

GILBERTO JOSÉ RIBEIRO DA SILVA

CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO
DE CHAPAS UTILIZANDO UM FLUIDO NA SUBSTITUIÇÃO DAS
FORMAS DA MATRIZ: HIDROCONFORMAÇÃO

**Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas
Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, para
obtenção do título de Mestre em Processos Industriais.**

**Área de concentração: Desenvolvimento e Otimização de
Processos Industriais.**

Orientador: Dr. Efraim Cekinski

São Paulo

06/2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

“O mais belo e nobre de todos os labores humanos é o de sementeiro, em qualquer de suas aplicações que suponha utilidade para seus semelhantes”A. L. Casillas.

Dedico este trabalho aos meus pais José e Maria José, a minha esposa Cacilda e ao meu filho Gilberto.

Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus.

Ao Professor Efraim Cekinski, pela orientação.

A empresa Colnaghi Indústria Mecânica Ltda por ceder os equipamentos necessários para a realização dos experimentos, aos funcionários Lucio Modesto, João e Edson.

Ao amigo Odair pela contribuição dada, sem a qual seria impossível a realização deste trabalho.

Ao amigo Roberto Roveri pelos conselhos dados, que foram muito importantes para minha vida profissional.

A empresa Indústria Metalúrgica Ramalho Ltda, em especial ao Enio Ramalho.

A Thalita Marques Nunes, Nadine Marques Nunes e Leonardo Marques Nunes pela ajuda no decorrer deste trabalho.

Aos colegas de trabalho Pedro Donizeti Ferrari, Marco Aurélio, André Mariano, Fabio Eduardo Fassi, Jéferson Oliveira Massareli, Otacílio Manoel Inocêncio, Marcelo Tonet, Carlos Roberto Brusco, Reginaldo Passareli, Herivelto Oliveira Cruz, Leandro Lopes, Eduardo Cicote, Amauri Baccarini, Robson Santana Martins, Janderson Filgueira Dias, José Roberto Parezani, Marcelo Jacyntho, Dalmir Bovi e em especial ao Emerson Dias pela ajuda na parte de simulação.

Aos demais colegas de trabalho que não foram citados diretamente.

Às funcionárias do IPT Lívia, Mary e Éster, pela eficiência na resolução de questões burocráticas.

RESUMO

O processo de conformação de chapas é utilizado há décadas, talvez séculos, e não se prevê final para evolução e utilização deste processo.

Definir os *blanks*, estimar efeitos como enrugamentos localizados, possíveis pontos de fissuramento e outros fenômenos relacionados a conformação, evoluiu bastante com o auxílio das modernas ferramentas de computação dedicadas ao tema. O que prevalecia até há pouco tempo, era a experiência do ferramenteiro, naturalmente com alguma consistência, já que o mercado está repleto de profissionais com longos anos dedicados ao assunto. Hoje, este método ainda prevalece; contudo, o profissional da área quando inicia este trabalho já o faz com alguns parâmetros iniciais.

O processo de conformação de chapas metálicas, sem dúvida, é um dos processos mais importantes dentro de uma indústria automobilística, o que é facilmente perceptível através da simples observação de automóveis em circulação, pois os formatos dos produtos estão bem próximos dos esperados nas fases de projeto. Vale ressaltar que, isto só é possível se todas as variáveis do processo estiverem conforme as especificações prévias de projeto. Atualmente, as empresas vêm buscando métodos para que seus produtos sejam cada vez melhores, com tempo de produção e custos reduzidos. Um recurso útil para se alcançar estas expectativas é um estudo de novos processos.

Em vista disso, este trabalho apresenta um dos mais novos conceitos relativos a conformação de chapas metálicas, utilizando a hidroconformação, analisada através dos métodos de elementos finitos e diagrama de limites de conformação. O objetivo principal deste trabalho é mostrar ser possível conformar chapas, utilizando-se um fluido na substituição das formas da matriz, dispondo de uma metodologia de avaliação e otimização para o processo de estampagem. Busca-se uma contribuição para a redução de custos em aplicações industriais com a utilização desta metodologia.

Palavras-chave: Conformação de chapas metálicas, Hidroconformação, Método dos Elementos Finitos, Diagramas de Limite de Conformação, Estricção, Fluido na Substituição da Matriz.

ABSTRACT

Contribution to the study of Process development for sheet metal forming using a fluid as a replacement for dies.

The process of conformation has been used for decades, maybe centuries, and the end of the evolution and the usage of this process seems unpredictable.

Defining the blanks, estimating effects such as localized wrinkles, possible fissure points and other related phenomena the conformation, have evolved a lot thanks to the modern computerized tools developed for these purposes. Some time ago it was believed in what can be called “the toolman experience”, which we may consider somehow consistent since there are many professionals in the market who have dedicated many years of their lives to the matter. Nowadays, the so called “guessing method” still prevails, however the professional working in this area begins his work with some initial parameters.

The process of sheet metal formation is undoubtedly one of the most important processes in an automobile industry. It can be easily seen through the mere observation of automobiles on the streets due to the fact that the shapes of the products are similar to the ones expected in the project stage. It is noteworthy to highlight that the aforementioned characteristics can only be detected if all the variables of the process follow the previous specifications of the project. Currently the companies have been searching for methods in order to make their products even better, aiming also at both cost and time reduction. A useful resource so as to meet the expectations is the study of new techniques and processes.

Bearing this in mind, this work presents one of the latest concepts in relation to the formation of sheet metal using hydroforming, analyzed through finite element methods and conformation limits diagram. The main objective of this work is to show the possibility of conforming sheets applying a fluid in the replacement for dies, having an evaluative methodology and optimization for the imprinting process. Hopefully there will be a contribution to the cost reduction in industrial application by means of the use of this methodology.

Keywords: *conformation of sheet metal, hydroforming, finite element method, conformation limits diagram, fluid as a replacement for dies.*

Lista de ilustrações

FIGURA 2.1 Diagrama de blocos para o projeto e controle do processo em conformação de metais.....	26
FIGURA 2.2 Demonstração esquemática dos ensaios a) tração b) compressão.....	27
FIGURA 2.3 Ilustração esquemática da tensão normal e da tensão de cisalhamento.....	28
FIGURA 2.4 Distribuição esquemática de tensões no processo de estampagem.....	29
FIGURA 2.5 Distribuição das deformações na conformação de um copo.....	31
FIGURA 2.6 Corpo de prova sendo tracionado com a velocidade.....	35
FIGURA 2.7 Principais componentes que formam um ferramental.....	36
FIGURA 2.8 Efeito e causa de defeitos em peças estampadas.....	37
FIGURA 2.9 Prensa mecânica de ação simples.....	38
FIGURA 2.10 Prensa mecânica de ação dupla ou duplo efeito.....	39
FIGURA 2.11 Processo de análise por Elementos Finitos.....	40
FIGURA 2.12 Exemplo de conceitos de peças leves.....	47
FIGURA 2.13 Fluxograma para classificar o processo.....	48
FIGURA 2.14 Hidroconformação de pares de chapas não soldadas.....	50
FIGURA 2.15 Limites de processamento definido pelo vazamento.....	51
FIGURA 2.16 Perfil já pré conformado.....	52
FIGURA 2.17 Tipos básicos de hidroconformação.....	53
FIGURA 2.18 Técnica de <i>hydroforming</i> baseada na injeção de líquido.....	54
FIGURA 2.19 Tipos de componentes hidroconformados.....	55
FIGURA 2.20 Materiais e tubos para produção de peças por hidroconformação.....	57
FIGURA 2.21 Folga para usinagem de uma superfície.....	63
FIGURA 2.22 Folga para usinagem do contorno do punção.....	63
FIGURA 2.23 Folga para usinagem de um alojamento.....	64
FIGURA 2.24 Usinagem de esticadores.....	65
FIGURA 4.1 Modelagem da peça no <i>software catia V4</i>	69
FIGURA 4.2 Dimensões da peça criada para análise.....	70
FIGURA 4.3 Modelo em sólido.....	70
FIGURA 5.1 Abertura do modelo 3D para início da simulação.....	72

FIGURA 5.2 Situação da peça após a primeira simulação.....	73 74
FIGURA 5.3 Situação da peça após a segunda simulação.....	74
FIGURA 5.4 Situação da peça após a terceira simulação.....	75
FIGURA 5.5 Situação da peça após a terceira simulação com excesso de estiramento.....	76
FIGURA 5.6 Peça simulada com resultados satisfatório.....	77
FIGURA 5.7 Malha já resolvida automaticamente fornecida pelo <i>software</i>	77
FIGURA 5.8 Dimensões do <i>blank</i>	78
FIGURA 5.9 Indicação das regiões onde têm rugas.....	78
FIGURA 5.10 Redução da espessura em porcentagem.....	79
FIGURA 5.11 Redução da espessura em milímetros.....	80
FIGURA 5.12 Distribuição da pressão no prensa chapas.....	81
FIGURA 5.13 Gráfico de diagrama limite de conformação gerado pelo <i>software</i>	81
FIGURA 5.14 Mesa de prensa com cilindro de nitrogênio.....	82
FIGURA 5.15 Cilindro de nitrogênio.....	83
FIGURA 5.16 Gráfico de funcionamento do cilindro de nitrogênio.....	83
FIGURA 5.17 Dispositivo para o controle da pressão e volume.....	84
FIGURA 5.18 Desenho da matriz em 2D.....	84
FIGURA 5.19 Desenho do punção 2D.....	85
FIGURA 5.20 Desenho do prensa chapas em 2D.....	85
FIGURA 5.21 Desenho dos componentes da ferramenta em 3D.....	86
FIGURA 5.22 Cálculo do volume do fluido fornecido pelo <i>software</i>	88
FIGURA 5.23 Superfície polida para auxiliar a vedação do fluido.....	88
FIGURA 5.24 Material de poliuretano para vedação do fluido.....	89
FIGURA 5.25 O princípio do funcionamento para o processo de hidroconformação.....	90
FIGURA 5.26 Modelo de <i>styropor</i> da matriz, prensa chapas e punção.....	90
FIGURA 5.27 Seqüências 1 e 2 do processo.....	91
FIGURA 5.28 Seqüências 3, 4 e 5 do processo.....	92
FIGURA 5.29 Seqüências 6 e 7 do processo.....	92
FIGURA 5.30 Usinagem das peças fundidas.....	93
FIGURA 5.31 Sentido preferencial de embutimento.....	94

FIGURA 5.32 Montagem do estampo.....	96
FIGURA 5.33 Prensa utilizada para experiência.....	97
FIGURA 5.34 Cilindros acionados por excesso na espessura do poliuretano.....	97
FIGURA 5.35 Resultado da primeira tentativa de conforma chapas.....	
FIGURA 5.36 Pontos de rugas.....	
FIGURA 5.37 Situação da peça após as modificações.....	
FIGURA 5.38 Comparação dos dois resultados o simulado e o do experimento.....	
FIGURA 5.39 Comparação dos resultados com a alteração das medidas do <i>blank</i>	

Lista de tabelas

TABELA 2.1 Rugosidades utilizadas para acabamento de superfícies.....	62
TABELA 2.2 Grau de acabamento.....	62
TABELA 2.3 Folga de linha de movimento.....	65
TABELA 5.1 Características Físicas e química do poliuretano.....	87

Lista de abreviaturas e siglas

SOFUNGE:	Sociedade Técnica de Fundições Gerais
GEIA:	Grupo Executivo da Indústria Automobilística
GM:	General Motors
JK:	Jucelino Kubitschek
SENAI:	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
CNC:	Comando Numérico Computadorizado
IF:	<i>Interstitial free</i> , ou livres de intersticiais

Lista de Símbolos

S:	Espessura da chapa [mm]
b:	Largura [mm]
l:	Comprimento [mm]
h:	Profundidade do embutimento [mm]
X_P :	Fator de embutimento simples efeito
X_A :	Fator de embutimento duplo efeito
d:	Diâmetro do punção [mm]
F:	Força aplicada [N]
A:	Área [mm ²]
t:	Tempo [s]
F_N :	Força de sujeição [N]
S_u :	Área de domínio onde ocorrem os deslocamentos [mm ²]
S_f :	Área de domínio onde atuam as forças externas [mm ²]
V:	Volume da peça deformada [m ³]
V :	Velocidade [m/s]
T:	Temperatura [°C]
T_f :	Energia [J]
P	Pressão [Pa]

Letras gregas

σ :	Tensão normal [N/mm ²]
ϵ :	Deformação [mm]
$\dot{\epsilon}$:	Taxa de deformação [s ⁻¹]
τ :	Tensão de cisalhamento [N/mm ²]

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	
1.1 Contexto geral.....	
1.2 Objetivos.....	
1.3 História.....	
1.3.1 Ferramenteiro um profissional raro e valorizado.....	
1.3.2 Máquinas ferramentas.....	
1.4 Conteúdo deste trabalho.....	
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	
2.1 Uma introdução à análise de conformação de chapas.....	
2.2 Análise de processos de conformação de chapas.....	
2.3 Tensões.....	
2.4 Tensão equivalente.....	
2.5 Deformações.....	
2.6 Taxa de deformação.....	
2.7 Energia.....	
2.8 Estampagem profunda.....	
2.8.1 Características principais do processo.....	
2.8.2 Defeitos em peças estampadas.....	
2.8.3 Equipamentos.....	
2.9 Procedimento de análise pelo Método de Elementos Finitos.....	
2.9.1 Aplicação do Método dos Elementos Finitos a processos de conformação.....	
2.9.2 Método dos Elementos Finitos com formulação de material rígido-plástica ou rígido-viscoplástica.....	
2.9.3 Método dos Elementos Finitos com formulação de material elasto-plástica.....	
2.9.4 Dificuldade para simulação do processo de conformação.....	
2.9.5 Equacionamento de problemas estruturais mecânicos.....	

2.9.6 Ferramentas computacionais.....	
2.10 Descrição do processo de hidroconformação.....	
2.10.1 Hidroconformação de pares de chapas metálicas.....	
2.10.2 Tecnologia do processo e exemplo de aplicação.....	
2.10.3 Tipos de componentes de força durante o processo de hidroconformação.....	
2.10.4 Campos de aplicações.....	
2.10.5 Materiais e tratamentos térmicos.....	
2.10.6 Pré-formas e preparação.....	
2.11 Procedimentos utilizados no dia a dia dos profissionais envolvidos na conformação.....	
2.11.1 Projeto.....	
2.11.2 Confeção das ferramentas para embutimento profundo.....	
2.11.3 Elaboração do processo de montagem e usinagem das ferramentas.....	
2.11.4 Linha matemática.....	
2.11.5 Rugosidade.....	
2.11.6 <i>Off-set</i>	
2.11.7 Superfície.....	
2.11.8 Esticadores (quebra rugas).....	
2.11.9 Folgas de linhas de movimento.....	
2.11.10 Linha de movimento da ferramenta para embutimento profundo.....	
3 ESTADO DA ARTE.....	
3.1 Considerações sobre o estado da arte.....	
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	
4.1 Início do projeto.....	
4.2 Modelagem da peça.....	
5 RESULTADOS.....	
5.1 Simulação para embutimento profundo.....	
5.2 Simulações realizadas.....	
5.3 Visualização da malha resolvida pelo <i>software</i>	

5.4 Direção de embutimento.....	
5.5 Forma do <i>blank</i>	
5.6 Análise de rugas.....	
5.7 Redução da espessura.....	
5.8 Pressão do prensa chapas.....	
5.9 Gráfico Diagrama Limite de Conformação.....	
5.9.1 FLD (<i>forming Limit Diagram</i>) fornecido a partir de <i>software</i> de simulação.....	
5.10 Projeto do estampo.....	
5.11 Cálculo do volume do fluido.....	
5.12 Sistema de vedação do fluido.....	
5.13 Processo de funcionamento da hidroconformação.....	
5.14 Modelo de <i>styropor</i>	
5.15 Material para confecção do estampo.....	
5.16 Sequências de operações para o processo.....	
5.17 Fases de confecção.....	
5.17.1 Usinagem da peça.....	
5.17.2 Polimento geral.....	
5.17.3 Montagem do estampo.....	
5.18 Prensa para ajustes.....	
5.19 Custos do projeto.....	
5.20 Experimento.....	
6 CONCLUSÕES.....	
7 SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO.....	
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	
ANEXOS.....	

1 INTRODUÇÃO

Fabricar um automóvel, na atual conjuntura competitiva mundial, representa um grande desafio e um procedimento complexo, onde é necessário o gerenciamento de uma grande variedade de problemas já na fase de concepção e durante o desenvolvimento do novo produto.

O objetivo não é apenas desenvolver a melhor qualidade, é também reduzir o tempo de lançamento e reduzir os custos. Por esta razão devemos repensar constantemente os nossos procedimentos e aperfeiçoá-los continuamente. Um dos procedimentos mais importantes é ter sob domínio, o mais cedo possível, os problemas peculiares ao desenvolvimento dos novos produtos e atuar sobre sua causa, eliminando-os já na fase inicial.

A indústria, seja qual for o ramo de atividade, passa a oferecer concorrência umas às outras em qualquer lugar do mundo. Devido a esta guerra acirrada, as empresas vêm buscando novas tecnologias, novos produtos com custos mais baixos e com tempos cada vez mais curtos. Para se reduzir o custo final de um produto, no caso o automóvel, mantendo-se ou melhorando-se a qualidade do mesmo, é necessário um trabalho conjunto de todas as empresas que formam a cadeia produtiva; ou seja, fornecedores, fornecedores dos fornecedores, distribuidores, transportadores e, principalmente seus funcionários.

É a filosofia de parceria que reforça o grau de comprometimento na solução dos problemas.

No Brasil, a situação das fábricas está mudando. Aquele conceito de indústrias antigas e desatualizadas já é coisa do passado e, com isso, estamos nos preparando para concorrer globalmente. Nos últimos anos, a instalação de novas montadoras, com modernas fábricas, nível de automação e qualidade em estágio de última geração, quase sempre trazem consigo fornecedores (parceiros) mundiais. Portanto, estão em condições de oferecer um produto diferenciado, favorecendo inclusive a exportação.

A indústria brasileira, no ramo automotivo, busca recuperar-se do tempo perdido causado pelos 20 anos de economia fechada e busca tanto a tecnologia, quanto o nível produtivo da Europa, Estados Unidos e Japão.

O sucesso de uma empresa está no tripé: qualidade, custo e produtividade. É com esse pensamento que no decorrer deste trabalho tentar-se-á contribuir.

1.1 Contexto geral

A literatura descreve vários caminhos nos processos de conformação mecânica, como: forjamento, laminação, trefilação, extrusão, estiramento, dobramento, cisalhamento e o embutimento profundo. É justamente sobre esta última alternativa que nos debruçaremos neste trabalho, por tratar-se de um processo bastante antigo e que se mantém vivo até os dias atuais.

As máquinas utilizadas para obtenção de peças com embutimento profundo são as prensas com esforços mecânico e hidráulico, que obriga a matéria-prima a se conformar de acordo com o punção e a matriz.

Todos os fenômenos que envolvem a conformação de chapas já foram, e continuam sendo, estudados e ensaiados; embora, os materiais tenham variações constantes, como o lançamento de novas ligas com novas características, o que exige aprimoramento constante dos profissionais. Invariavelmente sujeitos a uma condição contemporânea, que é a falta de tempo.

Os trabalhos de desenvolvimento do ferramental para produção de peças obtidas por embutimento profundo dependem da experiência prática dos profissionais da empresa e de uma série de tentativas para acerto do formato da chapa inicial (*blank*), para obtenção do produto final e das condições de processo como: quebra-rugas, carga do prensa chapas, pontos de enrugamento, de fissuras e afinamentos na espessura.

A indústria de manufatura de peças provenientes de chapas metálicas abrange um largo campo da economia mundial. A demanda vem desde a indústria automobilística até a indústria eletrônica.

Os processos de conformação de chapas são caracterizados por modificar a geometria de uma chapa metálica, através do controle do fluxo de material, no regime plástico de deformação.

Nos processos de conformação de chapas metálicas, o que predomina são as tensões e as formas finais que podem ser alcançadas em um ou mais estágios, limitados pelo início das instabilidades plásticas, dadas pela formação de defeitos como estiramento de espessura ou por enrugamento.

A arte e a ciência dos processos de conformação de chapas consistem em obter-se as peças desejadas conforme os requisitos estabelecidos em projeto e de fabricação, ponderando-se com razoável margem de segurança, nas variações de propriedades do material e nas condições de processo que estejam fora dos padrões especificados. (EVANGELISTA, 2000).

Este trabalho mostra os aspectos relacionados aos processos de conformação de chapas existentes e sugere um embutimento, utilizando um fluido que irá substituir as formas da matriz. Esta sugestão é uma adaptação do processo de “hidroconformação,” um método usado para conformação de tubos fechados na manufatura de componentes de geometrias complexas, a partir de chapas e por meio de pressão de um fluido.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo apresentar um dos mais novos conceitos relativos à conformação de chapas metálicas, utilizando-se a hidroconformação, onde serão aplicados os métodos de elementos finitos, diagrama de limites de conformação e tentar tornar possível a conformação de chapas com um fluido na substituição das formas da matriz. Com o uso desta metodologia busca-se uma contribuição para a redução de custos em aplicações industriais.

A decisão de fazer tal projeto é tentar minimizar gastos que a indústria automobilística possui quando inicia a construção de um veículo.

No início de um projeto para a construção de um automóvel, as indústrias automobilísticas têm um gasto elevado. Em uma etapa do processo constrói-se automóveis protótipos que serão utilizados para teste. Conseqüentemente são fabricados estampos com a finalidade de conformar chapas para montagem desses veículos.

Na fabricação desses estampos, são usinadas superfícies que darão formas às peças. O objetivo maior deste trabalho é realizar um estudo para que parte dessas superfícies sejam substituídas por um fluido, pois após estampar uma quantidade pequena de peças para tal finalidade, estes estampos são descartados.

1.3 História

1.3.1 Ferramenteiro, um profissional raro e valorizado

Esse texto faz parte da monografia "A Família ocupacional de ferramenteiros e afins", publicado pelo Senai em 2002. Retirado do site (www.dn.senai.br/repertorio/ferramenteiros).

No dia 21 de dezembro de 1955, Juscelino Kubitschek, às vésperas de sua posse, presidiu em São Paulo a cerimônia organizada para fundição do primeiro bloco de motor diesel para caminhões. Vazando o ferro líquido, no molde de areia desse primeiro motor fabricado no Brasil, o novo presidente da República inaugurava sua produção em escala industrial, pela Sociedade Técnica de Fundições Gerais - Sofunge, para a Mercedes-Benz do Brasil.

Logo depois da posse, em janeiro de 1956, Juscelino divulgou seu Plano de Metas, no qual se propunha o desenvolvimento, "a curto prazo", da indústria automobilística. Em 16 de junho daquele ano, foi instalado o Grupo Executivo da Indústria Automobilística - GEIA, órgão responsável pelo estabelecimento dos índices de nacionalização da indústria automobilística.

Dezoito meses depois da criação do GEIA, fez-se um balanço das atividades do setor, contando-se 17 grandes empresas com projetos aprovados pelo governo, além do registro de outros 821 fabricantes de peças, que dispunham de planos de expansão igualmente aprovados. No final de 1958, o GEIA já aprovava 56 projetos, número que passou a 86 no ano seguinte e a 21 em 1960, somando-se 202 projetos em 5 anos (1956-1960). Quanto às indústrias, dos 17 projetos aprovados, 11 foram concretizados (*FNM, Ford, GM, International Harvester, Mercedes-Benz, Scania-Vabis, Simca, Toyota, Vemag, Volkswagen e Willys*), o que incentivou a expansão do setor de autopeças, cujo número de fábricas chegou a 1.200, em 31 de dezembro de 1960. Além disso, no que se refere aos índices de nacionalização, dados de final de 1960 confirmam que eles foram atingidos e, em alguns casos, até ultrapassados.

Por detrás de todos esses números e dados, reflexos de intensas lutas políticas travadas durante todo o governo JK, é necessário buscar elementos qualitativos que o entusiasmo estatístico não mostra. Obviamente, os veículos produzidos por todas essas indústrias acabaram invadindo ruas e estradas, mudando para sempre a feição das cidades e criando hábitos que jamais admitiram recuos. Por suas dimensões e profundidade, como não poderia deixar de ser, o desenvolvimento desse setor industrial produziu efeitos em várias direções, atingindo também diretamente o mercado da força de trabalho.

E foi graças a esse contexto que, na segunda metade da década de 1950, os ferramenteiros conquistaram posição de destaque como mão-de-obra qualificada, de importância estratégica, a

partir do momento em que a demanda por esses profissionais cresceu, por conta dos planos de nacionalização da indústria automobilística, ocasião em que as montadoras tiveram de programar a substituição de suas matrizes para estampagem, até então importadas, por outras produzidas no Brasil.

Entretanto, como recordou um ex-professor do SENAI, na segunda metade da década de 1950, não havia ferramenteiros no Brasil, exceto um grande número de espanhóis, que dominavam o trabalho de ferramentaria. Naquela mesma época, a *Willis-Overland* do Brasil, hoje adquirida pela *Ford*, havia contratado com uma empresa americana, ligada ao grupo *Chrysler* ao qual a *Willis* pertencia, a preparação de ferramenteiros no Brasil.

A escassez desses profissionais especializados fazia com que fossem disputados freneticamente pelas indústrias, havendo memória de práticas fora das normas comuns adotadas para convencê-los a mudar de emprego: psicólogos, especialistas em recrutamento, vestiam macacões, arranjavam uma bicicleta, se postavam na porta das empresas, na hora da saída ou da entrada, e tentavam identificar quais eram os ferramenteiros. Dirigiam-se diretamente a eles e tentavam convencê-los a se mudarem para outras empresas que ofereciam melhores salários e benefícios. Houve casos em que o ferramenteiro retornava à mesma empresa, seis meses depois de deixá-la e após trabalhar em outras duas ou três, passando a receber um salário cinco a seis vezes maior do que o inicial.

Esses expedientes, contudo, revelaram-se insuficientes para suprir as necessidades da indústria, especialmente no que se referia ao setor automobilístico, em franca expansão. O SENAI decidiu envolver-se, então, diretamente na preparação de ferramenteiros para o mercado, inaugurando, em 1960, seu primeiro curso de ferramentaria, na Escola Roberto Simonsen, em São Paulo.

1.3.2 Máquinas ferramentas

No passado, o trabalho manual alcançava graus de perfeição do qual ainda hoje, nota-se uma grande habilidade que resultava geralmente na criação de magníficos trabalhos em ouro, prata, bronze, cobre e metal. Porém, por volta de 1800, o material utilizado para tais aplicações mudou e com ele o seu processo também, afinal trata-se agora de um material mais duro e mais frágil que poderia ser trabalhado de forma mais econômica, com a ajuda de máquinas. Foi então

que em 1839, um mestre serralheiro, chamado *Louis Schuler*, fundou uma oficina modesta na qual era possível encontrar também uma pequena forjaria, bem como uma ferraria. Assim, seguindo esta sensação empresarial, *Louis Schuler* foi rápido para perceber que poderia ganhar muito em produtividade, qualidade e principalmente custos, se fosse investido numa mecanização progressiva para atender a demanda que não parava de crescer. Assim, passo a passo, começou a substituir processos de trabalho manuais por instalações mecânicas, dando início à mecanização na sua própria oficina, com máquinas dobradeiras e prensas de corte, que eram inovações consideráveis naquela época; inovações que não pararam e que tornaram a *SCHULER* um reputado fabricante de máquinas ferramentas, exercendo papel muito importante há mais de 150 anos, desde as pequenas máquinas do passado, até prensas *transfer* capazes de produzir automaticamente o corpo de um carro e outros produtos complementares (METAL FORMING HANDBOOK, 1998).

1.4 Conteúdo deste trabalho

O conteúdo deste trabalho está estruturado conforme a descrição a seguir:

Revisão bibliográfica

Apresenta-se uma revisão bibliográfica abordando o tema conformação de chapas metálicas, destacando-se os aspectos para análise dos processos relacionados; bem como o Método dos Elementos Finitos e um processo destacando a hidroconformação para tubos.

Estado da arte

Aborda a situação atual referente a hidroconformação.

Materiais e métodos

Esta parte mostra os procedimentos adotados para realização do projeto, no qual será utilizado um *software* de engenharia avançada *Auto-form*, elaborado para propiciar aos profissionais desta área, recursos para economia de tempo e ganho de qualidade.

Resultados

Apresenta aspectos práticos do processo de conformação de chapas onde as formas da matriz serão substituídas por um fluido e os resultados obtidos no experimento.

Conclusões e sugestões

Apresenta-se as conclusões e sugestões de novas considerações a respeito deste trabalho.

Referências bibliográficas

Referências bibliográficas: São listadas as obras consultadas e referenciadas neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Até a década de setenta, o processo para confeccionar uma ferramenta de estampagem era muito longo, quando se decidia fabricar um produto, pois o que prevalecia até então era só a experiência do profissional. Para lançar um carro no mercado, as montadoras levavam aproximadamente quatro anos; hoje, o tempo de confecção de uma ferramenta foi reduzido pela metade. Esta redução deu-se devido ao auxílio das novas ferramentas computacionais existentes no mercado.

