

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Estudo da Conformabilidade na Hidroconformação de Recortes de Chapas de Aço Soldados a Laser

Autor: Renato Caldin

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Estudo da Conformabilidade na Hidroconformação de Recortes de Chapas de Aço Soldados a Laser

Autor: Renato Caldin

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado Acadêmico apresentada à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Campinas, 2006.
S.P. – Brasil.**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

C127e Caldin, Renato
 Estudo da conformabilidade na hidroconformação de
recortes de chapas de aço soldados a laser / Renato
Caldin. --Campinas, SP: [s.n.], 2006.

 Orientador: Sérgio Tonini Button
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

 1. Juntas soldadas. 2. Conformação de metais. 3.
Trabalhos em chapa de metal (Fabricação). 4. Chapas de
aço – Processo a frio. 5. Estampagem (em metal). I.
Button, Sérgio Tonini. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.
Título.

Titulo em Inglês: Study on the formability in hydroforming steel sheets tailored welded blanks.

Palavras-chave em Inglês: Tailored welded blank; Hydroforming; Formability; Deep drawing.

Área de concentração: Materiais e processos de fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Eugênio José Zoqui e Paulo Victor Prestes Marcondes

Data da defesa: 05/06/2006

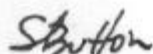
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Estudo da Conformabilidade na Hidroconformação de Recortes de Chapas de Aço Soldados a Laser

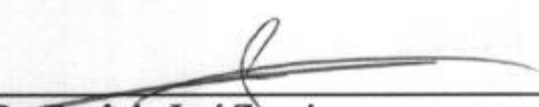
Autor: Renato Caldin

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button



Prof. Dr. Sérgio Tonini Button

Instituição: Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP



Prof. Dr. Eugênio José Zoqui

Instituição: Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP



Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes

Instituição: Universidade Federal do Paraná – UFPR

Campinas, 05 de junho de 2006.

Dedicatória:

A Deus que me acompanha e guia em todos os momentos da minha existência proporcionando uma vida em plenitude.

A Simone Souza que sempre me apoiou em todas as decisões, me incentivando, ajudando e compartilhando momentos difíceis com muito companheirismo, dedicação e carinho.

Aos meus pais João (*in memoriam*) e Rosa pelo carinho e amor ilimitado sempre despendido, me incentivando em todas as novas incursões.

Aos meus irmãos Maria Regina, Roberto, José Luis, Gilberto e Eliane que sempre me apoiaram nos momentos mais difíceis da minha vida, me auxiliando a superar todos os obstáculos.

Agradecimentos:

Ao Prof. Dr. Sérgio Tonini Button, mais que um orientador, um amigo, que sempre se dispôs a indicar os melhores caminhos a serem seguidos, nos aspectos profissionais, intelectuais e pessoais, direcionando sempre para soluções éticas.

A Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) – UNICAMP, pela oportunidade de desenvolvimento profissional.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio financeiro que permitiu a boa execução desta pesquisa.

Aos professores do Departamento de Materiais (DEMA) e Projetos (DPM) da FEM, pela convivência, formação e disponibilidade a qualquer tempo.

Aos senhores Cláudio Aparecido Pradella e Célio Caminaga que me auxiliaram no desenvolvimento das pesquisas com sugestões e idéias que tornaram possível a evolução e conclusão deste trabalho.

Aos amigos Mario Nunes da Silva e Evandro Cardoso da Silva pela ajuda, apoio e discussão dos resultados, que sempre colaboraram para o enriquecimento deste trabalho.

Ao técnico do Laboratório de Caracterização de Materiais – DEMA – FEM, José Luis pela ajuda e disponibilidade sempre demonstrada.

Ao secretário do DEMA – FEM, Daniel pela eficiência prestada sempre que solicitado.

Ao amigo Jonathas da empresa Ferrolene, pela receptividade e disposição de auxiliar no desenvolvimento deste trabalho cedendo os “*blanks*” soldados para a realização dos ensaios.

Ao amigo João da empresa Micro Millo, que não mediu esforços para buscar soluções referentes aos sistemas de vedação.

À empresa Volkswagen do Brasil que nos abriu as portas para o desenvolvimento do tema deste trabalho.

Resumo

CALDIN, Renato, *Estudo da Conformabilidade na Hidroconformação de Recortes de Chapas de Aço Soldados a Laser*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 121 p. Dissertação (Mestrado).

Em virtude do número crescente de veículos automotores e uma legislação ambiental cada vez mais rigorosa, as indústrias automobilísticas e os centros de pesquisas avançados buscam desenvolver novos materiais e processos de fabricação que visam à produção de peças com maior resistência mecânica, melhor conformabilidade do material e a redução das espessuras dos materiais empregados na fabricação, sem comprometer a rigidez e estabilidade estrutural das carroçarias. Esse conceito tem por objetivo minimizar os custos de produção, aumentar a segurança e reduzir o peso total do conjunto montado, diminuindo os índices de emissões de poluentes lançados no meio ambiente, em decorrência da melhor relação peso x potência do veículo e proporcionando melhores condições de conforto e dirigibilidade aos usuários.

Baseado nessas características, o objetivo deste estudo foi viabilizar a utilização simultânea de dois processos de fabricação não convencionais: Hidroconformação de “*Tailored Welded Blank*” (TWB). Para tanto, comparou-se a conformabilidade do TWB submetido à estampagem convencional e a hidroconformação, empregando-se o Diagrama Limite de Conformação, obtido a partir do ensaio Nakazima modificado, para determinar o limite de conformação da matéria-prima, e a Frente Máxima de Deformação (FMD) para determinar a deformação máxima ocorrida nos produtos. Para isso, foi desenvolvido um ferramental híbrido que possibilita a fabricação de peças pelos métodos da estampagem convencional e da hidroconformação, a partir de chapas de aço ST-06 e ST-07 com espessuras 1,5 e 0,9mm respectivamente, soldadas a laser para compor o TWB.

Com a análise comparativa entre a CLC da matéria-prima e a FMD dos produtos estampados convencionalmente e hidroconformados, foi possível identificar que a hidroconformação de chapas supera a estampagem convencional em relação a conformabilidade dos “*Tailored Welded Blanks*”, pois permitiu obter produtos com domos mais elevados e regulares, com uma menor redução de espessura e sem o aparecimento de falhas.

Palavras Chaves:

“*Tailored Welded Blank*”, Hidroconformação, Conformabilidade e Estampagem Profunda.

Abstract

CALDIN, Renato, *Study on the Formability in Hydroforming Steel Sheets Tailored Welded Blanks*, Campinas: School of Mechanical Engineering, State University of Campinas, 2006. 121 p. Dissertation (Master Degree).

The increasing number of vehicles and a more rigorous environmental legislation, are forcing automobile industries and research centers to develop new materials and manufacturing processes to the production of parts with higher mechanical properties, better formability and sheet thickness reduction, without compromising the rigidity and structural stability of the auto bodies. The main objective is to minimize the production costs, to increase the safety and to reduce vehicle weight, reducing pollutants emissions, resulting in a best relation weight x power and providing better conditions of comfort and driveability.

Based in these characteristics, the objective of this work was to study the simultaneous use of two not conventional manufacturing processes: hydroforming of Tailored Welded Blank (TWB). Therefore it was compared the formability of TWB in conventional stamping and hydroforming, from the Forming Limit Diagram (FLD), plotted from the modified Nakazima test, to determine the forming limit of the raw material, and the Maximum Front of Deformation (MFD) to determine the maximum deformation in the products. A hybrid tool was designed and assembled to manufacture parts by conventional stamping and hydroforming steel plates ST-06 and ST-07 com thickness 1,5 and 0,9mm respectively, welded by laser to form the TWBs.

With the comparative analysis between FLD of the raw material and MFD of the products conventionally stamped and hydroformed, it was possible to identify that hydroforming overcomes the conventional stamping in respect to the formability of Tailored Welded Blanks, and therefore it was possible to form products with higher and regular domes, with lower reduction of thickness, and without any failures.

Keywords:

Tailored Welded Blank, Hydroforming, Formability and Deep Drawing.

Sumário

Capítulo 1 – Introdução.....	01
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	
2.1 – Conformação Plástica das Chapas Metálicas.....	04
2.1.1 – Determinação da Severidade de Conformação.....	09
2.2 – “Blanks” Soldados sob Medida “ <i>Tailored Welded Blanks</i> ” (TWB).....	18
2.2.1 – Aspectos Tecnológicos dos “ <i>Tailored Welded Blanks</i> ”.....	22
2.2.2 – Aplicação dos “ <i>Tailored Welded Blanks</i> ”.....	24
2.2.3 – Descrição do Processo de Soldagem a Laser.....	25
2.2.4 – Operações de Conformação de Esboços TWB.....	26
2.3 – Características Tecnológicas da Hidroconformação.....	34
2.3.1 – Descrição do Processo de Hidroconformação de Tubos.....	36
2.3.2 – Aplicações de Peças Hidroconformadas a partir de Tubos.....	40
2.3.3 – Descrição do Processo de Hidroconformação de Chapas.....	43
2.3.3.1 – Hidroconformação de Chapas com Membrana de Borracha.....	43
2.3.3.2 – Hidroconformação de Chapas sem Membrana de Borracha.....	44
2.3.4 – Aplicações de Peças Hidroconformadas a partir de Chapas.....	47
2.3.5 – Desafios da Hidroconformação.....	48
2.3.6 – Propriedades Exigidas dos Materiais para a Hidroconformação.....	53
2.3.7 – Especificações dos Lubrificantes para a Hidroconformação.....	54

Capítulo 3 – Procedimento Experimental

3.1 – Especificações das Chapas de Aço Empregadas nos Ensaios.....	55
3.1.1 – Composição Química dos Aços Empregados nos Ensaios.....	56
3.1.2 – Propriedades Mecânicas dos Aços Empregados nos Ensaios.....	56
3.2 – Preparação dos Corpos-de-Prova (Soldagem a Laser).....	57
3.3 – Ensaios de Tração Empregados para Classificar os Materiais.....	59
3.4 – Determinação das Curvas Limites de Conformação.....	61
3.4.1 – Procedimentos Empregados para a Realização dos Ensaios de Estampabilidade.....	64
3.5 – Peça Produzida pelos Métodos da Hidroconformação e Estampagem Convencional.....	66
3.6 – Projeto, Construção e Montagem do Ferramental.....	67
3.7 – Ensaios de Conformação.....	70
3.7.1 – Etapas Empregadas nos Ensaios de Hidroconformação.....	71
3.7.2 – Proposta de Alteração do Projeto do Ferramental.....	75
3.7.3 – Etapas Empregadas nos Ensaios de Estampagem Convencional com Punção de Raio 13,5mm.....	77
3.7.4 – Etapas Empregadas nos Ensaios de Estampagem Convencional com Punção de Raio 5mm.....	79

Capítulo 4 – Apresentação e Discussão dos Resultados

4.1 – Ensaios de Tração Realizados para Caracterizar a Matéria-Prima.....	80
---	----

4.2 – Ensaio Nakazima – Determinação do Limite da Conformabilidade da Matéria-Prima.....	81
4.2.1 – Resultados das CLCs da Matéria-Prima.....	84
4.3 – Resultados Obtidos nos Ensaio de Hidroconformação.....	93
4.4 – Resultados Obtidos dos Ensaio de Estampagem Convencional (Raio do Punção de 13,5mm).....	97
4.5 – Resultados Obtidos dos Ensaio de Estampagem Convencional (Raio do Punção de 5mm).....	100
4.6 – Resultados das Frentes Máximas de Deformação (FMDs).....	101
4.7 – Medição da Variação de Espessura.....	106
4.8 – Medição da Altura do Domo dos Corpos-de-Prova.....	109
4.9 – Medição do Raio de Fundo dos Corpos-de-Prova.....	112
 Capítulo 5 – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	
5.1 – Conclusões.....	114
5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros.....	116
 Referências Bibliográficas.....	117
 Anexo A.....	A1
Anexo B.....	B1
Anexo C.....	C1
Anexo D.....	D1

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Estiramento e Embutimento de Chapas.....	05
Figura 2.2 – Forças Atuantes no Embutimento Durante o Processo de Estampagem Convencional.....	07
Figura 2.3 – Aspectos das Deformações das Circunferências Gravadas.....	10
Figura 2.4 – Representação da Curva Limite de Conformação e das Regiões de Deformação...	11
Figura 2.5 – Deformação dos Corpos-de-Prova após os Ensaios de Estampabilidade (a) e a CLC Obtida a partir dos Resultados de Deformação dos Corpos-de-Prova (b).....	15
Figura 2.6 – Lateral da Carroçaria Constituído de “ <i>Tailored Welded Blank</i> ”	21
Figura 2.7 – Esquema de Soldagem pelos Métodos RMSW e Laser.....	23
Figura 2.8 – Exemplo de Assoalho Veicular Estampado a partir de um Esboço TWB.....	24
Figura 2.9 – Soldagem a Laser Empregada na Fabricação de “ <i>Tailored Welded Blanks</i> ”	25
Figura 2.10 – Pontos de Indentação para Mensurar a Microdureza do TWB.....	27
Figura 2.11 – Distribuição da Dureza ao Longo da Seção Transversal do Aço ZSTE-220P.....	28
Figura 2.12 – Falhas de TWBs quando Solicitados a Tensões de Tração.....	29
Figura 2.13 – Aspectos dos Corpos-de-Prova TWB com Diferentes Razões de Espessuras Deformados no Ensaio de Tração Uniaxial.....	30
Figura 2.14 – Comparação dos Resultados dos Ensaios de Tração com Chapas TWB e com os Materiais-Base Individuais.....	31
Figura 2.15 – Curvas Limites de Conformação (CLC) para TWB com Diferentes Razões de Espessuras.....	32

Figura 2.16 – Previsão do Consumo de TWB.....	33
Figura 2.17 – Expectativas de Aumento do Consumo de Produtos Hidroconformados para Automóveis na Europa.....	35
Figura 2.18 – Etapas de Hidroconformação de Tubos.....	36
Figura 2.19 – Variação de Pressão no Processo de Hidroconformação.....	37
Figura 2.20 – Variação da Pressão no Interior do Tubo.....	37
Figura 2.21 – Representação de Três Condições de Severidade na Hidroconformação.....	38
Figura 2.22 – Possibilidades de Furação na Hidroconformação de Tubos.....	39
Figura 2.23 – Exemplo de Berço de Apoio do Modelo Zafira.....	40
Figura 2.24 – Coletores de Escapamento Produzidos por Fundição e por Hidroconformação...	41
Figura 2.25 – Tubos Hidroconformados Empregados na Fabricação do Chassi do Audi A2.....	42
Figura 2.26 – Exemplo de Chassi Produzido com Tubos Hidroconformados.....	42
Figura 2.27 – Hidroconformação de Chapas Planas com o Auxílio da Membrana de Borracha	44
Figura 2.28 – Etapas do Processo de Hidroconformação de Chapas com Punção Cônico sem Membrana de Borracha.....	45
Figura 2.29 – Variação das Pressões de Hidroconformação em Relação ao Raio da Peça.....	46
Figura 2.30 – Teto Hidroconformado.....	47
Figura 2.31 – Hidroconformação de Pares de Chapas.....	47
Figura 2.32 – Efeitos da Pressão Hidráulica e da Força do Prensa-Chapas na Hidroconformação.....	49

Figura 2.33 – Abaulamento do “ <i>Blank</i> ” antes da Conformação.....	50
Figura 2.34 – Equipamento de Hidroconformação com Sistema de Enchimento Rápido.....	52
Figura 3.1 – Representação da Ação dos Rolos Laminadores Durante o Processo de Soldagem.....	58
Figura 3.2 – Ensaio Erichsen Determinado para Analisar a Eficiência do Cordão de Solda.....	59
Figura 3.3 – Desenho do Corpo-de-Prova Adotado para os Ensaios de Tração.....	60
Figura 3.4 – Disposição da Linha de Solda em Relação ao Corpo-de-Prova.....	60
Figura 3.5 – Representação dos Corpos-de-Prova para os Ensaios Nakazima.....	62
Figura 3.6 – Dimensão e Disposição das Circunferências Gravadas Eletroliticamente nos CPs	63
Figura 3.7 – Corpo-de-Prova com a Gravação Eletrolítica das Circunferências Impressas antes de ser Submetido ao Ensaio de Estampabilidade.....	63
Figura 3.8 – Dimensões da Peça Produzida para Analisar a Conformabilidade do TWB.....	66
Figura 3.9 – Desenho Esquemático do Arranjo Experimental.....	67
Figura 3.10 – Representação do Ferramental para Hidroconformação Montado na Prensa.....	69
Figura 3.11 – Representação Esquemática do Processo de Hidroconformação.....	70
Figura 3.12 – Representação da Primeira, Segunda e Terceira Etapas de Hidroconformação....	71
Figura 3.13 – Representação da Quarta e Quinta Etapas de Hidroconformação.....	72
Figura 3.14 – Deformação do “ <i>Blank</i> ” sob uma Pressão 100bar (10MPa).....	73
Figura 3.15 – Deformação do “ <i>Blank</i> ” sob uma Pressão de 200bar (20MPa).....	73

Figura 3.16 - Montagem do Anel de Vedação Extra	74
Figura 3.17 – Rompimento do Anel após a Aplicação de 500bar (50MPa).....	74
Figura 3.18 – Proposta de Modificação no Projeto do Ferramental.....	75
Figura 3.19 – Representação Esquemática do Processo de Conformação Convencional.....	77
Figura 3.20 – Forma Final da Peça Estampada com Raio de 5mm.....	79
Figura 4.1 – Força x Deslocamento dos TWBs.....	80
Figura 4.2 – Aspectos dos Corpos-de-Prova após o Ensaio de Estampabilidade.....	82
Figura 4.3 – Corpo-de-Prova de 220mm de Largura Submetido ao Ensaio de Estampabilidade	82
Figura 4.4 – Deformações Ocorridas nos Dois Materiais.....	85
Figura 4.5 – CLC da Chapa Fina (0,90mm).....	86
Figura 4.6 – CLC da Chapa Grossa (1,50mm).....	86
Figura 4.7 – Sobreposição das CLCs Obtidas das Chapas de 0,90 e 1,50mm de Espessura.....	87
Figura 4.8 – CLC Resultante da Chapa de 0,90mm de Espessura.....	88
Figura 4.9 – CLC Resultante da Chapa de 1,50mm de Espessura.....	88
Figura 4.10 – CLCs das Chapas 0,90 e 1,50mm de Espessura Apresentadas Simultaneamente.	89
Figura 4.11 – Medições das Deformações com o Paquímetro Digital.....	90
Figura 4.12 – Dispersão das Três CLCs com as Medições Realizadas com o Paquímetro.....	91
Figura 4.13 – Variação das Medições entre as Leituras Efetuadas com o Paquímetro Digital e o Sistema Óptico CAMSYS®	92

Figura 4.14 – Peça de TWB Hidroconformada.....	93
Figura 4.15 – Gráfico de Pressão de Hidroconformação x Deformação.....	95
Figura 4.16 – Ruptura do Corpo-de-Prova Devido a Aplicação de Forças de Sujeição Excessivas.....	96
Figura 4.17 – Forma Final da Peça Estampada com Raio de 13,5mm.....	97
Figura 4.18 – Ruptura do Corpo-de-Prova Devido a Ausência de Lubrificação e Excesso de Força no Prensa-Chapas na Estampagem Convencional.....	99
Figura 4.19 – Comparação entre as FMDs e a CLC.....	101
Figura 4.20 – Dispersão nas medições das FMDs no Processo de Hidroconformação.....	103
Figura 4.21 – Dispersão nas Medições das FMDs no Processo de Estampagem Convencional com Raio no Fundo do Copo igual a 5mm.....	103
Figura 4.22 – Dispersão nas Medições das FMDs no Processo de Estampagem Convencional com Raio no Fundo do Copo igual a 13,5mm.....	104
Figura 4.23 – Frentes Máximas de Deformação Traçadas na CLC da Chapa de 0,90mm.....	105
Figura 4.24 – Medição de Espessura dos Corpos-de-Prova.....	106
Figura 4.25 – Variação de Espessura.....	107
Figura 4.26 – Medição da Altura de Domo.....	109
Figura 4.27 – Disposição dos Pontos da Medição da Altura de Domo.....	109
Figura 4.28 – Variação da Altura de Domo dos Diversos Corpos-de-Prova.....	111
Figura 4.29 – Degrau do “ <i>Tailored Welded Blank</i> ”	112

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Resultados dos Ensaios de Tração para TWBs com Diversas Razões de Espessuras e para os Materiais-Base.....	31
Tabela 2.2 – Principais Materiais Utilizados na Hidroconformação de Tubos.....	53
Tabela 3.1 – Composição Química dos Aços (porcentagem em peso) Empregados nos Ensaios.....	56
Tabela 3.2 – Propriedades Mecânicas dos Aços Empregados nos Ensaios.....	57
Tabela 3.3 – Largura (L) dos Diversos Modelos de Corpos-de-Prova Empregados para a Realização dos Ensaios Nakazima.....	62
Tabela 3.4 – Partes Constituintes da Ferramenta.....	69
Tabela 3.5 – Elementos Constituintes da Ferramenta Modificada.....	76
Tabela 4.1 – Resultados dos Ensaios de Tração dos Corpos-de-Prova Extraídos das Chapas Soldadas a Laser.....	81
Tabela 4.2 – Corpos-de-Prova Medidos pelo Sistema CAMSYS® e com Paquímetro Digital...	83
Tabela 4.3 – Resultados dos Ensaios de Conformação (Método da Hidroconformação).....	94
Tabela 4.4 – Resultados dos Ensaios de Conformação Convencional (Raio =13,5mm).....	98
Tabela 4.5 – Resultados dos Ensaios de Conformação – Estampagem Convencional, Punção com Raio de 5mm.....	100
Tabela 4.6 – Valores das Medições de Espessura (mm).....	106
Tabela 4.7 – Variação da Espessura após a Conformação, em Porcentagem.....	108
Tabela 4.8 – Medições da Altura de Domo (em milímetros).....	110
Tabela 4.9 – Resultados das Medições dos Raios do Fundo Copo (mm).....	113

Nomenclatura

Lista de Abreviaturas e Siglas:

CCV	<i>“Composite Concept Vehicle”</i>
CLC	Curva Limite de Conformação
CO₂	Dióxido de Carbono
DLC	Diagrama Limite de Conformação
FMD	Frente Máxima de Deformação
IISI	<i>“International Iron and Steel Institute”</i>
IRSID	Instituto Francês de Pesquisas em Siderurgia
MoS₂	Bissulfeto de Molibdênio
Nd:Yag	Cristal de Níodímio, Ítrio e Alumínio
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
RMSW	<i>“Resistance Mash Seam Welding”</i>
TWB	<i>“Tailored Welded Blank”</i>
ULSAB	<i>“Ultra Ligh Steel Auto Body”</i>

Símbolos:

ALO	<i>Alongamento</i>
CP	Corpo-de-Prova
e_1	Maior Deformação Principal Convencional
e_2	Menor Deformação Principal Convencional
F_1	Força no Punção
F_2	Força no Prensa-Chapas
F_a	<i>Força Axial</i>
FP	Força no Punção de Conformação (kgf)
FPC	Força no Prensa-Chapas (kgf)
F_R	Força Radial
F_T	Força de Compressão Tangencial
$HC1$	Pressão de Hidroconformação Inicial (bar)
$HC2$	Pressão de Hidroconformação (bar)
$HC3$	Pressão de Hidroconformação Máxima (bar)
$HC4$	Pressão de Hidroconformação Máxima (bar)
l_0	Diâmetro Inicial da Circunferência
l_1	Diâmetro Maior Final da Elipse
l_2	Diâmetro Menor Final da Elipse
LE	Limite de Escoamento
LR	Limite de Resistência
$PC1$	Pressão Inicial (estágio 1) no Prensa-Chapas (bar)

$PC2$	Pressão Final (estágio 1) no Prensa-Chapas (bar)
$PC3$	Pressão Inicial (estágio 2) no Prensa-Chapas (bar)
$PC4$	Pressão Final (estágio 2) no Prensa-Chapas (bar)
$PC5$	Pressão Inicial (estágio 3) no Prensa-Chapas (bar)
$PC6$	Pressão Final (estágio 3) no Prensa-Chapas (bar)
$PC7$	Pressão Inicial (estágio 4) no Prensa-Chapas (bar)
$PC8$	Pressão Final (estágio 4) no Prensa-Chapas (bar)
PC	Pressão de Corte (bar)
PF	Pressão de Fechamento (bar)
PMM	Pressão da Matriz Móvel (bar)
PP	Pressão no Punção de Conformação (bar)
PPC	Pressão no Prensa-Chapas (bar)
R	Coefficiente de Anisotropia de Lankford
S_0	Espessura Inicial
S_I	Espessura Final
ε_1	Maior Deformação Principal Verdadeira
ε_2	Menor Deformação Principal Verdadeira
ΔR	Anisotropia Planar
n	Expoente de Encruamento
P_i	Pressão Interna
F_T	Força de Tração

Resumo dos Capítulos:

Capítulo 1 – Descreve os objetivos e as justificativas para o desenvolvimento do trabalho.

Capítulo 2 – Apresenta a revisão bibliográfica abordando os conceitos de conformabilidade das chapas de aço e seus respectivos métodos de análise; os processos de geração de “*blanks*” soldados sob medida (“*Tailored Welded Blanks*”) envolvendo conformabilidade, soldagem e aplicações; e os processos de hidroconformação de tubos e chapas, também envolvendo a descrição dos processos de fabricação, conformabilidade e principais aplicações.

Capítulo 3 – Descreve o procedimento experimental empregado para qualificar a matéria-prima empregada nos ensaios, o desenvolvimento do projeto do ferramental, os ensaios de conformabilidade, e os ensaios de conformação.

Capítulo 4 – Apresenta os resultados obtidos na análise comparativa entre a matéria-prima dos “*Tailored Welded Blanks*” e os corpos-de-prova ensaiados, através de gráficos limites de conformabilidade. Também se avaliam os produtos estampados em termos de qualidade dimensional.

Capítulo 5 – Apresenta as conclusões extraídas a partir da análise das variáveis de influência estudadas neste trabalho, aponta as vantagens de conformabilidade de chapas hidroconformadas sobre as peças estampadas convencionalmente e sugere propostas para trabalhos futuros e possíveis modificações nas ferramentas, com o intuito de possibilitar melhores condições de ensaio.

Capítulo 1

Introdução

A indústria automobilística representa uma parcela altamente rentável e competitiva no cenário econômico internacional, de modo que cada fabricante busca desenvolver novos conceitos e tecnologias com o intuito de obter produtos mais eficientes, atraentes e seguros para liderar o mercado consumidor. Dentro dessa prerrogativa, as indústrias automobilísticas e os centros de pesquisas, investem maciçamente no desenvolvimento de produtos, materiais e processos de fabricação, com a finalidade de obter veículos mais leves, porém com elevada rigidez estrutural, através da utilização da combinação de novos materiais e processos de fabricação que possibilitam a produção de automóveis a partir de aços com maior resistência mecânica, melhor conformabilidade e menores espessuras, afetando diretamente o desempenho do veículo e a proteção do meio ambiente.

Essas pesquisas viabilizam o desenvolvimento de novas técnicas de fabricação que proporcionam ao veículo redução no tamanho das peças, aumento da absorção de energia da carroçaria quando o veículo é submetido a uma colisão, melhoria da estabilidade e maior rigidez estrutural, pela possibilidade de conceber peças com geometrias complexas e mais precisas. Essas características são obtidas também, pela melhoria na capacidade dos processos de fabricação, através da integração de múltiplas etapas de processo em operações reduzidas.

A diminuição do peso do veículo é um aspecto fundamental nessa análise, porque incide diretamente na relação peso x potência, e determina um melhor desempenho com considerável redução no consumo de combustível, resultando também em um excelente apelo comercial ao produto.

Como a carroçaria de um automóvel corresponde a aproximadamente um terço do seu peso total, reduzir peso nesse item torna-se bastante interessante para os fabricantes. Dessa forma, muitos protótipos e carros de linha foram produzidos com materiais e processos de fabricação não tradicionais, visando basicamente a redução de peso, eficiência e custos de fabricação. Veículos como os Audi A2 e A8 tiveram suas carroçarias produzidas a partir de ligas de alumínio (KELKAR, 2000), e a Daimler Crysler desenvolveu um veículo conceito CCV (*Composite Concept Vehicle*) com partes da carroçaria totalmente produzida em materiais poliméricos (BODYCOTE MATERIALS TESTING). Entretanto, esses veículos pertencem a uma classe minoritária na produção mundial, sendo que, a maioria dos carros ainda é produzida em aço.

Para a redução de peso das carroçarias dos veículos, pode-se:

- Substituir materiais pesados por materiais mais leves e resistentes;
- Desenvolver projetos de peças com geometrias complexas em que a forma do produto pode proporcionar melhoria na resistência mecânica do conjunto, sem a necessidade de utilizar materiais mais robustos;
- Integrar várias etapas de processos em etapas reduzidas permitindo a fabricação de peças mais precisas e com menor utilização de soldas e reforços.

Baseadas nessas premissas, técnicas de processos foram desenvolvidas com o intuito de reduzir o peso dos componentes dos veículos. Dentre essas diversas técnicas, destacam-se a utilização de “*blanks*” soldados sob medida ou “*Tailored Welded Blank*” (TWB), o que possibilita a soldagem de materiais diferentes com espessuras diferentes para posterior conformação em prensa, e a hidroconformação de tubos e chapas que propicia a obtenção de peças complexas com elevada rigidez.

O projeto ULSAB (*Ultra Light Steel Auto Body*) realizado por um consórcio de empresas siderúrgicas e montadoras, liderado pela IISI (*International Iron and Steel Institute*) auxiliou a implementação de alguns desses processos na indústria automobilística, desenvolvendo projetos voltados para a melhoria dos processos de fabricação relativos à matéria-prima e à fabricação do automóvel. Esse programa atingiu resultados bastante significativos, com uma redução de peso

de cerca de 36% da carroçaria desenvolvida pelo projeto ULSAB em comparação com as carroçarias obtidas pelos métodos de fabricação tradicionais (ULSAB, 2005).

O processo de geração de “*blanks*” soldados sob medida (TWB) possibilita a distribuição correta e precisa da necessidade de material associada aos esforços localizados, eliminando reforços e posteriores etapas de soldagem. Essa característica proporciona a obtenção de peças com melhor qualidade mecânica, em decorrência de menores regiões afetadas por calor, o que minimiza a heterogeneidade na microestrutura dos materiais, e possibilita produzir peças com melhor qualidade dimensional, em decorrência da possibilidade de uma peça completa ser processada e concluída na prensa.

O processo de obtenção de peças pelo método da hidroconformação de chapas visa atingir níveis de deformação superiores às obtidas pelo processo de estampagem convencional, em decorrência das tensões compressivas presentes no processo, que retardam o início das instabilidades plásticas (ZAMPALONI *et al.*, 2003). A hidroconformação também possibilita a integração de múltiplas etapas de processo em um número reduzido de operações, propiciando a simplificação da logística, melhoria da qualidade dimensional das peças, e conseqüentemente a redução nos custos de fabricação (SCHULER, 1998).

Em função dessas características, o objetivo deste estudo foi projetar e construir um ferramental híbrido destinado a conformação de TWBs, a fim de analisar a conformabilidade dos “*blanks*” soldados a laser, produzidos a partir de chapas de aços ST-06 e ST-07 com espessuras 1,5 e 0,9mm respectivamente, ao serem conformados pelo processo de hidroconformação de chapas, o que ainda não foi registrado em literaturas científicas e na indústria metal-mecânica, e também pelo processo de estampagem convencional.

Essa análise foi realizada através da comparação entre as Frentes Máximas de Deformação (FMD), resultantes das medições das deformações máximas obtidas das peças hidroconformadas e estampadas convencionalmente, com a Curva Limite de Conformação (CLC) levantada a partir das medições das deformações máximas obtidas dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio Nakazima modificado, que determinou o limite de conformação da matéria-prima.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 – Conformação Plástica das Chapas Metálicas

A conformação plástica de chapas metálicas (estampagem) ocorre quando existe a aplicação de tensões externas a uma chapa de metal ou “*blank*”, efetuadas pela ação de um punção contra uma matriz - operação de estampagem convencional - ou pela ação de um fluido contra uma matriz ou punção - operação de hidroconformação - proporcionando a modificação da geometria plana da chapa para outra forma tridimensional definida. Isto se dá através do controle do escoamento do material, no estado plástico de tensões e deformações, para o interior da ferramenta.

A estampagem é um dos principais processos de conformação de chapas metálicas, sendo amplamente utilizada na indústria metal-mecânica devido a sua capacidade de reprodução de peças iguais, elevada produtividade, possibilidade de geração de formas irregulares, alto índice de capacidade do processo e baixo custo de produção para grandes volumes.

A conformabilidade de chapas metálicas é geralmente definida como a capacidade do material deformar-se dentro de uma forma definida sem estricção de espessura ou fratura. Cada tipo de chapa pode suportar um determinado limite de deformação, que é usualmente associado ao início da estricção localizada, que eventualmente leva à fratura dúctil (OZTURK *et al.*, 2005).

Combinações de diferentes processos como a conformação de chapas, cortes e processos de soldagem têm sido empregados com muito sucesso na indústria mecânica. O estiramento e o embutimento profundo são condições de estados de tensão importantes presentes no processamento industrial das chapas metálicas (SCHULER, 1998).

No processo de estampagem profunda com estiramento, o “*blank*” é impedido de deslizar para o interior da ferramenta devido à ação da força no prensa-chapas e da geometria do “*draw bead*”, que geram tensões de tração na chapa durante a penetração do punção, ocasionando a redução da espessura dessa chapa.

Em contrapartida, o embutimento profundo é um processo de conformação de chapas no qual a característica fundamental é a ação de tensões combinadas e condições de compressão, em que a chapa é conformada sob a ação de tensão compressiva tangencial e tensão de tração radial, proporcionando redução de espessura na lateral e aumento na região próxima do flange.

Normalmente, o estiramento e o embutimento são utilizados simultaneamente na indústria automobilística para fabricar painéis complexos das carroçarias dos veículos, e a variável de influência que pode determinar se o processo será efetuado por estiramento, embutimento ou estado plano de deformações é a ação da força no prensa-chapas (Figura 2.1).

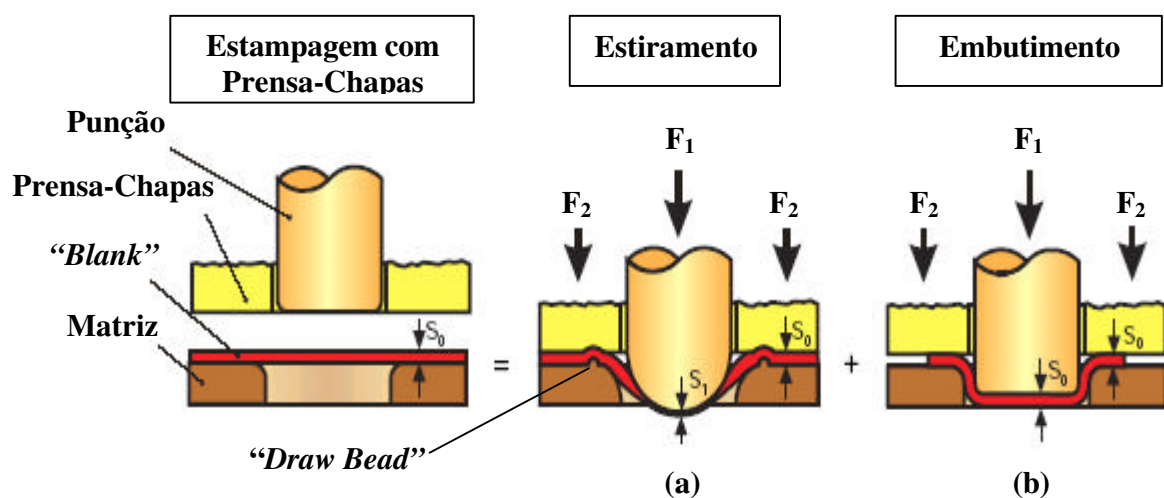


Figura 2.1 – Estiramento e Embutimento de Chapas
(adaptada de SCHULER, 1998)

O detalhe (a) da Figura 2.1 ilustra uma condição de estiramento e um estado de tensão biaxial, proporcionando o alongamento e o encruamento da chapa evidenciado pela redução de espessura S_I e ausência de escoamento do material da aba. O detalhe (b) desta figura apresenta uma condição de embutimento, identificado pelo equilíbrio da espessura S_0 , com o escoamento do material da aba para o interior da ferramenta.

No processo de estampagem convencional, a ferramenta é composta por um punção, uma matriz e um prensa-chapas, que age como um freio na chapa durante o processo de estiramento. No embutimento, o prensa-chapas é empregado para evitar a formação de rugas na chapa (SCHULER, 1998). Modernas técnicas foram desenvolvidas para aplicação de forças localizadas no prensa-chapas, empregando forças independentes em pontos estrategicamente definidos com o objetivo de proporcionar a movimentação e o travamento do “blank” em posições distintas, atingindo um melhor equilíbrio entre o estiramento e o escoamento do material durante a estampagem, a fim de conceber maiores índices de deformação sem comprometer a integridade da peça (SHULKIN *et al.*, 2000).

Normalmente, as tensões de tração são predominantes nos processos de estampagem, sendo que as deformações finais são limitadas pelo início da instabilidade plástica causada pela formação de defeitos como a estricção de espessura localizada, orelhamentos ou pelo enrugamento da chapa. O estado limite da conformação do metal não é uma propriedade intrínseca e característica apenas do material, mas é também função da taxa de deformação, do nível de deformação, do ferramental utilizado, da existência de gradientes de deformação e da lubrificação. Há ainda a influência da espessura do material da chapa e dos raios do punção e do ombro da matriz da ferramenta, pois quando a espessura da chapa e os raios do punção e do ombro da matriz são aumentados, eleva-se também o limite de conformação do material (EVANGELISTA, 2000).

Segundo Evangelista (2000), os maiores níveis de deformação são obtidos através da manutenção das tensões de compressão no plano das deformações, evitando-se possíveis enrugamentos, pela manutenção do cisalhamento no plano de deformações sem a ocorrência de falhas, pela manutenção da forma após a remoção da matriz e pela apresentação de uma superfície com textura suavizada e sem defeitos.

Os processos de conformação de chapas devem assegurar ao produto determinadas características mecânicas atribuídas na fase de projeto tais como: resistência mecânica, tolerância dimensional e repetitibilidade de produção do produto estampado em função do fornecimento da matéria-prima com características técnicas bem similares entre as partidas. Esses parâmetros conferem ao processo de estampagem viabilidade em sua utilização (LASCOE, 1988).

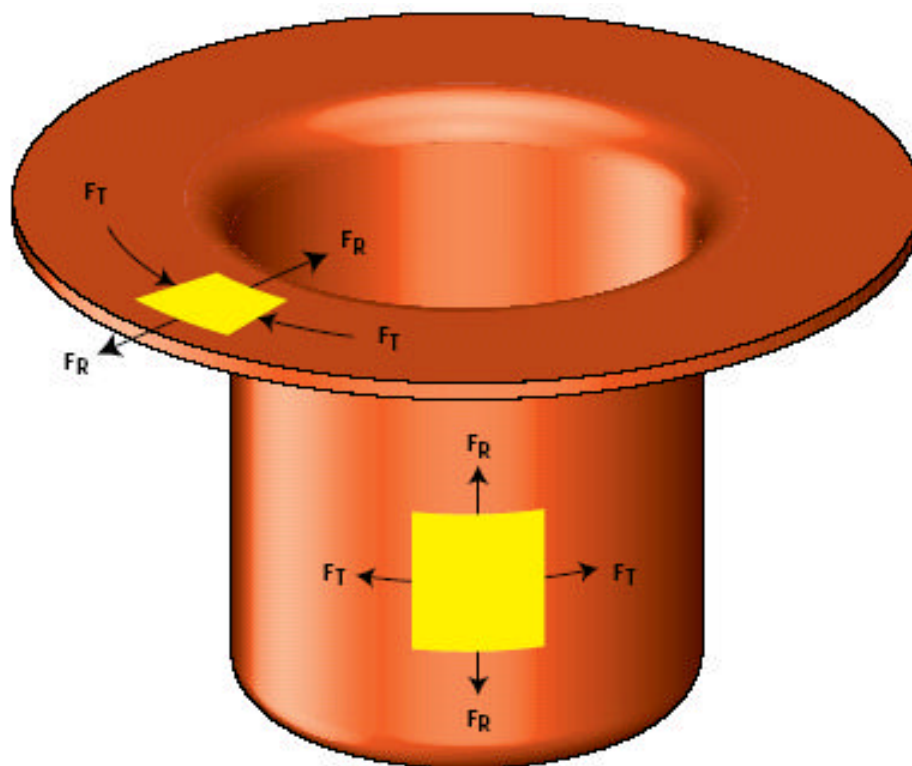


Figura 2.2 – Forças Atuantes no Embutimento Durante o Processo de Estampagem Convencional (SCHULER, 1998).

A Figura 2.2 mostra as forças radiais F_R e as forças de compressão tangenciais F_T , as quais uma peça estampada por embutimento é submetida. O material é comprimido na direção tangencial e estirado na direção radial. Com o aumento da profundidade da estampagem, a quantidade de deformação e a resistência à deformação também são aumentadas. A chapa é mais severamente estirada no raio do punção, onde normalmente as falhas ocorrem (SCHULER, 1998).

A partir dos modos básicos de deformação, do formato da ferramenta e do escoamento de material durante a conformação, pode-se classificar os modos básicos de conformação como sendo:

a) Estampagem Profunda - é a operação de conformação plástica, em que a chapa metálica é submetida a um estado de carregamento tração-compressão em todos os seus elementos de volume. A espessura final da chapa mantém-se estável, praticamente a mesma da espessura inicial, podendo até mesmo ser ampliada (situação que ocorre quando a componente de deformação em compressão é, em módulo, maior que a componente de deformação em tração) (SCHULER, 1998).

b) Estiramento Puro - é a operação de conformação plástica dos metais em que a chapa é submetida a um estado de tensão biaxial (tração), em todos os seus elementos de volume. O estiramento imprime, necessariamente, uma redução da espessura da chapa e um aumento do encruamento do material (ULSAB).

c) Conformação Combinada - ocorre quando existe a ação de estampagem profunda e do estiramento durante o processo de estampagem. Nas operações reais de estampagem, existe a combinação complexa de tipos de conformação, sendo que a estampabilidade torna-se função não somente das propriedades do material, mas também das condições de deformação presentes no processo de conformação.

d) Dobramento - ocorre quando a chapa de metal é submetida a um estado de carregamento devido a um momento fletor, fazendo com que a linha neutra situada no meio da espessura da chapa, durante a deformação elástica se desloque em direção à superfície interna do material dobrado, à medida que a deformação plástica continua (ULSAB).

2.1.1 – Determinação da Severidade de Conformação

Segundo Stoughton (2000), a habilidade para determinar a severidade de conformação relativa à ruptura do material, é um fator crítico na análise do processo de conformação das chapas metálicas.

Dessa forma, o ensaio mais utilizado para determinar as propriedades mecânicas das chapas é o ensaio de tração, pois permite obter o limite de resistência, o limite de escoamento, o grau de encruamento e o índice de anisotropia do material. Esse ensaio tem como desvantagem os estados de tensões uniaxiais impostos aos corpos-de-prova, que não representam os estados de tensões encontrados nos processos reais de estampagem. Esse erro é evitado empregando o ensaio Erichsen, que utiliza uma matriz com abertura circular e um punção hemisférico que proporciona ao material a ser ensaiado, estados de tensões similares aos encontrados em operações de embutimento e estiramento. Os resultados obtidos nesse ensaio servem para julgar a capacidade do material para uso em processos de embutimento profundo (HARPELL *et al.*, 2000 e KLEIBER *et al.*, 2002).

O limite de conformação de uma chapa metálica é definido como o estado no qual um afinamento localizado (estricção de espessura) na chapa inicia durante a conformação, basicamente levando a uma ruptura. O limite de conformação é convencionalmente descrito por uma curva traçada em um gráfico de deformação maior ϵ_1 versus deformação menor ϵ_2 (STOUGHTON, 2000).

O conceito da Curva Limite de Conformação (CLC) introduzido por Keeler e Goodwin pode representar satisfatoriamente a conformabilidade de uma chapa, sendo um método amplamente utilizado para determinar o critério de otimização dos processos de estampagem e desenvolvimento das ferramentas (BLECK *et al.*, 1998).

Srour (2002) citou que através das CLCs é possível identificar o modo como ocorrem as deformações e as possíveis causas de defeitos que estão relacionadas com as variáveis do processo, do projeto e do material.

Dentre as causas de processo, destacam-se os problemas relacionados à lubrificação, ao ajuste do ferramental e à operação (mão-de-obra).

As principais causas relativas ao projeto estão diretamente relacionadas com as geometrias dos produtos finais e formas do punção, matriz e prensa-chapas.

Quanto às variáveis dos materiais, destacam-se o limite de resistência e escoamento não apropriados, a baixa ductilidade, além de valores não apropriados de encruamento (n) e anisotropia normal (coeficiente de anisotropia R de Lankford).

Segundo Keeler (2002), a determinação da severidade de conformação pode ser realizada empiricamente através da impressão eletroquímica de um sistema de grade de circunferências de pequenos diâmetros, entre 2,5mm e 5mm, gravadas em um “blank”, a fim de determinar a quantidade de deformação em uma chapa.

Durante a conformação, a circunferência é alongada, resultando em uma geometria elíptica que demonstra as direções de deformação máxima e mínima, o que permite a realização das medições das deformações e_1 e e_2 , respectivamente (Figura 2.3).

