]

RESUMO

A união de chapas de diferentes materiais, espessuras e propriedades mecânicas formando uma geratriz para estampagem é uma estratégia que a indústria automobilística utiliza no desenvolvimento de estruturas leves. Uma delas chama-se Tailored Welded Blanks, onde duas ou mais chapas são unidas pelo processo de solda.

Dentro do contexto de estruturas leves é analisado neste trabalho o comportamento mecânico de duas diferentes chapas soldadas utilizadas pela indústria automobilística, formando uma única geratriz com diferentes razões de espessuras. Para isso, foram unidos os materiais ZSTE 220 P nas espessuras 1.5 e 0.8 mm e St 05 nas espessuras de 1.5 e 1.2 mm. O processo de junção utilizado para unir os materiais de diferentes espessuras foi solda a laser.

Os ensaios de fabricação utilizados para caracterizar o comportamento mecânico do material foram o ensaio de tração uniaxial e o ensaio Nakajima modificado. O ensaio de tração define as propriedades mecânicas e o ensaio Nakajima quantifica as deformações principais maiores e menores na superfície da chapa.

De posse destas deformações é possível construir as Curvas Limites de Conformação (CLC) de cada material. A maneira encontrada para simular estes estados de deformações foi utilizar 8 corpos de prova de mesmo comprimento, porém variando sua largura e o raio do entalhe correspondente. O uso de corpos de prova com diferentes larguras e raio de entalhe permite obter deformações que abrangem os campos referentes ao estiramento, deformação plana e embutimento profundo.

ABSTRACT

The joint of sheets of different materials, thickness and mechanical behaviour that form blanks for stamping processes is one of the strategies that the automotive industry uses in the development of light structures. One of them is called Tailored Welded Blanks, where two or more sheets are welded together.

In the context of light structures the mechanical behaviour of two different sheets welded together used by automotive industry, that form a single blank with different thickness ratio is analysed. For this ZSTE 220 P steel sheets of thickness 1,5 and 0,8 and ST 05 steel sheets of thickness 1,5 and 1,2 mm were joined together. The joining process used to get the different thickness materials together was laser welding.

The mechanical tests used to characterize the mechanical behaviour of the materials were the uniaxial tensile test and modified Nakajima test. The uniaxial tensile test defines the mechanical properties and the Nakajima test quantifies the major and minor strains in the surface of the sheets.

With this strain it's possible to draw the Forming Limit Diagram of each material. The way found to simulate these strain states was using eight specimens with the same length, varying width and the corresponding radius. The use of this kind of specimen with different length and width allows the determination of the strains that cover the field of stretching, plane strain and deep drawing.

1. Introdução

O setor automobilístico mundial nos últimos anos teve um crescimento de investimentos em novas tecnologias resultando no desenvolvimento e lançamento de novos modelos de veículos. Boa parte desses investimentos são aplicados em pesquisas e desenvolvimento de novos produtos, materiais e tecnologias de fabricação. Sendo assim, novos produtos com maior resistência, melhor conformabilidade e menores espessuras de chapas tem sido desenvolvidos visando em especial a redução do peso e o aumento da segurança dos veículos. Especificamente a pesquisa de novos métodos de fabricação levam simultaneamente a uma redução do tamanho do componente, melhoria na segurança do carro, boa estabilidade do veículo e uma eficiente rigidez na estrutura. A redução de peso é um aspecto fundamental para a indústria automobilística no desenvolvimento e fabricação de novos veículos.

Existem 3 setores na demanda de novos componentes que se completam respectivamente e se adequam as tendências atuais da melhor maneira possível: a construção de estruturas mais leves, materiais utilizados e combinação de materiais. Na construção de estruturas mais leves a tendência recai nos meios construtivos, visando uma boa capacidade da estrutura de suportar esforços excessivos e ter uma boa distribuição de forças e deformações. Materiais pesados devem ser substituídos por materiais leves e se possível mais resistentes. Na combinação de materiais, alia-se materiais de elevada rigidez com materiais de boa deformabilidade a frio, alcançando desta maneira uma alta resistência e uma melhoria na capacidade de carga reduzindo o peso final da estrutura./1.2/

A carroceria do automóvel representa cerca de 25 a 30% do peso total de um veículo de médio porte e a redução do seu peso vem a ser de grande importância. Existem inúmeras maneiras de reduzir o peso de um veículo, utilizando desde materiais poliméricos até ligas de magnésio, ligas de alumínio e outros tipos de ligas. Uma variante na maneira de reduzir o peso de um veículo, por exemplo, é unindo chapas de diferentes espessuras e comportamento mecânico, que implica na necessidade de melhorar as propriedades de resistência mecânica na deformabilidade a frio./1.3/

Em aplicações convencionais de estampagem de chapas para a indústria automobilística, algumas partes da estrutura são formadas de vários pequenos componentes. Cada pequeno componente é confeccionado individualmente e posteriormente unido, formando então o conjunto que dará forma à estrutura do automóvel. Esta metodologia tem como resultado um custo elevado na fabricação do ferramental e posterior montagem dos componentes unidos, aumentando a imprecisão na regulagem das ferramentas na linha de montagem da peça. Desta maneira viu-se a vantagem de unir peças únicas usando a tecnologia de solda.

Chapas soldadas representam um elemento tecnológico estrutural de formação de componentes/1.7/. Chapas finas que são unidas pelo processo de solda são chamadas de Tailored Welded Blanks e podem ser unidos diferentes materiais com diferentes espessuras, propriedades mecânicas e superfícies. TWB podem ser considerados como produtos semi-acabados para peças estampadas da indústria automobilística, reduzindo de um modo geral o peso final do veículo e aumentando a confiabilidade da estrutura.

Na Europa, no ano de 1979, a Volvo foi a pioneira no uso de chapas soldadas para a indústria automobilística usando o processo de solda por resistência. No Japão, desde 1986 a Toyota vem produzindo chapas soldadas/1.5/. No início de 1992, Tailored Welded Blanks (TWB) ou chapas unidas por solda foram usadas na indústria automobilística americana com o objetivo de consolidar partes, reduzir tolerâncias, custos, diminuir peso e aumentar a rigidez. Esta tecnologia teve uma rápida expansão: só no ano de 1997 foram projetados mais de 500 milhões de dólares em vendas de peças TWB /1.1/

O interesse neste tipo de produto foi muito grande e resultou em investimentos em pesquisas sobre novas classes de aços, novos conceitos e concepções do uso de Tailored Blanks. O programa desenvolvido nessa área é conhecido como ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body) e teve início em 1994 sob a liderança da IISI – International Iron and Steel Institute – com a PES - Porsche Engineering Service. O Programa reuniu 35 siderúrgicas de 18 países no desenvolvimento conceitual e efetivo na construção de uma carroceria (Body-in-White) visando resultados de redução de massa, aumento da rigidez em torção e rigidez em dobramento, e frequência natural de vibração. Conforme Taiss/1.6/, o programa é considerado a maior iniciativa de pesquisa colaborativa dos últimos tempos em qualquer ramo de atividade econômica. O projeto fornece valores comerciais para o uso de Tailored Blanks com custos

compatíveis a produção em escala comercial e viabiliza o aumento do seu uso na construção de automóveis. Portas, assoalhos, tetos, colunas e outras partes possuem uma montagem simples pelo uso de multi materiais e chapas pré cortadas O desempenho da conformabilidade de chapas soldadas através de solda Laser faz com que pesquisas sejam desenvolvidas na área da simulação do processo, pois desta maneira é alcançada e otimizada a posição da linha de solda, bem como a determinação da melhor geometria da ferramenta e seus parâmetros para o sucesso do processo.

Este trabalho tem por finalidade abordar o comportamento de chapas soldadas por solda linear a laser avaliando a sua conformabilidade através de ensaios de fabricação. A conformabilidade das chapas serão avaliadas através do ensaio Nakajima modificado (punção elipse rasa de 50 mm de raio), que define a Curva Limite Conformação. Serão determinadas as deformações principais maiores e menores das juntas soldadas a fim de caracterizar a CLC do material, permitindo posteriormente fornecer valores aos programas de simulação com a finalidade de comparar as curvas medidas e as simuladas. Serão ensaiados corpos de prova de geometrias variadas até a sua ruptura ou estrição, simulando os esforços com os quais as chapas são submetidas durante uma real conformação.

Através do ensaio de tração do material base foram determinadas as propriedades mecânicas intrínsecas dos materiais. Também foi realizado o ensaio de tração do material soldado e material base sem solda, e os resultados comparados posteriormente.

Para ilustrar, de um modo geral, a geometria do cordão de solda e a zona afetada pelo calor (ZAC), será feita uma análise metalográfica da zona de fusão da junta soldada. A análise de microdureza determina a variação da dureza do material ao longo do material base e da ZAC.

2. Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica deste trabalho tem por finalidade a abordagem de conceitos existentes sobre a demanda de construção de componentes mais leves dentro do setor automobilístico e do aprimoramento das propriedades mecânicas, utilizando para isso as diferentes tecnologias existentes para alcançar esse objetivo.

2.1 Tailored Welded Blank

O conceito de Tailored Welded Blanks (TWB) consiste de duas ou mais chapas planas que são unidas formando uma geratriz. Pode-se combinar chapas com diferentes propriedades mecânicas, espessura, acabamento superficial ou até mesmo diferentes materiais, conforme figura 2.1. A principal vantagem de usar TWB na indústria automobilística é de possuir materiais com características específicas (graus de estampabilidade) nas partes unidas, favorecendo a redução de peso e custos. /1.1/1.5/2.1/2.2/

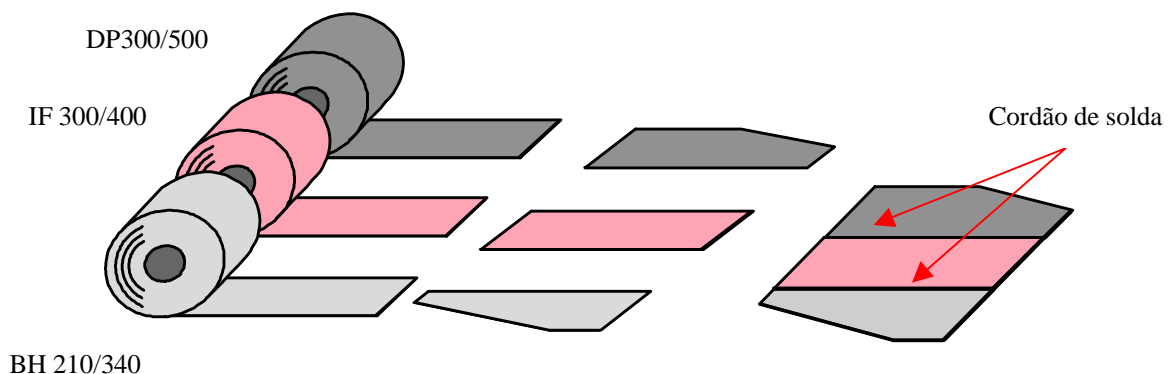


Figura 2.1- Desenho representativo da fabricação de um componente Tailored Welded Blank com diferentes materiais e o correspondente limite de resistência /2.3/.

Conforme Meiders /1.4/, combinar diferentes materiais numa única peça facilita o desenvolvimento de componentes com formas mais precisas, evitando o excesso de peso e propiciando assim um melhor desempenho da estrutura. Esse processo não só reduz o peso da parte final mas também elimina reforços estruturais nos veículos reduzindo custos de fabricação. Algumas partes da geratriz utilizada podem conter chapas de um material mais resistente com o objetivo de aumentar a rigidez, e no caso da chapa mais fina, a deformação localizada. Essa definição é melhor compreendida na figura 2.2, onde é possível visualizar a lateral de um automóvel produzida através da tecnologia de Tailored Welded Blanks, onde especifica-se a resistência mecânica e a espessura para cada um dos materiais utilizados.

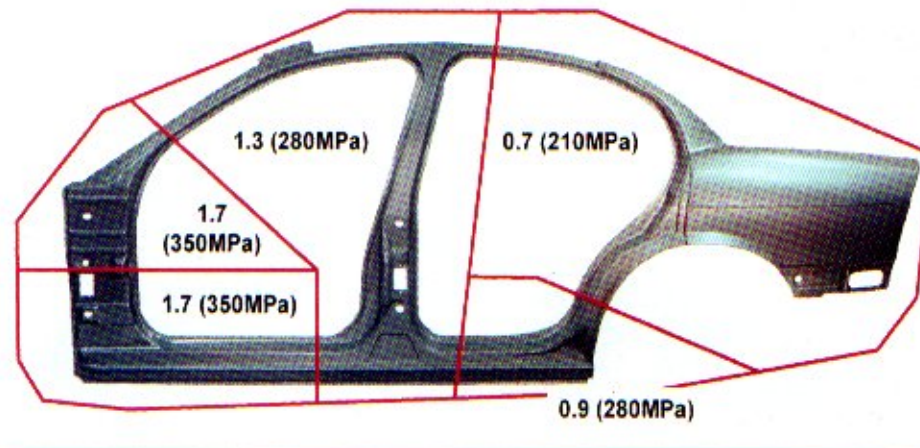


Figura 2.2- Lateral de um automóvel utilizando TWB. Estudo do projeto ULSAB. Estão indicadas chapas de diferentes espessuras e o correspondente limite de resistência /1.4/.

Jaroni e Dohr /2.1/ citam em seu trabalho outras vantagens atribuídas ao uso de TWB pela indústria automobilística com respeito ao processo, produto e design. Algumas das vantagens que podem ser enumeradas são:

- redução de tolerâncias das partes unidas, tal como a otimização do tamanho da chapa a ser utilizada no processo de estampagem;
- aumento no potencial de absorção de energia no caso de colisão;
- redução do nível de rebarba da peça conformada;
- redução do número de partes a serem montadas, resultando numa logística simplificada;
- otimização e redução de custos na parte do ferramental, incluindo matrizes e instalações;
- aumento no potencial de formar novos produtos com novas formas.

Mas para o processo também são atribuídas algumas desvantagens, como:

- altos investimentos em processos de solda e automação da linha de alimentação das chapas;
- cuidados de manuseio das chapas antes do processo de solda;
- alta exigência na qualidade de corte das chapas, o corte deve ser o mais linear possível;
- qualidade no cordão de solda.
- unir materiais com diferentes propriedades mecânicas. Cada material se comporta de uma maneira diferente quando conformado.

Schultz /2.4/ ilustra em seu trabalho as possíveis aplicações quanto ao uso de TWB na montagem de um automóvel. O autor cita a inovação e a dinâmica na montagem da carroceria de um automóvel atribuindo ao processo de dar uma pré forma nas partes que o compõem

antes da montagem do conjunto, utilizando diferentes combinações de geometria das chapas e posteriormente unido-as por solda laser conforme figura 2.3.

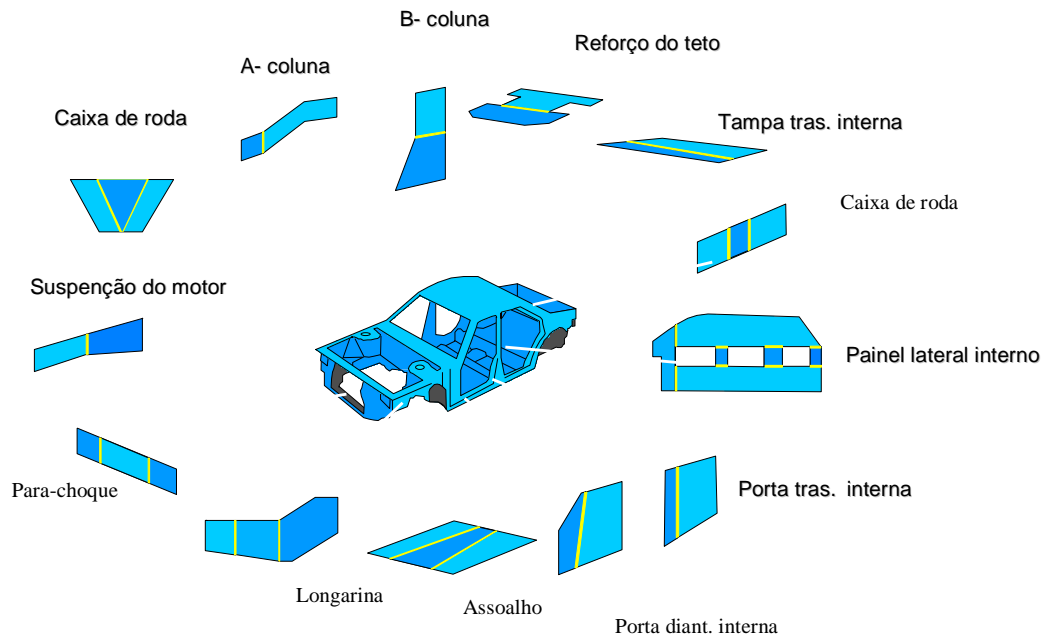


Figura 2.3- Possíveis partes de uma carroceria onde pode ser empregada Tailored Blank /2.4/.

Na concepção atual da indústria automobilística, a construção de estruturas mais leves possui uma relação de compromisso com a economia e ecologia. A utilização de materiais mais leves, porém mais resistentes, agrega os conceitos dos ambientalistas e das atuais normas ambientais, pois satisfaz os requisitos quanto ao desempenho ambiental de um veículo; reduzir a emissão de poluentes, o consumo de combustível e principalmente aumentar a viabilidade de reciclagem do material /1.2/.

Para a união das chapas, atualmente tem sido empregados os seguintes processos de soldagem /1.5/:

- a) solda a laser (laser welding);
- b) soldagem por esmagamento (smash weld);
- c) indução de alta frequência;
- d) feixe de elétrons.

Vários testes já foram realizados analisando a eficiência dos diferentes processos de soldagem, sendo o que apresentou melhor resultado foi solda a laser. Alguns dos pontos que são comparados entre os testes realizados foram: o retrabalho após a soldagem, a dificuldade de realizar solda não linear, a mudança de espessura da chapa e principalmente a preparação

da aresta da chapa, conforme tabela 2.1. Atualmente a solda a laser é o processo que se mostra mais adequado para confeccionar as chapas soldadas /2.5/.

Tabela 2.1- Comparação entre tecnologia de solda vs. Parâmetros para Chapas/2.5/.

	Arco Elétrico	Solda Esmagamento	CO ₂ -Laser	Indução alta frequência
Retrabalho	Não	Laminação frio	Não	necessário
Chapas Revestidas	é possível	em testes	em testes	é possível
Solda não linear	é possível	Não é possível	possível	Não
Mudança espessura	é possível	Não é possível	possível	Não
Integração Industrial	difícil	boa	boa	boa
Deformação	muito boa	boa	boa	difícil
Preparação arestas	precisa	média	precisa	fácil

2.1.1 Cuidados exigidos na fabricação de TWB

Um dos principais cuidados que se deve ter em relação à manufatura da geometria desejada é a qualidade do corte da chapa. Para garantir um processo livre de falhas deve-se buscar um corte mais linear e regular possível, a fim de reduzir pequenos espaços que se formam entre as chapas quando estas são unidas e alinhadas para a junção.

Conforme Dittlo et. al. /2.2/ estudos e testes comprovam que para garantir um processo livre de defeitos o tamanho destes espaços não deve exceder 10% da espessura da chapa mais fina a ser soldada. Alguns fornecedores de chapas soldadas adotam parâmetros de espaço conforme a indústria automobilística específica. Existem algumas tecnologias desenvolvidas a fim de garantir um mínimo de espaço entre as chapas. A empresa Soudronic /2.6/, desenvolveu um sistema onde um rolete imprime uma certa força de esmagamento na borda a ser soldada na chapa de maior espessura, resultando numa pequena deformação plástica e conseqüentemente no preenchimento de um possível espaço. A Thyssen Krupp /2.3/, utiliza roletes magnetizados com um certo ângulo no alinhamento a fim de pressionar uma aresta contra a outra eliminando o espaço existente entre as chapas. Estas tecnologias são caras e contribuem para um aumento de custos na fabricação de Tailored Welded Blanks.

2.1.2 Outras aplicações do uso de Tailored Welded Blanks

Com toda a vantagem e recursos do uso desta tecnologia, geralmente é comum a

transferência de tecnologia para outros setores que utilizam chapas para a manufatura de seus produtos. Na verdade, toda a indústria que utiliza chapas para manufatura de seus produtos de linha de produção, seja ela de embalagens, construção, eletrodomésticos, e que requer uma mudança de propriedade mecânica em uma determinada área do produto ou um melhor desempenho dele em função de algum componente relacionado a chapa, pode utilizar a tecnologia de união de chapas para aumentar a qualidade e reduzir peso do produto. O seu uso pode beneficiar indústrias que produzem máquina de lavar por exemplo, utilizando um aço de elevada resistência a corrosão somente nas partes mais vulneráveis localizados junto a portas, selos e puxadores, e nas outras partes utilizar um aço comum.

O uso de Tailored Blanks fora da indústria automobilística ainda está em um patamar muito baixo, isso se deve pela falta de conhecimento das indústrias metalúrgicas de seu potencial. O fato do custo elevado que se encontra atualmente o processo de solda a laser, o investimento em laboratórios equipados para controle de qualidade e a qualidade do corte da chapa limitam o avanço desta tecnologia para outras áreas /2.7/.

2.2 Tailored Rolled Blanks

Para a produção de peças com custos favoráveis, tendo ao mesmo tempo um produto final de boa qualidade, são desenvolvidos novos processos de fabricação que devem atender tais especificações. Com isso, busca-se cada vez mais uma melhora na qualidade das peças, e ao mesmo tempo a redução de peso. Sendo assim, podemos citar materiais de elevada resistência mecânica, novas estruturas de chapas (Tailored Blanks) e novos meios de construção da carroceria (Space-Frame). Neste âmbito é incluída a laminação flexível, chamada também de Tailored Rolled Blanks.

Laminação flexível de chapas finas caracteriza um método de fabricação que parte do princípio da produção de chapas onde há uma mudança de posição constante e programada do rolo que exerce compressão nas chapas ou perfis de espessura definida anteriormente durante o processo de laminação contínua. Tal processo já foi discutido no final do século XIX por Max Mannesmann, em que ele narrava a mudança de espessura de barras e perfis por diferentes variantes no processo/1.2/.

O fundamento para a laminação flexível é a representação do processo de laminação com o espaço móvel entre os rolos. Durante o processo de laminação há um espaçamento

entre os rolos laminadores por um dispositivo de regulação de altura, onde o perfil da espessura da chapa é modificado na direção do comprimento. Após concluído esta etapa do processo, o perfil de chapa laminado é conhecido como Tailor Rolled Blank, ou simplesmente perfil (Fig. 2.4).