A conformação de chapas é um processo de manufatura amplamente usado, pois, dependendo do tipo de processo como; embutimento profundo, dobramento de chapas, etc, pode-se gerar uma perda mínima de material, boa precisão dimensional e melhorar as propriedades mecânicas da peça conformada. Entretanto, o desenho da seqüência de produção de uma nova peça não é tarefa simples e requer muitos testes e ajustes até atingir uma condição de produção satisfatória. O método empírico "tentativa e erro" ainda é tradicionalmente aplicado no projeto de conformação, porém em menor quantidade.

Desde a década de 80, a simulação computacional tornou-se confiável e aceitável nas indústrias por auxiliar no desenvolvimento de novos produtos. A simulação computacional reduziu o método empírico de "tentativa e erro" consideravelmente e durante os últimos anos, este tipo de simulação vem se tornando uma ferramenta muito eficiente em descrever o complexo comportamento dos metais durante um processo de conformação. Esta descrição de comportamento pode incluir: o dano causado na matriz e na peça estampada, mudanças no material devido à formação de textura e recristalização, transformação de fase, evolução microestrutural, entre outros fenômenos.

Ao simular um processo de conformação, torna-se necessário avaliar previamente quais variáveis serão analisadas e quais parâmetros podem ter maior influência sobre estas variáveis no processo em estudo. Deve-se conhecer a capacidade do programa em resolver casos com geometria complexa, incluindo a representação de pequenos raios e chanfros, e considerar-se o tempo de processamento assim como os requisitos de "hardware" necessários.

Quando se pretende estudar processos que envolvam conformação ou deformação de algum material, é importante que se entenda e conheça o ponto em que ocorre a passagem de

deformação elástica para a plástica, uma vez que deve ocorrer deformação plástica do material para que este seja conformado; para tanto, os critérios de escoamento são de enorme utilidade.

Quando submetido à tensão, um corpo começa a se deformar. Enquanto estiver ocorrendo deformação elástica, o corpo sob tensão retorna ao seu estado inicial, caso a tensão seja removida. Nessa zona de deformação, a tensão e a deformação estão relacionadas por constantes elásticas.

Para causar deformação plástica, um nível particular de tensão deve ser alcançado; essa é a chamada tensão de escoamento. Para a maioria dos materiais dúcteis, tanto a extensão da deformação como a mudança na forma do corpo no estado inicial, podem continuar até um grau elevado antes do rompimento, caso a tensão que causou o escoamento inicial tenha sido continuamente aumentada.

A anisotropia plástica representa a variação das propriedades mecânicas, em relação ao sentido da laminação. Nos metais, a causa mais importante da anisotropia plástica é a orientação dos grãos, ou seja, a orientação da estrutura cristalográfica. Macroscopicamente, a anisotropia possui ligação direta com o processo de fabricação das peças metálicas, especialmente no caso de chapas laminadas, pois é a laminação que alinha os grãos em um sentido, o que gera uma orientação preferencial que irá modificar a capacidade de deformação do material nas diferentes direções em relação à direção de laminação.

Por esse motivo, a anisotropia é de tanta importância para processos de conformação, pois é responsável pela resistência à variação de espessura e pela formação de “orelhas” no caso, do embutimento profundo, por exemplo.

2.1 Uma introdução à análise de conformação de chapas

Os processos de conformação de chapas são caracterizados por modificar a geometria de uma chapa metálica, através do controle do fluxo de material no estado plástico de deformação.

Segundo Schaeffer (2004) nos processos de conformação de chapas, um *blank* é deformado plasticamente entre um punção e uma matriz onde é obtida a forma final.

Os processos de conformação de chapas metálicas dividem-se basicamente em (KOBAYASHI et al. 1989 apud SCHAEFFER, 2004):

- Embutimento (*deep drawing*), estampagem profunda;
- Dobramento de chapas e calandragem;
- Estiramento de chapas;
- Estiramento no plano da chapa;
- Hidroconformação (*hydroforming*) em tubos;
- Conformação por elastômeros;
- Conformação a vácuo, eletromagnética, por explosão;
- Outros.

Também citado em (KOBAYASHI et al. 1989 apud SCHAEFFER, 2004) as características básicas são:

- A peça trabalhada é uma chapa ou uma peça fabricada a partir de uma chapa metálica;
- As deformações usualmente causam mudanças significativas no formato mas, não na espessura da chapa;
- Em alguns casos, as magnitudes das deformações plástica e elástica recuperável são comparáveis. Nestes casos o retorno elástico (*springback*) pode ser significativo;
- Suas diferenças baseiam-se no modo como as deformações se compõem, ou seja, pela predominância de deformações de tração ou de compressão ou suas combinações.

Quando a geometria da peça é complexa, o custo da confecção do ferramental é alto porém, é amortizado com uma quantidade elevada de produção (SCHAEFFER, 2004).

2.2 Análise de processos de conformação de chapas

Em uma operação de conformação mecânica, o projeto consiste essencialmente de: (KOBAYASHI et al. 1989 apud SCHAEFFER, 2004).

- Estabelecer as relações cinemáticas (forma, velocidade, taxas de deformação e deformações) entre a parte não deformada *blank* e a parte deformada;
- Estabelecer os limites de conformabilidade, isto é, determinar se é possível executar a operação de conformação sem causar algum defeito de superfície (afinamento, enrugamento, fraturas, etc.);
- Prever as forças e tensões necessárias para executar a operação de conformação. Esta informação é necessária para o projeto da ferramenta e para selecionar o equipamento apropriado com força adequada e capacidade de energia.

Para o projeto de um estampo é fundamental que conheçamos a influência de variáveis tais como condições de atrito, propriedades de material e geometria da peça. A modelagem do processo para simulação computacional tem sido uma grande preocupação na tecnologia de conformação metálica moderna. A figura 2.1 mostra o diagrama de blocos para o projeto e controle do processo em conformação de chapas metálicas e indica o papel da modelagem do processo com alguns detalhes (KOBAYASHI et al. 1989 apud SCHAEFFER, 2004).

Um grande número de métodos aproximados de análise têm sido desenvolvidos e aplicados a vários processos de conformação. Os métodos mais conhecidos são o *slab method*, o *slip-line field method*, o *visioplasticity method*, *upper- (e lower-) bound techniques*, o método de *Hill* e mais recentemente o Método dos Elementos Finitos (KOBAYASHI et al. 1989 apud SCHAEFFER, 2004), cujo desenvolvimento e aplicação possibilitou um dos mais significativos avanços em análise e simulação de processos de conformação de metais nos últimos anos. Esta tecnologia mostra o comportamento do material ao longo do processo.

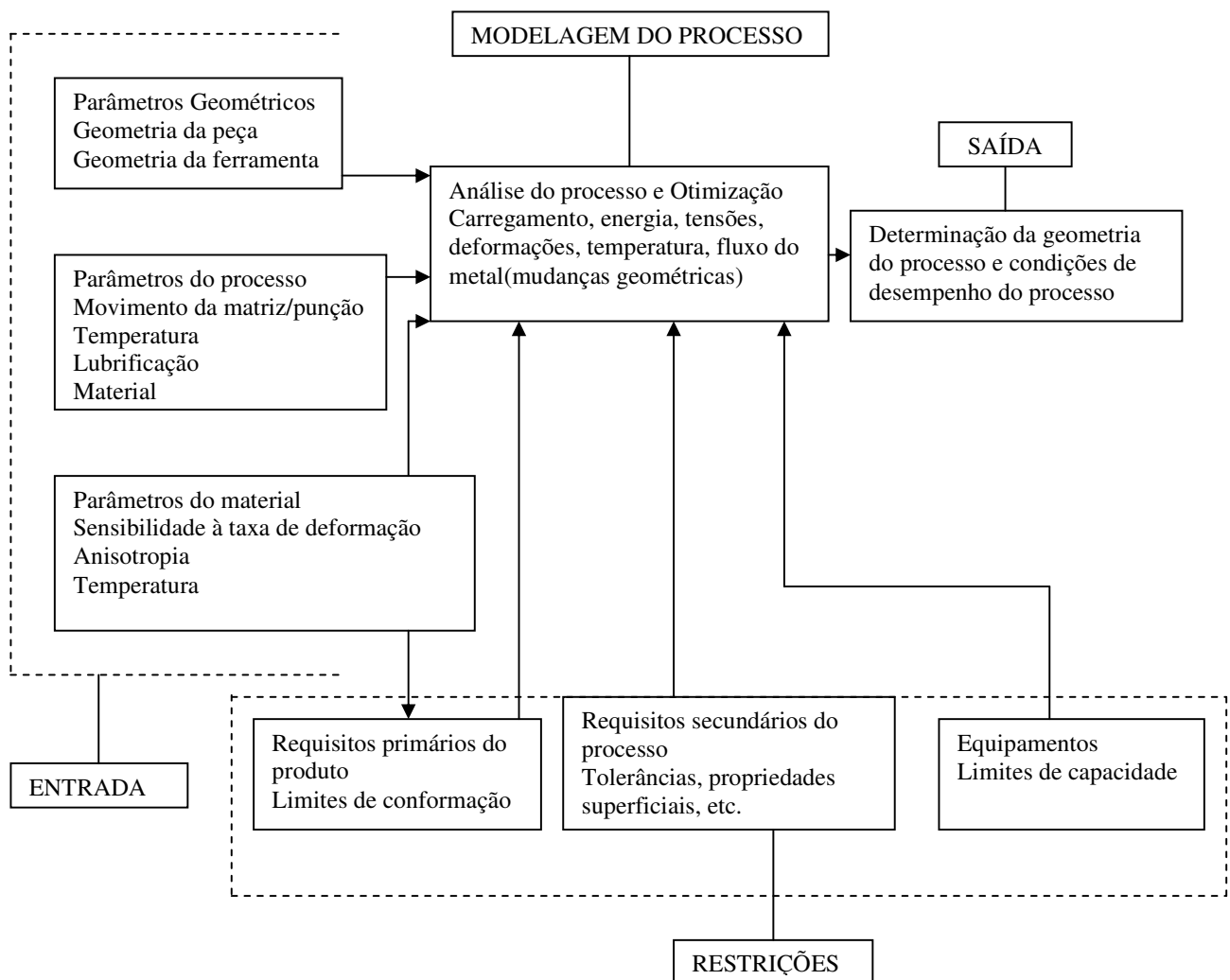


Figura 2.1 Diagrama de blocos para o projeto e controle do processo em conformação de metais (KOBAYASHI et al. 1989 apud SCHAEFFER, 2004).

2.3 Tensões

A tensão normal (σ) é um parâmetro definido como sendo o coeficiente entre a força aplicada (F) e a área (A) na qual esta força atua.

Sendo convencionalmente estipulado que o sinal (+) é usado quando a tensão normal é de tração e o sinal (-) quando a sollicitação é de compressão. A tensão normal é um parâmetro fundamental para se conhecer o quanto um material resiste durante a conformação.

A figura 2.2 demonstra esquematicamente os ensaios: a) tração b) compressão (SCHAEFFER, 2004).

$$\sigma = \pm \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

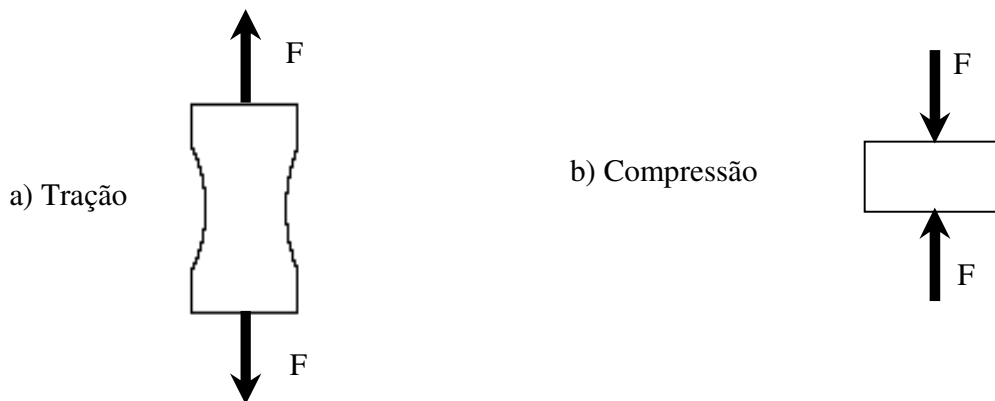
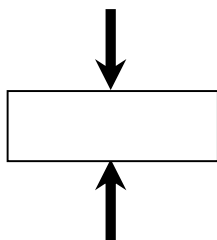


Figura 2.2 Demonstração esquemática dos ensaios: a) tração b) compressão (SCHAEFFER, 2004).

O estado de tensões provocado por forças externas em um corpo que está sendo deformado pode ser extremamente complexo. Podem ocorrer tensões normais (σ) (quando a força é perpendicular à seção na qual atua) e tensões de cisalhamento (τ) (quando a força está no plano da seção).

Um estado generalizado de tensões, ocorrentes num corpo sólido pode ser perfeitamente definido através de três tensões normais ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) e seis tensões de cisalhamento ($\tau_{xy} = \tau_{yx}; \tau_{xz} = \tau_{zx}; \tau_{yz} = \tau_{zy}$). A figura 2.3 mostra a tensão normal e a tensão de cisalhamento (SCHAEFFER, 2004).

$$(a) \quad \sigma = \pm \frac{F}{A}$$



$$(b) \quad \tau = \pm \frac{F}{A}$$

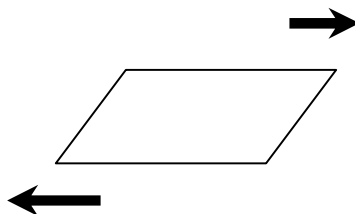


Figura 2.3 Ilustração esquemática da tensão normal e da tensão de cisalhamento (SCHAEFFER, 2004).

É possível imaginar um cubo elementar na peça que está sendo deformada, de forma que as tensões de cisalhamento sejam nulas e que nesta posição somente ocorram as tensões normais. Nesta situação, é comum se denominar as três tensões de tensões normais principais (σ_1 , σ_2 , σ_3). Neste caso é empregada ainda uma outra convenção na qual se estabelece que (SCHAEFFER, 2004):

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

Observa-se que, num caso particular em que as três tensões são negativas (de compressão), a convenção deve ser mantida. Nesse caso, numericamente σ_3 é a maior tensão; entretanto, a mais negativa e a menor das três tensões principais (SCHAEFFER, 2004).

2.4 Tensão equivalente

Em muitas situações é mais prático comparar um estado generalizado de tensões com uma tensão obtida num ensaio uniaxial de tensões. A transformação de um estado generalizado de tensões numa Tensão Equivalente (σ_{eq}) gerou várias hipóteses que caracterizam o instante em que o material inicia sua deformação plástica. Destas teorias destaca-se a de TRESCA

(desenvolvida por volta de 1870) que se baseou na hipótese da máxima tensão de cisalhamento, que define a tensão equivalente (σ_{eq}) como sendo igual à diferença entre maior tensão aplicada (σ_1) e a menor tensão aplicada (σ_3) (SCHAEFFER, 2004).

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.2)$$

No instante em que o material começa a escoar plasticamente, a tensão equivalente (σ_{eq}) é igual a tensão de escoamento (σ_e) obtida num estado uniaxial (por exemplo: o ensaio de tração). Esta tensão é um valor normalmente conhecido e característico da matéria-prima. São apresentadas as tensões σ_1 , σ_2 e σ_3 como incógnitas do processo (SCHAEFFER, 2004).

Na figura 2.4, é mostrada esquematicamente a distribuição de tensões no corpo de um componente no processo de estampagem profunda. As tensões radiais ($\sigma_r = \sigma_1$) são positivas e, portanto, de compressão, ($\sigma_t = \sigma_3$) negativas (SCHAEFFER, 2004).

Considerando a teoria de Tresca pode-se observar que a diferença entre as tensões, num determinado instante, é constante e igual à tensão de escoamento (σ_e) (SCHAEFFER, 2004).

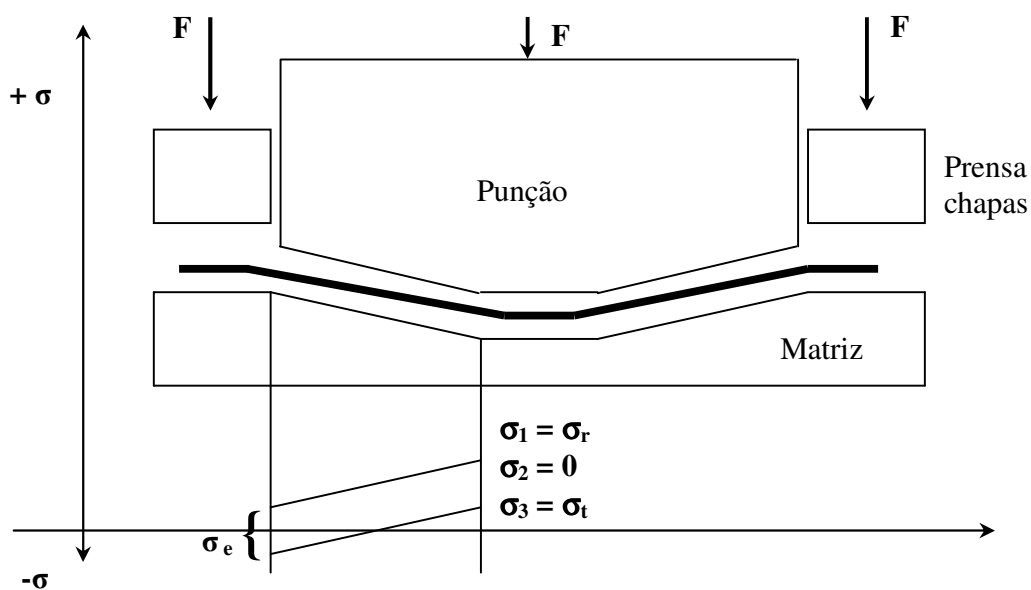


Figura 2.4 Distribuição esquemática de tensões no processo de estampagem (SCHAEFFER, 2004).

2.5 Deformações

A deformação pode ser recuperável ou irre recuperável. A deformação recuperável ou elástica é independente do tempo isto é, manifesta-se instantaneamente com a aplicação da força e desaparece rapidamente com a remoção da mesma. A deformação irre recuperável, viscosa ou plástica, denominada particularmente de escoamento dependente do tempo, ou seja, desenvolve-se continuamente sob ação da força aplicada.

As deformações podem ser caracterizadas de diversas formas.

$$\Delta l = l_1 - l_0 \quad (\text{no comprimento}) \quad (2.3)$$

$$\Delta b = b_1 - b_0 \quad (\text{na largura}) \quad (2.4)$$

$$\Delta s = s_1 - s_0 \quad (\text{na espessura}) \quad (2.5)$$

As deformações relativas:

$$\varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (100 \%) \quad (\text{no comprimento}) \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_0} \quad (100 \%) \quad (\text{na largura}) \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_s = \frac{s_1 - s_0}{s_0} \quad (100 \%) \quad (\text{na espessura}) \quad (2.8)$$

As deformações verdadeiras:

$$\varepsilon_l = \ln \frac{l}{l_0} \quad (\text{no comprimento}) \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_b = \ln \frac{b}{b_0} \quad (\text{na largura}) \quad (2.10)$$

$$\epsilon_s = \ln \frac{s}{s_0} \quad (\text{na espessura}) \quad (2.11)$$

As deformações verdadeiras são os parâmetros empregados nas análises dos processos de conformação. O conhecimento das deformações que ocorrem num processo de conformação podem fornecer importantes informações, tais como situação das tensões internas, possibilidades de reduzir etapas de processo, conhecimento sobre o limite máximo de deformações etc.

Para um processo de estampagem profunda (fabricação de um copo) a figura 2.5 mostra esquematicamente como pode ocorrer a distribuição das deformações ao longo do corpo. Observa-se, que na estampagem deseja-se sempre manter a deformação na espessura da peça o mais próximo possível de zero (espessura inalterada). A variação de espessura da peça é caracterizada pela sua deformação na espessura (ϵ_s) (SCHAEFFER, 2004).

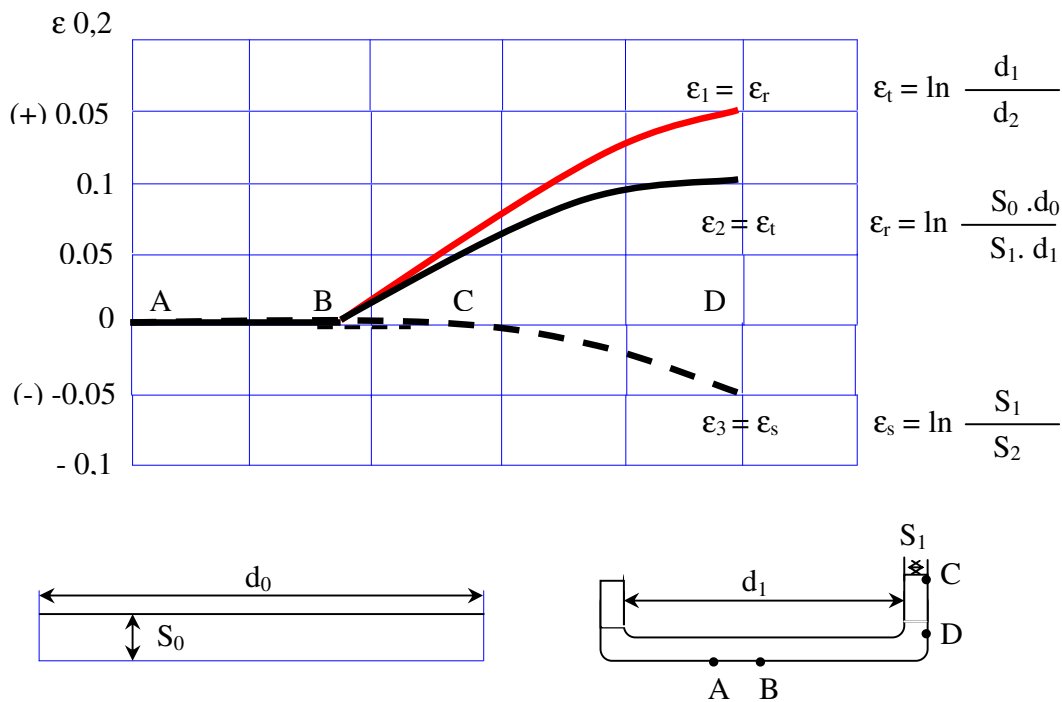


Figura 2.5 Distribuição das deformações na conformação de um copo (SCHAEFFER, 2004).

A figura. 2.5 mostra, esquematicamente, a variação das deformações ao longo de um corpo estampado a partir de um disco de diâmetro (d_0). São avaliadas as seguintes deformações

Deformação tangencial ou circunferencial:

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (2.12)$$

Deformação radial

$$\epsilon_r = \epsilon_1 = \ln \frac{S_0 d_0}{S_1 d_1} \quad (2.13)$$

Deformação da espessura

$$\epsilon_x = \epsilon_3 = \ln \frac{S_1}{S_0} \quad (2.14)$$

Observa-se na figura 2.5 (desenho esquemático), no ponto “D”, que a espessura final (S_1) é maior que a espessura da chapa original (S_0). Uma deformação positiva é consequência de que a deformação absoluta (dimensão) final (S_1) é maior que a dimensão inicial (S_0). O que significa que existe um esforço de compressão.

2.6 Taxa de deformação

Nos processos de conformação mecânica a taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) é definida como sendo a variação da deformação (ϵ) em função do tempo (t):

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (2.15)$$

Para um ensaio de tração simples, conforme figura 2.6, a expressão acima pode ser descrita por:

Considerando a velocidade com que se deslocam as garras (V) tem-se:

$$V = \frac{d_L}{d_t} \quad (2.16a)$$

Ou ainda:

A expressão 2.16a transforma-se então em:

$$d_t = \frac{d_L}{V} \quad (2.16b)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{d \ln (l/l_0)}{dL/V} = \frac{d \ln (L/L_0)}{dL} \cdot V = \frac{V}{L} \quad (2.17)$$

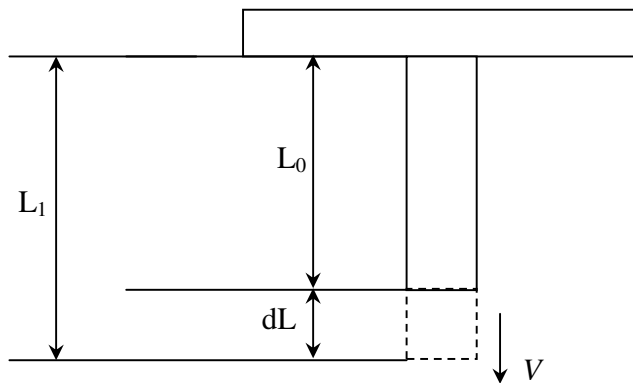


Figura 2.6 Corpo de prova sendo tracionado com a velocidade v (SCHAEFFER, 2004).

A taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) tem uma influência relativamente pequena nos processos de conformação mecânica a frio.

Entretanto, com a produção de chapas metálicas de alta resistência, muitos processos modernos começam a ser realizados com deformação a quente. Com o aumento de temperatura, o

parâmetro taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) passa a ter um significado muito importante no controle dos processos (SCHAEFFER, 2004).

2.7 Energia

O cálculo da energia necessária para a realização de uma operação de estampagem deve levar em conta as características cinemáticas das prensas a serem empregadas:

Prensa de duplo-efeito (SCHAEFFER, 2004).

$$T_r = F_{m\acute{a}x} \cdot X \cdot h \quad (2.18)$$

Prensa de simples-efeito (SCHAEFFER, 2004).

$$T_r = (F_{m\acute{a}x} \cdot X + F_N) h \quad (2.19)$$

Onde:

h é a altura estampada (espaço percorrido) pelo punção;

X é o fator de correção;

$X = 0,63$ estampagem sem flange;

$X = 0,8$ estampagem com flange e para as operações posteriores.

2.8 Estampagem profunda

O processo de estampagem profunda ou embutimento profundo caracteriza-se como um processo de fabricação cuja matéria-prima é uma chapa metálica plana (geratriz ou *blank*) que é transformada em diferentes formas geométricas com saliências profundas ou rasas.

2.8.1 Características principais do processo

A figura 2.7 mostra, os principais componentes que formam o ferramental empregado no processo de estampagem.

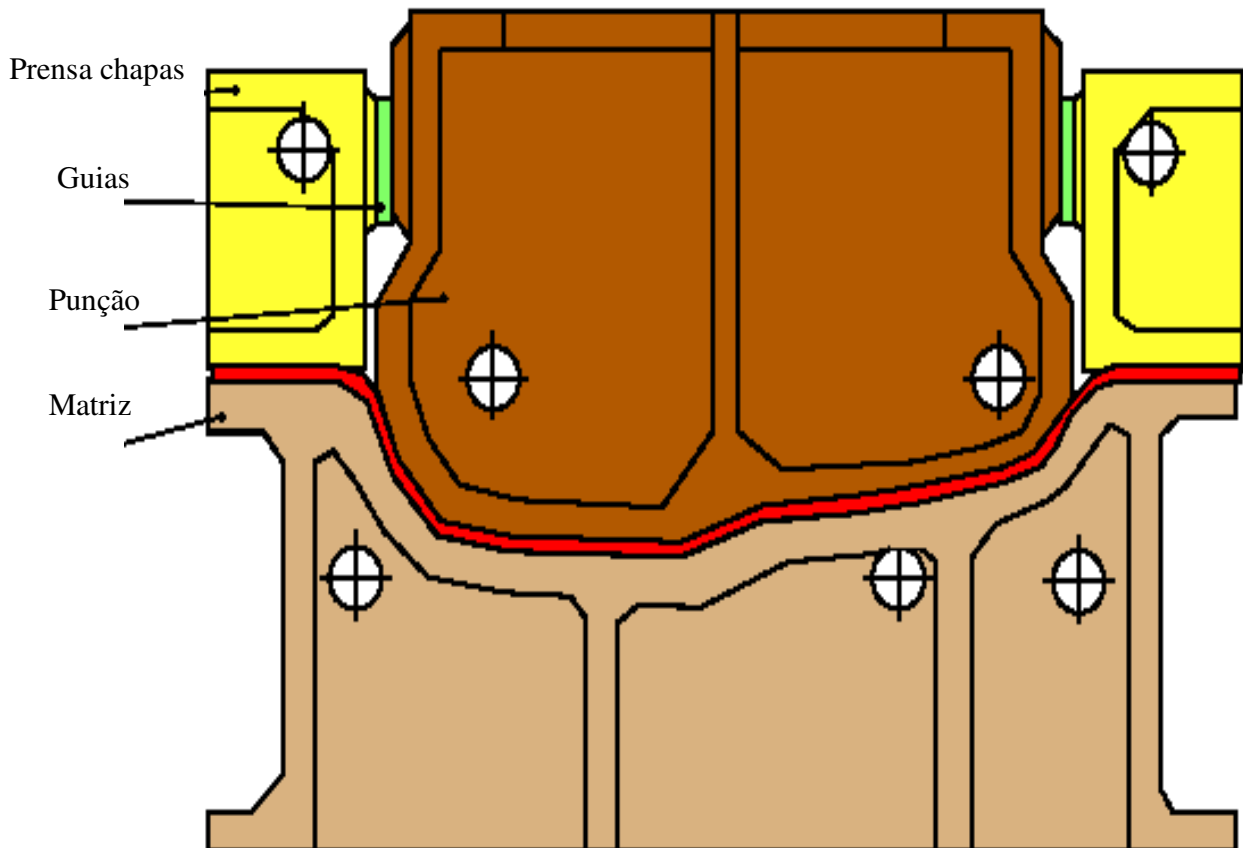


Figura 2.7 Principais componentes que formam o ferramental (METAL FORMING HANDBOOK, 1998).