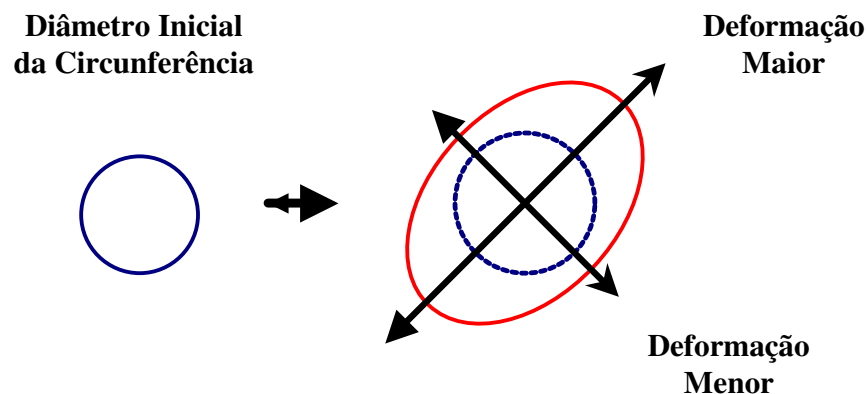


Figura 2.3 – Aspectos das Deformações das Circunferências Gravadas (KEELER, 2002)

A maior deformação é amplamente positiva, sendo obtida a partir do maior eixo da elipse. A menor deformação é perpendicular em relação à maior deformação e pode ser positiva, nula ou negativa.

A CLC ilustrada na Figura 2.4 é empregada para os aços de baixo carbono e a quantidade de deformação imposta no processo determina a possibilidade ou não de falha do material durante a operação de estampagem.

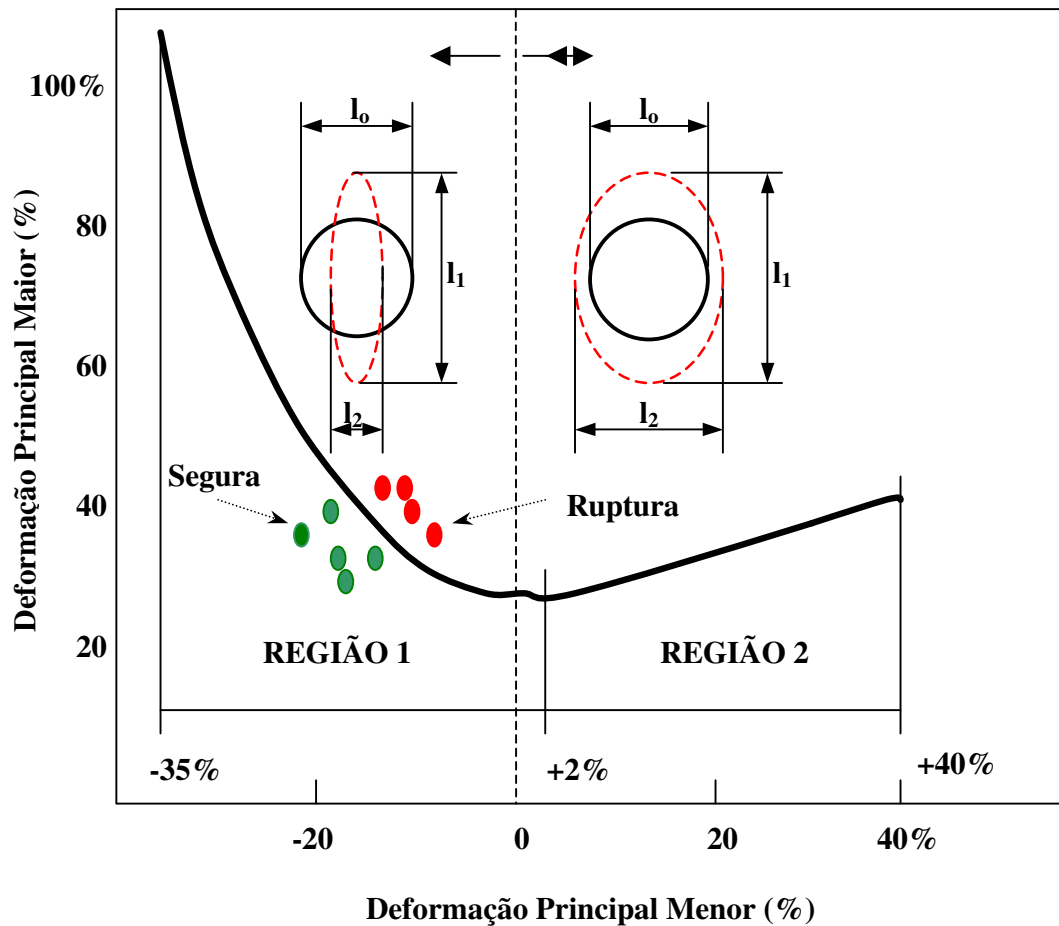


Figura 2.4 – Representação da Curva Limite de Conformação e das Regiões de Deformação (adaptada de BRESCIANI, 1997).

A *região 1* do gráfico indica uma condição de embutimento profundo com a presença de tensões compressivas e trativas, enquanto a *região 2* do gráfico determina uma zona onde as tensões trativas são predominantes, gerando a condição de estiramento puro. As zonas identificadas pelas elipses vermelhas localizadas acima da CLC indicam uma elevada probabilidade de ruptura do material se as deformações na chapa durante o processo de

fabricação atingirem estas posições no gráfico. Enquanto, as elipses verdes localizadas abaixo da CLC, indicam uma zona segura de deformação durante o processo de conformação.

Para se obter um carregamento biaxial de tensão no ensaio da CLC, é necessário que o flange do prensa-chapas atue em toda extensão periférica do corpo-de-prova, simulando a condição de estiramento puro (condição identificada na *região 2* da Figura 2.4). À medida que a largura do corpo-de-prova é reduzida, proporcionada pela ação do flange do prensa-chapas em áreas menores, é possível obter a condição de carregamento tração-compressão, simulando o estado de estampagem profunda (condição identificada na região 1 da figura 2.4). A severidade da conformação ou margem de segurança para algum ponto localizado na estampagem é a diferença entre a deformação admissível (CLC) e a frente máxima de deformação efetiva do produto (FMD).

Srour (2002) descreveu que existem vários métodos para se construir uma CLC, que diferem entre si pelo tipo de ensaio empregado para obter os pontos da curva. Os métodos mais utilizados são o IRSID, Marciniak e o Nakazima.

O método IRSID emprega corpos-de-prova de tração com entalhes nas laterais submetidos ao embutimento em equipamentos destinados aos ensaios Erichsen ou Swift.

No método Marciniak, o corpo-de-prova é conformado sobre a superfície plana de um punção de seção transversal cilíndrica junto com um espaçador de poliuretano, posicionado entre a chapa e o punção, eliminando dessa forma o efeito desfavorável do atrito e permitindo obter a fratura ou a estricção de espessura no fundo plano do corpo-de-prova (CRIVELLARO, 2003).

O outro método denominado Nakazima, mais utilizado atualmente para determinar a CLC, consiste na marcação de uma rede de circunferências sobre a superfície plana da chapa, seguida por um embutimento até a fratura ou início da estricção de espessura. Nesse ensaio, chapas com larguras diferentes são conformadas em uma prensa hidráulica sob a ação de um punção hemisférico ou um fluido pressurizado (OZTURK *et al.*, 2005).

As circunferências gravadas são deformadas, transformando-se em elipses ou circunferências de diâmetros maiores. Dessa forma, as deformações são facilmente determinadas ao longo da superfície da peça ensaiada, através da medição dos diâmetros maiores e menores das elipses. As deformações obtidas na fratura (ou estrição) são traçadas em um gráfico, tendo como eixo da abscissa, a menor deformação principal verdadeira e o eixo da ordenada, a maior deformação principal verdadeira.

A CLC é construída baseada nas deformações principais obtidas de experimentos de estiramento biaxial em amostras com geometrias diferentes. A região sob a curva é considerada segura para alguns modos de deformação particulares, enquanto que a região acima da CLC é considerada ser potencialmente propensa à fratura. Normalmente, uma outra curva denominada curva de segurança, é traçada 10% abaixo da CLC, com o propósito de garantir a integridade física das peças produzidas. A razão principal para esse procedimento se refere ao fato de que a observação da estrição é um processo subjetivo, e depende da precisão do equipamento e capacidade técnica do operador (KEELER, 2002).

Uma CLC mais elevada indica que o material possui maior conformabilidade. A principal análise da conformabilidade exige determinar se a quantidade de deformação excede o limite de conformação em algum ponto na peça conformada. Desse modo, quando uma chapa metálica falha por estrição de espessura localizada ou fratura durante a conformação, uma solução comum é redesenhar-se a peça ou mudar os parâmetros do processo de estampagem.

Os ensaios para determinar a CLC podem ser realizados até a ruptura ou início da estrição do material.

Para determinar a CLC até a ruptura, deve-se efetuar a medição em elipses deformadas onde a ruptura esteja localizada no centro da elipse.

O método mais comum para a realização das medições, é efetuar a medição das elipses localizadas na periferia da zona de estrição, com o propósito de determinar uma condição limite de conformação do material mais conservadora sem a possibilidade da ocorrência de rupturas durante o processamento da peça.

Após a escolha adequada das elipses, a medição deverá ser efetuada com uma escala graduada, paquímetro ou por intermédio de um dispositivo óptico desenvolvido especialmente para essa atividade. As medições são obtidas através da leitura do comprimento do diâmetro maior da elipse, designando a maior deformação principal convencional e através da medição do comprimento do menor diâmetro da elipse, designando a menor deformação principal convencional (SROUR, 2002).

Através das medições realizadas nos corpos-de-prova, é possível determinar as deformações convencionais e verdadeiras, calculadas a partir das seguintes expressões:

1) Maior Deformação Principal:

$$\text{Convencional: } e_1 = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad \text{Verdadeira: } e_1 = \ln (1 + e_1)$$

2) Menor Deformação Principal:

$$\text{Convencional: } e_2 = \frac{l_2 - l_0}{l_0} \quad \text{Verdadeira: } e_2 = \ln (1 + e_2)$$

onde:

l_0 é o diâmetro inicial da circunferência;

l_1 é o diâmetro maior final da elipse;

l_2 é o diâmetro menor final da elipse.

O Diagrama Limite de Conformação (DLC) que contém as Curvas Limites de Conformação pode ser obtido com o ensaio Nakazima, que consiste em medir as deformações máximas próximas à fratura de uma malha de círculos eletroliticamente pré-impressa em chapas metálicas, pela deformação controlada dos corpos-de-prova com geometrias específicas de largura variável que simulam os diversos estados de tensão presentes nos processos de estampagem profunda, desde o estado uniaxial de tração presente nas paredes de uma peça

obtida por embutimento profundo, passando pela tração uniaxial, deformação plana e finalmente estiramento biaxial para as larguras maiores (KNOCKAERT *et al.*, 2001).

A Figura 2.5 apresenta três corpos-de-prova com larguras crescentes e a CLC construída a partir dos resultados obtidos nos ensaios.

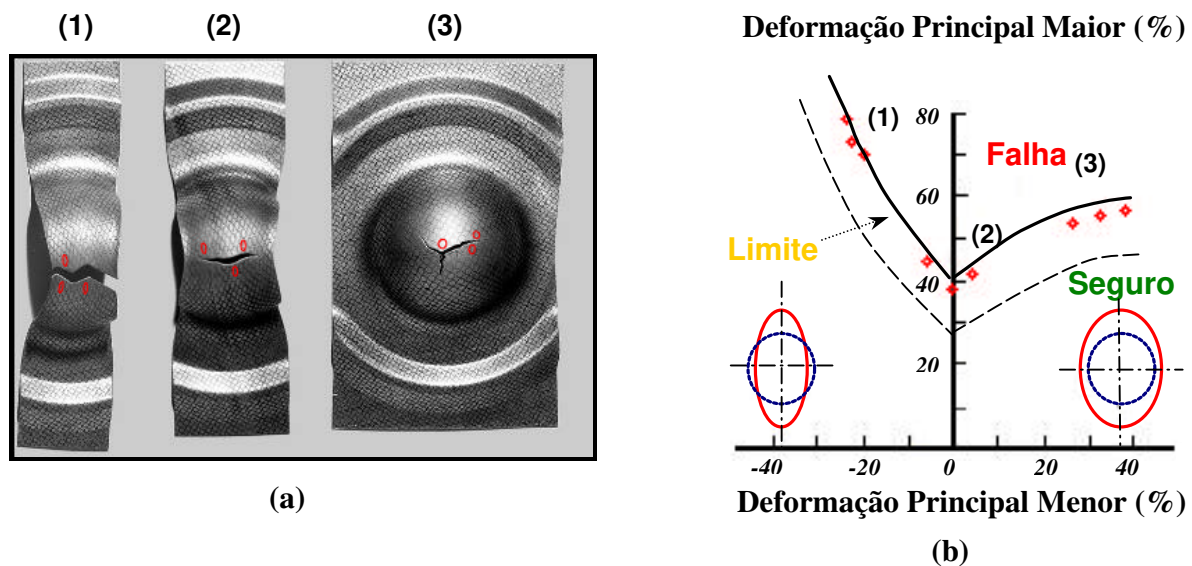


Figura 2.5 – Deformação dos Corpos-de-Prova após os Ensaios de Estampabilidade (a) e a CLC Obtida a partir dos Resultados de Deformação dos Corpos-de-Prova (b) - (INTERNET LEARNING OF STEEL APPLICATION AND PROCESS, 2005).

O detalhe (1) dessa figura representa o estado de tensão uniaxial evidenciado no lado esquerdo da CLC – região de estampagem profunda. O detalhe (2) determina o processo de conformação combinada, onde existem tensões combinadas, uniaxiais e biaxiais – estiramento e embutimento profundo. O detalhe (3) apresenta o estado de tensão biaxial, localizado no lado direito da CLC – condição de estiramento puro.

Uma das dificuldades desse ensaio é que prejudica a qualidade de seus resultados, relaciona-se à precisão das medidas das circunferências deformadas. Um método desenvolvido por Vogel e Lee (1990) para a medição de deformações da superfície de uma peça tridimensional

deformada calcula a deformação em toda área visualizada ao invés de determinar a deformação localizada de círculos individuais. Para o engenheiro de projeto, esse sistema automático para medição das deformações é uma ferramenta vital para o sucesso do projeto, como foi comprovado pelo trabalho de Hsu (2003) que se fundamenta no processamento digital da imagem da superfície estampada.

Um fator de segurança ou margem de segurança pode ser obtida pela comparação da deformação efetiva do produto na estampagem com a deformação permissível definida pela curva limite de conformação. Essa avaliação pode ser obtida em uma só estampagem e é extremamente importante durante o teste da ferramenta quando o tempo do desenvolvimento é muito limitado (KEELER, 2002).

A condição de segurança (zona verde da figura 2.5) é sempre necessária em todos os processos de estampagem. Para tanto, ajustes adicionais nas ferramentas, uso de aços com diferentes propriedades mecânicas, ou de diferentes lubrificantes deveriam ser empregados primeiro em uma tentativa de se reduzir à severidade da conformação. Em muitos casos severos, o redimensionamento do produto ou modificações na ferramenta, seriam as únicas alternativas para reduzir a severidade de conformação. A modificação da ferramenta deveria ser conduzida através da suavização da superfície do prensa-chapas (“*drawbeads*”), através de uma menor penetração, de um maior raio e outras modificações que permitiriam uma maior quantidade de material escoar para dentro do corpo da peça.

Infelizmente, isto geralmente também reduz a quantidade de estiramento nos painéis externos da carroçaria, estiramento esse que provavelmente já está próximo das especificações ideais de estiramento mínimo definidas para garantir a qualidade superficial desses painéis (KEELER, 2002).

A CLC possui uma forma característica independente das propriedades do material, o que implica dizer que sempre existe um carregamento biaxial limite que leva a falha do corpo-de-prova. Através da análise e avaliação das deformações impostas à chapa metálica, é possível determinar a combinação das propriedades do material, lubrificante e ferramenta, que é mais favorável para a realização de determinada peça estampada (NCT-360026/1995).

A medição das deformações para determinar a Frente Máxima de Deformação (FMD) é obtida de maneira análoga à CLC e desenvolvida especificamente para o produto que se deseja avaliar, com o objetivo de determinar a condição de severidade de conformabilidade do material (NCT-360026/1995).

Com a CLC e a FMD traçadas, é possível diagnosticar se existem pontos na peça susceptíveis a falhas em prensa, através dos seguintes parâmetros:

- Pontos da FMD situados acima da CLC indicam elevada certeza de falha durante o processamento;
- Pontos da FMD situados nas vizinhanças da CLC indicam possíveis ocorrências de problemas em prensa;
- Pontos da FMD situados abaixo da CLC, indicam que o material suporta bem as deformações impostas.

Com essas informações pode-se:

- Determinar a margem de segurança na estampagem de peças, sem que ocorra a ruptura do material na prensa;
- Indicar de forma precisa, os pontos críticos na estampagem de determinada peça;
- Conhecer a severidade de forma, em função dos gradientes de deformação, observados nos corpos-de-prova;
- Determinar a severidade das condições de operação (pressão no prensa-chapas, lubrificação, acabamento superficial do corpo-de-prova, etc);
- Determinar a influência da consistência de propriedades do metal lote a lote, sobre a margem de segurança na fabricação da peça conformada.

Algumas medidas podem ser adotadas quando as deformações situam-se acima ou bem próximas da CLC:

- Utilizar aços com melhores propriedades mecânicas;

- Redefinir o projeto da peça de modo a melhorar o nível e a distribuição das deformações;
- Melhorar o efeito da lubrificação e / ou rugosidade do material sobre as condições de estampagem;
- Prever possível excesso de pressão no prensa-chapas durante a fabricação da peça.

Segundo Bleck *et al.*, (1998), o diagrama limite de conformação é afetado pelas seguintes variáveis do material: espessura, resistência à tração, encruamento e taxa de deformação.

Sendo assim, o gerenciamento adequado no desenvolvimento da utilização da chapa ou do “*blank*”, pode resultar em uma economia significativa nos custos do produto (KUSUDA *et al.*, 1997).

O aumento da produtividade está relacionado à análise e minimização das margens de segurança empregadas no processo, em que pequenas diferenças nas propriedades dos materiais, condições do ferramental e lubrificação podem proporcionar mudanças significativas na produção. Com essas prerrogativas, visando o aperfeiçoamento contínuo da qualidade dos produtos e a redução dos custos de fabricação, surgiu um novo processo de fabricação aliado à tecnologia de soldagem a laser, para a obtenção dos “*blanks*” soldados sob medida, denominados “*Tailored Welded Blank*” (TWB), que serão apresentados no próximo tópico deste capítulo.

2.2 – “*Blanks*” Soldados sob Medida “*Tailored Welded Blanks*” (TWB)

No processo de produção convencional, os painéis das carroçarias dos veículos são produzidos a partir da estampagem de vários pequenos componentes individuais, sendo posteriormente unidos por um determinado processo de soldagem para gerar a forma final do painel desejado. Essa concepção de fabricação caracteriza-se por altos custos com ferramentas e materiais, além de contribuir para a imprecisão das peças nas etapas do processo de montagem.

Para solucionar esses problemas, surgiu o TWB que consiste em um processo de fabricação de “*blanks*” que permite obter-se peças tridimensionais a partir da conformação plástica de

chapas metálicas soldadas, bem como produzir peças com a utilização de materiais com diferentes propriedades físico-químicas e espessuras diversas, além de proporcionar a utilização de revestimentos superficiais em partes específicas dos produtos.

A característica fundamental do TWB é a distribuição correta e precisa de peso na estrutura da carroçaria do veículo. Materiais mais resistentes e / ou mais espessos são posicionados em regiões da carroçaria sujeitas a maiores solicitações mecânicas, e materiais menos espessos com características especiais de absorção de energia são introduzidos fundamentalmente com a finalidade de completar a peça, constituindo zonas de deformação e proporcionando maior segurança à célula do habitáculo em situações de colisões. (MEINDEIRS *et al.*, 2000).

Esse conceito é identificado nas estruturas internas das portas dos veículos, onde as regiões que acomodam as dobradiças e a fechadura permitem a utilização de materiais mais espessos e resistentes, e o restante da zona de fechamento, é produzida com materiais mais leves e finos garantindo maior eficiência da peça a ser produzida com relação ao desempenho e viabilidade do processo. Essa configuração de processo permite a minimização dos custos de fabricação em virtude da redução dos tempos e etapas de processo empregadas, além da excelente qualidade dimensional obtida na peça em função do sistema de prensagem garantir a mesma qualidade dimensional em todas as peças produzidas, diferentemente da vulnerabilidade dos ajustes freqüentes empregados na condição convencional de soldagem após a conformação.

A Toyota vem aplicando o processo TWB em carroçarias automotivas desde 1985 e produzia em 1997, 3,6 milhões de painéis para 60 tipos de aplicações diferentes (KUSUDA *et al.*, 1997).

Atualmente, a maioria das montadoras mundiais adotou esse tipo de tecnologia.

A aplicação de “*blanks*” soldados na indústria automobilística pode ser descrita em três fases, segundo esses autores:

Primeira fase: O uso foi limitado a painéis internos, visando melhorar a aplicação dos materiais à integração desses painéis.

Segunda fase: Foram aplicados a painéis externos, principalmente para melhorar a aparência da carroçaria e a precisão de montagem.

Terceira fase: Foram aplicados para melhorar a resistência dos veículos quando submetidos a colisões e principalmente reduzir o peso, melhorando a relação peso x potência.

Segundo Mendeirs *et al.*, (2000), os principais objetivos na fabricação de “blanks” soldados destinados à aplicação de painéis ou peças das carroçarias dos automóveis, é a redução de peso e do custo dos materiais utilizados.

Ainda segundo esses autores, a utilização do processo de TWBs resulta em algumas vantagens ao produto, processo e “design” quando comparado com o processo de obtenção de peças pelo método convencional. As vantagens são as seguintes:

- Redução do peso das peças a serem produzidas;
- Melhoria das tolerâncias dimensionais das peças - partes diferentes de um produto são soldadas juntas antes do processo de conformação, usando o processo de soldagem continua;
- Redução da quantidade de sucata devido a formas irregulares dos produtos. Peças muito pequenas, necessárias para formar um “blank” irregular, podem ser aproveitadas e facilmente unidas para a melhor utilização do material;
- Elevar a rigidez das peças;
- Aumentar o potencial de absorção de energia em situação de colisão;
- Reduzir o nível de retalhos da peça pós-conformada;
- Reduzir o número de partes a serem montadas, resultando em uma logística simplificada;
- Otimizar os custos referentes ao ferramental, incluindo matrizes e instalações;
- Possibilitar o aumento no potencial de gerar produtos com novas formas.

Agregando algumas dessas vantagens da aplicação dos TWBs, é possível contribuir para o desenvolvimento de projetos de carros mais leves e seguros, resultando em uma redução do consumo de combustível e melhoria de desempenho. Esse aspecto é muito importante do ponto de vista ecológico, porque uma menor quantidade de poluentes é gerada e lançada diariamente no meio ambiente.

Esses autores também enumeram algumas desvantagens na utilização dos TWBs:

- A soldagem das chapas planas é uma etapa extra no processo de produção, elevando os custos de fabricação em decorrência da implantação de células de fabricação exclusivamente destinadas à geração dos “blanks”;
- Redução da conformabilidade do TWB em relação a conformabilidade dos materiais-base, devido à solda e à zona afetada pelo calor que influenciam negativamente na conformabilidade do “blank” em decorrência do desenvolvimento de estruturas martensíticas.

A tecnologia TWB possibilita dispensar-se a utilização de alguns reforços estruturais, proporcionando redução de peso e diminuição dos desperdícios, habitualmente presentes em quantidades significativas quando se refere à fabricação de painéis com grandes aberturas, como painéis interiores das portas e laterais, como é exemplificado na Figura 2.6.

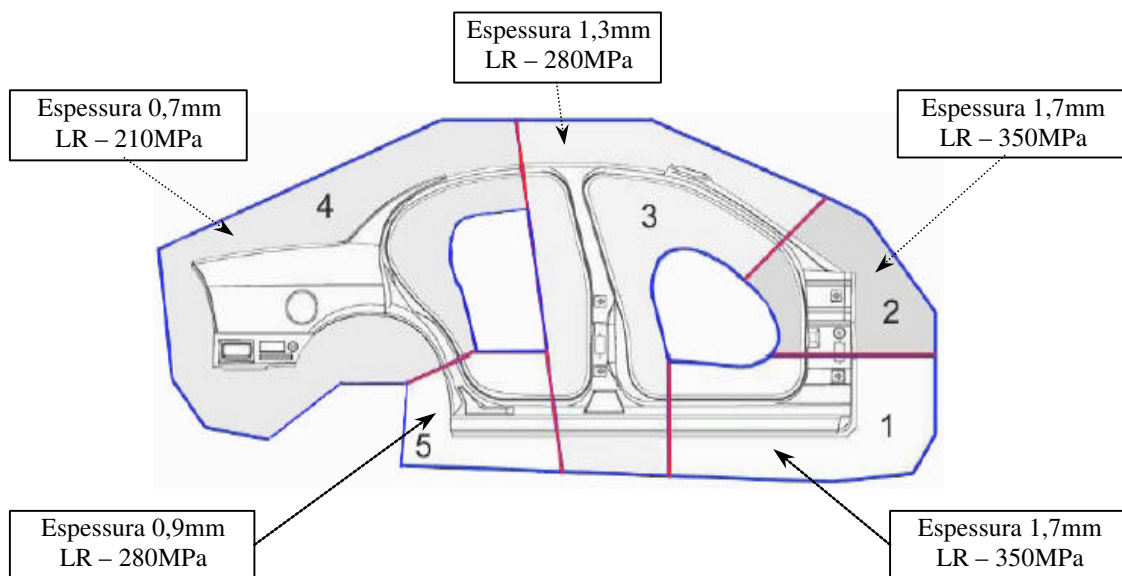


Figura 2.6 – Lateral de Carroçaria Constituído de “Tailored Welded Blank” (ULSAB)

O processo de soldagem do conjunto identificado pelas linhas vermelhas da Figura 2.6 foi realizado da seguinte forma:

Primeiro passo: soldagem das chapas 1, 2 e 3;

Segundo passo: soldagem das chapas 4 e 5;

Terceiro passo: integração total das chapas com a união dos dois grupos soldados, formados pelo primeiro e segundo passos;

Quarto passo: conformação plástica da peça (obtenção do painel lateral completo).

2.2.1 – Aspectos Tecnológicos dos “*Tailored Welded Blanks*”

A possibilidade da variação da combinação de materiais e espessuras no processo de obtenção do TWB tornou necessário recorrer-se a técnicas de soldagem tecnologicamente avançadas, como é o caso da soldagem a laser, por feixe de elétrons ou por arco elétrico. Com o desenvolvimento dessas tecnologias, foi possível garantir não só a união das diversas chapas que constituem o “*tailored welded blank*”, mas também, a resistência às solicitações a que são impostas, obtendo-se linhas de solda com elevada resistência e ductilidade (SHAKERI *et al.*, 2002).

Esses autores apresentam alguns processos de soldagem empregados para confeccionar o TWB:

- Raio Laser;
- Resistência elétrica com costura (RMSW);
- Indução por alta frequência;
- Feixe de elétrons (sem vácuo).

Segundo Meinders *et al.*, (2000), os processos de soldagem mais comumente utilizados são a soldagem a laser e o RMSW. Os dois processos de soldagem possuem características próprias.

A largura do RMSW incluindo a zona afetada pelo calor é de 10 a 15mm, enquanto que a largura da solda laser incluindo a zona afetada pelo calor é de 1 a 2mm. O volume da fração de martensita na solda laser é maior devido às altas razões de temperatura durante o resfriamento.

Como as razões de temperatura são mais baixas no RMSW, menos martensita é produzida e conseqüentemente uma menor dureza da solda é gerada, sendo assim, a RMSW pode ter melhor conformabilidade do que a solda laser. A desvantagem desse processo é que a solda é muito aparente em contraste com a quase invisível solda a laser. A RMSW não é empregada para painéis externos dos veículos, enquanto que a solda a laser é estreita e raramente afeta a proteção catódica nos TWBs galvanizados.

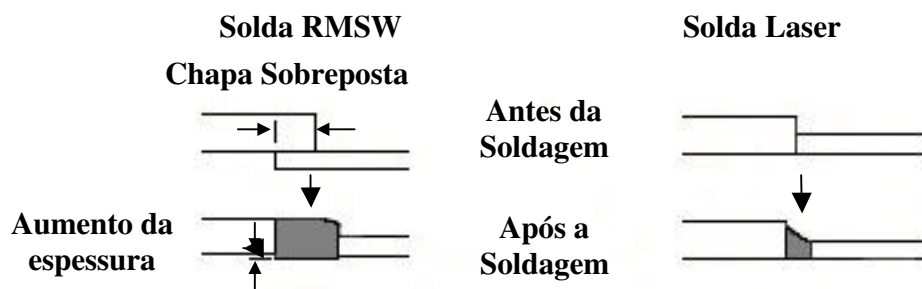


Figura 2.7 – Esquema de Soldagem pelos Métodos RMSW e Laser
(adaptada de MEINDERS, *et al.*, 2000).

A Figura 2.7 compara os processos de soldagem RMSW e laser, identificando o aumento da espessura no cordão de solda no processo RMSW em decorrência da necessidade da sobreposição das chapas durante o processo, além da largura excessiva do cordão de solda inviabilizando a sua utilização em painéis externos. Em contrapartida, o processo de soldagem a laser proporciona um cordão de solda mais limpo, estreito e homogêneo.

Atualmente, a indústria automobilística emprega a soldagem a laser como o principal processo de soldagem para a obtenção de TWBs, devido à precisão, resistência e acabamento da soldagem. Esse método exige durante o processo de soldagem, a presença de superfícies planas e regulares, com elevado grau de acabamento, bem como ausência de oxidação.

Segundo Bayraktar *et al.*, (2005), a maioria dos aços soldados TWB são produzidos pelos processos de soldagem a laser. Os processos são soldagem a laser CO₂ e soldagem a laser Nd:YAG (cristal de neodímio – ítrio – alumínio) podendo ser pulsado ou contínuo. TWBs de aço soldados a laser, tipicamente possuem uma parte da solda que é significativamente maior na resistência e na dureza e que apresenta baixa ductilidade em relação aos materiais-base empregados.

A qualidade do corte da chapa é extremamente importante para a confecção do TWB soldado a laser, porque esse processo de soldagem não emprega metais de adição e a fusão dos aços ocorre diretamente nos metais-base. Dessa forma, o encosto das chapas no equipamento de soldagem a laser deve ser perfeito sem a presença de frestas.

2.2.2 – Aplicação dos “*Tailored Welded Blanks*”

Os TWBs são amplamente utilizados na indústria automobilística moderna, sendo empregados na fabricação dos seguintes componentes:

- Colunas A, B e C situadas em ambos os lados das portas;
- Painéis internos das portas;
- Longarinas;
- Assoalhos;
- Caixas de roda;
- Laterais.

A Figura 2.8 apresenta um exemplo de aplicação de TWB em assoalho de veículo, composto pela união de três chapas com dois materiais de espessuras e composição química diferentes.

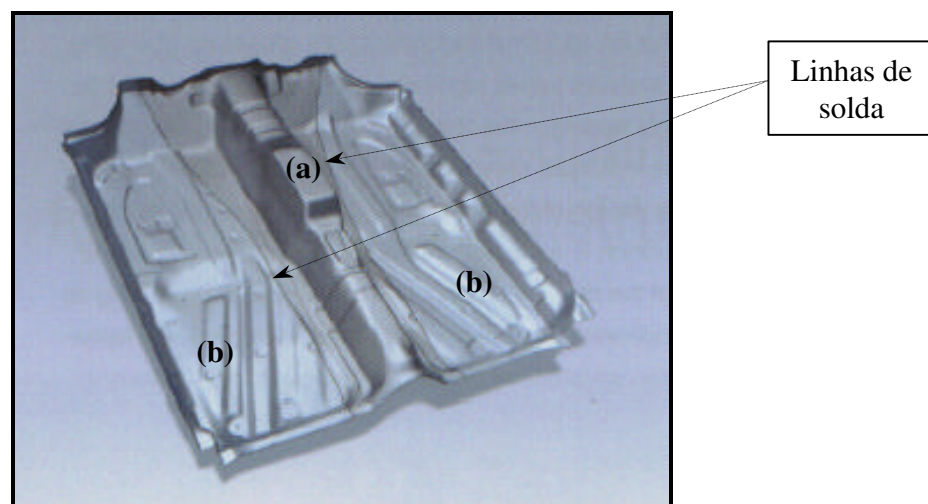


Figura 2.8 – Exemplo de Assoalho Veicular Estampado a partir de um Esboço TWB
(foto extraída de KORVES e MOHRBACHER, 2003).

O detalhe (a) da figura 2.8 mostra uma região estrutural do assoalho, em que é necessária a utilização de materiais mais espessos e mais resistentes, devido às solicitações mecânicas, de torção e flexão impostas nessa região. O detalhe (b) da figura emprega materiais mais finos e mais leves, por se tratar de regiões de fechamento com pouca solicitação mecânica.

2.2.3 – Descrição do Processo de Soldagem a Laser

A soldagem a laser exige um raio concentrado na superfície que seja suficiente para fundir o material, como mostrado na Figura 2.9 que representa esse processo.

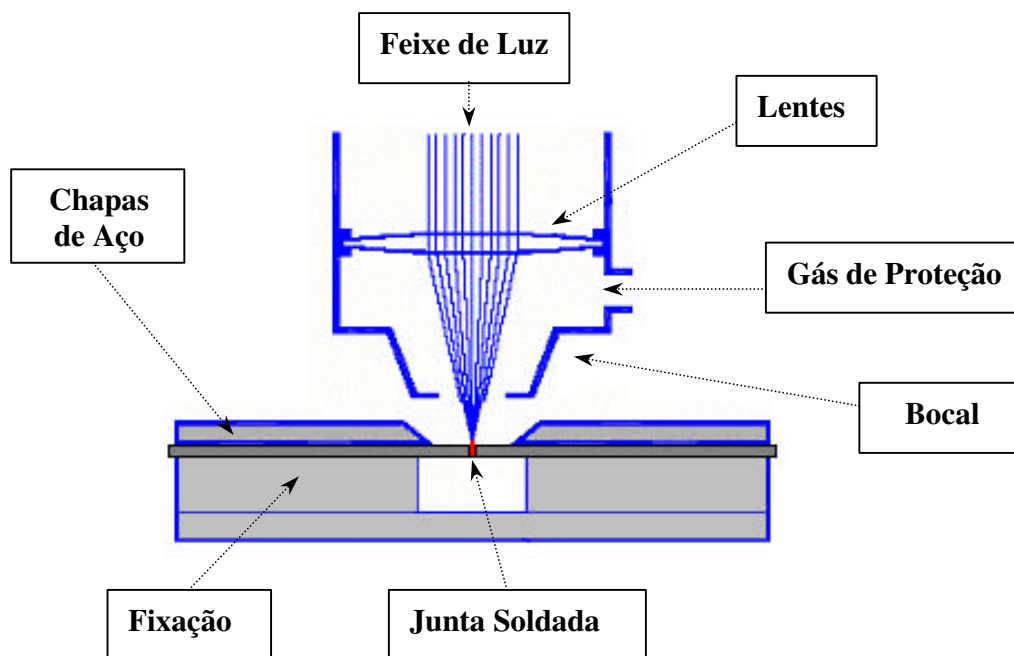


Figura 2.9 – Soldagem a Laser Empregada na Fabricação de “*Tailored Welded Blanks*”
(adaptada de AUTOMOTIVE STEEL DESIGN MANUAL, 2002).

A concentração crítica de energia é de aproximadamente 10^4W/cm^2 para a maioria das ligas ferrosas. Nesta densidade de potência, a energia transferida de um raio laser dentro da peça ocorre em duas dimensões, e a profundidade da solda é determinada pelo escoamento do material na poça fundida. Além da densidade da potência, outros fatores como a refletividade do material, a velocidade relativa entre o material e o raio, e o comprimento de onda do laser, determinam a configuração da solda (AUTOMOTIVE STEEL DESIGN MANUAL, 2002).

No processo de soldagem a laser, freqüentemente utilizam-se gases para aumentar a transferência de energia no processo de soldagem e também diminuir a oxidação do material fundido, garantindo a integridade e melhorando a aparência visual da solda.

Ainda segundo esses autores, há dois tipos de lasers primários usados para soldagem de ligas aço na indústria automobilística: Laser CO₂ (gás) e Laser Nd:YAG (estado sólido).

O laser CO₂ opera com um comprimento de onda da ordem de 10,6μm enquanto o laser Nd:YAG opera com um comprimento de onda de 1,06μm. Ambos os lasers podem usar espelhos e lentes para direcionar e focalizar o raio. O comprimento de onda mais curta do Nd:YAG permite utilizar fibras ópticas (200 a 1000μm de diâmetro). Os laser Nd:YAG permitem a utilização de sistemas robotizados simples, enquanto os lasers CO₂ são restritos a células de manufatura com manipuladores complexos. Esses fatores incidem diretamente nos custos envolvidos na operação.

2.2.4 – Operações de Conformação de Esboços TWB

Segundo Kusuda *et al.*, (1997), devido às vantagens de utilização do TWB em relação aos processos produtivos empregados, associados à melhoria da qualidade e eficiência do produto produzido, podem ser impostos aos “*Tailored Welded Blanks*” operações de conformação plástica de estampagem profunda para determinar a forma final do produto.

A estampagem do TWB necessita de um prensa-chapas com geometria que possibilite a absorção da linha de solda ou o degrau existente entre a diferença de espessura das chapas.

Durante o processo, os materiais de menor espessura e / ou materiais mais dúcteis são solicitados com maior intensidade, fato esse que distorce a forma do produto durante a estampagem promovendo a movimentação da linha de solda.

Como em todas as operações de estampagem, o controle do processo das operações de estampagem para TWB requer o monitoramento da força do prensa-chapas, da uniformidade do material a ser conformado, das folgas entre punções e matrizes, da lubrificação e da carga de prensagem.

As características de conformabilidade devem ser analisadas cuidadosamente nos TWB, pois as condições de resposta dos materiais em função da diferença de espessuras ou diferença dos materiais empregados podem ocasionar falhas prematuras no produto. Além disso, o processo de soldagem causa um endurecimento da junta soldada e na zona afetada pelo calor, de modo que a conformabilidade nesta região é reduzida em relação à região contínua dos recortes.

Segundo Crivellaro (2003), a dureza na zona de fusão e na zona afetada pelo calor do “*Tailored Welded Blank*” é aproximadamente o dobro da dureza dos metais-base. As Figuras 2.10 e 2.11 mostram o aumento da dureza no centro da linha de solda de um “*Tailored Welded Blank*” confeccionado pelo processo de soldagem a laser, devido às altas taxas de resfriamento presentes na soldagem.

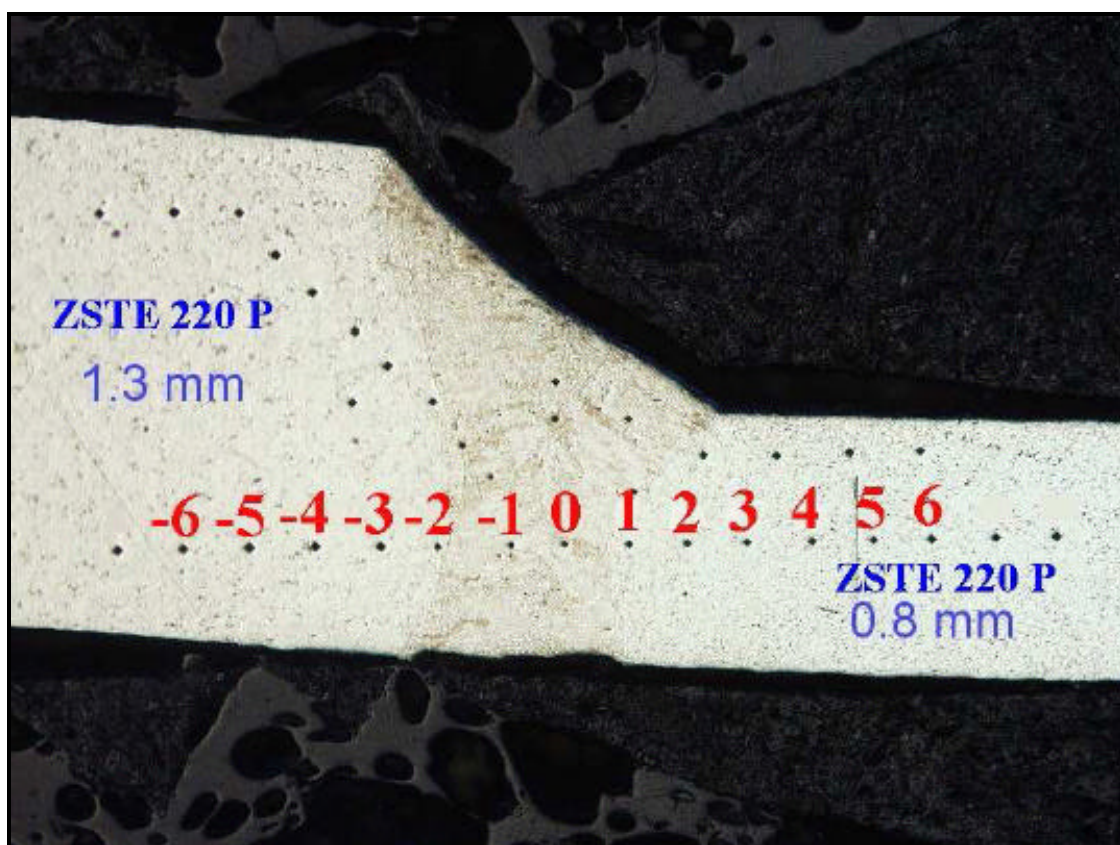


Figura 2.10 – Pontos de Indentação para Mensurar a Microdureza do TWB (CRIVELLARO, 2003).

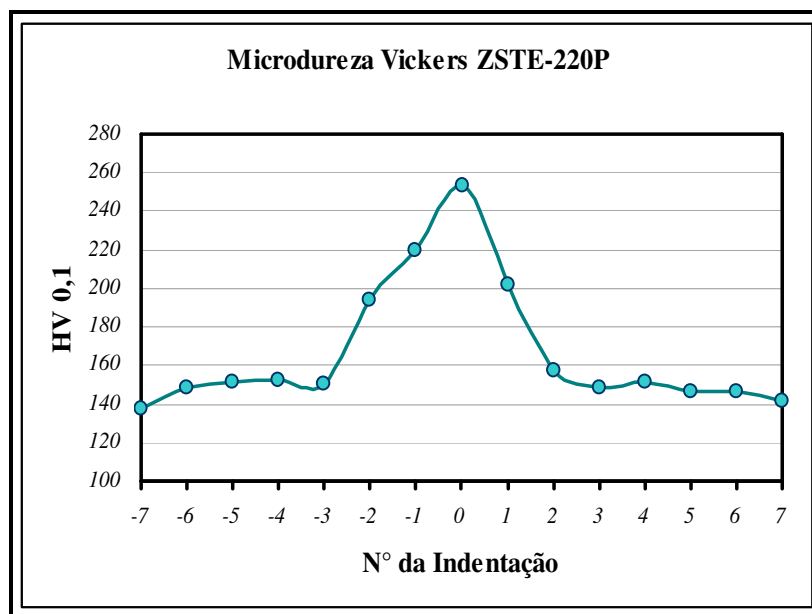


Figura 2.11 – Distribuição da Dureza ao Longo da Seção Transversal do Aço ZSTE-220P (CRIVELLARO, 2003).

Nesta figura pode-se observar o efeito causado pela mudança microestrutural ocorrida nas chapas durante a junção, devido às altas taxas de temperatura do processo de soldagem a laser aliado ao rápido resfriamento que a junta soldada é submetida logo após o processo de soldagem (CRIVELLARO, 2003).

Também é importante verificar que o metal-base do TWB não sofreu alterações significativas de dureza durante o processo de soldagem, mantendo a ductilidade equilibrada em relação à linha de solda e mostrando uma faixa estreita de material afetado pela zona de calor.

Segundo Min *et al.*, (2000), para a fabricação de painéis externos da carroçaria do automóvel produzido com TWB, é necessário analisar-se os seguintes aspectos para que não haja falhas durante a estampagem:

- A resistência das partes soldadas deve ser bem maior do que a dos metais-base;
- Após a soldagem, deformações severas na linha de solda deverão ser evitadas;
- A conformabilidade das partes soldadas deverá ser similar ao dos metais-base;
- A reprodutibilidade da solda deve ser alta.

É importante notar que o TWB só resiste à deformação paralela à linha de solda, embora as deformações ocorram em todas as direções no plano da chapa. Deformações perpendiculares à linha da solda que excedem o limite de resistência do material resultam no afinamento ou na ruptura paralela à linha de solda do material menos resistente (Figura 2.12). Assim, no caso de “blanks” com materiais distintos, a influência da geometria geralmente excede a influência da solda sobre a conformabilidade.

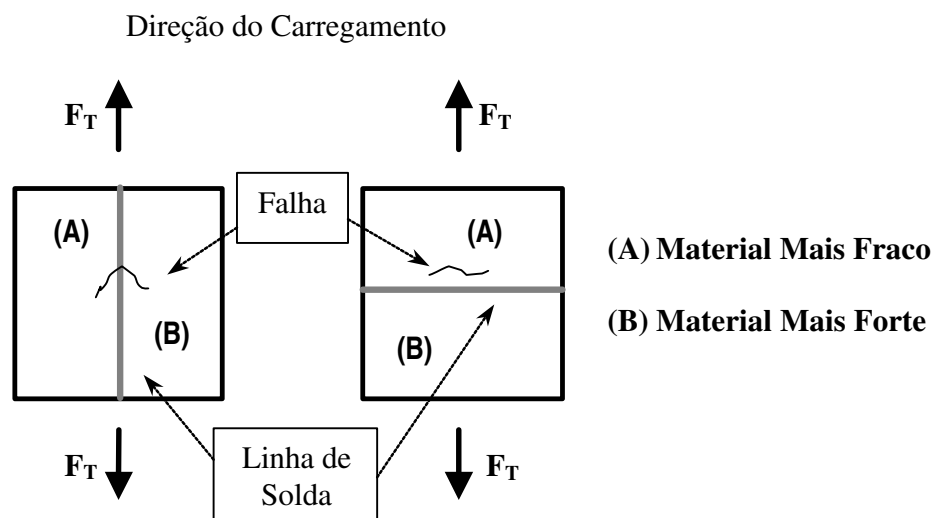


Figura 2.12 – Falhas de TWBs quando Solicitados a Tensões de Tração
(adaptada de BAKRAKTAR *et al.*, 2005).

Segundo esses autores, dois tipos de falhas podem ocorrer nos TWBs, ou a falha inicia-se na solda ou no material-base mais fraco.

Kinsey *et al.*, (2000) identificaram que a ductilidade ao longo da linha de solda no TWB é severamente reduzida, contribuindo assim para a geração de falhas.