A produção de perfis em somente um passo na laminação contribui sensivelmente para uma elevado potencial de economia na produção de chapas. Estudos em laboratórios de pesquisas concluem que chapas produzidas através da laminação flexível podem ser deformadas através de estampagem profunda ou Hidroconformação. /1.2/

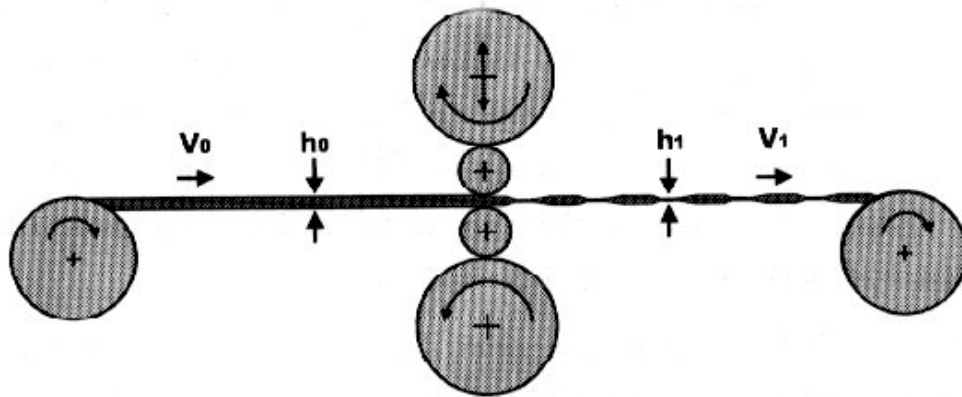


Fig 2.4 – Representação esquemática da laminação flexível /1.2/

2.2.1 Aplicação dos Tailored Rolled Blanks

Apesar da possibilidade de aplicação da laminação flexível, esta não representa uma substituição das chapas soldadas, conhecidas como Tailored Welded Blanks (TWB), pois não é possível a construção de partes ou estruturas com diferentes combinações de materiais (aço BH com aço TRIP), pois a mudança da espessura da chapa é sucedida somente no lado transversal da direção de laminação. A laminação flexível representa mais um suplemento, já que aqui a técnica de fabricação de chapas laminadas com diferentes espessuras não deve ser de custos elevados em função da escala de produção.

Sendo assim, verifica-se alguma diferença da laminação flexível para o TWB. Na laminação flexível a mudança na espessura da chapa é de ação progressiva caracterizando um processo não estacionário. Consequentemente não há uma mudança brusca na espessura da chapa, com isso não existe falhas na direção de laminação. Este comportamento corresponde

no decorrer da mudança de espessura da chapa à ausência de picos de tensão. Outra variante para este comportamento é à ausência da influência térmica que ocorre no processo de soldagem para a manufatura dos TWB's, onde ocorre uma mudança na microestrutura do material na área próxima ao cordão de solda. Esta nova tecnologia de laminação pode ser usada para produzir chapas com espessuras variadas em um mesmo perfil sem que para isso seja usado qualquer tipo de método de união de chapas (figura 2.5). Ao material pode-se atribuir um aumento da deformabilidade e uma proteção maior contra corrosão pela ausência do um cordão de solda /2.9/.

O processo permite uma exata adaptação do local na espessura da chapa para uma determinada solicitação de esforço. Nos últimos anos a Indústria automobilística tem desenvolvido a construção de componentes com estruturas mais leves, sendo a laminação flexível uma alternativa. Vários componentes automotivos tem sido produzidos na forma de protótipos, provando as vantagens de usar novos métodos e processos na laminação de chapas /2.8/. Tais resultados mostram uma redução de cerca de 25% do peso de um componente produzido por laminação flexível, quando comparado com um componente que foi produzido com chapa de espessura uniforme.

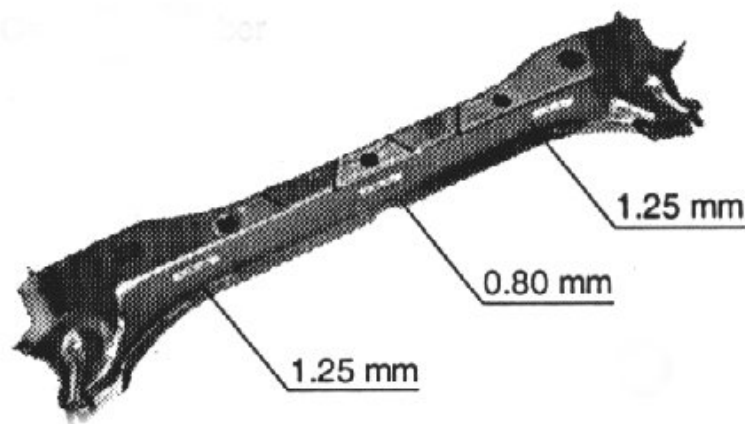


Fig.2.5- Barra transversal de um componente automotivo produzido por laminação flexível /2.2/.

Durante a laminação flexível, na zona laminada verifica-se um aumento de tensão na seção da área que foi reduzida. A redução de espessura no processo de laminação significa uma grande deformação, e conseqüentemente um encruamento localizado no material. Para anular este endurecimento, já que chapas produzidas por laminação flexível requerem boa flexibilidade, o material deve ser submetido a um recozimento em forno contínuo para alívio

de tensões. Em caso onde não é necessário uma boa deformabilidade, este recozimento pode ser eliminado, gerando uma redução de custos. Um grande gradiente de espessura e/ou um baixo coeficiente de endurecimento enfraquece a parte mais fina da chapa provocando falhas como “necking” (pescoçamento) e fratura na zona de menor espessura. Em contrapartida, um menor gradiente de espessura e/ou um grande coeficiente de encruamento fortalece a zona de menor espessura, com isso na parte mais grossa da chapa é onde iniciará por primeiro a deformação, e a capacidade de carga na zona de deformação se espalha para as seções mais finas da chapa /1.2/2.9/2.10/.

2.3 Patchwork

O conceito de “Patchwork” consiste da sobreposição de chapas com o objetivo de aumentar a resistência na área onde é necessário um reforço estrutural no local exato de sua junção com a chapa de base, conforme figura 2.6. Ambas as chapas são unidas por diferentes maneiras antes do processo de conformação, tais como: junção por adesivo, junção por solda ponto, junção mecânica por rebite ou também pela combinação destas formas de junção permitindo a conformação do conjunto, garantindo o aspecto de funcionalidade deste reforço /2.14/.

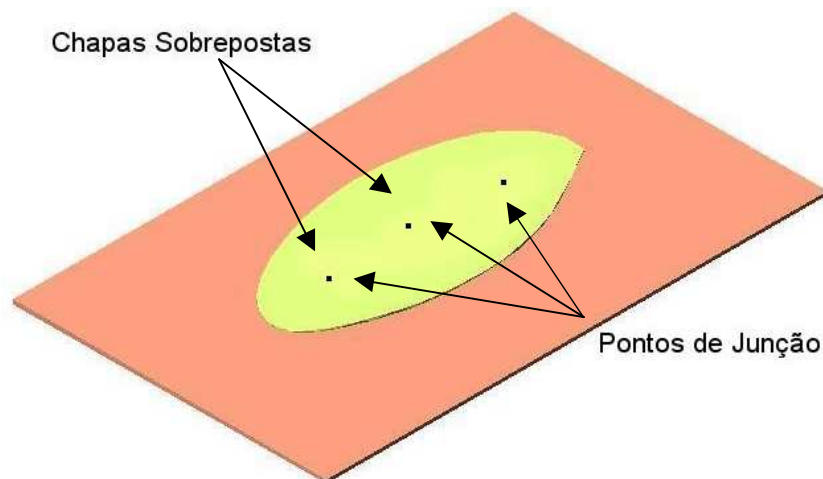


Figura 2.6 Desenho esquemático de chapas Patchwork.

O emprego de processos de junção mecânica para confecção de Patchwork tem a vantagem de não gerar a formação de ZAC em torno da junção, o que permite o emprego de múltiplas chapas de aço galvanizadas, desde que não se ultrapasse o limite de espessura total de 4mm, pois desta maneira a união das chapas ficaria comprometida. O formato de chapas “Patchwork” possui uma flexibilidade maior e geralmente é menos custoso do que um

processo de junção a laser. Os principais questionamentos quanto ao uso desta tecnologia ficam em torno da sua estampabilidade, fadiga e desempenho estrutural. Com chapas “patch” o desempenho estrutural das multi “camadas” deve ser considerada pela maneira como foi feita a união das chapas, se por solda ponto, adesivos ou outra tecnologia. A vantagem do uso desta tecnologia é a formação de peças múltiplas numa mesma matriz, onde o ajuste entre o reforço e a chapa maior é excelente.

Segundo a tecnologia de junção de chapas de diferentes materiais e espessuras visando a otimização do balanço resistência/peso, as operações de soldagem não linear abrem um novo leque de possibilidades visando a redução de peso, com soluções de baixo custo que venham a estimular os projetistas e estilistas a adotá-las em seus projetos. As montagens feitas com chapas de múltiplas espessuras e materiais vêm de encontro a esta necessidade /2.13/.

Conforme Prange /2.11/ uma outra maneira de tentar reduzir o peso de um componente é explorando a forma geométrica da chapa. As diferentes alternativas de geometria das chapas estudadas conduzem a uma redução de até 34% no peso total do componente. (figura 2.7).

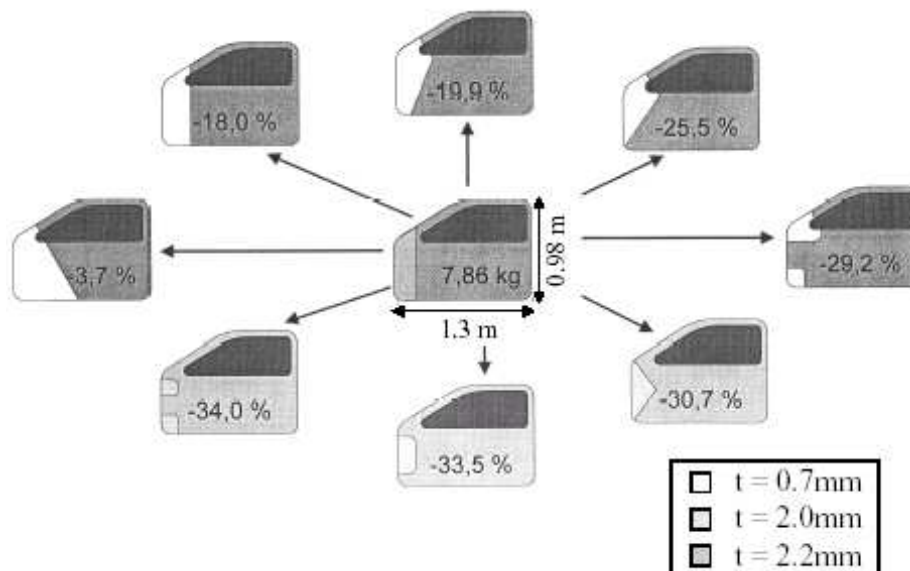


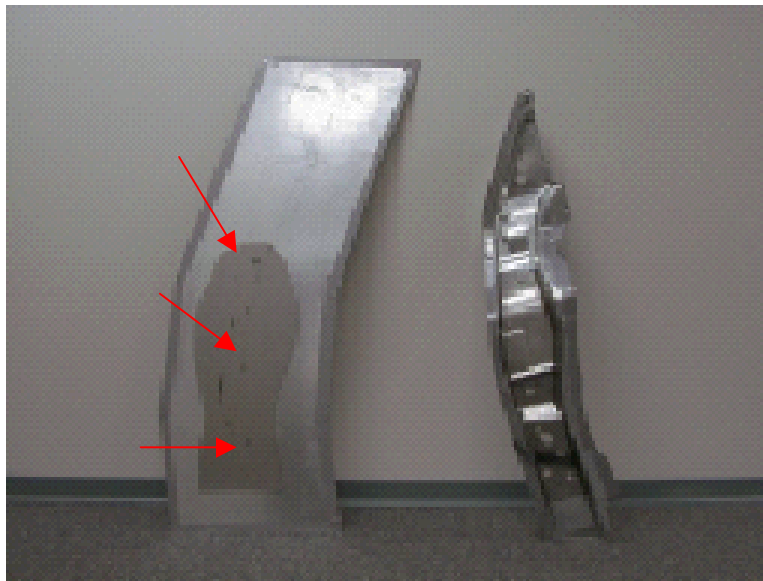
Figura 2.7 - Estudo da geometria para reforço em painel interno de porta objetivando redução de peso /2.11/

2.3.1 Aplicação Industrial da Técnica

Uma peça produzida com técnica “patch” pode ser visualizado na figura 2.8. O reforço não deve exceder o tamanho da chapa maior ou chapa base. Outra observação que deve ser

feita é que ambas as chapas são unidas usando 2 ou 3 pontos de soldagem e a localização destes pontos deverá ser na área plana da parte soldada. Não se consegue submeter deformações nas áreas onde se localiza o ponto de soldagem, pois há o perigo de rompimento da junta. Se necessário pontos adicionais de soldagem ou um processo de resoldagem, pode ser feito mais tarde na montagem da peça.

Um exemplo onde é aplicado o reforço localizado em uma estrutura é na parte inferior dos trilhos do assento, pois visa aumentar a inércia dos mesmos e a maximização da segurança prevenindo o seu arrancamento durante uma eventual colisão. Este reforço é executado através de uma junção mecânica ou solda ponto no “patch” situado sobre a chapa antes do processo de conformação. Este estudo foi realizado dentro do âmbito do projeto ULSAC, onde também estes esforços existem nas portas laterais, no capô dianteiro e traseiro e na porta traseira dos veículos “hatchback” /2.12/.



Figuras 2.8- Coluna longitudinal com um reforço de patchwork (fish shape). Patchwork fixada com 3 pontos de solda./2.5/

2.3.2 Vantagens da Técnica Patchwork

No processo de união não linear de chapas pode-se enumerar as seguintes vantagens de se empregar “Patch Tailored Blanks”:

- a) redução dos custos necessários pela não necessidade de equipamentos sofisticados para preparação das juntas;
- b) redução de peso e do custo de material devido a otimização do perfil da chapa de reforço agregada à chapa de base;

- c) sem restrições com relação ao perfil da chapa de reforço, significando otimização do perfil e material empregado;
- d) possibilidade de combinação de técnica de junção envolvendo TWB com soldas lineares feita por feixe laser e técnicas de “patchwork” em uma mesma montagem;
- e) possibilidade de usar sobra de bobina de materiais empregados para processamento de outras peças, para emprego na confecção das geometrias de reforço;
- f) grande flexibilidade na fase de “Try-out” para mudar posição e número pontos de junção seja por solda ponto ou por “clinchng”, permitindo liberdade no projeto.

Em relação à abordagem convencional de junção não existe a necessidade de flanges para fazer os pontos de união, seja por solda ponto ou por junção mecânica, e ainda há a possibilidade de localizar os pontos de junção em locais de difícil acesso, se comparando com a abordagem convencional. A técnica “Patchwork” vem a ser uma outra maneira de se construir componentes com diferentes espessuras visando a otimização do uso de materiais e a redução de peso de um componente.

3. Conformabilidade no Processo de Estampagem Profunda

Conformabilidade é definida como a capacidade de uma chapa de metal de ser deformada por um processo específico de conformação desde a sua forma original até a forma desejada sem que haja falhas durante o processo. Para qualquer estudo de deformabilidade deve-se dar uma atenção especial a três fatores simultaneamente: Material, Processo e Forma, pois eles interagem entre si em um processo de conformação /3.1/. Durante o processo de conformação de uma chapa têm-se condições variadas do comportamento do material quanto a sua condição de escoamento. As solicitações que podem aparecer são de embutimento profundo, tração uniaxial, deformação plana e estiramento biaxial. Nestes tipos de solicitações são alcançadas faixas de deformações maiores e menores, conhecidas como ϕ_1 e ϕ_2 .

Basicamente em um processo de estampagem profunda existem quatro regiões com deformações distintas, a saber:

- a parte plana do fundo de um copo estampado cuja a espessura final é praticamente a mesma da geratriz, quase não apresentando deformação;
- o raio do fundo do copo onde ocorre significativa deformação na espessura;
- o raio da matriz onde se verifica um aumento da espessura pelas diferenças entre as tensões de tração, compressão e a componente tangencial;
- as paredes laterais da peça onde ocorre um decréscimo gradual da espessura até o fundo da peça.

A figura 3.1 ilustra de forma esquemática a variação da espessura da chapa de um aço inox 304 de espessura inicial de 1,44 mm durante um processo de embutimento em função da deformação que a geratriz é submetida. Na figura está relacionada a dureza Rockwell correspondente ao ponto medido e a variação em porcentagem do aumento e/ou diminuição da espessura do material.

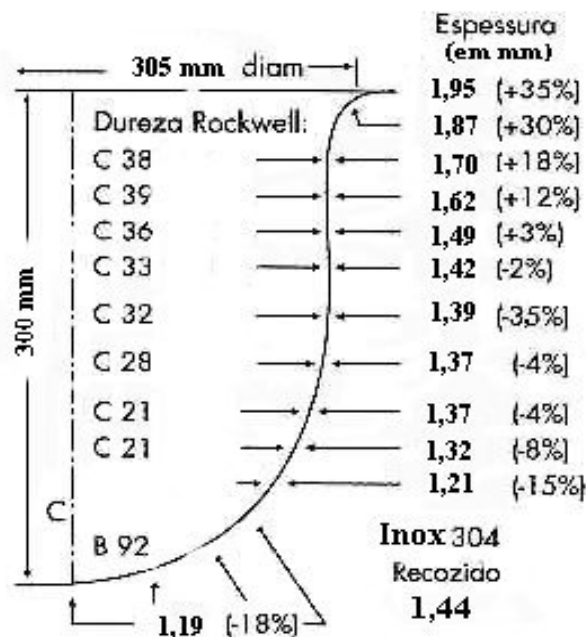


Figura 3.1- Ilustração representativa da variação da espessura de uma geratriz durante a estampagem de um copo hemisférico/3.5/.

A estampagem de chapas é um processo muito utilizado na indústria metal mecânica. É um processo que produz componentes das mais variadas formas sem necessitar na maioria das vezes de um longo processo de manufatura. O processo de estampagem consiste em fazer com que uma chapa plana escoe para o interior de uma ferramenta pela aplicação de uma força através de um punção/3.2/.

Na conformação de chapas vários elementos atuam de forma decisiva no comportamento do material quando este é deformado. Estes elementos são identificados como sendo o atrito, as tensões de tração e compressão, tamanho da geratriz, raio das ferramentas e matrizes. No momento que estes elementos estão atuando na chapa durante um processo de estampagem ocorre o aparecimento de um campo variado de tensões.

Conforme Garcia et al. /3.3/ ao longo de um processo de estampagem a geratriz é submetida a diferentes tipos de estado de tensões que são responsáveis pela distribuição do metal na matriz, podendo variar desde a estampagem profunda ao estiramento, até atingir o formato final.

Segundo Doege /3.4/ para estimar a capacidade de deformação de um material alguns ensaios mecânicos são aplicados, caracterizando o seu comportamento diante dos diferentes

tipos de deformações que ocorrem em uma estampagem. As partes interessantes para o estudo destes diferentes estados de tensão e deformação de um copo estampado são o flange, a parede lateral e o fundo. A figura 3.2 é uma ilustração representativa de uma parte de um copo estampado, onde estão assinalados os elementos *a*, *b* e *c*, de uma geratriz que sofreu um processo de estampagem.

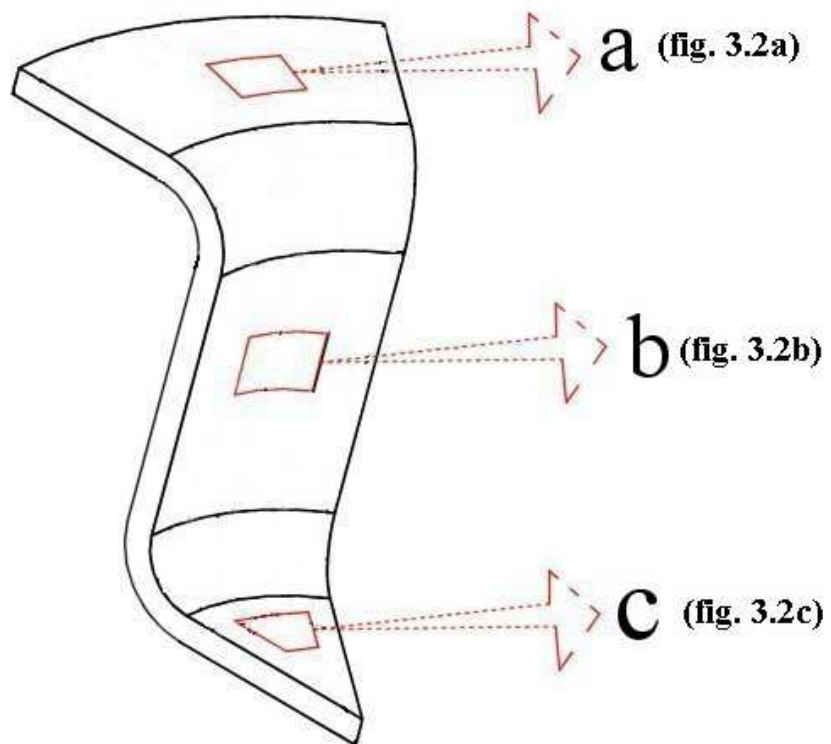


Figura 3.2- Parte de um copo estampado representando os diferentes estados de deformação e tensão.

Dependendo da região de uma geratriz, o estado de tensões que ocorre em um processo de estampagem é multi axial. Sendo assim é natural que apareçam também diferentes estados de deformações. No exemplo da estampagem de um copo cilíndrico, na região do flange ocorre o que é chamado de estampagem profunda, devido a existência de um campo de tensões trativas (σ_r) e compressivas (σ_t), que ocasiona um aumento da espessura da chapa, conforme figura 3.2a /3.2/.

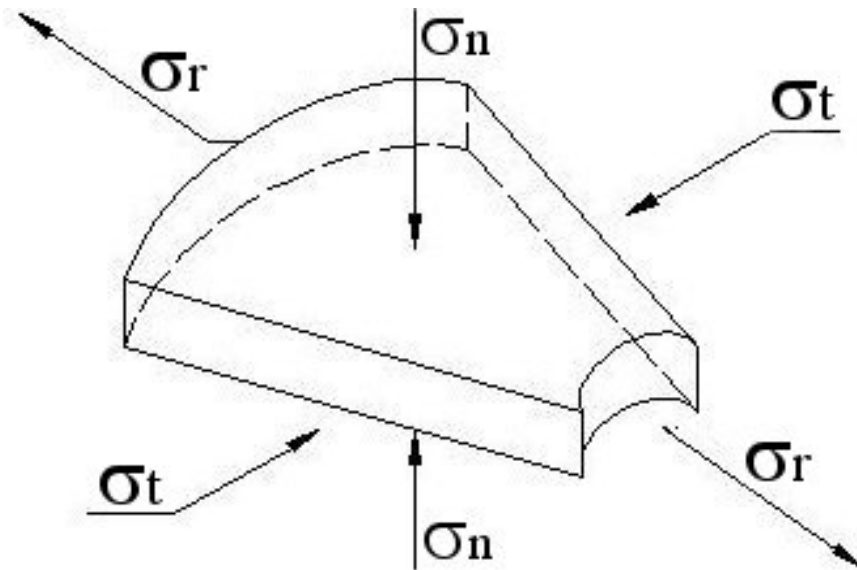


Figura 3.2a-Tipos de tensões no flange de um copo estampado.