2.8.2 Defeitos em peças estampadas

Num processo de estampagem, vários fatores podem levar a diversos tipos de defeitos em uma peça. Segundo Schaeffer (2004), os fatores vão desde a pressão do prensa chapas, o raio da matriz, raio do punção, até a folga entre punção e a matriz e etc., podendo levar à origem de defeitos. A figura. 2.8 indica esquematicamente, alguns defeitos e suas causas.

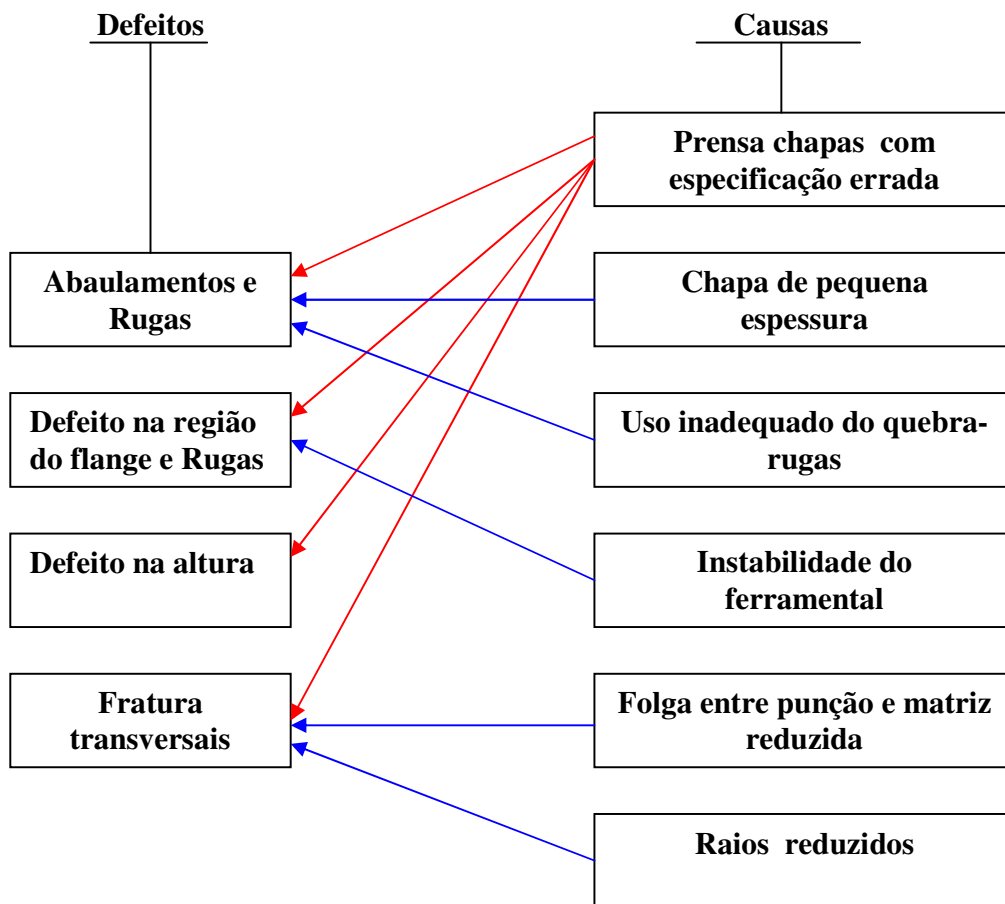


Figura 2.8 Efeito e causa de defeitos em peças estampadas (SCHAEFFER, 2004).

2.8.3 Equipamentos

Nas operações de estampagem profunda, existem várias alternativas para a execução das operações de fabricação.

a) Prensas de simples ação

Nesse caso, as operações de trabalho com grandes esforços são executados pela parte superior da prensa. Na parte inferior, são usados pinos que atuam sobre uma almofada de ar ou óleo, para efetuar as operações de extração das peças figura. 2.9.

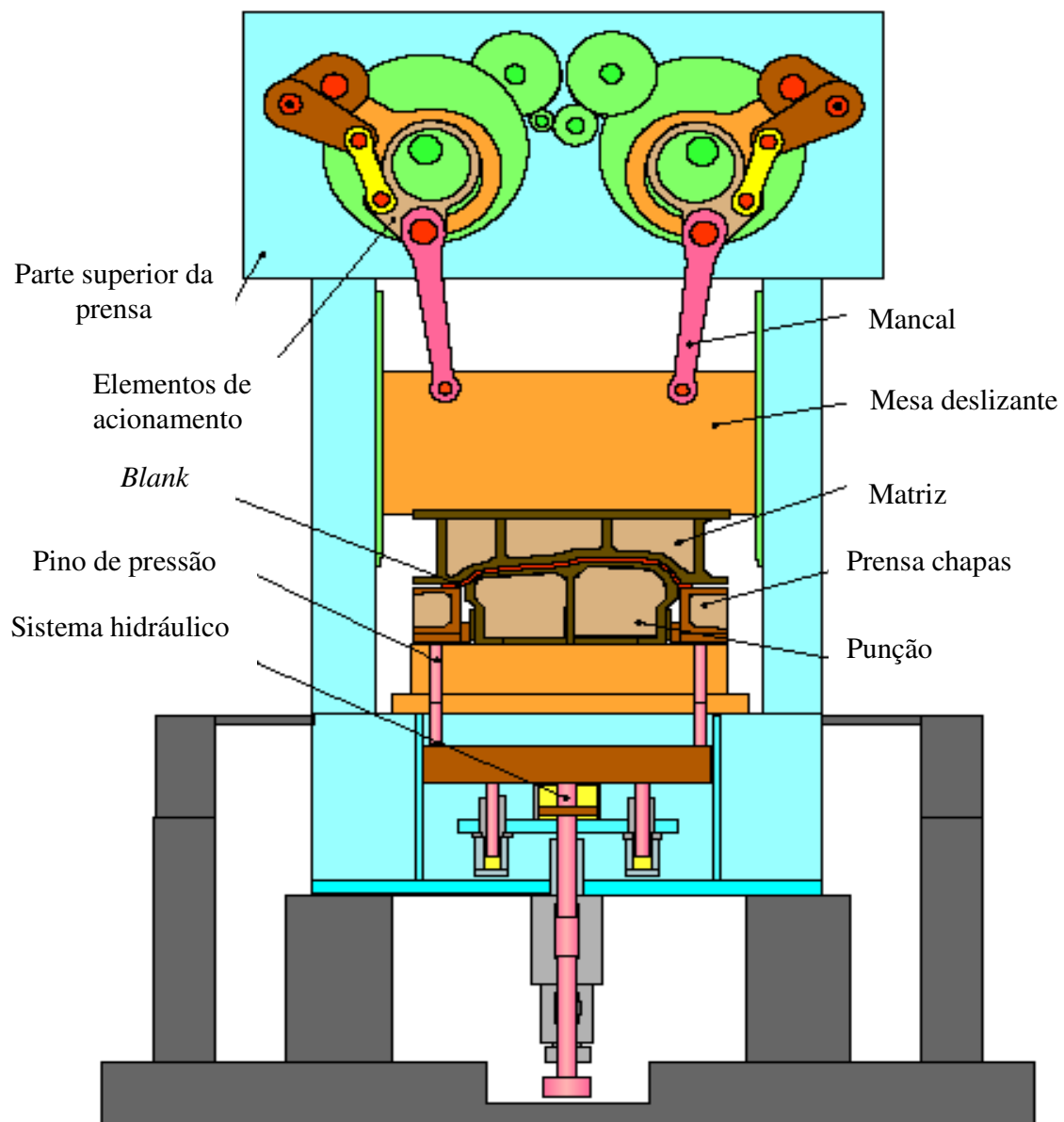


Figura 2.9 Prensa mecânica de ação simples (METAL FORMING HANDBOOK, 1998).

b) Prensa de dupla-ação

A figura 2.10 mostra, esquematicamente, o uso de uma prensa de ação dupla. Nesse caso, o controle do prensa chapas pode ser efetuado pelo sistema hidráulico secundário da prensa. Na

maioria das vezes, os processos de estampagem profunda são executados com prensas hidráulicas de dupla-ação.

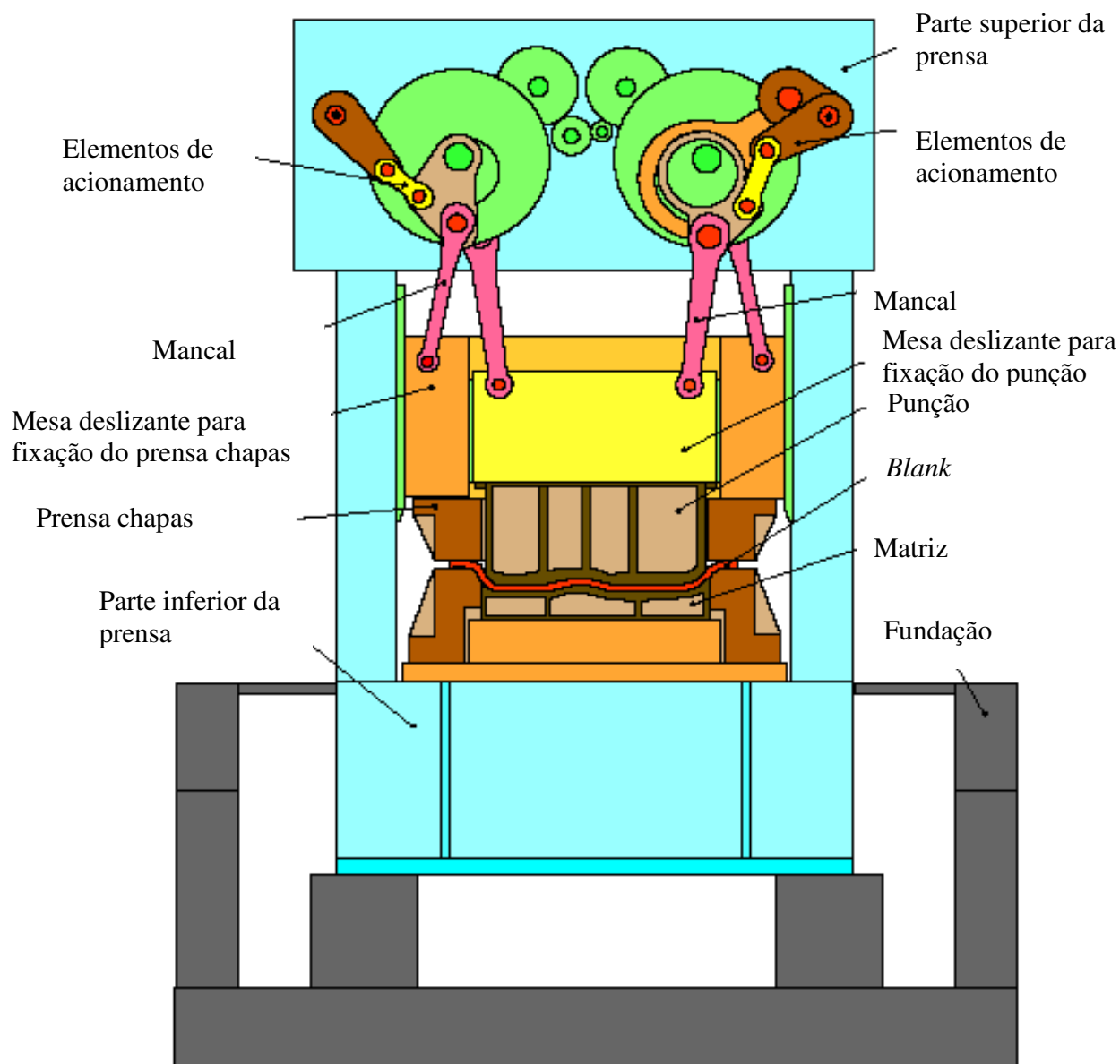


Figura 2.10 Prensa mecânica de ação dupla ou duplo efeito (METAL FORMING HANDBOOK, 1998).

2.9 Procedimentos de análise pelo Método de Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos considera a região de solução do problema formada por pequenos elementos interconectados entre si. A região em estudo é analiticamente modelada ou aproximada por um conjunto de elementos discretos pré-definidos. Uma vez que estes elementos possam ser colocados juntos em um número incontável de diferentes configurações, têm-se formas geométricas demasiadamente complexas em sua modelagem. Além disso, possibilita que o projetista tenha boas possibilidades no modo de aplicação de cargas e condições de contorno, o que torna este método o mais amplamente utilizado em análises estruturais nos dias atuais.

O Método dos Elementos Finitos é aplicável a uma grande faixa de problemas de valores de contorno em engenharia. Em um problema de valor de contorno, uma solução é procurada na região do corpo (domínio), enquanto nos contornos desta região os valores das variáveis dependentes (ou suas derivadas) são conhecidos.

Processo de análise por Elementos Finitos, esquematizado na figura 2.11 (BATHE, 1996 apud EVANGELISTA, 2000). Idealiza um problema físico por um modelo matemático e, requer hipóteses que conduzem a um conjunto de equações diferenciais que governam este modelo.

Sendo o método dos Elementos Finitos também um conjunto de procedimentos baseados em métodos numéricos, é necessário considerar-se a acuracidade da solução.

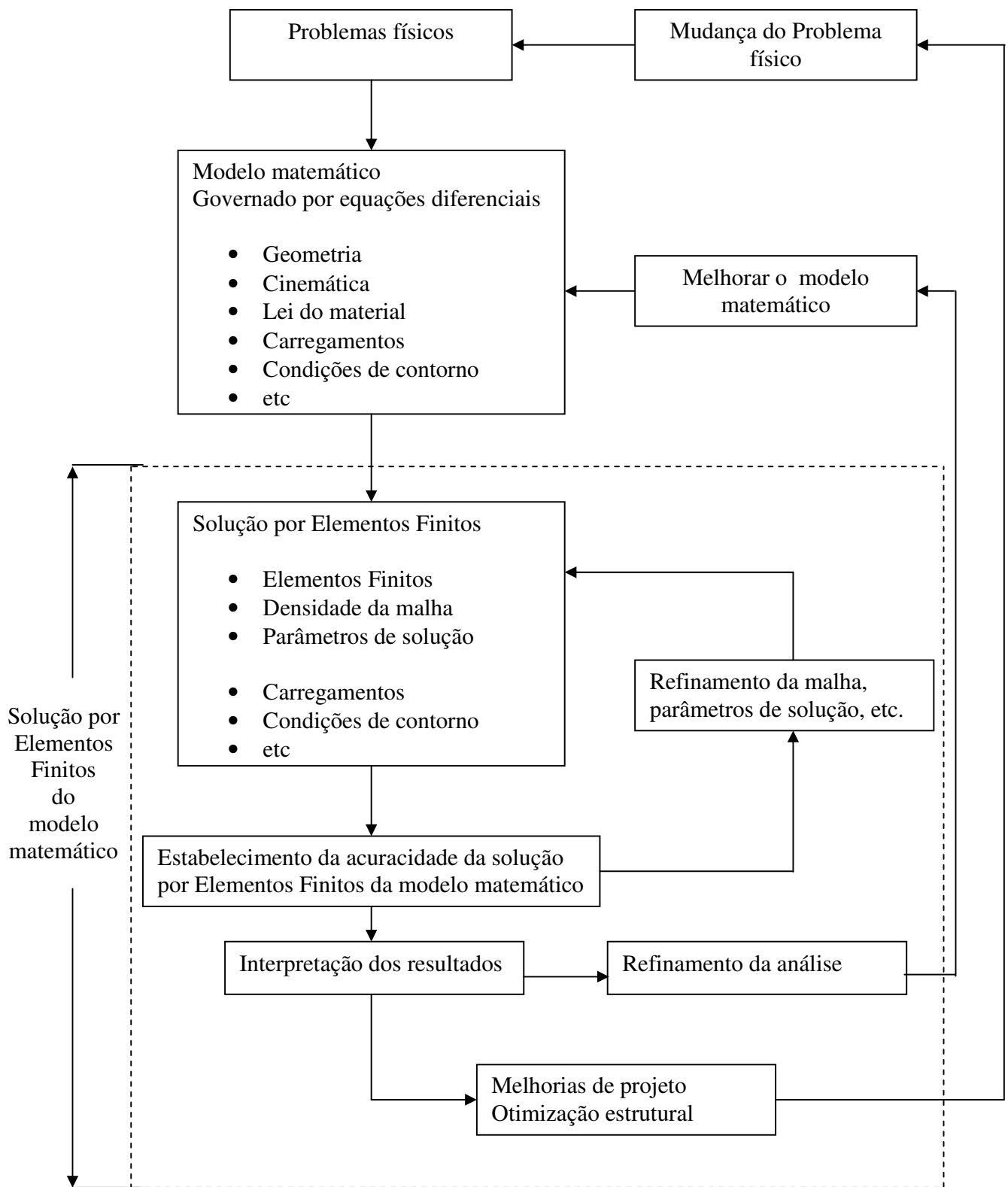


Figura 2.11 Processo de análise por Elementos Finitos, (BATHE, 1996 apud EVANGELISTA, 2000).

De acordo com Huebner (1982 apud EVANGELISTA, 2000), o método pode ser sumarizado basicamente em 3 etapas: pré-processamento, solução e pós-processamento.

Pré-processamento (*preprocessing*)

É a etapa de preparação do problema para posteriormente solucioná-lo. É nesta fase que se faz a modelagem do fenômeno, assumindo-se hipóteses, condições iniciais, condições de contorno e carregamentos, assim como a escolha do elemento, das propriedades dos materiais e da geometria que representará a forma do componente a ser analisado.

Solução (*solver*)

A solução do problema tem como ponto de partida o modelo configurado na etapa anterior. Portanto, a precisão das respostas depende basicamente da capacidade do engenheiro em abstrair o fenômeno. A solução é baseada em um algoritmo numérico que visa solucionar da maneira mais rápida e precisa uma equação diferencial com condições de contorno e/ou condições iniciais impostas pelo modelo.

Pós-Processamento (*postprocessing*)

Esta é a última etapa. Nela analisam-se os casos vindos das necessidades do engenheiro que modela o problema. Ou seja, ela é o conjunto solução da equação diferencial que descreve o fenômeno em estudo, sendo que em problemas mecânicos pode ser apresentada por:

- Deslocamento nodais;
- Deformações da geometria;
- Gradientes de tensão;
- Gradientes de temperatura;
- Deslocamento nodais ao longo do tempo;
- Frequências naturais e modos de vibrar da estrutura.

Esses recursos implementados computacionalmente permitem estimar a solução de um problema complexo em um tempo relativamente pequeno, fazendo com que se otimize o tempo de desenvolvimento.

2.9.1 Aplicação do Método dos Elementos Finitos a processos de conformação

Em processos práticos de conformação mecânica, um número de operações (pré-formação) é necessário para transformar uma geometria “simples” inicial em uma geometria “complexa”, mantendo-se as propriedades e tolerâncias desejadas. Para isso, um método de análise que pode tratar das condições de contorno de matrizes é necessário para aproveitar completamente as vantagens do Método dos Elementos Finitos na análise de conformação (MAKINNOUCHI, 1996 apud EVANGELISTA, 2000).

2.9.2 Método dos Elementos Finitos com formulação de material rígido-plástica ou rígido-viscoplástica:

A condição assumida de formulação de material rígido-plástica ou rígido-viscoplástica implica no fato de a tensão de escoamento ser uma função da deformação, taxa de deformação e temperatura e na resposta elástica do material ser desprezada. Esta condição é bem razoável na análise dos problemas de conformação, pois a porção elástica da deformação é desprezada na maioria das vezes. A formulação rígida-viscoplástica tem vantagens práticas significativas: primeiro, ela reduz o esforço e tempo computacional exigidos para a simulação de escoamento de material; segundo, ela estima as tensões, deformações, taxas de deformação, velocidades e temperaturas com precisão suficiente para propósitos práticos. Devido à desconsideração da região elástica do material, não é possível calcular a deformação inicial da chapa na face da matriz devido ao seu peso e o efeito *Springback* após a conformação (importante para o processo de estampagem).

2.9.3 Método dos Elementos Finitos com formulação de material elasto-plástica

Abordagem estática implícita:

Considerando-se que o processo de estampagem não é realmente um processo de impacto, assume-se um equilíbrio quase estático para o processo. O esquema estático implícito de integração no tempo satisfaz este requisito, desde que as condições de equilíbrio sejam asseguradas em cada passo de integração no tempo. Contudo, há que avaliar-se o tempo de convergência, devido principalmente à mudança do estado de atrito e contato entre a ferramenta e a chapa durante a interação.

Abordagem estática explícita:

De modo a solucionar a questão da convergência, resolvem-se as equações da matriz de rigidez sem iterações em cada passo de integração no tempo, limitando-se o tamanho de cada passo de modo a ser muito pequeno. Um grande número de incrementos é necessário para completar todo o processo de conformação sem acúmulo de erro, devido ao desprezo dos termos de ordem elevada na integração no tempo.

Abordagem dinâmica explícita:

Neste tipo de abordagem, as equações de equilíbrio dinâmico são a base da formulação. Tem-se a grande vantagem de não ser necessária a montagem e solução da matriz de rigidez, obtendo-se a solução para um *time step* mais rapidamente que em uma abordagem estática. Para obter-se a solução neste tipo de abordagem, o incremento de tempo deve ser limitado de maneira que a onda de dilatação não ultrapasse nenhum elemento. É comum utilizar-se *step times* de 10^{-6} segundos. Para reduzir o tempo de cálculo, a simulação é feita com o punção em velocidade aumentada, chegando-se a 100 vezes a velocidade real, o que pode conduzir a resultados não realísticos (MAMALIS et al. 1996 apud EVANGELISTA, 2000).

2.9.4 Dificuldades para simulação do processo de conformação

O desenvolvimento de métodos confiáveis para simular o processo de deformação de

metais têm como obstáculo o comportamento não linear do material, que ocorre devido às deformações de caráter inelástico, além de outros problemas, como a natureza transitória deste tipo de processo, a presença de grandes deslocamentos, grandes rotações, deformações finitas e os efeitos derivados do contato e atrito entre a chapa e a matriz. Tais características tornam o processo tão complexo que requerem o uso de sofisticados algoritmos numéricos e necessidades de grandes recursos computacionais.

Autores como Bathe (1996), Agelet de Saracibar e Oñate, (1991 apud EVANGELISTA, 2000) atribuem o comportamento não linear a três causas principais:

- Comportamento não linear do tipo cinemático devido a grandes deslocamentos, rotações e deformações que ocorrem no processo;
- Comportamento linear do tipo constitutivo, devido ao caráter inelástico (plástico, viscoplástico, degradação) que caracteriza as deformações do material;
- Caráter não linear das condições de contorno devido à interação (contato e atrito) que se produz entre os sólidos que atuam no processo (lâmina, matriz, moldes) ao longo de uma superfície de contato que não é conhecida *a priori* e que varia ao longo do processo.

No contexto da análise por Elementos Finitos de processos de conformação de metais, pode-se considerar duas formas de abordar o problema: a formulação de sólido ou formulação de fluxo. A formulação de sólido é o caso mais geral, em que a porção elástica da deformação não é desprezível frente às deformações inelásticas. É um caso particular da formulação de sólido; no entanto, é aplicável em muitos processos de conformação de metais. Do ponto de vista de análise computacional, a formulação de fluxo é muito mais econômica que a de sólido (EVANGELISTA, 2000).

2.9.5 Equacionamento de problemas estruturais mecânicos

Assume-se aqui por simplicidade, que todos os componentes de deslocamento estão prescritos sobre S_u (área do domínio onde ocorrem os deslocamentos), e todos os componentes de tração estão prescritos sobre S_f (área do domínio onde atuam as forças externas), tal que $S_u \cup S_f$

= S e $S_u \cap S_f = 0$. Analisando-se o equilíbrio de um corpo tridimensional em equilíbrio, sendo dados:

- Geometria do corpo;
- Carregamentos aplicados;
- Condições de contorno em S_u ;
- Lei de tensão por deformação do material;
- Estado inicial de tensões no corpo.

2.9.6 Ferramentas computacionais

O método dos Elementos Finitos tornou-se um elemento integrante na tecnologia de estampagem, o seu objetivo é reduzir custos, propiciar testes experimentais de baixo custo e rapidez, através da simulação computacional.

Qualquer implementação prática de considerações preliminares devem ser levadas em conta, as características especiais como:

- A correlação entre os parâmetros de processo: movimentos e forças, pressão interna e o movimento de fechar da ferramenta;
- Critérios de falha: deformação durante o processo e rompimento da peça por deformação excessiva;
- Comportamento do material: anisotropia e curva de escoamento;
- Descrição das condições de atrito material/ferramenta.

As seguintes informações podem ser obtidas através do programa de simulação:

- Deformação plástica equivalente;
- A tensão efetiva;

- Distribuição da espessura do material;
- Distribuição da taxa de deformação plástica;

Na indústria automobilística, bem como em outros domínios industriais, tem-se assistido a uma progressiva redução de tempo no desenvolvimento e confecção de novos produtos.

As crescentes preocupações ambientais, representadas pelo esforço colocado na redução do peso dos automóveis (e do seu consumo energético), conduziram à introdução de novos materiais, em geral mais leves.

Tal processo implicou uma reformulação dos modos de pensar, conceber e produzir, ocorrendo uma sucessiva aproximação aos conceitos da produção virtual.

A introdução de novos materiais e a crescente complexidade geométrica dos componentes conformados em chapa, que têm ocorrido nos últimos anos, parecem comprometer a desejada redução do tempo de concepção e produção de um novo modelo de automóvel.

A dificuldade tem sido resolvida com a adaptação de processos de concepção e projeto inovadores, através dos quais se consegue reduzir o número de testes experimentais (experimentação laboratorial) pela adaptação de testes virtuais ou numéricos (experimentação virtual) e, por uma maior interatividade entre as fases de concepção e projeto dos componentes e das ferramentas de conformação, a caminho da denominada produção virtual.

Atualmente, existem vários programas comerciais largamente utilizados na indústria. É uma evolução notável, que traduz bem o esforço na investigação e no desenvolvimento da modelação e simulação numérica dos processos de conformação de chapa.

As estimativas indicam que a utilização da simulação numérica no apoio à concepção e ao projeto reduz os custos de desenvolvimento de alguns componentes de automóveis e permite a fabricação de conformados de geometria mais complexa, acelera a introdução de novos materiais e reduz a fase de projeto.

A realização de simulações numéricas requer igualmente que o operador conheça com algum detalhe o programa de simulação que vai utilizar: métodos numéricos, parâmetros numéricos, algoritmos a selecionar, modelação do comportamento mecânico dos materiais.

Por muito simples e interativa que seja a utilização deste tipo de programas, os riscos são elevados se a formação do operador não for adequada. Uma simulação de um determinado tipo de problema pode conduzir a resultados totalmente afastados da realidade apenas por uma seleção incorreta de determinados parâmetros.

2.10 Descrição do processo de hidroconformação

A hidroconformação, principalmente de peças tubulares, é bem conhecida há anos como uma técnica que passa por um desenvolvimento extremamente dinâmico, especialmente em aplicações na indústria automotiva, na Alemanha e nos Estados Unidos (MEIK VAHL et al. 1999).

Os exemplos de conceitos de peças leves hidroconformadas são dados na figura 2.12. A tecnologia de armação obtida através do processo de hidroconformação é uma resposta para o projeto de peças leves que utilizam perfis de alumínio extrudados.

Nos perfis moldados e *blanks*, no processo de hidroconformação os mesmos são calibrados pela elevada pressão interna até atingirem as especificações propostas no projeto. Estes dois exemplos mostram que a hidroconformação desempenha um papel importante na realização do projeto de peças leve.