Meinders *et al.*, (2000) mostraram que o segundo tipo de falha ocorre pela deformação perpendicular do TWB em relação à linha de solda. A deformação estará localizada no material-base mais fraco, desde que a solda tenha uma tensão de escoamento mais elevada do que os materiais-base, e conseqüentemente a conformabilidade nesta direção depende das propriedades mecânicas do material-base mais fraco.

A causa fundamental para a diminuição da conformabilidade nos TWBs é o fato de que o material menos espesso ou menos resistente sofre a maior deformação durante o processo de conformação, enquanto o material mais espesso ou mais resistente não se deforma na mesma intensidade. Para melhorar o rendimento na estampagem dos TWBs, usam-se métodos de retardo no escoamento do material menos espesso, que proporciona condições para que o material mais resistente sofra maiores deformações e posteriormente possa equalizar os níveis de deformação.

Kridli *et al.*, (2003) e Kusuda *et al.*, (1997) apontaram que a conformabilidade do TWB é predominantemente afetada pela espessura do material mais fino e essa influência é tanto maior quanto maior for a razão de espessura das chapas soldadas.

Chan *et al.*, (2003) mostraram que a intersecção da CLC no eixo de maior deformação é uma função das espessuras das chapas, e concluíram que quanto maior a razão de espessuras, menores são os limites de conformabilidade. As Figuras 2.13 e 2.14 e a Tabela 2.1 adaptadas desse trabalho mostram a influência da taxa de espessuras e do uso de materiais distintos sobre o comportamento do TWB quando submetido a um ensaio de tração uniaxial.

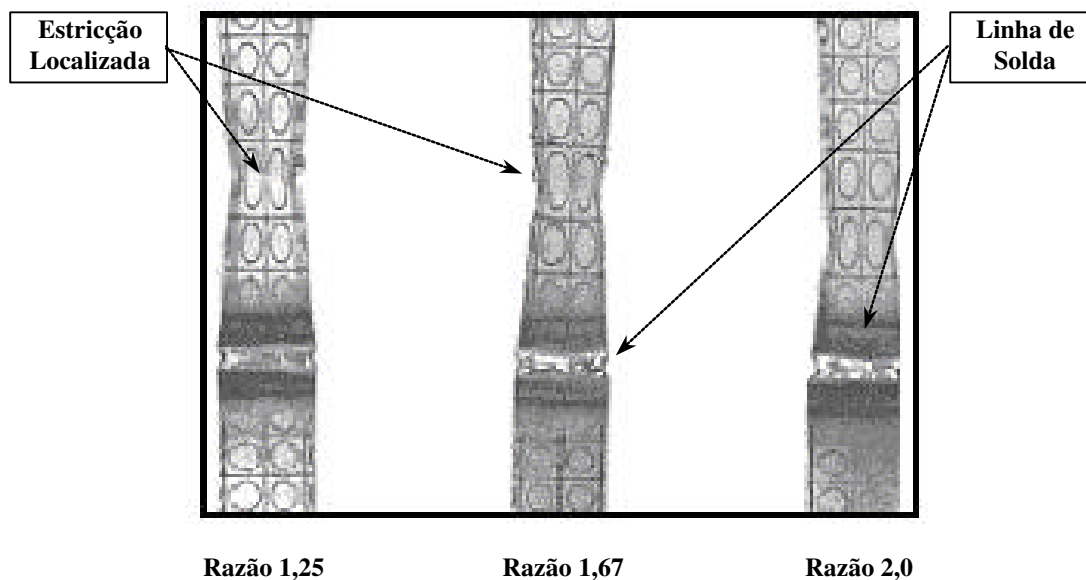


Figura 2.13 – Aspectos dos Corpos-de-Prova TWB com Diferentes Razões de Espessuras, Deformados no Ensaio de Tração Uniaxial (adaptada de CHAN *et al.*, 2003).

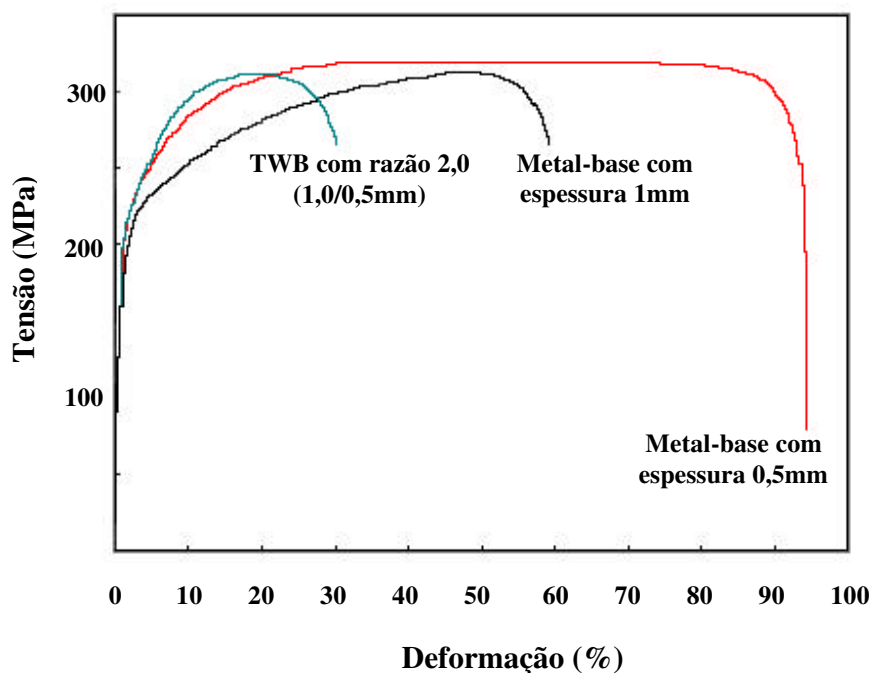


Figura 2.14 – Comparação dos Resultados dos Ensaio de Tração com Chapas TWB e com os Materiais-Base Individuais (adaptada de CHAN *et al.*, 2003).

Tabela 2.1 – Resultados dos Ensaio de Tração para TWBs com Diversas Razões de Espessuras e para os Materiais-Base (adaptada de CHAN *et al.*, 2003).

Razão de espessura dos corpos-de-prova	Limite de resistência (MPa)
2,00 (0,50/1,00mm)	311,28
1,67 (0,60/1,00mm)	323,49
1,25 (0,80/1,00mm)	303,27
Espessura do metal base (mm)	Limite de resistência (MPa)
0,50	317,79
0,60	315,00
0,80	284,45
1,00	319,01

Os resultados dos gráficos obtidos das três razões de espessura e apresentados na Tabela 2.1 mostraram que não existe diferença significativa entre o limite de resistência dos TWB e os materiais-base individuais, porém observou-se que houve uma grade redução da ductilidade nos ensaios com as chapas TWB. Assim, concluíram que no uso do TWB ocorreria uma considerável

redução de peso do painel automotivo sem acarretar uma redução significativa de sua resistência mecânica.

A Figura 2.15 também adaptada desses autores apresenta a influência da razão de espessuras sobre a CLC para as chapas TWB, confirmando que razões maiores reduzem significativamente esses limites, dificultando e restringindo a estampagem desse tipo de material.

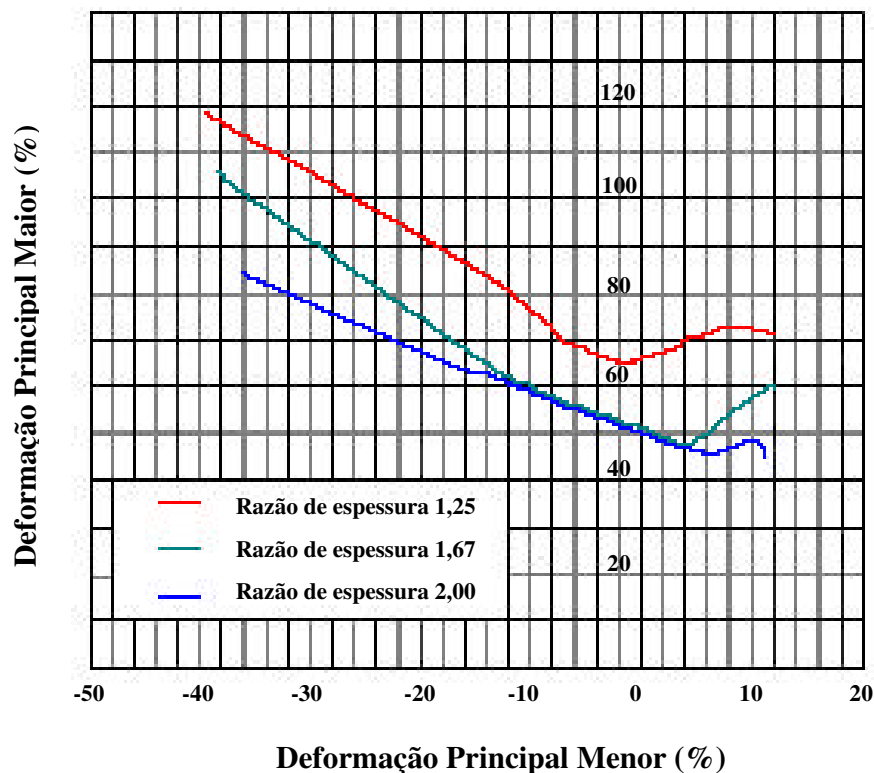


Figura 2.15 – Curvas Limites de Conformação (CLC) para TWB com Diferentes Razões de Espessuras (adaptada de CHAN *et al.*, 2003).

Um aspecto importante na conformabilidade do TWB é o fato da movimentação da linha de solda. Segundo Meinders (2000), essa movimentação é significativamente influenciada pela ocorrência do estado de deformação, especialmente quando o material é estirado perpendicularmente em relação à linha de solda, devido à localização da deformação no material-base mais fino (fraco).

Segundo Heo *et al.*, (2001) a linha de solda desloca-se no TWB durante conformação, no sentido da chapa mais fina para a mais espessa, fato esse, que pode ser explicado pela diferença de resistência e conformação dos dois materiais. A movimentação da linha de solda pode ser controlada através da instalação apropriada de “drawbeads” na ferramenta ou segundo Meinders (2000), pode ser realizada através do posicionamento da linha de solda na região com baixas deformações perpendiculares em relação à linha de solda, sendo que, a força do prensa-chapas e o atrito, são variáveis de influência importantes no processo de embutimento profundo do TWB.

Segundo Korves e Mohrbacher, (2003) atualmente utiliza-se para a confecção de TWBs o processamento de aços “Dual” e “Complex Phase”, visando auxiliar a otimização das características de deformação dos componentes a serem fabricados.

Também segundo esses autores, a perspectiva de evolução da aplicação de TWBs tendo em vista os resultados verificados nos últimos anos pode ser representada pela Figura 2.16.

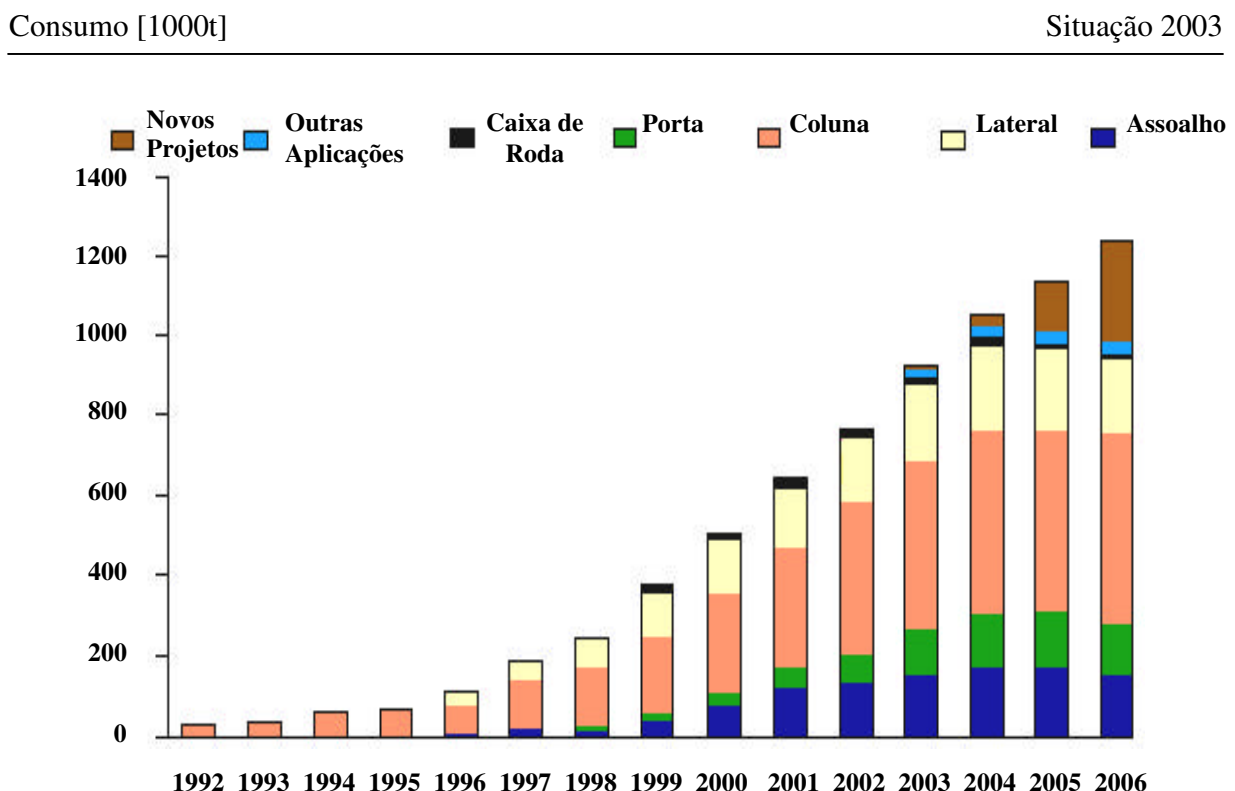


Figura 2.16 – Previsão do Consumo de TWB
(adaptada de KORVES e MOHRBACHER, 2003)

2.3 – Características Tecnológicas da Hidroconformação

Segundo Zhang (1999) a hidroconformação possui uma grande variedade de denominações, tais como: conformação hidráulica, embutimento profundo por hidroconformação, conformação flexível, “*hydrobulging*”, conformação por alta pressão, conformação por baixa pressão e embutimento profundo hidromecânico.

Essa tecnologia de conformação foi desenvolvida na década de 40, Pré-Segunda Guerra Mundial, e suas aplicações eram destinadas exclusivamente à indústria aeronáutica alemã e foram restritas a alguns campos específicos por causa dos direitos aduaneiros particulares, incidindo em um número reduzido de pesquisas e experiências práticas. Na década de 90, a hidroconformação chamou a atenção de muitos campos industriais, especialmente das indústrias automobilísticas.

Hoje, um dos objetivos da indústria automobilística moderna é a minimização dos custos de fabricação e a otimização dos produtos em relação ao peso e as características de robustez e rigidez estrutural do veículo. Nesse contexto se enquadra a hidroconformação de tubos, que consiste em um processo de conformação plástica dos metais a frio, possibilitando a fabricação de peças com geometrias complexas com variações nas seções transversais e linhas de centro, através da aplicação de elevadas pressões hidráulicas.

O processo de hidroconformação também possibilita fabricar peças a partir de chapas planas, podendo-se reduzir os custos de fabricação das ferramentas através da utilização de somente um punção ou uma matriz, e eliminando os ajustes necessários entre a matriz e o punção existentes nas ferramentas destinadas à estampagem convencional. Embora os resultados de conformabilidade obtidos pela utilização dessa tecnologia sejam muito promissores, ela ainda não foi muito difundida na indústria, resumindo-se a poucas aplicações em produtos seriados e bastante utilizada na fabricação de peças para veículos protótipos.

Segundo Hertell (2001), as expectativas de utilização de peças hidroconformadas são prósperas, com perspectivas significativas de crescimento de produção de peças hidroconformadas na Europa para os próximos anos, como mostrado na Figura 2.17.

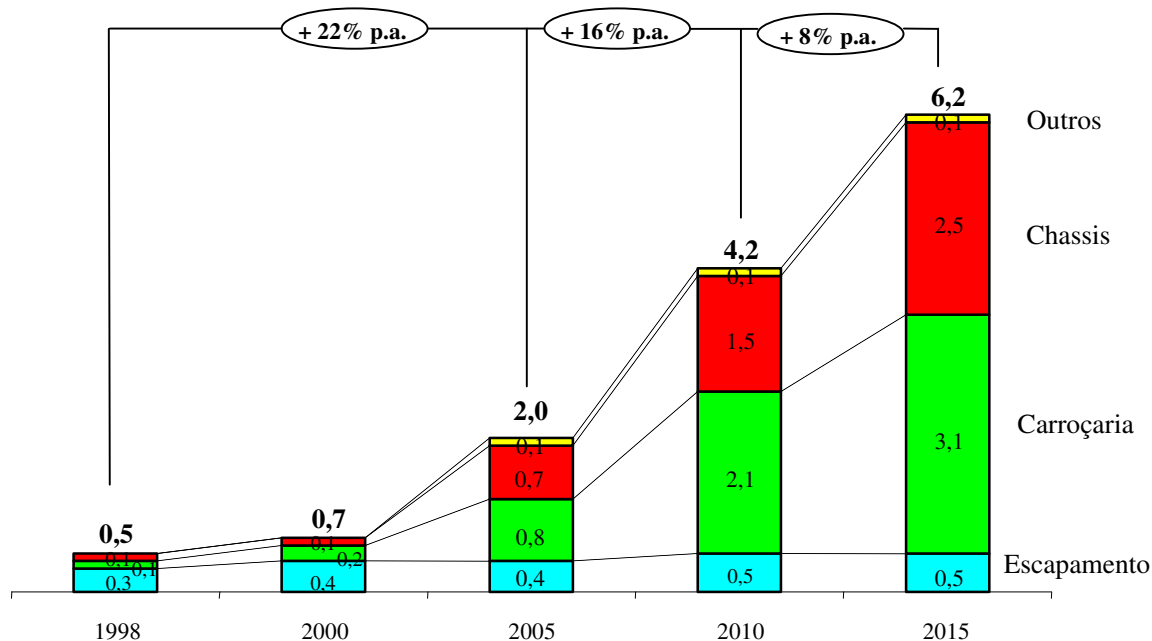


Figura 2.17 – Expectativa de Aumento do Consumo de Produtos Hidroconformados para Automóveis na Europa (adaptada de HERTELL, 2001).

A hidroconformação é geralmente definida como de baixa ou alta pressão. O ponto limite entre esses dois níveis tem sido arbitrariamente definido industrialmente em torno de 83MPa (12000psi). A complexidade da geometria da peça determina se a hidroconformação será de baixa ou alta pressão. A pressão interna na hidroconformação de tubos é comparativamente muito maior do que nos outros processos de hidroconformação. O processo de hidroconformação de tubos é classificado como de baixa pressão, onde a pressão interna oscila entre 80 e 100MPa e a redução de espessura é geralmente inferior a 5%. A hidroconformação de alta pressão atinge pressões da ordem de 690MPa com relatos de até 1380MPa. O sistema de vedação na conformação por alta pressão é um elemento extremamente crítico, e exige uma atenção especial (ZHANG, 1999).

A hidroconformação é dividida em dois processos distintos (ZHANG, 1999):

- Hidroconformação de tubos;

- Hidroconformação de chapas planas.

2.3.1 – Descrição do Processo de Hidroconformação de Tubos

A tecnologia da hidroconformação de tubos é baseada na injeção de um fluido no interior de um tubo, comprimindo-o de forma radial e axial, fazendo com que as suas paredes sejam projetadas contra a ferramenta, obtendo-se assim a forma final desejada (Figura 2.18).

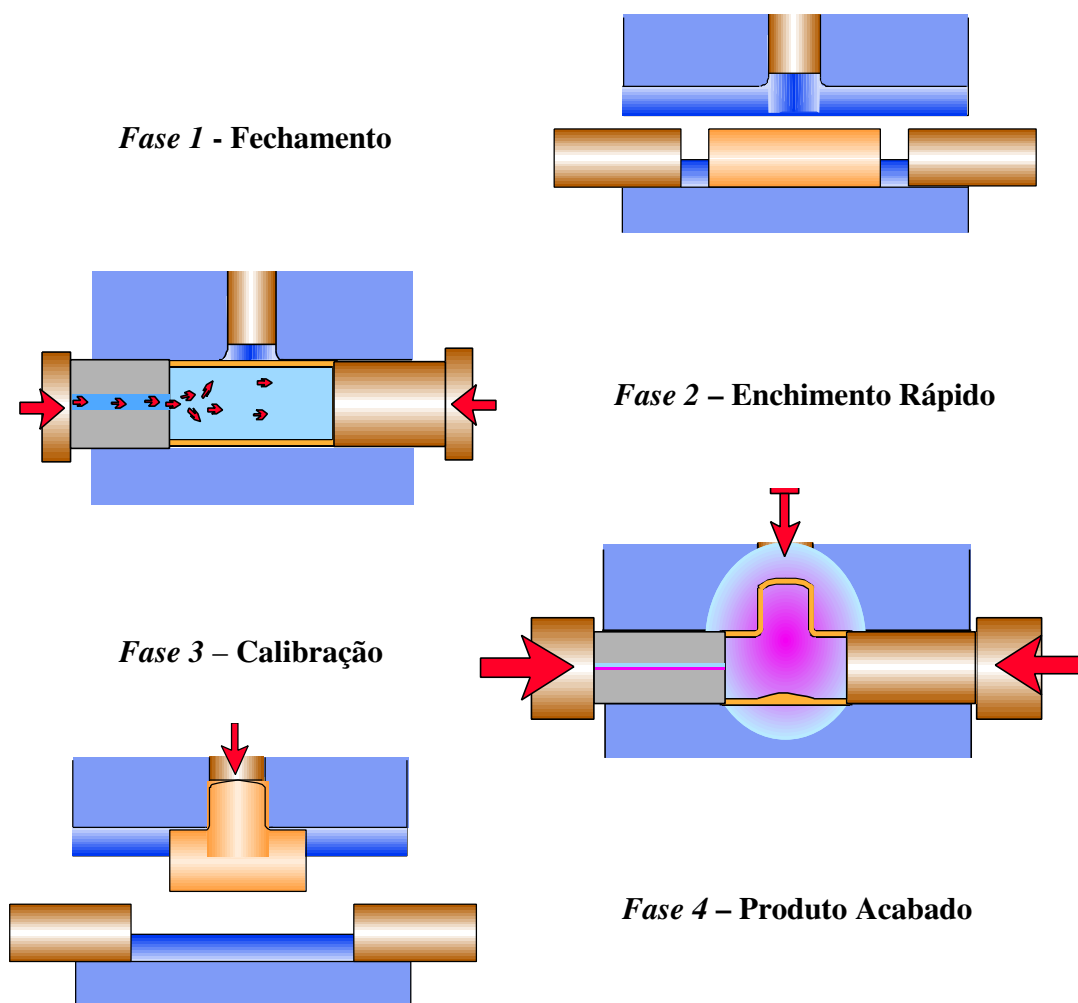


Figura 2.18 – Etapas de Hidroconformação de Tubos (adaptada de SCHULER, 1998).

Para a efetivação do processo de hidroconformação de tubos são necessárias as seguintes fases: pressurização, conformação e calibração (SCHULER, 1998).

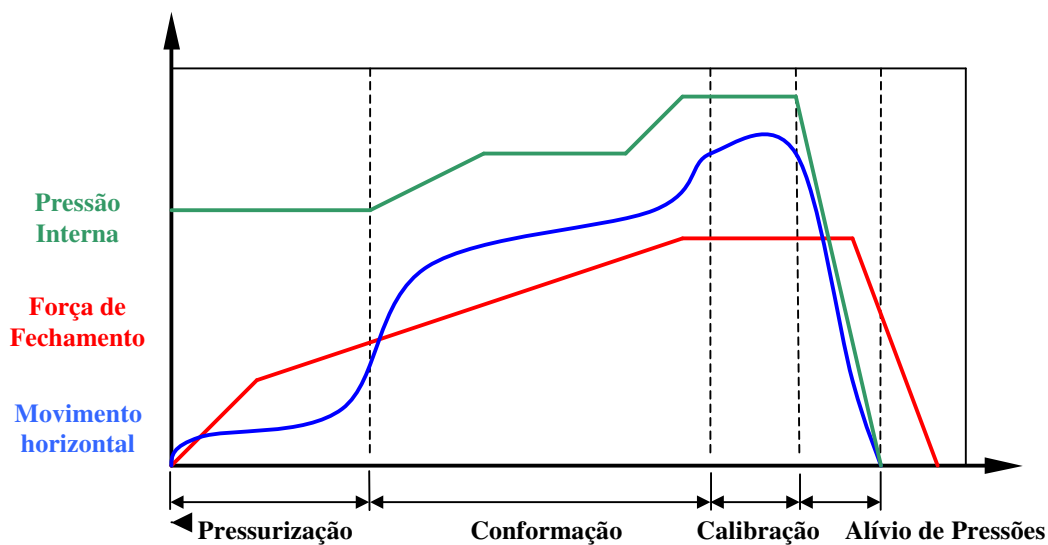


Figura 2.19 – Variação de Pressão no Processo de Hidroconformação (SCHULER, 1998).

Já a figura 2.20 apresenta a variação da pressão no interior do tubo ao longo do processo de hidroconformação, desde a fase de enchimento até a calibração do produto.

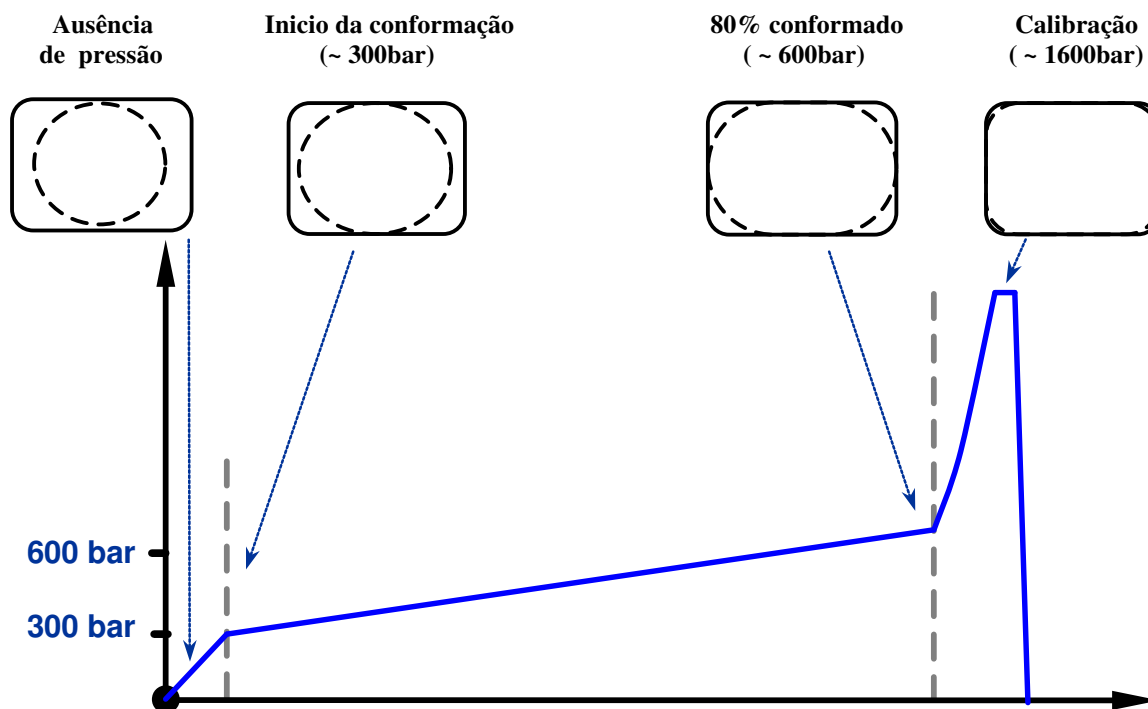


Figura 2.20 – Variação da Pressão no Interior do Tubo
(adaptada de HERTELL, 2001)

Rimkus *et al.*, (2000) propuseram que a pressão interna e a força axial são definidas como uma função do tempo e usualmente referida como curvas de carregamento que são influenciadas pelo tipo de material utilizado, pela espessura da chapa, pelo diâmetro do tubo, pela relação espessura da chapa / diâmetro do tubo e pelo raio de conformação.

Para realizar grandes expansões durante a hidroconformação de tubos, é necessário à utilização de passos intermediários de recozimento, ou empregar materiais com alta ductilidade para suportar os elevados níveis de deformação (SCHULER, 1998).

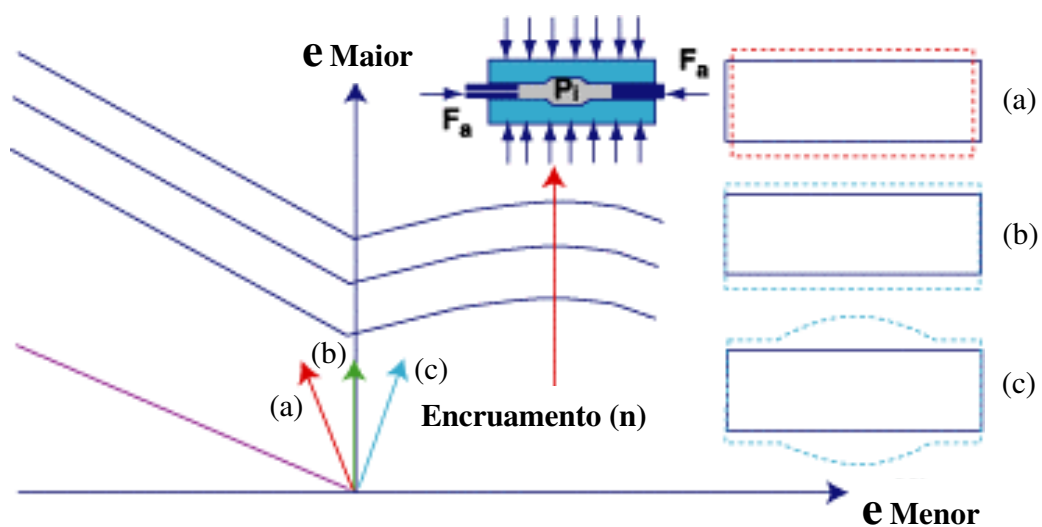


Figura 2.21 – Representação de Três Condições de Severidade na Hidroconformação (adaptada de HERTELL, 2001).

O detalhe (a) da figura 2.21 apresenta uma condição segura de hidroconformação, porque permite o escoamento do material para o interior da ferramenta com o auxílio de tensões compressivas geradas pela ação dos cilindros axiais. O detalhe (b) representa uma condição moderada de deformação, porque não existe a movimentação longitudinal do tubo incidindo em redução de espessura do material. O detalhe (c), em virtude de apresentar somente tensões de tração (estiramento puro), apresenta índice de deformação bastante acentuado com grande redução de espessura. Através dessa análise, é possível dizer que as tensões compressivas geradas pelos cilindros axiais possibilitam o escoamento do material promovendo um maior índice de deformação da peça.

A hidroconformação de tubos torna-se viável para produções acima de 50.000 peças com as seguintes características técnicas (HERTELL, 2001):

- Deformação da seção transversal inferior a 50%;
- Raio dos cantos da peça deve ser no mínimo seis vezes a espessura da parede do tubo;
- Raio de dobra deve ser no mínimo quatro vezes o diâmetro do tubo;
- O diâmetro do tubo deve variar entre 20 a 160mm;
- A espessura do tubo deve oscilar entre 2 e 6mm.

Ainda segundo Schuler (1998) a hidroconformação apresenta as seguintes vantagens:

- Tolerância dimensional apertada;
- Elevada rigidez e baixo “*springback*”;
- Elevada resistência a fadiga;
- Baixa resistência ao escoamento;
- Menos costuras de solda;
- Baixo peso e estabilidade otimizada;
- Componentes hidroconformados feitos em uma só peça.

A hidroconformação de tubos possibilita a geração de furações durante o processo de conformação. Nesse caso, o fluido pressurizado atua como uma matriz da ferramenta para apoiar a chapa de metal durante a operação de furação (Figura 2.22).

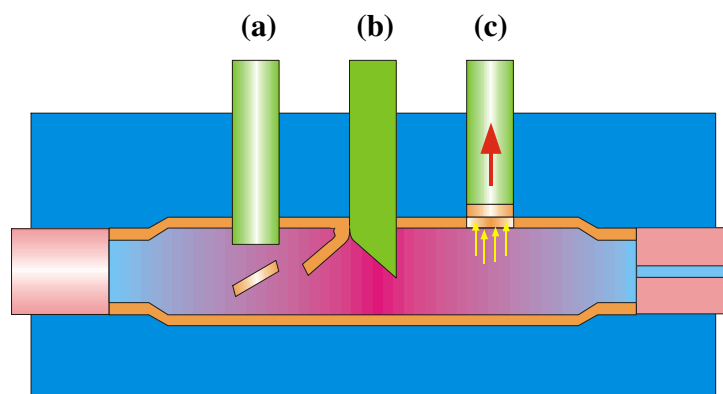


Figura 2.22 – Possibilidades de Furação na Hidroconformação de Tubos (SCHULER, 1998).

O detalhe (a) demonstra a ação de um punção atuando da face externa para a interna do tubo promovendo o cisalhamento de toda a periferia do anel a ser removido. O detalhe (b) refere-se à ação de um punção agindo da face externa para a interna do tubo, realizando o cisalhamento parcial do anel – esse tipo de operação é realizada quando a extração integral do anel não é desejável. O detalhe (c) refere-se ao movimento de recuo do punção, fazendo com que a elevada pressão no interior do tubo promova o cisalhamento total do anel de dentro para fora.

Essas características viabilizam a execução de um maior número de etapas de processo em um só equipamento, garantindo melhor precisão dimensional aos produtos hidroconformados.

2.3.2 – Aplicações de Peças Hidroconformadas a partir de Tubos

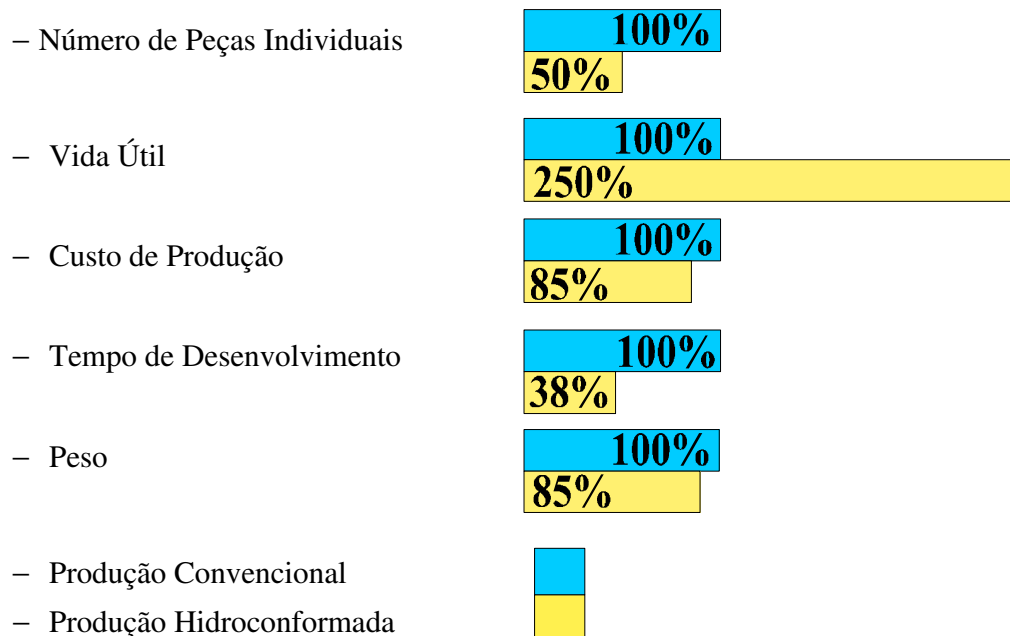
O berço de apoio do conjunto motor-propulsor e suspensão dianteira da Zafira (Figura 2.23) produzido a partir de tubos hidroconformados apresentam as seguintes vantagens em relação a um berço produzido pelos processos convencionais:

- redução de 60% no custo do ferramental;
- redução de 20% no custo de produção;
- redução de 30% no peso do produto acabado.



Figura 2.23 – Exemplo de Berço de Apoio do Modelo Zafira
(extraída de HERTELL, 2001).

Segundo Hertell (2001), a substituição dos coletores de escapamento fundidos Figura 2.24 (a), pelos coletores hidroconformados, detalhe (b) da Figura 2.24, apresentou os seguintes ganhos:



(a) Coletor Fundido



(b) Coletor Hidroconformado

Figura 2.24 – Coletores de Escapamento Produzidos por Fundição e por Hidroconformação (fotos extraídas de HERTELL, 2001).

A Figura 2.25 apresenta a aplicação de nove peças de alumínio produzidas pelo processo da hidroconformação de tubos, onde existe a necessidade de aliar-se a redução de peso com maior resistência mecânica localizada.

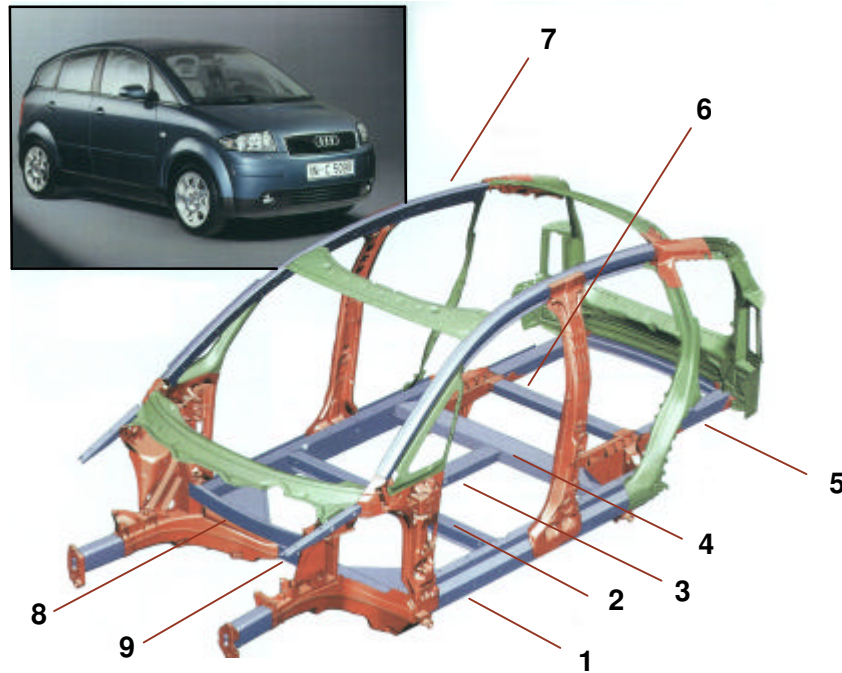


Figura 2.25 – Tubos Hidroconformados Empregados na Fabricação do Chassi do Audi A2
(adaptada de HERTELL, 2001 e HARTL, 2005).

A Figura 2.26 apresenta um chassi da camionete Silverado produzido com tubos de aço hidroconformados.

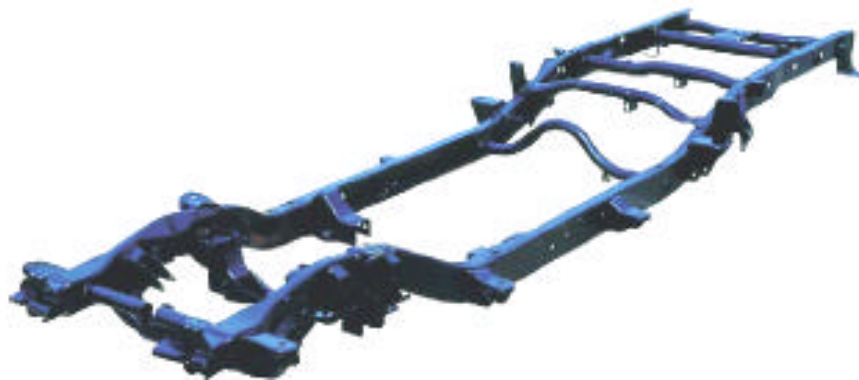


Figura 2.26 – Exemplo de Chassi Produzido com Tubos Hidroconformados
(foto extraída de DOHMANN e HARTL, 2004).

2.3.3 – Descrição do Processo de Hidroconformação de Chapas

A hidroconformação de chapas pode ser realizada com o auxílio de uma membrana de borracha separando o fluido do “*blank*” ou com a ação direta do fluido contra o “*blank*”, denominado embutimento profundo hidromecânico.

A hidroconformação de chapas pode ser realizada por dois métodos (HARTL, 2005):

1. A chapa é forçada dentro da cavidade da ferramenta pela ação do fluido sob pressão;
2. A chapa é conformada pela ação de um punção macho que age contra um fluido sob pressão.

2.3.3.1 – Hidroconformação de Chapas com Membrana de Borracha

O processo de hidroconformação de chapas exige somente a presença de uma ferramenta (fêmea) rígida – punção ou uma matriz, que é destinada a dar a forma final da peça, enquanto o outro lado da ferramenta é substituído por uma membrana de borracha utilizada para confinar o fluido pressurizado. A hidroconformação de chapas, também pode conformar simultaneamente dois “*blanks*” com o intuito de moldar um produto tubular de geometria complexa. Estes dois “*blanks*”, um superior e outro inferior podem ser ou não soldados juntos durante a conformação (KANG *et al.*, 2004).

Essa tecnologia tem sido utilizada nas indústrias automobilísticas para produzir peças grandes das carroçarias dos veículos, e é especialmente adequada para a conformação de peças de chapas metálicas destinadas ao desenvolvimento de protótipos ou peças de pequena escala de produção (ZHANG, 1999).

A Figura 2.27 adaptada de Zhang, 1999, representa o esquema de funcionamento da hidroconformação de chapas planas com o auxílio da membrana de borracha.

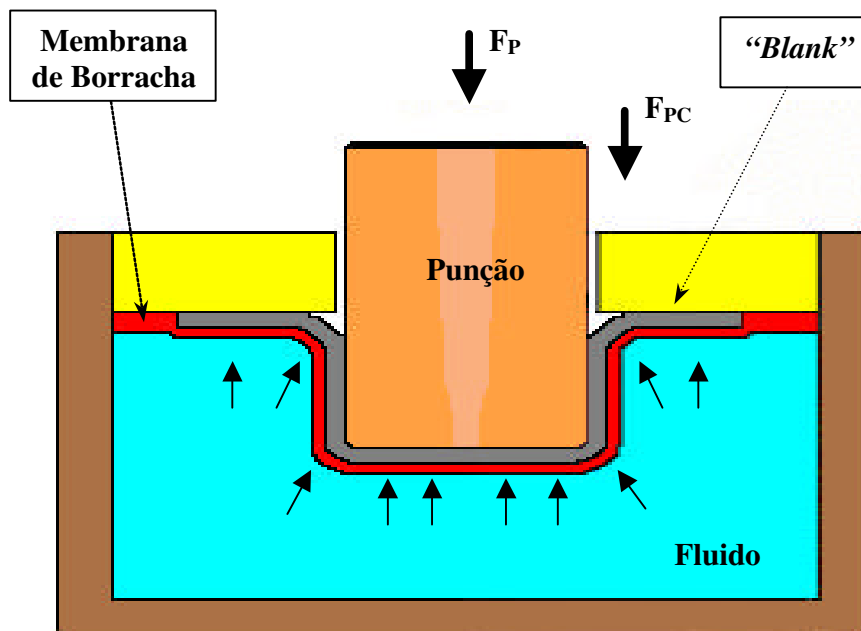


Figura 2.27 – Hidroconformação de Chapas Planas com o Auxílio de Membrana de Borracha (adaptada de ZHANG, 1999).

Nesta figura observa-se a aplicação de tensões compressivas em toda a área da peça conformada, em virtude da ação da pressão hidráulica atuar diretamente sob toda a área da membrana de borracha.

O grande inconveniente desse processo refere-se ao fato que a membrana de borracha resiste a um número reduzido de operações, exigindo substituições sucessivas, fato esse que aumenta o tempo de manutenção do equipamento, e elevando também o custo de produção (LASCOE, 1988).

2.3.3.2 – Hidroconformação de Chapas sem Membrana de Borracha

Nesse processo, a membrana de borracha é dispensada, e a pressão do fluido age diretamente no “blank”, resultando em significativos aumentos de produtividade e limites da taxa de embutimento, quando comparado com a hidroconformação de chapas por membrana de borracha (ZHANG, 1999).

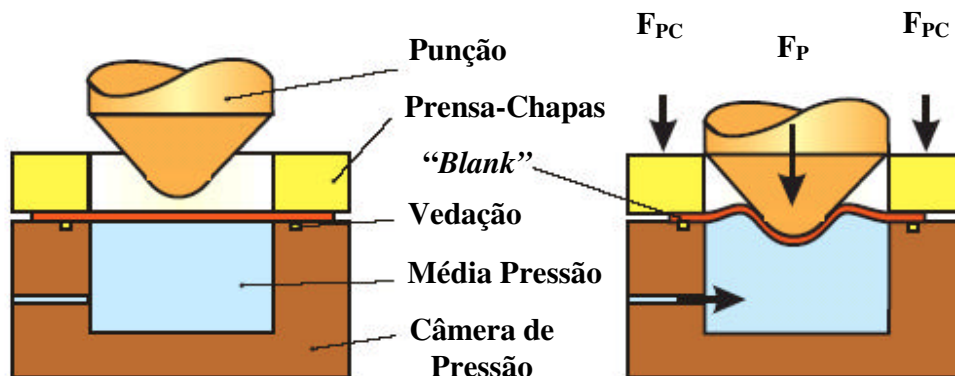


Figura 2.28 – Etapas do Processo de Hidroconformação de Chapas com Punção Cônico sem Membrana de Borracha (SCHULER, 1998).

Quando o punção começa a deformar o material, o volume no interior da câmara de pressão diminui, causando um aumento da pressão interna devido a incompressibilidade natural do fluido (ZAMPALONI *et al.*, 2003).

Esta pressão do fluido serve para dois propósitos:

- Primeiro: retardar o início da fratura do material;
- Segundo: forçar o material a conformar-se muito mais para a forma do punção do que as peças conformadas sem a resistência do fluido.