À medida que o processo de estampagem avança, o metal escoá em direção a matriz, conseqüentemente ele é dobrado e depois endireitado. Na parede plana do copo verifica-se o que é chamado de tensão plana responsável pela homogeneização da espessura, que caracteriza um estiramento uniforme, onde ocorre uma diminuição da espessura do material devido ao surgimento de tensões trativas radiais e transversais, conforme figura 3.2b /3.3/.

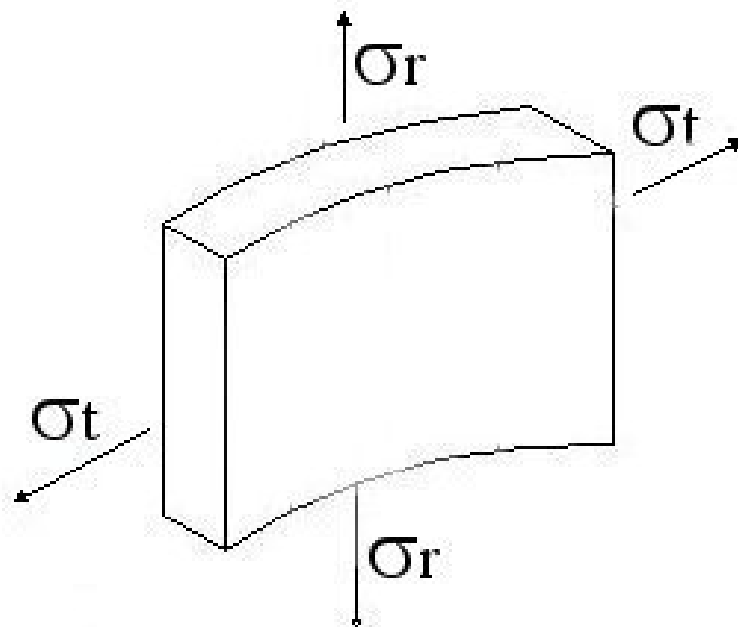


Figura 3.2b - Tipos de tensões na parede de um copo estampado.

No fundo plano do copo o tipo de sollicitação que ocorre é de um estiramento biaxial (radial), mas com uma redução mínima da espessura original do material, devido as níveis de tensões serem menores /3.2/. A figura 3.2c ilustra este comportamento do material.

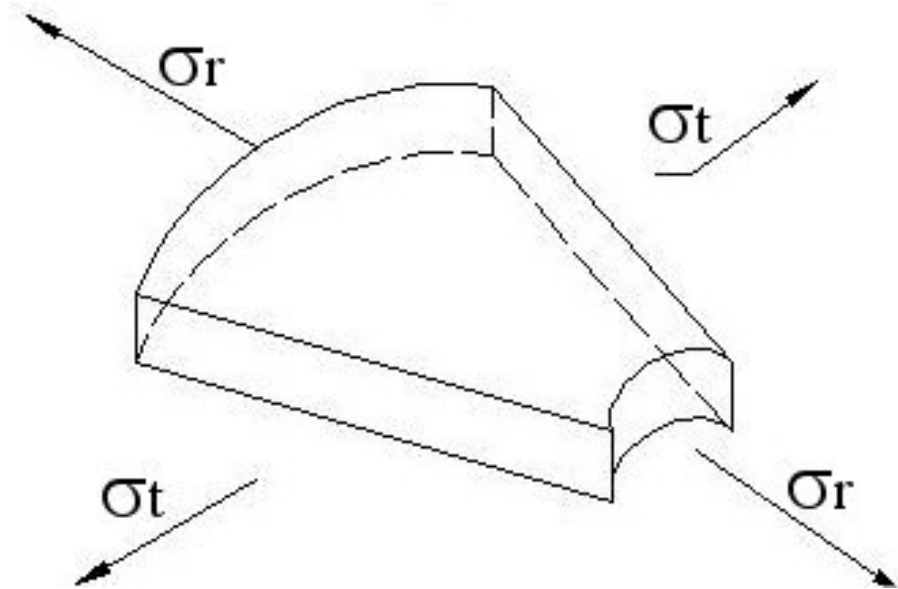


Figura 3.2c - Tipos de tensões no fundo de um copo estampado.

4. Métodos e Testes para Avaliação das Propriedades Mecânicas de Chapas

Conforme Lange /4.1/, para uma seleção correta e segura do material a ser utilizado na manufatura de peças estampadas é de suma importância o conhecimento do seu comportamento mecânico diante de solicitações severas no processo de estampagem. Sendo assim, tornou-se necessário o estudo do comportamento mecânico do material quanto a sua estampabilidade, identificando mais rápida e precisamente onde podem ocorrer falhas no processo. Somente através de ensaios (tração, metalográfico, químico) é que se consegue determinar as propriedades mecânicas dos materiais /4.2/4.7/.

Com o rápido crescimento das indústrias de estampagem e o surgimento de novas fábricas de automóveis, tais segmentos foram impulsionados para um desenvolvimento nos processos de estampagem evitando desta maneira o método “tentativa e erro”. Tal método tem um reflexo direto no custo de fabricação, pois dispensa-se mais energia e matéria prima até a obtenção do produto final livre de falhas.

Segundo Renó /4.3/ a interação entre o material e a ferramenta tem-se procurado simular em laboratório através de ensaios simulativos como Erichsen, Swift e expansão hidráulica (bulge test). Cada um destes ensaios representa um caso determinado de conformação de chapa, sendo as condições de ensaio especificadas com o objetivo de manter as condições de reprodutividade do processo de estampagem.

4.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração pode ser classificado como um ensaio mecânico de utilização universal. É usado tanto para determinar as propriedades mecânicas essenciais ao projeto, como no controle de qualidade dos materiais quer quando ainda na forma de matéria-prima, quer quando já na forma de produto acabado.

Este é um ensaio realizado conforme as normas DIN 10002 e NBR-6152, sem atrito e de tração uniaxial realizado numa máquina universal de ensaio de tração, onde o corpo de prova é fixo por garras e o movimento se dá na direção vertical. O ensaio de tração é realizado com velocidade constante e consiste em submeter um corpo de prova a uma carga de tração continuamente crescente até que se atinja a fratura. Durante o ensaio registra-se simultaneamente a variação do comprimento de referência através de extensômetros (por

exemplo, do tipo indutivo ou resistivo) aplicados diretamente sobre o corpo de prova, em função da carga instantânea de tração (F) presente durante o ensaio. A figura 4.1 mostra uma geometria característica de um corpo de prova para o ensaio de tração.

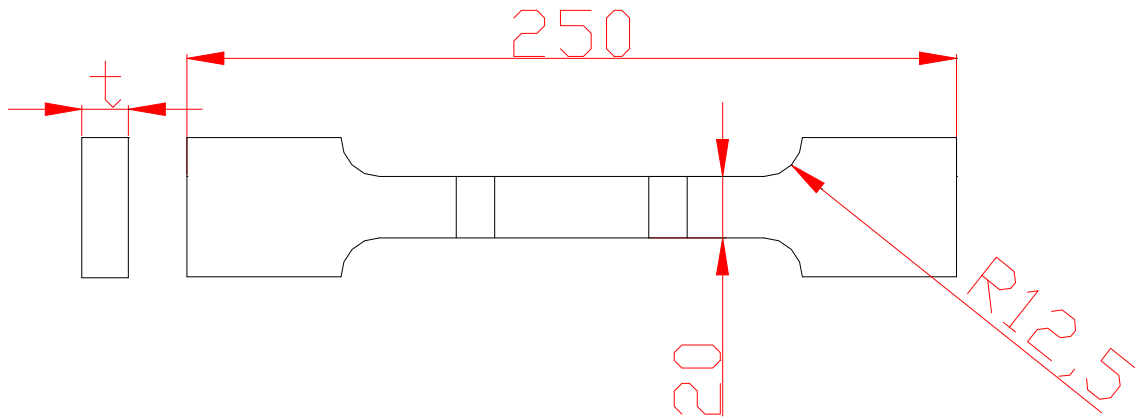


Figura 4.1 – Geometria típica de um corpo de prova para ensaio de tração. Unidades em mm.

O levantamento do diagrama tensão convencional (σ_c) vs. deformação relativa (ϵ) constitui o resultado do ensaio realizado. A tensão convencional ou nominal (σ_c) é obtida dividindo-se a carga instantânea (F) pela área inicial da seção transversal (S_0) do corpo de prova, ou seja:

$$\sigma_c = \frac{F}{S_0} \quad (1)$$

A deformação relativa é a extensão linear média que se obtém dividindo a variação de comprimento da zona de referência, Δl , pelo respectivo comprimento inicial, l_0 .

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (2)$$

No diagrama da figura 4.2 é apresentada a curva típica de um material dúctil. Da sua análise pode-se observar a região de comportamento elástico (OA), região de escoamento das discordâncias (AB), região de encruamento uniforme (BU) e região de escoamento não uniforme (UF). O ensaio convencional permite determinar através do diagrama $\sigma \times \epsilon$ algumas

propriedades mecânicas do material, como: Módulo de Elasticidade (E), Limite de Escoamento (LE), Limite de Resistência (LR) e grau de encruamento (n).

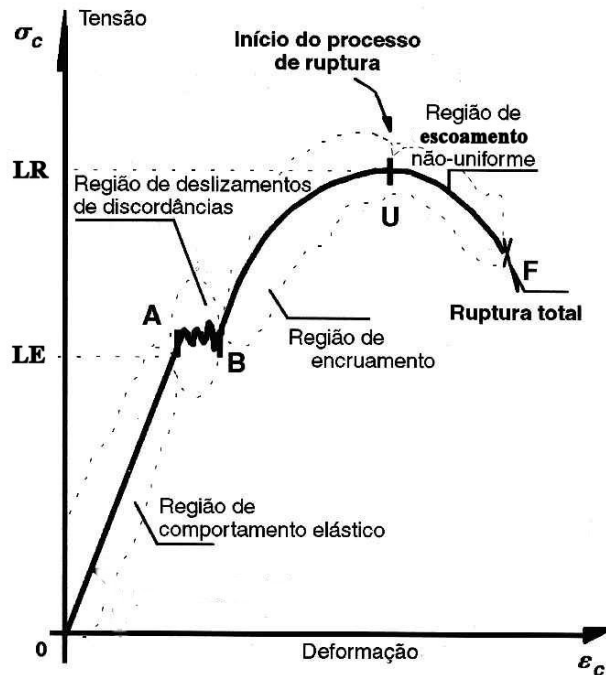


Figura 4.2 Esboço de um diagrama tensão-deformação convencional /3.3/.

O módulo de elasticidade mede a rigidez do material em relação a tensão e a deformação na zona elástica. O limite de escoamento marca a passagem do estado elástico para o plástico, caracterizando o movimento das discordâncias do material. O limite de resistência corresponde ao ponto de máxima carga atingida durante o ensaio. O grau de encruamento é um dado que caracteriza o comportamento do material, pois um material com alto valor de n , tem alto grau de conformabilidade, isto é, suporta uma maior quantidade de deformação uniforme em tração do que outro material com valor baixo de n .

Nos casos em que é necessário uma representação matemática do comportamento mecânico do material é usado a curva de escoamento real do material. Esta curva fornece valores da tensão de escoamento real (k_f) durante todo o processo de escoamento considerando o encruamento do material. Uma forma geral da representação matemática para a curva de escoamento verdadeira ou real é descrita pela equação de Hollomon:

$$k_f = C * \phi^n \tag{3}$$

Onde C é uma constante do material, o expoente n é o grau de encruamento que varia entre 0 e 1 e φ é a deformação verdadeira.

Uma maneira de calcular o valor da constante C de um dado material é aplicar o logarítmico na equação 3, a saber:

$$\log k_f = \log C + n \log \varphi \quad (4)$$

A curva de escoamento verdadeira ou real pode ser calculada usando os resultados do ensaio de tração convencional. A deformação verdadeira (φ) é dada pela integração do comprimento inicial (l_0) e instantânea (l):

$$\varphi = \int_{l_0}^l \frac{\Delta l}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (5)$$

e, portanto:

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (6)$$

Os valores da tensão de escoamento (k_f) são determinados em função da força instantânea pela seção deformada instantânea ou verdadeira S_1 . Portanto tem-se:

$$k_f = \frac{F}{S_1} \quad (7)$$

A seção verdadeira é calculada empregando a deformação relativa partindo da equação 2, logo:

$$S_1 = \frac{S_0}{1 + \varepsilon} \quad (8)$$

O grau de encruamento do material é determinado segundo a norma SEW 1125. Nesta norma o grau de encruamento é calculado usando a seguinte fórmula:

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N (\ln \varphi_{Li} * \ln k_{fi}) - (\sum_{i=1}^N \ln \varphi_{Li}) * (\sum_{i=1}^N \ln k_{fi})}{N \sum_{i=1}^N (\ln \varphi_{Li})^2 - (\sum_{i=1}^N \ln \varphi_{Li})^2} \quad (9)$$

Interessa aqui ressaltar que as equações (6) e (7) são aplicáveis somente na zona de deformação plástica uniforme. Na zona de deformação elástica, aplica-se as equações (1) e (2) correspondente até a tensão de escoamento.

A anisotropia de uma chapa é calculada conforme norma SEW 1126. Este fenômeno aparece por causa da orientação cristalográfica preferencial dos grãos do metal durante a laminação da chapa. Para descrever a anisotropia são usados os índices de anisotropia. Estes são definidos como a razão das deformações verdadeiras que ocorrem em um elemento de volume durante a deformação do mesmo, conforme figura 4.3.

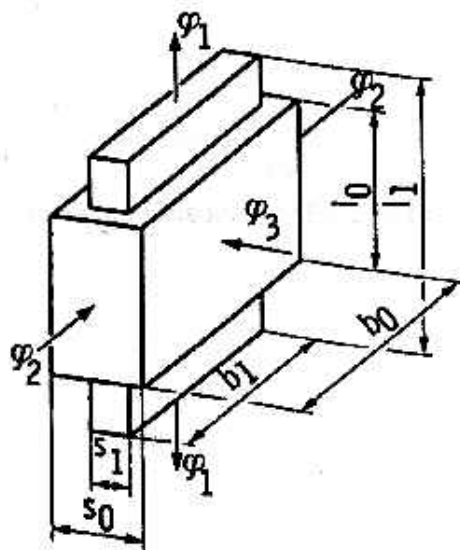


Figura 4.3 – Elemento de volume antes e depois de uma deformação plástica/4.4/.

Na prática é muito difícil medir a deformação na espessura (φ_3) de um corpo de prova. Para tal são avaliados a deformação no comprimento e na largura. Isso é possível devido ao volume do corpo de prova permanecer constante durante uma deformação plástica, conforme equação 10.

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (10)$$

Por isso o índice de anisotropia é calculado retirando corpos de prova nas três direções de laminação principais (0° , 45° , 90°). Logo o índice de anisotropia pode ser calculado pela razão das deformações reais da largura e da espessura definida da seguinte forma:

$$r = \frac{\varphi_2}{\varphi_3} = \frac{\ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right)}{\ln\left(\frac{S_1}{S_0}\right)} = \frac{\varphi_b}{-(\varphi_b + \varphi_l)} \quad (11)$$

A partir da razão de deformação nas três direções principais são calculados os valores da anisotropia média e planar, a saber:

$$r_m = \frac{1}{4}(r_{0^\circ} + 2 * r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (12)$$

e:

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ} \quad (13)$$

4.2 Ensaio Erichsen

Este ensaio caracteriza-se pela avaliação da ductilidade de chapas metálicas /3.3/. O esboço do ensaio e as dimensões características são determinadas conforme as normas DIN 50101, conforme figura 4.4. Segundo Garcia et. al. /3.3/, o ensaio consiste em um punção de cabeça esférica que avança sobre uma fina chapa metálica (geratriz), fixa em um sistema de prensa-chapas. O ensaio envolve estiramento biaxial, e o resultado é dado pelo avanço do punção sobre o metal até o instante que ocorre a fratura. Os resultados podem variar com a velocidade de avanço do punção, lubrificação e material utilizado .As chapas utilizadas podem ser circulares ou quadrados de 90 a 100mm de largura, com a espessura nominal variando de 0,2 a 2mm. O resultado do teste é o valor da altura do “copo” em milímetros. É um tipo de teste largamente usado na indústria metal/mecânica com a finalidade do controle de qualidade de chapas finas destinadas ao processo de estampagem.

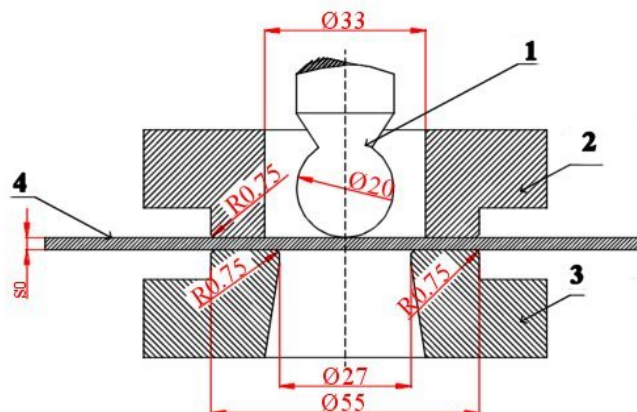


Figura 4.4 - Ensaio Erichsen, onde 1: Punção, 2: Prensa Chapa, 3: Matriz e 4: Chapa /4.4/

O ensaio Erichsen é largamente usado nos centros fornecedores de chapas soldadas como um teste rápido para conferir as propriedades homogêneas nas junções. O ensaio determina a relação ductilidade/tenacidade da mesma. Chegou-se a conclusão que, quando a relação do embutimento "Cordão de solda" X "Metal de base" ficar abaixo de 70% 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 /2.3/.

4.3 Ensaio sob Pressão Hidráulica (bulge test)

Este ensaio é indicado para o levantamento da curva limite de conformação de chapas finas e para obter informações sobre seu comportamento em processos de estiramento. Neste ensaio a chapa em forma de disco é fixada numa matriz em forma de um anel, de modo que não ocorra vazamento de óleo, conforme figura 4.5. Em seguida aumenta-se a pressão do óleo continuamente e, como conseqüência, se tem uma redução da espessura da chapa até sua ruptura. Na máquina há sensores de pressão e deslocamento para registrar tais valores como pressão do óleo e altura do abaulamento /4.4/.

O ensaio sob pressão hidráulica fornece informações sobre o comportamento da chapa sob tensão biaxial, não tendo influência de atrito. Outras características técnicas e causas de falhas na estampagem de chapas, como porosidade e inclusões podem ser determinadas através deste ensaio.

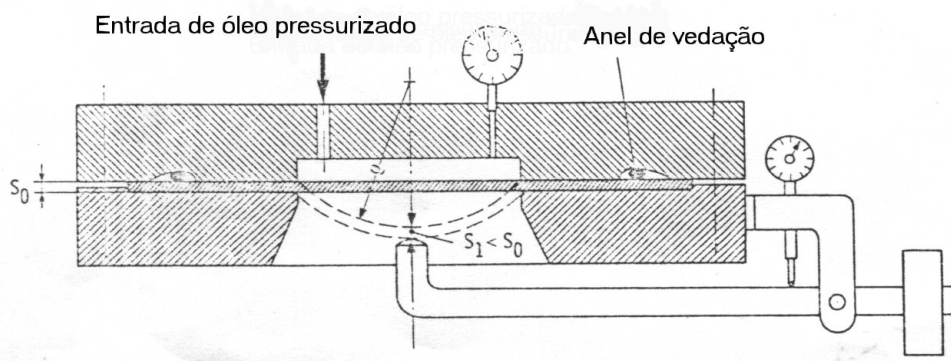


Figura 4.5 - Ensaio sob pressão hidráulica-Bulge test /4.5/.

4.4 Ensaio Nakajima

Na conformação dos metais pelo processo de estampagem ocorre de um modo geral um estado complexo de deformações no plano da chapa, indo desde o embutimento profundo ($\phi_1 = -\phi_2$), tração uniaxial ($\phi_1 = -2\phi_2$), deformação plana ($\phi_2 = 0$) e estiramento biaxial ($\phi_1 = \phi_2$). Nakajima /4.6/ observou que essas condições de deformação são de um estado uniaxial ou biaxial, dependendo do processo utilizado.

Com o objetivo de esclarecer os limites de conformação de uma chapa quando submetida a um estado complexo de deformação, Nakajima propôs um ensaio onde seriam combinados os diferentes estados de deformações oriundos dos ensaios de embutimento e estiramento (tração e “bulge test”) em um único ensaio variando somente a geometria dos corpos de prova, conforme figura 4.6.

Desta maneira o ensaio proposto por Nakajima permitiu percorrer com um mesmo ferramental e com um número menor de ensaios tecnológicos a mesma gama de deformações citadas anteriormente. Para cobrir um estado de deformação desejado, de modo que ele pudesse construir a curva limite de conformação de um material, o autor utilizou em seus ensaios geratrizes circulares como corpos de provas, alterando a largura dos mesmos. A forma geométrica do punção utilizado foi hemisférica de 100 mm de diâmetro /4.1/.

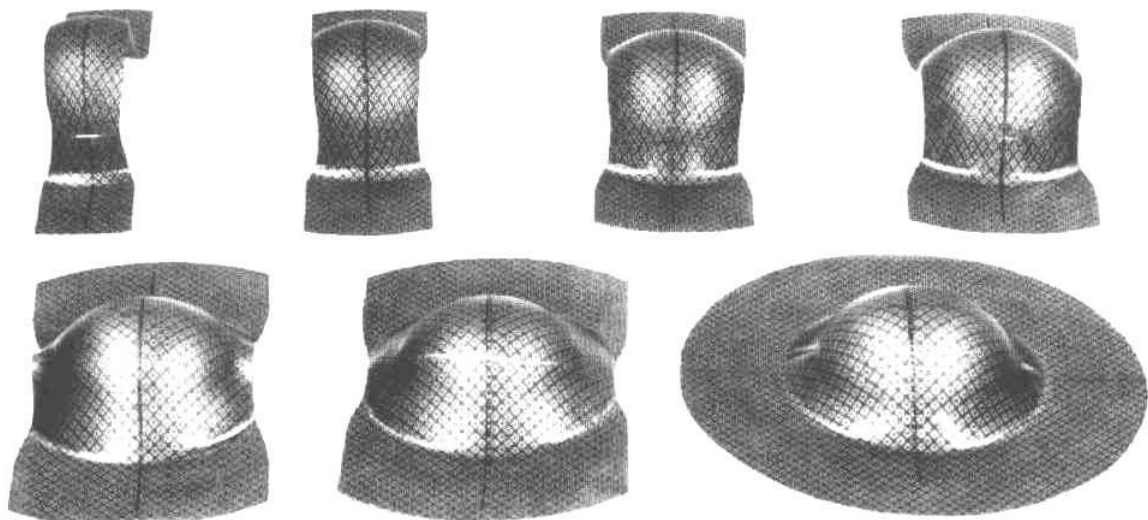


Fig 4.6 - Geometrias dos corpos de provas proposta por Nakajima após ensaio /4.1/

4.5 Ensaio Marciniak

Este ensaio consiste na conformação simultânea do corpo de prova e de um espaçador de poliuretano posicionado entre o punção e a chapa, eliminando desta forma o efeito desfavorável do atrito entre o punção e corpo de prova, permitindo desta maneira obter a fratura ou a estrição no fundo plano do corpo de prova deformado, conforme figura 4.7.