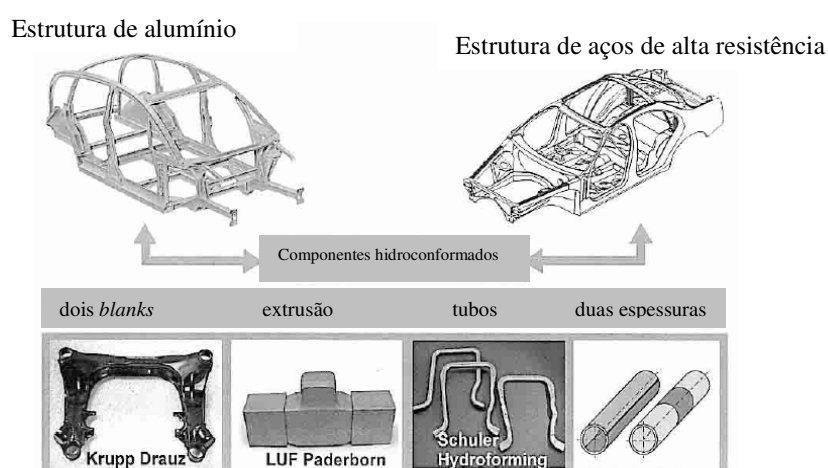


Figura 2.12 Exemplos de conceitos de peças leves (MEIK VAHL et al.1999).

A hidroconformação é usada principalmente para a obtenção de produtos tubulares, mas novas variantes estão sendo estudadas. O uso dos tubos preparados pode adaptar a peça de uma maneira flexível. Além disso, o uso de pares de chapas de metal como produto semi-acabado aumenta o campo da hidroconformação com uma nova gama de geometrias que podem ser realizadas por esta técnica.

O crescente mercado da hidroconformação e a presença de novas variantes induziram a propor um fluxograma para classificar o processo conforme mostrado na figura 2.13. A conformação dos tubos e dos *blanks* que podem ser perfurados, cortados e de unir através da pressão interna. Por exemplo, os excêntricos e o eixo podem ser unidos com o processo da hidroconformação (MEIK VAHL et al.1999).

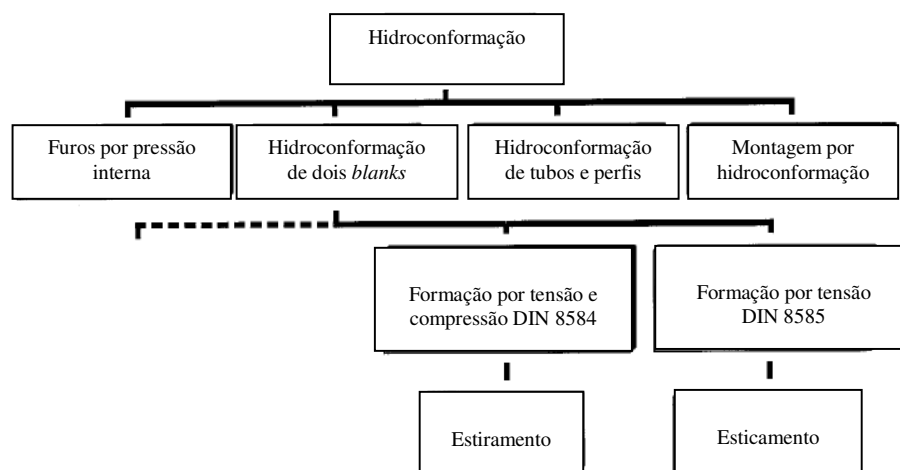


Figura 2.13 Fluxograma para classificar o processo (MEIK VAHL et al. 1999).

2.10.1 Hidroconformação de pares de chapas metálicas

A hidroconformação de pares de chapas metálicas é um processo para a produção de corpos ocos e foi apresentada por autores diferentes (SCHMOECKEL et al. 1997). Agora, o tópico do trabalho de pesquisa trata das investigações a respeito do potencial em relação às aplicações industriais.

Em princípio, duas razões principais impulsionam a mudança de produtos não-preparados para o processamento com pressão interna elevada a partir de tubos para uso dos *blanks*. Primeiramente, o uso dos tubos limita os possíveis produtos às estruturas longitudinalmente orientadas com possibilidades limitadas para a expansão. A outra razão pode ser encontrada na limitada gama de materiais e qualidade para os tubos na comparação com os *blanks* de modo que nem todas as aplicações possíveis possam ser realizadas com estes materiais (MEIK VAHL et al.1999).

A comparação com o processo clássico de embutimento profundo mostra que a hidroconformação de pares de chapas podem reduzir os custos do trabalho feito em ferramentas (estampos). Além disso, o correto posicionamento dos *blanks* depois do processo de conformação, permite a montagem das chapas sem ter que retirar as mesmas do estampo. Isto pode levar à redução de custos porque poucas operações são necessárias. Por outro lado, o tempo do ciclo do processo de conformação em si é mais longo do que o ciclo do processo clássico de embutimento profundo; assim, a principal utilização desta tecnologia pode ser destinada para a produção em média e pequena escala.

Um aspecto principal no desenvolvimento da hidroconformação de chapas de metal é o uso do equipamento que introduz o fluido entre os *blanks*. Nesse caso, diferentes variantes técnicas foram desenvolvidas e ainda estão sob investigação.

A vedação dos corpos ocos conformados por duas chapas ainda é crítica. Os primeiros estudos com a injeção de fluido sob pressão entre dois *blanks* foram feitos com pares de chapas que foram soldados ao longo de sua borda. Este método mostrou a viabilidade do processo na primeira vez (SÜNKEL, R. et al. 1996). Não obstante, a conexão rígida dos dois limites das chapas restringe o grau de simetria que se pode obter entre os dois *blanks*. Se o *blank* encher completamente a cavidade mais baixa da ferramenta, o movimento do material na área do prensa chapas para. Isso implica que, na cavidade mais profunda da ferramenta haverá falta de material da parte externa, e o aumento da tensão interna provoca a ruptura do mesmo.

A cadeia de processo que está sob investigação na universidade de *Erlangen* realiza a hidroconformação de pares de chapas não-soldadas, conforme figura 2.14, para permitir um movimento dos *blanks* relativos de cada uma. Isto evita o acoplamento direto dos *blanks* e suas deformações.

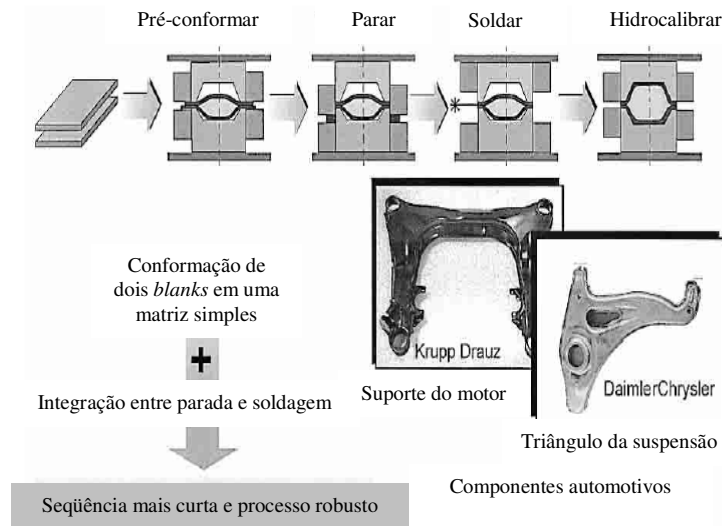


Figura 2.14 Hidroconformação de pares de chapas não-soldadas (MEIK VAHL et al. 1999).

As experiências mostraram que é possível manter o volume do fluido entre os *blanks*, selados pela força do prensa chapas, enquanto que o movimento de cada um em relação ao outro não é atrapalhado por tal ação (HEIN, P. et al. 1999).

Para um processo bem sucedido, é necessário controlar o comportamento de retração da área de flange na cavidade e este descreve as limitações físicas desse processo como consequência. A taxa de retração durante o aumento da pressão interna influencia diretamente na distribuição da tensão na peça. Conseqüentemente, a força do prensa chapas é o principal parâmetro de controle do processo dos *blanks* que apresentam simetria rotacional. A figura 2.15 mostra os limites de processamento definidos pelo vazamento (a pressão do prensa chapas é insuficiente para selar os dois *blanks*) e pela ruptura do material. Deve-se mencionar que a geometria da ferramenta é retangular entre o fundo e a borda. Esta geometria foi escolhida para que possa determinar uma relação entre os parâmetros de controle e o raio mínimo alcançável, sem a ruptura no fundo da cavidade. Quanto mais elevado o limite de rachadura, menores os raios e melhor a exatidão da forma a ser alcançada. A força do prensa chapas é mantida constante durante o aumento do nível da pressão do fluido.

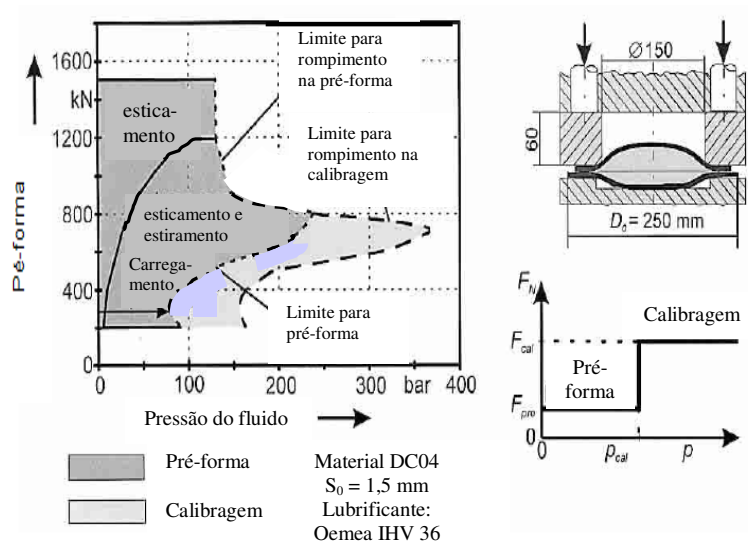


Figura 2.15 Limites de processamento definido pelo vazamento (MEIK VAHL et al. 1999).

A aplicação de pequenas forças no prensa chapas leva a uma limitação do processo pelo vazamento do fluido, pois a pressão entre os *blanks* é insuficiente para realizar a vedação do fluido. Após ter alcançado este limite no processo de pré-conformação, é possível aplicar uma força muito elevada no prensa chapas para selar os vazamentos, que param da mesma maneira que a retração do material.

As forças elevadas do prensa chapas no estágio de pré-conformação conduzem à ruptura antes que o vazamento ocorra. Nesta região do diagrama, a conformação é realizada somente pelo esticamento do material sem retração. Se a pressão suficiente do fluido for alcançada, a retração inicia-se. Isso tem uma influência notável na pressão, na rachadura e também na exatidão da forma. Quanto mais a retração pode ser realizada, deve-se dizer que menor a força escolhida do prensa chapas, maiores limites de rachadura podem ser alcançados.

As curvas na figura 2.15 mostram que existe uma otimização para o controle do processo. Que pode ser alcançada por uma força elevada do prensa chapas para manter a função da vedação e em um nível mais baixo para permitir a retração do material do flange (GEIGER, M. et al. 1999).

2.10.2 Tecnologia do processo e exemplo de aplicação

A técnica da hidroconformação baseia-se na injeção de um fluido em um tubo, junto com uma compressão axial ou radial que é obtida através da relação de expansão da parede. Este processo inclui em geral a seguinte seqüência: expansão, compressão e calibração (BORTOLUSSI, R.; BUTTON, S. T., 2002). Hidroconformação é categorizada como um processo de conformação a frio, e é usado para a fabricação de corpos ocos e geometricamente complexos obtidos através de um perfil tubular ou qualquer outros perfis já pré-conformados (SCHIEBL, G. et al. 1992; GEIGER, M. et al. 1997; SCHMOECKEL, D. et al. 1997), como podemos ver na figura 2.16 abaixo: Esta técnica, permite obter elementos de geometria complexa com uma rigidez elevada, resistente e um peso otimizado.



Fig. 2.16 Perfil já pré-conformado (METAL FORMING HANDBOOK, 1998).

A hidroconformação, principalmente de peças tubulares, é bastante conhecida há anos como uma técnica que passa por um desenvolvimento extremamente dinâmico, especialmente em aplicações na indústria automotiva, na Alemanha e nos Estados Unidos. A alta pressão causada por leis ambientais e pelo mercado em si fez com que novos conceitos no desenvolvimento automotivo fossem criados. A redução do consumo de combustível pode ser feita através de uma otimização da tração e da redução de massa do chassi.

As aplicações da hidroconformação no setor automobilístico são variadas, são feitos componentes como longarinas do assoalho, tubulações de distribuição de gases, trilhos do teto, de *spoilers*, etc.

Neste sentido, com respeito à produção tradicional desses componentes, a hidroconformação elimina nas peças os pontos de solda, quando as mesmas forem produzidas em um só componente.

Este processo tem uma precisão elevada nas dimensões, e nas peças são reduzidas as partes, peso; conseqüentemente melhora a segurança do automóvel (<http://navactiva.com/web> 2000).

Existem dois tipos básicos de hidroconformação conforme mostrado na figura 2.17 abaixo.

- Hidroconformação livre;
- Hidroconformação fechada (Ferramenta).

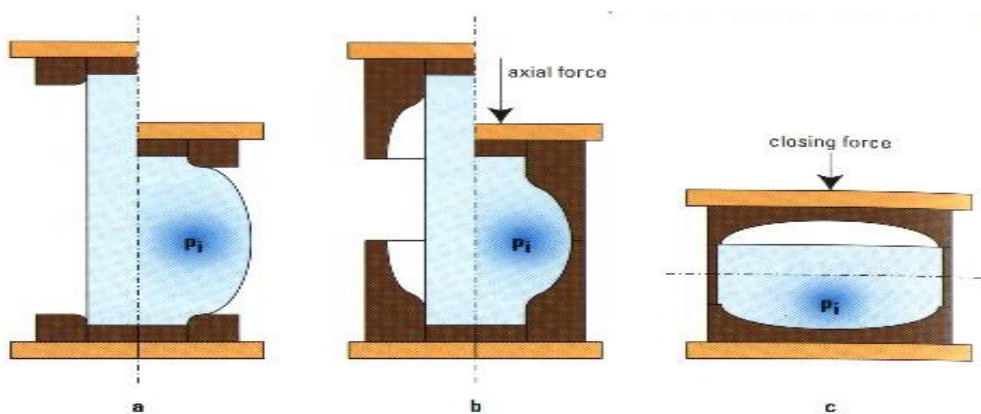


Figura 2.17 Tipos básicos de hidroconformação (METAL FORMING HANDBOOK, 1998).

Onde:

A: Hidroconformação livre;

B e C: Hidroconformação fechada;

Pi: Pressão Interna.

Para melhor ilustrar o processo de hidroconformação, a figura 2.18 mostra a seqüência de produção de uma conexão do tipo “T”.

Para a produção desta peça será utilizada uma prensa hidráulica especial que é equipada com a ferramenta para a produção da tal peça (neste caso será utilizada a hidroconformação fechada). Dependendo da peça a ser produzida, a ferramenta têm dois cilindros horizontais posicionados relativamente nas bocas do tubo que produzirão durante a fabricação da peça em questão a contrapressão necessária para a conformação do tubo no perfil externo. No início do processo, o tubo está fechado pelos cilindros axiais, e o tubo é preenchido com uma pressão média. Já no meio do processo, os cilindros comprimem o tubo e a pressão interna do tubo é elevada até existir um inchaço que permite com que as paredes tomem o perfil desejado (perfil da ferramenta). Após o processo de conformação, é necessária a calibração da peça, processo este que garante a qualidade da peça final bem como sua reprodutibilidade (METAL FORMING HANDBOOK, 1998).

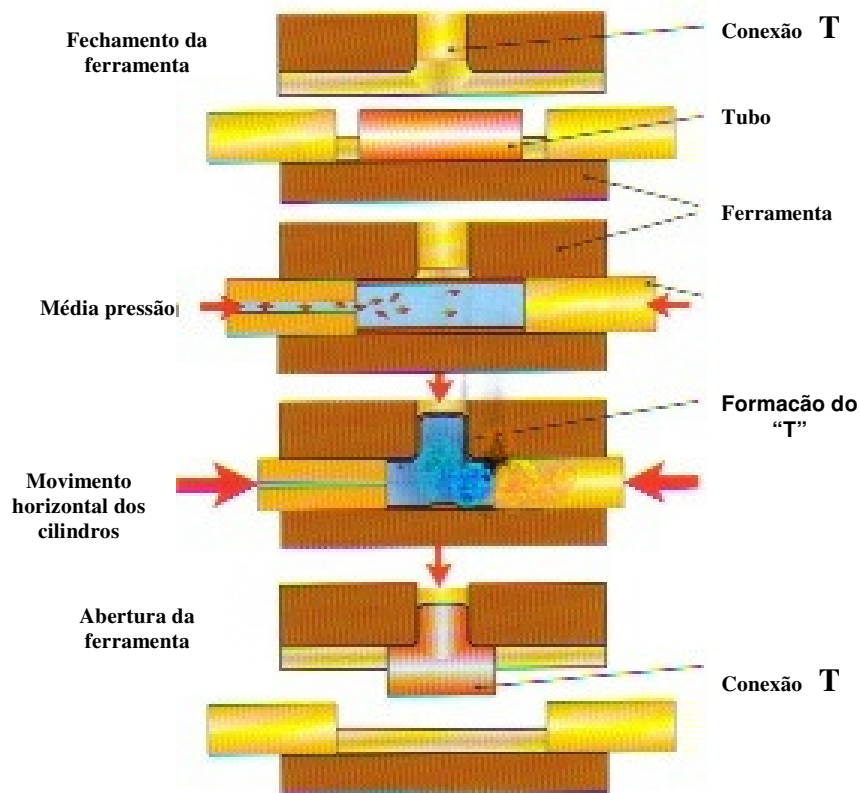


Figura 2.18 Técnica de hidroconformação baseada na injeção de líquido (METAL FORMING HANDBOOK, 1998).

A expansão no interior da peça acontece quando o líquido é injetado e é acompanhado por uma compressão na direção radial ou axial provenientes dos cilindros; como consequência a peça que já estava com uma forte deformação é levada contra as paredes da ferramenta, obtendo-se posteriormente calibragem final de peça. Por este método, a peça é pressionada contra as paredes da ferramenta que determinará o seu contorno final, atingindo-se um alto grau de estabilidade dimensional e uma excelente qualidade mecânica (METAL FORMING HANDBOOK, 1998).

2.10.3 Tipos de componentes de força durante o processo de hidroconformação

Uma diferença básica entre os componentes hidroconformados que permitem as condições do processo é baseado na geometria da peça; assim podemos só utilizar:

- Expansão contínua e compressão;
- Expansão só parcial e compressão;
- Só calibração.

O componente mostrado na figura 2.19 é caracterizado por um alto grau de deformação devido ao fluxo material axial que toma lugares em cima do contorno inteiro da peça. Eles são ampliados e são comprimidos durante o processo. Como resultado do fluxo, graus mais altos de deformação são possíveis, alterando a densidade da parede.

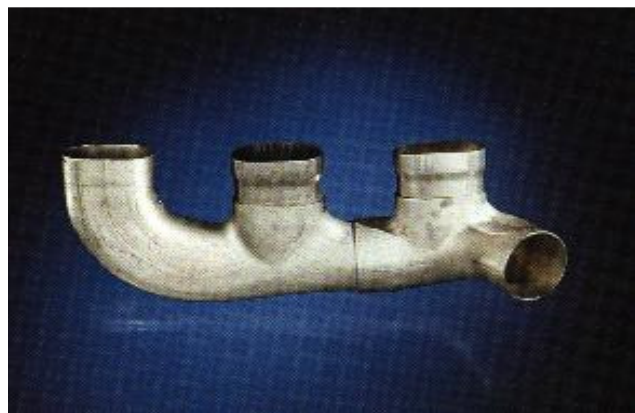


Figura 2.19 Tipos de componentes hidroconformados (METAL FORMING HANDBOOK, 1998).

2.10.4 Campos de aplicações

As possibilidades estruturais oferecidas pela hidroconformação são prosperamente usadas em várias aplicações para a fabricação de componentes que exigem qualidade e resistência mecânica, além de ter uma vida maior e um peso final menor. Assim, após vários desenvolvimentos, três grupos de usuários principais emergiram como os mais significantes durante os mais recentes anos; são eles:

- A engenharia para automóvel;
- Indústrias de instalação sanitária e doméstica;
- Fabricantes de componentes de tubos.

Atualmente, observa-se uma grande preocupação no projeto de um componente, não apenas pela sua funcionabilidade como também pela sua produção. A engenharia simultânea tem se tornado um importante aliado no campo de projetos de produtos, com clientes e planejadores de processos cooperando desde os estágios iniciais até a determinação das características do produto final.

Aqui, os seguintes parâmetros influenciam a seleção do material da ferramenta e o necessário:

- Revestimento ou tratamento térmico;
- A geometria da peça;
- O material da peça;
- A máxima pressão interna admissível;
- O sistema de vedação.

A figura 2.20 ilustra o *lay-out* de uma ferramenta para o processo de hidroconformação. A ferramenta inclui uma parte superior e uma inferior que é usado para acomodar os elementos.

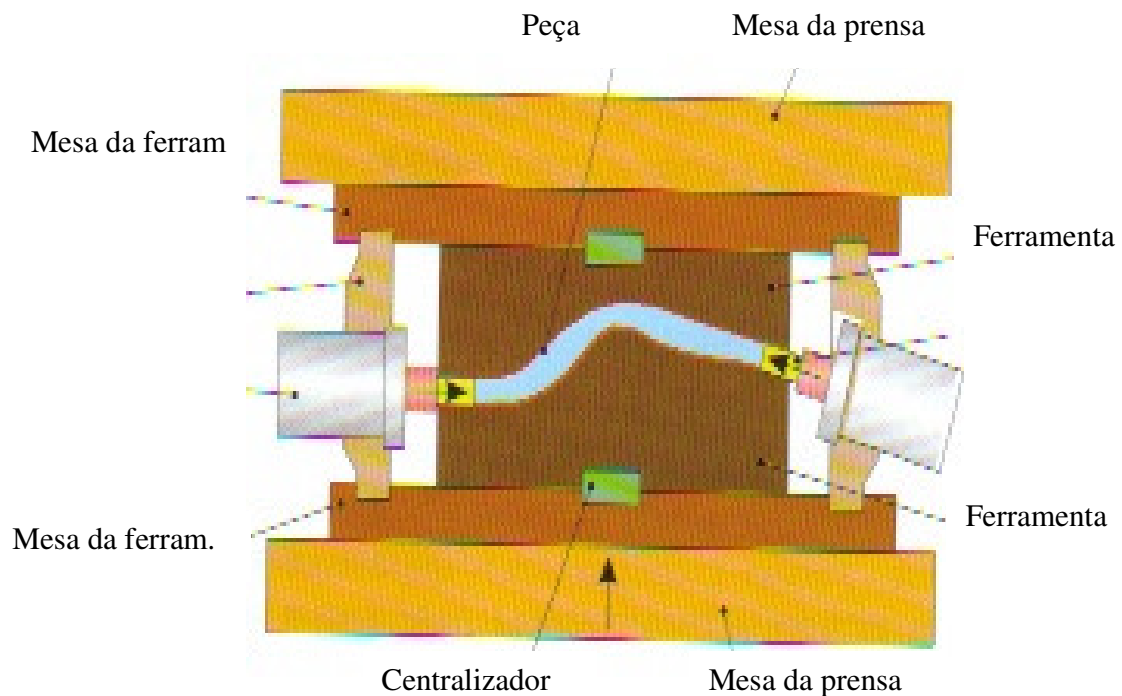


Figura 2.20 Materiais e tubos para produção de peças por hidroconformação (METAL FORMING HANDBOOK, 1998).

2.10.5 Materiais e tratamentos térmicos

Basicamente, os mesmos materiais que podem ser utilizados em outros processos de conformação a frio são também satisfatórios para aplicações na hidroconformação.

Os melhores resultados de conformação são obtidos utilizando-se materiais com um alto grau de alongamento.

Se a estampabilidade do material é excedida durante os estágios do processo de fabricação, a conformação deve ser feita utilizando-se vários estágios (estampagem progressiva) com recozimentos intermediários. Por isso, devido aos custos adicionais envolvidos, tratamentos

térmicos devem ser utilizados quando todas as outras possibilidades, por exemplo, projeto ou modificações do material, tiverem sido exauridas.

O método preferível para tratamento térmico para aços austeníticos é com a utilização de gás inerte, para pequenas peças um forno contínuo pode ser utilizado.

No caso de aços ferríticos, o tipo e o tratamento térmico mais prático dependerá do respectivo material e de seu histórico de estampabilidade, a princípio dois possíveis processos podem ser utilizados: recristalização e o recozimento normal.

Os métodos mais favoráveis de tratamentos térmicos devem ser determinados caso a caso e uma particular atenção deve ser dispensada ao comportamento da vida útil do material.

2.10.6 Pré-formas e preparação

São utilizados os seguintes materiais semi-acabados para a hidroconformação:

- Tubos com costura ou sem-costura;
- Tubos de paredes duplas;
- Perfis extrudados;
- soldados ou tubos pré-conformados.

Em geral, são mais utilizados os tubos de seção circular; tubos soldados e extrudados com seções não circulares são utilizados menos frequentemente.

Os passos necessários, para uma produção tecnicamente e economicamente boa são descritos a seguir, em referência à tubos cortados utilizados como *blanks*:

O processo de corte de tubos deve ser preciso para evitar efeitos indesejáveis, tais como, vazamentos no começo da seqüência do processo. Estes conduziriam a falhas na peça. Diferenças na espessura das paredes ao longo da seção dos tubos resultam em um alto grau de refugo e em casos extremos até falhas na peça acabada. As seguintes tolerâncias são geralmente admissíveis: comprimento; +/- 0,5 mm, o ângulo de corte da seção em relação ao eixo longitudinal; +/- 0,5 °.

A concentricidade dos tubos é um fator importante para evitar problemas quando a ferramenta é fechada; os tubos devem ser limpos de quaisquer sujeiras, podendo estas danificar a superfície da ferramenta.

A pré-forma ideal para o processo de hidroconformação são tubos cilíndricos com excelente concentricidade. Este tipo de falha conduz a diferenças na espessura da parede das peças e uma má conformação devido a problemas localizados.

As operações de dobrar são realizadas em mandriz, perfiz, comes ou máquinas de dobrar por indução, dependendo do raio de dobra, tubo e espessura da parede.

Erros na operação de dobrar, como dobras na superfície inferior, marcas deixadas por grampos, devem ser sempre evitadas.

2.11 Procedimentos utilizados no dia a dia dos profissionais envolvidos na conformação

Os procedimentos que serão mostrados a seguir, fazem parte da experiência de vinte e quatro anos do autor deste trabalho, todos esses anos dedicados ao processo de conformação de chapas.

2.11.1 Projeto

Quando o projetista iniciar o projeto para confecção de um estampo, alguns procedimentos devem ser levados em conta como:

- Tipo de prensa que vai produzir;
- Altura da ferramenta fechada;
- Tipo de automação;
- Sistema de nitrogênio ou almofada de prensa;
- Alimentação de chapas.

2.11.2 Confeção das ferramentas para embutimento profundo

No processo de embutimento a pressão exercida sobre o prensa chapas é fundamental para a obtenção de peças com qualidade.

A operação de embutimento caracteriza-se na maioria das vezes por necessitar de uma boa pressão inicial de sujeição, para permitir o controle de fluxo de material de modo a evitar rugas e encruamentos, minimizando a possibilidade de ruptura que ocorre no final do processo.

O embutimento por estiramento ou “*stretch draw*” é um processo cuja característica principal é a ocorrência do estiramento do material de dentro para fora da área do *blank*, propiciando uma maior rigidez às peças que possuem baixa profundidade de embutimento e grandes áreas planas, como painéis de cofre, portas, tetos e para-lamas de veículos, ou qualquer outro painel de características semelhantes. Esta operação minimiza o efeito de flambagem da superfície do painel, requerendo, entretanto grandes forças de sujeição.

2.11.3 Elaboração do processo de montagem e usinagem das ferramentas

Para elaboração do processo de montagem e usinagem de uma ferramenta algumas considerações devem ser levadas em conta como:

- Espessura da chapa;
- Classe do produto (peça interna ou externa);
- Parte padrão da ferramenta;
- Operação da ferramenta.

A espessura da chapa é a referência para dar a folga entre o punção e a matriz na usinagem das superfícies (o *off-set*). É importante saber a classe do produto, pois serve de parâmetro para determinar o grau de acabamento. Ex.: Se a peça for externa como porta, teto, etc, deve-se pedir uma rugosidade de 0,005 mm, se for interna a rugosidade pode ser de 0,01 mm. A parte padrão é fundamental, pois essa informação é que vai determinar em qual lado que deverá ser dado a folga.

2.11.4 Linha matemática

É considerada linha matemática:

- a superfície padrão do produto;
- o contorno nominal de um movimento;
- o contorno nominal de um alojamento.

A linha matemática é a linha de referência para a orientação de qual lado será dada a folga “off-set”.

O “off-set” é um termo usado para instruir o programador a criar uma linha paralela e constante à linha matemática, com uma distância pré-determinada.