O segundo propósito provoca o escoamento de um grande volume de chapa a deformar-se uniformemente contra o punção antes de iniciar-se o seu deslocamento, atrasando o afinamento excessivo e adiando o início da fratura do material, em virtude da redução das forças de atrito atuantes entre a chapa e o punção no início da conformação (ZAMPALONI *et al.*, 2003).

O processo de estampagem por hidroconformação diverge da estampagem convencional, porque envolve a necessidade da utilização de uma câmara de alta pressão agindo como um compartimento para acomodar o fluido durante o processo de estampagem. Este auxílio externo fornece uma tensão compressiva em toda a área da peça, atrasando o início das instabilidades plásticas e reduzindo a formação de rugas (“*wrinkles*”) devido às forças de atrito.

Segundo Kang *et al.*, (2004) a hidroconformação oferece uma grande vantagem sobre a conformação convencional que é a distribuição de espessura mais uniforme do produto conformado devido à aplicação da pressão hidrostática. O encruamento é mais alto e mais uniforme com significativa redução do “*springback*” após o processo de hidroconformação.

Os resultados dos ensaios de hidroconformação de um tanque de combustível, realizados por Kang *et al.*, (2003), demonstraram uma redução de espessura de 31,6% do produto hidroconformado contra 43,6% do produto estampado. Isto é devido a maior distribuição uniforme da deformação plástica obtida durante a hidroconformação quando comparada com o processo de estampagem convencional.

A Figura 2.29 adaptada de Kang *et al.*, (2003), apresenta as pressões envolvidas para conformar cantos mais acentuados de um tanque de combustível. Raios menores necessitam de pressões de conformação muito mais elevadas do que os raios mais suaves.

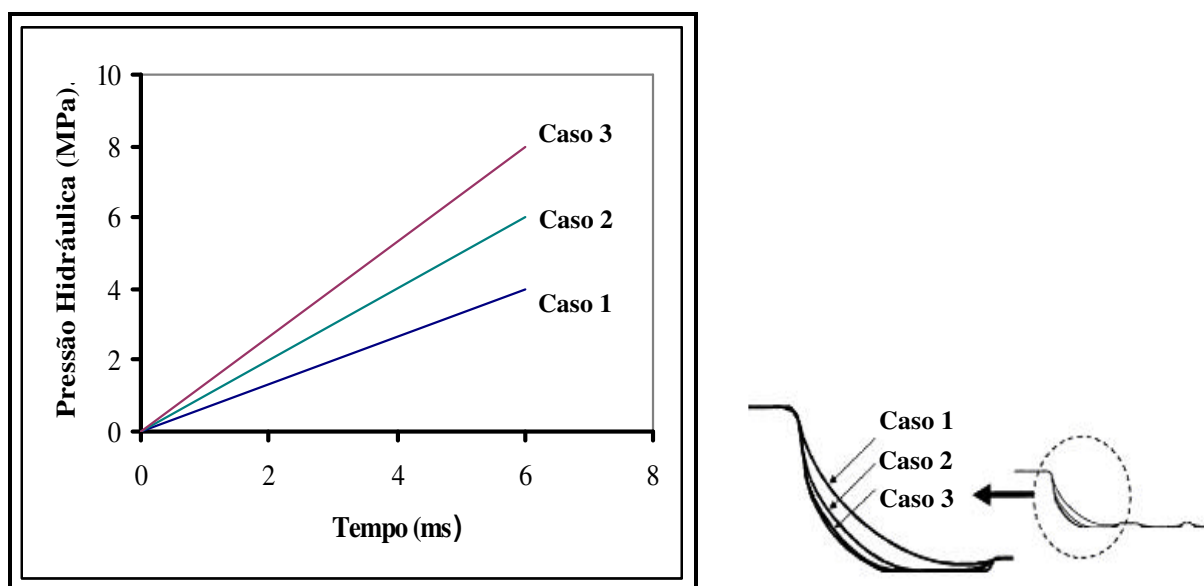


Figura 2.29 – Variação das Pressões de Hidroconformação em Relação ao Raio da Peça
(adaptada de KANG, 2003)

2.3.4 – Aplicações de Peças Hidroconformadas a partir de Chapas

A figura 2.30 apresenta um teto de um veículo de luxo produzido com chapa hidroconformada.

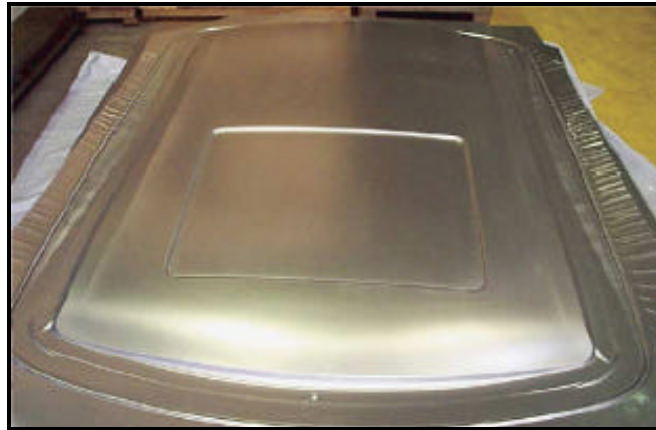


Figura 2.30 – Teto Hidroconformado (HARTL, 2005).

A Figura 2.31 mostra um braço oscilante de suspensão fabricado pelo processo de hidroconformação de pares de chapas.

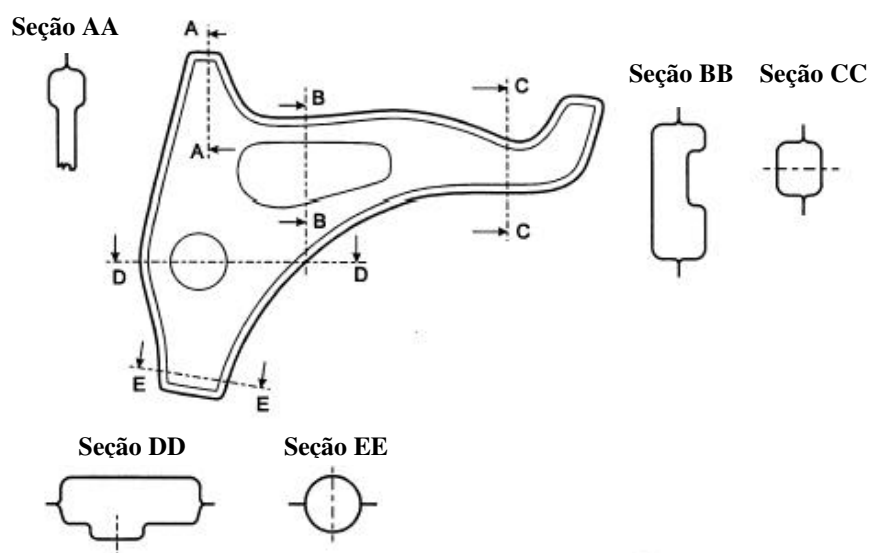


Figura 2.31 – Hidroconformação de Pares de Chapas
(adaptado de HEIN e VOLLERTSEN, 1990).

2.3.5 – Desafios da Hidroconformação

Os desafios presentes durante o processo de hidroconformação podem ser classificados em duas categorias principais: material e pressão do fluido (ZAMPALONI *et al.*, 2003).

O quesito material refere-se à escolha e ao comportamento da chapa ideal para a hidroconformação.

Um dos principais obstáculos diz respeito ao equilíbrio delicado entre a pressão do fluido e a ductilidade do material escolhido. A pressão do fluido necessita ser suficientemente elevada para estirar a peça trabalhada através dos raios de curvatura, para conformar a chapa na forma do punção ou da matriz, ainda que o material necessite ser dúctil o suficiente para deformar-se sem ruptura.

O segundo quesito é a relação entre a pressão do fluido e o deslocamento limite do punção durante o processo de hidroconformação.

As pressões do fluido no interior da câmara de pressão são tão elevadas que possibilitam o material dobrar para o raio de curvatura do punção muito mais rápido do que a ductilidade do material pode permitir. Esse comportamento pode levar a ruptura prematura da chapa.

Por outro lado, se a pressão do fluido for muito baixa, a chapa pode não estirar o suficiente durante o processo e enrugar. Por essa razão, existe a necessidade de estabelecer um intervalo ideal para a pressão do fluido, possibilitando determinar o limite do deslocamento do punção, para assegurar que não haja rupturas ou enrugamentos na peça acabada (Figura 2.30).

O detalhe (a) da Figura 2.32 determina três diferentes situações do processo de hidroconformação de chapas que ocorrem através da variação da pressão em relação ao deslocamento do material no interior da ferramenta, já o detalhe (b) apresenta também o efeito da ação da força do prensa-chapas durante a hidroconformação.

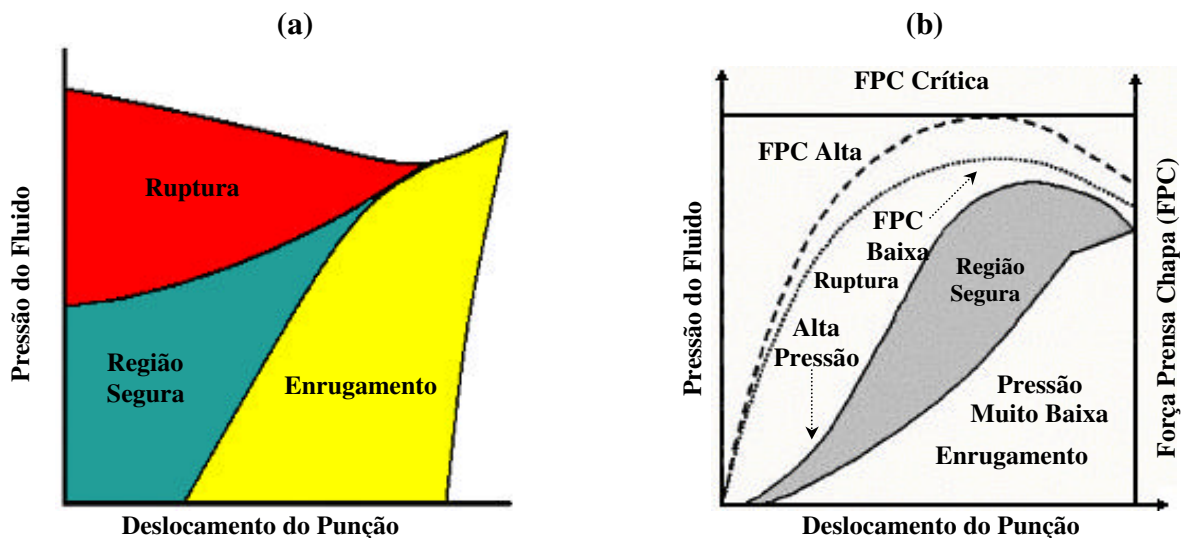


Figura 2.32 – Efeitos da Pressão Hidráulica e da Força do Prensa-Chapas na Hidroconformação (adaptadas de ZAMPOLI *et al.*, 2003 e de ABEDRABBO *et al.*, 2005).

A qualidade do produto final da hidroconformação depende amplamente dos parâmetros de processo como carregamento de pressão, atrito, forças atuantes no prensa-chapas, entre outros. O nível da pressão é determinado pela equiparação da força de fechamento contra a pressurização de hidroconformação e com o carregamento do punção no processo de estampagem (KANG *et al.* 2004).

Kandil (2003) estabeleceu que a pressão máxima depende da taxa de embutimento e da espessura da chapa, e foi determinada estar entre 15 e 30% da tensão de escoamento do material do “blank”.

Shulkin *et al.*, (2000) propuseram que as forças restritivas aplicadas no “blank” pelo prensa-chapas devem ser otimizadas para garantir que a chapa possa ser escoada para o interior da ferramenta possibilitando a obtenção de um produto conformado de excelente qualidade. Essa otimização ocorre pela aplicação de forças diferentes ao longo da área de contato no prensa-chapas, possibilitando diferentes estados de tensão nas mais variadas formas da peça.

Segundo Zampaloni *et al.*, (2003) manter-se uma pressão constante de conformação permite aumentar a profundidade da estampagem de 12 a 31% em relação às peças conformadas

sem a resistência do fluido (estampagem convencional). Essa melhoria na conformabilidade poderia ser atribuída a muitos fatores, mas a maior parte deles é causado pela mudança dos contornos dos produtos com raios mais acentuados.

Quando a chapa metálica abaula em uma direção (direção do punção) seguida pela deformação na direção oposta, as deformações planas e de curvatura reverterão causando o encruamento do material. Dependendo da quantidade de encruamento, a resistência à ruptura da chapa aumentará. Também, a curvatura e o estiramento reversos provocam o assentamento perfeito da chapa metálica na cavidade da ferramenta, para deformar-se plasticamente, e posteriormente a deformação localizada acima da superfície do punção será atrasada.

Outra razão para a conformabilidade melhorada pode ser determinada quando ocorre o início do abaulamento. O abaulamento proporciona mais material na cavidade da ferramenta para ser deformada pelo punção, em comparação com a estampagem convencional, na qual o grau de deformação da chapa no interior da cavidade da ferramenta é muito menor (Figura 2.33).

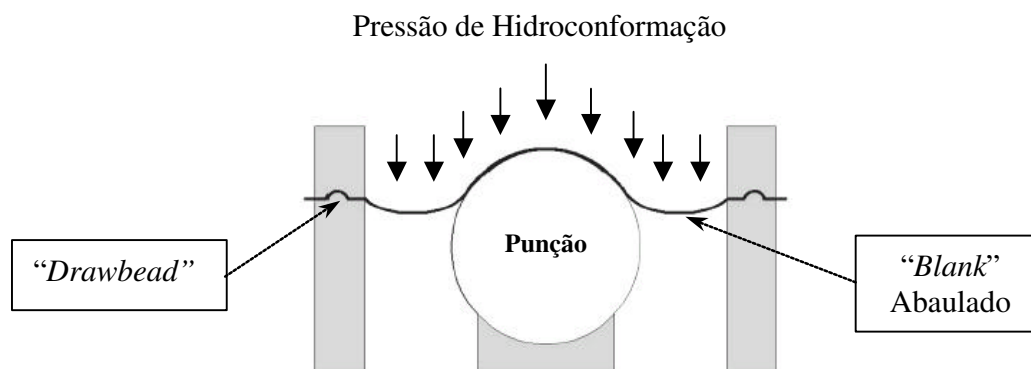


Figura 2.33 – Abaulamento do “Blank” antes da Conformação
(adaptada de ZAMPALONI *et al.*, 2003).

A figura 2.31 demonstra que as dobras na peça iniciam-se na área do flange (sob o “drawbead”) e estendem-se gradualmente em direção ao centro da peça, aumentando o escoamento do material para o interior da ferramenta sem a ação do punção.

O processo de hidroconformação de chapas como em todos os processos de conformação, possui vantagens e desvantagens.

As principais vantagens na utilização da hidroconformação de chapas na indústria automobilística e aeroespacial são segundo (ZAMPALONI *et al.*, 2003):

- Melhoria na conformabilidade do “*blank*” devido à melhor distribuição da deformação plástica em comparação à estampagem convencional;
- Baixa taxa de desgaste das matrizes ou punções, pois esse processo elimina o contato metal-metal entre a ferramenta e o produto;
- Menor variação de espessura da peça final, pois a pressão de conformação auxilia a distribuição uniforme das deformações;
- Possibilita a integração de múltiplas operações na estampagem, eliminando algumas operações de acabamento e reduzindo as perdas de material;
- Redução do custo de fabricação do ferramental;
- Eliminação de soldagens posteriores dos produtos;
- Melhoria da repetitibilidade dos produtos.

Também segundo esses autores, as desvantagens da utilização da hidroconformação de chapas são:

- Tempo de ciclo bem maior do que o método de estampagem tradicional, em virtude da fase de enchimento;
- Custo elevado do equipamento quando comparado com a estampagem convencional.

Visando reduzir as desvantagens impostas a hidroconformação, aperfeiçoamentos importantes foram realizados no processo, principalmente na redução do tempo de ciclo e no custo de investimento da planta, dentre os quais destacam-se:

- redução no tempo de enchimento do fluido na peça trabalhada;
- integração da alta velocidade da operação de pré-conformação;
- rápida transição do enchimento para conformação;
- aumento da velocidade de conformação;
- redução dos tempos de operações subsidiárias.

Em função do aumento do uso do processo de hidroconformação para componentes em larga escala de fabricação, o tempo de enchimento tornou-se um fator decisivo no ciclo do processo. Por outro lado, elevadas taxas de vazão no enchimento das peças podem gerar a formação de bolhas.

A Figura 2.34 apresenta um sistema hidráulico contendo uma bomba de alta vazão e média pressão que é utilizada para promover o enchimento rápido dos espaços vazios da peça com o fluido que será responsável pela conformação. Posteriormente, o intensificador de pressão atuará com elevadas pressões hidráulicas e baixa vazão para conformar e calibrar a peça.

Algumas peças hidroconformadas que requerem operações de pré-conformação podem ser pré-conformadas diretamente na ferramenta de hidroconformação, sendo que em alguns casos a aplicação de uma pressão auxiliar interna oferece vantagens em relação ao resultado da conformação. Assim, para se reduzir o tempo de ciclo é necessário existir uma rápida transição de enchimento para a conformação.

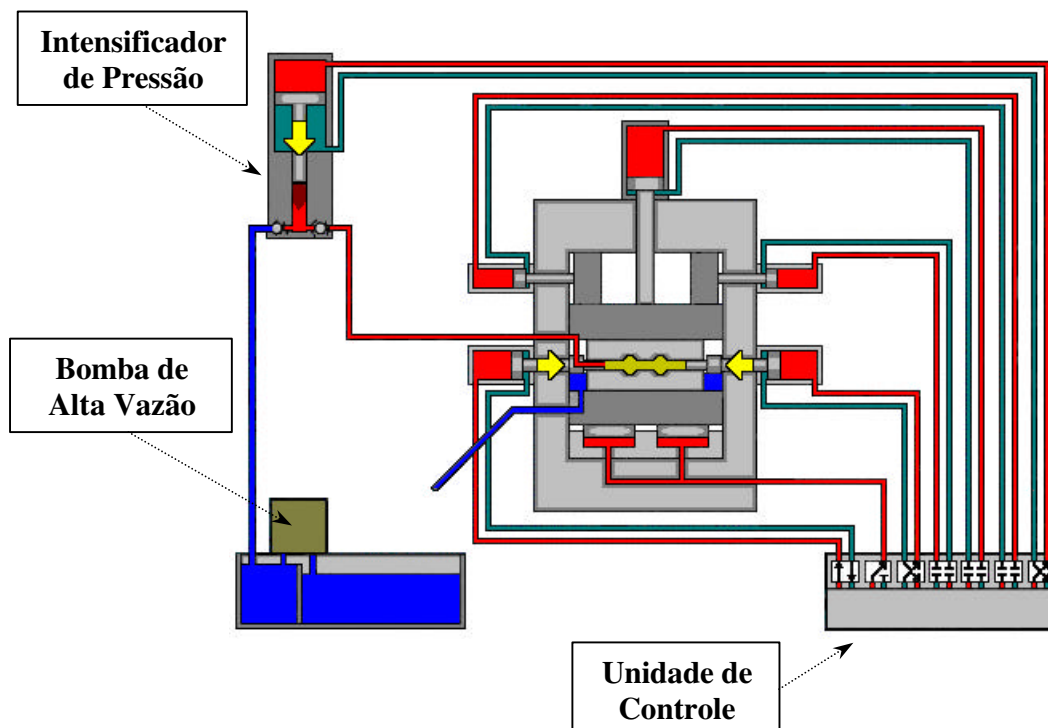


Figura 2.34 – Equipamento de Hidroconformação com Sistema de Enchimento Rápido
(adaptada de SIEGERT *et al.*, 2000)

2.3.6 – Propriedades Exigidas dos Materiais para Hidroconformação

Assim como em outros processos de conformação, o sucesso da hidroconformação depende das propriedades dos materiais empregados, como composição química, tipos de solda, resistência à tração, ductilidade e anisotropia, que devem ser determinados e analisados (KOÇ e ALTAN, 2001).

Alguns desses materiais são mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Principais Materiais Utilizados na Hidroconformação de Tubos,
(KOÇ e ALTAN, 2001).

Material	Designação Americana	Designação Alemã	Material No. DIN
Aços	AISI 1015	C 15	DIN 17007, 1.0401
	AISI 1020	C 22	DIN 17007, 1.0402
	AISI 1035	C 35	DIN 17007, 1.0501
	AISI 1045	C 45	DIN 17007, 1.0503
	AISI 1015	ST 37	DIN 17007, 1.0100
	AISI 1020	ST 42	DIN 17007, 1.0130
	ASTM A572-575	ST50	DIN 17007, 1.0530
Aços Ligados	AISI 5120	21 MnCr 5	DIN 17007, 1.2162
	AISI 420	X 20 Cr 13	DIN 17007, 1.4021
	AISI 304		
	AISI 409		
Ligas de Alumínio	AA 1050A	Al 99,5	DIN 1712 (Parte 3)
	AA 5005A	Al Mg 1	DIN 1725 (Parte 1)
	AA 5056A	Al Mg 5	DIN 1725 (Parte 1)
	AA 5086	Al Mg 4 Mn	DIN 1725 (Parte 1)
	AA 7075	Al Zn Mg Cu 1,5	DIN 1725 (Parte 1)
	AA 5052		
	AA 5754		
	AA 6260T4		
	AA 6061T4		
	AA 6063T4		

Esses autores definiram que as propriedades dos materiais destinados a hidroconformação devem apresentar as seguintes características técnicas:

- Elevado alongamento uniforme;
- Elevado coeficiente de encruamento;
- Pequena diferença entre as propriedades mecânicas nas diferentes direções;
- Propriedades mecânicas e de acabamento superficial semelhantes entre as chapas dos materiais-base e da região da solda;
- Pequenas tolerâncias dimensionais na forma e na espessura.

2.3.7 – Especificações dos Lubrificantes para a Hidroconformação

Os lubrificantes estão entre os mais importantes facilitadores no processo de hidroconformação. São utilizados para minimizar o atrito nas áreas onde ocorre contato entre as superfícies da ferramenta e da peça.

Muitas peças só podem ser conformadas com o auxílio de lubrificantes apropriados, pois permitem controlar as variações na espessura da parede da peça, simplificam a forma dos tubos usados como “*blanks*”, reduzem parcialmente o processo de estiramento do material e melhoram a conformação em áreas onde não é permitida qualquer deformação permanente na direção axial do produto (NGAILE *et al.*, 2004).

Um grande número de lubrificantes podem ser considerados para o uso na hidroconformação, que dependendo de sua composição química podem ser classificados em função de sua viscosidade como os lubrificantes sólidos, geralmente à base de grafite ou MoS₂, os lubrificantes baseados na dispersão de polímeros e as graxas, óleos e emulsões.

O lubrificante é geralmente aplicado por spray ou imersão, exceto nos casos de óleos, já que a camada de lubrificante deve ser geralmente aplicada e endurecida antes do processo de conformação da peça. Uma atenção especial deve ser dada à espessura da camada lubrificante que poderá ser determinada pelo método experimental de tentativa e erro (SCHULER, 1998).

Capítulo 3

Procedimento Experimental

3.1 – Especificações das Chapas de Aço Empregadas nos Ensaios

Conforme citado anteriormente, o objetivo deste estudo foi determinar as propriedades mecânicas fundamentais envolvidas nos processos de hidroconformação quando comparado com a estampagem convencional (matriz/punção) na conformação a frio de chapas planas “*Tailored Welded Blanks*” gerados a partir de chapas de aços galvanizados, aplicados na fabricação de painéis internos das carroçarias dos automóveis nas indústrias automobilísticas.

Essa comparação foi realizada através da determinação da Curva Limite de Conformação (CLC) representativa da matéria-prima e da Frente Máxima de Deformação (FMD) obtida dos corpos-de-prova produzidos pelos processos de hidroconformação e estampagem convencional.

Dessa forma, foi possível determinar as propriedades do material através de ensaios práticos fundamentais realizados em máquinas de tração, embutimento e em análises simulativas práticas, visando à comparação dos processos e adequação da hidroconformação de chapas em escala industrial.

Para a realização dos ensaios foram utilizadas chapas de aço gentilmente cedidas pela empresa Ferrolene de São Paulo, fornecedora de “*blanks*” soldados para a maior parte das indústrias automobilísticas nacionais.

Os materiais utilizados para a confecção dos corpos-de-prova para os ensaios de CLC e FMD foram os aços laminados a frio ST-06 e ST-07 com espessuras 1,5 e 0,9mm respectivamente, ou seja, com uma razão de espessura igual a 1,67.

Os aços ST-06 e ST-07 são destinados à conformação de peças com elevado requisito de estampagem profunda e empregados na fabricação das carroçarias dos veículos Volkswagen Golf e Pólo.

Segundo informações da indústria Siderúrgica Usiminas (comunicação escrita), as chapas dos aços ST-06 e ST-07 referem-se à norma VW-4011 (Norma Volkswagen de produtos galvanizados a quente), podendo ser fornecidas com revestimentos GI (zinco puro) e GA (liga de ferro-zinco).

3.1.1 – Composição Química dos Aços Empregados nos Ensaios

A Tabela 3.1 apresenta a composição química em peso dos aços empregados nos ensaios, conforme as normas técnicas da empresa siderúrgica Usiminas (comunicação escrita).

Tabela 3.1 – Composição Química dos Aços (porcentagem em peso) Empregados nos Ensaios:

Aço	C	Mn	P (máx.)	S (máx.)	Al	Outros
ST – 06	$\leq 0,060$	$\leq 0,350$	0,025	0,020	$\geq 0,005$	Ti $\leq 0,60$ Nb $\leq 0,50$
ST – 07	$\leq 0,020$	$\leq 0,350$	0,020	0,020	$\geq 0,005$	Ti $\leq 0,60$ Nb $\leq 0,50$

3.1.2 – Propriedades Mecânicas dos Aços Empregados nos Ensaios

A Tabela 3.2 apresenta os valores característicos das propriedades mecânicas dos aços utilizados nos ensaios, referentes às especificações técnicas da empresa Siderúrgica Usiminas.

Tabela 3.2 – Propriedades Mecânicas dos Aços Empregados nos Ensaios:

AÇO USIMINAS	ST – 06	ST – 07
(LE) Limite de Escoamento (MPa)	120 a 200	120 a 180
(LR) Limite de Resistência (MPa)	270 a 350	270 a 350
(ALO) Alongamento (%)	37	39

3.2 – Preparação dos Corpos-de-Prova (Soldagem a Laser)

As informações relativas a essa preparação foram obtidas verbalmente na empresa Ferrolene.

O equipamento de soldagem empregado para a confecção dos corpos-de-prova possibilita a união de chapas com 300mm de largura mínima de cada lado. Dessa forma, as chapas de aço ST-06 com 1,5mm e ST-07 com 0,9mm de espessura foram cortadas em uma guilhotina hidráulica, em lotes de 300mm de largura x 1200mm de comprimento. Como a precisão do corte da chapa é um fator extremamente importante para a produção do TWB, o alinhamento e as lâminas de corte da guilhotina devem ser ajustados com frequência, e a guilhotina deve ser empregada somente para esse fim, com o intuito de manter o processo de soldagem capaz.

Para a geração dos “*blanks*”, foi utilizado um equipamento de soldagem a laser CO₂ que emprega os gases Hélio e Argônio para a proteção do cordão de solda. O laser foi gerado com um ângulo de ataque de 90° a uma potência de 6000W assistido pelos gases CO₂, Hélio e N₂, e imprimindo uma velocidade de soldagem da ordem de 8m/min. A largura do cordão de solda oscilou de 1 a 1,5mm.

Durante o processo de soldagem, as duas chapas de 300mm de largura foram posicionadas nas laterais do equipamento com as faces encostadas. O equipamento de soldagem possui dois rolos laminadores, um superior e outro inferior, dispostos de forma radial entre si e perpendicular em relação às chapas, com o propósito de conformar as faces das chapas promovendo o

preenchimento dos picos e vales das faces, para que o canhão de soldagem a laser possa realizar a fusão dos dois materiais das chapas sem a aplicação de metais de adição (Figura 3.1).

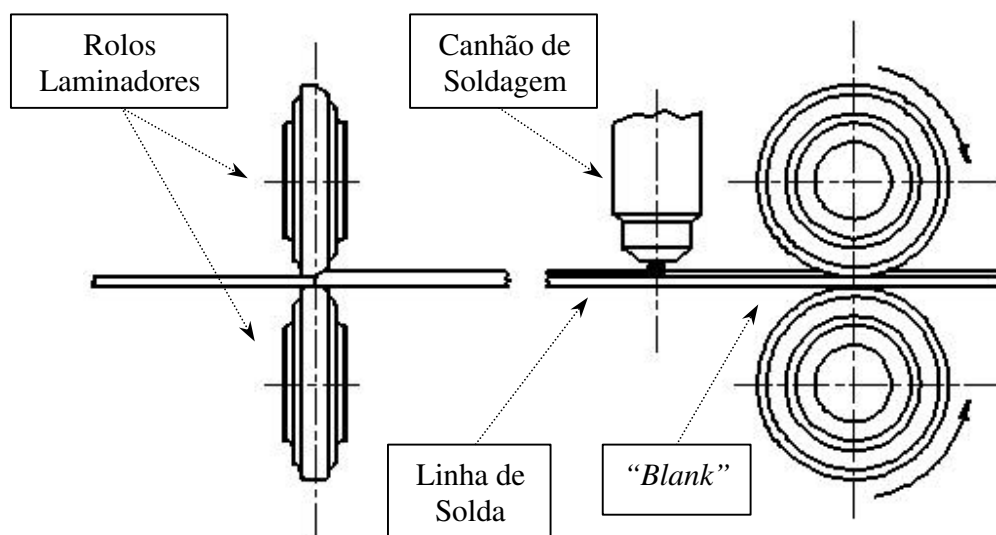


Figura 3.1 – Representação da Ação dos Rolos Laminadores Durante o Processo de Soldagem.

Após a soldagem, o “blank” deslizava em uma esteira de borracha para realizar uma etapa de limpeza no cordão de solda através de uma escova de aço rotativa, e posteriormente, a solda recebeu uma lubrificação para evitar a oxidação.

O processo de soldagem é automatizado e rápido, proporcionando um cordão de solda estreito e homogêneo. O equipamento de soldagem é assistido por um microscópio óptico que permite a visualização da soldagem durante todo o processo, com o propósito de assegurar a qualidade da solda nos blanks.

Mesmo com a análise realizada pelo monitoramento da solda durante toda a etapa de soldagem, os operadores retiraram amostras de dimensões 100 x 100mm de alguns “blanks” soldados para submetê-los ao ensaio de embutimento Erichsen, visando garantir a qualidade do produto a ser fornecido (Figura 3.2).

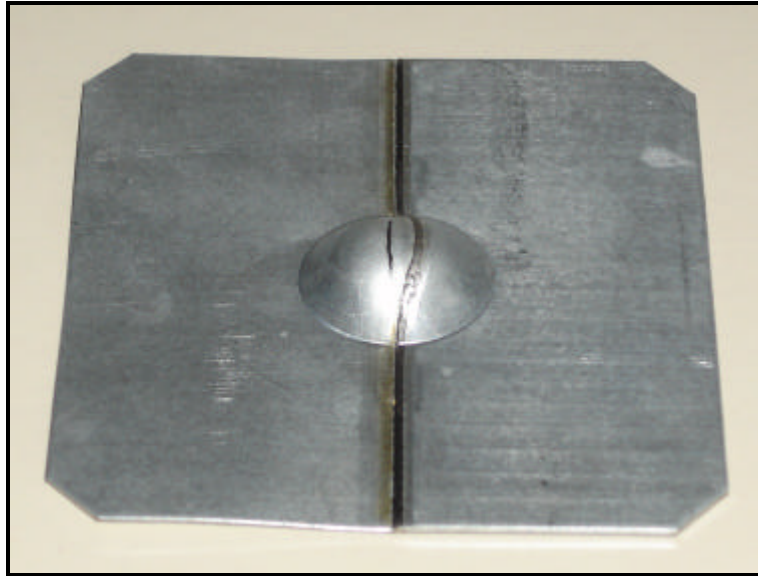


Figura 3.2 – Ensaio Erichsen Determinado para Analisar a Eficiência do Cordão de Solda.

Através do ensaio de embutimento destrutivo Erichsen, é possível verificar a ocorrência da fratura sempre no material mais fraco ou menos espesso, paralela à linha de solda, fato esse, que demonstra que a linha de solda possui uma resistência mecânica superior ao material-base mais fraco, garantindo a eficiência do processo de soldagem. Essa característica também foi confirmada durante todos os ensaios de CLC e FMD.

3.3 – Ensaios de Tração Empregados para Classificar os Materiais

Os ensaios de CLC e FMD foram realizados com duas diferentes partidas de aço. Dessa forma, foram realizados ensaios de tração em amostras das duas partidas, com o objetivo de verificar a similaridade desses materiais.

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP – FEM – DEMA, numa máquina MTS modelo 810 Test Star II.

A Figura 3.3 apresenta as dimensões dos corpos-de-prova da norma ASTM – E8M – 95a, empregados nesses ensaios.

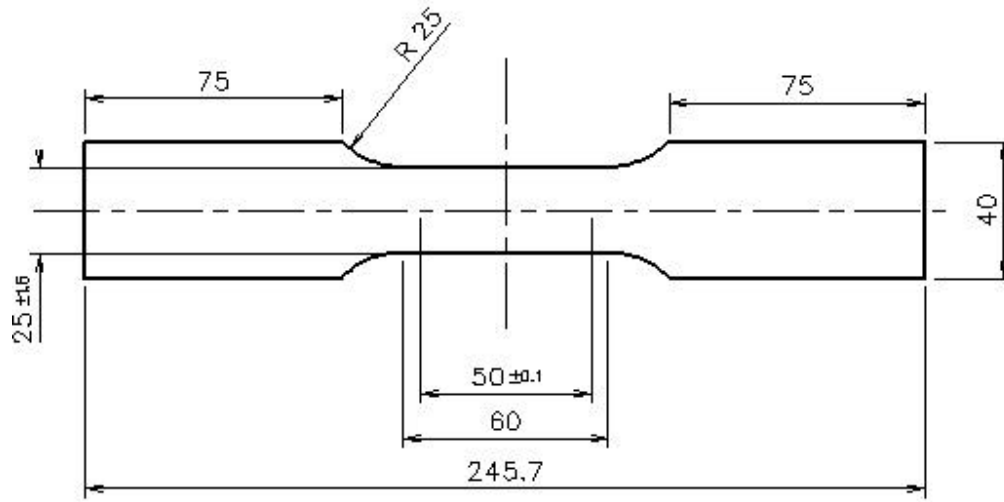


Figura 3.3 – Desenho do Corpo-de-Prova Adotado para os Ensaios de Tração.

Foram ensaiados três corpos-de-prova retirados de cada direção em relação à linha de solda: 90°, 45° e 0°, com o sentido de laminação da chapa perpendicular à linha de solda (Figura 3.4).

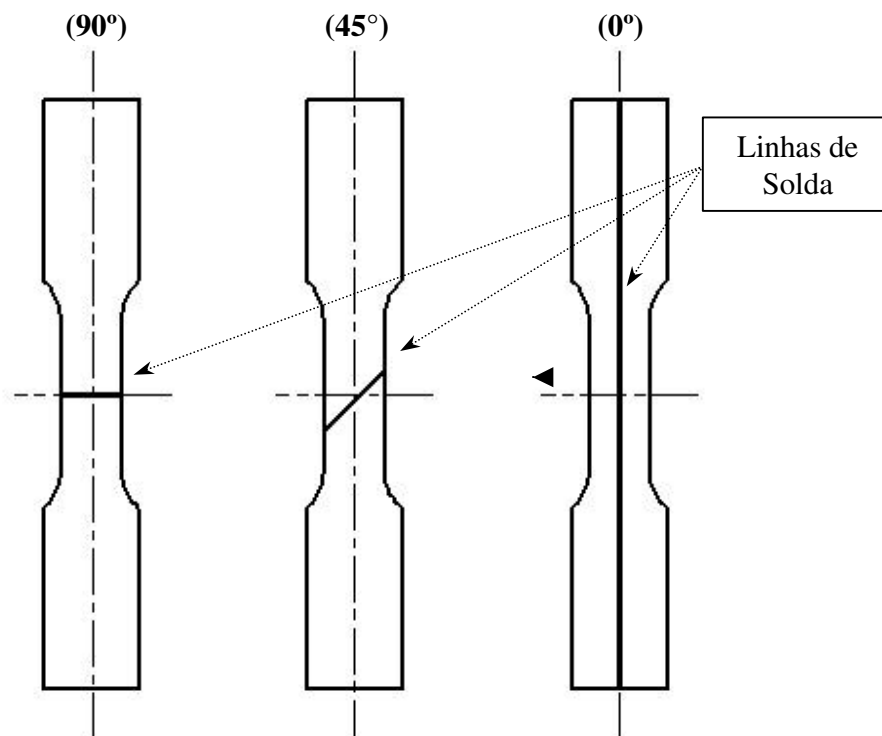


Figura 3.4 – Disposição da Linha de Solda em Relação ao Corpo-de-Prova.

3.4 – Determinação das Curvas Limites de Conformação

Como descrito anteriormente, a curva limite de conformação (CLC) é representada num gráfico construído a partir de dados obtidos em laboratório que relacionam as maiores deformações principais (ϵ_1) com as menores deformações principais (ϵ_2) medidas na superfície da chapa ensaiada próximo da região de estricção localizada.

A CLC tem por objetivo identificar algumas variáveis de influência no processo de conformação por estampagem. Dessa forma é possível realizar correções no ferramental tanto no aspecto construtivo, na escolha do material do produto, assim como, na geometria do produto, ferramentas e variáveis de processo.

Os resultados obtidos da CLC serão úteis para definir as características de conformabilidade dos TWBs, e permitirão avaliar o comportamento destes “*blanks*” submetidos a estampagem de um produto definido pela hidroconformação e estampagem convencional, como descrito no Capítulo 2.

Neste trabalho, a curva CLC foi traçada a partir de resultados obtidos em ensaios Nakazima realizados no Laboratório de Materiais da empresa COSIPA (Companhia Siderúrgica Paulista) e o equipamento de embutimento Erichsen empregado nos ensaios foi ajustado com as seguintes características técnicas:

- Capacidade de força no prensa-chapas: 10 a 230 kN;
- Velocidade do punção: 10mm/min;
- Raio do punção hemisférico: 40mm;
- Diâmetro do prensa-chapas: 165mm;
- Diâmetro de abertura da matriz: 120mm;
- Lubrificante utilizado: graxa grafitada a base de bissulfeto de molibdênio.

A força empregada no anel de fixação do prensa-chapas variou em função da largura do corpo-de-prova ensaiado, ou seja, corpos-de-prova mais largos representativos das condições próximas do estiramento biaxial (estiramento puro) utilizaram cargas inferiores no prensa-chapas.

Já os corpos-de-prova mais estreitos representativos das condições de estampagem profunda, empregaram cargas mais elevadas.

Da primeira partida de chapas de aço foram retiradas 10 amostras de cada corpo-de-prova, com o objetivo de garantir significância estatística e repetitibilidade do ensaio da Curva Limite de Conformação (CLC), segundo os procedimentos descritos por (NAKAZIMA *et al.*, 1968).

A Figura 3.5 e a Tabela 3.3 apresentam as dimensões dos corpos-de-prova empregados nos ensaios Nakazima e que permitiram obter os dados para determinar a CLC.

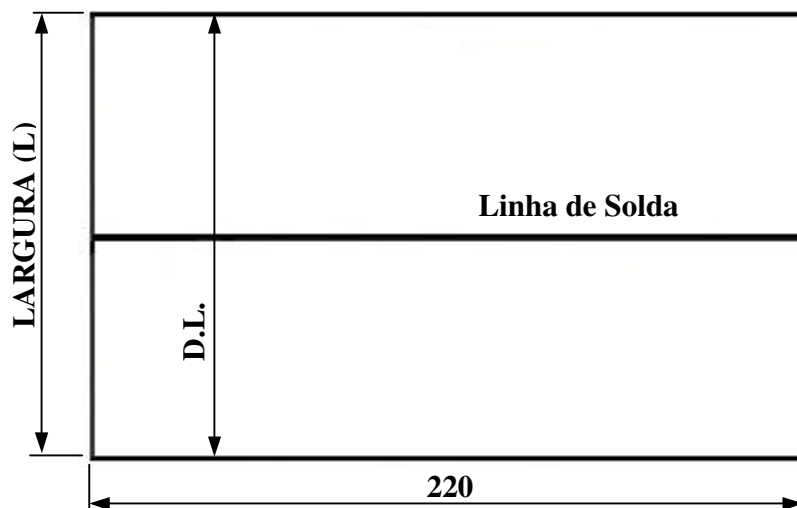


Figura 3.5 – Representação dos Corpos-de-Prova para os Ensaio Nakazima (DL – Direção de Laminação).

Tabela 3.3 – Largura (L) dos Diversos Modelos de Corpos-de-Prova Empregados para a Realização dos Ensaio Nakazima.

Modelo	L (mm)	Modelo	L (mm)
1	50	6	130
2	80	7	140
3	100	8	160
4	110	9	175
5	120	10	220

Posteriormente, os corpos-de-prova foram submetidos a uma gravação eletrolítica para gerar a impressão de circunferências tangenciais de diâmetro 2,5mm (Figura 3.6) com a finalidade de possibilitar a análise das deformações do material quando submetido às deformações plásticas.

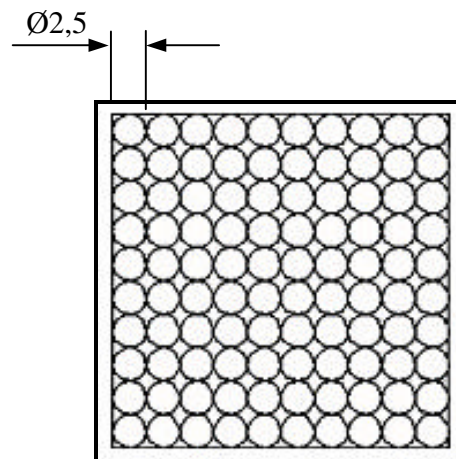


Figura 3.6 – Dimensão e Disposição das Circunferências Gravadas Eletroliticamente nos CPs.

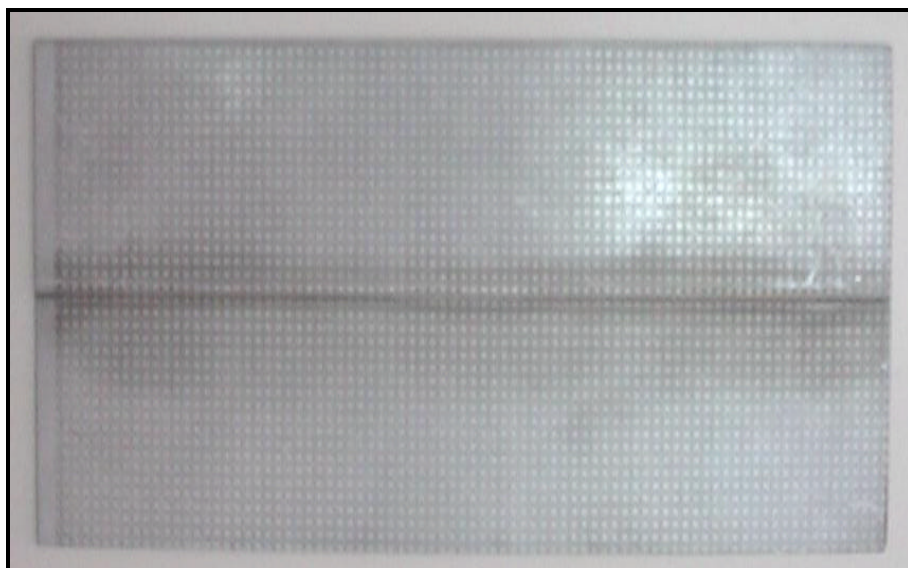


Figura 3.7 – Corpo-de-Prova com a Gravação Eletrolítica das Circunferências Impressas antes de ser Submetido ao Ensaio de Estampabilidade.

3.4.1 – Procedimentos Empregados para a Realização dos Ensaios de Estampabilidade

Os ensaios de estampabilidade foram realizados da seguinte maneira:

Passo 1: Acionar o equipamento e imprimir uma carga média no prensa-chapas de aproximadamente 110 kN, para que o sistema hidráulico do equipamento entre em operação promovendo o aquecimento do óleo hidráulico, com o intuito de não interferir nos resultados do ensaio.

Passo 2: Remover o anel do prensa-chapas e lubrificar o punção hemisférico da máquina com graxa grafitada;

Passo 3: Como o TWB possui espessuras diferentes (0,9 e 1,5mm), foi necessário a utilização de calços de mesma espessura em relação aos materiais empregados de maneira inversa, para que o prensa-chapas pudesse efetuar a fixação, ou seja, colocar um calço de 0,9mm na região de fixação do corpo-de-prova com espessura de 1,5 mm e um calço de 1,5mm na outra região do corpo-de-prova, no material de 0,9 mm de espessura;

Passo 4: Posicionar o corpo-de-prova com seus respectivos calços no assento do equipamento, instalar o anel de encosto do prensa-chapas e promover o fechamento do equipamento.

Passo 5: Determinar a altura do domo a partir de ensaios de estampabilidade com os corpos-de-prova extremos, ou seja, utilizar forças maiores no prensa-chapas para os corpos-de-prova de menor largura (50mm) e utilizar menores forças no prensa-chapas para os corpos-de-prova de maior largura (220mm). Dessa forma foi possível gerar o intervalo de forças aplicadas no prensa-chapas para efetuar o ensaio em todos os demais corpos-de-prova.

Passo 6: Com a velocidade e a força do prensa-chapas previamente ajustadas para cada corpo-de-prova, inicia-se a subida do punção hemisférico até o instante em que começa aparecer visualmente o início da estricção de espessura localizada. Nesse instante, o movimento do punção é invertido para que não haja a falha (ruptura) total do material.

Passo 7: Remover o anel do prensa-chapas, retirar o corpo-de-prova do equipamento, identificá-lo, coletar a força de resistência mecânica registrada no equipamento e analisar as deformações máximas ocorridas na periferia da estricção de espessura localizada.