Inicialmente neste ensaio foram utilizados os corpos de prova do ensaio proposto por Nakajima, mas foi verificado que o material rompia no raio de curvatura da ferramenta devido ao atrito entre o punção e o corpo de prova. Por esse motivo Marciniak utilizou um espaçador de poliuretano a fim de evitar o colapso prematuro da chapa ensaiada. Os modelos de corpo de prova e do espaçador permitem obter toda a gama de deformações requeridas na obtenção da curva limite de conformação /4.3/.

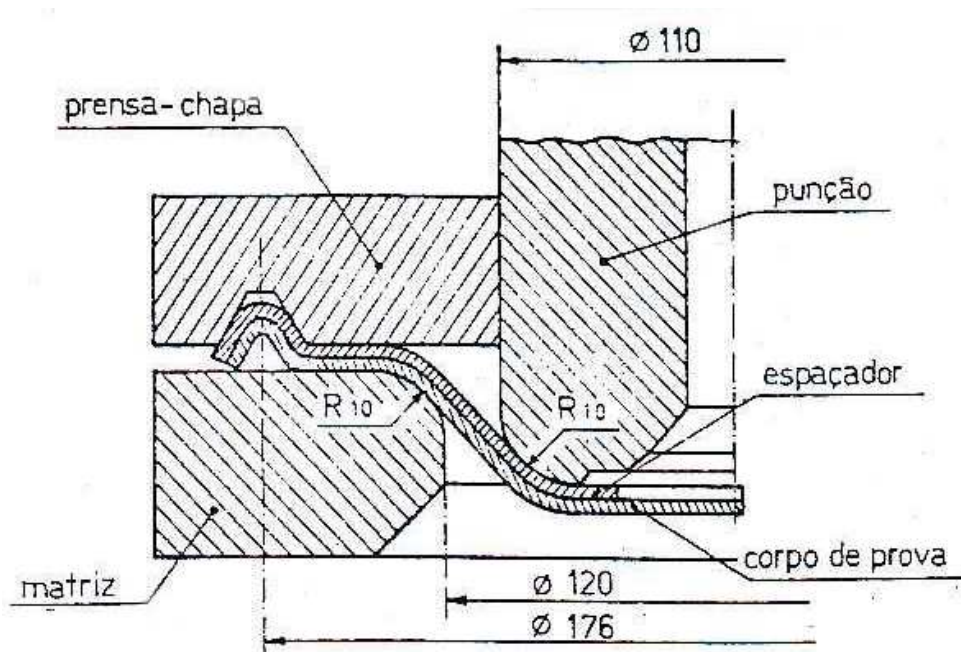


Figura 4.7 – Desenho esquemático para o ensaio Marciniak /4.3/

5. Análise da Conformabilidade de Chapas Através da Curva Limite de Conformação

5.1 Curva Limite de Conformação

A Curva Limite de Conformação (CLC), também conhecida como diagrama de Goodwin-Keeler, representa uma ilustração gráfica da possibilidade de conformação máxima possível de uma chapa quando submetida a um estado de deformações biaxiais e uniaxiais no seu plano. É um dos critérios de segurança utilizados para identificar problemas existentes ou problemas que possam existir quando uma chapa metálica é submetida a uma conformação mecânica durante o processo de estampagem. A intensidade e o sentido das deformações existentes (φ_1 e φ_2) podem variar em pontos diferentes na chapa ou também em um mesmo ponto a medida que ocorre a deformação. Ferran /5.1/ afirmou que as CLC apenas dão os valores máximos das deformações permissíveis numa chapa, não fornecendo nenhuma informação de como se atinge estas deformações.

Carr /5.2/ em seu trabalho descreve a Curva Limite de Conformação como a melhor maneira de representar as deformações limites maiores (φ_1) e menores (φ_2) que estão envolvidas numa superfície plana de uma chapa caracterizando o ponto exato da falha catastrófica quando esta é submetida a um estado de deformações que ultrapassa sua capacidade de estiramento. A CLC tem sido usada como um ótimo indicador na previsão de falhas de conformação em linhas de estampagem. O diagrama indica as condições de deformação que ocorre em uma região localizada no ponto de maior deformação. Contudo, o sucesso da estampagem depende da capacidade do material de redistribuir uniformemente da melhor maneira possível as deformações superficiais envolvidas no processo, garantindo uma peça livre de falhas.

Conforme Hasek /5.3/ existem várias maneiras de se determinar experimentalmente as curvas limites de conformação. Pode-se utilizar ensaios de estampabilidade hidráulica (Bulge Test), Erichsen, ensaio de tração uniaxial e ensaio de estampabilidade com punção hemisférico utilizando corpos de prova com modificações na sua geometria, com a finalidade de simular os diferentes estados de deformações envolvidas no processo. Os diferentes meios para determinar a CLC diferenciam-se entre si essencialmente pela geometria dos corpos de prova e dos punções utilizados nos ensaios, já que cada ensaio possui uma solicitação característica, variando desde a estampagem profunda ao estiramento.

Ferran /5.1/ assume a idéia destas curvas como eminentemente experimentais, onde se baseia em um aproveitamento racional de informações obtidas a partir das deformações medidas nos círculos impressos na superfície da chapa após a conformação. Afirma que para poder determinar as possibilidades máximas de conformação seria preciso ter um critério baseado na deformação máxima possível da chapa quando submetida a um sistema de tensões biaxiais, que possa produzir no plano da chapa deformações principais compreendidas entre $\varphi_1 = -\varphi_2$ e $\varphi_1 = \varphi_2$ passando por $\varphi_2 = 0$. Este critério seria fornecido pelas curvas limites de conformação.

Keeler/5.4/ em suas pesquisas utilizou o ensaio de tração biaxial para plotar o gráfico das duas principais deformações, que são responsáveis pelo estiramento da chapa. O seu método consistiu em tracionar lâminas metálicas que possuíam em sua superfície um rede de malha impressa. Uma vez tracionada esta lâmina até a ruptura, as malhas impressas deformavam-se tornando-se uma elipse. O eixo vertical da elipse ele definiu como sendo o eixo de maior deformação, e o eixo horizontal como o de menor deformação. Em seguida era medida as deformações principais nos eixos das elipses formadas na zona da fratura e na zona próxima a fratura. Utilizando estes pontos para representar graficamente uma curva chamada de nível de deformação crítica (que corresponde ao lado direito da curva), Keeler pôde estimar os pontos próximos onde ocorre uma falha catastrófica da peça estampada.

Goodwin /5.5/ utilizou do mesmo princípio de Keeler, gravando uma malha impressa no plano da chapa, e estendeu a faixa de deformações críticas que ocorriam no plano da peça através de um ensaio onde ele envolvia estado de deformações de fratura de tração-compressão ao mesmo tempo (deformações mais ligadas ao processo de estampagem profunda). A representação gráfica da malha deformada revelava uma faixa separando a zona de falha da zona sem falha. Goodwin definiu esta faixa como sendo a do lado esquerdo do gráfico plotado. O conjunto de dados de Goodwin e Keeler constituiu o que é chamado de curva limite de conformação (figura 5.1).

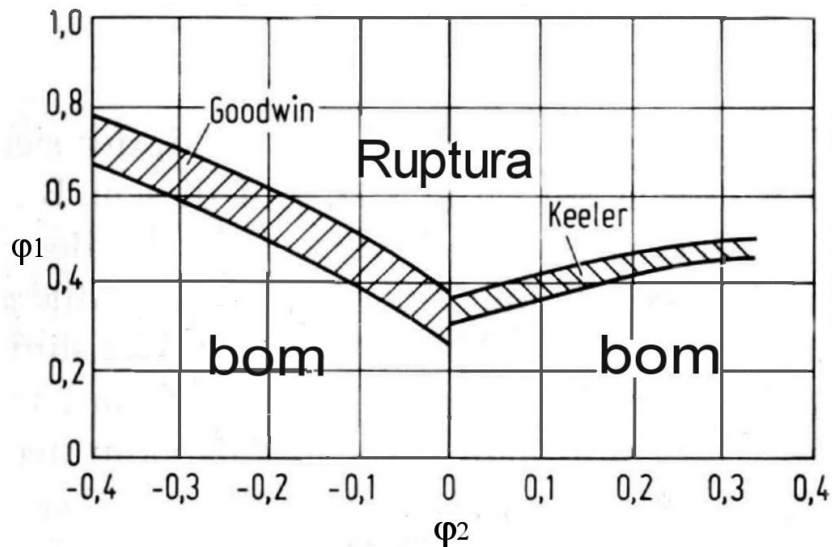


Fig.5.1 Curva Limite de Conformação /2.5/

5.2 Curva Limite de Conformação Aplicada a Tailored Welded Blank

Com a finalidade de otimizar e melhorar a qualidade de chapas soldadas para a indústria automobilística, é de suma importância o conhecimento de como a chapa soldada irá se comportar diante de solicitações severas. Algumas pesquisas têm sido desenvolvidas nesta área. Os resultados mostram que a conformabilidade de Tailored Welded Blanks (TWB) diminui com o aumento da razão de espessura do material e a maneira para se atingir uma máxima conformabilidade dos TWB é minimizar a deformação localizada no material mais fraco, não submetendo-o a deformações de estiramento /5.6/5.7/.

Cayssials /5.6/ desenvolveu alguns estudos para estimar o comportamento de TWB objetivando determinar a sua CLC, concluiu que eles permitem estimar os seguintes pontos:

- Viabilidade do uso de peças Tailored Welded Blanks;
- As zonas críticas envolvidas no processo de estampagem;
- As severidades nas condições de processo de estampagem de TWB.

Cayssials /5.6/ utilizou em seus estudos chapas soldadas circulares e retangulares. Os resultados dos ensaios estão vinculados com as propriedades mecânicas dos materiais utilizados que afetam a conformabilidade do material e também diretamente a construção da CLC. Quando a deformação máxima excede os valores correspondentes ao aparecimento de fissuras, a falha catastrófica da chapa ocorre em uma área próxima ao cordão de solda localizada no material mais fraco.

Cayssials /5.6/ afirma que para atingir o ponto máximo na curva deve-se minimizar ao máximo a deformação no material mais fraco, em outras palavras, minimizar a interação entre ambos materiais. Ele caracteriza esta interação pela quantidade de deslocamento do cordão de solda em direção ao material mais resistente. O ponto ótimo será então onde o cordão de solda não está sob condição de deformação severa de estiramento. As figuras 5.2(a) e 5.2(b) mostram que a localização da linha de solda afeta sensivelmente a estampabilidade do TWB, pois um cordão de solda que se localiza em uma zona de estiramento - deformação severa - reduz a conformabilidade da peça, induzindo a uma falha do componente soldado.

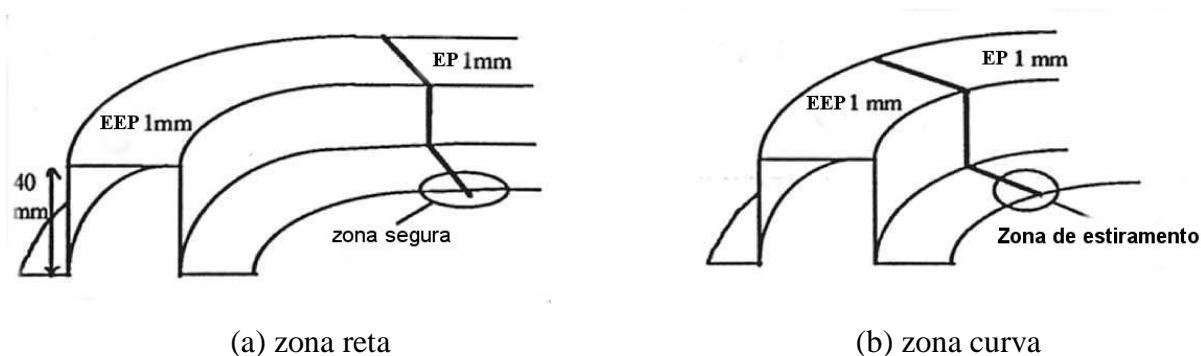


Figura 5.2 – Cordão de solda localizado em uma região segura e crítica /5.6/

Graisert /5.8/ pesquisou e levantou a curva limite de conformação de uma junta soldada combinada com as espessuras de 1,00 e 1,25mm, e observou que a deformação efetiva é de um nível mais baixo se comparada com chapas de mesma espessura. A tensão de escoamento era atingida antes na chapa de menor espessura, com isso o cordão de solda tem um papel de compensar a tensão na chapa de maior espessura. O autor concluiu então que por um lado a capacidade de estampo de uma chapa soldada depende da dureza do cordão de solda e por outro do material adjacente, que representa a dureza na direção transversal. As deformações ocorrem quase que exclusivamente na direção longitudinal ao cordão de solda, onde no diagrama de Goodwin-Keeler é definida a tensão plana.

O estudo de Lee et. al. /5.9/ foi o efeito da razão de espessura das chapas soldadas no levantamento da Curva Limite de Conformação. Para união das chapas com diferentes espessuras ele utilizou o laser tipo Nd:YAG, e como material base aço carbono nas razões de espessura de 2 (1,0/0,5mm), 1,67 (1,0/0,6mm) e 1,25 (1,0/0,8mm). O autor observou que nos ensaios de tração que envolviam chapas soldadas a região onde aparece o pescoçamento

ocorria na chapa de menor espessura. No ensaio de conformabilidade utilizado por Lee a fratura ocorria paralela ao cordão de solda e perpendicular a deformação maior principal, localizada no material mais fino. Ele explica este comportamento pelo fato de que o material de espessura mais fina se encontrar sob uma deformação na região plástica enquanto que o material de espessura mais grossa ainda se encontra em uma deformação na região elástica. Isto explica o porquê dos materiais de diferentes espessuras falharem nas regiões de espessura mais fina.

A espessura do material tem uma grande influência no levantamento da Curva Limite de Conformação. A figura 5.3 mostra a CLC para diferentes razões de espessura de um aço ao carbono. A maior razão de espessura de uma chapa soldada (2) tem o mais baixo nível representado na curva, enquanto que a menor razão de espessura (1.25) tem o mais alto nível na CLC. Isso implica que quando maior a razão de espessura da junta soldada, mais baixa será a capacidade de conformação da mesma.

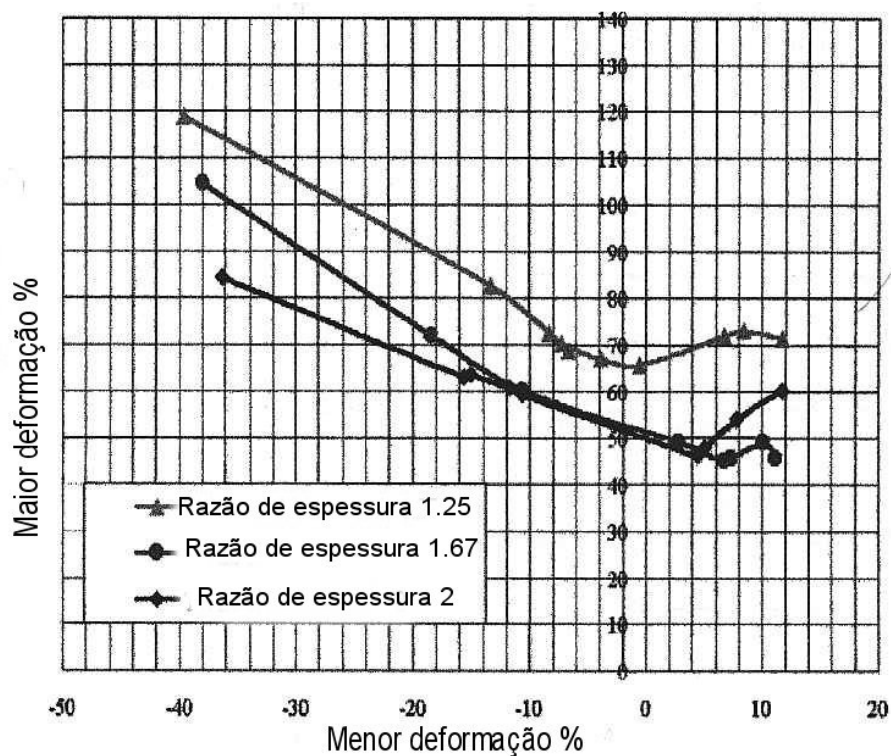


Figura 5.3 - Comparação da Curva Limite de Conformação para diferentes razões de espessura de uma junta soldada /5.9/

6. Procedimentos Experimentais

Para a realização do trabalho foram utilizados dois tipos de aços ao carbono largamente utilizados na indústria automobilística. O material empregado neste trabalho sob a forma de chapa e de espessura variada, posteriormente unida através de uma soldagem a laser, tem como objetivo a manufatura de corpos de prova de chapas soldadas, também conhecidas como Tailored Welded Blanks. Estes corpos de prova foram unidos respeitando a dimensão de 200 mm de comprimento e mantendo uma largura variável. Ao mesmo tempo foram usinados diferentes dimensões de raio visando reproduzir os diferentes estados de deformações que uma chapa é submetida durante o processo de estampagem.

6.1 Material Base

Dois diferentes materiais com diferentes espessuras foram utilizados. O aço refosforado ZStE 220 P nas espessuras de 1,5 mm e 0,8 mm foi unido através do processo de soldagem a laser formando a geratriz. O outro material utilizado foi um aço IF (Interstitial Free) comercialmente conhecido como St 05 também unido por um processo de soldagem a laser nas espessuras de 1,5 mm e 1,2 mm. O material utilizado nos ensaios, bem como as diferenças de espessuras, foram escolhidos por se tratarem de materiais com os quais são confeccionadas partes específicas de um veículo. A composição química e as propriedades mecânicas apresentadas pelas usinas que fabricam os materiais estão representadas nas tabelas 6.1 e 6.2.

O aço St 05 caracteriza-se por possuir uma excelente conformabilidade destinado a peças com estampagem profunda, extra-profunda, crítica e supercrítica, principalmente em painéis da indústria automotiva. É utilizado na confecção do túnel de dois automóveis de passeio/6.1/.

O aço ZStE é indicado principalmente para a fabricação de peças estampadas, desde deformações mais leves até deformações mais severas. Alterando sua composição química, proporciona diversos graus de estampabilidade adequados á aplicações específicas. O material ZStE 220 P é largamente utilizado na confecção do assoalho de dois automóveis de passeio do /6.2/.

Tabela 6.1- Composição Química dos materiais utilizados nos ensaios /6.1/6.2/.

Material	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Al (%)	Ti (%)
ST 05	≤0,02	≤0,3	≤0,1	≤0,025	≤0,02	≤0,02	≤0,3
ZStE 220 P	0,06	0,7	0,5	0,08	0,03	-	-

Tabela 6.2- Propriedades Mecânicas dos materiais utilizados nos ensaios/6.1/6.2/.

Material	LE (N/mm ²)	LR (N/mm ²)	Ag (%)	n ₉₀ ^o	Δr	r
ST 05	140/180	270/340	-	0,20	-	2,0
ZStE 220 P	220/280	340/420	80	-	-	-

6.2 Processo de Soldagem

O tipo de processo de soldagem utilizado para união das chapas foi solda laser CO₂. Durante o processo de soldagem foram utilizados os gases Argônio e Hélio com a finalidade de proteção do cordão de solda. Para a formação do laser, utiliza-se os gases CO₂, H₂ e N₂. A potência da fonte utilizada para união do material foi de 75% com uma velocidade de solda de 7m/min. O ângulo de ataque do feixe de laser é feito de um ângulo reto, através de um jogo de espelhos. A regulagem da altura do eixo Z (responsável pelo feixe de laser) é de suma importância, pois influencia diretamente na geometria do cordão de solda, visualizado na parte plana das chapas. A correta regulagem da potência utilizada junto com a regulagem do ponto focal determina a espessura do cordão de solda resultante. A espessura resultante do cordão de solda a laser não deve ultrapassar 1 mm.

6.3 Corpos de Prova

Para a obtenção da curva limite de conformação é necessário levantar uma série de combinações de deformações, deformações principais maiores e menores, a fim de traçar a curva em conjunto com as medidas de deformações levantadas /4.3/.

Nakajima /4.6/ foi quem primeiro propôs ensaiar corpos de provas na forma de discos com variação na geometria para traçar a CLC. Hasek /5.3/ modificou este ensaio adotando corpos de prova com entalhes circulares na chapa, mas mantendo a mesma geometria. Hennig /6.3/ propôs, com o objetivo de alcançar um maior nível de deformações principais maiores e menores na CLC, uma série de 8 corpos de prova de forma retangular de mesmo comprimento, porém com diferentes larguras e raio dos entalhes. Para isso, todos os corpos de provas das chapas soldadas foram cortados no comprimento de 200 mm tomando-se o cuidado de manter localizado o cordão de solda laser exatamente na metade do comprimento dos corpos de prova. A figura 6.1 ilustra uma família (maneira como é identificado uma série de 8 corpos de prova com diferentes dimensões de entalhes e largura) usados no ensaio. Na figura. 6.1 está relacionado a dimensão da largura em função do raio do entalhe.

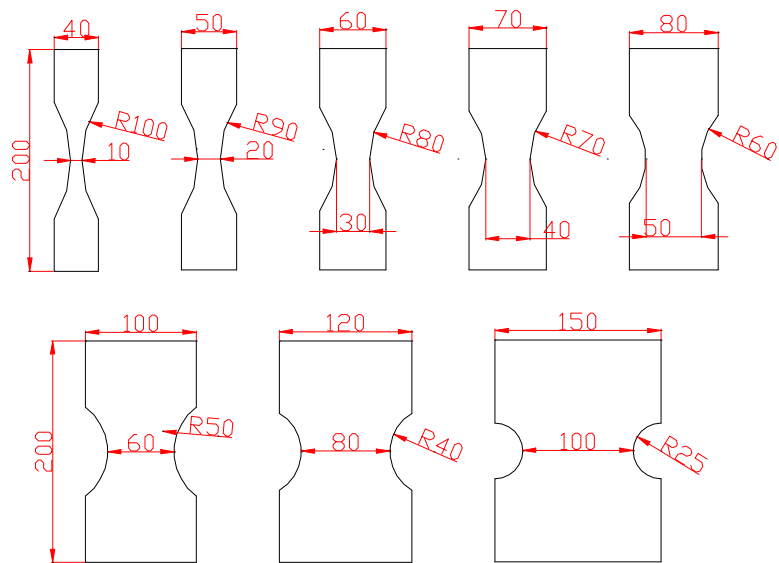


Figura 6.1 – Família de corpos de prova para determinar a CLC pelo ensaio Nakajima modificado.

Os entalhes dos corpos de prova foram obtidos através de um fresamento tangencial automatizado e tem por finalidade atingir diferentes estados de deformações no plano da chapa. Para eliminar problemas de fratura prematura nos entalhes, foi dado um acabamento final na aresta do entalhe. A figura 6.2 ilustra a usinagem de um corpo de prova nas dimensões especificadas anteriormente.