2.11.5 Rugosidade

A rugosidade refere-se ao grau de acabamento que será dado na superfície usinada, isto é, quanto menor o número que indica rugosidade melhor o grau de acabamento da superfície conforme a tabela 2.1.

Tabela 2.1 Rugosidades utilizadas para acabamento de superfícies (ferramentaria VW).

Operações		Superfície (mm)	Contorno (mm)	Corte (mm)	Flange (mm)
Embutir	Prensa chapas	0,005	0,2		
	Punção	0,005	0,02		
	Matriz	0,01			
Recortar e furar	Facas inferiores	0,01		0,005	
	Facas superiores	0,05		0,005	
	Prensa chapas	0,02	0,05		
Calibrar	Punção	0,005	0,02		
	Matriz	0,01	0,02		
	Prensa chapas	0,01	0,02		
Flangear	Punção	0,005	0,02		0,005
	Matriz	0,005	0,02		0,005
	Prensa chapas	0,01	0,02		0,005

Para determinar o grau de acabamento de alojamentos para aços e postigos, ou para outras usinagens que se fizerem necessárias deve-se adotar o seguinte parâmetro conforme tabela 2.2.

Tabela 2.2 Grau de acabamento (ferramentaria VW).

Grau de Acabamento			
Desbastado	$\sqrt{100}$	▽	Rug 0,15 mm
Alisado	$\sqrt{25}$	▽▽	Rug 0,01 mm
Retificado	$\sqrt{6,3}$	▽▽▽	Rug 0,005 mm

2.11.6 Off-set

O *off-set* nada mais é do que a folga que é dada quando usina-se uma superfície, um contorno, um alojamento e a linha de corte. Conforme exemplo das figuras 2.21, 2.22 e 2.23 abaixo.

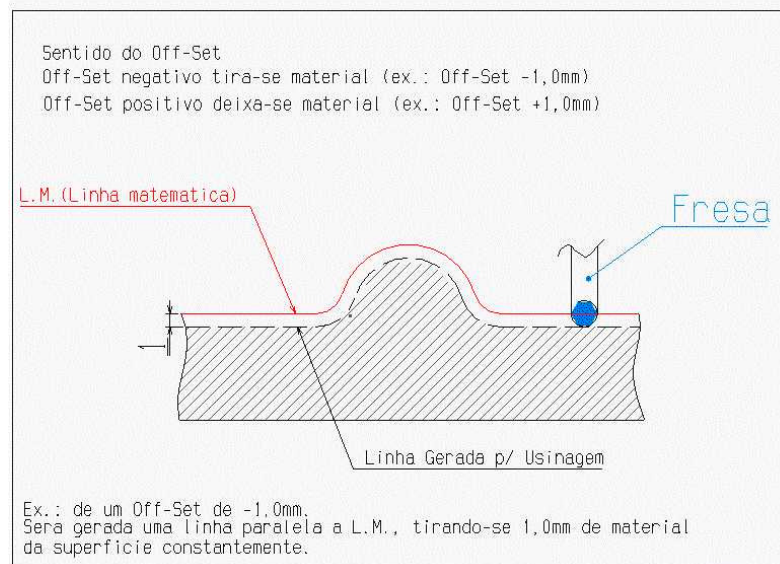


Figura 2.21 Folga para usinagem de uma superfície (ferramentaria VW).

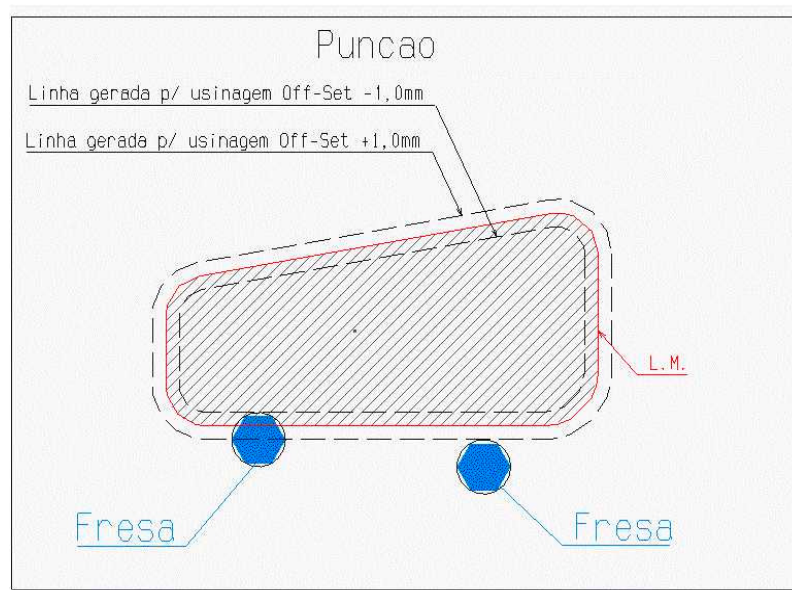


Figura 2.22 Folga para usinagem do contorno do punção (ferramentaria VW).

Obs.: No punção, a folga adotada para usinagem é negativa (*off-set* – 1,0 mm) onde a linha do contorno fica menor que a linha matemática, na usinagem de um alojamento, se a folga for negativa (*off-set* – 1,0 mm) o mesmo fica maior.

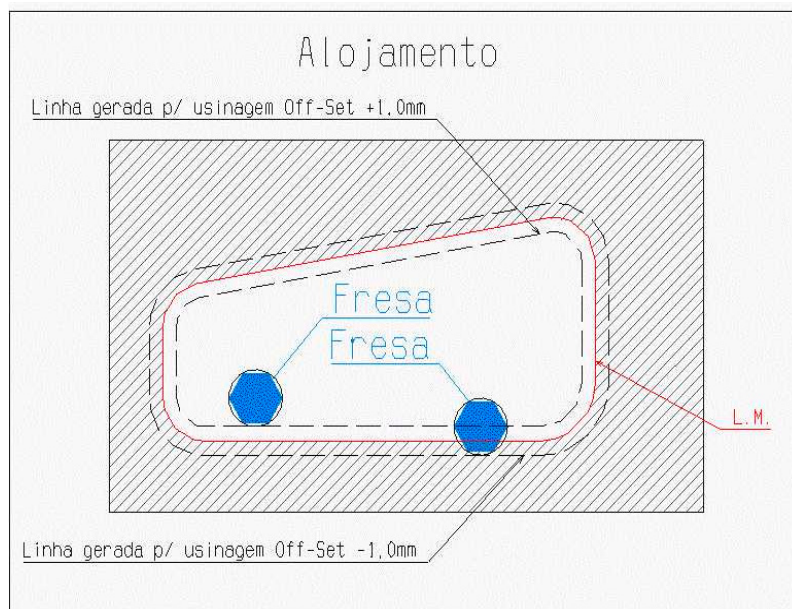


Figura 2.23 Folga para usinagem de um alojamento (ferramentaria VW).

2.11.7 Superfície

A parte padrão da ferramenta deve ter a superfície copiada nominal, já a parte oposta deve ter a superfície copiada com a mesma medida da espessura da chapa.

Nas ferramentas de embutimento, além da folga com a medida da espessura da chapa, deve-se aplicar na superfície da matriz uma folga a mais de 10 % da espessura da chapa (tirando material, *off-set* negativo) para facilitar os trabalhos no ajuste (*Try-Out*).

Nas ferramentas de embutimento, onde a dimensão da peça ultrapasse a 1500 mm, deverá ser aplicada uma compensação de 7 % partindo do centro (para cada lado).

2.11.8 Esticadores (quebra rugas)

Os esticadores (quebra rugas) não devem ser afetados pela folga extra, de 10 % dada na

superfície, conforme figura 2.24, pois se a mesma for dada na parede lateral dos esticadores, o mesmo ficará com a folga em excesso.

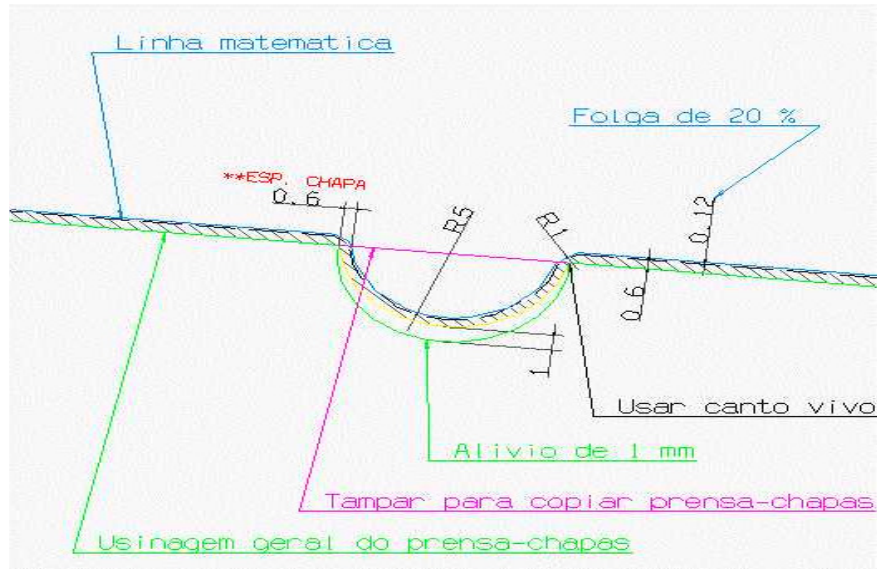


Figura 2.24 Usinagem de esticadores (quebra rugas)(ferramentariaVW).

2.11.9 Folgas de linhas de movimento

As folgas de linha de movimento (punção x prensa chapas ou sujeitador) devem seguir a tabela 2.3 mostrada.

Tabela 2.3 folga de linha de movimento (ferramentaria VW).

Folga entre punção e prensa chapas ou (sujeitador)			
Operações	Ferramentas		
	Pequena	Média	Grande
Embutimento Externo	1,0 mm	1,0 mm	1,0 mm
Embutimento interno	0,5 mm a 1,0 mm	1,0 mm a 2,0 mm	2,0 mm a 3,0 mm
Flangear Recortar Furar Calibrar	0,3 mm	0,3 mm	0,3 mm
	0,5 mm	0,5 mm	0,5 mm
	0,3 mm	0,3 mm	0,3 mm

Nota: Ferramentas com as seguintes dimensões são consideradas:

- Menores que 1500 mm por 1500 mm -- Pequena
- Com aproximadamente 1800 mm por 1800 mm -- Média
- Maiores que 1800 mm por 1800 mm -- Grande

2.11.10 Linha de movimento da ferramenta para embutimento profundo

Quando a superfície copiada de um punção for nominal, seu contorno também deverá ser nominal, com isso, toda a folga de movimento será dada no contorno do prensa chapas ou sujeitador.

No entanto, se o punção tiver sua superfície copiada com folga, seu contorno também deverá ter a folga com a mesma medida e com isso o contorno do prensa chapas deverá receber apenas a folga suficiente para completar a medida total.

Caso a superfície do punção tenha duas folgas distintas (duas espessuras de chapa), deve-se adotar também as mesmas folgas, tanto para o contorno do punção quanto para o do prensa chapas (folga do prensa chapas + folga do punção = folga total).

3 ESTADO DA ARTE

3.1 Considerações sobre o estado da arte

De acordo com a literatura existem várias técnicas para estampagem, desde pequenas peças para automóveis, até peças para aeronaves.

Segundo Kirmbe, H. et al. (1998), o processo completo da hidroconformação de pares de chapas metálicas ainda está em um estado pré-industrial e o potencial tecnológico e econômico desse novo processo de produção ainda não pode ser finalmente avaliado. A respeito da aplicação aos componentes complexos, há ainda falta do conhecimento básico a respeito do controle e da robustez. Análises dos riscos e possibilidades e os cálculos econômicos preliminares têm sido

feitos para dar indicativos às áreas nas quais os esforços devem ser concentrados, visando a uma introdução bem sucedida no ambiente industrial

De uma maneira geral, pode-se obter peças estampadas por embutimento (*deep drawing*), estampagem, dobramento de chapas e calandragem, estiramento de chapas, estiramento no plano da chapa, hidroconformação (*hydroforming*) em tubos, conformação por elastômeros, conformação a vácuo, eletromagnética, por explosão (SCHAEFFER, 2004).

Para a técnica de interesse neste trabalho, hidroconformação de chapas onde as formas da matriz serão substituídas por um fluido, foram encontrados alguns trabalhos: (BORTOLUSSI; BUTTON, 2002) utilizaram o método de hidroconformação para tubos onde citam que a técnica de hidroconformação é baseada na injeção de líquido e o tubo é comprimido radial e axialmente. Este processo compreende em geral, as seguintes fases: expansão, compressão e calibragem; e, também que hidroconformação é considerado um processo de conformação a frio e é utilizado para fabricação de peças vazadas de geometria altamente complexas de tubos ou perfis.

De acordo com (METAL FORMING HANDBOOK, 1998), a função de uma prensa é transferir uma ou mais forças e movimentos a uma ferramenta com a finalidade de dar forma. É importante conhecer o projeto da prensa para a utilização no processo a ser usado. Dependendo da aplicação pretendida, a prensa deve ser projetada para executar um processo específico.

Um dos alvos da indústria de conformação de chapas é a minimização dos custos e a otimização de seus produtos com relação a peso, e das características da força e da rigidez. Na busca para processos de produção alternativos, à hidroconformação para a manufatura foi oferecido um potencial técnico e econômico interessante aos fabricantes da chapa de metal.

Hidroacero, uma empresa do grupo *Gestamp*, produzirá para a *Opel* o novo Corsa da *General Motors* as partes ao *crossmember* e ao *subframe*, 650.000 unidades de cada, com a tecnologia da hidroconformação, pela primeira vez dentro da Espanha, que é o terceiro país dentro da Europa a utilizar esta técnica (<http://navactiva.com/web/es/amngm/act/>).

A empresa *Gestamp* conta com um centro técnico de identificação e desenvolvimento em Barcelona, onde todos os projetos novos da hidroconformação são desenvolvidos (<http://www.navactiva.com/web/es/act/noticias/2004/05/26/25774.jsp>).

Hoje a *Schuler*, fabricante de máquinas e ferramentas para estampagem, é uma das empresas que domina a técnica da hidroconformação. Dentro da empresa existem *softwares* para modelar todo o processo, desde o projeto até a produção.

Além de fornecer máquinas, é um dos maiores fornecedores de produtos obtidos pelo método da hidroconformação que abastecem a Alemanha. A *Schuler* atua dentro dos Estados Unidos com a mesma linha de produtos.(http://www.schulergroup.com/en/30_products/60hydroforming/41schulerhydroformingusa/index.php).

Os autores descrevem a hidroconformação como uma técnica baseada na injeção de um fluido, com compressão axial ou radial e pela expansão em que a peça a ser conformada vai de encontro às paredes da matriz.

Numa comparação entre o processo de hidroconformação e outros processos para a produção do mesmo tipo de peça, em que consiste a conformação; temos que levar em conta todos os aspectos técnicos como também aspectos econômicos. Também devem ser incluídos os passos subsequentes de trabalho e as propriedades dos componentes acabados (após o final do processo) em qualquer avaliação. A produção de peças pelo processo de hidroconformação pode parecer antieconômico por ter baixa produtividade, sendo que somente os custos da peça são considerados. Porém, se forem comparadas as propriedades técnicas do produto final com as propriedades técnicas da mesma peça produzida por outros métodos de conformação é possível compensar esta desvantagem.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Início do projeto

Para a confecção do estampo o processo foi dividido em cinco etapas:

1. Modelagem da peça no *software* Catia V4;
2. Simulação do embutimento (repuxo) utilizando o *software* *Auto-Form*;
3. Projeto no *software* Catia V5;
4. Confecção do estampo;
5. Experimento.

4.2 Modelagem da peça

O primeiro passo foi a modelagem de uma peça com uma determinada geometria, conforme mostra as figuras 4.1, 4.2 e 4.3. A geometria desta peça foi criada no *software* catia V4.

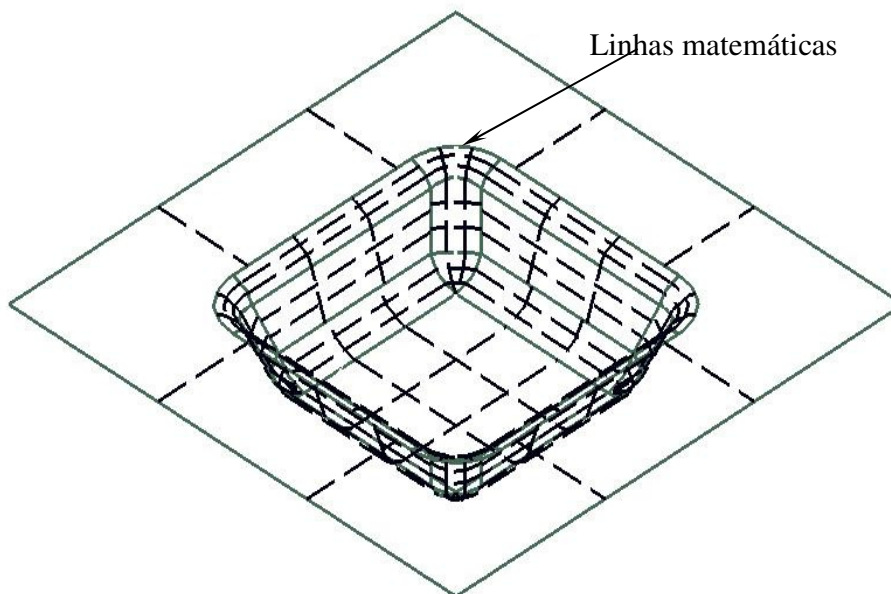


Figura 4.1 Modelagem da peça no *software* catia V4.

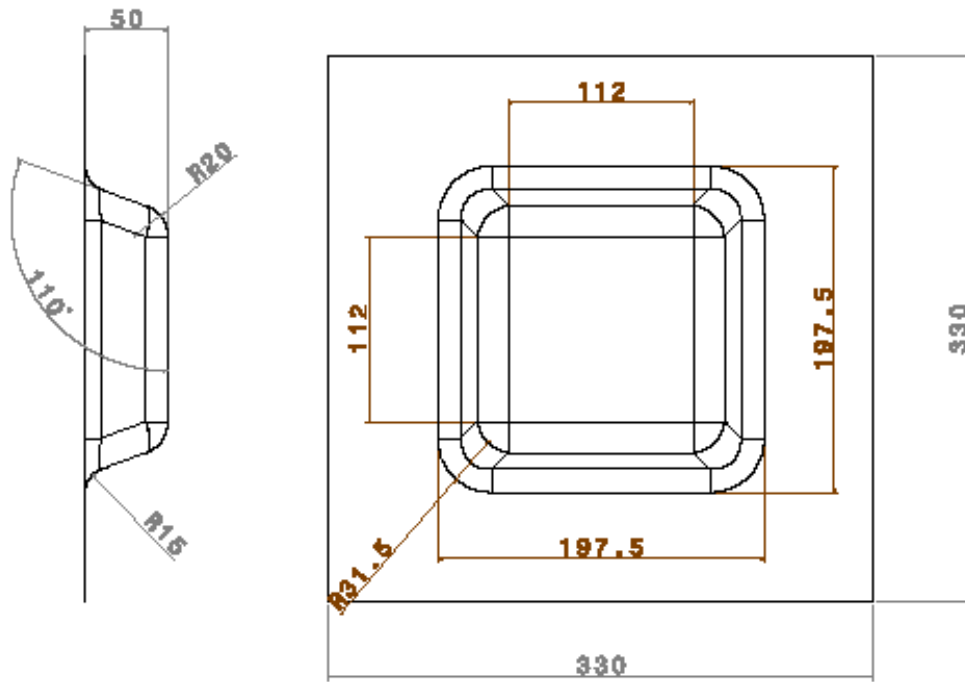


Figura 4.2 Dimensões da peça criada para análise

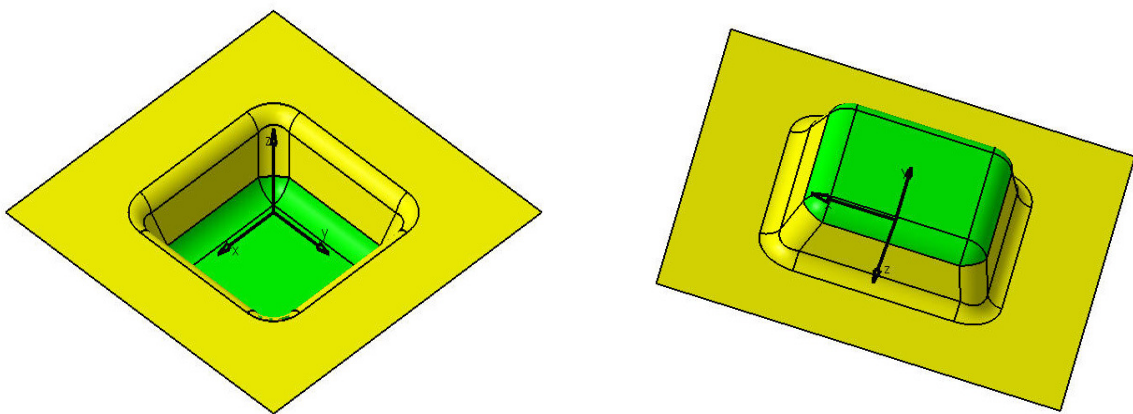


Figura 4.3 Modelo em sólido

5 RESULTADOS

5.1 Simulação para embutimento profundo

Para simulação do embutimento utilizou-se o *software Auto-form*, podendo-se extrair muitos resultados como: as informações sobre as áreas seguras e áreas críticas da peça, onde ocorram enrugamentos ou existam fortes tendências para tal, ou ainda áreas em que estes fenômenos não ocorram.

Os resultados obtidos na simulação são apresentados por cores:

- Vermelho – Ruptura;
- Laranja - Excesso de estiramento (tendência a Ruptura);
- Amarelo - Tendência a estiramento;
- Verde - Embutimento satisfatório;
- Cinza - Estiramento insuficiente;
- Azul - Tendência de rugas;
- Roxo - Rugas na peça.

A simulação inicia-se com a abertura do modelo 3D mostrado na figura 5.1. Após a importação do modelo matemático, foram adicionados as propriedades do material, já incluso na base de dados do *software* usado para a simulação. O material a ser utilizado é o aço IF. Trata-se de um aço carbono laminado a frio, com espessura de 0.70 mm.

Os chamados aços IF (*interstitial free*, ou livres de intersticiais) têm sido adotados com sucesso nos últimos anos na fabricação de painéis para carrocerias de automóveis. Eles apresentam níveis muito altos de estampabilidade em função de seus baixos teores de átomos intersticiais, como C e N, que são menores que 0,003 e 0,004 %, respectivamente. Essa condição lhes proporciona baixo limite de escoamento e alta resistência à redução de espessura durante a deformação a frio. Os aços IF também não sofrem envelhecimento, uma vez que o carbono está totalmente combinado na forma de precipitados. As principais aplicações automotivas, que

tomam partido da alta estampabilidade das chapas de aço IF, são cavidades no piso traseiro, alojamento do pneu sobressalente e a parte interior das portas frontal e traseira (HOILE, S. 2000; MAID et al. 1988).

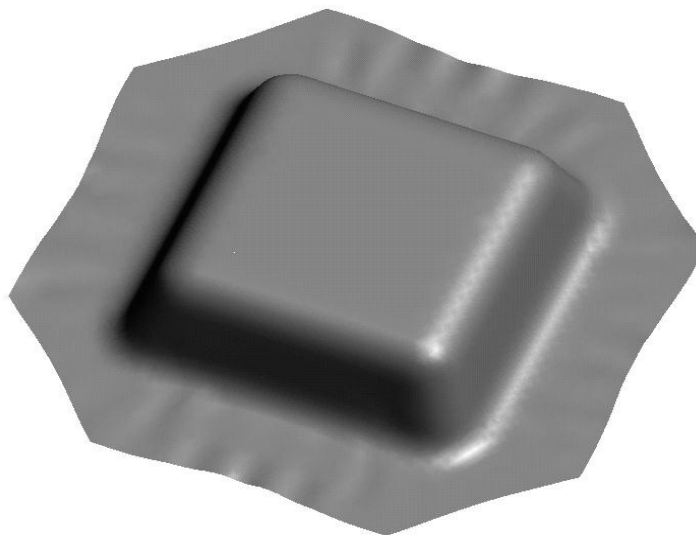


Figura 5.1 Abertura do modelo 3D para início da simulação.

5.2 Simulações realizadas

Na primeira simulação, as medidas do *blank* foram de 350 mm por 350 mm, com uma força na região do punção de $17 \cdot 10^4$ N e na área de sujeição uma força de $12 \cdot 10^4$ N. A peça apresentou fraturas e rugas conforme mostra a figura 5.2.

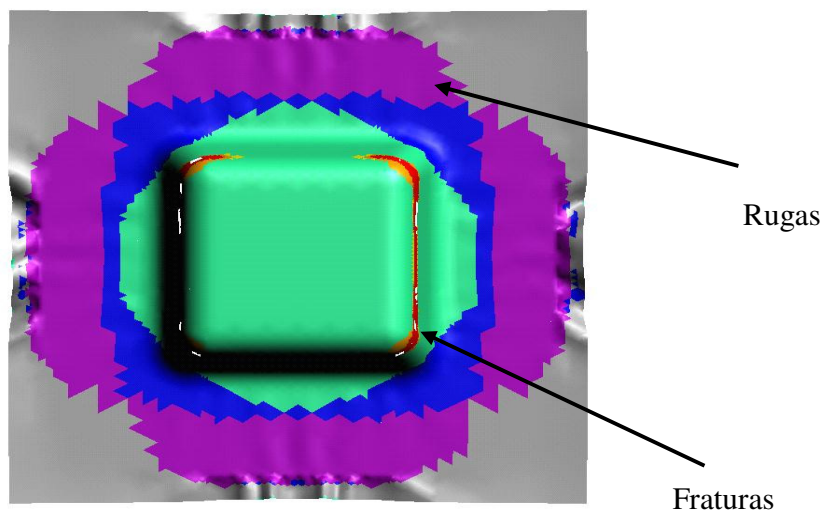


Figura 5.2 Situação da peça após a primeira simulação.

Foi realizada uma segunda simulação, na qual o *blank* foi diminuído em 20 mm, ficando com as medidas de 330 mm por 330 mm, sendo que as forças foram mantidas. Obteve-se melhoras na peça, mas esta apresentou fraturas nos cantos e rugas na área de sujeição, conforme mostrado na figura 5.3.

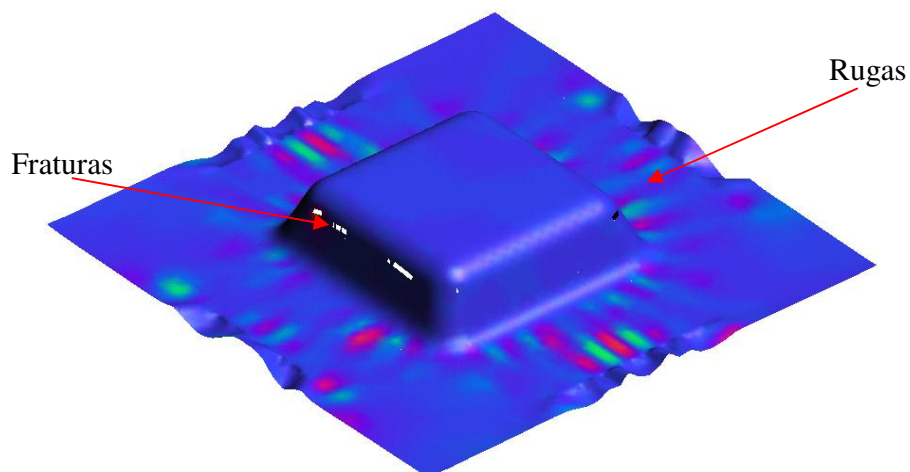


Figura 5.3 Situação da peça após a segunda simulação.

Uma terceira simulação na qual as medidas de 330 mm por 330 mm do *blank* foram mantidas, e a força de sujeição na área do prensa chapas que era de $12 \cdot 10^4$ N foi reduzida para $8 \cdot 10^4$ N, a peça obteve melhoras significativas; porém algumas regiões ainda apresentaram um estiramento muito grande, conforme mostrado nas figuras 5.4 e 5.5.