A medição da altura do domo foi obtida através do método de tentativa e erro para determinar a uniformidade de todos os demais corpos-de-prova a serem ensaiados. Como citado anteriormente, essa análise é função da força empregada no prensa-chapas e a deformação máxima obtida pelo material até a estricção.

A altura do domo obtida nos ensaios apresentou os seguintes resultados:

- Média nos corpos-de-prova: 53,58mm;
- Tolerância imposta: +/- 10%;
- Profundidade mínima tolerada: 48,22 mm;
- Profundidade máxima tolerada: 58,94 mm.

Com a altura do domo definida e seguindo os passos determinados para a realização dos ensaios de estampabilidade, foi possível obter a deformação em todos os demais corpos-de-prova empregados na realização dos ensaios, através da variação das forças aplicadas no prensa-chapas em decorrência da variação da largura (L) de todos os corpos-de-prova, abrangendo os modos de deformação propostos na curva limite de conformação (embutimento profundo, estado plano de deformação e estiramento puro).

3.5 – Peça Produzida pelos Métodos da Hidroconformação e Estampagem Convencional

A escolha da forma da peça utilizada para realização dos ensaios de estampabilidade de “*tailored welded blank*” foi concebida com o intuito de simular condições severas de estampagem, próximas das condições reais encontradas nas indústrias e que pudesse ser obtida em condições de laboratório. A forma desenhada propõe uma condição de embutimento profundo e embutimento invertido, com estiramento (Figura 3.8).

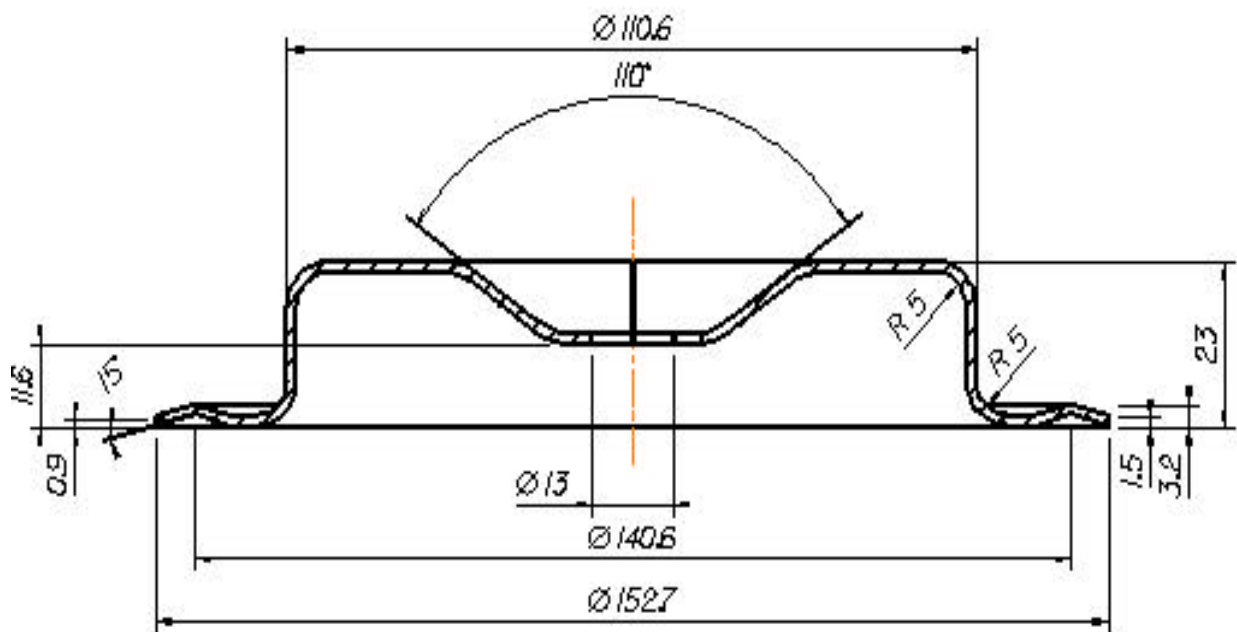


Figura 3.8 – Dimensões da Peça Produzida para Analisar a Conformabilidade do TWB

3.6 – Projeto, Construção e Montagem do Ferramental.

O ferramental desenvolvido para realizar os ensaios de estampagem convencional e hidroconformação da peça da Figura 3.8 é mostrado na Figura 3.9 e foi montado numa prensa do Laboratório de Conformação Mecânica – DEMA – FEM – UNICAMP (Figura 3.9).

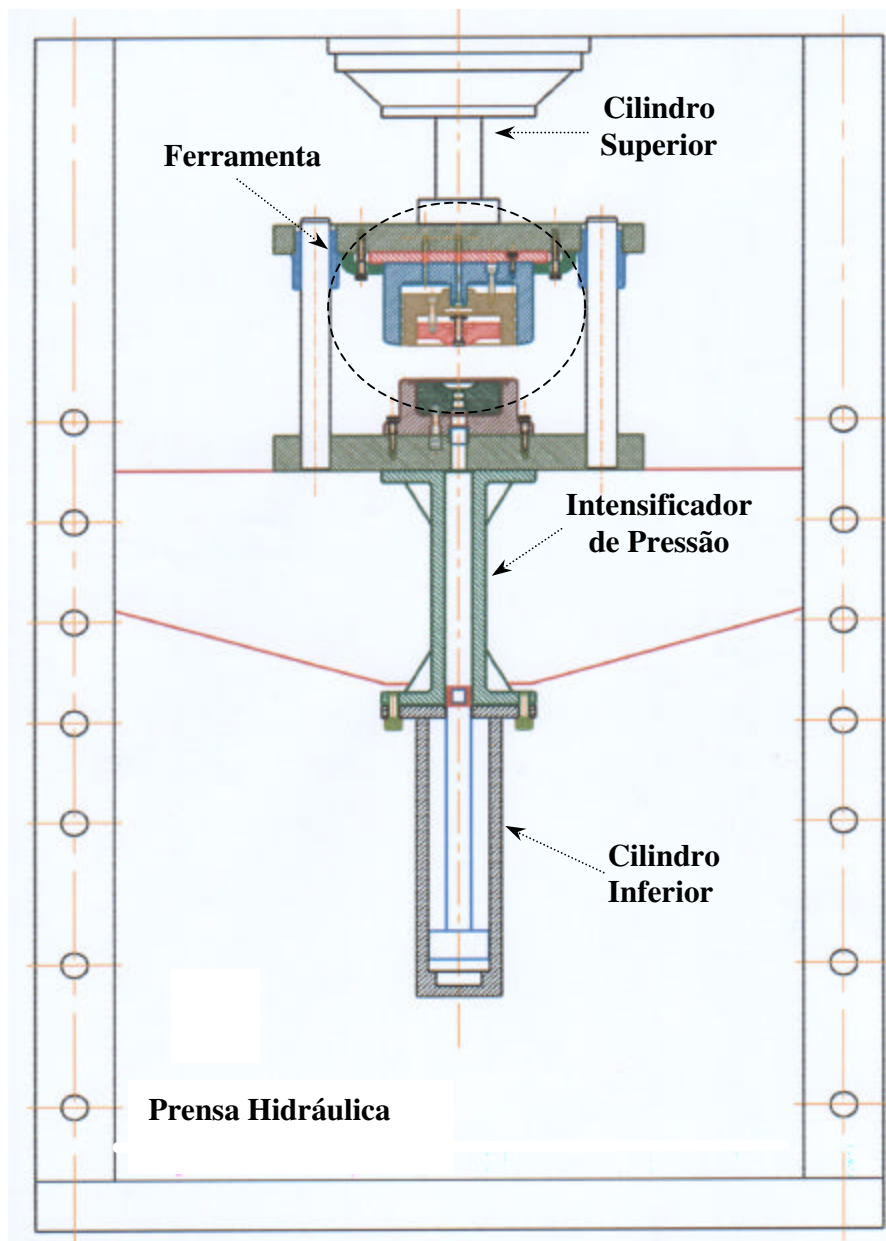


Figura 3.9 – Desenho Esquemático do Arranjo Experimental

O equipamento utilizado para a execução dos ensaios é composto dos seguintes itens:

- ?? Três unidades hidráulicas com capacidade máxima de pressão de 250bar (25MPa), com funcionamento independente, e equipadas com válvulas reguladoras de vazão e pressão;
- ?? Uma prensa hidráulica composta por um cilindro superior de capacidade 500kN e um cilindro inferior de capacidade 100kN acoplado a um intensificador de pressão com capacidade máxima de 1000bar (100MPa).

A decisão na concepção do projeto do arranjo experimental foi tomada para possibilitar o funcionamento independente da ferramenta e visou proporcionar o estudo das variáveis de influência envolvidas nos ensaios, com o objetivo de simular os vários estados de tensão presentes na estampagem, como o estiramento puro e estampagem profunda.

O conjunto necessita de quatro fontes de pressurização: a primeira para elevar a pressão na emulsão (cilindro inferior da Figura 3.9); a segunda para pressionar o prensa-chapas (11) responsável pelo escoamento adequado da chapa durante a estampagem evitando seu enrugamento; a terceira para a matriz-fêmea móvel (4) que atuará como um freio para o avanço da chapa deformada. Caso esse freio não existisse, o abaulamento excessivo do TWB poderia causar sua ruptura por ter atingido o limite de conformabilidade.

Com o freio, estabelece-se uma tensão compressiva sobre o “*tailored welded blank*”, evita-se o abaulamento e a ruptura. Finalmente, a quarta fonte de pressurização é responsável por manter a ferramenta fechada e efetua o movimento do punção de corte periférico (3) que retira o produto da chapa por corte no final do processo. O punção de corte (12) sob a ação do punção (3), efetua o corte da parte central do produto ainda com o material em contato com a emulsão pressurizada (Figura 3.10).

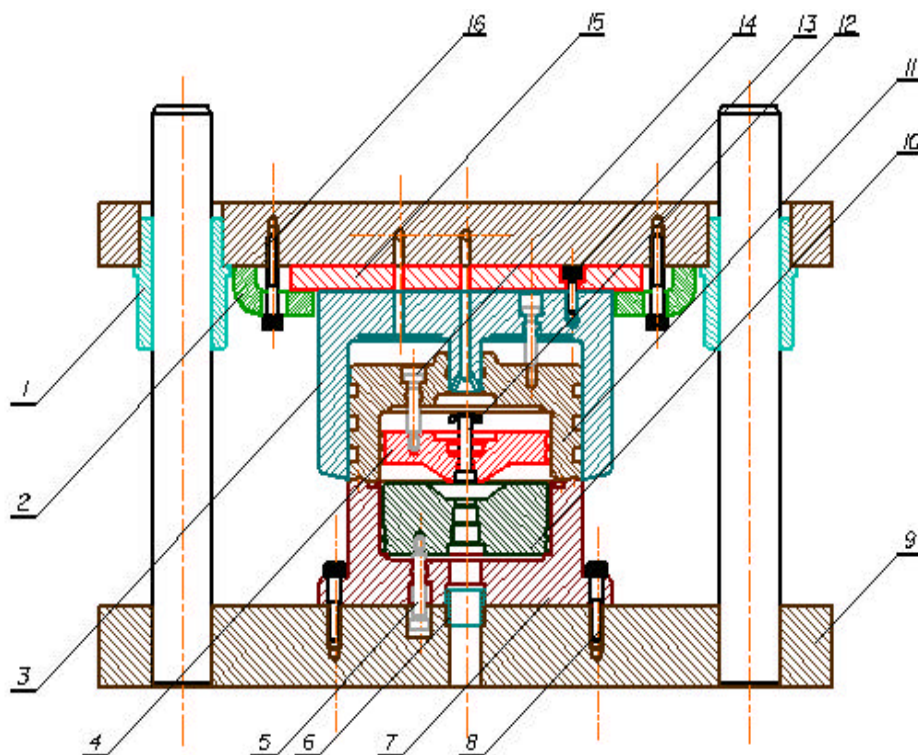


Figura 3.10 – Representação do Ferramental para Hidroconformação Montado na Prensa.

Tabela 3.4 – Partes Constituintes da Ferramenta:

Item	Quantidade	Denominação
01	02	Bucha Guia com Esferas
02	04	Grampo de Fixação
03	01	Punção de Corte Periférico
04	01	Matriz-Fêmea Móvel
05	06	Parafuso com Corpo Retificado M6X40
06	01	Bucha Guia e de Vedação
07	01	Câmara de Alta Pressão
08	06	Parafuso M8X40 (DIN-912)
09	01	Porta Ferramenta
10	01	Punção para Estampagem Convencional
11	01	Prensa-Chapas
12	01	Punção para Furação
13	03	Parafuso M8X20 (DIN-912)
14	03	Parafuso com Corpo Retificado M6X35
15	01	Placa de Choque
16	04	Parafuso M12X80 (DIN-912)

Como definido nos objetivos deste trabalho, esse conjunto pode ser utilizado para a estampagem convencional, quando a emulsão pressurizada empurra o punção para estampagem (10) fazendo com que o TWB escoe sob a matriz-fêmea móvel (4) gerando a geometria do produto. Retirando-se o punção (10), o conjunto passa a atuar como um ferramental desenvolvido para hidroconformação, de modo que a emulsão pressurizada passa a agir diretamente sob o TWB forçando-o a escoar contra a matriz-fêmea móvel.

Os detalhes construtivos desse ferramental podem ser consultados com o autor.

3.7 – Ensaios de Conformação

Da segunda partida de aço (mencionada no item 3.3) foram confeccionados 100 corpos-de-prova para a realização dos ensaios de estampagem convencional e hidroconformação. Os “*blanks*” foram cortados com dimensões 200 x 200mm com a linha de solda posicionada sempre no centro do “*blank*” e também foram submetidos à gravação eletroquímica de circunferências como mostrado nas Figuras 3.6 e 3.7.

Após a montagem do ferramental, foram realizados ensaios preliminares para avaliação do processo, de modo a definir as condições adequadas de processamento.

Para a realização dos ensaios de hidroconformação, retirou-se o punção destinado à estampagem convencional (10) da câmara de alta pressão (7) (Figura 3.10), fazendo com que o fluido atuasse diretamente sob o TWB (Figura 3.11).

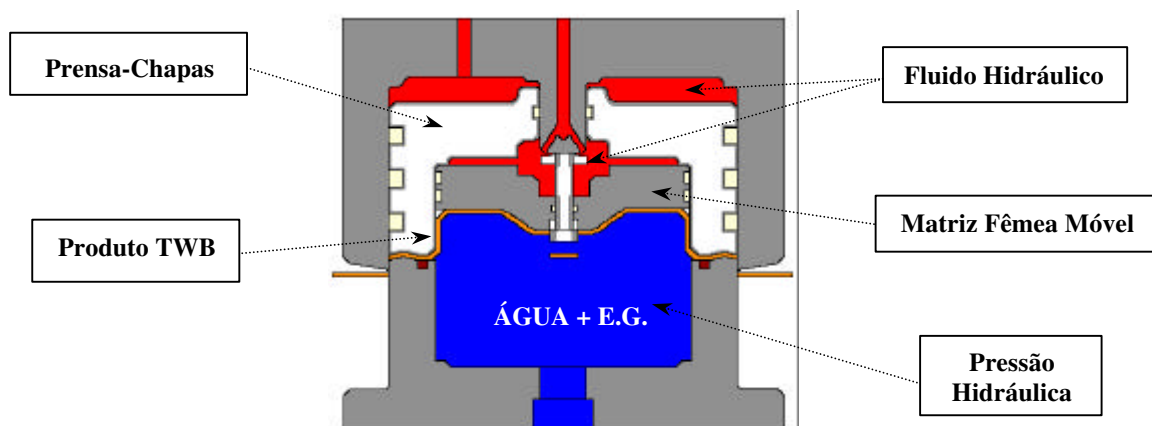


Figura 3.11 – Representação Esquemática do Processo de Hidroconformação

3.7.1 – Etapas Empregadas nos Ensaios de Hidroconformação

Primeira etapa – com a ferramenta aberta, introduz-se o anel de poliuretano usinado (dureza 90 Shore-A) concebido para efetuar a vedação entre a câmara de pressão e o “blank” durante o estágio de pré-conformação.

Segunda etapa - efetua-se a lubrificação da matriz móvel, da coroa circular de contato da câmara de pressão incluindo o anel de vedação e da coroa circular de contato do prensa-chapas. Nesses ensaios foi empregada uma graxa comercial para reproduzir as mesmas condições empregadas para os ensaios de obtenção da CLC, nos quais se utilizou uma graxa grafitada.

Terceira etapa – A câmara de pressão é preenchida com uma mistura composta de 50% de água e 50% de etileno glicol. Esse fluido é o veículo responsável por realizar a conformação hidráulica. A finalidade exclusiva da utilização do etileno glicol é inibir a corrosão das partes metálicas da ferramenta que não receberam revestimentos anticorrosivos (Figura 3.12).

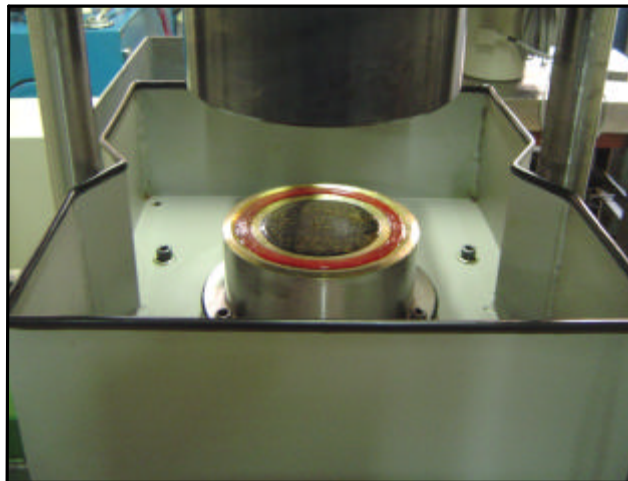


Figura 3.12 – Representação da Primeira, Segunda e Terceira Etapas de Hidroconformação.

Quarta etapa - O “blank” soldado (TWB) gravado com circunferências de diâmetro 2,5mm dispostas tangencialmente é posicionado adequadamente sobre a câmara de pressão com a face contendo a diferença de espessura (0,6mm) voltada para cima.

Quinta etapa – Realiza-se a etapa de fechamento da ferramenta. Nesse momento é necessário a colocação de quatro colunas de aço entre a flange que fixa a parte superior do porta ferramentas e o anel de fechamento do cilindro superior da prensa, paralelos a haste do cilindro, com o propósito de garantir a estanqueidade da ferramenta (Figura 3.13).

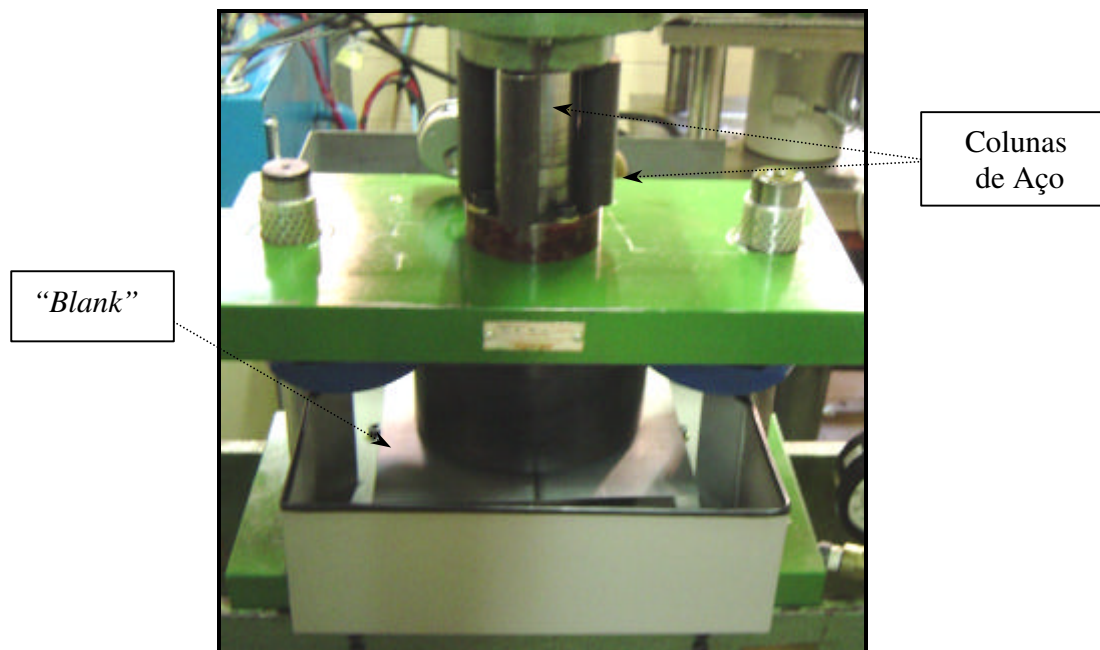


Figura 3.13 – Representação da Quarta e Quinta Etapas de Hidroconformação.

Sexta etapa – Aciona-se o cilindro inferior da prensa atingindo uma pressão de 100bar (10MPa) (etapa de pré-conformação). A matriz móvel é acionada simultaneamente para que existam tensões compressivas no material já no início de sua conformação.

Nessa etapa inicia-se a conformação da peça com a presença de rugas no lado do “blank” com chapa de aço de 0,9mm de espessura.

A Figura 3.14 ilustra a variação na deformação dos dois materiais. A chapa mais fina com um enrugamento acentuado e a chapa mais espessa com uma deformação mais uniforme. Esse enrugamento traz um sério problema operacional, pois qualquer dobramento dessas rugas pode causar a rejeição do produto.

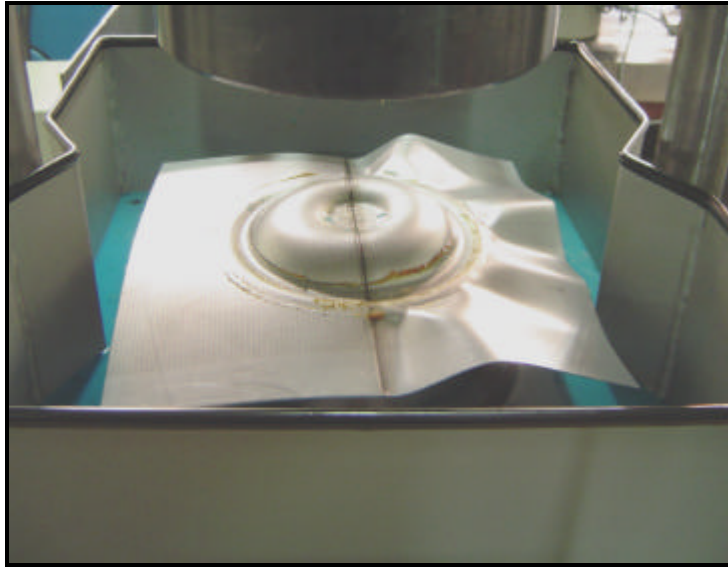


Figura 3.14 – Deformação do “Blank” sob uma Pressão de 100bar (10MPa)

Sétima etapa – Nessa fase aplica-se uma pressão hidráulica na peça de 200bar (20MPa).

Na Figura 3.15 é possível verificar-se um aumento da deformação do material, inclusive pela presença de rugas mais acentuadas na chapa mais fina e a ação da matriz móvel no topo do produto gerando tensões compressivas.

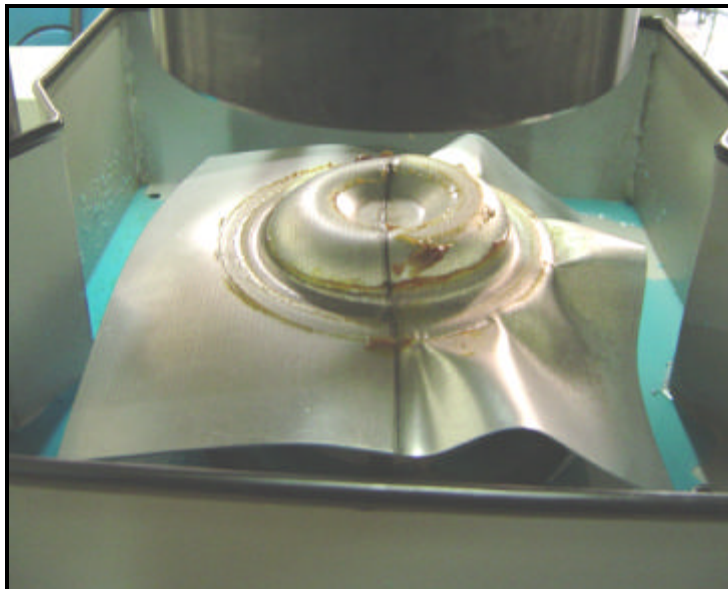


Figura 3.15 – Deformação do “Blank” sob uma Pressão de 200bar (20MPa)

Oitava etapa – um anel de poliuretano usinado, dureza 90 Shore A é inserido além do anel já instalado na câmara de pressão, para o ferramental resistir às elevadas pressões na calibração

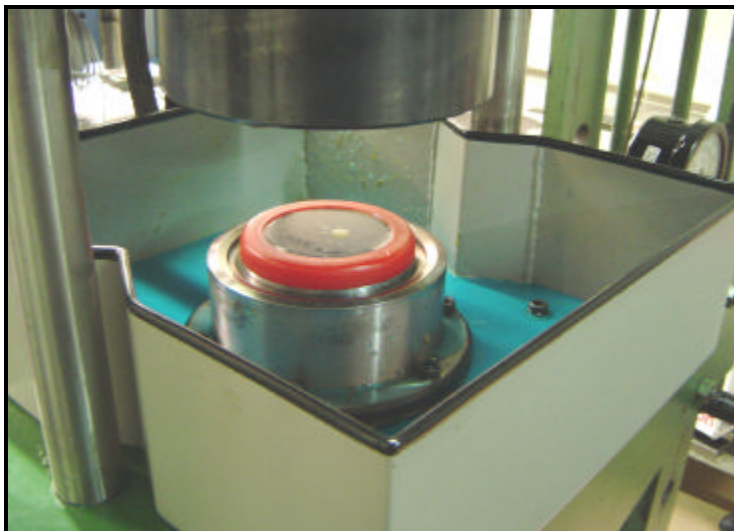
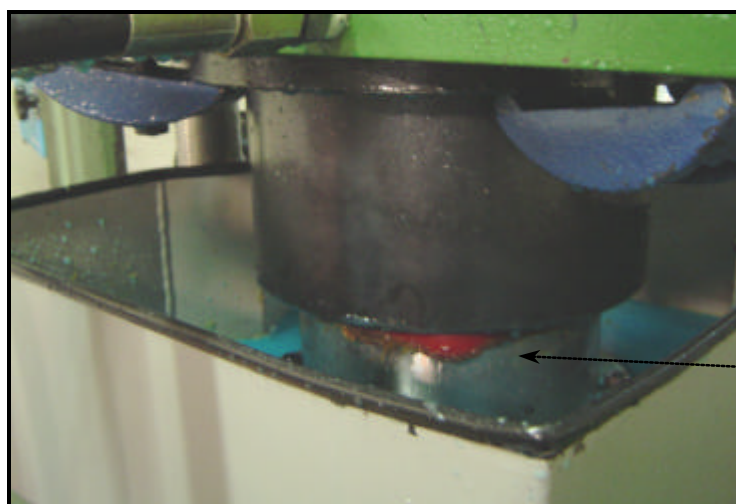


Figura 3.16 – Montagem do Anel de Vedação Extra

Nona Etapa – A peça pré-conformada é inserida novamente na ferramenta para efetuar a fase de calibração. Nessa etapa é aplicada uma pressão superior a 500bar (50MPa).

Observou-se que mesmo com a utilização do anel de vedação extra, esse sistema de vedação mostrou-se insuficiente para suportar as pressões na fase de calibração (Figura 3.17).



Anel Rompido

Figura 3.17 – Rompimento do Anel após a Aplicação de 500bar (50MPa)

Décima Etapa – As pressões são aliviadas, a ferramenta é aberta e extrai-se a peça.

3.7.2 – Proposta de Alteração do Projeto do Ferramental

Considerando os problemas observados com o uso do ferramental durante os ensaios, principalmente no que se refere à dificuldade de impor-se maiores pressões para hidroconformação e as dificuldades encontradas no controle da ferramenta, algumas alterações foram propostas para o projeto de alguns componentes que resultaram no conjunto mostrado da Figura 3.18 e Tabela 3.5.

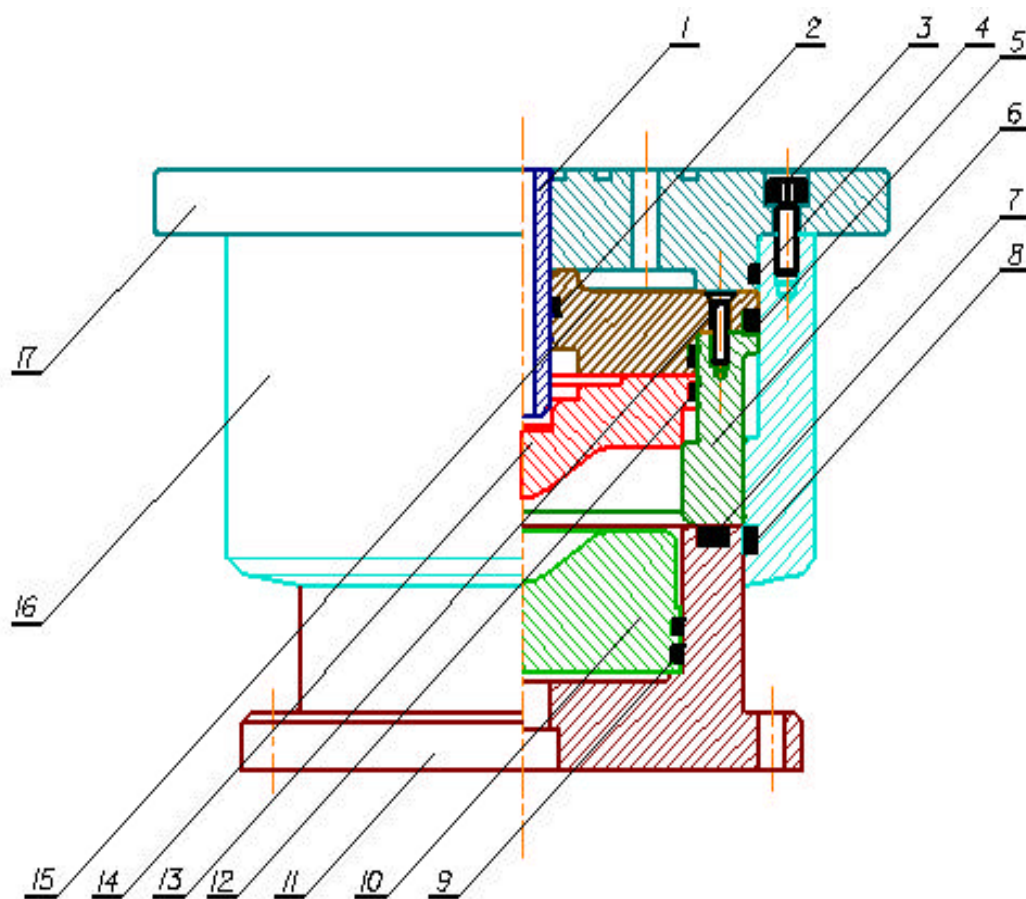


Figura 3.18 – Proposta de Modificações no Projeto do Ferramental

Tabela 3.5 – Elementos Constituintes da Ferramenta Modificada

Nº	Descrição	Qte	Observação
01	Guia do Prensa Chapa	01	VND – Dureza 58RC
02	Anel de Vedação (o-ring)	01	
03	Parafuso M8x20	08	DIN - 912
04	Anel de Vedação (o-ring)	01	
05	Anel de Vedação (o-ring)	01	
06	Corpo do Prensa-Chapa	01	VND – Dureza 58RC
07	Anel de vedação	01	Poliuretana
08	Anel de Vedação (o-ring)	01	
09	Anel de Vedação (o-ring)	02	
10	Punção para conformação convecional	01	VND – Dureza 58RC
11	Câmara de Pressão	01	VND – Dureza 58RC
12	Anel de Vedação (o-ring)	02	
13	Parafuso M6x20	08	
14	Matriz-Fêmea Móvel	01	VND – Dureza 58RC
15	Tampa do Prensa-Chapa	01	VND – Dureza 58RC
16	Corpo do Punção Periférico	01	VND – Dureza 58RC
17	Tampa do Punção Periférico	01	VND – Dureza 58RC

Comparando-se o conjunto da Figura 3.18 com o conjunto mostrado na Figura 3.10, destacam-se as seguintes alterações propostas: eliminar o punção de furação (12); aumentar a superfície de sujeição da câmara de pressão (11) de modo a permitir uma maior superfície de contato com a chapa e absorver possíveis irregularidades da solda; incluir anéis de vedação em regiões críticas como as superfícies de contato entre o punção periférico (16) e a câmara de pressão (11) entre a câmara e o prensa-chapa (06) e entre ele e o punção periférico; modificar o assento, a forma e a vedação da matriz-fêmea móvel (14), e modificar o formato da tampa do prensa-chapa (15) de modo a favorecer a pressurização da câmara superior existente entre essa tampa e a tampa do punção periférico (17).

A forma da matriz-fêmea móvel (14) e o punção para conformação convencional foram modificados com o intuito de aumentar ainda mais a severidade de conformação do material.

Para a realização desses ensaios, inseriu-se o punção com raio de contorno igual a 13,5mm para estampagem convencional (10) no interior câmara de alta pressão (7) (Figura 3.10). O cilindro inferior da prensa utilizado anteriormente no processo de hidroconformação para pressionar o fluido contra o “*blank*”, agora servirá para promover o deslocamento do punção (10) contra o “*blank*”, promovendo a conformação e a obtenção da peça acabada.

Diagrama esquemático de uma prensa hidráulica para a produção de TWB. O diagrama mostra uma seção transversal da máquina com componentes rotulados:

- Prensa-Chapas**: Indica a estrutura superior da prensa.
- Produto TWB**: Indica o material sendo processado.
- Pressão Hidráulica**: Indica a força aplicada no sistema.
- Fluido Hidráulico**: Indica o líquido utilizado para transmitir a pressão.
- Matriz Fêmea Móvel**: Indica a parte móvel da matriz.
- Punção de Conformação**: Indica a ferramenta que conforma o material.
- Água + E.G.**: Indica a mistura de água e gás (E.G.) utilizada no processo.

77

Etapas necessárias para a realização dos ensaios:

Primeira etapa – com a ferramenta aberta, promove-se a lubrificação com graxa comercial do punção, da matriz-fêmea móvel, e das coroas circulares do prensa-chapas, e da câmara de alta pressão.

Segunda etapa – o “*blank*” deve ser posicionado sobre a câmara de pressão, com a face contendo a diferença de espessuras (0,6mm) voltada para cima;

Terceira etapa – fechamento da ferramenta – o “*blank*” deve ser ajustado corretamente no interior da ferramenta fechada, para que a diferença de espessura das chapas seja absorvida pelo degrau existente no prensa-chapas e possibilite a acomodação perfeita do “*blank*” na ferramenta, para não haver danos prematuros ao produto durante o processamento;

Quarta etapa – Aplicação de pressão na câmara da matriz-fêmea móvel. Esse sistema hidráulico funciona como um freio (almofada hidráulica) durante o processo de conformação, para que existam também tensões compressivas no material e não só trativas. O sistema é dotado de uma válvula reguladora de pressão ajustada para operar com uma pressão máxima de 100bar (10MPa).

Quinta etapa - Acionamento do cilindro inferior da prensa, movimentando o punção de conformação do PMI para o PMS. Esse deslocamento promove a conformação do material, resultando na obtenção das máximas deformações na peça.

Sexta etapa – Acionamento do cilindro superior da prensa, movimentando o conjunto superior da ferramenta do PMS para o PMI, efetuando o furo central e o corte periférico da peça.

Sétima etapa – Promove-se a abertura da ferramenta, em seguida aplica-se uma leve pressão sobre a matriz-fêmea móvel, promovendo o deslocamento e a extração do produto acabado da ferramenta.

3.7.4 – Etapas Empregadas nos Ensaio de Estampagem Convencional com Punção de Raio 5mm

Para a realização desse ensaio, inseriu-se o punção com raio de contorno igual a 5mm para estampagem convencional (10) no interior câmara de alta pressão (7). A descrição desse ensaio é idêntica à descrita nos procedimentos de estampagem convencional com punção de conformação de raio de contorno igual a 13,5mm. O objetivo desse ensaio foi de elevar a severidade de conformação, empregando-se um punção com menor raio de contorno, proporcionando a obtenção de peças similares às obtidas pelo método da hidroconformação.

A Figura 3.20 apresenta a peça produzida pelo método da estampagem convencional com raio no fundo do copo de 5mm.



Figura 3.20 – Forma Final da Peça Estampada com Raio de 5mm

Constatou-se durante a realização dos ensaios, que a deformação máxima do material ocorre na região central da peça, onde seria realizado um furo de diâmetro 13mm. Como o objetivo do trabalho é analisar a conformabilidade dos TWBs, optou-se em não efetuar mais o furo central nos corpos-de-prova como apresenta a Figura 3.20, com o propósito de não interferir nos resultados das medições das deformações.

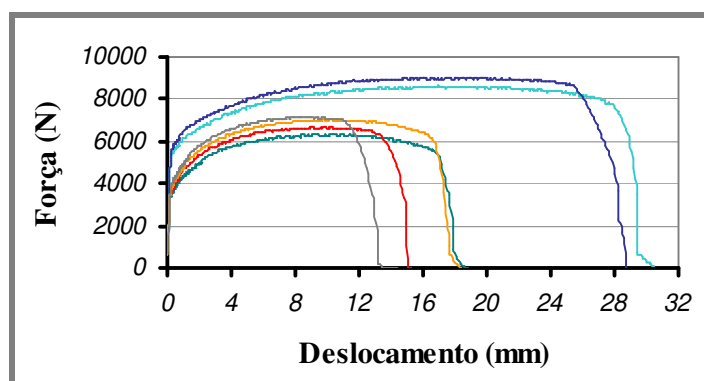
Capítulo 4

Apresentação e Discussão dos Resultados

4.1 – Ensaio de Tração Realizado para Caracterizar a Matéria-Prima

Nos ensaios de tração uniaxiais realizados com a matéria-prima, foram obtidos os valores das curvas força x deslocamento das amostras de TWBs produzidos a partir dos aços ST-06 e ST-07 conforme descrito no Capítulo 3.

A Figura 4.1 e a Tabela 4.1 apresentam os resultados dos ensaios de tração uniaxiais dos TWBs utilizados para construir a CLC, juntamente com os resultados dos TWBs utilizados para determinar as FMDs.



- Deformação a 0° da linha de solda (material empregado para determinar a CLC);
- Deformação a 0° da linha de solda (material empregado para determinar as FMDs);
- Deformação a 45° da linha de solda (material empregado para determinar a CLC);
- Deformação a 45° da linha de solda (material empregado para determinar as FMDs);
- Deformação a 90° da linha de solda (material empregado para determinar a CLC);
- Deformação a 90° da linha de solda (material empregado para determinar as FMDs).

Figura 4.1 – Força x Deslocamento dos TWB

Tabela 4.1 – Resultados dos Ensaio de Tração dos Corpos-de-Prova Extraídos das Chapas Soldadas a Laser.

Amostras	Propriedades	Posição da Linha de Solda		
		0°	45°	90°
CLC	Força Máxima (N).	8512,50	6658,20	6355,00
	Alongamento Máximo (%)	46,90	19,18	22,68
	Deslocamento Máximo (mm)	23,45	9,59	11,34
FMD	Força Máxima (N).	8998,21	7185,92	7021,4
	Alongamento Máximo (%)	51,76	20,76	26,70
	Deslocamento Máximo (mm)	25,88	10,38	13,35

Esses resultados dos ensaios de tração demonstraram que os materiais retirados das duas partidas distintas não apresentaram diferenças significativas com relação à força máxima, alongamento e ao deslocamento total que pudessem interferir nos resultados de comparação entre os ensaios da CLC e as FMDs.

Assim, conclui-se que esses materiais são similares para o objetivo deste trabalho.

4.2 – Ensaio Nakazima – Determinação do Limite de Conformabilidade da Matéria-Prima

Conforme descrito no Capítulo 2, o ensaio Nakazima determina as regiões onde as estirções de espessura localizadas ocorrem, determinando os limites de conformação do material.

A Figura 4.2 apresenta os corpos-de-prova escolhidos para a realização das medições das deformações máximas principais, com o objetivo de identificar os limites de conformabilidade da matéria-prima, depois de submetidos ao embutimento em um equipamento destinado a realização de ensaios Erichsen.

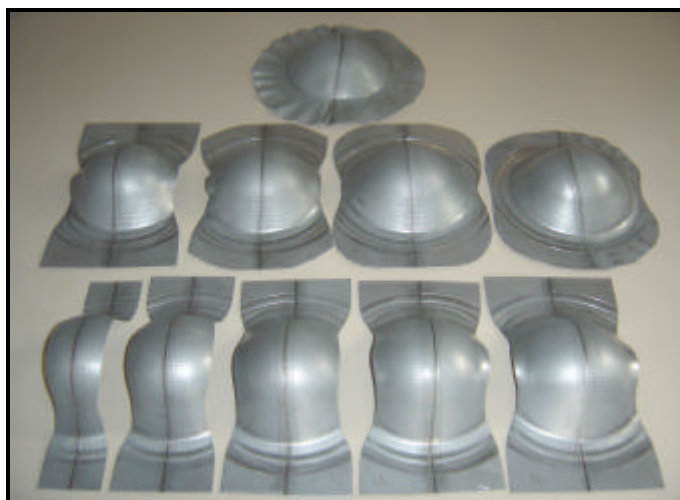


Figura 4.2 – Aspecto dos Corpos-de-Prova após o Ensaio de Estampabilidade.

Durante a realização dos ensaios, o corpo-de-prova com largura 50mm excedeu os 10% tolerados na altura de domo, porque a capacidade máxima de força no prensa-chapas do equipamento é de 230 kN, o que impossibilitou a adequação desse CP dentro da tolerância especificada, pois não foi possível aplicar a força necessária no prensa-chapas.

A Figura 4.3 apresenta em destaque o CP de 220 mm de largura após o Embutimento.

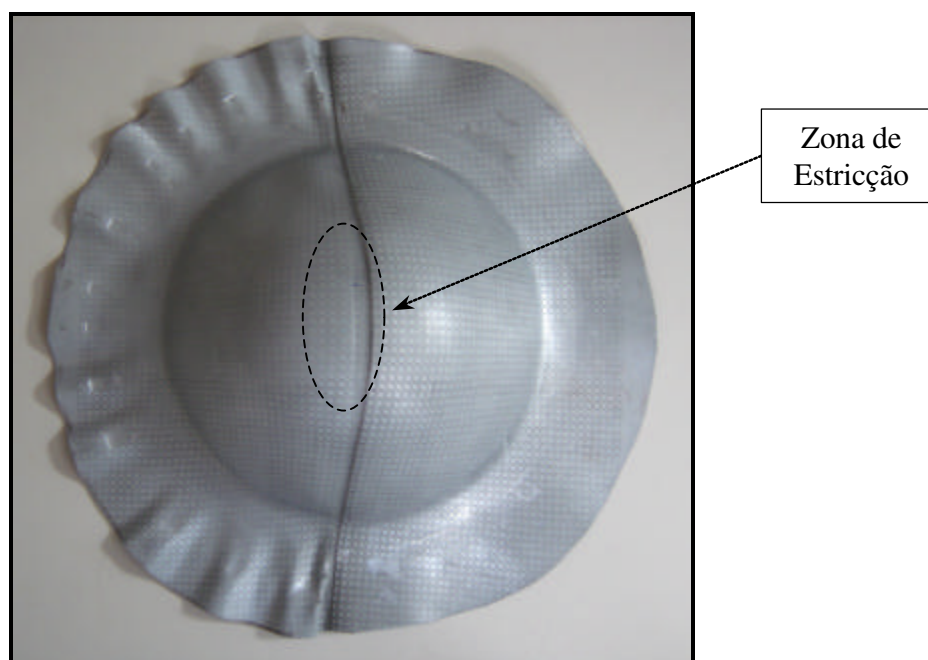


Figura 4.3 – Corpo-de-Prova de 220 mm de Largura Submetido ao Ensaio de Estampabilidade

Nessa figura pôde-se observar o efeito do prensa-chapas sobre os materiais empregados no CP, com o enrugamento pronunciado da chapa mais fina devido à diferença de comportamento do “blank” e menor resistência mecânica do material de menor espessura durante a conformação. O início da estrição localizada ocorreu na chapa mais fina, paralela a linha de solda, em função da condição de tensão biaxial (estiramento puro) ocorrida nesse CP, reforçando a tese descrita por Min *et al.*, (2000), que o TWB resiste bem às deformações paralelas à linha de solda, e não as deformações perpendiculares que excedem o limite de resistência do material.

Como a estrição de espessura ocorreu sempre na chapa mais fina dos CPs, representativos da condição de estiramento puro, não foi possível determinar a CLC da chapa mais espessa do “blank”, em virtude das deformações nessas chapas não serem significativas.

A partir da análise das circunferências deformadas (elipses) que foram medidas na periferia dessas estrições localizadas, determinaram-se as deformações verdadeiras.

A Tabela 1 do Anexo A mostra os resultados obtidos nos ensaios de estampabilidade, destacando os corpos-de-prova identificados em negrito que foram reunidos na Tabela 4.2, e posteriormente submetidos à leitura óptica das deformações principais no sistema denominado CAMSYS[®] (Tabelas 2 e 3 do Anexo A) e com um paquímetro digital reunidos na Tabela 1 do Anexo B.

Tabela 4.2 – Corpos-de-Prova Medidos pelo Sistema CAMSYS[®] e com Paquímetro Digital.

Corpo-de-prova (mm)	Domo (mm)	Força Máxima (kN)	Prensa-Chapa (kN)
220x220	40,8	70,2	15
220x175	52,8	80,4	55
220x160	40,0	88,6	130
220x140	52,3	82,4	190
220x130	51,8	77,0	200
220x120	51,9	70,6	200
220x110	56,1	67,2	200
220x100	52,8	58,3	210
220x80	58,1	48,1	230
220x50	59,2	30,6	230

4.2.1 – Resultados das CLCs da Matéria-Prima

O sistema de leitura óptica CAMSYS[®] é um equipamento composto por uma câmera digital que proporciona a leitura semi-automática das circunferências deformadas (elipses) com uma resolução de 0,05mm. Os dados coletados por essa câmera são analisados em um computador, sendo que as leituras dependem da escolha correta da elipse e da habilidade do operador, porque durante a leitura, a câmera imprime uma linha sobreposta à imagem da elipse deformada com o intuito do operador aceitar ou recusar a leitura. Dessa forma, o sistema de leitura é bastante vulnerável à sensibilidade do operador.