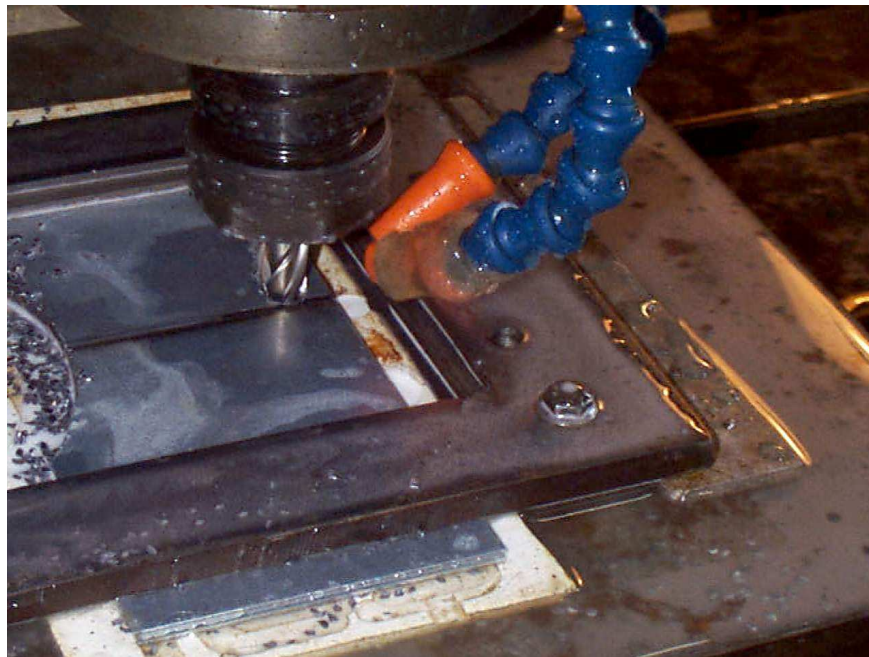


Figura 6.2 – Usinagem de um corpo de prova para o levantamento da CLC de uma chapa soldada.

6.4 Marcação da Grade nos Corpos de Prova

Para que se possa medir as deformações que ocorrem na superfície do material a ser ensaiado, é necessário sobre o mesmo a marcação de uma rede de malhas de modo que a área inicial seja conhecida e reproduzida com precisão e clareza.

A malha utilizada foi de geometria quadrada de dimensões iguais e conhecidas, comprimento de lado igual a 2.5 mm, conforme figura 6.3. Com as dimensões da malha conhecida, torna-se mais simples a interpretação do estado de deformações na superfície da peça, pois na direção (por exemplo de uma célula quadrada) aonde se encontra uma porcentagem maior de deformação é definida como φ_1 , e perpendicularmente a esta direção define-se como a menor deformação φ_2 .

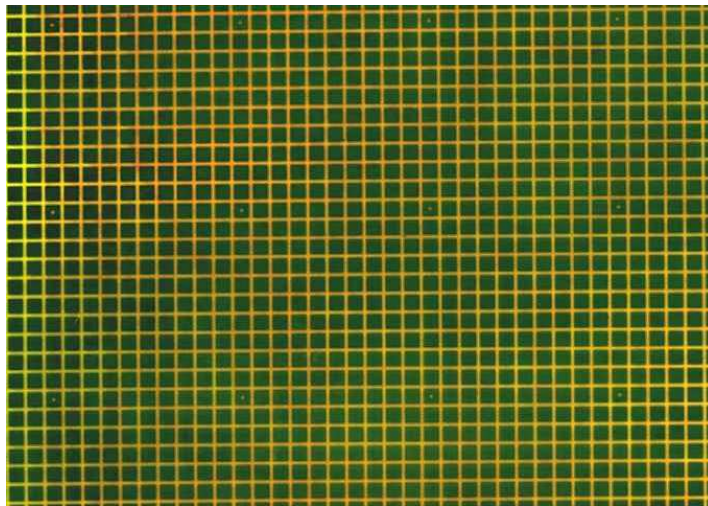


Figura 6.3 – Ilustração da malha utilizada para leitura das deformações.

Existem inúmeros métodos que são utilizados para a marcação de uma malha reticulada sobre a superfície do material a ser ensaiado. Dentre elas podemos citar: marcação por laser, por riscamento, através de fina camada de tinta e o método eletrolítico. O método utilizado para reproduzir a rede de malhas na superfície da chapa foi o método eletrolítico.

6.5 Método Eletrolítico

Consiste na utilização de um eletrólito, um agente neutralizador, uma almofada de feltro não muito grossa, um rolo compressor, uma rede de malha de dimensão conhecida e uma fonte de energia para fornecer a corrente necessária para a gravação. Coloca-se em cima da amostra a rede de malhas desejada para a gravação e em cima o feltro embebido no eletrólito.

Com a fonte de energia ligada ao rolo, imprime-se uma certa força do rolo para o feltro com um movimento contínuo para a frente e para trás, não mais que 4 vezes, gravando em baixo relevo na superfície da chapa a malha desejada. A desvantagem deste método é a rápida oxidação da peça, mas mediante a aplicação do agente neutralizador logo após o ataque químico, consegue-se neutralizar a ação corrosiva do eletrólito. O princípio básico da gravação é mostrado esquematicamente na figura 6.4. Para a gravação da malha sobre superfície do aço, utiliza-se como fonte de energia de corrente alternada uma fonte de solda de 14 V de saída com uma corrente de 40A.

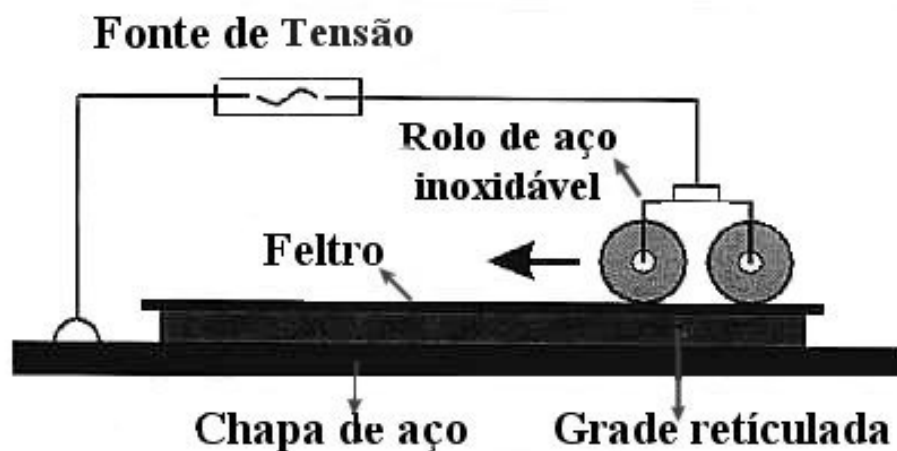


Figura 6.4 – Modelo esquemático para gravação da malha na superfície da chapa /6.5/.

Conforme Klein et. al. /6.4/ quando a corrente utilizada para marcação for AC há uma remoção pequena de material, e o desenho da malha é clara. Para uma corrente DC há uma deposição de sais sobre a chapa, e a rede de malha é escura.

6.6 Medição das deformações principais ϕ_1 e ϕ_2 .

Uma vez marcada a rede de malhas sobre a superfície da chapa através do método eletrolítico, a mesma é estampada até a fratura, e em seguida é medida as deformações ϕ_1 e ϕ_2 . Para estimar a CLC da zona da fratura deve-se tomar o cuidado de escolher uma célula onde a fratura passe no seu centro. Para estimar a CLC de uma zona livre de falhas é escolhida uma célula não fraturada para medição da deformação. Esta célula escolhida geralmente localiza-se a distância de uma célula e meia da fraturada, garantindo assim o levantamento da CLC de uma zona livre de deformações severas. A figura 6.5a ilustra a

geometria da malha antes de se executar o ensaio. A figura 6.5b ilustra um corpo de prova após o ensaio Nakajima, onde se pode notar claramente a malha deformada. A medição dessa malha deformada é que dará origem aos pontos que irão constituir a CLC do material.

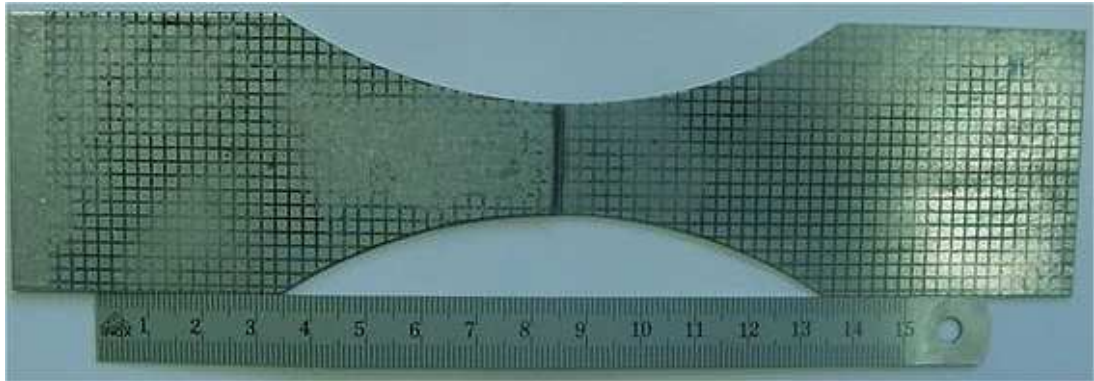


Fig 6.5a – Corpo de prova antes do ensaio Nakajima apresentando a malha sem deformação.

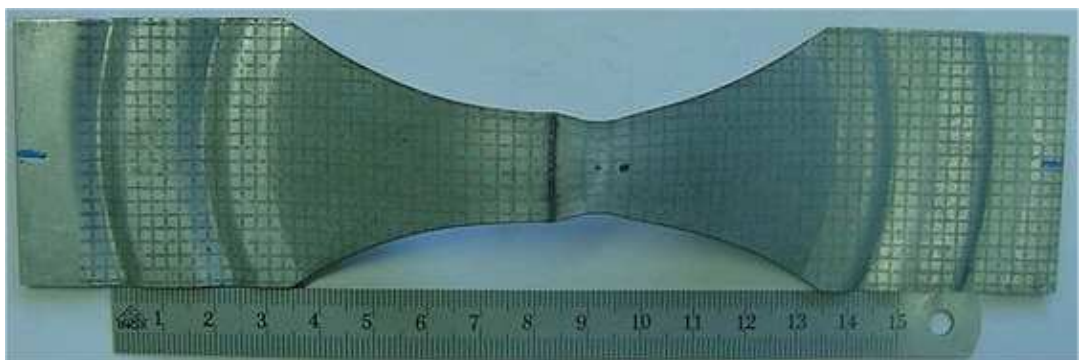


Figura 6.5b – Corpo de prova deformado após o ensaio Nakajima apresentando a malha deformada.

Para uma leitura rápida do gradiente de deformação, utiliza-se uma escala graduada em fita flexível transparente que contém em sua superfície uma escala de deformação logarítmica conhecida, conforme figura 6.6.

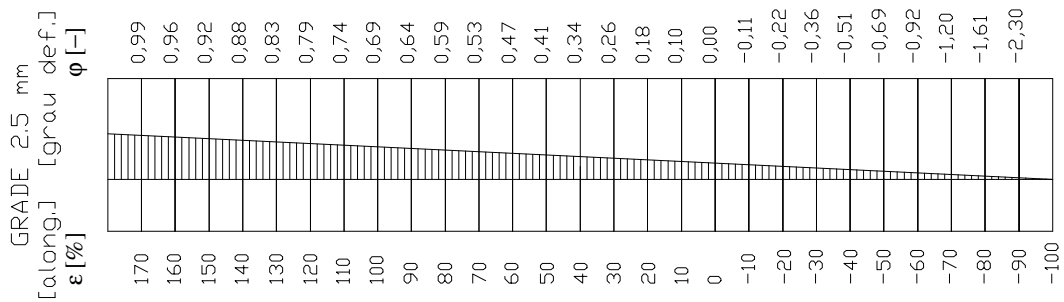


Figura 6.6 – Fita flexível utilizada para a leitura das deformações.

Para a determinação da CLC do material estudado, são medidas na superfície da chapa após o ensaio as deformações logarítmicas maiores (φ_1) e menores (φ_2), que resultam na construção de um sistema de coordenadas similar ao da figura 6.7.

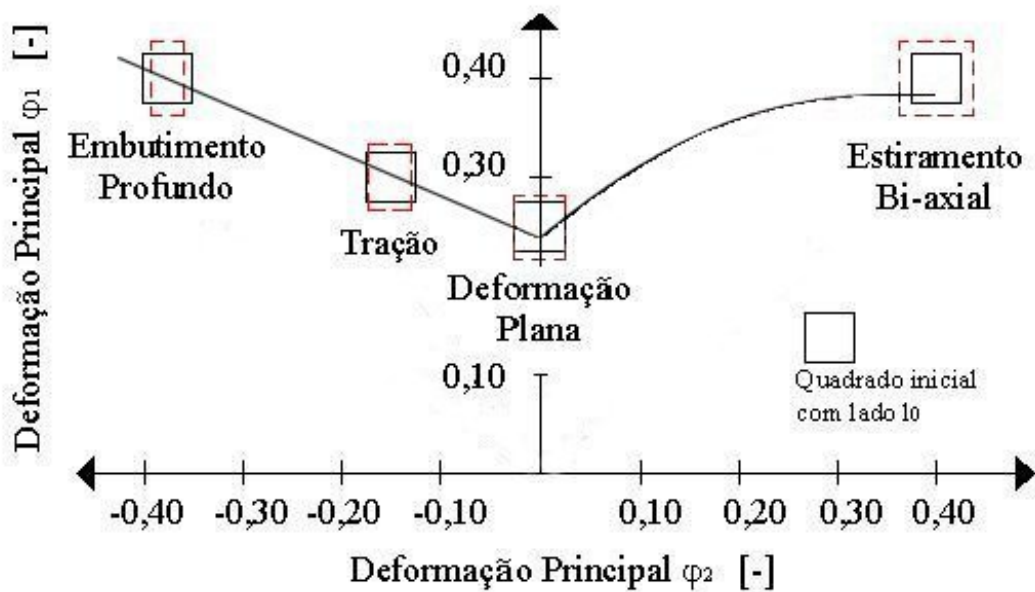


Figura 6.7 – Representação esquemática da CLC.

Quando não se faz o uso da fita flexível para medir as deformações, pode-se de um modo geral calcular as deformações através dos modelos matemáticos apresentado no capítulo 4, a saber:

$$\epsilon_1 = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (14)$$

e,

$$\varepsilon_2 = \frac{l_2 - l_0}{l_0} \quad (15)$$

Com os valores da deformação relativa referentes aos lados de maior (ε_1) e menor (ε_2) consegue-se definir as deformações principais no plano da chapa, a saber:

$$\varphi_1 = \ln(1 + \varepsilon_1) \quad (16)$$

e,

$$\varphi_2 = \ln(1 + \varepsilon_2) \quad (17)$$

onde φ_1 é definido como sendo a deformação na direção do eixo de maior deformação e φ_2 como sendo a deformação na direção do eixo de menor deformação. Estes pontos no gráfico $\varphi_1 \times \varphi_2$ indicam a CLC da chapa analisada como já se mostrou na figura 6.6.

7. Resultados Experimentais

7.1 Composição Química

Os materiais referidos neste trabalho foram fornecidos por diferentes usinas e passaram por diferentes tratamentos termomecânicos antes de serem entregues para os centros fornecedores de chapas soldadas. Para efeito de análise da composição química dos materiais fornecidos, foi determinada a composição química de ambos os materiais ensaiados em laboratório. O tipo de teste utilizado para determinar a composição química dos materiais foi um espectrometro de emissão óptica. A tabela 7.1 ilustra a composição química de ambos os materiais.

Tabela 7.1 –Composição química dos materiais em estudo determinada em laboratório.

Material	C(%)	Mn(%)	Si(%)	P(%)	S(%)	Al(%)	Ti(%)	Ni(%)	Cr(%)
ST 05	0,02	0,15	0,01	0,016	0,001	0,17	-	0,011	0,016
ZStE 220P	0,05	0,14	0,01	0,022	0,001	0,11	0,07	0,011	0,01

7.2 Propriedades Mecânicas

Um bom resultado final na estampagem de chapas originando uma peça livre de falhas depende do conhecimento de suas propriedades mecânicas e de seus estados de deformações/7.1/.

Foram realizados três ensaios de tração uniaxial de cada direção de laminação do material base e com as chapas de diferentes espessuras unidas através de soldagem a laser, com o objetivo de caracterizar as suas propriedades mecânicas. Os corpos de prova para o ensaio de tração foram usinados conforme norma DIN 10002. Foram usinados corpos de prova nas três direções principais de laminação (0° , 45° , 90°), e posteriormente tracionados em uma máquina de ensaio universal da marca Kratos com capacidade de 10 kN, na taxa de deformação de 0.005 s^{-1} a temperatura ambiente.

Os corpos de prova possuíam na zona de medição 50 mm como comprimento inicial (l_0). O equipamento utilizado para medir a variação de deformação do comprimento na zona de medição foi um clip gauge da marca Instron modelo 2630-100 com variação da amplitude

de +/- 25 mm. Os ensaios foram conduzidos com velocidade constante até o aparecimento da fratura, onde então o teste era dado por encerrado. Como as características mecânicas dos materiais são determinadas através do ensaio de tração, que determina a capacidade do material para conformação, alguns valores importantes das propriedades intrínsecas dos materiais como limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), grau de encruamento (n) e anisotropia (r) são determinados através deste ensaio.

Nas figuras 7.1 e 7.2 estão ilustrados os diagramas tensão vs. deformação relativa para os materiais *ST 05* e *ZStE 220 P*. As curvas comparam o limite de resistência e o limite de escoamento dos materiais em estudo em relação aos três sentidos de laminação.

Na figura 7.1 verifica-se que o valor médio do limite de escoamento (LE) do material *ST 05* calculado para os três sentidos de laminação é de $215 \pm 5 \text{ N/mm}^2$. Este valor se comparado ao do fabricante, conforme tabela 6.2, encontra-se um pouco superior, cerca de 19%, do que o fabricante especifica. Para o limite de resistência o valor máximo verificado nos ensaios foi na ordem de 368 N/mm^2 par o sentido de 0° de laminação, e o valor mais baixo verificado ficou em torno de 356 N/mm^2 para o sentido de 90° de laminação. O valor médio do LR calculado para os três sentidos de laminação ficou em torno de $363 \pm 6 \text{ N/mm}^2$.

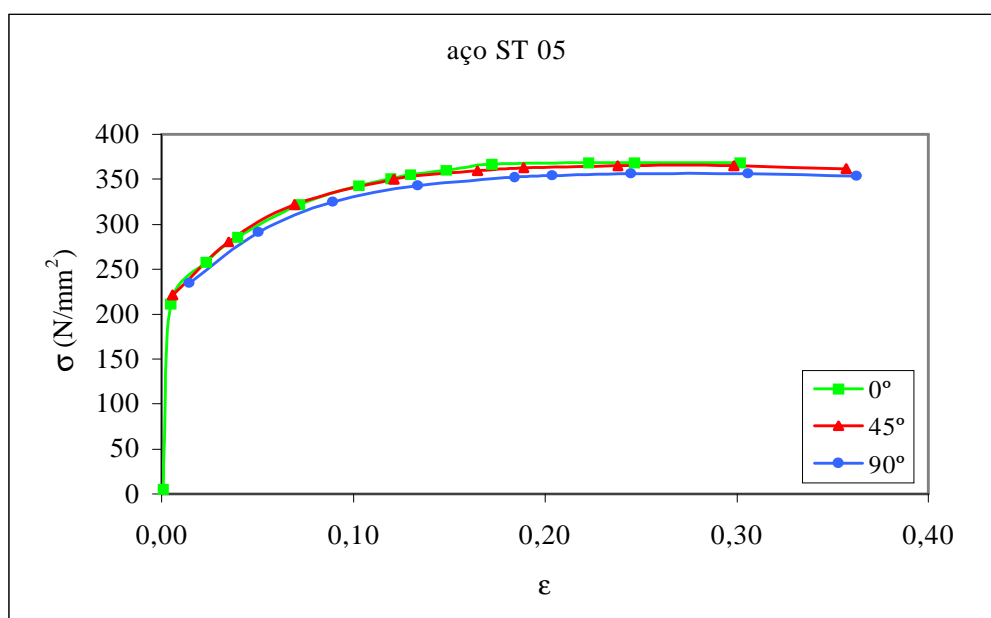


Figura 7.1- Gráfico tensão vs. deformação relativa para o material ST05.

Na figura 7.2 verifica-se que o limite de escoamento (LE) médio calculado do material *ZStE 220 P* para os três sentidos de laminação é de $309,6 \pm 13 \text{ N/mm}^2$. Se este valor também

for comparado com o da tabela 6.2, este se encontra um pouco superior ao especificado pelo fabricante, cerca de 10%. Para o limite de resistência (LR) o valor máximo encontrado nos ensaios foi de 442 N/mm^2 , correspondente aos corpos de prova orientados no sentido de laminação de 0° . Para o sentido de laminação de 90° é verificado o menor limite de resistência, ficando em torno de 436 N/mm^2 . O valor médio do LR calculado para os três sentidos de laminação fica em torno de $439 \pm 3 \text{ N/mm}^2$.

Se comparados os valores médios levantados nos ensaios, nota-se que o limite de resistência mais alto é do aço *ZStE 220 P*. De fato esta é uma característica dos elementos de liga presentes na composição química do material, pois este aço apresenta uma quantidade maior de carbono e fósforo, que são elementos que contribuem para um aumento na resistência mecânica do material.

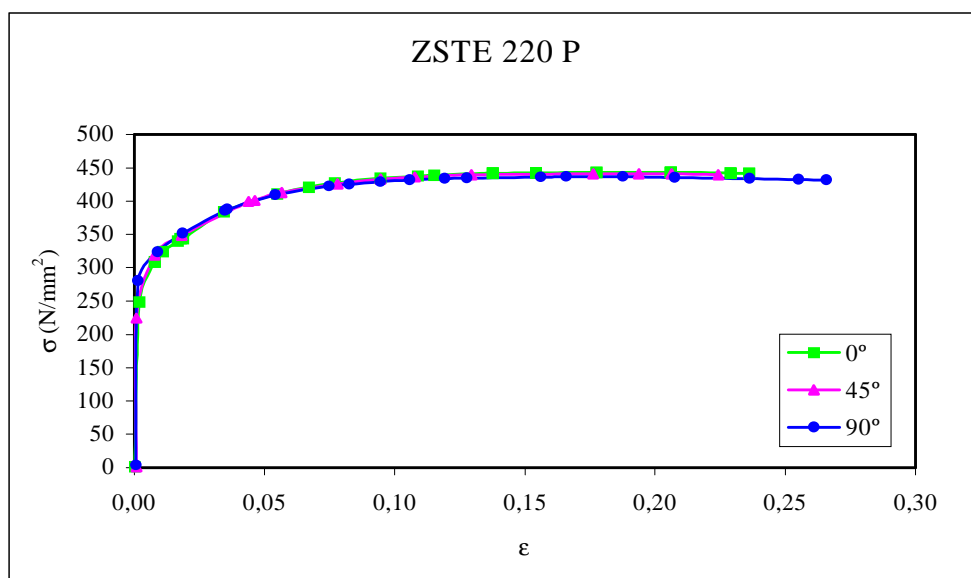


Figura 7.2- Gráfico tensão vs. deformação relativa para o material ZStE 220 P.