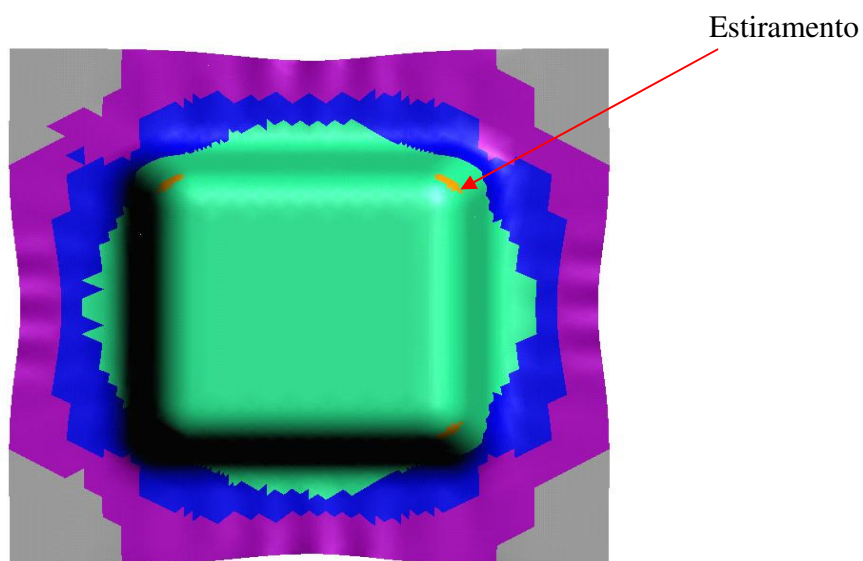


Figura 5.4 Situação da peça após a terceira simulação.

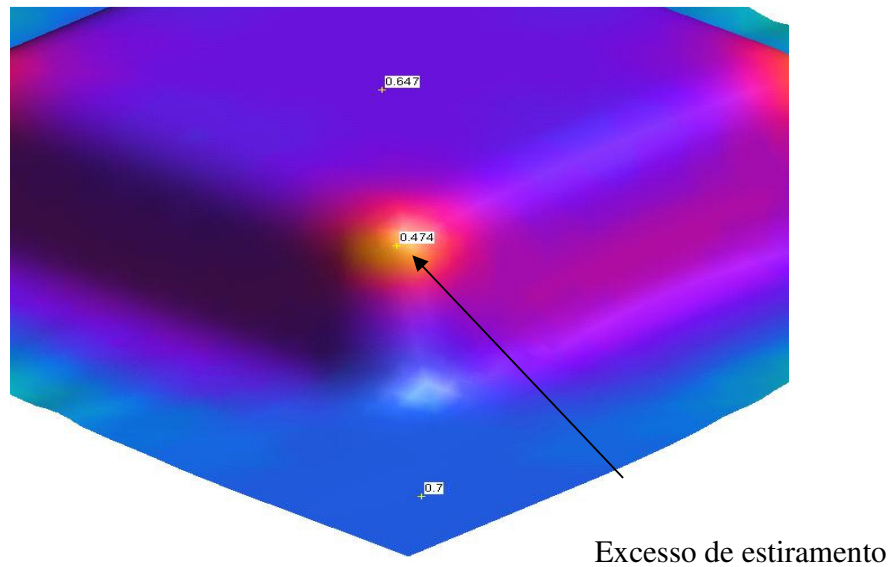


Figura 5.5 Situação da peça após a terceira simulação com excesso de estiramento.

Numa quarta simulação as forças utilizadas anteriormente foram mantidas, na região do punção com 17.10^4 N, na região do prensa chapas de 8.10^4 N e o tamanho do *blank* com 330 mm por 330 mm. Na análise feita, notou-se que em alguns pontos havia excesso de material, que foi retirado a 45° . Após a simulação, o resultado foi satisfatório, conforme figura 5.6.

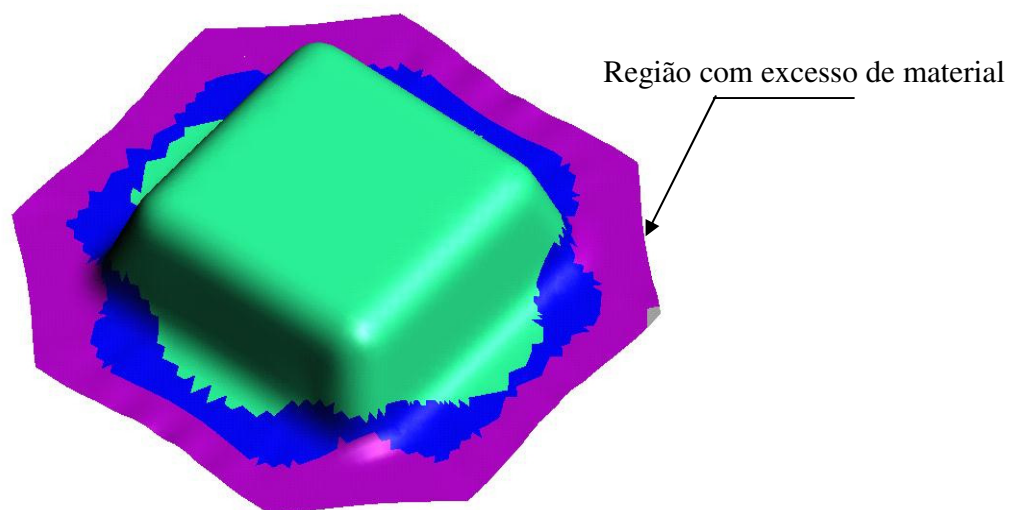


Figura 5.6 Peça simulada com resultado satisfatório.

5.3 Visualização da malha resolvida pelo *software*

Na simulação, o *software* prevê a construção de uma malha para dividir a geometria selecionada e para proporcionar condições de análise localizada em cada ponto da peça. Neste caso, por tratar-se de um *software* em que o operador não tem acesso à formulação, a escolha é automática. Na análise, o tamanho da malha é definido da seguinte maneira: onde houver necessidade, o *software* refina a mesma; ou seja, o ponto crítico é melhor analisado. A figura 5.7 mostra a malha definida automaticamente por este. Esta é triangular e o tipo de análise é por geometria da peça.

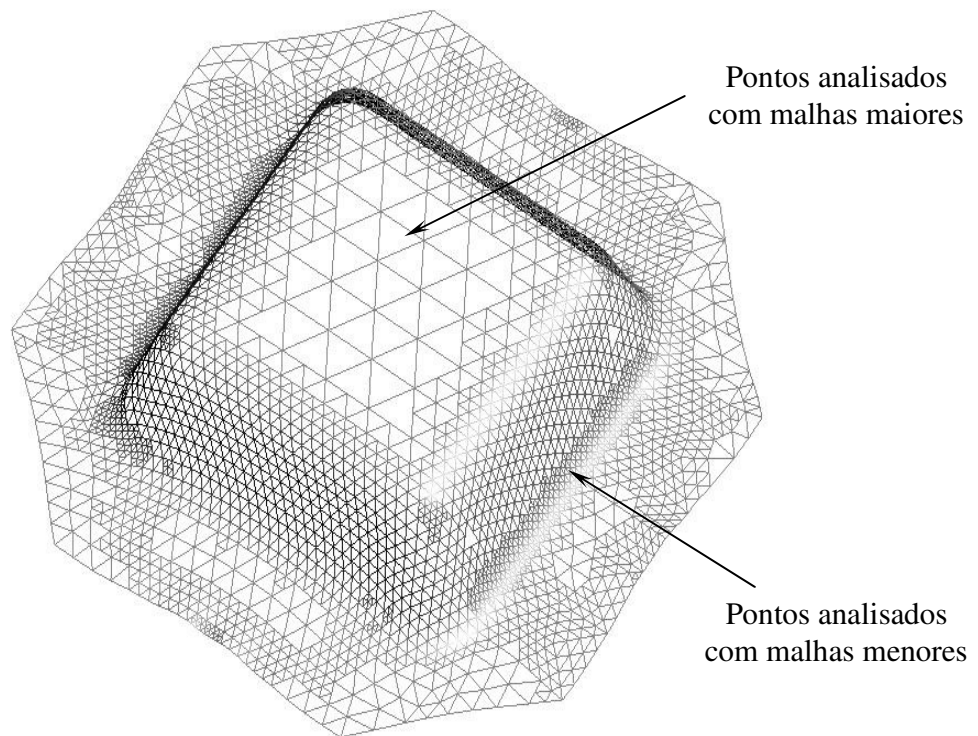


Figura 5.7 Malha definida automaticamente e fornecida pelo *software*.

5.4 Direção de embutimento

Seguindo-se o processo, será determinada a direção preferencial do embutimento e o *software* indicará as áreas onde existam ângulos negativos de extração, em relação às informações dadas sobre os eixos e rotações da ferramenta.

5.5 Forma do *blank*

Neste momento, a análise já pode ser efetuada e os resultados iniciais serão obtidos muito rapidamente. Se o prensa chapas, quebra-rugas e almofadas de retenção forem necessários, o *software* permitirá acrescentá-los às dimensões do *blank*, antes ou depois da primeira análise. O melhor aproveitamento para a matéria prima pode ser decidido seguindo as orientações dos “retalhos”. A figura 5.8 mostra as dimensões teóricas do *blank*, após a simulação.

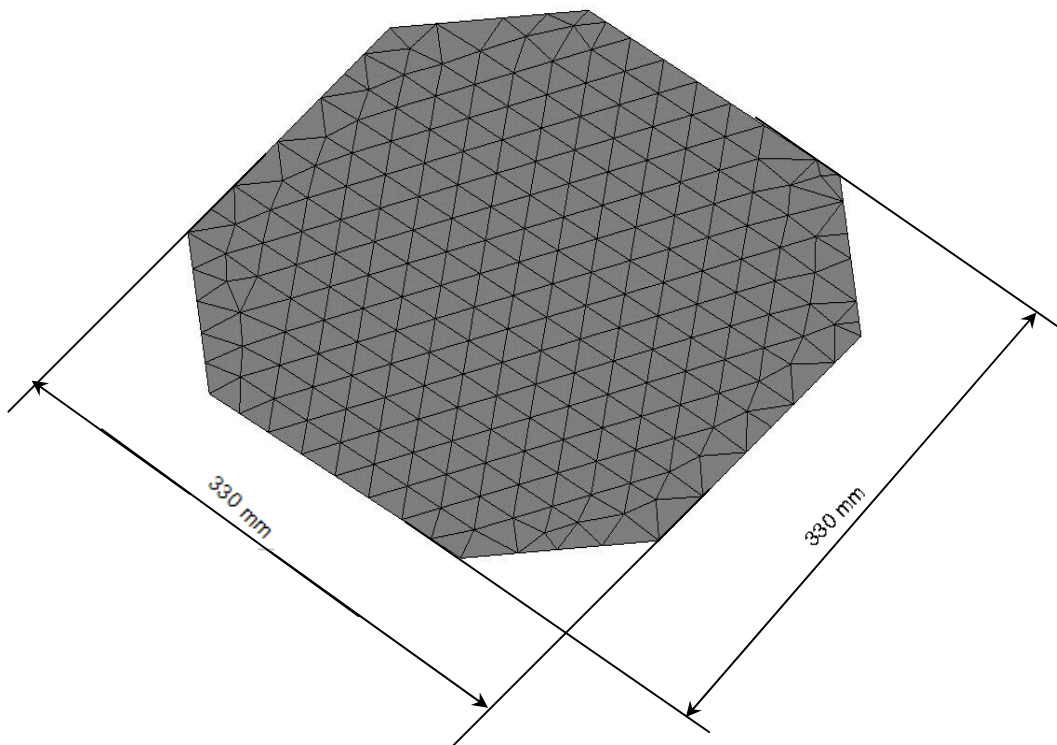


Figura 5.8 Dimensões do *blank*.

5.6 Análise de rugas

Entre outros resultados importantes, a figura 5.9 mostra a espessura resultante da peça, mediante as condições estabelecidas para a análise, indicando as regiões que possuem rugas.

Numa situação normal, ou seja, em uma ferramenta de embutimento profundo onde a matriz tem as formas, estas rugas não teriam nenhum problema, uma vez que a região enrugada não é peça. Especificamente neste caso, na ferramenta trabalhada para experiência, quanto menos

rugas houver nesta região, melhor será o processo, pois a pressão que será exercida nesta região ajudará na vedação do fluido.

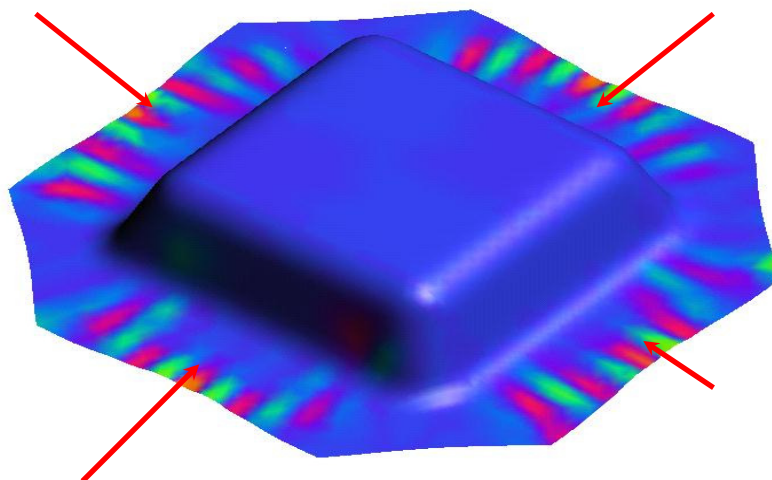


Figura 5.9 Indicação das regiões que possuem rugas.

5.7 Redução da espessura (porcentagem e em milímetro)

É visível que algumas áreas da peça ficarão mais finas, conforme mostrado nas figuras 5.10 e 5.11, e outras sofrerão pequenos acréscimos de espessura.

Neste caso, vale lembrar que na estampagem de chapas metálicas a redução da espessura é inevitável. Convencionou-se dentro da indústria automobilística, que a redução ideal da espessura de chapa é de 10 % da mesma.

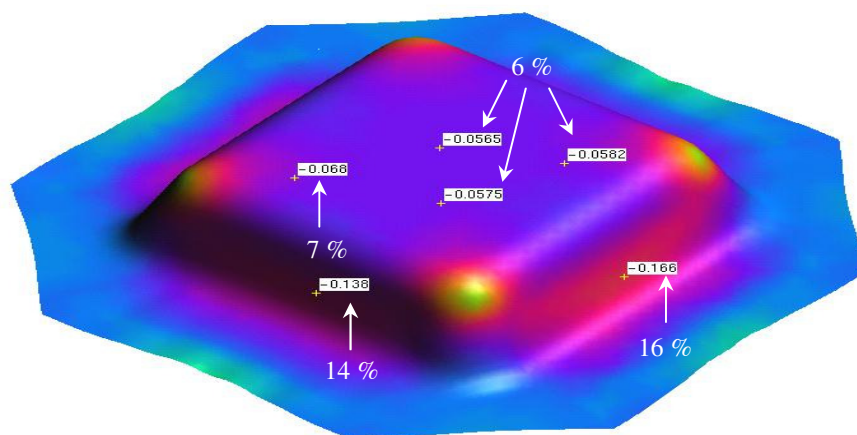


Figura 5.10 Redução da espessura em porcentagem.

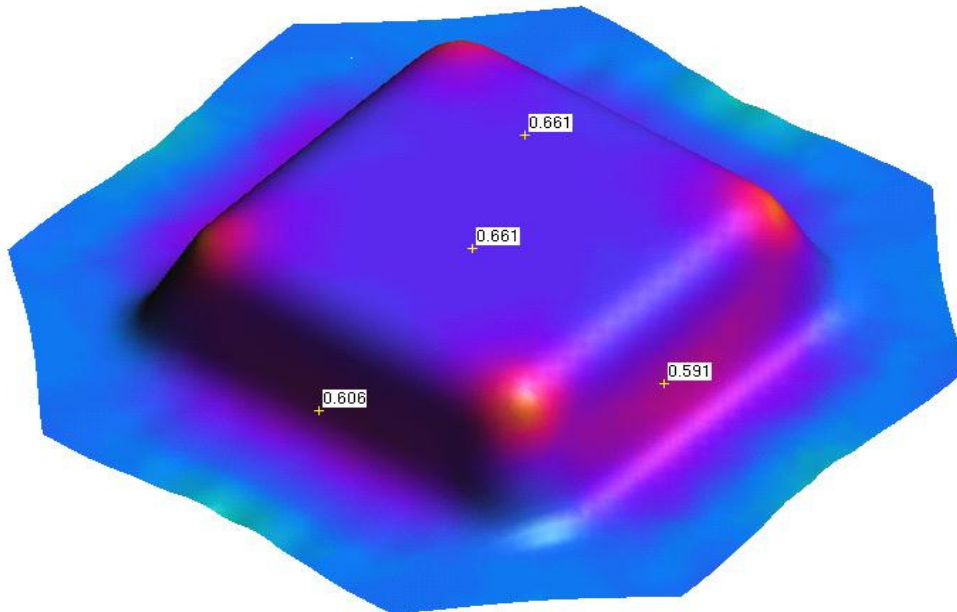


Figura 5.11 Redução da espessura em milímetros.

5.8 Pressão do prensa chapas (N/mm²)

A figura 5.12 ilustra a distribuição da pressão utilizada no prensa chapas.

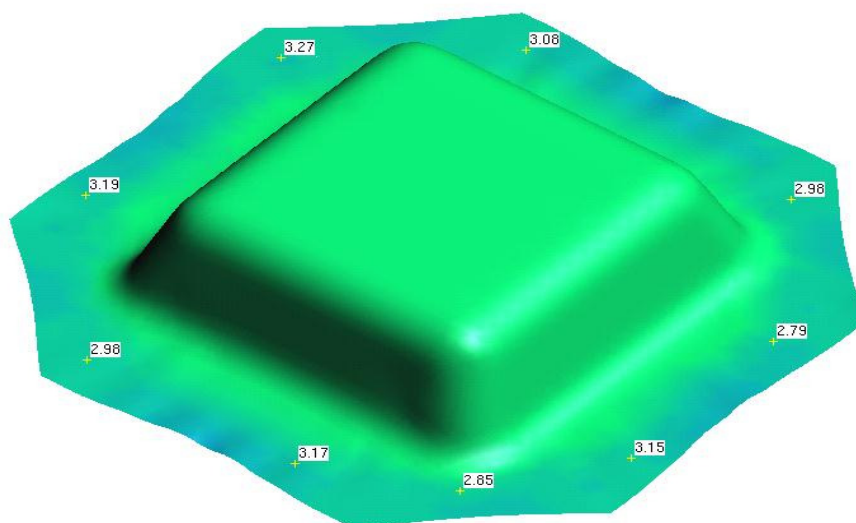


Figura 5.12 Distribuição da pressão no prensa chapas.

5.9 Gráfico Diagrama Limite de Conformação

5.9.1 FLD (*Forming Limit Diagram*) fornecido a partir do *software* de simulação

Ponto onde a curva limite de conformação intercepta o eixo de maior deformação do diagrama dos limites de conformação. Ele determina o instante que o material vai romper ou o quanto ele irá suportar.

A figura 5.13 mostra no gráfico gerado, pelo *software* de simulação, o resultado obtido, no qual os pontos pretos indicam o posicionamento da peça.

Conforme pode-se observar, uma parte bem pequena da peça está dentro do campo que indica estiramento; outra na região com tendência a rugas; uma parte na região de rugas e a maioria, na região verde indicando que a peça está em condições satisfatórias.

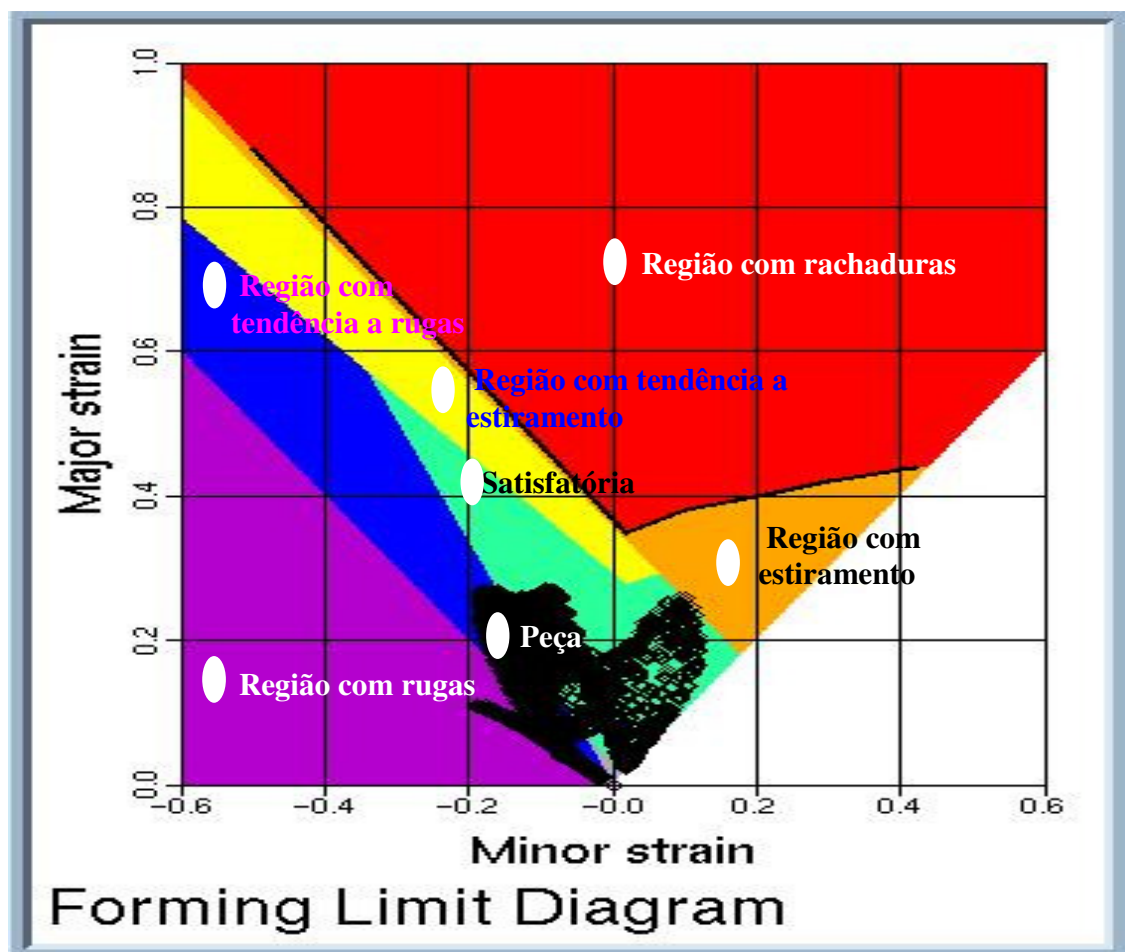


Figura 5.13 Gráfico de Diagrama Limite de Conformação gerado pelo *software* .

5.10 Projeto do estampo

Após feita a simulação para a conformação, o passo seguinte foi importar o modelo matemático feito no *software* Catia V4, para o *software* V5 e iniciar a construção da ferramenta em sólido; porém algumas precauções devem ser tomadas.

As ferramentas para embutimento profundo, em sua maioria, trabalham em prensas de duplo efeito. Sabe-se que a maioria das empresas que trabalham para as indústrias automobilísticas, não possuem máquinas com estas características.

Como o estampo proposto para o experimento utilizará um fluido na substituição das formas da matriz, a mesma não poderá trabalhar invertida. A sugestão apresentada é a fabricação de uma mesa de prensa com cilindros de nitrogênio, que fará a função da prensa de duplo efeito conforme figura 5.14.

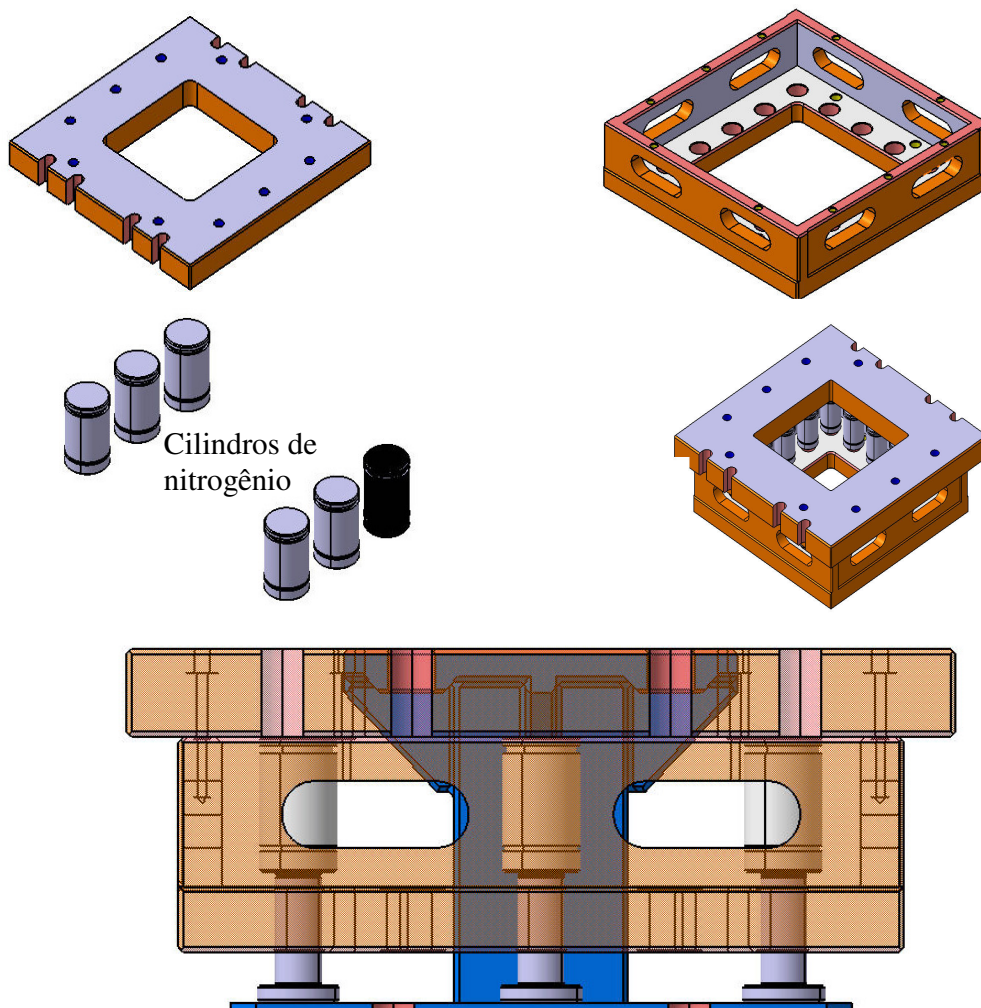


Figura 5.14 Mesa de prensa com cilindros de nitrogênio

A figura 5.15 mostra as medidas do cilindro e a figura 5.16 o gráfico de funcionamento do mesmo.

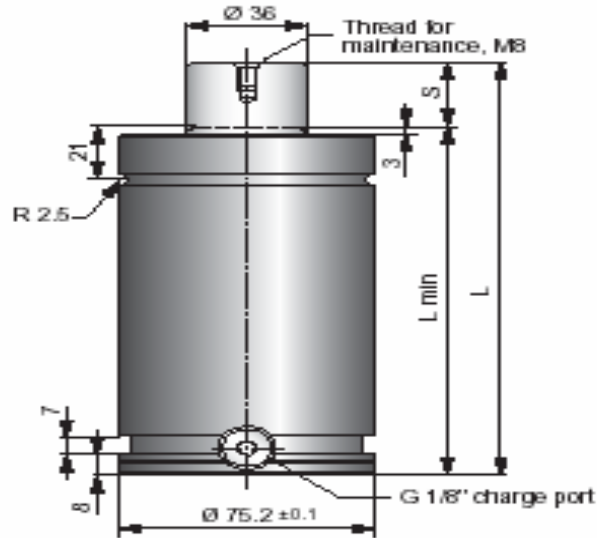


Figura 5.15 Cilindro de nitrogênio (catálogo Prody).

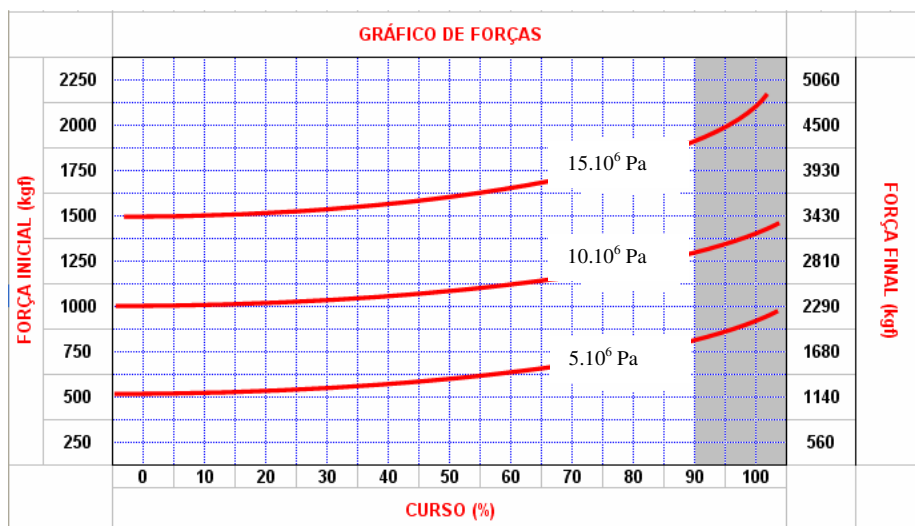


Figura 5.16 Gráfico de funcionamento do cilindro de nitrogênio (catálogo Prody).