Com os corpos-de-prova selecionados e mostrados na Tabela 4.2, a próxima etapa do ensaio Nakazima foi efetuar as leituras das deformações com o sistema óptico CAMSYS[®] das circunferências mais deformadas, medindo-se os eixos principais das elipses deformadas na periferia da região com estricção de espessura localizada.

Como as estricções de espessura ocorreram sempre próximas ou nas linhas de solda dos corpos-de-prova que simularam as condições de estampagem profunda (larguras: 50, 80, 100, 110, 120, 130 e 140mm), as leituras das deformações principais foram realizadas tanto na chapa mais fina (0,90mm) como na chapa mais espessa (1,50mm) dos corpos-de-prova, promovendo a determinação de duas Curvas Limites de Conformação para a matéria-prima.

Para revelar o “X” formado na zona de estricção dos corpos-de-prova representativos da condição de estampagem profunda, foi utilizado pó de grafite no lado interno desses corpos-de-prova (Figura 4.4). Essa figura apresenta um exemplo da caracterização visual da estricção de espessura contendo as elipses deformadas do corpo-de-prova com largura 50mm, em que o diâmetro maior da deformação principal no sentido de tração é superior ao diâmetro original da circunferência e o diâmetro menor da deformação principal, perpendicular ao sentido de tração é inferior ao diâmetro original da circunferência.

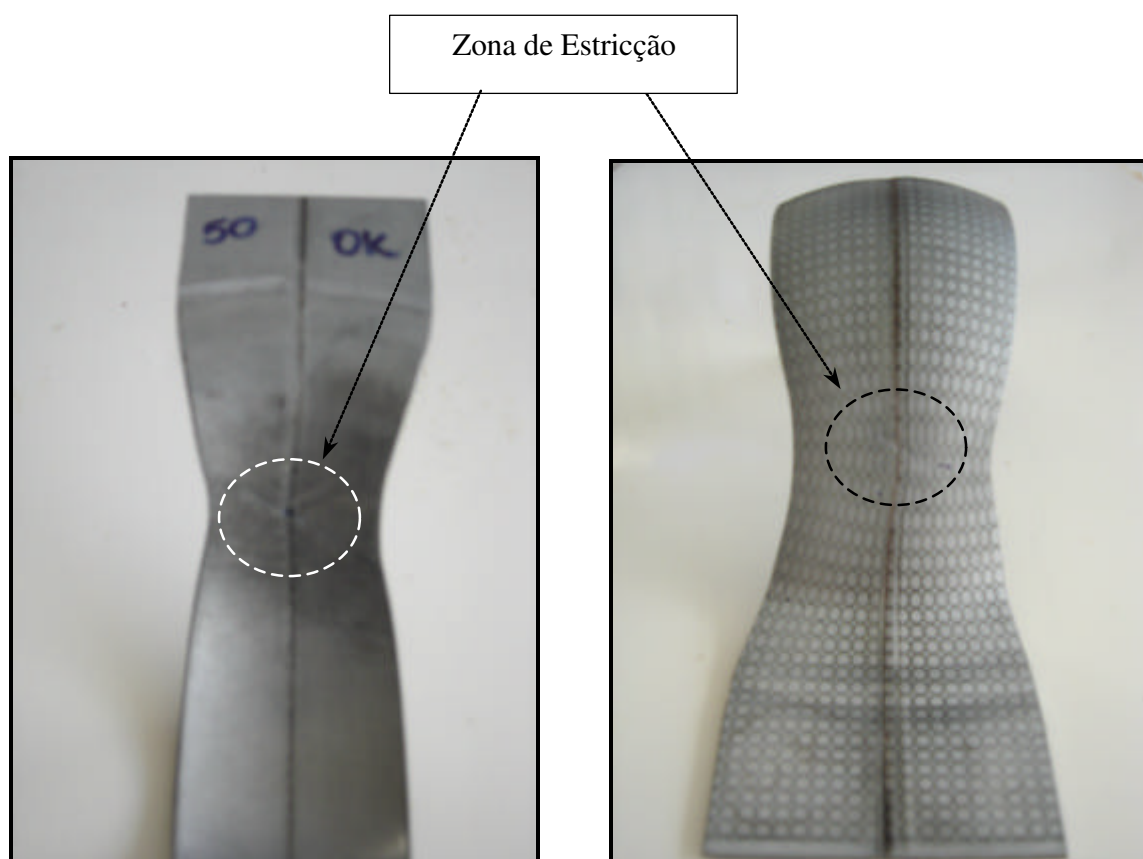


Figura 4.4 – Deformações Ocorridas nos Dois Materiais

Como as estricções nos corpos-de-prova representativos da condição de estampagem profunda, ocorreram sempre na interface das duas chapas (linha de solda do TWB), as medições das deformações para construir a CLC foram realizadas nas chapas de espessura 0,9mm e 1,5mm. O “X” da Figura 4.4 mostra a origem e a propagação da estricção no corpo-de-prova.

Após a realização das medições em todos os corpos-de-prova, os dados coletados foram analisados para compor as Curvas Limites de Conformação. Todas as curvas traçadas a seguir foram obtidas a partir de linhas de tendência polinomiais de segundo grau.

A Figura 4.5 apresenta a CLC traçada a partir de todos os dados obtidos pelo sistema de leitura óptico CAMSYS[®] (Tabela 2 do Anexo A) do lado mais fino (0,90mm) dos corpos-de-prova.

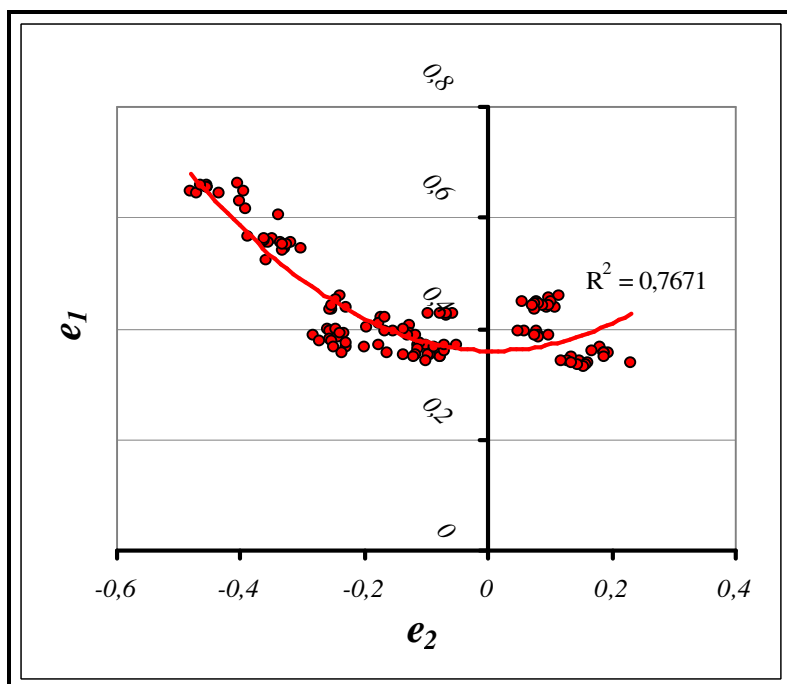


Figura 4.5 – CLC da Chapa Fina (0,90mm)

A Figura 4.6 apresenta a CLC traçada a partir de todos os dados obtidos pelo sistema de leitura óptico CAMSYS® (Tabela 3 do Anexo A) do lado mais espesso (1,50mm) dos corpos-de-prova.

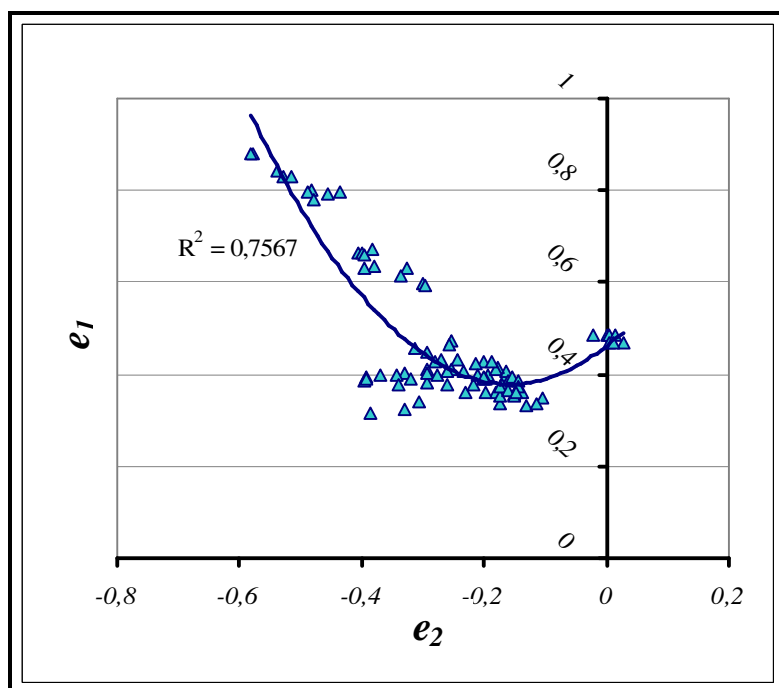


Figura 4.6 – CLC da Chapa Grossa (1,50mm)

A Figura 4.7 representa a sobreposição das CLCs traçadas a partir de todos os dados obtidos pelo sistema de leitura óptico CAMSYS[®] dos dois lados (espessuras 0,90 e 1,50mm) dos corpos-de-prova.

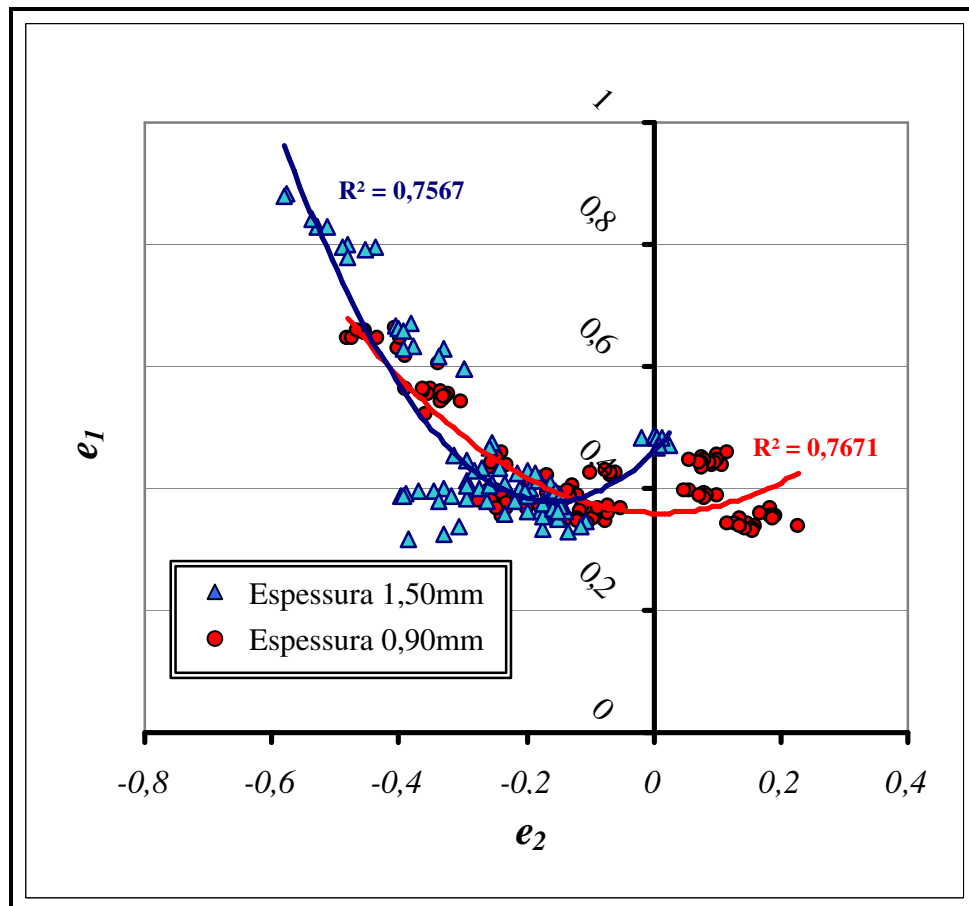


Figura 4.7 – Sobreposição das CLCs Obtidas das Chapas de 0,90 e 1,50mm de Espessura.

Posteriormente, foram construídas CLCs com os dados mais críticos obtidos da leitura CAMSYS[®], ou seja, foram admitidos somente os valores de deformação referentes às condições de maior deformação (elipses mais deformadas próximas a estricção de espessura), como mostrado na Tabela 4 do Anexo A e na Figura 4.8 para a chapa de 0,9mm de espessura e na Tabela 5 do Anexo A e na Figura 4.9 para a chapa de 1,5mm de espessura.

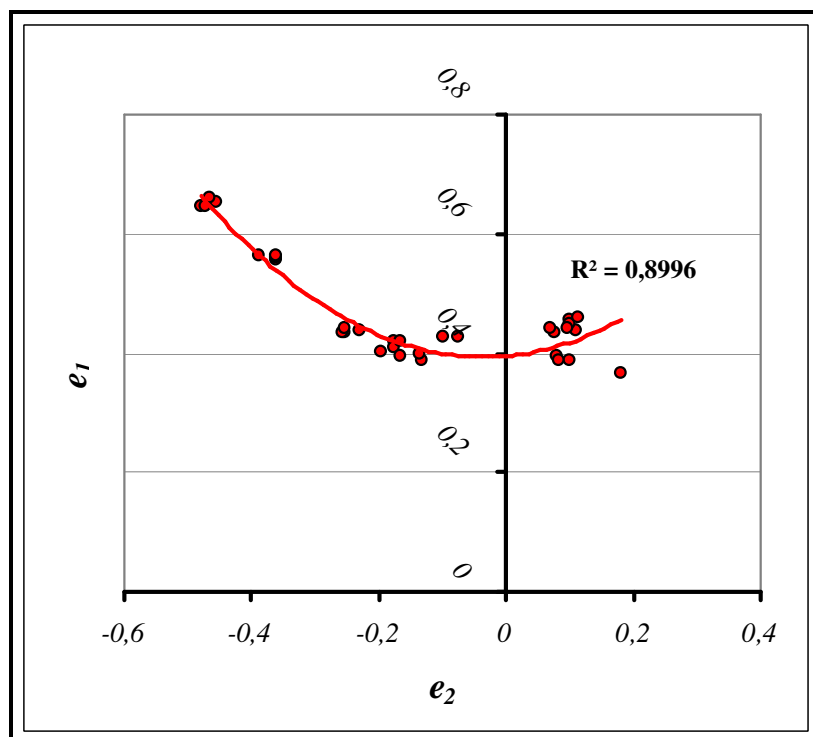


Figura 4.8 – CLC Resultante da Chapa de 0,90mm de Espessura.

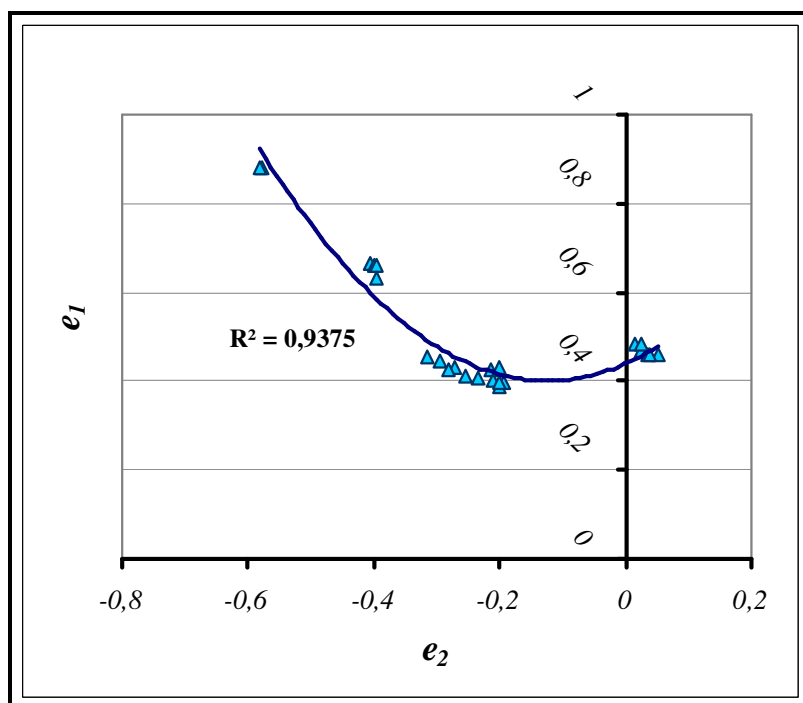


Figura 4.9 – CLC Resultante da Chapa de 1,50mm de Espessura

As Figuras 4.6 e 4.9 apresentam as curvas traçadas a partir dos dados de deformação obtidos das chapas mais espessas (1,50mm), entretanto, não houve deformação significativa nos corpos-de-prova de 160, 175 e 220mm de largura, que retratam o estado de tensão biaxial, e a estricção nesses corpos-de-prova ocorreu no lado do “blank” onde a chapa é mais fina, 0,90mm de espessura.

A CLC traçada a partir dos dados obtidos das deformações das chapas de 1,50mm de espessura demonstrou que não ocorreu um estado de tensão biaxial (estiramento) significativo, observado pela presença maciça de deformações de estados de tensão uniaxiais, representados pelo lado esquerdo do gráfico.

A Figura 4.10 apresenta um gráfico com as deformações mais severas medidas nas chapas de 0,90mm e 1,50mm simultaneamente, e representa o comportamento do “blank” quanto aos seus limites de conformabilidade.

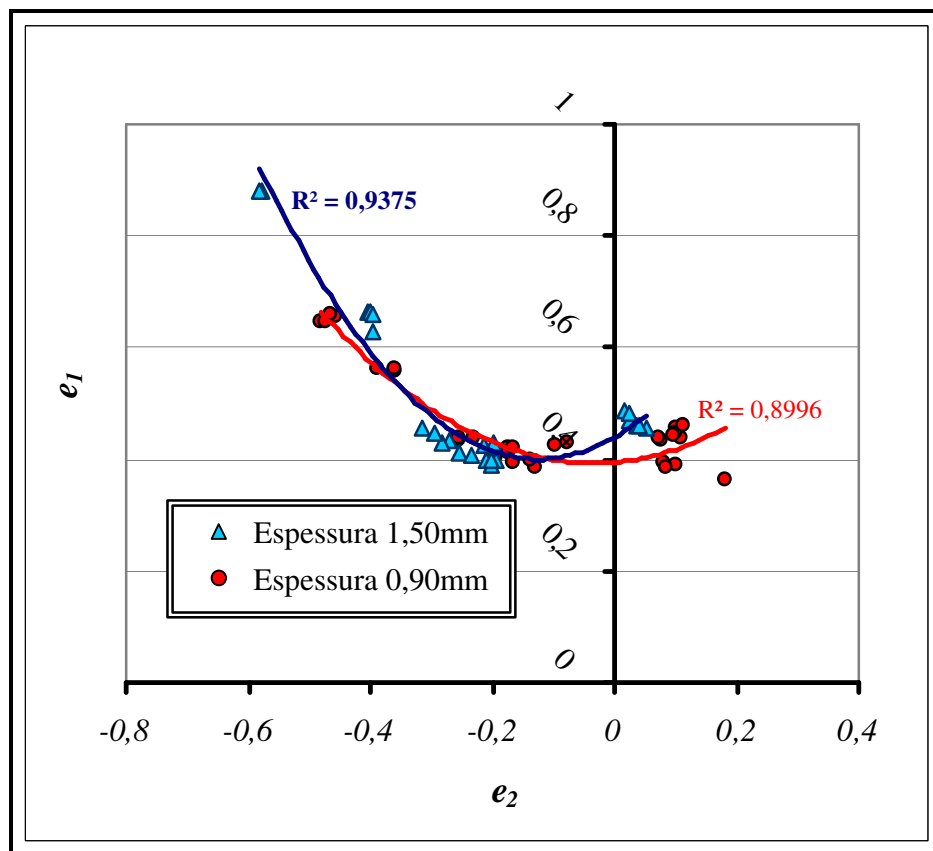


Figura 4.10 – CLCs das Chapas 0,90 e 1,50mm de Espessura Apresentadas Simultaneamente

A Figura 4.10 mostra que a CLC da chapa mais espessa possui uma condição de severidade maior em relação à estampagem profunda (representada pelo lado esquerdo do gráfico) do que a CLC da chapa mais fina, reforçando a tese apresentada por Kridli *et al.*, (2003) e Kusuda *et al.*, (1997), que o limite de conformabilidade de um TWB é limitado pela chapa mais fina ou menos resistente na região de estiramento puro (tensão biaxial), representada pelo lado direito do gráfico.

Para obter-se uma medição precisa de leitura empregando o sistema de leitura óptica CAMSYS® é necessário posicionar a câmera de leitura de maneira perpendicular às elipses deformadas. Entretanto, como as deformações principais dos corpos-de-prova que simulam a condição de estampagem profunda localizam-se próximas às linhas de solda, não foi possível realizar a medição dessas deformações, e os dados coletados não representaram a maior severidade de deformação. Dessa forma, visando obter-se uma curva mais próxima do limite de conformabilidade do material, optou-se em efetuar medições com o auxílio de uma lente iluminada e um paquímetro digital (Figura 4.11).



Figura 4.11 – Medições das Deformações com o Paquímetro Digital

Para garantir significância estatística nas medições efetuadas com o paquímetro digital, foram realizadas três medições distintas em cada corpo-de-prova nas mesmas elipses demarcadas, com o intuito de avaliar a dispersão ocorrida nos procedimentos de medição. Com os resultados mostrados na Tabela 1 do Anexo B conclui-se que essa dispersão foi sempre inferior a 0,13mm.

A Figura 4.12 apresenta um gráfico com a sobreposição das três Curvas Limite de Conformação traçadas a partir dos dados de deformação coletados com o paquímetro digital e apresentados na Tabela 1 do Anexo B. Esse procedimento só foi efetuado na chapa de menor espessura, porque como citado anteriormente, define o limite de conformabilidade do TWB.

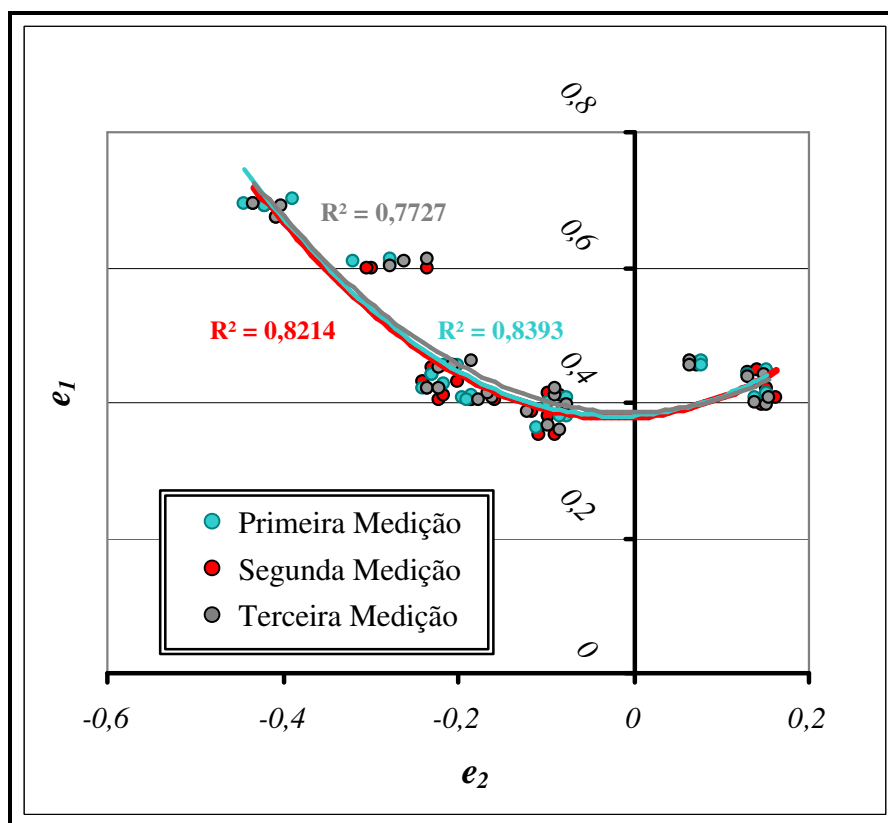


Figura 4.12 – Dispersão das Três CLCs com as Medições Realizadas com o Paquímetro

A partir da sobreposição das três linhas de tendência polinomiais de segundo grau traçadas no gráfico, compondo a CLC, é possível determinar que a medição efetuada com o paquímetro digital indica ser uma forma eficaz para medir as deformações, principalmente nas regiões próximas à linha de solda, onde os sistemas de leitura óptica não são muito eficientes.

Como as deformações ocorridas na chapa de menor espessura definem o limite de conformação do TWB, foi efetuada uma comparação através da sobreposição da CLC obtida pelo sistema CAMSYS[®] com os dados de deformação mais severos e a CLC obtida pelo paquímetro digital. A Figura 4.13 apresenta as CLCs traçadas simultaneamente.

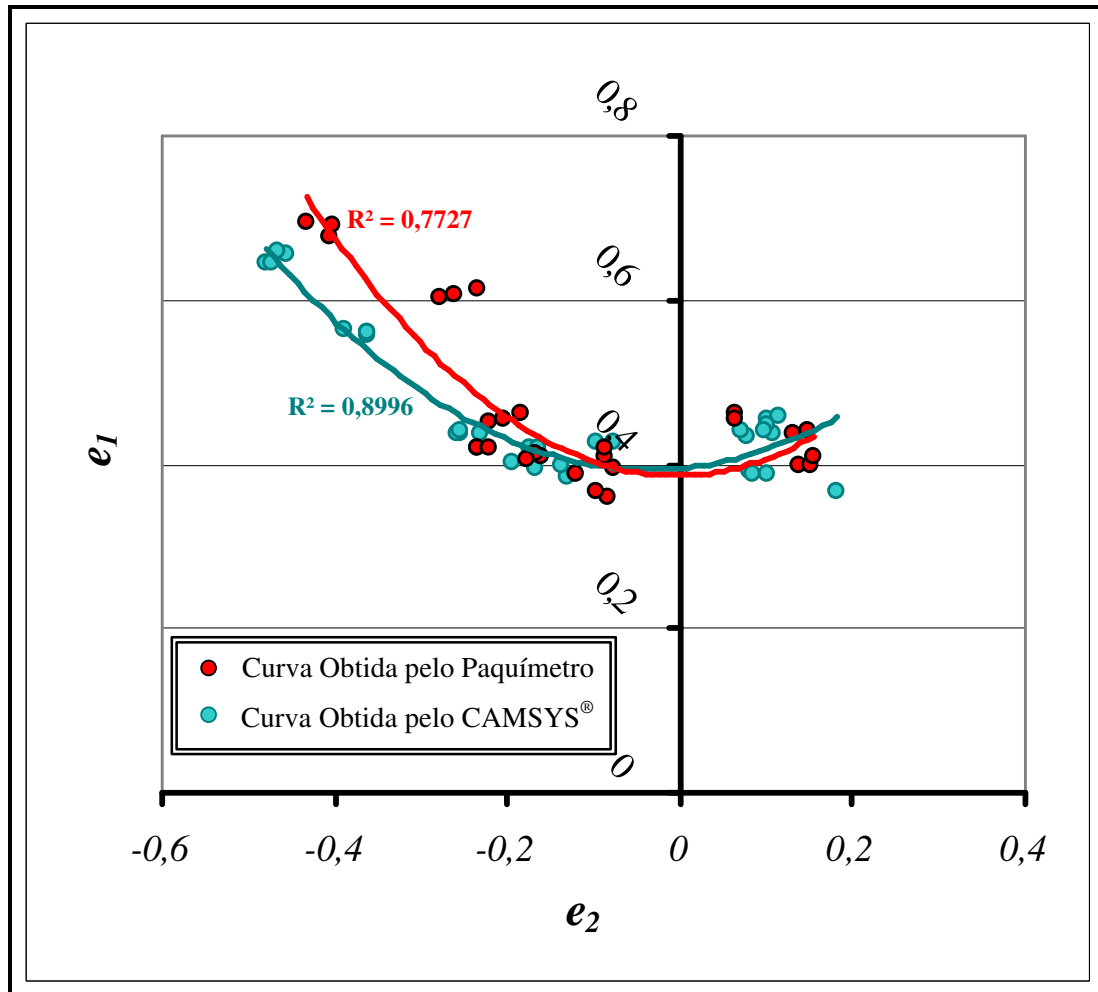


Figura 4.13 – Variação das Medições entre as Leituras Efetuadas com o Paquímetro Digital e o Sistema Óptico CAMSYS[®].

A Figura 4.13 mostra que curvas são próximas na região de estiramento e diferem na região de estampagem profunda, em decorrência da dificuldade de leitura do sistema CAMSYS[®] próximo a linha de solda, o que possibilita identificar que a CLC obtida com o paquímetro digital situa-se em uma condição mais severa de deformação do que a CLC traçada pelo sistema CAMSYS[®].

4.3 – Resultados Obtidos nos Ensaio de Hidroconformação

A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos durante os procedimentos de ensaio realizados na conformação dos TWBs pelo método da hidroconformação, como descrito no Capítulo 3.

A Figura 4.14 apresenta uma peça hidroconformada, e evidencia a movimentação da linha de solda e o raio mais acentuado da chapa com espessura 0,90mm.

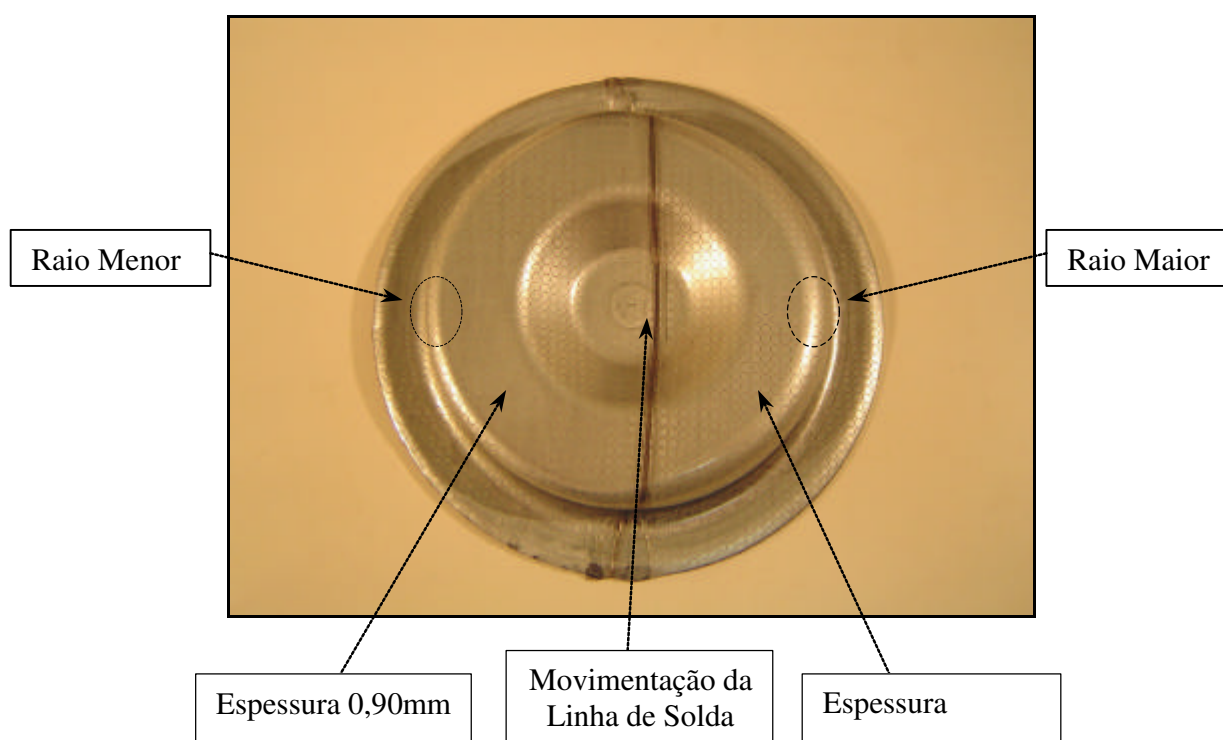


Figura 4.14 – Peça de TWB Hidroconformada.

A movimentação da linha de solda disposta de maneira assimétrica na peça ocorre em virtude do material mais fraco resistir menos à solicitação mecânica durante a conformação do que o material mais espesso, principalmente quando o estiramento ocorre de forma perpendicular em relação à linha de solda, como descrito por Meinders (2000).

Observou-se nos ensaios de hidroconformação que a variação do raio na peça ocorre em função de duas características:

- A ferramenta desenvolvida não possui nenhum limitador de raio para acomodar a chapa durante a conformação. Essa característica foi concebida propositalmente para análise do processo, com o intuito de possibilitar a geração de raios bastante acentuados, e até mesmo levar o material à ruptura prematuramente.
- O sistema de vedação não suportou as pressões necessárias para que o material mais espesso e mais resistente pudesse atingir o mesmo raio da chapa mais fina.

Dentro dos limites impostos pelo ferramental produzido, os “*blanks*” apresentaram um comportamento satisfatório quando submetidos à conformação, com índice aceitável para a repetibilidade desses ensaios.

Pode-se observar na Tabela 4.3 que as pressões atingidas na fase de calibração variaram de 400 a 600bar (40 a 60MPa). Essas pressões não foram suficientes para o material mais espesso atingir o mesmo nível de deformação que o material mais fino do TWB na fase de calibração, ou seja, gerar o mesmo raio de fundo do copo nos dois materiais (Tabela 4.9), e que seria necessário elevar ainda mais as pressões de conformação.

Tabela 4.3 – Resultados dos Ensaio de Conformação (Método da Hidroconformação)

Ensaio	PC1	HC1	PC2	PC3	HC2	PC4	PC5	HC3	PC6	PC7	HC4	PC8	OBS.
01	100	100	100	240	240	240	-	-	-	-	-	-	Enrugou
02	25	110	100	100	240	215	-	-	-	-	-	-	Falhou
03	25	240	205	40	400	340	-	-	-	-	-	-	OK
04	40	100	95	40	240	200	100	400	340	100	600	400	Falhou
05	40	100	95	75	200	160	125	340	240	-	-	-	Falhou
06	75	100	95	40	280	225	-	-	-	-	-	-	Falhou
07	75	100	95	40	200	175	40	400	345	75	400	340	OK
08	75	100	95	40	240	220	75	525	340	-	-	-	OK
09	100	125	100	40	240	215	-	-	-	-	-	-	Falhou
10	75	100	95	40	200	175	75	400	300	-	-	-	Falhou
11	75	100	95	40	200	175	75	400	300	-	-	-	Falhou
12	75	100	95	40	200	175	40	400	345	-	-	-	OK

Legenda:

- PC1 – Pressão Inicial (estágio 1) no Prensa-Chapas (bar);
- HC1 – Pressão de Hidroconformação Inicial (bar);
- PC2 – Pressão Final (estágio 1) no Prensa-Chapas (bar);
- PC3 – Pressão Inicial (estágio 2) no Prensa-Chapas (bar);
- HC2 – Pressão de Hidroconformação (bar);
- PC4 – Pressão Final (estágio 2) no Prensa-Chapas (bar);
- PC5 – Pressão Inicial (estágio 3) no Prensa-Chapas (bar);
- HC3 – Pressão de Hidroconformação Máxima (bar);
- PC6 – Pressão Final (estágio 3) no Prensa-Chapas (bar);
- PC7 – Pressão Inicial (estágio 4) no Prensa-Chapas (bar);
- HC4 – Pressão de Hidroconformação Máxima (bar);
- PC8 – Pressão Final (estágio 4) no Prensa-Chapas.

A Figura 4.15 apresenta a variação da altura do domo em função da pressão de hidroconformação, ao longo do ciclo de produção.

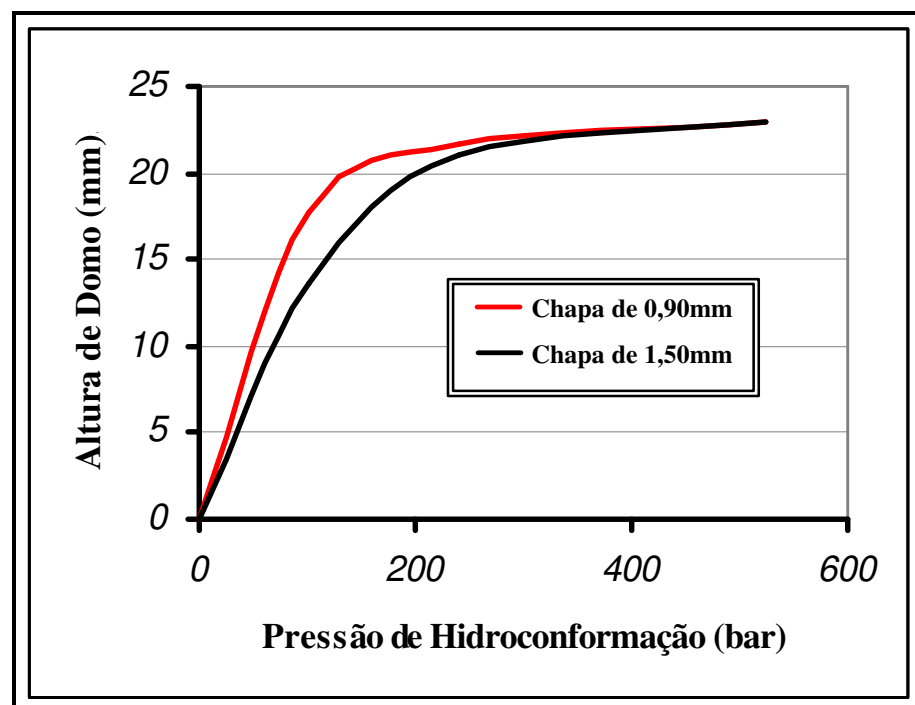


Figura 4.15 – Gráfico de Pressão de Hidroconformação x Deformação

A curva vermelha da Figura 4.15 representa a deformação ocorrida na chapa de 0,90mm de espessura, enquanto que a curva preta refere-se à deformação ocorrida na chapa de 1,50mm de espessura. Observa-se que a chapa espessa exige pressões mais elevadas para atingir um mesmo nível de deformação atingida pela chapa fina.

Em função das limitações do arranjo experimental, não foi possível variar as forças no prensa-chapas durante o ciclo de processo, devido à ineficiência das vedações hidráulicas empregadas para a hidroconformação, e a ausência de sistemas de acionamentos hidráulicos mais precisos. Dessa forma, observou-se que qualquer incremento de pressão excedente aos valores mostrados na Tabela 4.3 promove a ruptura do material de vedação interrompendo o ensaio.

A Figura 4.16 apresenta a ruptura do material devido à aplicação de forças de sujeição mais elevadas, associadas a uma condição de estiramento superior à capacidade do material mais fino resistir. É importante notar que a ruptura do material ocorreu sempre paralela à linha de solda do TWB evidenciando a região de maior concentração de tensões na peça, em decorrência de sua geometria e da zona afetada pelo calor durante o processo de soldagem, conforme descrito por Meinders *et al.*, (2000).

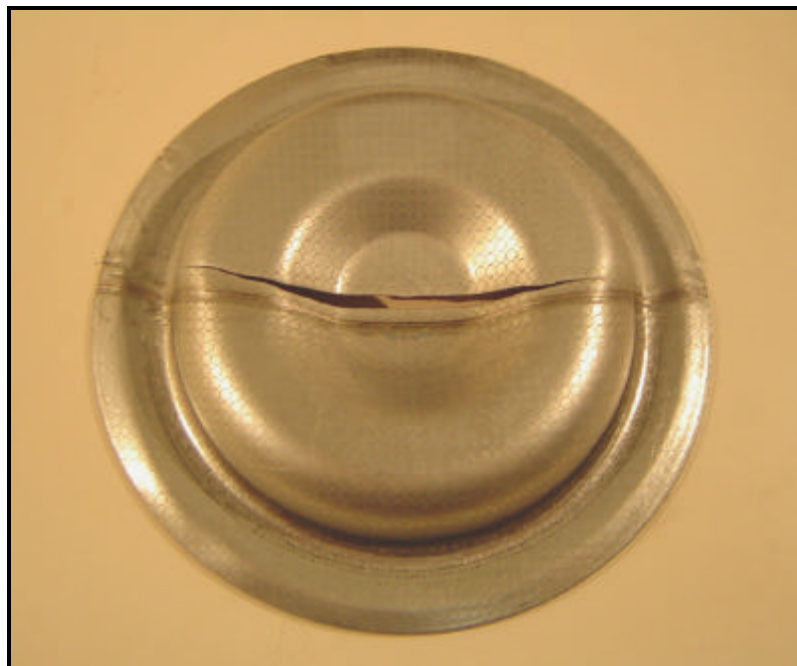


Figura 4.16 – Ruptura do Corpo-de-Prova Devido a Aplicação de Forças de Sujeição Excessivas.

A ruptura do material durante os ensaios sempre ocorreu de forma paralela à linha de solda no material menos espesso e mais fraco, determinando que a resistência da solda é superior a resistência do material mais fraco do TWB. Essa característica é fundamental na fase de projeto dos produtos a serem dimensionados com TWBs com espessuras diferentes.

4.4 – Resultados Obtidos nos Ensaios de Estampagem Convencional (Raio do Punção de 13,5mm)

A Tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos durante os procedimentos de ensaio realizados na conformação dos TWBs pelo método da estampagem convencional com raio de contorno da peça igual a 13,5mm.

O processo de conformação de chapas pelo método da estampagem convencional é bastante conhecido no meio industrial e apresentou somente as dificuldades inerentes ao ajuste das ferramentas. Durante os ensaios, foi possível variar a pressão no prensa-chapas, obtendo-se diferentes condições de estiramento e estampagem profunda.



Figura 4.17 – Forma Final da Peça Estampada com Raio de 13,5mm

Tabela 4.4 – Resultados dos Ensaio de Conformação Convencional (Raio = 13,5mm)

CP	PPC	FPC	PMM	PP	FP	PF	PC
01	95	17.466	100	370	36.193	160	250
02	100	18.385	100	360	35.215	165	240
03	105	19.304	100	180	17.608	170	210
04	150	27.577	100	220	20.542	220	210
05	120	22.062	100	180	17.608	189	210
06	130	23.900	100	180	17.608	200	200
07	130	23.900	100	180	17.608	200	260
08	135	24.820	100	180	17.608	200	230
09	75	13.789	100	150	14.673	130	210
10	75	13.789	100	160	15.651	130	210
11	75	13.789	100	200	19.564	125	240
12	75	13.789	100	190	18.585	125	250
13	50	9.192	100	180	17.608	90	240
14	50	9.192	100	200	19.564	90	240

Legenda:

CP – Corpo-de-Prova;

PPC – Pressão no Prensa-Chapas (bar);

FPC – Força no Prensa-Chapas (kgf);

PMM – Pressão da Matriz-Fêmea Móvel (bar);

PP – Pressão no Punção de Conformação (bar);

FP – Força no Punção de Conformação (kgf);

PF – Pressão de Fechamento (bar);

PC – Pressão de Corte (bar).

Observação: A força de corte total calculada é igual 157kN (vide Anexo D).

A Figura 4.18 mostra uma peça que sofreu ruptura em função da força de sujeição elevada e ausência de lubrificação. A pressão de sujeição adotada nesse corpo-de-prova foi de 175bar (17,5MPa) , gerando uma força no prensa-chapas de 321kN.

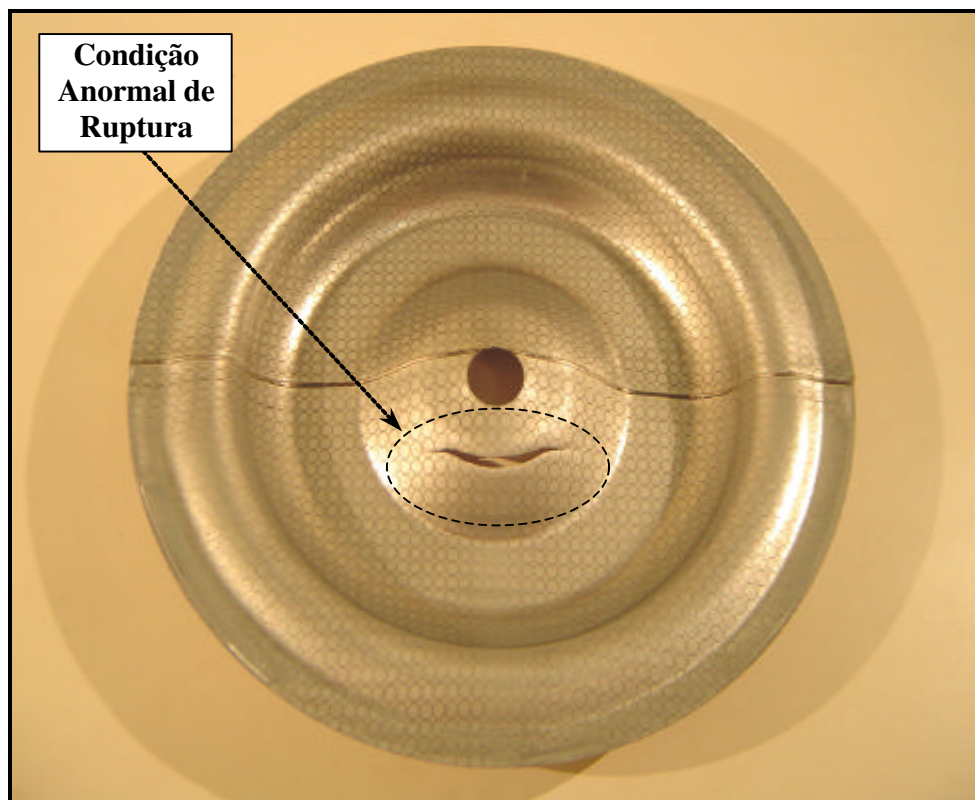


Figura 4.18 – Ruptura do Corpo-de-Prova Devido a Ausência de Lubrificação e Excesso de Força no Prensa-Chapas na Estampagem Convencional

A Figura 4.18 ilustra a importância do dimensionamento correto da força de sujeição e da lubrificação no processo de estampagem convencional. A ausência de lubrificação agregada à elevada força de sujeição provocou a ruptura do corpo-de-prova em uma região de ocorrência de falhas diferente da observada nos ensaios de hidroconformação (Figura 4.16). Essa condição de ruptura anormal ocorreu devido a maior resistência imposta ao escoamento do material na interface “*blank*” e ferramenta, de modo que as forças de atrito agiram com maior intensidade na linha de dobra mais estirada da peça durante a conformação, promovendo a ruptura prematura.