As tabelas 7.2 e 7.3 indicam os resultados dos ensaios de tração para os aços ST05 e ZStE 220 P. Os resultados das propriedades mecânicas foram calculados conforme descrito no subcapítulo 4.1. O grau de encruamento das chapas foi calculado através da equação 9 apresentada no subcapítulo 4.1 que segue a norma SEW 1125. Para isso teve-se o cuidado de tomar os pontos compreendidos entre limite de escoamento e o limite de resistência do alongamento, que é a garantia de deformação uniforme do material. Os índices de anisotropia para os dois materiais em estudo estão descritos no anexo e seguem a norma SEW 1126.

Tabela 7.2 – Propriedades Mecânicas do Material ST 05 determinada em Laboratório

Propriedades Mecânicas	ângulo referente ao sentido de laminação			
	0°	45°	90°	Valor Médio
LE	211,4	221,3	214,1	215,6
LR	368,2	364,9	356,1	363,1
Ag ₅₀	56	58	57	
n	0,21	0,22	0,23	
r	1,76	1,6	2,26	
r _m	1,81			
Δr	0,41			

Tabela 7.3 – Propriedades Mecânicas do Material ZStE 220 P determinada em Laboratório

Propriedades Mecânicas	ângulo referente ao sentido de laminação			
	0°	45°	90°	Valor Médio
LE	294	315	320	309,6
LR	442	440	436	439,3
Ag ₅₀	44	40	42	
n	0,18	0,17	0,16	
r	1,32	1,5	1,16	
r _m	1,37			
Δr	-0,26			

Também foram executados ensaios de tração envolvendo os materiais na forma de TWB. Os ensaios foram executados nas mesmas condições do material base citado anteriormente. Os ensaios foram conduzidos até o aparecimento da fratura, o que determinava o fim do ensaio. O que foi verificado no resultado do ensaio de tração de corpos de prova com cordão de solda a laser é que a fratura sempre ocorreu no lado da chapa de menor espessura. Nota-se também uma pequena variação na distância da fratura ao cordão de solda para os dois materiais, conforme figura 7.3. Todas as fraturas nos corpos de prova na forma de TWB se localizaram paralelamente ao cordão de solda e perpendicularmente ao sentido da força aplicada. A figura 7.3 mostra os corpos de prova na forma de TWB após o ensaio de tração para as duas diferentes razões de espessura. Para o aço *ST 05* a razão de espessura era de 1,25 (1,5/1,2mm), e para o aço *ZStE 220 P* a razão de espessura verificada era de 1,87 (1,5/0,8mm).

A razão de espessura recomendada pelos centros fornecedores de chapas soldadas em conjunto com as montadoras não deve ultrapassar 3 /2.3/, pois até este limite é garantido uma união com sucesso e um bom acabamento da geometria do cordão de solda. Acima deste valor a fusão da chapa mais grossa na fina fica prejudicada, comprometendo as características mecânicas da união.

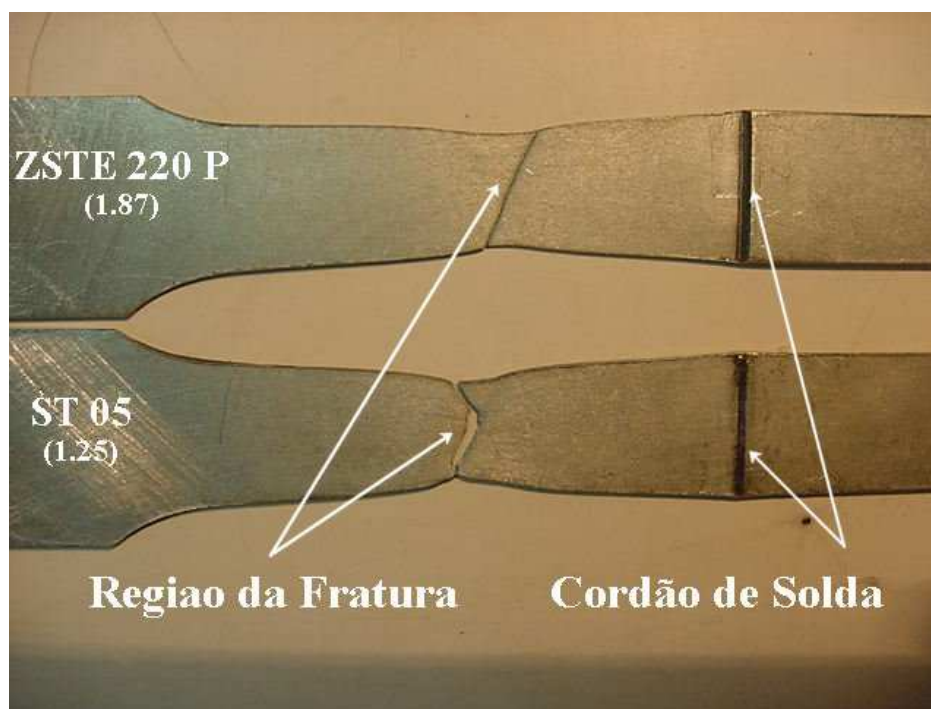


Figura 7.3 – Cp's na forma de TWB após ensaio de tração.

As figuras 7.4 e 7.5 fazem um comparativo dos resultados dos ensaios de tração para os dois materiais na forma de MB e na forma de TWB. Como nos centros fornecedores de chapas soldadas as geratrizes são soldadas sem respeitar qualquer sentido de laminação, os valores que são comparados do MB com o TWB correspondem a uma média dos três sentidos de laminação. O que se verifica nos resultados apresentados é que tanto o LE quanto o LR do material soldado é maior que do material base. Supõe-se que este desempenho no resultado é devido à presença do cordão de solda. Neste caso o cordão de solda retém por um certo tempo o material durante o ensaio de tração, pois na região da solda a dureza é praticamente o dobro do material base devido à alta taxa de resfriamento da área do cordão de solda. Essa característica contribuiria para que se atinja valores maiores para o limite de resistência e limite de escoamento. Uma outra hipótese seria de que o material mais fino comece a encruar antes que o material mais grosso, por começar a se deformar antes, há uma resistência maior ao escoamento e consequentemente eleva os valores para LE e LR. Conforme descrito por Lee em seu trabalho /5.9/, começa ocorrer primeiro uma deformação plástica na chapa mais

fina, enquanto que a chapa mais grossa ainda se encontra em uma deformação elástica. À medida que o ensaio avança, a chapa mais grossa começa a se deformar, interagindo com o outro material fazendo com que se atinjam valores maiores para o LE e LR. Esta interação é caracterizada pelo deslocamento do cordão de solda na direção da chapa mais grossa.

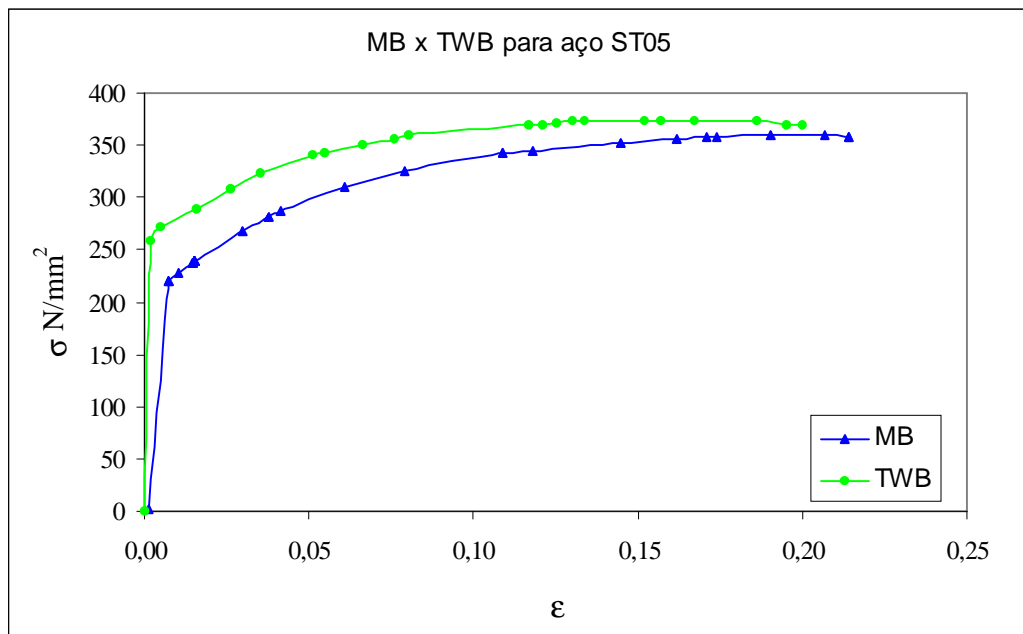


Figura 7.4 – Ensaio de tração comparando o comportamento do MB e TWB para o aço ST 05.

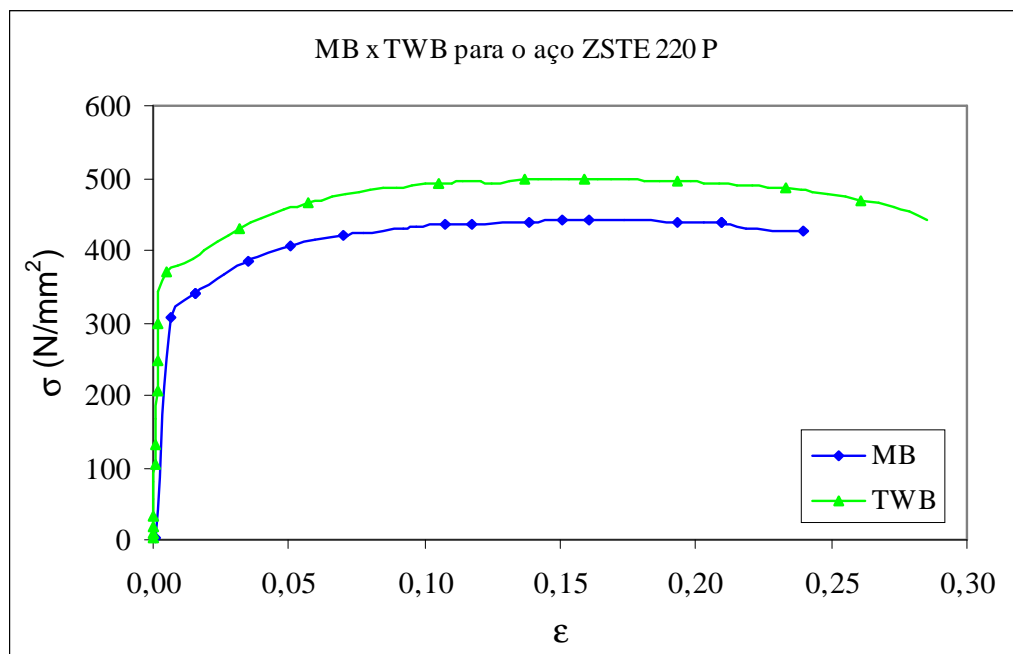


Fig. 7.5 - Ensaio de tração comparando o comportamento do MB e TWB para o aço ZStE 220 P

O limite de escoamento (LE) do material ST 05 na forma de TWB foi de 257 N/mm² e o limite de resistência (LR) foi de 373 N/mm². Se estes valores forem comparados com os do MB se verifica um aumento no comportamento mecânico do material soldado na ordem de

19% e 2,7% respectivamente. Para o material ZStE 220 P na forma de TWB o limite de escoamento (LE) medido foi de 360N/mm² e o limite de resistência (LR) foi de 498 N/mm². Se novamente estes valores forem comparados com os do MB o aumento no comportamento mecânico do material é na ordem de 16% e 13% respectivamente.

Esta característica do aumento do LE e do LR de geratrizes soldadas no ensaio de tração também foi verificada por Adonyi e Milián /7.7/ em seu trabalho. Os autores na sua investigação pesquisaram a influência da solda a laser e por esmagamento nas propriedades mecânicas de cinco diferentes aços de baixo carbono. Em todos os resultados alcançados o LE e o LR verificado das geratrizes soldadas (de ambos os processos de solda) foram maiores que os valores do MB.

Na ilustração da figura 7.6 é feita uma análise comparativa dos valores do LE e do LR levantados em laboratório para o material base (MB) e para o material na forma de Tailored Welded Blanks (TWB).

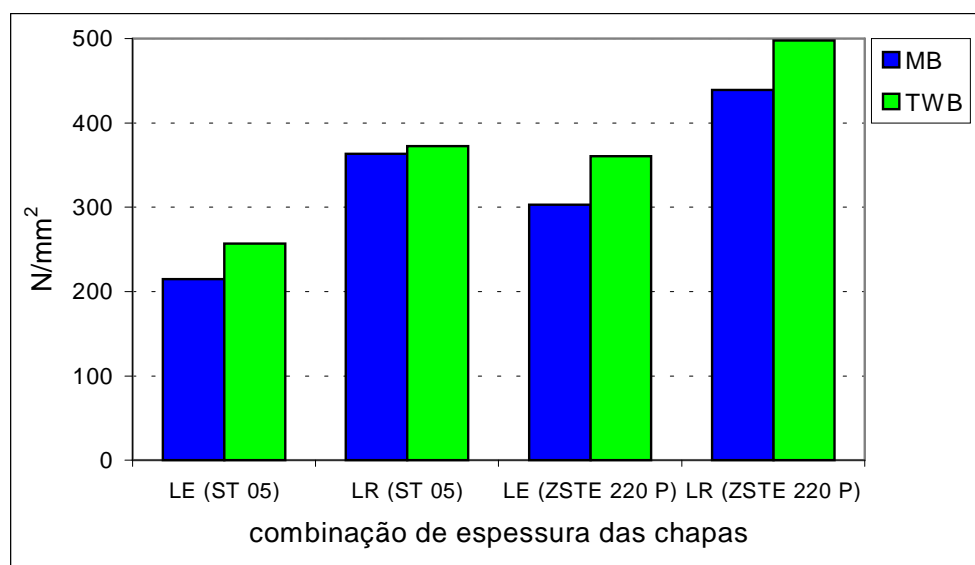


Figura 7.6 – Análise comparativa dos LE e LR dos materiais em estudo na forma de MB e TWB.

7.3 Análise da junta soldada

Para se obter o sucesso de uma peça estampada deve-se levar em consideração as suas propriedades mecânicas, espessuras, condições de lubrificação e o estudo da geometria desejada. Para a estampagem de peças TWB a situação é um pouco mais complicada devido a presença do cordão de solda, das diferentes características de conformabilidade dos materiais unidos e da diferença de espessura /7.3/.

Um fator que está ligado ao desempenho do componente soldado no momento da conformação é a posição do cordão de solda, pois este é um limitador para a estampagem de formas mais complexas. Atualmente é empregado em escala industrial somente solda linear laser para união das geratrizes /7.3/. Um bom entendimento da influência do cordão de solda no processo de estampagem e nos parâmetros adotados para a soldagem facilita a escolha dos materiais a serem unidos, bem como a otimização da geometria da geratriz.

Em função da presença do cordão de solda e para um bom entendimento da influência que ele exerce no sucesso da estampagem de uma peça TWB, foi feita uma análise metalográfica para cada material na seção transversal da área do cordão de solda no âmbito de caracterizar a zona de fusão e suas propriedades, como microdureza e distribuição da ZAC.

As figuras 7.7 e 7.8 ilustram a macrografia óptica dos materiais ST 05 e ZStE 220 P indicando de um modo geral a geometria do cordão de solda. O reagente químico utilizado para a revelação da estrutura do ponto de junção das peças foi Nital na proporção de 4% durante 30 segundos.



Figura 7.7 – Macrografia indicando a geometria do cordão de solda para o aço ST 05. Aumento 50X.

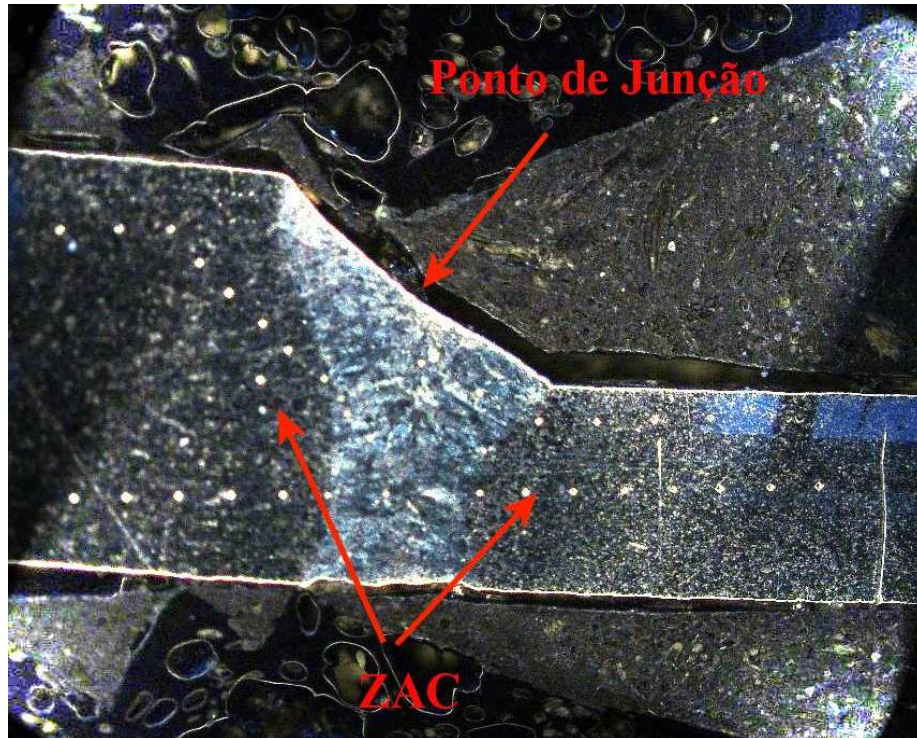


Figura 7.8 – Macrografia indicando a geometria do cordão de solda para o aço ZStE 220P. Ataque Nital 4%. Aumento 50X.

Também é possível visualizar a ZAC e a quantidade de área que ele está presente no MB. Este tipo de condução (condução bidimensional) indica que houve uma distribuição uniforme e constante do calor ao longo do processo de junção, característica de um processo contínuo de soldagem.

Com o objetivo de visualizar a estrutura do material e do cordão de solda foi feito uma análise micrográfica que ilustra progressivamente as microestruturas do MB e da junta soldada de ambos os materiais. Nas figuras 7.9 e 7.10 é visualizado a variação da microestrutura do cordão de solda e da chapa base. Se observa no cordão de solda uma região difusa com estruturas lamelares. Como a dureza nesta área é muito maior que no material base, a fratura sempre ocorrerá numa região adjacente ao cordão de solda localizado no material mais fino.

O tamanho de grão das chapas metálicas para a estampagem é de grande importância, pois é o que define alguns parâmetros no processo como tensão de escoamento, grau de encruamento e alongamento/7.1/. Com tamanho de grão grande, podem aparecer rugas após a estampagem na superfície da chapa, fenômeno conhecido como casca de laranja, que resulta em um péssimo aspecto no acabamento do componente.



Figura 7.9 – Micrografia óptica do material ST 05 atacado com Nital 4% com aumento de 100X.



Figura 7.10 – Micrografia óptica do material ZStE 220P atacado com Nital 4% com aumento de 100X.

Para obter sucesso na junção de chapas a qualidade do corte da aresta a ser soldada deve ser muito precisa, sem qualquer tipo de espaços ou “dentes” entre as arestas a serem unidas.

Quando se solda a chapa, especialmente com solda laser, com a boa qualidade de corte a transição da chapa de maior espessura para a de menor espessura torna-se suave, garantindo então uma zona fundida de não mais que 1mm e o sucesso da união. Desta maneira consegue-se unir materiais com diferentes propriedades mecânicas e composição química /7.2/.

Para caracterizar as propriedades da zona soldada do conjunto, foi medida a microdureza da seção soldada, indo desde o MB até atravessar a zona onde se encontra o cordão de solda. O equipamento utilizado para medir a microdureza da junta soldada foi um microdurômetro da marca Bueller modelo Micromet 2001. O microscópio óptico utilizado para capturar as imagens da junta com os pontos de indentação oriundos do teste de microdureza foi um Olympus modelo BX 51 M. As figuras 7.11 e 7.12 ilustram a distribuição dos pontos medidos ao longo da seção transversal do aço ST 05 e do aço ZStE 220P e a identificação das espessuras dos materiais utilizados para a confecção da geratriz. Nota-se também a variação da geometria dos pontos de indentação, que variam de tamanho a medida que se aproximam do ponto de junção da peça caracterizando uma dureza maior na zona fundida.

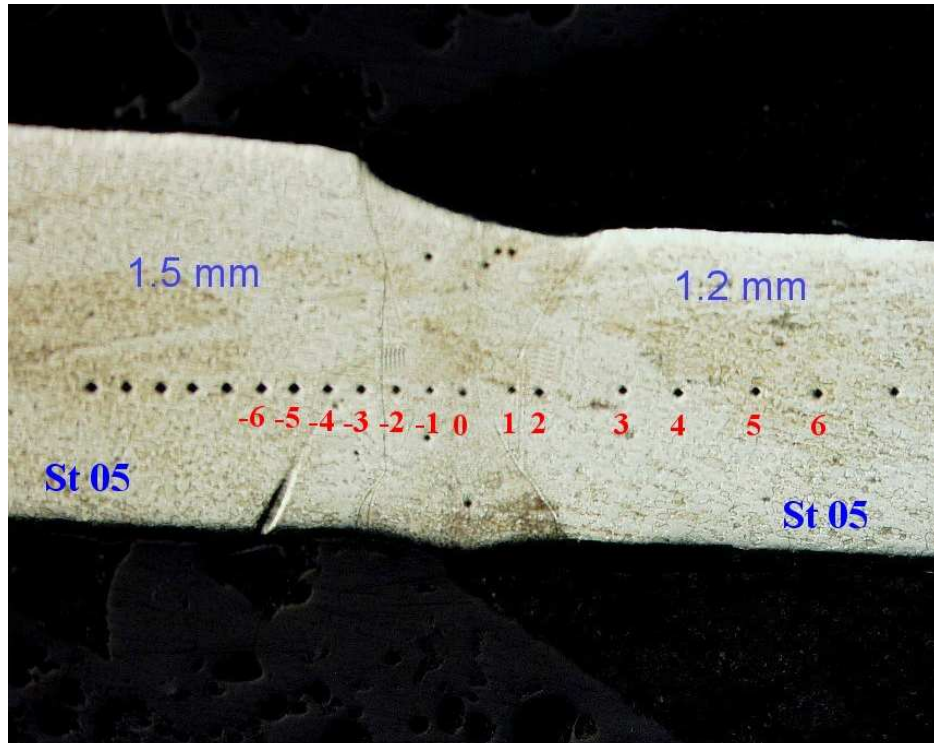


Figura 7.11 – Pontos de indentação para mensurar a microdureza do aço ST 05.