Se for necessário um controle da pressão e do volume do fluido dentro da câmara, a solução é adaptar um dispositivo para o controle de pressão e volume do fluido conforme exemplo da figura 5.17.

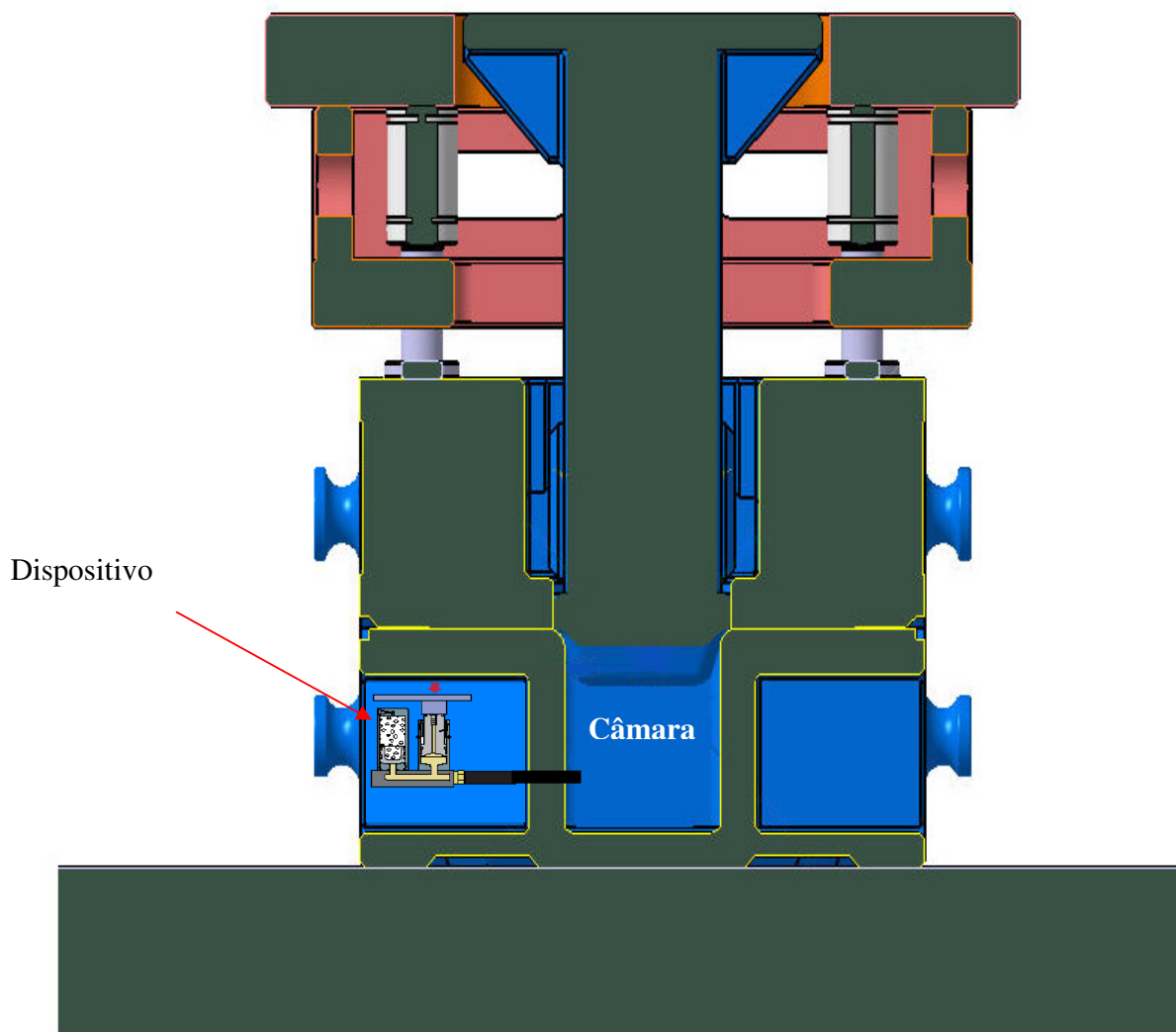


Figura 5.17 Dispositivo para o controle da pressão e volume.

As figuras 5.18, 5.19 e 5.20 mostram os desenhos da matriz, punção e do prensa chapas em 2D, construída pelo *software* catia V5.

O *software* projeta o estampo em sólido 3D, permitindo sua visualização em 2D.

Matriz

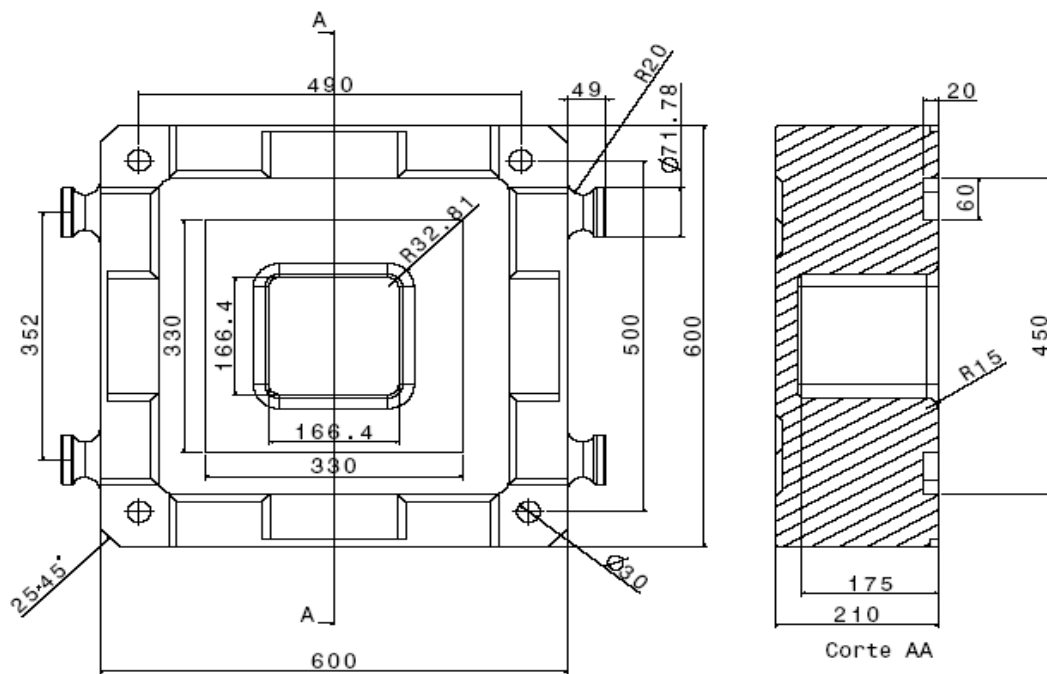


Figura 5.18 Desenho da matriz em 2D.

Punção

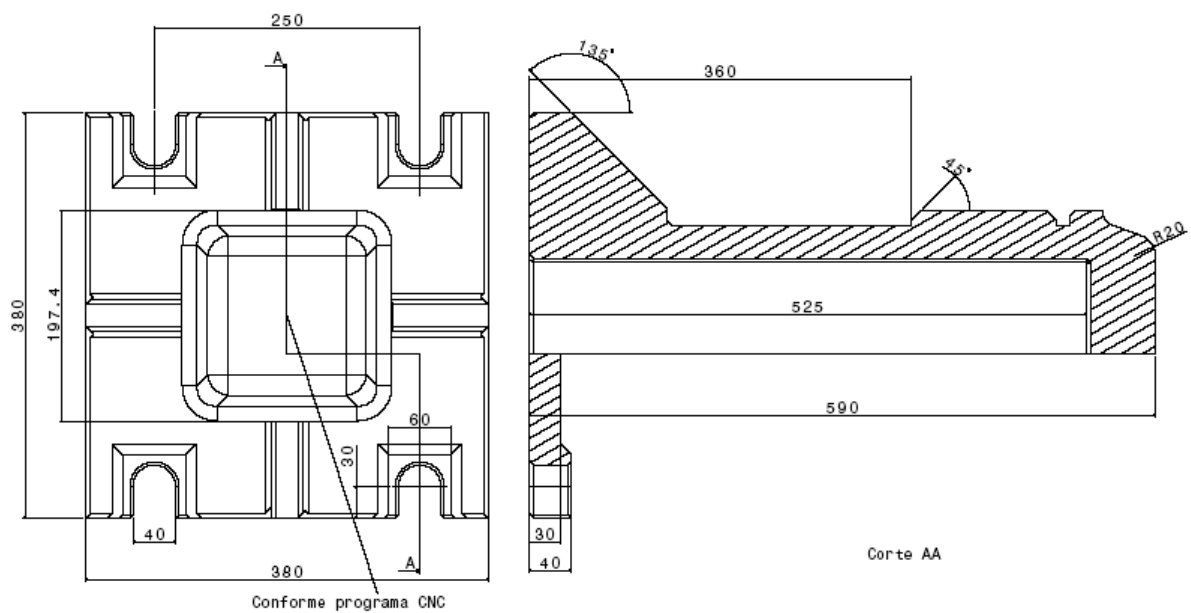


Figura 5.19 Desenho do punção em 2D.

Prensa chapas

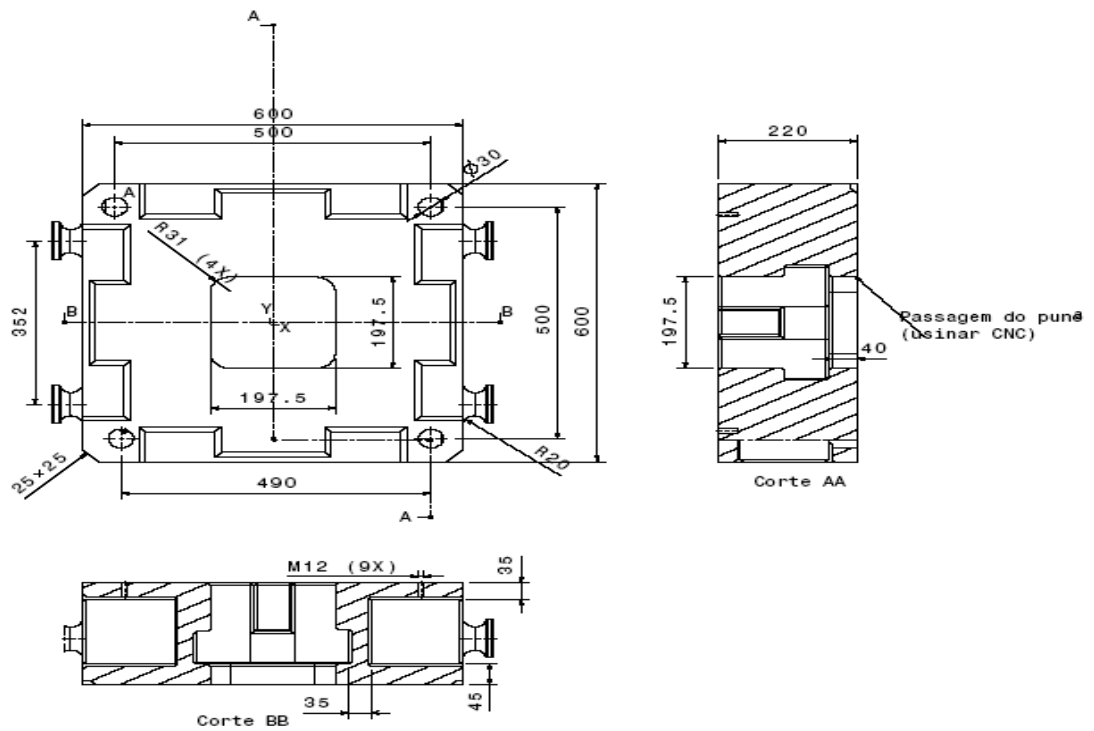


Figura 5.20 Desenho do prensa chapas em 2D.

A figura 5.21 mostra os componentes da ferramenta desenhada em sólido 3D.

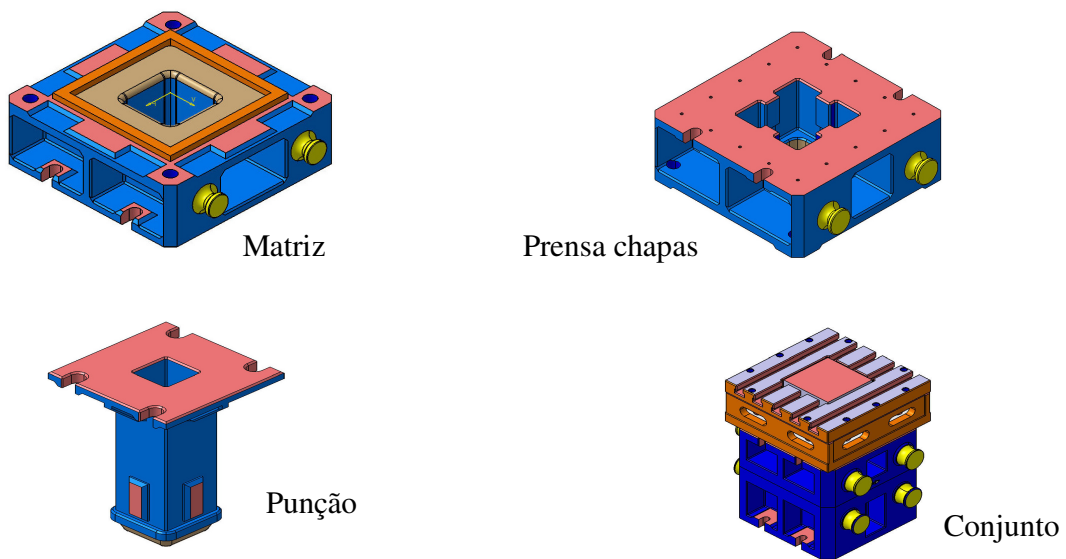


Figura 5.21 Desenho dos componentes da ferramenta 3D.

5.11 Cálculo do volume do fluido

O próprio *software* utilizado para o projeto, permite calcular o volume do fluido necessário para realização do experimento demonstrado na figura 5.22.

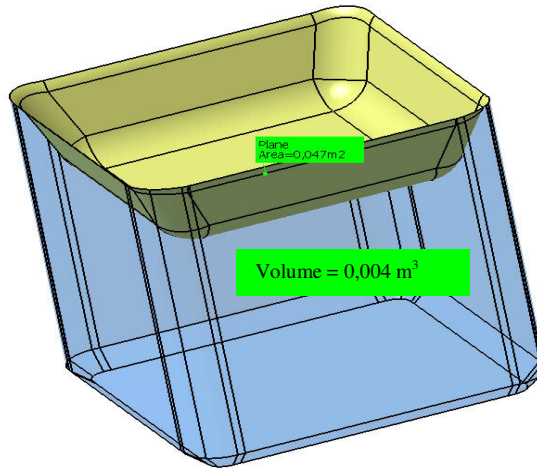


Figura 5.22 Cálculo do volume do fluido fornecido pelo *software*.

5.12 Sistema de vedação do fluido

O sistema de vedação do fluido, basicamente segue a mesma linha dos estampos construídos para injeção de plástico, ou seja, a região que sela o estampo tem a superfície polida, conforme mostrado na figura 5.23.

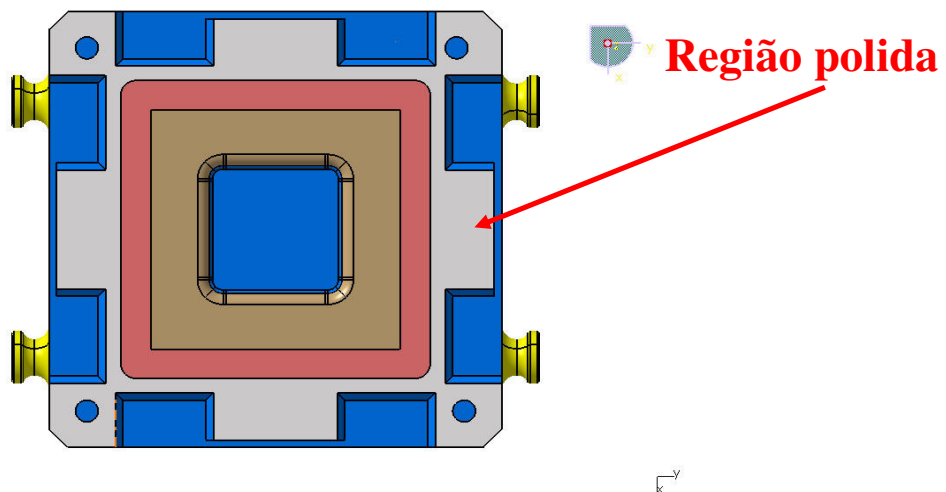


Figura 5.23 Superfície polida para auxiliar a vedação do fluido.

Para garantia do processo, o projeto prevê a utilização de um tipo de material com a função de envolver todo o contorno da peça para ajudar na vedação do fluido conforme demonstrado na figura 5.24.

Inicialmente este material terá uma espessura de 30 mm que será comprimido 9 mm. Essas medidas são aleatórias necessitando de alguns experimentos para chegar no ideal para o processo.

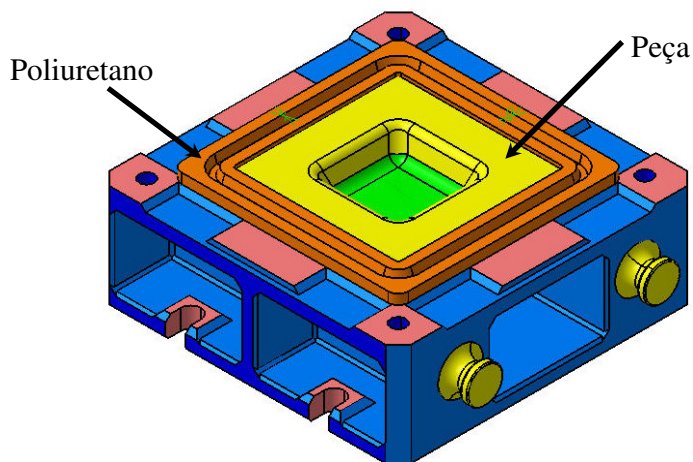


Figura 5.24 Material de poliuretano para vedação do fluido.

Esta informação é parte do boletim técnico fornecido pela Vick Brasil retirada no site (<http://www.vick.com.br/vick/produtos/poliuretano.htm>).

O material utilizado para a vedação é de poliuretano que tem o peso específico de 1,25 e uma dureza de 90 Shore A.

“O Poliuretano pertence a um grupo de plásticos que aliam características de elastômero com possibilidade de transformação, devido à grande variação de durezas possíveis de se estabelecer na sua formulação. Possui alta resistência à tração e compressão e é ideal na produção de peças que exijam grande durabilidade. Pode ser utilizado tanto em serviços de repuxo, como prensa chapa, onde é necessário um curso maior, com ciclo de operação mais lento, quanto em serviços onde seja necessário um curso menor, com ciclo de operação mais rápido. Por isso, existe uma variação quanto a determinação do espaço para alojamento, que deve ser entre 20 e 30 % maior que a medida externa da peça feita com o poliuretano, a fim de permitir seu abaulamento”.

Tabela 5.1 Características Físicas e químicas do poliuretano.

DUREZA		
Dureza Shore "A"	90	95
MÓDULOS (PSI)		
A 50% alongamento	1000	3550
A 100% alongamento	1600	4550
A 300% alongamento	2550	-
Alongamento %	650	270
Resistência à tração PSI 80	8500	-
Resistência ao rasgamento	680	1600
"c"(PLI) tira (PLI)	450	1100
MÓDULO DE COMPRESSÃO		
PSI 10% deflexão	860	-
5% deflexão	-	2025
Deformação permanente "B" , % 22 hrs a 158° F	26	33
Resistência ao impacto a 78° F (Bashore)	23	33

Fonte: (<http://www.vick.com.br/vick/produtos/poliuretano.htm>).

5.13 Processo de funcionamento da hidroconformação

O princípio do funcionamento de hidroconformação de chapas é um pouco diferente da hidroconformação para tubos, conforme mostrado no item 2.11.1.

No processo de hidroconformação para tubos, acontece uma expansão junto com uma compressão axial ou radial, que é obtida através da relação expansão pelo tamanho da parede, citados por Schieblgl et al. (1992), Geiger et al. (1997), Schmoeckel et al. (1997), Bortolussi; Button, (2002).

No processo de hidroconformação para chapa é aplicada uma força sobre esta que comprimirá o fluido, exercendo uma pressão que resultará na reação do mesmo, modelando-a nas paredes do punção de acordo com a figura 5.25.

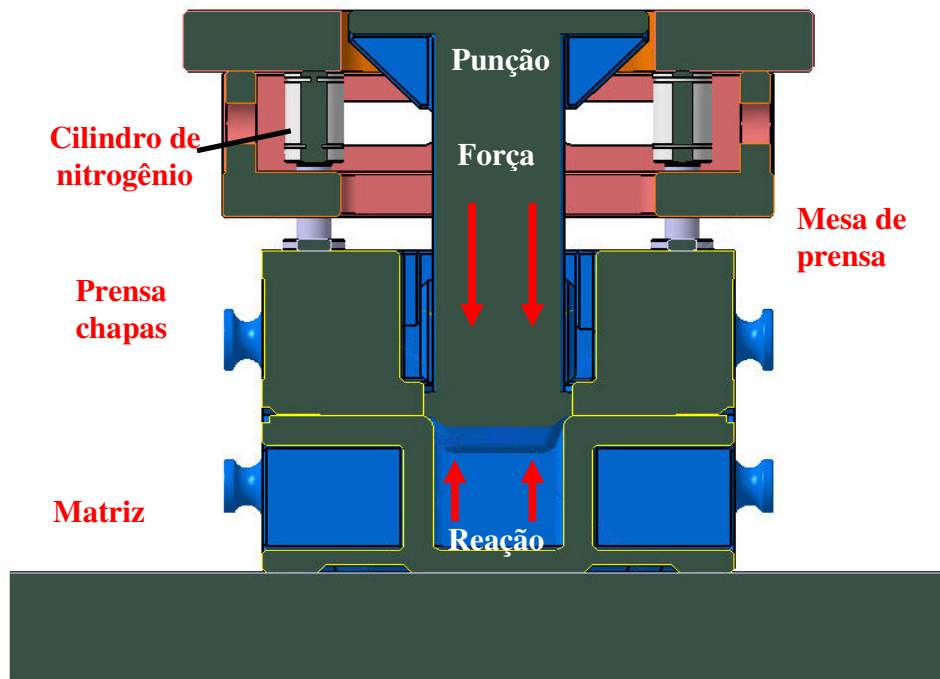


Figura 5.25 O princípio do funcionamento do processo de hidroconformação de chapas.

5.14 Modelo de *styropor*

Feito o projeto, o passo seguinte foi a construção do modelo de *styropor* mostrado na figura 5.26 para fundir a ferramenta.



Figura 5.26 Modelo de *styropor* da matriz, prensa chapas e punção.

5.15 Material para confecção do estampo

O tipo de material utilizado para confecção do estampo é um ferro fundido do tipo cinzento, por tratar-se de um estampo para experimento. Em outras ocasiões, para a produção em

larga escala, utiliza-se material com outras características do tipo dúctil.

Ferro fundido é o termo genérico utilizado para as ligas Ferro-Carbono, nas quais o conteúdo de carbono excede o seu limite de solubilidade na austenita, na temperatura do eutético. A maioria dos ferros-fundidos contém no mínimo 2 % de carbono, mais silício (entre 1 e 3 %) e enxofre, podendo ou não haver outros elementos de liga.

Os cinco tipos de ferros fundidos comercialmente existentes são o cinzento, dúctil, maleável, grafítico compacto e branco. Todos estes tipos, exceto o branco, são compostos de uma fase grafítica em uma matriz que pode ser ferrítica, perlítica, bainítica, martensítica temperada ou uma combinação destas.

Os ferros fundidos também podem ser classificados em não-ligados ou ligados. Os não-ligados constituem-se basicamente de ligas de ferro-carbono-silício contendo pequenas quantidades de manganês, fósforo e enxofre. Os ferros fundidos ligados, por sua vez, são divididos em tipos, de acordo com a sua aplicação e propriedade: brancos resistentes à abrasão e à corrosão, cinzentos de alta-resistência, dúcteis termoresistentes e brancos termoresistentes.

5.16 Sequências de operações para o processo:

Passo 1 Prensa aberta: O *blank* é posicionado sobre a ferramenta.

Passo 2 Prensa fechada: O cilindro do punção é movimentado e o prensa chapas posicionado sobre o *blank* é acionado pelos cilindros de nitrogênio.

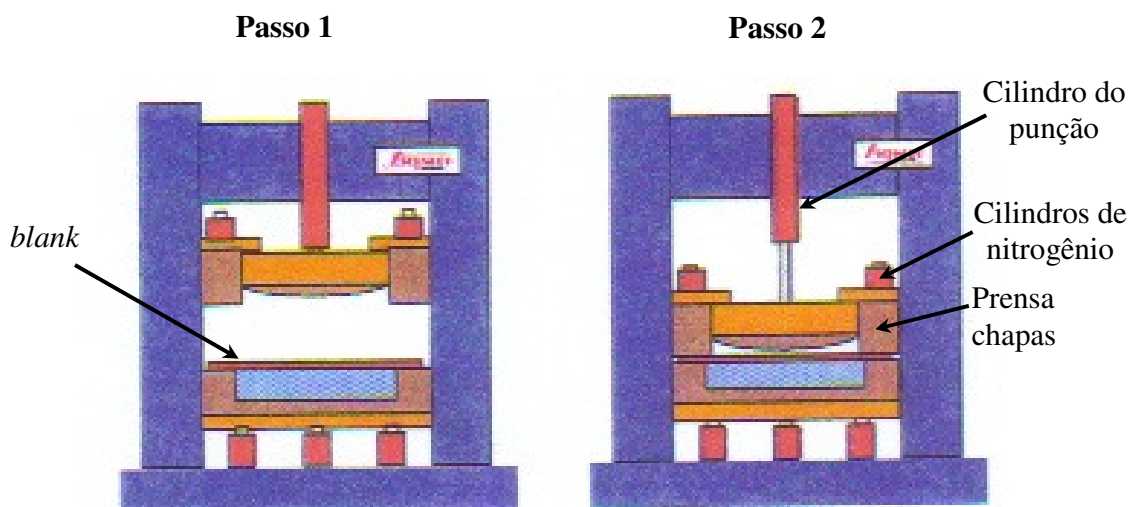


Figura 5.27 Sequências 1 e 2 do processo.

Passo 3 Prensa fechada: O prensa chapas é travado, o cilindro do prensa chapas e o cilindro para fechar a ferramenta são movimentados.

Passo 4 Pré-conformação: O fluido dentro da câmara dará a pressão, iniciando o trabalho de conformação da chapa (conformação a frio).

Passo 5 Calibragem: A pressão do fluido é aumentada, obtendo-se a calibragem da peça.

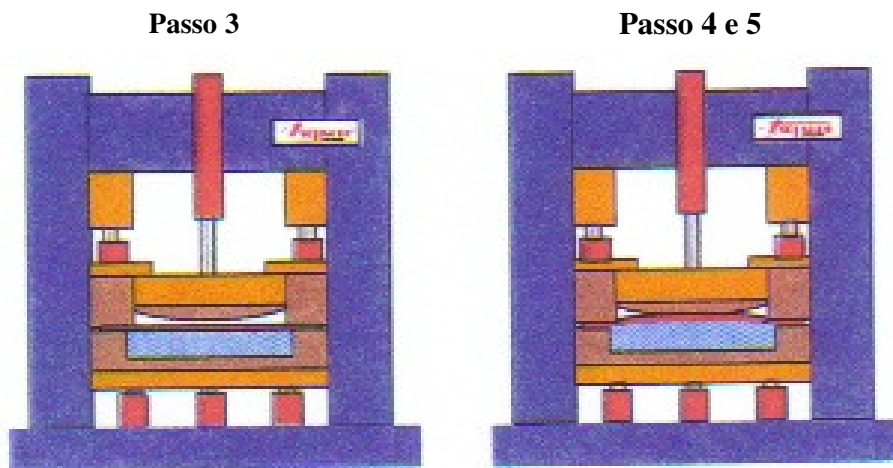


Figura 5.28 Sequências 3, 4 e 5 do processo.

Passo 6 Prensa aberta: A pressão do sistema e do cilindro é aliviada, assim como a dos cilindros do conjunto mesa/ferramenta.

Passo 7 Prensa aberta: O punção alcança a sua posição superior, o prensa chapas é levantado, os cilindros retornam à sua posição inicial e a peça é retirada.