4.5 – Resultados Obtidos nos Ensaio de Estampagem Convencional (Raio do Punção de 5mm)

A Tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos durante os procedimentos de ensaio realizados na conformação dos TWBs pelo método da estampagem convencional com raio de fundo do copo nos corpos-de-prova igual a 5mm.

Tabela 4.5 – Resultados dos Ensaio de Conformação - Estampagem Convencional, Punção com Raio de 5mm

CP	PF	PPC	FPC	PMM	PP	FP	PC
01	40	125	22.981	100	200	19.564	210
02	40	125	22.981	100	200	19.564	210
03	75	140	25.739	100	240	23.441	210
04	75	125	22.981	100	210	20.511	210
05	75	125	22.981	100	210	20.511	210
06	100	140	27.577	100	260	25.433	210
07	100	140	25.739	100	210	20.511	210

Legenda:

PPC – Pressão no Prensa-Chapas (bar);

PF – Pressão de Fechamento (bar);

FPC – Força no Prensa-Chapas (kgf);

PMM – Pressão na Matriz-Fêmea Móvel (bar);

PP – Pressão do Punção de Conformação (bar);

FP – Força no Punção de Conformação (kgf);

PC – Pressão de Corte (bar).

Os procedimentos adotados na realização dos ensaios com punção de 5mm de raio foram similares aos adotados para a efetivação dos ensaios de estampagem com punção de raio 13,5mm. A diferença significativa refere-se ao fato da dificuldade na obtenção de peças íntegras, devido ao raio da peça ser mais acentuado, resultando numa deformação mais severa.

4.6 – Resultados das Frentes Máximas de Deformação (FMDs)

Após a estampagem dos corpos-de-prova, esses foram submetidos a uma análise pela medição dos diâmetros maiores e menores das elipses mais deformadas com o auxílio do sistema de leitura óptico CAMSYS® e pelo paquímetro digital, de maneira análoga às medições efetuadas para determinar a CLC.

A Figura 4.19 apresenta a análise de conformação do produto definido pela medição das circunferências deformadas (FMD) em relação às circunferências deformadas para determinar o limite de conformação do material (CLC). Essa comparação foi realizada através da sobreposição dos pontos obtidos pela medição da CLC e dos resultados obtidos com os corpos-de-prova empregados para determinar as FMDs, todos obtidos com o sistema de leitura óptica CAMSYS®.

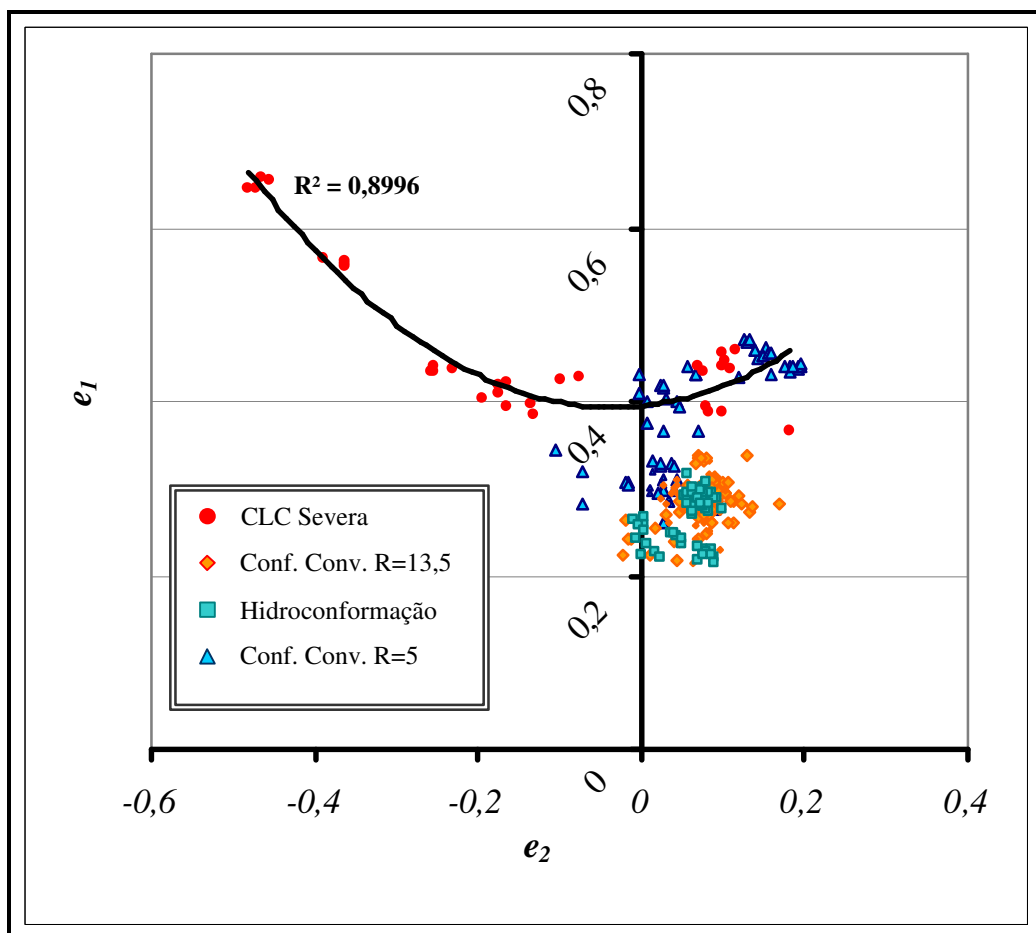


Figura 4.19 – Comparação entre as FMDs e a CLC

A Figura 4.19 mostra os resultados das FMDs obtidos pela medição na região plana do cone do produto, próxima à estrição e à linha de solda no centro da peça. Essa condição de medição apresentou resultados de estados de tensão de tração-tração (estiramento puro) predominantes, evidenciando que os corpos-de-prova com raio de 5mm produzidos pela estampagem convencional situam-se em uma condição de estampagem insegura, com probabilidade de falhas iminentes. Em contrapartida, os corpos-de-prova produzidos pela hidroconformação também com raio de 5mm situam-se em uma condição de estampagem bastante segura quando comparada com a estampagem convencional.

A conformabilidade do TWB pelo método da hidroconformação supera a conformabilidade do TWB na estampagem convencional, devido à emulsão responsável pela hidroconformação atuar em toda a área do “*blank*”, promovendo uma melhor distribuição de tensões ao longo de todo o ciclo de conformação da peça, e em função da minimização das forças de atrito atuantes entre o “*blank*” e a ferramenta, característica que ocorre do início ao fim do processo de conformação na estampagem convencional.

Como mostrado na Figura 4.13, a medição realizada com o paquímetro digital mostrou-se eficiente para as medições nos TWBs, e sendo assim, foi realizada a comparação dos limites de conformabilidade do material (CLC), em relação aos limites de deformação apresentados nos corpos-de-prova, determinados pelas FMDs. As tabelas 2, 3 e 4 do Anexo B apresentam os valores das deformações dos corpos-de-prova (FMD) obtidos pela medição com o paquímetro.

Essas medições foram realizadas também nas paredes laterais dos corpos-de-prova para possibilitar a análise dos estados de tensão tração-compressão, tensões essas envolvidas na estampagem profunda, o que não ocorreu com o sistema de leitura óptica CAMSYS®. Essa medição foi efetuada somente para verificar o índice de severidade nesse modo de conformação, mas não determinou o limite de conformabilidade dos materiais empregados no TWB.

As Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 mostram as dispersões de deformações obtidas através das três medições realizadas com o paquímetro digital, em cada amostra estampada, para determinar as frentes máximas de deformação dos corpos-de-prova produzidos pelos métodos da hidroconformação e estampagem convencional com raios de 5 e 13,5 mm no fundo do copo.

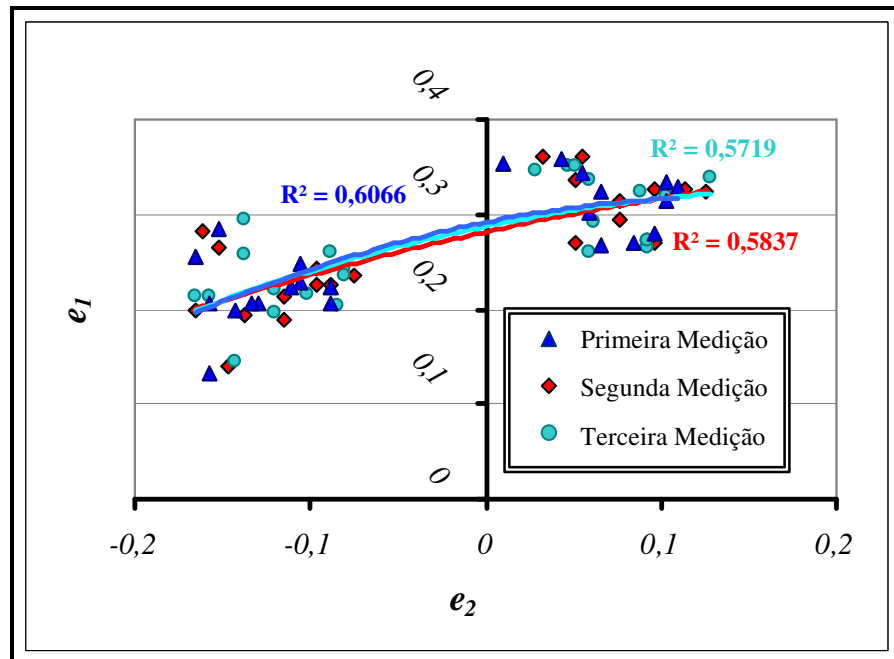


Figura 4.20 – Dispersão nas Medições das FMDs no Processo de Hidroconformação

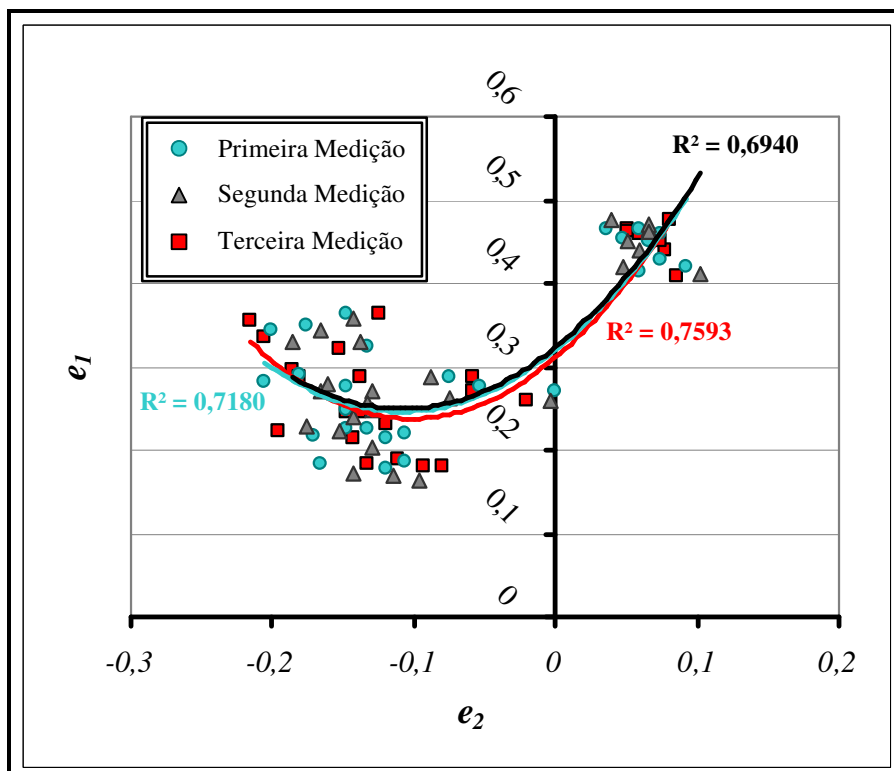


Figura 4.21 – Dispersão nas Medições das FMDs no Processo de Estampagem Convencional com Raio no Fundo do Copo igual a 5mm

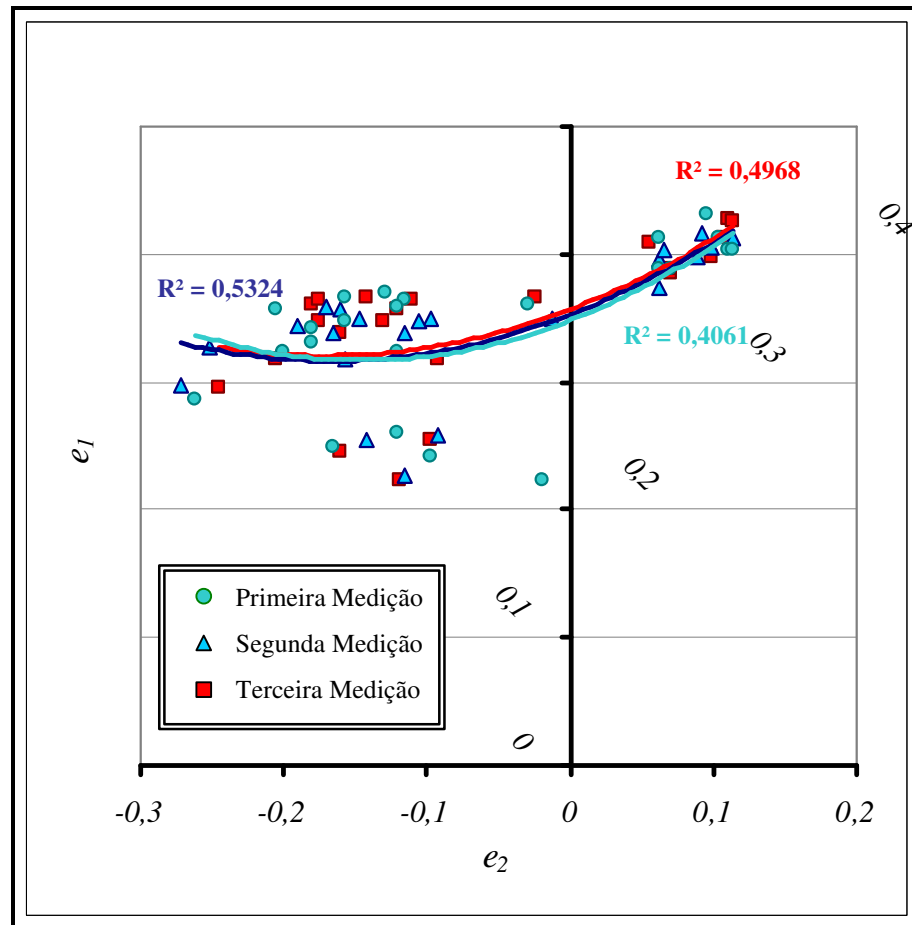


Figura 4.22 – Dispersão nas Medições das FMDs no Processo de Estampagem Convencional com Raio no Fundo do Copo igual a 13,5mm

As dispersões observadas nessas medições correspondem às seguintes variações máximas verificadas nos círculos deformados:

- . 0,13mm para os corpos-de-prova estampados convencionalmente com raio no fundo do copo igual a 13,5mm;
- . 0,09mm para os corpos-de-prova estampados convencionalmente com raio no fundo do copo igual a 5mm;
- . 0,07mm para os corpos-de-prova hidroconformados.

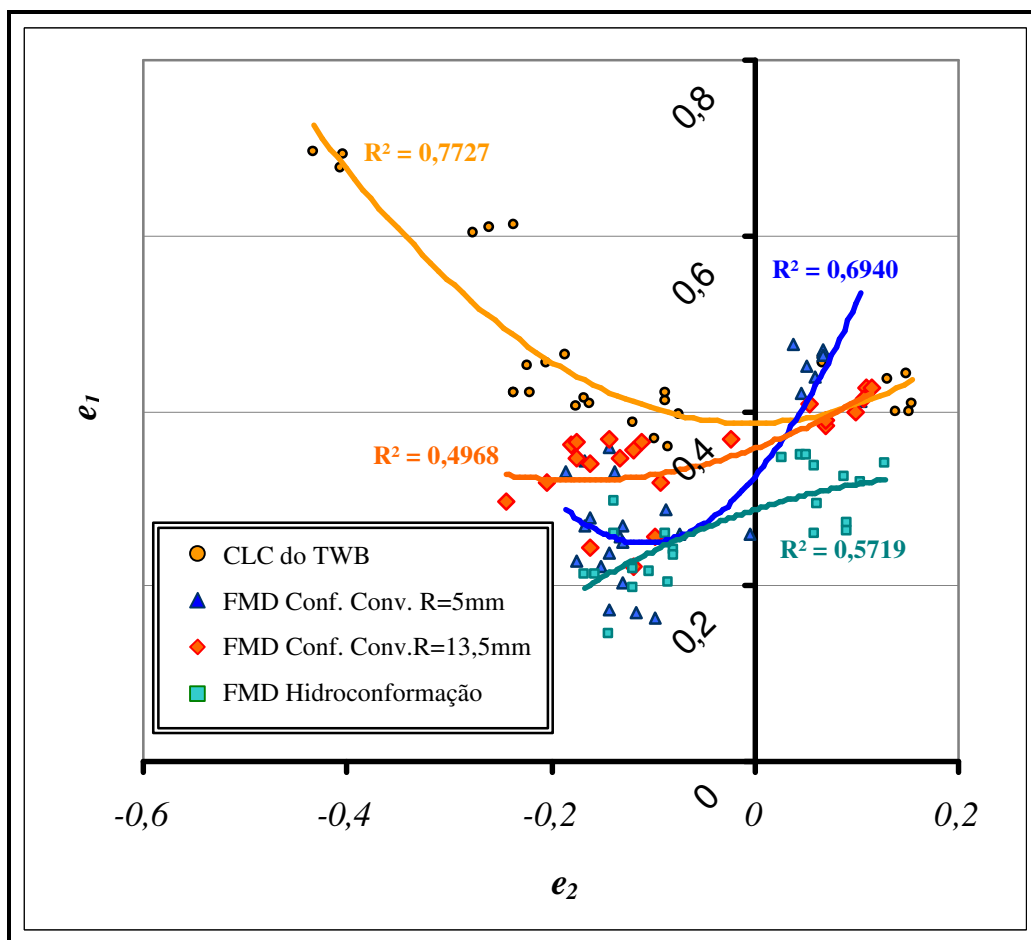


Figura 4.23 – Frenes de Máxima Deformação Traçadas na CLC da Chapa de 0,90mm

Os resultados mostrados na Figura 4.23, obtidos pela comparação da medição entre a CLC e as FMDs mostraram-se bastante confiáveis e similares às medições realizadas com o sistema de leitura óptico CAMSYS®, o que pode ser observado pela comparação de peças produzidas pela hidroconformação e estampagem convencional com raios de copo similares (5mm). As deformações obtidas nas peças hidroconformadas foram traçadas no gráfico, em uma região bastante segura bem abaixo da curva das peças conformadas convencionalmente, reforçado pelo fato de que as peças hidroconformadas atingiram uma altura de domo (Figura 4.28) superior às peças estampadas pelo método da estampagem convencional, o que intensificou o grau de conformação das peças hidroconformadas.

4.7 – Medição da Variação de Espessura

As medições de variação de espessura foram efetuadas no Centro de Tecnologia da Unicamp pelo equipamento comparador horizontal Carl Zeiss com laser HP acoplado. A medição de espessura proporciona uma comparação entre os corpos-de-prova obtidos por hidroconformação e por conformação convencional, ambos com raio do fundo do copo (7) (Figura 4.24) de 5mm, e permite analisar a severidade devida à conformação.

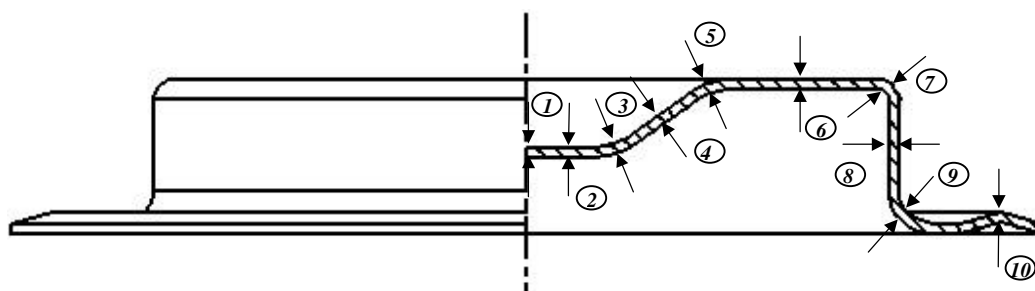


Figura 4.24 – Medição de Espessura dos Corpos-de-Prova

A Tabela 4.6 apresenta os valores das espessuras medidas ao longo da seção transversal dos corpos-de-prova, nas posições mostradas na Figura 4.24.

Tabela 4.6 – Valores das Medições de Espessura (mm)

	CPs - Conformação Convencional						CPs - Hidroconformação			
Posição	1C1	2C1	3C1	5C1	6C1	7C1	3H	7H	8H	12H
01	0,610	0,582	0,563	0,620	0,589	0,588	0,688	0,600	0,619	0,649
02	0,582	0,602	0,582	0,609	0,584	0,567	0,682	0,576	0,606	0,631
03	0,580	0,635	0,614	0,613	0,620	0,595	0,654	0,556	0,579	0,554
04	0,650	0,717	0,639	0,716	0,701	0,628	0,719	0,632	0,698	0,701
05	0,709	0,771	0,618	0,792	0,788	0,669	0,817	0,792	0,780	0,765
06	0,660	0,742	0,635	0,837	0,789	0,703	0,777	0,790	0,724	0,721
07	0,690	0,793	0,695	0,881	0,800	0,733	0,776	0,791	0,762	0,691
08	0,754	0,800	0,728	0,895	0,839	0,782	-	0,853	0,837	0,824
09	0,751	0,845	0,719	0,942	0,893	0,825	0,925	0,879	0,895	0,819
10	0,802	0,947	0,890	0,930	0,881	0,788	0,950	0,921	0,942	0,900
Incerteza de medição: Pontos n° 8 = 27µm (p/k = 4) e demais pontos = 16µm (p/k = 4). CPs Convencionais com R= 5mm – 1C1, 2C1, 3C1, 5C1, 6C1 e 7C1 CPs Hidroconformados com Raio = 5mm – 3H, 7H, 8H e 12H Espessura Inicial da Chapa = 0,89mm										

A Figura 4.25 representa a variação de espessura ao longo da seção transversal. A linha de tendência azul, obtida por ajuste polinomial de segundo grau, representa os corpos-de-prova produzidos pelo método da hidroconformação, enquanto que a linha de tendência vermelha, obtida pelo mesmo método, representa os corpos-de-prova pelo método da estampagem convencional, ambos com raio do fundo do copo na peça igual a 5mm.

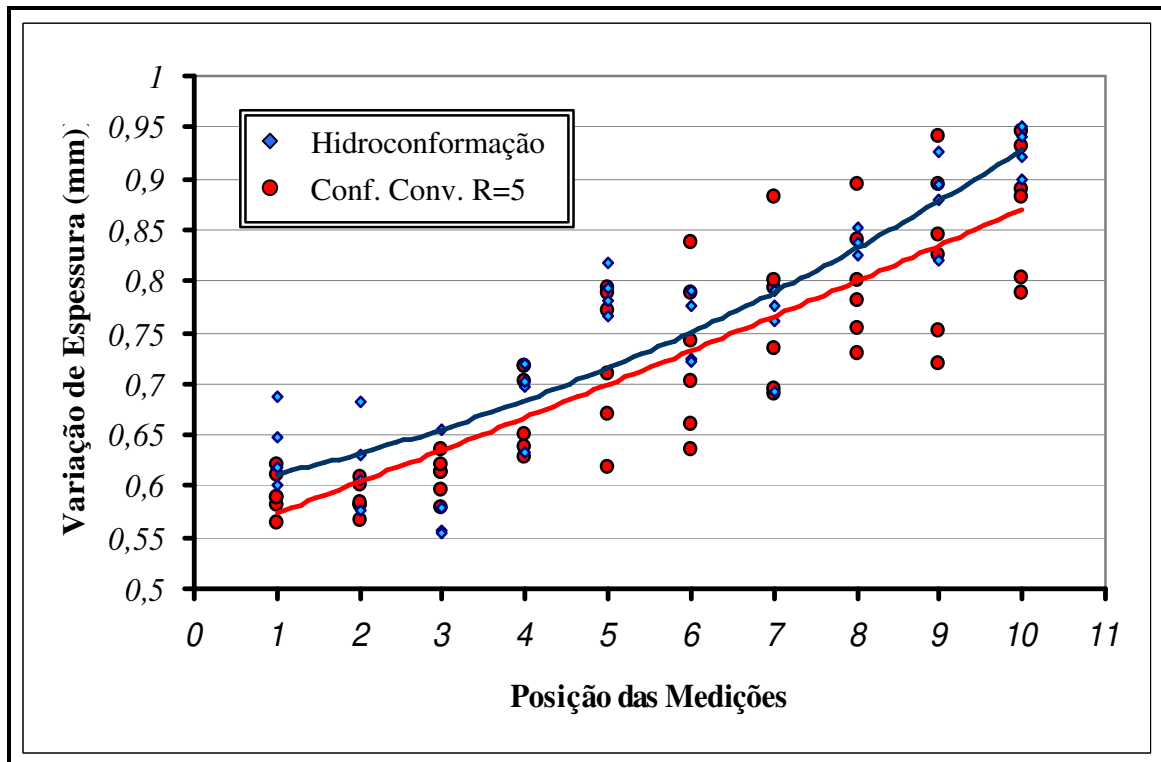


Figura 4.25 – Variação de Espessura

A análise da significância estatística dos valores obtidos da variação de espessura foi verificada através de um teste estatístico, com o planejamento aleatorizado por blocos (Análise de Comparação por Pares), mostrado no Anexo C. Esse procedimento confirmou que a variação de espessura é significativa entre os processos de hidroconformação e conformação convencional.

A Tabela 4.7 mostra os resultados de redução de espessura em porcentagem medida ao longo da peça, paralela a linha de solda na chapa de 0,90mm de espessura.

Tabela 4.7 – Variação da Espessura após Conformação, em Porcentagem.

Posição	CPs - Conformação Convencional						CPs - Hidroconformação			
	1C1	2C1	3C1	5C1	6C1	7C1	3H	7H	8H	12H
01	31,81	34,97	37,10	30,73	34,19	34,30	23,13	32,96	30,84	27,49
02	34,97	32,74	34,97	31,96	34,75	36,65	23,80	35,64	32,29	29,50
03	35,20	29,05	31,40	31,51	30,73	33,52	26,93	37,88	35,31	38,10
04	27,38	19,89	28,60	20,00	21,68	29,83	19,67	29,39	22,01	21,68
05	20,78	13,86	30,95	11,51	11,96	25,25	8,72	11,50	12,85	14,53
06	26,26	17,10	29,05	6,48	11,84	21,45	13,19	11,73	19,11	19,44
07	22,91	11,40	22,35	1,57	10,62	18,10	10,12	11,62	11,51	22,79
08	15,76	10,62	18,66	0	6,26	12,63	-	4,69	6,48	7,93
09	16,09	5,59	19,67	-5,25	0,22	7,82	-3,35	-0,45	0	8,49
10	10,39	-5,81	0,56	-3,91	1,57	11,96	-6,14	-2,90	-5,25	-0,51

Nos corpos-de-prova ensaiados, ocorreram os seguintes picos de variação de espessura:

Deformações máximas obtidas pelo processo de estampagem convencional:

- Redução de espessura = 37,10% (predomínio das forças trativas).
- Ampliação de espessura = 5,81% (predomínio de forças compressivas);

Deformações máximas obtidas pelo processo da hidroconformação:

- Redução de espessura = 38,10% (predomínio de forças trativas);
- Ampliação da espessura = 6,14% (predomínio de forças compressivas).

A análise desses resultados pode ser associada à análise da altura de domo apresentada no item 4.8 a seguir.

4.8 – Medição da Altura do Domo dos Corpos-de-Prova

As medições foram realizadas em torno do perímetro do fundo do copo sobre uma mesa de mármore com um traçador de altura (Figura 4.26).



Figura 4.26 – Medição da Altura de Domo

As leituras de K foram realizadas nas posições A, B, C, D, E, F, G, H, I e J da peça estampada (Figura 4.27).

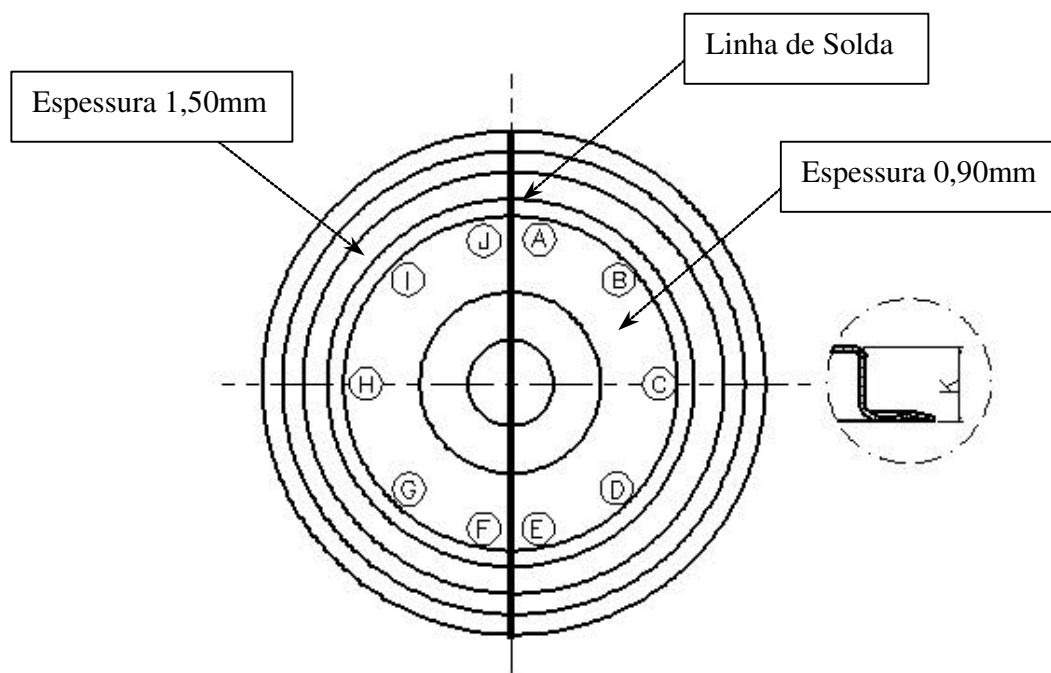


Figura 4.27 – Disposição dos Pontos da Medição da Altura de Domo.

Designação dos corpos-de-prova:

- Peças hidroconformadas: 3H, 7H, 8H e 12H;
- Peças conformadas convencionalmente com raio 5mm: 1C1, 2C1, 3C1, 5C1, 6C1 e 7C1;
- Peças conformadas convencionalmente com raio 13,5mm: 2C, 8C, 9C e 14C.

A Tabela 4.8 apresenta os valores em milímetros da altura de domo (K)

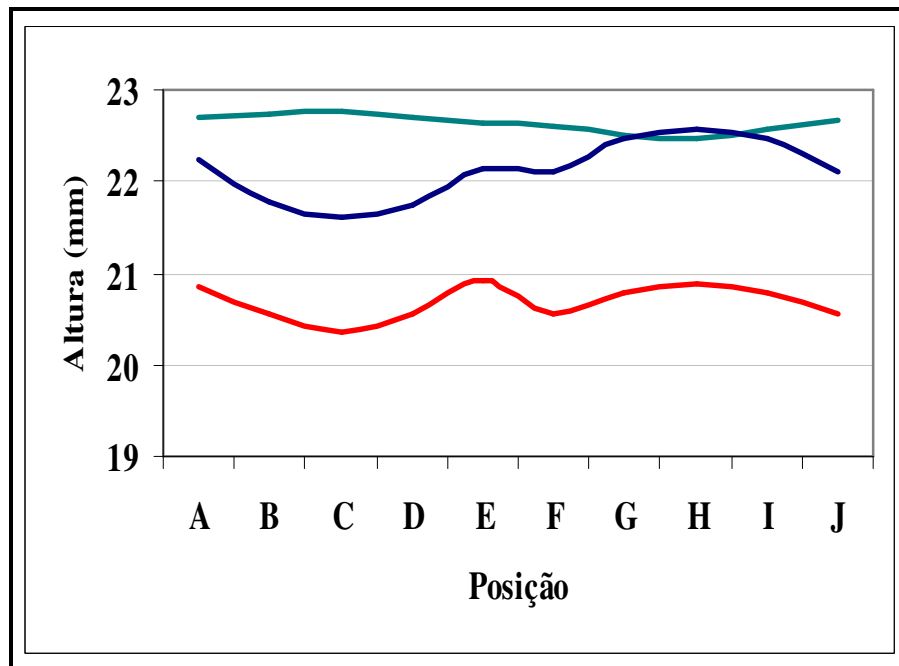
Tabela 4.8 – Medições de Altura do Domo (em milímetros)

CP	Medição da Chapa de 1,50mm					Medição da Chapa de 0,90mm				
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
3H	23,04	23,06	23,10	23,00	22,80	22,66	22,50	22,38	22,60	22,90
7H	22,48	22,48	22,48	22,38	22,36	22,36	22,30	22,32	22,44	22,52
8H	22,90	23,06	23,00	22,96	22,90	22,76	22,68	22,70	22,68	22,78
12H	22,40	22,40	22,44	22,50	22,54	22,62	22,56	22,46	22,50	22,48
1C1	22,18	21,88	21,76	21,80	22,36	22,10	22,54	22,64	22,48	21,96
2C1	22,34	21,90	21,68	21,88	22,56	22,52	22,84	22,84	22,72	22,24
3C1	21,96	21,66	21,54	21,72	22,28	22,06	22,44	22,56	22,36	21,70
5C1	21,92	21,58	21,38	21,50	22,04	21,90	22,28	22,48	22,36	22,76
6C1	22,28	21,88	21,60	21,72	22,20	22,04	22,38	22,54	22,48	22,00
7C1	22,76	21,80	21,80	21,86	21,38	22,08	22,34	22,52	22,42	21,94
2C	21,00	20,48	20,10	20,10	20,48	20,30	20,36	20,50	20,60	20,78
8C	20,84	20,62	20,52	20,80	21,18	20,72	21,02	21,08	20,92	20,50
9C	20,76	20,52	20,46	20,72	21,06	20,68	20,98	21,04	20,86	20,38
14C	22,40	22,08	22,00	22,12	22,62	22,46	22,80	22,88	22,68	22,18

Dessa tabela, calcula-se os seguintes valores:

- Altura média do domo para peças hidroconformadas = 22,63mm;
- Altura média do domo para peças estampadas convencionalmente com raio de 5mm no fundo do copo = 22,13mm;
- Altura média do domo para peças estampadas convencionalmente com raio de 13,5mm no fundo do copo = 21,11mm.

Com os valores médios calculados a partir dos resultados mostrados na Tabela 4.8, construiu-se um gráfico representado pela Figura 4.28 com o intuito de mostrar a variação de altura média do domo dos corpos-de-prova ensaiados.



Legenda:

- Peças hidroconformadas com raio inferior a 5mm;
- Peças conformadas convencionalmente com raio de 5mm;
- Peças conformadas convencionalmente com raio de 13,5mm.

Figura 4.28 – Variação da Altura de Domo dos Diversos Corpos-de-Prova

Nessa figura, notou-se que as peças produzidas pelo processo da hidroconformação foram mais solicitadas à deformação (maior valor médio) e, no entanto, apresentaram menor variação da altura do domo em comparação as peças estampadas convencionalmente. A partir dessas observações, é possível concluir-se que a severidade da deformação na hidroconformação foi ainda maior e mais uniforme, o que reforça a observação efetuada quanto à variação de espessura. Sendo assim, é possível dizer que a hidroconformação possibilita fabricar peças com geometrias mais complexas e com melhor qualidade dimensional do que o processo de estampagem convencional, como descrito no Capítulo 2 pelos autores (ZAMPALONI *et al.*, 2003).

Também observou-se que as pressões atingidas no processo de hidroconformação promoveram a inversão da face plana do “*blank*”, ou seja, o degrau de 0,6mm voltado inicialmente para cima antes do “*blank*” ser submetido à conformação foi invertido após a conformação, o que não ocorreu no processo de conformação convencional (Figura 4.29).

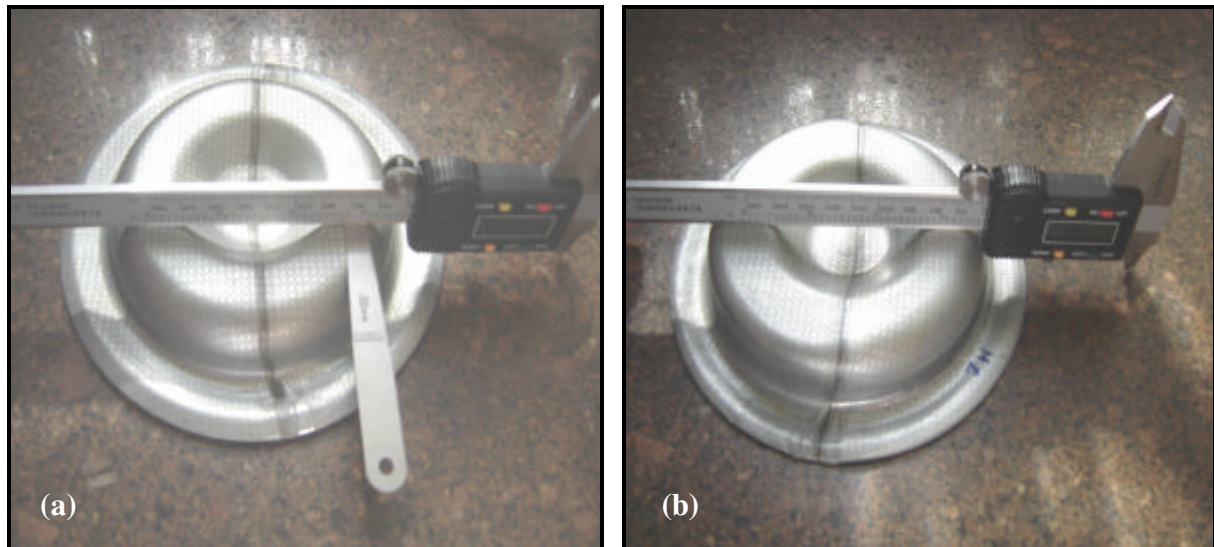


Figura 4.29 – Degrau do “*Tailored Welded Blank*”

O detalhe (a) da figura 4.29 mostra que o degrau existente, derivado da diferença de espessura do TWB, está posicionado na face externa do fundo do copo do corpo-de-prova produzido pelo método da estampagem convencional. Em contrapartida, o detalhe (b) da figura 4.29 mostra a face externa plana no fundo do copo, identificando a inversão do degrau do TWB, devido à aplicação de elevadas pressões hidráulicas do processo de hidroconformação.

4.9 – Medição do Raio de Fundo dos Corpos-de-Prova

A medição do raio dos corpos-de-prova foi efetuada com auxílio de um calibrador de raio.

A Tabela 4.9 apresenta medições de raio do fundo do copo efetuadas em todos os corpos-de-prova submetidos às análises anteriores.

Tabela 4.9 – Resultados das Medições dos Raios do Fundo do Copo (mm)

	CP	Raio da chapa 0,9mm	Raio da chapa 1,5mm
Hidroconformação	3H	5,0	12,0
	7H	5,0	10,0
	8H	4,5	10,5
	12H	4,5	8,5
Estampagem Convencional Raio do Punção (5mm)	1C1	5,0	5,0
	2C1	5,0	5,0
	3C1	5,0	5,0
	5C1	5,0	5,0
	6C1	5,0	5,0
	7C1	5,0	5,0
Estampagem Convencional Raio do Punção (13,5mm)	2C	13,5	13,5
	8C	13,5	13,5
	9C	13,5	13,5
	14C	13,5	13,5

Os corpos-de-prova oriundos da estampagem convencional mantiveram os raios de forma definidos inicialmente pelos punções da ferramenta, correspondendo aos raios de 5 e 13,5mm.

Entretanto, os corpos-de-prova obtidos do processo de hidroconformação apresentaram um raio médio de 5mm no lado da peça com espessura de 0,9mm e um raio médio de 10mm no lado da peça com espessura 1,5mm. Essa variação ocorreu devido à ausência de um assento na fêmea móvel para a acomodar o material, e à ineficiência do sistema de vedação que rompia quando as pressões atingiam 500bar, impossibilitando atingir-se pressões que pudessem calibrar a chapa de 1,5mm com o raio de 5mm.

Se fosse possível elevar as pressões sem se instalar um assento na matriz móvel, a peça possivelmente romperia prematuramente no lado da chapa mais fina, porque esse raio seria ainda mais reduzido.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

5.1 - Conclusões

A partir dos resultados obtidos neste trabalho e considerando os obtidos nele propostos, pode-se concluir:

- O objetivo fundamental foi integrar simultaneamente os processos de hidroconformação de chapas e blanks soldados sob medida (TWB). Esse conceito possibilitou verificar que o processo mostrou-se muito eficiente na fabricação de peças com a relação à qualidade dimensional e maior nível de deformação sem a presença de falhas dos produtos obtidos nos ensaios.
- A grande vantagem da hidroconformação realizada com a ação do fluido como veículo responsável pela conformação, é o fato de que a pressão hidráulica atua em todos os pontos da peça de maneira uniforme em relação ao comportamento do material durante a conformação, diferentemente do que ocorre com a estampagem convencional, porque durante o movimento da ferramenta, o punção gera tensões trativas desde o início da conformação nas regiões mais salientes, em razão do atrito gerado entre o “*blank*” e a ferramenta, comprometendo a conformabilidade do material.

- A análise comparativa envolvendo os processos de hidroconformação e estampagem convencional demonstrou que a hidroconformação supera a estampagem convencional relativo a conformabilidade de “*Tailored Welded Blank*”, atingindo maiores níveis de deformação dentro de uma faixa segura de conformação, obtendo peças com contornos complexos, o que pode ser comprovado pela maior e regular altura de domo obtida e menores raios das peças sem a presença de rupturas.
- O projeto e a construção do ferramental atenderam as expectativas iniciais referentes à fabricação de peças hidroconformadas a partir de chapas planas soldadas com materiais e espessuras diferentes e na redução do custo de fabricação do ferramental, em função de proporcionar a fabricação de peças sem a utilização de um punção, condição essa que pode representar economia na fabricação de uma ferramenta de hidroconformação em relação a uma ferramenta desenvolvida para a estampagem convencional.
- O equipamento utilizado para a realização dos ensaios (ferramentas e prensa), apresentou um comportamento satisfatório durante o processamento, em virtude da deficiência dos sistemas de vedação e dos comandos hidráulicos não permitirem um controle muito preciso durante as etapas de processo de conformação, principalmente quando o equipamento era utilizado para produzir peças pelo método da hidroconformação, em que as pressões de trabalho eram muito elevadas.

5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Seria interessante estudar os seguintes aspectos:

- Durante a estampagem do TWB pelo método da hidroconformação ou pelo método da estampagem convencional, é importante analisar a influência da movimentação da linha de solda no produto acabado e desenvolver um ferramental para a hidroconformação que possibilitasse variar as forças de sujeição ao longo do prensa-chapas, permitindo manter a linha de solda estática e o controle do escoamento do material para o interior da ferramenta.
- Desenvolver um ferramental com uma matriz estática composta por diversos furos no raio do fundo copo, para permitir a ação de uma contra pressão hidráulica agir diretamente no “*blank*” durante a hidroconformação, com o objetivo de gerar tensões compressivas atuantes em todos os pontos da peça com o propósito de reduzir o atrito gerado pela matriz-fêmea móvel no início da conformação e retardar a ruptura no final do processo.
- Desenvolver ensaios experimentais de hidroconformação e comparar os resultados dos ensaios com os resultados obtidos em simulação computacional, com o propósito de avaliar a confiabilidade da simulação no desenvolvimento das ferramentas e do processo de hidroconformação de chapas.

Referências Bibliográficas

- Abedrabbo, N., Zampaloni, M. & Pourboghrat, F. Wrinkling Control in Aluminum Sheet Hydroforming. *International Journal of Mechanical Sciences*. vol. 47, pp. 333-358, 2005.
- ASTM – E8M – 95.
- Automotive Steel Design Manual - Design Manual. rev. 6.1, agosto de 2002, disponível em <http://www.a-sp.org/database/default.asp?doc=28> consultado em novembro de 2005.
- Bayraktar, I., Isac, N. & Arnold, G. An Experimental Study on the Forming Parameters of Deep-Drawable Steel Sheets in Automotive Industry. *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 162-163, pp. 471-476, 2005.
- Bleck, W., Deng, Z., Papamantellos, K. & Gusek, C. O. A Comparative Study of the Forming Limit Diagram Models for Sheet Steels. *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 83, pp. 223-230, 1998.
- Bodycote Materials Testing, CCV – Composite Concept Vehicle.
<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=1347#Crysler'sCompositeConcept>.
consultado em março de 2006.
- Bresciani Filho, E., Zavaglia, C. A. C., Button, S. T., Gomes, E. & Nery, F. A. C. *Conformação Plástica dos Metais*. São Paulo, 5.^a Ed., Editora da Unicamp, 1997.
- Camsys. 2005. <http://www.camsysinc.com>
consultado em novembro de 2005.
- Chan, S. M., Chan, L. C. & Lee, T. C. Tailor Welded Blanks of Different Thickness Ratios Effects on Forming Limit Diagrams. *Journal of Materials Processing Technology*. vol 132, pp. 95-101, 2003.