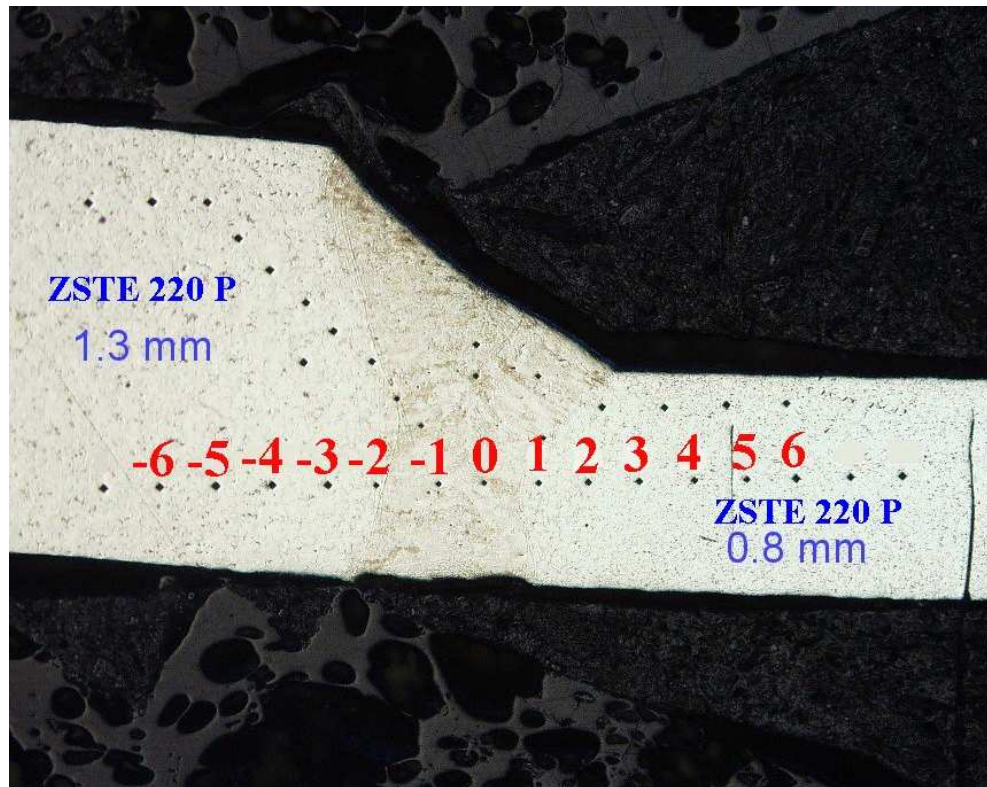


Figura 7.12 – Pontos de indentação para mensurar a microdureza do aço ZStE 220P.

O tipo de microdureza utilizado para mensurar os valores da dureza do MB e da junta soldada foi Vickers com um penetrador padronizado em forma de diamante de base quadrada respeitando o ângulo de 136° entre as faces opostas. A carga do penetrador utilizada foi de 100 gramas. As figuras 7.13 e 7.14 relacionam o valor da microdureza medida com o ponto localizado na junta soldada do MB e na zona de fusão.

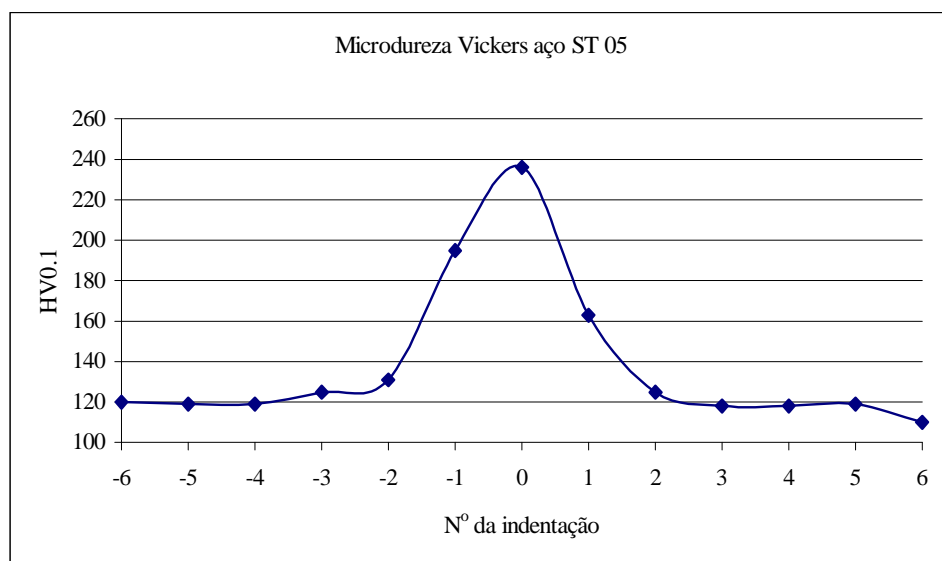


Figura 7.13 – Gráfico representando a distribuição da dureza ao longo da seção transversal do aço ST 05.

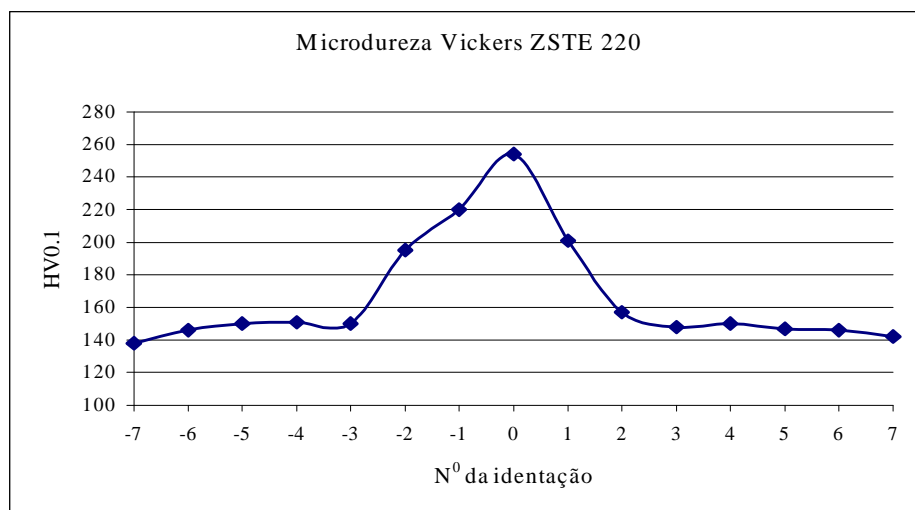


Figura 7.14 – Gráfico representando a distribuição da dureza ao longo da seção transversal do aço ZStE 220P.

Nota-se através das figuras 7.13 e 7.14 que na zona de fusão e na ZAC a dureza é aproximadamente o dobro do que a medida no MB. Segundo Machado /7.5/ a máxima dureza da ZAC ocorre na primeira região (crescimento de grão). Suban et. al /7.2/ afirma que a variação de dureza não é um bom dado para medir a qualidade da solda, mas dá uma boa aproximação da ductilidade e da conformabilidade da junta soldada.

Este efeito é causado pela mudança microestrutural que ocorre na chapa durante o processo de junção devido as altas taxas de temperatura do processo de solda a laser com um resfriamento rápido e induzido que a junta é submetida logo após o processo de soldagem. Também se justifica estas medidas de dureza pela composição química dos materiais, espessura e a velocidade de soldagem. Conforme conclui Waddell e Wallach /7.3/ um dos principais fatores que controlam a dureza da solda é a quantidade de carbono equivalente e de elementos de liga presente no MB, ou seja, aços com mesma tensão de escoamento podem resultar em uma diferença significativa na conformabilidade dependendo somente da sua composição química. Outra conclusão relevante para o aumento da dureza na junção se refere as condições de soldagem, tais como velocidade, potência e o tipo de soldagem que está sendo utilizado para unir as peças.

7.4 Avaliação da Conformabilidade Através da CLC

Para determinar o comportamento mecânico de chapas finas destinadas a produção de peças estampadas, normalmente são executados inúmeros ensaios simulativos padronizados (Erichsen, Swift, Dobramento). No entanto eles não são capazes de definir com exatidão o comportamento do material na produção industrial, pois seguem um modelo único de deformação/7.4/, já que as peças industriais apresentam um modo bastante complexo e variado de deformação ao longo do processo de estampagem.

As CLC consistem em um método de ensaio cujo principal objetivo é aproximar a comparação entre as deformações obtidas através de ensaios de laboratório com as sofridas pelo material durante a produção industrial.

Para determinar a CLC dos materiais em estudo foi necessário identificar os diferentes níveis de deformação que ocorrem na superfície da chapa. Para isso a geometria dos corpos de prova utilizados foi o que Hennig /6.3/ propôs em seu trabalho, que consiste numa série de oito corpos de prova em que são variados a largura e o raio de entalhe. A utilização de corpos de prova com diferentes larguras e raios de entalhe permite a obtenção de diferentes pontos na CLC, pontos estes que cobrem os campos referentes ao embutimento profundo, deformação plana e estiramento. A figura 7.15 ilustra uma família (composta de oito corpos de prova) após o ensaio, indicando o sentido da deformação que corresponde para cada geometria de corpo de prova. Para caracterizar este estado de deformação os corpos de prova foram usinados conforme é mostrado na figura 6.1. O cordão de solda faz uma separação simétrica do tamanho do corpo de prova (100 mm para cada lado), garantindo desta maneira que o cordão de solda esteja exatamente no meio do punção no momento dos ensaios para determinação das CLC.

A seguir será feita uma descrição dos equipamentos utilizados para levantamento da CLC de cada material, da maneira como foi feita a leitura das deformações e dos resultados obtidos no ensaio.

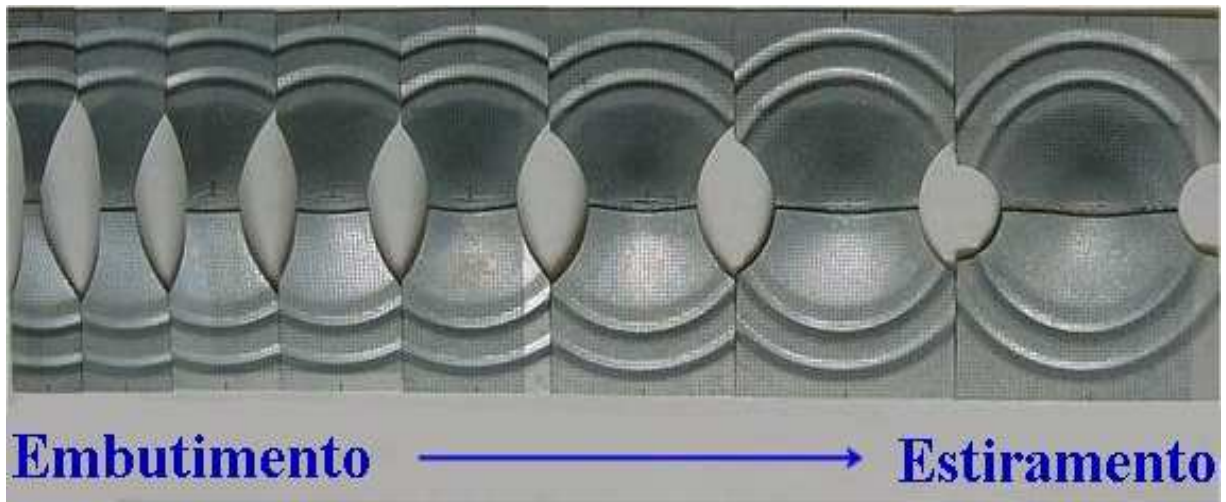


Figura 7.15 – Corpos de prova após ensaio Nakajima utilizados para levantamento da CLC de TWB indicando o sentido de deformação.

7.4.1 Metodologia de Ensaio

Os ensaios para a obtenção da CLC dos corpos de prova soldados foram executados em uma prensa hidráulica da marca FKL. Junto foi montado todo o ferramental necessário para a conformação dos corpos de prova. O ferramental era composto por um porta ferramentas, um prolongador dotado de “strain-gauges” para medir a força aplicada pela prensa hidráulica, prensa-chapas com “draw-beads” para evitar que o material escoasse durante a realização dos ensaios, um punção de geometria elipse rasa de raio 50 mm, uma célula de carga localizada sob o punção para mensurar a força de estampagem na hora do ensaio, um disco de poliuretano para evitar o atrito entre o punção e a chapa e distribuir melhor as tensões na superfície da chapa, evitando desta maneira a influência do raio do punção e consequentemente um colapso prematuro do material.

A figura 7.16 ilustra o corpo de prova antes da execução do ensaio e como ele era posicionado no prensa-chapas. Para garantir uma boa centragem do corpo de prova no prensa-chapas foi feito uma marca que o dividia simetricamente na largura, então esta marca era alinhada com outra existente no prensa-chapas o que garantia a centragem do corpo de prova. A figura ilustra apenas uma geometria do corpo de prova utilizado.



Figura 7.16 – Centragem do corpo de prova antes do ensaio.

Na figura 7.17 é possível visualizar o conjunto de ferramentas utilizado no ensaio e o corpo de prova deformado após o ensaio realizado.

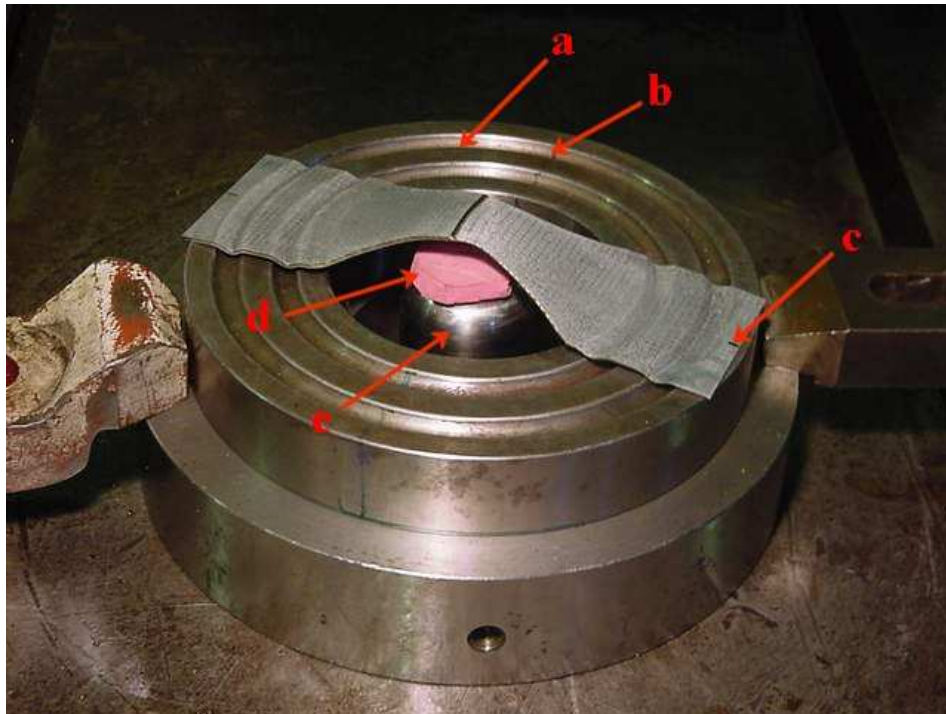


Figura 7.17 – Conjunto ferramenta - material utilizado no ensaio com identificação dos itens.

Na figura 7.17 também estão identificados os seguintes itens, a saber:

- a) prensa-Chapas com “draw-beads”;
- b) marcação no prensa-chapas que divide simetricamente a ferramenta em quatro partes;
- c) marcação no corpo de prova para referência de simetria na largura;
- d) espaçador de Poliuretano;
- e) punção elipse rasa de diâmetro 50 mm.

O ensaio era conduzido da seguinte maneira: com o corpo de prova centrado e posicionado adequadamente baixava-se a parte superior do prensa-chapas até que o valor da força indicasse a força pré determinada, que era na ordem de 5 kN, força esta suficiente para evitar o escoamento do material durante o ensaio junto com a ação dos “draw-beads”. Após aplicação da força de retenção e sua estabilização, iniciava-se o ensaio. Com uma velocidade de avanço reduzida e constante do punção em direção ao corpo de prova, o ensaio era conduzido até o aparecimento da fissura na superfície da chapa, o que caracterizava o fim do ensaio, conforme é mostrado na figura 7.18.

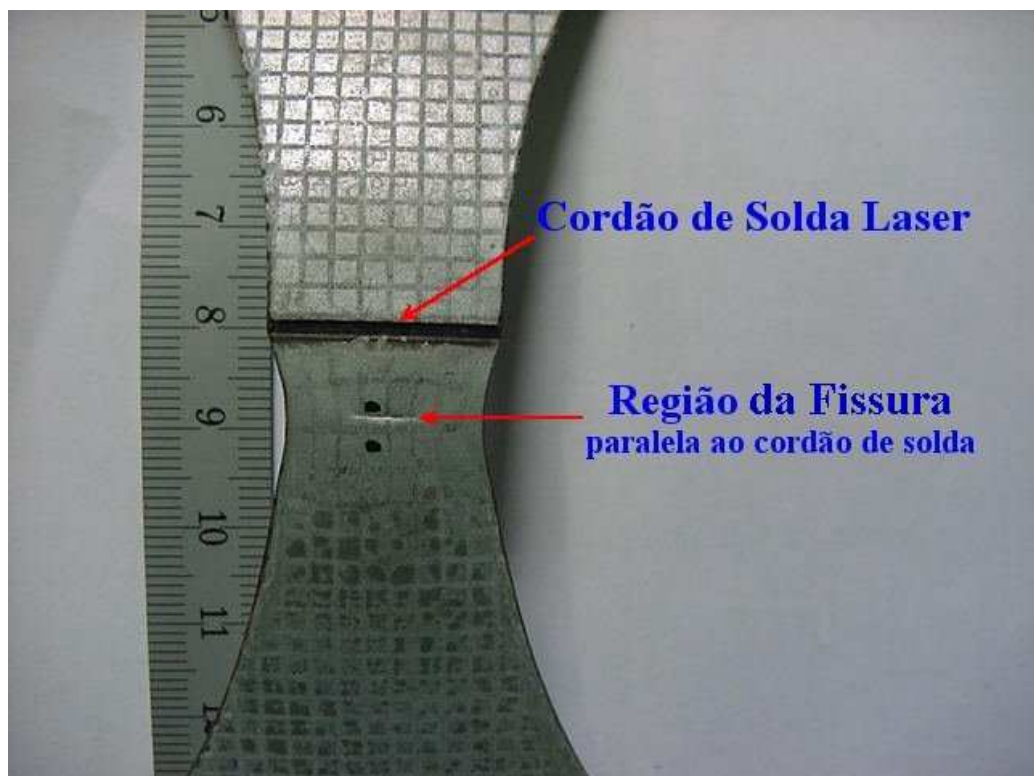


Figura 7.18 – Tipo de fissura nos corpos de prova do ensaio Nakajima modificado.

A fissura que ocorreu em todos os corpos de prova do ensaio Nakajima foi paralela ao cordão de solda, conforme já verificado anteriormente no ensaio de tração. A figura 7.18 mostra claramente a malha deformada na superfície da chapa perto da região da fissura. A malha quadrada deformada se transforma em um retângulo que permite determinar as deformações máximas e mínimas pelo maior e menor lado do retângulo. As deformações assim mensuradas são colocadas em um gráfico, tendo como eixos um sistema de coordenadas ϕ_1 e ϕ_2 . Para plotar o gráfico da CLC foram medidos os quadrados onde a fissura passa no meio e aqueles onde estão próximos a falha. Uma vez medida estas deformações (tanto para a célula rompida quanto para a célula boa) elas foram inseridas em um gráfico, onde irão constituir uma nuvem de pontos distribuídos ao longo do gráfico.

As figuras 7.19 e 7.20 mostram a CLC dos materiais Tailored Welded Blanks ST 05 e ZStE 220 P respectivamente.

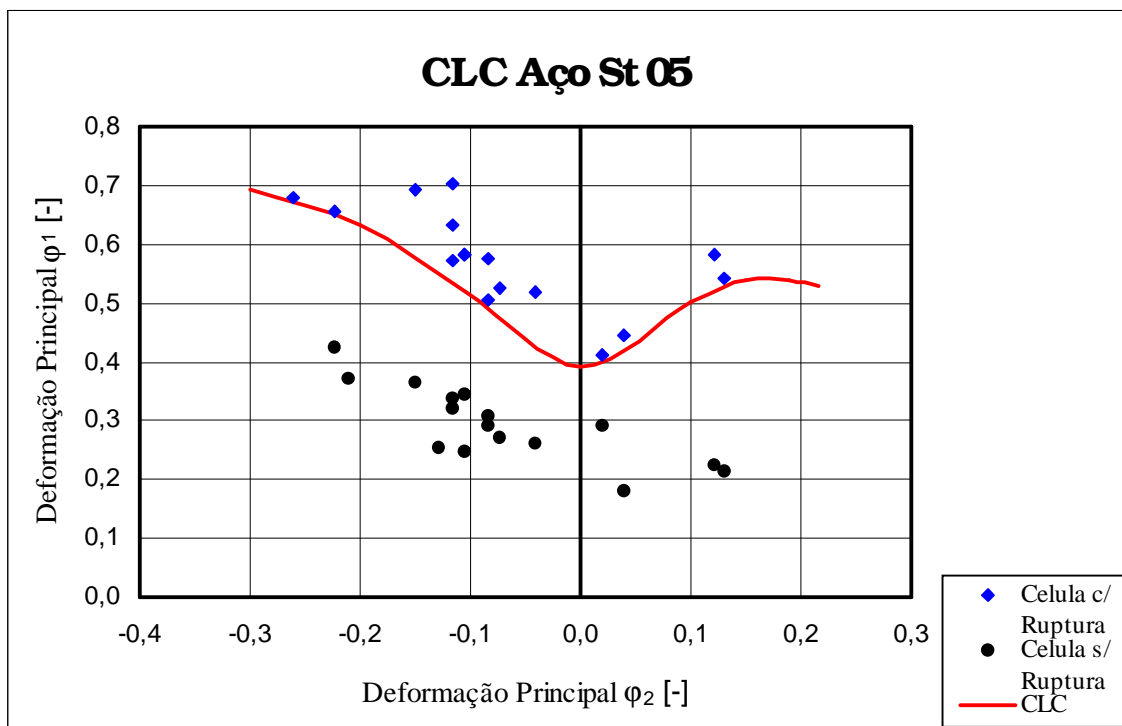


Fig. 7.19 – CLC correspondente ao material TWB do aço ST 05.