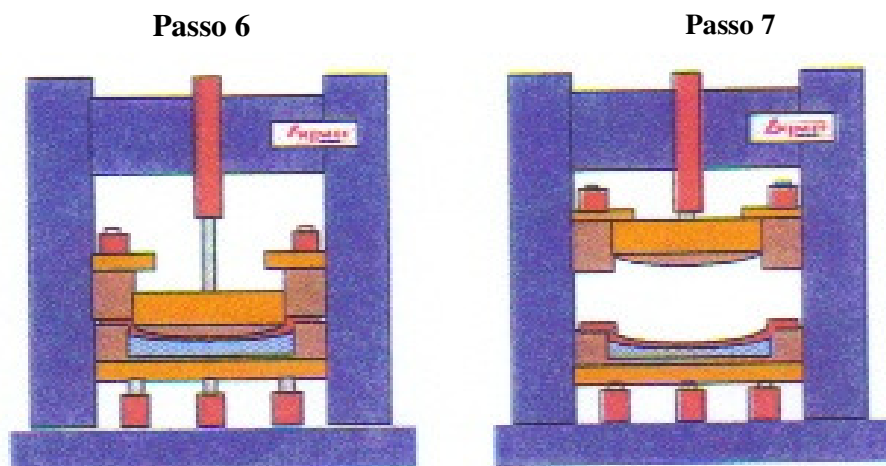


Figura 5.29 Sequências 6 e 7 do processo.

5.17 Fases de confecção

5.17.1 Usinagem da peça

Nesta etapa do processo, foi criado um programa CNC que utilizou o modelo matemático gerado para dar forma a peça, citado no item 5.1.

A máquina utilizada para usinagem, foi uma fresadora votam 3000.

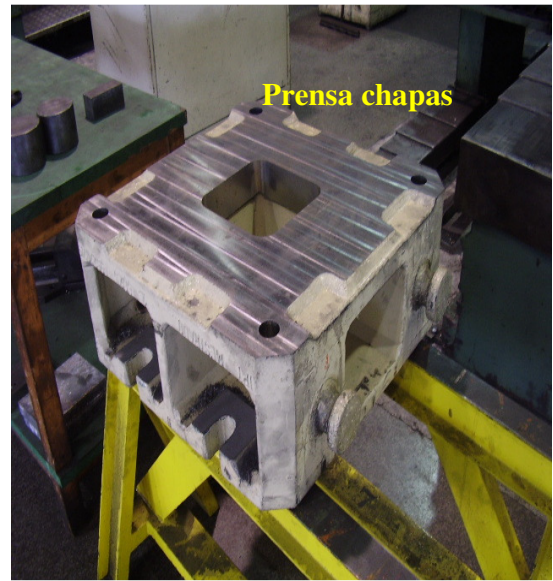
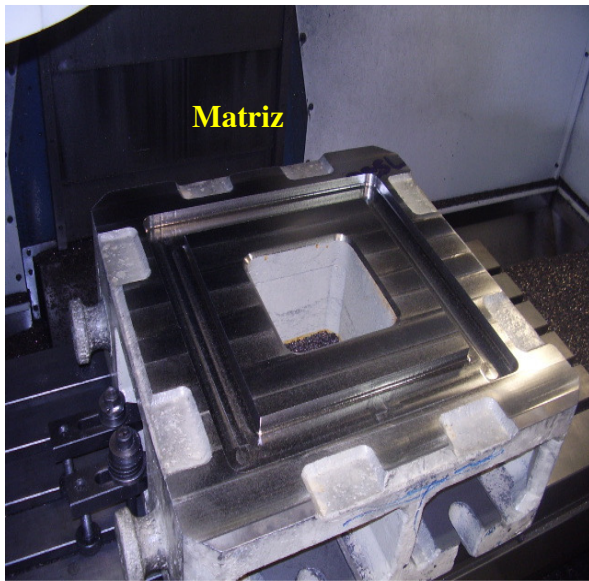


Figura 5.30 Usinagem das peças fundidas (matriz, prensa chapas e punção).

5.17.2 Polimento geral

Conforme citado no item 5.4, a peça no momento da conformação tem um sentido preferencial de embutimento, exigindo que o polimento da matriz seja feito seguindo estas condições conforme mostrado na figura 5.31.

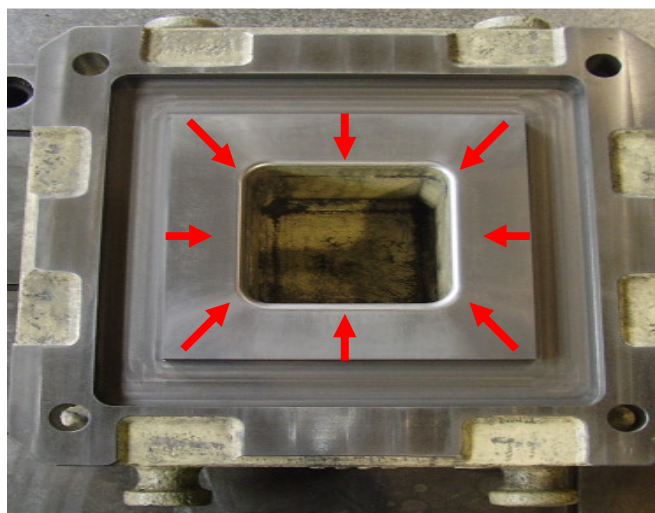


Figura 5.31 Sentido preferencial de embutimento

5.17.3 Montagem do estampo

Neste caso a montagem é simples, exigindo apenas que seja checada a passagem do punção no contorno do prensa chapas, conforme ilustrado na figura 5.32.

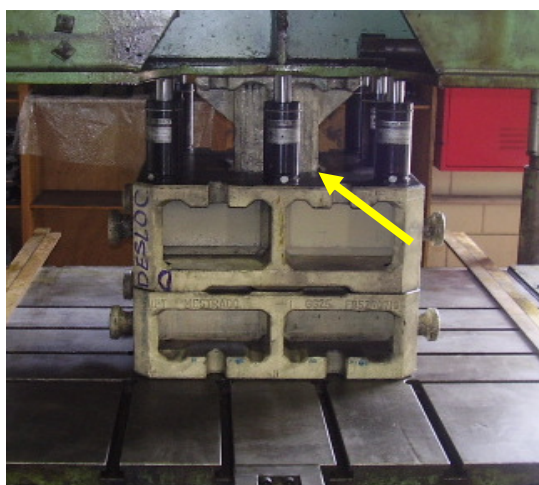


Figura 5.32 Montagem do estampo

5.18 Prensa para ajustes

A prensa utilizada para a experiência tem a capacidade de força de $120 \cdot 10^4$ N conforme figura 5.33.

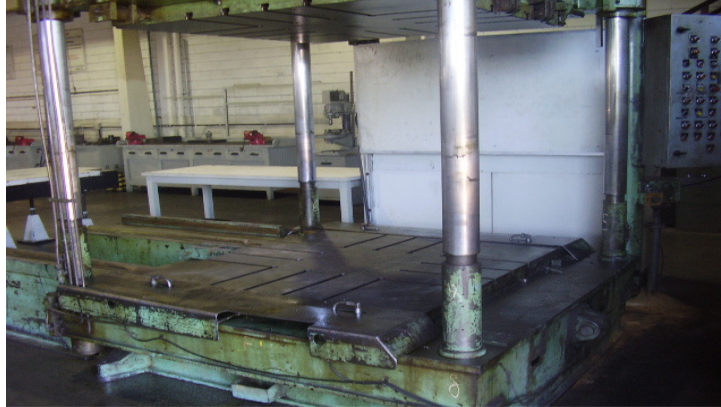


Figura 5.33 Prensa utilizada para experiência.

5.19 Custos do projeto

Os custos para execução deste experimento, desde a fase de projeto até a obtenção da peça pelo método de hidroconformação, foram:

- Projeto: 15 dias x 8 horas x R\$ 28,00 = R\$ 3.360,00
- Modelo : 15 horas x R\$ 30,00 = R\$ 450,00
- Fundido: 600 Kg x R\$ 3,90 = R\$ 2.340,00
- Usinagem 2D: 5 horas x R\$ 40,00 = R\$ 600,00
- Programa CNC: 8 horas x R\$ 100,00 = R\$ 800,00
- Cópia CNC: 30 horas x R\$ 130,00 = R\$ 3.900,00
- Ajustes: 16 horas x R\$ 28,00 = R\$ 448,00
- Prensa: 24 horas x R\$ 150,00 = R\$ 3.600,00
- Valor total: R\$ 15.498,00

5.20 Experimento

Durante a primeira experiência para a obtenção da peça, todos os parâmetros apontados na simulação foram obedecidos: a força na região do prensa chapas foi de $8 \cdot 10^4$ N; na região do punção foi de $17 \cdot 10^4$ N; a medida do *blank* foi de 330 mm por 330 mm; o curso do punção foi de 50 mm; o volume do fluido de 4 l e as dimensões do poliuretano para a vedação do fluido com 30 mm de espessura e que inicialmente será comprimido 9 mm conforme citado no item 5.12.

Como as medidas do material adotadas para a vedação foram aleatórias, a primeira parte do ajuste foi a de chegar nas medidas ideais para o processo. Inicialmente notou-se que a medida da espessura desse material projetado estava com excesso e no momento em que o prensa chapas sobrepôs o poliuretano, o mesmo encontrou uma resistência fazendo com que os cilindros de nitrogênio fossem acionados conforme figura 5.34, impedindo-os de atuarem sobre a chapa, eliminando assim a função proposta para os mesmos.

Outro fator que influenciou a redução da espessura foi a dureza da borracha que é de 90 Shore A, necessitando-se de uma dureza menor.

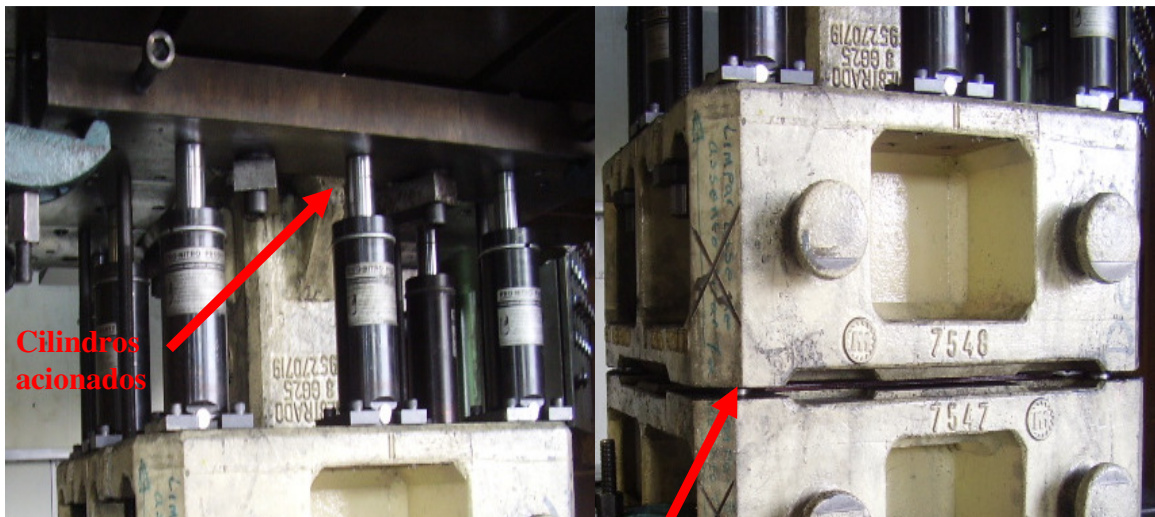


Figura 5.34 Cilindros acionados por excesso na espessura do poliuretano.

A ação tomada foi a de reduzir a espessura do material através de tentativas, sendo realizados alguns experimentos até chegar-se na medida de 22 mm na mesma e sendo comprimida 2 mm.

Solucionado o problema e concluído o ajuste sem a chapa, a etapa seguinte foi a de verificar se o fluido de dentro da câmara não vazava com o acionamento da prensa.

Uma vez tendo sido checados todos os parâmetros e utilizando-se a experiência obtida ao longo dos anos dedicados a conformação de chapas, inicia-se o experimento. Na primeira tentativa para conformar a chapa observou-se que o resultado foi satisfatório conforme mostrado na figura 5.35.

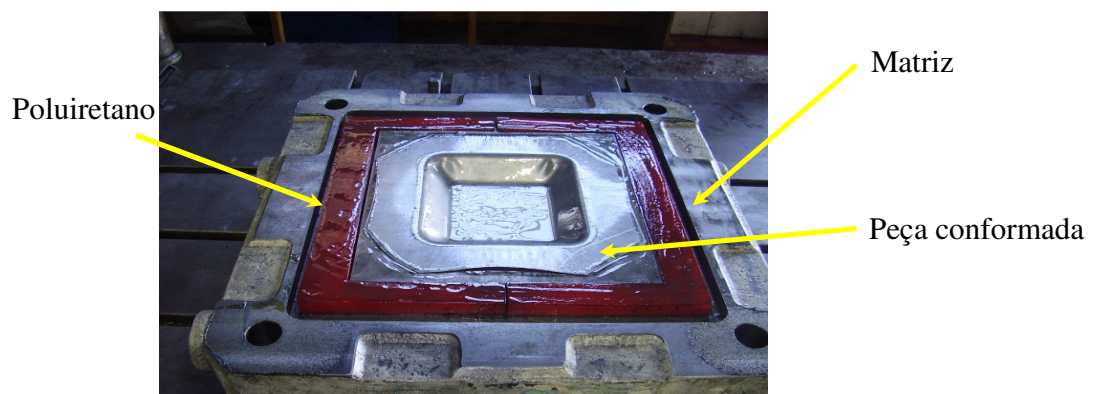


Figura 5.35 Resultado da primeira tentativa de conformar a chapa.

Com o objetivo alcançado inicia-se a análise. Observando-se a peça, percebeu-se que em alguns pontos existem rugas conforme mostrado na figura 5.36.

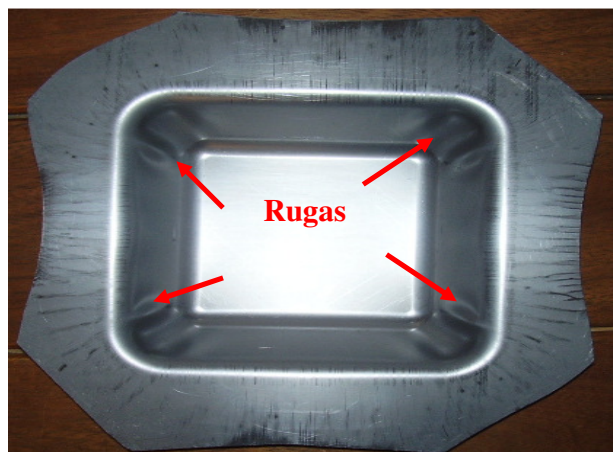


Figura 5.36 Pontos com rugas.

As causas mais prováveis são:

- Pouca área de atuação do prensa chapas(*blank* menor);
- Força insuficiente no prensa chapas;
- Pressão insuficiente dos cilindros.

Com base nessas hipóteses, o primeiro procedimento foi o de checagem da pressão dos cilindros de nitrogênio. Verificou-se que a mesma estava insuficiente, ou seja, pelo tipo de cilindro utilizado, a informação contida no catálogo do fornecedor indicava $12 \cdot 10^6$ Pa e a medição mostrava uma pressão de $6 \cdot 10^6$ Pa.

Devido a falta de equipamento para calibrar a pressão, um novo procedimento foi adotado e as medidas do *blank* foram aumentadas em 20 mm, passando para 350 mm por 350 mm e o chanfro foi eliminado. A figura 5.37 mostra a situação da peça após as modificações.

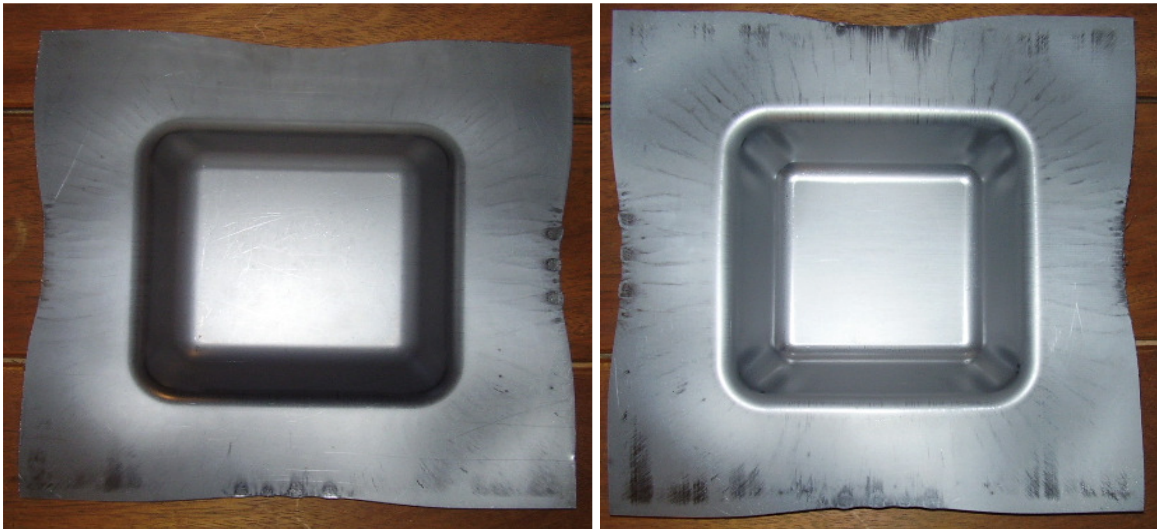


Figura 5.37 Situação da peça após as modificações.

Analisando as peças nas duas situações pôde-se observar que a melhora foi significativa, concluindo-se que com a pressão ideal os resultados serão melhores, sendo que o objetivo inicial de conformar uma chapa com um fluido alcançou êxito.

Comparando o resultado da simulação com o resultado obtido no experimento, observou-se que na região do prensa chapas, a peça simulada apresentou mais rugas que a peça obtida no experimento. Em uma outra comparação, notou-se que na peça resultante do experimento a redução do *blank* foi maior que a peça simulada. A figura 5.38 ilustra a comparação dos dois resultados.

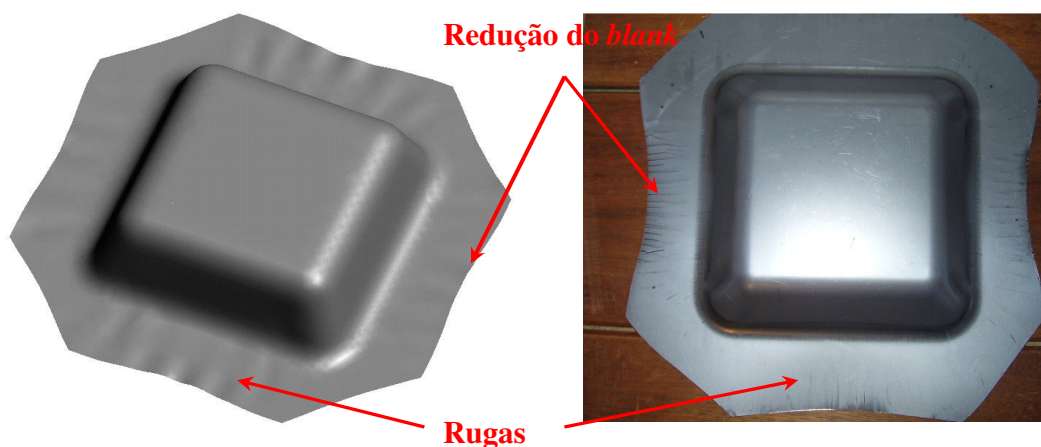


Figura 5.38 Comparação dos dois resultados o simulado e o do experimento.

A figura 5.39 mostra uma comparação da peça resultante do experimento obtido após o aumento das medidas do *blank*, para 350 mm por 350 mm, com a peça simulada com as mesmas medidas, observou-se que, os resultados não estão parecidos. A peça simulada indica regiões com rugas, fissuras e estiramentos excessivos. A peça conformada nestas condições apresentou resultados melhores do que da peça estampada nas condições adotadas inicialmente.

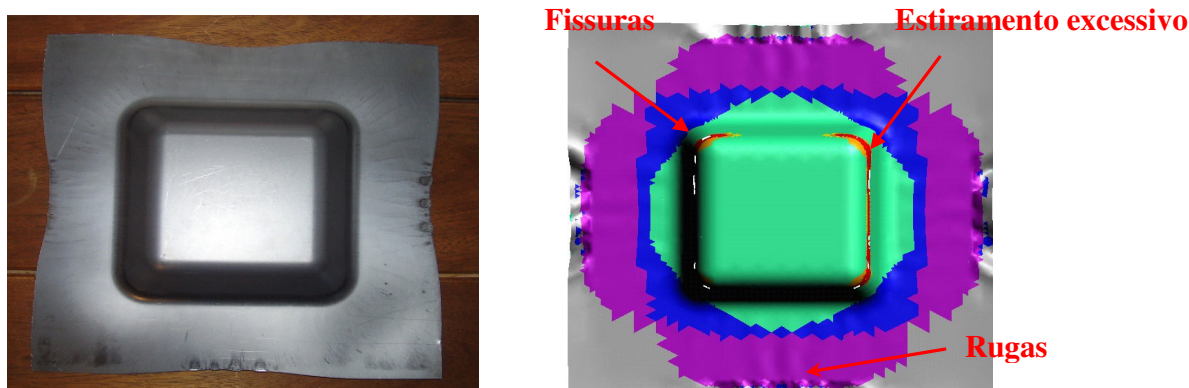


Figura 5.39 Comparação dos resultados com a alteração das medidas do *blank*.

Nas comparações entre as simulações e os experimentos, alguns pontos foram analisados. Na primeira situação, o resultado da simulação sugeriu as medidas do *blank* de 330 mm por 330 mm. Notou-se que na região do prensa chapas os formatos dos *blanks* diferem-se, e a peça simulada apresenta uma quantidade maior de rugas nesta região. Na segunda situação, em que as medidas do *blank* são de 350 mm por 350 mm a simulação mostra que nestas condições os resultados não são satisfatórios; porém, comparando com a peça conformada, observou-se que os resultados foram melhores que o sugeridos.

Analisando todos os parâmetros notou-se que, uma etapa da simulação sugere uma determinada pressão conforme mostrada na figura 5.12. Com base nestas informações, adotou-se para o experimento cilindros de nitrogênio com a função de fornecer tais pressões.

Pode-se concluir que, as diferenças analisadas nas comparações entre as simulações e os experimentos estão relacionadas com a diferença de pressão na região do prensa chapas, pois a pressão interna dos cilindros de nitrogênio sugerida é de $12 \cdot 10^6$ Pa e as mesmas encontravam-se com $6 \cdot 10^6$ Pa.

6 CONCLUSÕES

A seguir serão apresentadas as conclusões finais, tendo como referência os resultados obtidos.

A hidroconformação de chapas metálicas é um processo que saiu do estágio pré-industrial e entrou no estágio industrial, necessitando ainda de inúmeras investigações.

As características especiais do mesmo foram examinadas ao longo do trabalho e as vantagens em potencial foram apresentadas.

Este estudo definiu um modelo de processo, direcionou sua atenção a alguns resultados importantes e forneceu informações para a implementação de uma tecnologia em um ambiente industrial.

Alcançou os objetivos previstos inicialmente, em provar ser possível a conformação de chapa aberta ou *Blank*, através de um fluido.

A intenção de “deformar ou conformar” chapas a partir de um processo barato, funcional e facilmente adaptável no tocante a material e mão de obra, simplesmente ganhou força adicional diante dos resultados positivos.

Percebe-se a importância da aplicação destes princípios não somente para a indústria automobilística, mas também para qualquer ramo em que haja necessidade de se modelar peças-chaves na confecção de inúmeros produtos de utilidade pública.

Com o aprofundamento das pesquisas e aperfeiçoamento do processo espera-se chegar a muitos avanços em diversas áreas, o que trará sem dúvida inúmeros benefícios a muitos setores da indústria.

7 SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO

Posteriormente pode-se aprimorar a conformação de chapas utilizando o método apresentado.

A peça utilizada para o estudo tem os raios convexos. Esses raios formaram-se no punção favorecendo a conformação. A sugestão para trabalhos futuros é que se faça uma forma côncava na punção e adicione-se uma bomba injetando fluido dentro da câmara para que o processo evolua.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGELET DE SARACIBAR, C.; OÑATE, E., (1991) **Modelo Numérico de Processos de Conformado de Laminas Metálicas**. Barcelona, Centro Internacional de Métodos Numéricos em Ingeniería. Cap. 5, p. 5. 1-5.80. / Monografia n° 8.
- BATHE, K.J., (1996) **Finite element procedures**. New Jersey, Prentice Hall, p. 485-641.
- BORTOLUSSI, R.; BUTTON, S.T. "**Prediction of forming limits of tube hydroforming process - simulation and experiments**", Numisheet 2002 – 5th Intl. Conf. and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Forming Processes – Jeju Island – Korea – October 21-25, 2002.
- EVANGELISTA, S. H. (2000) **Diagramas de limite de conformação aplicados à análise por Elementos Finitos de um processo de estampagem em chapas metálicas**, São Carlos. 135p. Dissertação (Mestrado).
- GEIGER, M.; HEIN, P.; BOBBERT, S. **Finite element analysis and process design for the hydroforming of sheet metal pairs**. Proc. of the 4th Intern. Conf. on numerical simulation of 3D sheet forming processes NUMISHEET '99, Besançon (13-17 September, 1999).
- HEIN, P.; VOLLERTSEN, F. **Hydroforming of sheet metal pairs**. Journal of Materials Processing Technology, 87, n° 1-3 (1999), p. 154-164.
- HOILE, S. **Materials Science and Technology**, October 2000, 1079-1093
- HUEBNER, K.H.; THORNTON, E.A., (1982) **The Finite Element Method for Engineers**. 2. ed. John Wiley & Sons.
- KIRMBE, H.; WESSELMANN, L.; KRAUSE, D.; PAUTSCH, C.; BAUER, A. **Manufacturing process hydroforming**. INPRO (edt.) : Project Report TEC-04 (1998) (in German).
- KOBAYASHI, S.; OH, S.I.; ALTAN, T. (1989). **Metal Forming and Finite-Element Method**. Oxford University Press.
- MAID, O et al. **Stahl und Eisen**, 18 April 1988, 355-364.
- MAKINNOUCHI, A., (1996) **Sheet metal forming simulation in industry**. Journal of Materials Processing Technology, v. 60, p. 19-26.

- MAMALIS, A.G.; MANOLAKOS, D.E.; BALDOUKAS, A.K., (1996) **Simulation of sheet metal forming using explicit finite element techniques: effect of material and forming characteristics Part 1. Deep-drawing of cylindrical cups.** Journal of Materials Processing Technology. V. 58, p. 48-60.
- MEIK VAHL; PHILIPP HEIN; STEFAN BOBBERT, (1999) **Hydroforming of sheet metal pairs for the production of hollow bodies.**
- METAL FORMING HANDBOOK, (1998) Schuler Editora Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- MURATA M.; ADACHI, Y. **Sheet metal bulging using high temperature liquid.** Advanced Technology of Plasticity 1996, Proc. of the 5th ICTP, Columbus, Ohio, USA (7-10 October, 1996), p. 761-764.
- SCHAEFFER, LIRIO, (2004) **Conformação de chapas metálicas**, Porto Alegre, Imprensa Livre 200p.
- SCHIEBL, G.; LINDNER, H. **Verfahren zum Herstellen eines Hohlkörpers.** Brevet DE 4232 161 A1 (1992).
- SCHMOECKEL, D.; DICK, P. **High pressure forming of sheet metal plates in producing hollow-formed parts.** Prod. Eng., Annals of the WGP 4 (1997), 1, p. 5-8.
- SCHMOECKEL, D.; LIEBLER, B.C.; SPECK, F.D. **Deep drawing of aluminium alloys in partially heated tools.** Prod. Eng., Annals of the WGP 1 (1994), 2, p. 55-58.
- SMITH WILLIAM, F. **Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**, 3a. ed.; Ed. McGraw-Hill, Lisboa, (1998).
- SÜNKEL, R.; PAUTSCH, C.; ROLL, K.; TODERKE, R.; FUCHS, F.; STEININGER, V. **Numerical simulation of metal forming processes in industry with INDEED.** Proc. of the 3rd Int. Conf. NUMISHEET '96, Dearborn (USA) (29.9.-3.10.1996), p. 286-293.

Sites

<http://ww.infor.net.com.br/tollbar.php>

<http://www.periodicos/capes>

<http://www.navactiva.com/web/es/act/noticias/2004/05/26/25774.jsp>

<http://navactiva.com/web/es/amngm/act/resumen/2000/05/31/p6198.jsp>

http://www.carlosfreire.com.br/carlosfreire/empresa_portifolio.asp

[http://www.dn.senai.br/repertorio/ferramenteiros\(2002\)](http://www.dn.senai.br/repertorio/ferramenteiros(2002))

<http://www.theautochannel.com/news/2005/09/16/143195.html>

<http://hydroforming.net/>

<http://www.schuler-hydroforming.de/englisch/default.asp>

<http://www.schulergroup.com>

<http://www.dana.com.br>

<http://www.graebener-group.de/>

<http://www.sps-pressen.de/english/default.htm>

<http://www.vick.com.br/vick/produtos/poliuretano.htm>

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)