- Crivellaro, R. S. “*Estudo da Estampabilidade de Tailored Blanks Soldadas a Laser*”. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia de Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, (2003).
- Dohmann, F. & Hartl, CH. Hydroforming Applications of Coherent FE-Simulations to the Development of Products and Process. *Journal of Materials Processing Technology*. vol 150, pp. 18-24, 2004.
- Evangelista, S. H. “*Diagrama de Limite de Conformação Aplicados a 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 Carlos, Universidade de São Paulo.
- Harpell, E. T. Numerical Prediction of the Limiting Draw Ratio for Aluminum Alloy Sheet. *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 100, pp. 131-141, 2000.
- Hartl, Ch. Research and Advances in Fundamentals and Industrial Applications of Hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 167, pp. 387-392, 2005.
- Hein, P. & Vollertsen, F. Hydroforming of Sheet Metal Pairs. *Journal Materials Processing Technology*. v.87, pp. 154-164, 1999.
- Heo, Y., Choi, Y. & Seo, D. Characteristics of Weld Line Movements for the Deep Drawing with Drawbeads of Tailor Welded Blanks. *Journal of Materials Processing Technology*. vol 111, pp. 164-169, 2001.
- Hertell, K. Hydroforming Process – Schuler, 2001.
- Hsu, Q. C. Comparison of Different Analysis Models to Measure Plastic Strains on Sheet Metal Forming Parts by Digital Image Processing. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. pp. 515-521, 2003.
- ILSAP, 2005 – consultado em fevereiro de 2005
<http://ilsap.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?CATID=18&PAGEID=2081271360>

Internet Learning of Steel Applications & Processes

<http://www.steeluniversity.org/content/html/eng/default.asp?CATID=18&PAGEID=2081271360> consultado em setembro de 2005.

Kandil, A. An Experimental Study of Hydroforming Deep Drawing. *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 134, pp. 70-80, 2003.

Kang, B. H., Son, B. M. & Kim, J. A Comparative Study of Stamping and Hydroforming Processes for an Automobile Tank Using FEM. *International Journal of Mechanical Sciences*. vol. 44, pp. 87-94, 2004.

Keeler, S. Training Manual Enhanced FLC Project – The bead correction factor, 2002
<http://www.a-sp.org/database/pdf/Training%20manual%20-%Print.pdf>
consultado em fevereiro de 2005.

Kelkar, A. Strategies for Aluminium in the Auto Body
<http://msi.mit.edu/msi/meeting05082000/przpdf/BIW2000pdf>.
consultado em março de 2006.

Kinsey, B., Liu, Z. & Cao, J. A Novel Forming Technology for Tailor Welded Blanks. *Journal of Materials Processing Technology*. vol 99, pp. 145-153, 2000.

Kleiber, M., Rojek, J. & Sotchi, R. Reliability Assessment for Sheet Metal Forming Operations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. vol.191, pp. 4511-4532, 2002.

Knockaert, R., Chastel, Y. & Massoni, E. Experimental and Numerical Determination of Texture Evolution During Deep Drawing Tests. *Journal of Materials Processing Technology*. vol 110, pp. 300-311, 2001.

Koç, M. & Altan, T. An Overall Review of Tube Hydroforming (THF) Technology. *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 108, pp. 384-393, 2001.

Korves, L. & Morbacher, H. Tailored Blanks – Optimized Sheets for Automotive Construction. Techforum, pp. 28-31, dezembro de 2003.

- Kridli, G. T., Bao, L., Mallick, P. K. & Tian, Y. Investigation of Thickness Variation and Corner Filling in Tube Hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*. vol 133, pp. 287-296, 2003.
- Kusuda, H., Takasago, T. & Natsumi, F. Formability of tailored blanks. *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 71, pp. 134-140, 1997.
- Lascoe, O. D. Handbook of Fabrication Processes. ASM International, 1988, 456 p.
- Meinders, T., Berg, A. Van den & Huértink, J. Deep Drawing Simulations of Tailored Blanks and Experimental Verification. *Journal of Materials Processing Technology*. vol 103, pp. 65-73, 2000.
- Mesquita, E. L. A. & Léo, L. Estampagem de Aços Inoxidáveis – ACESITA, 1997.
http://www.acesita.com.br/download/apostila_aco_inox_estampagem.pdf
 consultado em agosto de 2004.
- Metal Handbook Forming. *American Society for Metals*. vol.4, 8th ed., Metals Park, Ohio 44073.
- Min, K. B., Kim, K. S. & Kang, S. S. A Study on Resistance Welding in Steel Sheets Using a Tailor Welded Blank (1st report) – Evaluation of Upset Weldability and Formability. *Journal of Materials Processing Technology*. vol.101, pp. 186-192, 2000.
- Montgomery. Design and Analysis of Experiments. John Willy and Sons, 3rd Ed., 1991, 649p.
- Nakazima, K., Kikuma, T. & Hasuda, K. Study on the Formability of Steel Sheets. *Yawata Technical Report*. pp. 111-124, 1968.
- Novaski, O. *Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica*. São Paulo. Edgard Blüncher Ltda. 1.^a ed., pp. 66-68 e pp. 87-118, 1994.
- Ozturk, F. & Lee, D. Experimental and Numerical Analysis of Out-of-Plane Formability Test. *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 170, pp. 247-253, 2005.

- Rimkus, W., Bauer, H. & Mihsein, H. J. A. Design of Load-Curves for Hydroforming Applications. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 108, pp. 97-105, 2000.
- Schuler. *Metal Forming Handbook*. Berlin, Springer, 1998.
- Shakeri, H. R., Buste, A., Worswick, M. J., Clarke, J. A., Feng, F., Jain, M. & Finn, M. Study of Damage Initiation and Fracture in Aluminum Tailor Welded Blanks Made Via Different Welding Techniques. *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 22, pp. 95-110, 2002.
- Shulkin, L. B., Posteraro, R. A., Ahmetoglu, M. A., Kinzel, G. L. & Altan, T. Blank Holder Force (BHF) Control in Viscous Pressure Forming (VPF) of Sheet Metal. *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 98, pp. 7-16, 2000.
- Siegert, K., Häussermann, M., Lösch, B. & Rieger, R. Recent Development in Hydroforming Technology. *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 98, pp. 251-258, 2000.
- Srour Junior, E. H. Determinação do Grau de Conformabilidade de Chapa de Aço para Suporte de Coluna de Direção e Identificação de Similar Nacional. *Universidade Federal do Paraná*. Dissertação de Mestrado, 2002.
- Stoughton, T. B. A General Forming Limit Criterion for Sheet Metal Forming. *International Journal of Mechanical Sciences*. vol. 42, pp.1-27, 2000.
- ULSAB. 2005. <http://www.ulsab.org> – consultado em fevereiro de 2005.
- Vogel, J. H. & Lee, D. The Automated Measurement of Strains from Three-Dimensional Deformed Surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*. pp. 8-13, 1990.
- Zampaloni, M., Abedrabbo, N. & Pourboghrat, F. Experimental and Numerical Study of Stamp Hydroforming of Sheet Metals. *International Journal of Mechanical Sciences*. vol. 45, pp. 1815-1845, 2003.
- Zhang, S. H. Developments in Hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 91, pp. 236-244, 1999.

ANEXO A

Valores Obtidos dos Ensaio de Estampabilidade

Tabela 1 – Resultados Obtidos nos Ensaio de Estampabilidade

CP 220x220 (mm)	Alt. Domo (mm)	Força (kN)	Prensa-Chapas (kN)	Observações
1	32,4	47,7	80	Reduzir FPC
2	34,1	46,8	60	Reduzir FPC
3	37,5	49,9	40	Reduzir FPC
4	48,9	56,8	10	Manter FPC
5	48,9	56,5	10	Manter FPC
6	40,0	60,7	10	Aumentar FPC
7	47,3	66,5	20	Reduzir FPC
8	40,8	70,2	15	Analisar

CP 220x175 (mm)	Alt. Domo (mm)	Força (kN)	Prensa-Chapas (kN)	Observações
1	40,8	47,3	105	Manter FPC
2	38,9	64,4	105	Reduzir FPC
3	42,9	71,3	85	Reduzir FPC
4	43,3	68,8	75	Reduzir FPC
5	45,7	70,6	65	Reduzir FPC
6	48,0	72,4	55	Reduzir FPC
7	57,3	82,0	45	Aumentar FPC
8	52,8	80,4	55	Analisar

CP 220x160 (mm)	Alt. Domo (mm)	Força (kN)	Prensa-Chapas (kN)	Observações
1	47,4	86,0	140	Reduzir FPC
2	40,0	88,6	130	Analisar

CP 220x140 (mm)	Alt. Domo (mm)	Força (kN)	Prensa-Chapas (kN)	Observações
1	47,4	86,0	140	Reduzir FPC
2	40,0	88,6	130	Analisar

CP 220x130 (mm)	Alt. Domo (mm)	Força (kN)	Prensa-Chapas (kN)	Observações
1	59,2	84,1	200	Aumentar FPC
2	54,0	78,1	220	Calço danificado
3	51,8	77,0	200	Analisar

CP 220x120 (mm)	Alt. Domo (mm)	Força (kN)	Prensa-Chapas (kN)	Observações
1	60,3	68,2	145	Aumentar FPC
2	56,4	69,3	155	Aumentar FPC
3	53,7	71,9	225	Calço danificado
4	51,9	70,6	200	Analisar

CP 220x110 (mm)	Alt. Domo (mm)	Força (kN)	Prensa-Chapas (kN)	Observações
1	56,3	61,4	155	Manter FPC
2	55,7	64,0	155	Aumentar FPC
3	60,1	71,1	170	Aumentar FPC
4	56,1	67,2	200	Analisar

CP 220x100 (mm)	Alt. Domo (mm)	Força (kN)	Prensa-Chapas (kN)	Observações
1	54,5	58,0	165	Aumentar FPC
2	52,8	58,3	210	Analisar

CP 220x80 (mm)	Alt. Domo (mm)	Força (kN)	Prensa-Chapas (kN)	Observações
1	56,7	48,9	220	Manter FPC
2	54,6	47,9	220	Aumentar FPC
3	58,1	48,1	230	Analisar

CP 220x50 (mm)	Alt. Domo (mm)	Força (kN)	Prensa-Chapas (kN)	Observações
1	60,5	30,7	220	Manter FPC
2	60,0	30,6	220	Aumentar FPC
3	59,2	31,2	230	Analisar

Valores das Deformações Verdadeiras Obtidos pelo Sistema de Leitura Óptica CAMSYS[®] para Determinar a CLC da Matéria-Prima

Tabela 2 – Deformações Ocorridas no “Blank” com a Chapa de 0,90mm de Espessura

CP – 50		CP – 80		CP -100		CP – 110		CP-120	
e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1
-0,4054	0,6623	-0,3277	0,5446	-0,2579	0,3979	-0,2543	0,3789	-0,1262	0,4053
-0,4547	0,6571	-0,3332	0,5420	-0,2525	0,3897	-0,2436	0,3828	-0,1741	0,4184
-0,3907	0,6149	-0,3025	0,5423	-0,2544	0,3945	-0,2391	0,3917	-0,1754	0,4102
-0,4338	0,6439	-0,3478	0,5631	-0,2457	0,3974	-0,2537	0,3785	-0,1280	0,3926
-0,4800	0,6458	-0,3197	0,5538	-0,2306	0,3673	-0,2289	0,3742	-0,1946	0,4024
-0,4720	0,6444	-0,3355	0,5564	-0,1994	0,3655	-0,2735	0,3782	-0,1252	0,3908
-0,4548	0,6538	-0,3260	0,5495	-0,2810	0,3878	-0,2568	0,4353	-0,1516	0,3932
-0,4548	0,6538	-0,3614	0,5560	-0,2362	0,3555	-0,2388	0,4582	-0,1653	0,4208
-0,4548	0,6538	-0,3552	0,5530	-0,2539	0,4355	-0,2475	0,3679	-0,1658	0,3931
-0,4548	0,6538	-0,3874	0,5641	-0,2312	0,3899	-0,2473	0,4506	-0,1016	0,3684
-0,4658	0,6583	-0,3312	0,5500	-	-	-0,2533	0,4396	-0,1117	0,3693
-0,4006	0,6299	-0,3609	0,5587	-	-	-0,2303	0,4384	-	-
-0,3393	0,6046	-0,3613	0,5618	-	-	-	-	-	-
-0,3957	0,6478	-0,3585	0,5210	-	-	-	-	-	-

CP – 130		CP – 140		CP – 160		CP – 175		CP - 220	
e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1
-0,0581	0,4262	-0,0918	0,3526	0,0997	0,4562	0,1485	0,3407	0,1000	0,3888
-0,0657	0,4214	-0,0963	0,3517	0,1090	0,4384	0,1363	0,3501	0,0800	0,3929
-0,0658	0,4259	-0,1134	0,3622	0,0788	0,4397	0,1619	0,3373	0,0580	0,3940
-0,0759	0,4278	-0,0863	0,3670	0,0948	0,4356	0,1578	0,3347	0,0837	0,3861
-0,0971	0,4262	-0,0697	0,3693	0,1019	0,4472	0,1554	0,3298	0,0495	0,3945
-0,0508	0,3682	-0,1179	0,3868	0,1151	0,4593	0,1453	0,3343	0,0810	0,3830
-0,0769	0,3485	-0,1312	0,3858	0,0786	0,4489	0,1828	0,3650	0,0747	0,3870
-0,1097	0,3720	-0,1763	0,3690	0,0986	0,4416	0,1888	0,3556	0,0770	0,4340
-0,0753	0,3474	-0,1360	0,3971	0,0896	0,4413	0,2296	0,3361	0,0712	0,4399
-0,0705	0,3580	-0,1009	0,3418	0,0808	0,4456	0,1937	0,3551	0,0555	0,4463
-	-	-0,1170	0,3515	0,0754	0,4434	0,1866	0,3543	-	-
-	-	-0,1359	0,3520	-	-	0,1882	0,3540	-	-
-	-	-0,1624	0,3572	-	-	0,1689	0,3599	-	-
-	-	-0,1185	0,3472	-	-	0,1891	0,3497	-	-

Tabela 3 – Deformações Ocorridas no “Blank” com a Chapa de 1,50mm de Espessura

CP – 50		CP – 80		CP – 100		CP - 110	
e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1
-0,5293	0,8297	-0,3813	0,6702	-0,1945	0,3991	-0,1325	0,3308
-0,5372	0,8415	-0,4060	0,6647	-0,1631	0,3992	-0,1737	0,3353
-0,5142	0,8290	-0,3999	0,6626	-0,1640	0,4069	-0,2319	0,3599
-0,5783	0,8815	-0,3951	0,6585	-0,1618	0,3869	-0,1792	0,3608
-0,5805	0,8800	-0,3791	0,6340	-0,1556	0,3944	-0,2186	0,3774
-0,4366	0,7974	-0,3946	0,6293	-0,1767	0,4145	-0,1969	0,3609
-0,4829	0,7999	-0,2990	0,5960	-0,1998	0,4290	-0,1513	0,3569
-0,4889	0,7972	-0,2957	0,5941	-0,2145	0,4253	-0,1757	0,3536
-0,4545	0,7905	-0,3278	0,6287	-0,1802	0,4116	-0,1056	0,3465
-0,4795	0,7807	-0,3369	0,6156	-0,2010	0,3890	-0,1536	0,3380
-	-	-	-	-0,2549	0,4100	-0,1517	0,3513
-	-	-	-	-0,1716	0,3756	-0,1146	0,3374

CP – 120		CP – 130		CP – 140		CP -160	
e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1
-0,2935	0,3830	-0,3296	0,4014	-0,1879	0,4256	-0,0204	0,4847
-0,2926	0,4126	-0,3183	0,3895	-0,1968	0,3882	0,0262	0,4697
-0,2558	0,3970	-0,3439	0,3976	-0,1730	0,3754	0,0015	0,4859
-0,2936	0,4036	-0,3694	0,3978	-0,2339	0,4081	0,0061	0,4837
-0,2614	0,3783	-0,3973	0,3872	-0,2101	0,3996	0,0247	0,4825
-0,3136	0,4549	-0,3913	0,3926	-0,2003	0,3961	0,0147	0,4848
-0,2752	0,4004	-0,3928	0,3894	-0,1597	0,3649	0,0054	0,4676
-0,2716	0,4322	-0,3394	0,3785	-0,1457	0,3876	0,0106	0,4704
-0,2437	0,4326	-0,3313	0,3244	-0,1393	0,3627	0,0507	0,4576
-0,2943	0,4467	-0,3066	0,3385	-0,1446	0,3727	0,0362	0,4615
-0,2598	0,4056	-0,3870	0,3156	-0,1485	0,3612	0,0394	0,4616
-0,2812	0,4280	-	-	-	-	-	-
-0,2547	0,4745	-	-	-	-	-	-
-0,2571	0,4651	-	-	-	-	-	-

Tabela 4 – Deformações Severas Ocorridas no “Blank” com a Chapa de 0,90mm de Espessura

CP – 50		CP – 80		CP -100		CP – 110		CP-120	
e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1
-0,4800	0,6458	-0,3614	0,5560	-0,2539	0,4355	-0,2568	0,4353	-0,1741	0,4184
-0,4720	0,6444	-0,3874	0,5641	-	-	-0,2533	0,4396	-0,1754	0,4102
-0,4548	0,6538	-0,3609	0,5587	-	-	-0,2303	0,4384	-0,1946	0,4024
-0,4658	0,6583	-0,3613	0,5618	-	-	-	-	-0,1653	0,4208
-	-	-	-	-	-	-	-	-0,1658	0,3931

CP – 130		CP – 140		CP – 160		CP – 175		CP - 220	
e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1
-0,0759	0,4278	-0,1312	0,3858	0,0997	0,4562	0,1828	0,3650	0,0770	0,4340
-0,0971	0,4262	-0,1360	0,3971	0,1090	0,4384	-	-	0,0712	0,4399
-	-	-	-	0,1019	0,4472	-	-	0,1000	0,3888
-	-	-	-	0,1151	0,4593	-	-	0,0800	0,3861
-	-	-	-	0,0986	0,4416	-	-	0,0837	0,3861

Tabela 5 – Deformações Severas Ocorridas no “Blank” com a Chapa de 1,50mm de Espessura

CP – 50		CP – 80		CP – 100		CP - 110	
e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1
-0,5783	0,8815	-0,4060	0,6647	-0,1945	0,3991	-	-
-0,5805	0,8800	-0,3999	0,6626	-0,1998	0,4290	-	-
-	-	-0,3951	0,6585	-0,2145	0,4253	-	-
-	-	-0,3946	0,6293	-0,2010	0,3890	-	-
-	-	-	-	-0,2549	0,4100	-	-

CP – 120		CP – 130		CP – 140		CP -160	
e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1
-0,2716	0,4322	-	-	-0,2339	0,4081	0,0147	0,4848
-0,2812	0,4280	-	-	-0,2101	0,3996	0,0262	0,4697
-0,2943	0,4467	-	-	-0,2003	0,3961	0,0247	0,4825
-0,3136	0,4549	-	-	-	-	0,0507	0,4576
-	-	-	-	-	-	0,0362	0,4615
-	-	-	-	-	-	0,0394	0,4616

ANEXO B

Valores das Deformações Verdadeiras Obtidos pelas Medições Realizadas com o Paquímetro Digital para Determinar a CLC da Matéria-Prima

Para garantir confiabilidade nas medições com paquímetro, as medidas foram realizadas em três ciclos de medições nas elipses selecionadas e demarcadas, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Deformações Medidas com o Paquímetro Digital na Chapa de 0,90mm de Espessura
para Determinar a CLC da Matéria-Prima

1. Corpo-de-prova com 50mm de largura.

CP 50	Primeira Medição (mm)				Segunda Medição (mm)				Terceira Medição (mm)			
Elipse	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2
01	4,87	1,65	0,675	-0,407	4,94	1,63	0,689	-0,420	4,87	1,65	0,675	-0,407
02	4,97	1,61	0,695	-0,432	5,00	1,68	0,701	-0,389	4,97	1,61	0,695	-0,432
03	4,95	1,63	0,691	-0,420	4,96	1,59	0,693	-0,444	4,95	1,63	0,691	-0,420

2. Corpo-de-prova com 80mm de largura.

CP 80	Primeira Medição (mm)				Segunda Medição (mm)				Terceira Medição (mm)			
Elipse	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2
01	4,52	1,84	0,600	-0,298	4,56	1,80	0,609	-0,320	4,55	1,91	0,607	-0,261
02	4,52	1,96	0,600	-0,235	4,54	1,88	0,605	-0,277	4,53	1,88	0,602	-0,277
03	4,52	1,83	0,600	-0,304	4,58	1,88	0,613	-0,277	4,58	1,96	0,613	-0,235

3. Corpo-de-prova com 100mm de largura.

CP 100	Primeira Medição (mm)				Segunda Medição (mm)				Terceira Medição (mm)			
Elipse	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2
01	3,82	2,03	0,432	-0,200	3,90	2,03	0,453	-0,200	3,89	1,99	0,450	-0,222
02	3,89	1,97	0,450	-0,230	3,91	2,00	0,455	-0,215	3,94	2,06	0,463	-0,185
03	3,90	2,02	0,453	-0,205	3,86	1,97	0,442	-0,230	3,90	2,02	0,453	-0,205

4. Corpo-de-prova com 110mm de largura.

CP 110	Primeira Medição (mm)				Segunda Medição (mm)				Terceira Medição (mm)			
Elipse	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2
01	3,71	1,99	0,403	-0,220	3,80	2,00	0,427	-0,215	3,77	1,96	0,419	-0,235
02	3,74	2,00	0,411	-0,215	3,77	1,95	0,419	-0,240	3,77	1,96	0,419	-0,235
03	3,82	1,95	0,432	-0,240	3,85	1,97	0,440	-0,230	3,77	1,99	0,419	-0,220

5. Corpo-de-prova com 120mm de largura.

CP 120	Primeira Medição (mm)				Segunda Medição (mm)				Terceira Medição (mm)			
Elipse	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2
01	3,72	2,06	0,405	-0,185	3,74	2,06	0,411	-0,185	3,73	2,11	0,408	-0,161
02	3,71	2,12	0,403	-0,157	3,73	2,04	0,408	-0,195	3,75	2,10	0,413	-0,166
03	3,71	2,06	0,403	-0,185	3,72	2,05	0,405	-0,190	3,72	2,08	0,405	-0,176

6. Corpo-de-prova com 130mm de largura.

CP 130	Primeira Medição (mm)				Segunda Medição (mm)				Terceira Medição (mm)			
Elipse	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2
01	3,74	2,28	0,411	-0,084	3,70	2,25	0,400	-0,097	3,74	2,27	0,410	-0,088
02	3,63	2,25	0,381	-0,097	3,63	2,30	0,381	-0,075	3,68	2,30	0,395	-0,075
03	3,75	2,25	0,413	-0,097	3,73	2,30	0,408	-0,075	3,77	2,27	0,419	-0,088

7. Corpo-de-prova com 140mm de largura

CP 140	Primeira Medição (mm)				Segunda Medição (mm)				Terceira Medição (mm)			
Elipse	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2
01	3,53	2,27	0,353	-0,088	3,56	2,22	0,361	-0,110	3,55	2,28	0,359	-0,084
02	3,65	2,21	0,386	-0,115	3,65	2,29	0,386	-0,080	3,65	2,20	0,386	-0,120
03	3,53	2,23	0,353	-0,106	3,63	2,28	0,381	-0,084	3,58	2,25	0,367	-0,097

8. Corpo-de-prova com 160mm de largura.

CP 160	Primeira Medição (mm)				Segunda Medição (mm)				Terceira Medição (mm)			
Elipse	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2
01	3,69	2,87	0,397	0,146	3,73	2,89	0,408	0,153	3,70	2,85	0,400	0,139
02	3,73	2,92	0,408	0,163	3,73	2,85	0,408	0,140	3,69	2,89	0,397	0,153
03	3,77	2,89	0,419	0,153	3,75	2,89	0,413	0,153	3,73	2,90	0,408	0,156

9. Corpo-de-prova com 175mm de largura.

CP 175	Primeira Medição (mm)				Segunda Medição (mm)				Terceira Medição (mm)			
Elipse	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2
01	3,87	2,83	0,445	0,132	3,86	2,83	0,442	0,132	3,84	2,83	0,437	0,132
02	3,88	2,86	0,447	0,142	3,88	2,89	0,447	0,153	3,86	2,88	0,442	0,149

10. Corpo-de-prova com 220mm de largura.

CP 220	Primeira Medição (mm)				Segunda Medição (mm)				Terceira Medição (mm)			
Elipse	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2	Ø1	Ø2	e_1	e_2
01	3,91	2,67	0,455	0,074	3,93	2,68	0,460	0,077	3,93	2,65	0,460	0,066
02	3,92	2,67	0,458	0,074	3,91	2,68	0,455	0,077	3,91	2,65	0,455	0,066

Valores das Deformações Verdadeiras Obtidos pelas Medições Realizadas com o Paquímetro Digital para Determinar as FMDs nos Corpos-de-Prova

As medições das Frentes Máximas de Deformação foram realizadas de maneira semelhante às medições efetuadas para determinar o Limite de Conformação do Material. O estiramento foi medido no centro da peça na região plana do cone, próximo à linha de solda e o repuxo profundo foi verificado nas circunferências mais deformadas na lateral da peça.

Todas as medições foram realizadas em três ciclos completos, envolvendo as elipses selecionadas e demarcadas, com o intuito de determinar a dispersão nas medições.

A Tabela 2 apresenta as medições das deformações ocorridas nas peças descritas com os corpos-de-prova com raio igual a 13,5mm, produzidos pelo método da estampagem convencional.

Tabela 2 - Deformações Verdadeiras das Peças Produzidas pelo Método da Estampagem Convencional com o Raio igual a 13,5mm

Corpo de Prova 2C1 - Estiramento					Corpo de Prova 2C1 - Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,64	2,66	0,384	0,070	01	3,48	2,11	0,339	-0,161
02	3,66	2,66	0,389	0,070	02	3,51	2,08	0,347	-0,176
-	-	-	-	-	03	2,89	2,31	0,153	-0,071
-	-	-	-	-	04	3,33	1,94	0,295	-0,245

Corpo de Prova 2C1 - Estiramento					Corpo de Prova 2C1 - Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,60	2,64	0,373	0,062	01	3,41	2,12	0,318	-0,157
02	3,68	2,64	0,395	0,062	02	3,48	2,10	0,339	-0,166
-	-	-	-	-	03	2,80	2,31	0,121	-0,071
-	-	-	-	-	04	3,34	1,89	0,298	-0,272

Corpo de Prova 2C1 - Estiramento					Corpo de Prova 2C1 - Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,66	2,66	0,389	0,070	01	3,49	2,07	0,342	-0,181
02	3,66	2,64	0,389	0,062	02	3,45	2,07	0,330	-0,181
-	-	-	-	-	03	2,93	2,28	0,167	-0,084
-	-	-	-	-	04	3,30	1,91	0,286	-0,261

Corpo de Prova 5C1 - Estiramento					Corpo de Prova 5C1 - Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,73	2,62	0,408	0,055	01	3,56	2,07	0,361	-0,181
02	3,69	2,74	0,397	0,099	02	3,41	2,02	0,318	-0,205
-	-	-	-	-	03	3,03	2,42	0,200	-0,024
-	-	-	-	-	04	3,10	2,20	0,223	-0,119
-	-	-	-	-	05	3,17	2,11	0,245	-0,161

Corpo de Prova 5C1 - Estiramento					Corpo de Prova 5C1 - Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,71	2,65	0,403	0,066	01	3,50	2,05	0,344	-0,190
02	3,69	2,71	0,397	0,089	02	3,44	1,93	0,327	-0,251
-	-	-	-	-	03	3,00	2,47	0,190	-0,004
-	-	-	-	-	04	3,11	2,21	0,226	-0,115
-	-	-	-	-	05	3,20	2,15	0,255	-0,143

Corpo de Prova 5C1 - Estiramento					Corpo de Prova 5C1 - Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,75	2,64	0,413	0,062	01	3,54	2,02	0,356	-0,205
02	3,71	2,77	0,403	0,110	02	3,43	2,03	0,324	-0,200
-	-	-	-	-	03	3,10	2,43	0,223	-0,020
-	-	-	-	-	04	3,16	2,25	0,242	-0,097
-	-	-	-	-	05	3,18	2,10	0,249	-0,166

Corpo de Prova 6C1 - Estiramento					Corpo de Prova 6C1 - Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,80	2,77	0,427	0,110	01	3,57	2,22	0,364	-0,111
02	3,75	2,76	0,413	0,107	02	3,57	2,08	0,364	-0,176
-	-	-	-	-	03	3,58	2,42	0,367	-0,024
-	-	-	-	-	04	3,20	2,25	0,255	-0,097

Corpo de Prova 6C1 - Estiramento					Corpo de Prova 6C1 - Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,72	2,74	0,405	0,099	01	3,52	2,25	0,350	-0,097
02	3,75	2,78	0,413	0,114	02	3,54	2,11	0,356	-0,161
-	-	-	-	-	03	3,52	2,45	0,350	-0,012
-	-	-	-	-	04	3,21	2,26	0,258	-0,093

Corpo de Prova 6C1 - Estiramento					Corpo de Prova 6C1 - Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,75	2,75	0,413	0,103	01	3,57	2,21	0,364	-0,115
02	3,71	2,78	0,403	0,114	02	3,58	2,12	0,367	-0,157
-	-	-	-	-	03	3,56	2,41	0,361	-0,029
-	-	-	-	-	04	3,22	2,20	0,261	-0,120

Corpo de Prova 7C1 - Estiramento					Corpo de Prova 7C1 - Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,80	2,78	0,426	0,114	01	3,51	2,11	0,347	-0,161
-	-	-	-	-	02	3,41	2,26	0,318	-0,093
-	-	-	-	-	03	3,54	2,20	0,356	-0,120
-	-	-	-	-	04	3,58	2,15	0,367	-0,143

Corpo de Prova 7C1 - Estiramento					Corpo de Prova 7C1 - Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,76	2,72	0,416	0,092	01	3,55	2,09	0,359	-0,171
-	-	-	-	-	02	3,48	2,21	0,339	-0,115
-	-	-	-	-	03	3,51	2,23	0,347	-0,106
-	-	-	-	-	04	3,52	2,14	0,350	-0,147

Corpo de Prova 7C1 - Estiramento					Corpo de Prova 7C1 - Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,82	2,73	0,432	0,096	01	3,51	2,12	0,347	-0,157
-	-	-	-	-	02	3,43	2,20	0,324	-0,120
-	-	-	-	-	03	3,55	2,20	0,359	-0,120
-	-	-	-	-	04	3,59	2,18	0,370	-0,129

Tabela 3 - Deformações Verdadeiras das Peças Produzidas pelo Método da Estampagem
Convencional com o Raio igual a 5mm

Corpo de Prova 3C - Estiramento					Corpo de Prova 3C - Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,95	2,61	0,465	0,051	01	3,54	2,00	0,356	-0,215
02	3,99	2,69	0,475	0,081	02	3,47	2,02	0,336	-0,205
03	3,73	2,70	0,408	0,085	03	3,57	2,19	0,364	-0,124
-	-	-	-	-	04	3,42	2,13	0,321	-0,152
-	-	-	-	-	05	3,21	2,43	0,258	-0,020

Corpo de Prova 3C - Estiramento					Corpo de Prova 3C - Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,90	2,60	0,453	0,047	01	3,52	2,08	0,350	-0,176
02	3,95	2,63	0,465	0,059	02	3,50	2,03	0,344	-0,200
03	3,78	2,72	0,421	0,092	03	3,57	2,14	0,364	-0,147
-	-	-	-	-	04	3,43	2,17	0,324	-0,133
-	-	-	-	-	05	3,25	2,48	0,270	0

Corpo de Prova 3C - Estiramento					Corpo de Prova 3C - Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,95	2,65	0,465	0,066	01	3,50	2,10	0,344	-0,166
02	3,97	2,65	0,470	0,066	02	3,45	2,06	0,330	-0,185
03	3,74	2,75	0,411	0,103	03	3,55	2,15	0,359	-0,143
-	-	-	-	-	04	3,45	2,16	0,330	-0,138
-	-	-	-	-	05	3,21	2,47	0,258	-0,004

Corpo de Prova 8C - Estiramento					Corpo de Prova 8C Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,92	2,63	0,458	0,059	01	3,30	2,16	0,286	-0,138
01	3,85	2,68	0,440	0,077	02	3,17	2,14	0,245	-0,147
-	-	-	-	-	03	3,30	2,34	0,286	-0,058
-	-	-	-	-	04	3,25	2,34	0,270	-0,058

Corpo de Prova 8C - Estiramento					Corpo de Prova 8C Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,89	2,65	0,450	0,066	01	3,27	2,14	0,276	-0,147
01	3,92	2,67	0,458	0,074	02	3,18	2,14	0,249	-0,147
-	-	-	-	-	03	3,33	2,30	0,286	-0,075
-	-	-	-	-	04	3,27	2,35	0,276	-0,054

Corpo de Prova 8C - Estiramento					Corpo de Prova 8C Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,94	2,65	0,463	0,066	01	3,25	2,18	0,270	-0,129
01	3,89	2,61	0,450	0,051	02	3,20	2,17	0,255	-0,133
-	-	-	-	-	03	3,31	2,27	0,287	-0,088
-	-	-	-	-	04	3,22	2,30	0,261	-0,075

Corpo de Prova 9C - Estiramento					Corpo de Prova 9C Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,79	2,65	0,424	0,066	01	3,33	2,06	0,295	-0,185
-	-	-	-	-	02	3,00	2,22	0,190	-0,111
-	-	-	-	-	03	3,30	2,07	0,286	-0,181

Corpo de Prova 9C - Estiramento					Corpo de Prova 9C Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,75	2,63	0,413	0,059	01	3,29	2,02	0,283	-0,205
-	-	-	-	-	02	3,09	2,23	0,220	-0,106
-	-	-	-	-	03	3,31	2,07	0,289	-0,181

Corpo de Prova 9C - Estiramento					Corpo de Prova 9C Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,78	2,60	0,421	0,047	01	3,25	2,10	0,270	-0,166
-	-	-	-	-	02	3,04	2,18	0,203	-0,129
-	-	-	-	-	03	3,28	2,11	0,279	-0,161

Corpo de Prova 14C - Estiramento					Corpo de Prova 14C Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,94	2,61	0,462	0,051	01	3,10	2,04	0,223	-0,195
-	-	-	-	-	02	2,98	2,17	0,184	-0,133
-	-	-	-	-	03	3,07	2,15	0,213	-0,143
-	-	-	-	-	04	3,12	2,20	0,230	-0,120

Corpo de Prova 14C - Estiramento					Corpo de Prova 14C Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,95	2,57	0,465	0,036	01	3,08	2,09	0,217	-0,171
-	-	-	-	-	02	2,98	2,10	0,184	-0,166
-	-	-	-	-	03	3,11	2,17	0,226	-0,133
-	-	-	-	-	04	3,07	2,20	0,213	-0,120

Corpo de Prova 14C - Estiramento					Corpo de Prova 14C Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,99	2,58	0,475	0,039	01	3,12	2,08	0,229	-0,176
-	-	-	-	-	02	2,95	2,15	0,173	-0,143
-	-	-	-	-	03	3,10	2,13	0,223	-0,152
-	-	-	-	-	04	3,15	2,15	0,239	-0,143

Corpo de Prova A - Estiramento					Corpo de Prova A Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,89	2,67	0,450	0,074	01	2,97	2,29	0,180	-0,079
-	-	-	-	-	02	3,17	2,16	0,245	-0,138
-	-	-	-	-	03	2,97	2,26	0,180	-0,093

Corpo de Prova A - Estiramento					Corpo de Prova A Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,81	2,67	0,429	0,074	01	2,96	2,20	0,177	-0,120
-	-	-	-	-	02	3,11	2,14	0,226	-0,147
-	-	-	-	-	03	2,99	2,23	0,187	-0,106

Corpo de Prova A - Estiramento					Corpo de Prova A Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,85	2,63	0,440	0,059	01	2,92	2,25	0,163	-0,097
-	-	-	-	-	02	3,18	2,18	0,249	-0,129
-	-	-	-	-	03	2,94	2,21	0,170	-0,115

Tabela 4 - Deformações Verdadeiras das Peças Produzidas pelo Método da Hidroconformação

Corpo de Prova 3H - Estiramento					Corpo de Prova 3H Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,25	2,61	0,270	0,051	01	3,00	2,21	0,190	-0,115
02	3,25	2,73	0,270	0,096	02	3,11	2,25	0,226	-0,097
03	3,26	2,72	0,273	0,092	-	-	-	-	-

Corpo de Prova 3H - Estiramento					Corpo de Prova 3H Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,24	2,65	0,267	0,066	01	3,05	2,18	0,207	-0,129
02	3,25	2,70	0,270	0,085	02	3,12	2,23	0,229	-0,106
03	3,28	2,73	0,279	0,096	-	-	-	-	-

Corpo de Prova 3H - Estiramento					Corpo de Prova 3H Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,22	2,63	0,261	0,059	01	3,02	2,20	0,197	-0,120
02	3,23	2,72	0,264	0,092	02	3,08	2,24	0,217	-0,102
03	3,26	2,72	0,273	0,092	-	-	-	-	-

Corpo de Prova 7H - Estiramento					Corpo de Prova 7H Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,44	2,73	0,327	0,096	01	3,29	2,11	0,273	-0,161
02	3,44	2,78	0,327	0,114	02	3,07	2,21	0,213	-0,115
03	3,33	2,68	0,295	0,077	03	3,01	2,25	0,194	-0,097

Corpo de Prova 7H - Estiramento					Corpo de Prova 7H Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,40	2,75	0,315	0,103	01	3,30	2,13	0,285	-0,152
02	3,46	2,75	0,333	0,103	02	3,05	2,17	0,207	-0,133
03	3,35	2,63	0,301	0,059	03	3,05	2,27	0,207	-0,088

Corpo de Prova 7H - Estiramento					Corpo de Prova 7H Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,43	2,71	0,324	0,089	01	3,33	2,16	0,295	-0,138
02	3,41	2,75	0,318	0,103	02	3,09	2,20	0,220	-0,120
03	3,32	2,64	0,292	0,062	03	3,04	2,28	0,203	-0,084

Corpo de Prova 8H - Estiramento					Corpo de Prova 8H Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,43	2,81	0,324	0,125	01	3,03	2,10	0,200	-0,166
02	3,56	2,56	0,361	0,032	02	3,14	2,30	0,236	-0,075
03	3,56	2,62	0,361	0,055	03	3,11	2,27	0,226	-0,088
-	-	-	-	-	04	3,01	2,16	0,194	-0,138

Corpo de Prova 8H - Estiramento					Corpo de Prova 8H Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,45	2,77	0,330	0,110	01	3,05	2,12	0,207	-0,157
02	3,53	2,50	0,353	0,010	02	3,10	2,27	0,223	-0,088
03	3,55	2,59	0,359	0,043	03	3,10	2,22	0,223	-0,111
-	-	-	-	-	04	3,03	2,15	0,200	-0,143

Corpo de Prova 8H - Estiramento					Corpo de Prova 8H Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,48	2,82	0,339	0,128	01	3,07	2,10	0,213	-0,166
02	3,51	2,55	0,347	0,028	02	3,16	2,29	0,242	-0,080
03	3,52	2,60	0,350	0,047	03	3,14	2,29	0,236	-0,080
-	-	-	-	-	04	3,07	2,12	0,213	-0,157

Corpo de Prova 12H - Estiramento					Corpo de Prova 12H Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,40	2,68	0,315	0,077	01	3,23	2,13	0,264	-0,152
02	3,47	2,61	0,336	0,051	02	3,16	2,25	0,242	-0,097
-	-	-	-	-	03	2,85	2,14	0,139	-0,147

Corpo de Prova 12H - Estiramento					Corpo de Prova 12H Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,43	2,65	0,324	0,066	01	3,20	2,10	0,255	-0,166
02	3,50	2,62	0,344	0,055	02	3,18	2,23	0,249	-0,106
-	-	-	-	-	03	2,83	2,12	0,132	-0,157

Corpo de Prova 12H - Estiramento					Corpo de Prova 12H Estampagem Profunda				
Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2	Elipse	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	e_1	e_2
01	3,47	2,63	0,336	0,059	01	3,21	2,16	0,258	-0,138
02	3,52	2,61	0,350	0,051	02	3,22	2,27	0,261	-0,088
-	-	-	-	-	03	2,87	2,15	0,146	-0,143

ANEXO C

Análise da Significância da Variação de Espessuras

Para verificar se variação de espessura é realmente significativa na comparação dos produtos ensaiados pelos métodos da estampagem convencional e hidroconformação, foi empregado o teste estatístico – Planejamento Aleatorizado por Blocos (Análise de Comparação por Pares), segundo Montgomery, (1991).

	CPs - Conformação Convencional						CPs - Hidroconformação				
Pos,	1C1	2C1	3C1	5C1	6C1	7C1	3H	7H	8H	12H	yi.
01	0,610	0,582	0,563	0,620	0,589	0,588	0,688	0,600	0,619	0,649	6,108
02	0,582	0,602	0,582	0,609	0,584	0,567	0,682	0,576	0,606	0,631	6,021
03	0,580	0,635	0,614	0,613	0,620	0,595	0,654	0,556	0,579	0,554	6,000
04	0,650	0,717	0,639	0,716	0,701	0,628	0,719	0,632	0,698	0,701	6,801
05	0,709	0,771	0,618	0,792	0,788	0,669	0,817	0,792	0,780	0,765	7,501
06	0,660	0,742	0,635	0,837	0,789	0,703	0,777	0,790	0,724	0,721	7,378
07	0,690	0,793	0,695	0,881	0,800	0,733	0,776	0,791	0,762	0,691	7,612
08	0,754	0,800	0,728	0,895	0,839	0,782	--	0,853	0,837	0,824	7,312
09	0,751	0,845	0,719	0,942	0,893	0,825	0,925	0,879	0,895	0,819	8,493
10	0,802	0,947	0,890	0,930	0,881	0,788	0,950	0,921	0,942	0,900	8,951
y.j	6,788	7,434	6,683	7,835	7,484	6,878	6,988	7,39	7,442	7,225	y..=72,17

Número de amostras – $N = a \times b$

$N = 10 \times 10 = 100$ amostras

$$SS_T = (\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2) - (y_{..}^2 / N)$$

$$SS_T = 53,86026 - 52,0952 = 1,7674$$

yi.	yi. ²
6,108	37,30766
6,021	36,25244
6,000	36,00000
6,801	46,25360
7,501	56,26500
7,378	54,43488
7,612	57,94254
7,312	53,46534
8,493	72,13105
8,951	80,12040
$\sum y_i^2$	530,1729

$$SS_{\text{TRAT}} = 1 / b (S^a_{i=1} S^{n1}_{j=1} y_{i,j}^2) - (y_{..}^2 / N)$$

$$SS_{\text{TRAT}} = 53,01729 - 52,0952 = 0,92209$$

y.j	y.j ²
6,788	46,07694
7,434	55,26436
6,683	44,66249
7,835	61,38723
7,484	56,01026
6,878	47,30688
6,988	48,83214
7,39	54,6121
7,442	55,38336
7,255	52,63503
S y.j²	522,1708

$$SS_{\text{BLOCOS}} = 1 / a (S^a_{i=1} S^{n1}_{j=1} y_{i,j}^2) - (y_{..}^2 / N)$$

$$SS_{\text{BLOCOS}} = 52,21708 - 52,0952 = 0,12188$$

$$SS_T = 1,7674$$

$$SS_{\text{TRAT}} = 0,92209$$

$$SS_{\text{BLOCOS}} = 0,12188$$

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{TRAT}} - SS_{\text{BLOCOS}} = 1,7674 - 0,92209 - 0,12188 = 0,72343$$

$$F_{0\text{TRAT}} = \frac{SS_{\text{TRAT}} / (a - 1)}{SS_E / [(a - 1)(b - 1)]} = \frac{0,92209 / (10 - 1)}{0,72343 / [(10 - 1)(10 - 1)]} = 11,47$$

$$F_{0\text{BLOCOS}} = \frac{SS_{\text{BLOCOS}} / (b - 1)}{SS_E / [(a - 1)(b - 1)]} = \frac{0,12188 / (10 - 1)}{0,72343 / [(10 - 1)(10 - 1)]} = 1,516$$

$$P\text{-value} \sim 0$$

ANEXO D

Cálculo da Força de Corte

Determinação da Força de Corte do Produto Após o Processo de Conformação
(Mesquita, *et al.*, 1997)

1. Expressão da Força de Corte:

$$F_c = e \cdot p \cdot k_c$$

onde:

F_c – Força de Corte (N);

e – Espessura da Chapa (m);

k_c – Pressão Específica de Corte (MPa).

2. Determinação da Pressão Específica de Corte (k_c) do Material Utilizado para Compor os “Blanks”:

$$k_c = 80\% \text{ LR}$$

$$k_c = 80\% \text{ 340}$$

$$k_c = 272.000.000\text{Pa}$$

3. Descrição do “Blank” de “Tailored Welded Blank”

?? Diâmetro Externo do Disco: 153mm (0,153m);

?? Perímetro Externo do Disco: 480,66mm (0,48066m);

?? Diâmetro do Furo Central: 13mm (0,013m);

?? Perímetro do Furo Central: 40,84mm (0,04084m);

?? Espessura da Chapa Mais Fina do “Blank”: 0,90mm (0,0009m);

?? Espessura da Chapa Mais Grossa do “Blank”: 1,50mm (0,0015m).

4. Cálculo da Força de Corte para a Espessura de 0,90mm

$$F_c = \frac{0,0009 \times 0,048066 \times 272.000.000}{2} = 59\text{kN}$$

5. Cálculo da Força de Corte para a Espessura de 1,50mm

$$F_c = \frac{0,0015 \times 0,48066 \times 272.000.000}{2} = 98\text{kN}$$

6. Cálculo da Força de Corte do Furo Central

$$F_c = 0,0015 \times 0,04084 \times 272.000.000 = 17\text{kN}$$

7. Cálculo da Força de Corte Total

$$F_c = 59 + 98 = 157\text{kN}$$

Observação: Para a realização do cálculo da força de corte total não foi necessária a adição da força de corte determinada para o furo central, porque as etapas de corte e furação no processo de estampagem não aconteceram simultaneamente.