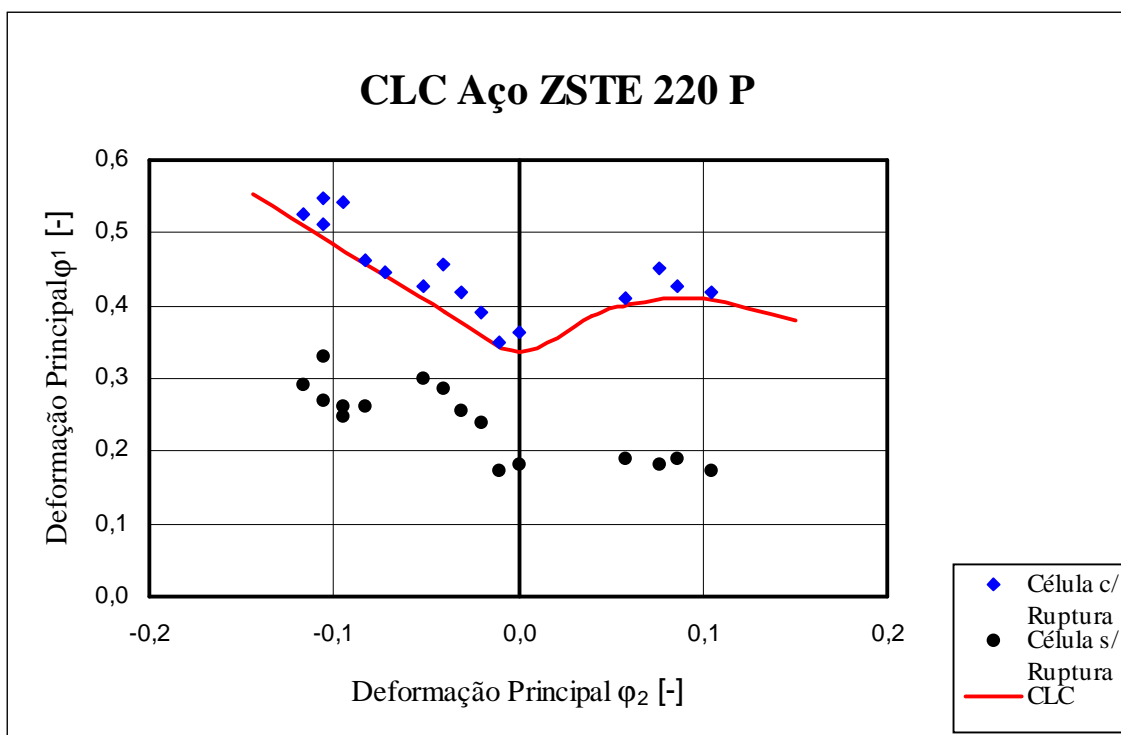


Fig. 20 – CLC correspondente ao material TWB do aço ZStE 220P.

A nuvem dos valores de ruptura corresponde aos pontos assinalados em triângulos, e a nuvem dos valores “bom” corresponde aos pontos assinalados em círculos. Para traçar a CLC a ruptura do material, foi traçada uma curva posicionado-a logo abaixo da nuvem correspondente aos valores de ruptura.

O gráfico da CLC é dividido em duas zonas distintas: a zona acima da curva de conformação e a zona abaixo da curva de conformação. A zona acima da CLC é considerada zona de ruptura, ou seja, qualquer que seja a deformação aplicada que ultrapasse esta linha o material com certeza irá falhar. A zona abaixo da CLC é considerada zona livre de falhas. Qualquer que seja a deformação mensurada de uma parte estampada que venha a cair nesta região é alcançado o sucesso da conformação.

As CLC plotadas correspondem ao conjunto soldado e não somente a chapa mais fina, onde ocorreram as fraturas. Lange /4.1/ afirma que a espessura da chapa exerce uma influência na construção da CLC. Se por hipótese é traçado a CLC dos materiais separadamente, a curva mais para cima corresponderia a do material de maior espessura, e a curva mais para baixo a do material de menor espessura. Segundo Lee /5.9/, há uma interação entre os materiais soldados na hora da sua conformação. Conforme foi verificado nos ensaios

de tração que o cordão de solda exerce uma influência nos resultados dos ensaios, suponha-se que para traçar as CLC dos materiais soldados o cordão de solda também exerça influência.

Sendo assim, é provável que a Curva Limite de Conformação plotada para os materiais soldados (fig. 7.19 e 7.20) corresponde a uma curva que estaria localizada entre as curvas resultantes do ensaio feito separadamente do material de maior e menor espessura. Desta maneira é provável que a CLC do material soldado não deve estar abaixo da curva do material mais fino, pois não seria vantajoso unir chapas com o objetivo de formar geratrizes visando a redução de peso e melhorando as propriedades mecânicas, já que a geratriz da chapa mais fina teria uma capacidade maior de conformação devido as deformações medidas serem maiores.

Nas tabelas 7.4 e 7.5 são apresentados os resultados correspondentes aos valores das deformações determinadas no LdTM para as geratrizes soldadas dos materiais ST 05 e ZStE 220 P respectivamente.

Tabela 7.4– Valores referentes a ϕ_2 e ϕ_1 que originaram a curva da figura 7.19.

ϕ_2	ϕ_1 (ruptura)
- 0,30	0,69
- 0,20	0,63
- 0,10	0,52
0,00	0,39
0,10	0,53
0,15	0,54
0,19	0,54
0,22	0,53

Tabela 7.5– Valores referentes a ϕ_2 e ϕ_1 que originaram a curva da figura 7.20

ϕ_2	ϕ_1 (ruptura)
- 0,14	0,55
- 0,10	0,48
- 0,04	0,39
0,00	0,34
0,04	0,39
0,06	0,40
0,10	0,41
0,15	0,38

São valores de deformação que se por hipótese forem exportados para um programa específico de simulação de chapas servem como valores limites para os resultados da simulação de estampagem, isto é, suponha-se que se esteja simulando um processo onde ocorra um campo de deformações que abrange os campos referentes ao estampagem profunda, deformação plana e estiramento, estes valores iriam garantir que os resultados matemáticos obtidos pelo programa estejam dentro da realidade física garantindo o sucesso da simulação.

Segundo Evangelista /7.6/ algumas propriedades do material como grau de encruamento, taxa de deformação e anisotropia influenciam na distribuição de deformações durante um processo de estampagem. Para alcançar valores mais elevados dos níveis de deformação se deve levar em conta alguns fatores tais como: o material empregado e suas ligas, espessura da chapa, tratamento térmico, n , r , taxa de deformação, inclusões e defeitos presentes na chapa. As combinações das deformações máximas e mínimas é o que limita a conformação de um material antes da ocorrência de estirções e fraturas.

8. CONCLUSÕES

- O ensaio de tração uniaxial serviu para caracterizar as propriedades intrínsecas dos materiais investigados. Através deste ensaio foram caracterizados os LE, LR, n e r dos materiais.
- Os resultados apresentados para o LE e o LR das chapas TWB levantadas no ensaio de tração foram um pouco superior daqueles levantados para o MB. Há duas hipóteses para este resultado: Uma é a presença do cordão de solda que retém o material no início do ensaio fazendo com que o material mais fino atinja primeiro a deformação plástica, enquanto que o material mais grosso ainda se encontra em uma deformação elástica. Uma outra hipótese seria de que o material mais fino por se deformar antes que o material mais grosso atinja um grau de encruamento maior, aumentando a resistência ao escoamento e consequentemente elevando os valores para LE e LR.
- Nos ensaios de tração do material TWB, a fratura sempre ocorreu no lado da chapa de menor espessura, paralelo ao cordão de solda e perpendicular ao sentido da força aplicada. Este tipo de fratura ocorre quando a força é aplicada perpendicularmente ao cordão de solda.
- Foi observado no cordão de solda uma região difusa com estruturas lamelares. Como a dureza nesta área é muito maior que no material base, a fratura sempre ocorreu numa região adjacente ao cordão de solda localizado no material mais fino.
- Para unir chapas de diferentes espessuras a aresta da chapa deve ser a mais reta possível, pois desta maneira se elimina os defeitos que se formam quando os materiais são soldados formando uma geratriz. Se a aresta de corte não for boa a união estará comprometida e será uma região propícia a ocorrência de falhas quando a peça for estampada.
- O teste da microdureza mostrou que a dureza no ponto da junção era praticamente o dobro da dureza medida no MB. Este efeito é causado pela mudança estrutural que ocorre na chapa devido à alta taxa de resfriamento que a junta sofre logo após a soldagem por laser.

- As curvas Limite de Conformação traçadas através da leitura das deformações maiores (ϕ_1) e menores (ϕ_2) é um dos métodos mais confiáveis para se avaliar o desempenho dos materiais quanto ao grau de deformação em uma linha de produção.
- As CLC ajudam a apontar soluções e a identificar pontos nas matrizes de estampagem onde o material sofre uma deformação crítica, ou seja, permite ter uma idéia do grau de segurança na fabricação de uma peça.
- O critério utilizado para o levantamento da CLC a estrição foi a de escolher uma célula onde a ruptura passasse no seu centro, o que corresponde as deformações de uma falha. A uma célula de distância da célula rompida era medida as deformações de uma célula “boa”, o que garante uma nuvem de pontos na curva considerado área segura. Com isso a CLC pode ser dividida em 2 zonas: a zona acima da linha de conformação considerada zona de ruptura, onde certamente ocorrerá falha, e a zona segura abaixo da linha de conformação, onde se tem o sucesso de uma peça estampada.
- As CLC levantadas para materiais TWB com diferentes espessuras de mesmo material correspondem às geratrizes soldadas. É possível que a CLC do conjunto soldado esteja localizado entre a curva do material de maior espessura e do material de menor espessura. Espessura maior tende a levar a curva para cima, e espessura menor tende a levar a curva para baixo.
- O método Nakajima se mostra um método prático e rápido para simular as deformações de um material e determinar a sua CLC quando comparado com outros métodos para obter a CLC, já que este método de ensaio consiste em variar somente os corpos de prova.
- Os valores de deformação medidos podem alimentar programas específicos de simulação proporcionando desta forma valores que garante uma peça livre de falhas catastróficas.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Construir a Curva Limite de Conformação de cada material base nas respectivas espessuras e posteriormente comparar com a curva levantada no trabalho, observando a influência da espessura na construção da curva;
- Variar a geometria do punção para definir a Curva Limite de Conformação utilizando punção hemisférico e comparar com a curva obtida pelo o punção elipse rasa;
- Simular o embutimento dos materiais com as deformações medidas;
- Com outros tipos de aços utilizados pela industria automobilística (TRIP, DP, BH) na forma de TWB, montar a CLC correspondente;
- Definir as deformações de uma peça industrial e comparar com as deformações levantadas em laboratório.

10. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- /1.1/ Saunders, F.I; Wagoner, R.H. **“Forming of Tailored Blanks”** Physical Metallurgy and Materials Science v27A n9 Setembro 1996 p.2605-2616
- /1.2/ Hauger, A. **“Flexibles Walzen als kontinuierlicher Fertigungsprozess für Tailor Rolled Blanks”** Alemanha, 1999 161p. Tese (Doutorado em Engenharia) RWTH-Aachen
- /1.3/ Tourrucôo, M. **“Estudo de Chapas de Aço de elevada Resistência para a Industria Automobilística”**. Porto Alegre, 1999. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFRGS.
- /1.4/ **“Forum – Technische Mitteilungen Thyssenkrupp”** edição inglesa, 1/1999 p.2-67
- /1.5/ **“Tailor Welded Blank Design and Construction Manual”** A/SP Technical Report-1995 p.2-78
- /1.6/ Taiss, E. **“A trajetória do Programa ULSAB – Ultra light Steel Auto Body e o Desenvolvimento da Usiminas no Atendimento ao Setor Automobilístico”** V Conferência Nacional de Conformação de Chapas. Gramado, 2002 p. 163-182
- /1.7/ Bernadskii, V. N. **“Thin-Sheet welded Tailored Blanks in Automotive Industry”** Welding International 15, 2001 p.898-906
- /2.1/ Jaroni e Dohr **“Tailored Blanks- von der Marktnische zur Weltweiten Produktion”** Stahl und Eisen 118 (1998) Nr.8 p.35-38
- /2.2/ Dittlo et. al.; **“Weight Reduction and Safety Improvement Associated with the Use of Laser Welded Tailored Blanks”** The European Automotive Industry Meets The Challenges of the Year 2000 – 5th International Congress Strassborg, 21-23 Junho 1995, pág 1-14
- /2.3/ <www.thyssenkrupp.com/ml/search/index.html/tailored_blanks> Acesso em: 28 Agosto 2002

/2.4/ Schulz, E. **“Leichtbau von Fahrzeugen mit innovativen Stählen”** Stahl und Eisen 117 (1997) Nr.10 p. 37-46

/2.5/ Auto/Steel Partnership, Tailored Blank Project Team, 2000 <<http://www.a-sp.org/database/custom/twb/TWBApp.pdf>> Acesso em: 23 Maio 2002

/2.6/ <http://www.soudronic.com/automotive/231_linear_tailored.html> Acesso em: 02 Setembro 2002

/2.7/ Pallet, R.J.; Lark, R.J. **“The use of Tailored Blanks in the Manufacture of Construction Components”** Journal of Material and Processing Technology N^o 117, 2001 p.249-254

/2.8/ Bölke, P. **“Entwicklung der Flexiblen Walztechnologie und Anschliessender Weiterverarbeitungsprozesse bis zur Serienreife”** Final Report BMBF (Federal Ministry for Education and Research), 2001 p.126-139

/2.9/ Koop, R.; Hohmeir, P.; Wiedner, C. **“Deep Drawing and Stretch Forming of Geometrically Inhomogeneous Lightweight Construction Components”** RWTH-Aachen, Alemanha, 2000 págs:1-4

/2.10/ Hauger, A.; Kopp, R. **“Flexibles Walzen – Auf dem Sprung zum Industriellen Einsatz”** Alemanha, 2000 págs.3.3-1 – 3.3-6

/2.11/ Prange, W. & Wonnenberger, I. & Jaroni, U. & Mertens, Axel & Auhage, T. – **“Plant Technology and Applications for Tailored Blanks and Thyssen Engineered Blanks”**, Technische Mitteilungen Thyssenkrupp-1/1999, p. 31- 35.

/2.12/ ULSAC Program Results Maio 2001 www.ulsac.org Acesso em: 10 de Julho.

/2.13/ <http://www.usinorauto.com/services/assembleage5.htm>

/2.14/ Magain, P.; Dawance, J.; Delfanne, S.; Chamont, B.; Fournet, A. **“The Patchwork Technique for Proper Material Placement on Panels: Industrial Application on the new Peugeot 206”** SAE Technique Papers Detroit, MI N^o 982402 1998 p.1-6

/3.1/ Mielnik, E.M., **“Metalworking Science and Engineering”** United States: McGraw-Hill, 1991 p. 779-871

/3.2/ Borsoi, C.A.; **“Determinação e otimização de Geratriz para o Processo de Estampagem”** Porto Alegre, 2001. 115p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFRGS.

/3.3/ Garcia, A.; Spim, J.; Santos, A. **“Ensaio dos Materiais”** Livros Técnicos e Científico editora Rio de Janeiro- Brasil, 2000

/3.4/ Doege, E. Dröeder, K. Griesbach, B.; **“On the development of new characteristic values for the evaluation of sheet metal formability”** Journal of Materials Processing Technology N^o 71 1997 p.152-159

/3.5/ Mesquita, A.; Rugani, E. L.; Lucas, L. **“Estampagem dos aços Inoxidáveis”** Núcleo Inox editora press grafic São Paulo- Brasil, 1997

/4.1/ Lange, K. **“Handbook of Metal Forming”**, Estados Unidos: McGraw-Hill, 1985 pág. 18.3-18.17

/4.2/ Schuler, **“Metal Forming Handbook”**, Springer-Verlag Heidelberg, Alemanha 1998.

/4.3/ Renó, R. T., **“Conformabilidade e Textura de Chapas Finas a Frio de Aço Acalmado ao Alumínio”** São Paulo, 1985. p. 207 Dissertação (Mestrado em engenharia) – Escola Politécnica da USP

/4.4/ Schaeffer, L. **“Conformação Mecânica”**, Imprensa Livre Editora, Porto Alegre, Brasil 1999

/4.5/ König, W.; Klocke, F. **“Fertigungsverfahren Blechbearbeitung Band 5”** , VDI Verlag Düsseldorf-Alemanha, 1995

/4.6/ Nakajima, K., Kikuma, T., Hasuda, K.; **“Study on the Formability of Steel Sheets”**
Yawata Technical Report N^o 164 1968 p.111-124

/4.7/ Metals Handbook, **“Sheet Formability Testing”**, Mechanical Testing – American Society for Metals (ASM), Vol. 8, Edição 9, 1985 p. 547-570.

/5.1/ Ferran, E. M.; **“Curvas Limites de Conformação: Aplicação aos Processos de Estiramento e estampagem”** Metalurgia vol.29 N^o 192 Nov. 1977 p.697-704

/5.2/ Carr, A. R. **“Forming Limit Diagrams Of Aluminium Alloys: Determination, Their Applications to Press Forming and the Influence of the Material Surface”** Alcan International Banbury, Inglaterra, 1999

/5.3/ Hasek, V. **“Anwendung von Grenzformänderungsschaubildern”** Industrie Anzeige 99. Jg. Nr. 20 1977 p. 343-347

/5.4/ Keeler, S. P.; **“Understanding Sheet Metal Formability”** Part 4- Predicting Forming Limits, Machinery, 1968 p. 92-99

/5.5/ Goodwin, G.M **“Application of Strain Analysis to Sheet metal Forming Problems in the Press Shop”** La Metallurgia, 60 (1968) p. 767-774

/5.6/ Cayssials, F. **“Specific Formit Limits Curves for Tailored Blanks”** 40th Mechanical Working and Steel Processing – ISS Technical Paper Outubro, 1998 p.1-6

/5.7/ Azuma, K et all. **“Sheet Metal in Forming Processes”** 16th Biental Congress, ASM Congress, Medtals Park, OH, 1988 p.205-215

/5.8/ Greisert, C. et al. **“Forming Behaviour of Tailored Rolled Blanks”** Inovations in Processing and Manufacturing of Sheets Materials – The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)-2001

/5.9/ Lee T.C et al. **“Tailor-Welded Blanks of Different Thickness Ratios Effects on Forming Limit Diagram”** Journal of Materials Processing Technology N^o 132 2003 p. 95-101.

/6.1/ <http://www.usiminas.com.br/produtos/> Acesso em: 10 de maio 2002.

/6.2/ <www.csn.com.br/produtos> Acesso em: 11 de Maio de 2002

/6.3/ Hennig, R.; **“Vergleichende Untersuchungen zur numerischen Simulation des Tiefziehens nichtzylindrischer rotationssymmetrischer und nichtrotationssymmetrischer Teile”** Alemanha, 1997 pág:131 Dissertação (Doutorado em Engenharia) Universidade Técnica de Dresden

/6.4/ Klein et. all. **“Curvas Limite de Conformação”** Ipatinga-MG, 1981 Trabalho Técnico - Centro de Pesquisas – USIMINAS- p.54

/6.5/ Lachmann. L.; **“The measurement of strains and stresses from three-dimensional deformed surfaces in sheet metal forming”** Technische Universität Dresden – Fakultät Maschinenwesen Forschungszentrum, Technische Innenmitteilungen Alemanha, 1999 p.1-8

/7.1/ Cada, R.; **“Comparison of formability of steel strips, which are used for deep drawing of stamping”** Journal of Materials Processing Technology N^o 60 1996 p.283-290

/7.2/ Sulan, M.; Kampus. Z.; Tusek, J.; **“Welding of Tailored Blanks of Different Materials”** Journal of Materials Processing Technology N^o 119 2001 p.180-184

/7.3/ Wadell, W.; Wallack, R.; Jackson, S.; **“The Influence of the Weld Structure on the Formability of Laser Welded Tailored Blank”** Society of Automotive Engineers Inc. – SAE N^o 982396 1998 p.257-268

/7.4/ Cervelin, F.; Klein, L.N.T.; **“Conformação de Chapas Finas”** Metalurgia – ABM vol. 39 N^o 307 1983 p.311-317

/7.5/ Machado, I.G.; **“Soldagem por Laser de Tailored Blanks”** V Conferência Nacional de Conformação de Chapas. Gramado, 2002 p. 35-45

/7.6/ Evangelista, S. H.; **“Diagramas de Limite de Conformação Aplicados à Análise por Elementos Finitos de um Processo de Estampagem de Chapas Metálicas”** São Carlos, 2000. 154p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

/7.7/ Adonyi, Y.; Milián, J. L.; **“Formability of Tailored Blanks for Automotive Applications”** 34th MWSP CONF. PROC., ISS – AIME Vol. XXX 1993 p.83-91

11. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- 1- Norma Técnica DIN 10002 para ensaio de tração, versão em inglês 1991 p.401-421
- 2- Norma Técnica DIN 50101 para ensaio Erichsen, versão em alemão 1979
- 3- Norma Técnica SEW 1125 para cálculo do grau de encruamento, versão em alemão 1984 p.2-3
- 4- Norma Técnica SEW 1126 para cálculo do índice de anisotropia, versão em alemão 1984 p.2-3
- 5- Norma Técnica NBR- 6152 para ensaio de tração, versão português 1992 p.13
- 6- Norma Técnica ISO12004 para determinação das Curvas Limites de Conformação de materiais metálicos, versão em inglês, 1ª edição 1997 p.1-6
- 7- Manual de Instruções do software Spider/Catman
- 8- Rossi, M.; **“Estampado em Frio de la Chapa”** 8ª edición 1966 p.560
- 9- Spim, J.A; Santos, C.A; **“Metalografia”** Porto Alegre”; LAFUN-UFRGS, 2002 p.143 (Caderno Técnico)

ANEXOS

Tabela para calcular o índice de anisotropia.

Material: Aço ZStE 220 P

Espessura: 0,8 mm

Data: 03/02/03

		0°	45°	90°
b ₀	1	19,69	19,93	19,67
	2	19,70	19,93	19,67
	3	19,70	19,94	19,68
	média b ₀	19,69	19,93	19,97
	l ₀	50,00	50,00	50,00
a ₁	1	17,40	17,72	17,81
	2	17,77	17,82	17,77
	3	18,11	18,07	17,92
	média b ₀	17,63	17,87	17,83
	l ₁	59,95	60,05	59,05
	φ _b	-0,103	-0,110	-0,098
	φ _l	0,181	0,183	0,182
	r	1,32	1,50	1,16
	rm	1,37		
	Δr	-0,26		

Tabela para calcular o índice de anisotropia.

Material: Aço ST 05

Espessura: 1,2 mm

Data: 16/10/03

		0°	45°	90°
b ₀	1	19,93	19,74	19,75
	2	19,89	19,69	19,9
	3	19,87	19,70	19,71
	média b ₀	19,89	19,71	19,72
	l ₀	50,50	50,00	49,80
b ₁	1	17,72	17,60	17,33
	2	17,67	17,57	17,34
	3	17,66	17,58	17,37
	média b ₁	17,68	17,59	17,34
	l ₁	60,55	60,05	59,90
	φ _b	-0,11	-0,11	-0,12
	φ _l	0,18	0,18	0,18
	r	1,76	1,60	2,26
	rm	1,81		
	Δr	0,41		