

**UNIJUÍ - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio
Grande do Sul**

DETEC – Departamento de Tecnologia



**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
HIDROCONFORMAÇÃO EM TUBOS DE AÇO**

IVAN LAIRTON THÖN

ENGENHARIA MECÂNICA

Trabalho de Conclusão de Curso

Orientador: **Prof. Ph.D. Wang Chong**

Co-orientador: **MSc. Eng. João Henrique Corrêa de Souza**

Panambi, RS, Dezembro de 2006.

IVAN LAIRTON THÖN

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
HIDROCONFORMAÇÃO EM TUBOS DE AÇO**

Relatório de Trabalho de Conclusão de Curso -
TCC, para a obtenção do Título de Engenheiro
Mecânico pela Universidade Regional do
Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul –
UNIJUÍ.

Orientador: **Prof. Ph.D. Wang Chong**

Co-orientador: **MSc. Eng. João Henrique Corrêa de Souza**

Panambi, RS, Dezembro de 2006.

UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul

DETEC – Departamento de Tecnologia

Curso de Engenharia Mecânica – Campus Panambi

Trabalho de Conclusão de Curso

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
HIDROCONFORMAÇÃO EM TUBOS DE AÇO**

Autor: Ivan Lairton Thön

Banca avaliadora:

1º Avaliador: Eng.º Angelin Adams – Bruning Tecnometal

2º Avaliador: Prof. Pedro Luis Andrighetto – Unijuí

3º Avaliador: Prof. Wang Chong – Unijuí

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a **Deus**, pela vida que me concede a cada dia e sua misericórdia infinita, a **Jesus Cristo** pela graça da salvação e perspectivas da vida eterna. Aos meus pais, irmãos e amigos que sempre me apoiaram e incentivaram a continuar lutando.

Aos **Professores do Curso de Engenharia Mecânica da Unijuí**, que me desafiaram a cada vez buscar mais conhecimento relacionado ao curso e para a vida. E aos demais Professores da Universidade com os quais tive contato durante o período de graduação.

Ao Professor orientador, **Wang Chong Ph.D.** pelas suas contribuições em relação ao desenvolvimento, andamento e definições da estrutura do trabalho.

Em especial ao Co-orientador **João Henrique Correa de Souza, MSc.** que atualmente reside na Alemanha e através de e-mails e conversa pelo SKYPE, se dispôs a ajustar horários para diálogos, apesar dos transtornos de fuso horário e outras dificuldades; e de suas contribuições com dados, informações e orientações sobre o processo; e pela sua ajuda na estruturação do relatório.

Ao Professor **Ari Roque Adams** e Professor **Luis Alberto Rüchel** pelo auxílio nas definições do projeto da ferramenta teste e de produção e ajuda na tradução de materiais da língua Alemã para o Português.

E ao **Colégio Evangélico Panambi** por permitir a utilização dos recursos do laboratório de projetos para realização de atividades de pesquisa e descrição do trabalho. E pela disponibilidade dos materiais e recursos de usinagem para a construção do protótipo da ferramenta de teste de hidroconformação, sem a qual não teria nenhuma experiência prática sobre o processo.

RESUMO

Este trabalho apresenta conceitos sobre princípios de conformação, o estado da arte do processo de hidroconformação em tubos, verificando principalmente os detalhes que influenciam no desenvolvimento de um sistema de produção; e cálculos analíticos para determinação da pressão interna e variação da espessura do tubo de aço. Foram realizados testes práticos com um sistema simplificado de uma ferramenta de hidroconformação, onde se uniu as cavidades e os punções de vedação através de parafusos e se amplificou a pressão do fluido hidráulico por meio de um pino acionado por dentro de um dos punções de vedação. Os resultados do teste provaram o funcionamento da vedação do tubo dentro da ferramenta e do amplificador de pressão. Ao final especificação completa de um sistema de hidroconformação para produção.

PALAVRAS CHAVES: conformabilidade, hidroconformação, tubo de aço, amplificador de pressão, vedação da ponteira.

SUMÁRIO

| | |
|---|----------|
| 1 – INTRODUÇÃO | 4 |
| 2 – ESTADO DA ARTE | 7 |
| 2.1 – Princípios da conformação | 7 |
| 2.1.1 – Definição..... | 7 |
| 2.1.2 – Ensaio de tração..... | 7 |
| 2.1.3 – Tensão e deformação verdadeira..... | 10 |
| 2.1.4 – Coeficiente de encruamento (n)..... | 11 |
| 2.1.5 – Anisotropia e o parâmetro R | 12 |
| 2.1.6 – Curva limite de conformação (CLC)..... | 14 |
| 2.1.7 – Ensaio de pressão interna em tubos..... | 15 |
| 2.1.8 – Formas do blank e da conformação em tubos | 17 |
| 2.2 – Exemplos de peças..... | 17 |
| 2.3 – Etapas básicas do processo..... | 19 |
| 2.4 – Exemplo comparativo da técnica de fabricação convencional e hidroconformação..... | 19 |
| 2.5 – Exemplos de prensas para o processo de hidroconformação..... | 19 |
| 2.5.1 – Prensa de colunas verticais com travamento | 20 |
| 2.5.2 – Prensas dedicadas a hidroconformação e exemplo de processos possíveis | 22 |
| 2.6 – Conceitos de fechamento e movimentos dos cilindros de vedação | 25 |
| 2.7 – Forma construtiva de ferramentas usadas no processo | 27 |
| 2.8 – Exemplos de uso de Softwares para análise virtual do processo | 27 |
| 2.8.1 – <i>HYDROFORMING</i> da <i>AutoForm</i> | 29 |
| 2.8.2 – <i>PAM-TUBE 2G</i> da <i>ESI Group</i> | 29 |
| 2.9 – Exemplos de ferramentas de hidroconformação..... | 32 |
| 2.10 – Corte das ponteiros de vedação do tubo | 32 |
| 2.11 – Falhas que podem ocorrer na hidroconformação de tubos | 36 |

| | |
|--|-----------|
| 3 – ABORDAGEM TEÓRICA ANALÍTICA DO PROCESSO DE EXPANSÃO DE TUBOS | 40 |
| 3.1 – Determinação da mínima pressão interna pelo método do vazo de pressão..... | 40 |
| 3.1.1 – <i>Determinação da mínima pressão interna SISTEMA PARA TESTE</i> | 41 |
| 3.1.2 – <i>Determinação da mínima pressão interna SISTEMA PARA PRODUÇÃO</i> | 42 |
| 3.2 – Variação da espessura do tubo em função da expansão | 42 |
| 3.2.1 – <i>Variação estimada da espessura para o tubo do SISTEMA PARA TESTE</i> | 42 |
| 3.2.2 – <i>Variação estimada da espessura para o tubo do SISTEMA PARA PRODUÇÃO</i> | 43 |
| 3.3 – Teoria sobre expansão livre de um cilindro pela pressão interna | 44 |
| 3.3.1 – <i>Cálculo analítico da pressão interna pela equação 3.8 do SISTEMA PARA TESTE</i> | 47 |
| 3.3.2 – <i>Cálculo analítico do “r” em função do “n” pela equação 3.9</i> | 48 |
| 3.3.3 – <i>Cálculo analítico da pressão interna máxima pela equação 3.10</i> | 49 |
| 4 – CONSTRUÇÃO DO SISTEMA PARA TESTE | 50 |
| 4.1 – Cálculo dos esforços de fechamento | 50 |
| 4.1.1 – <i>Para abertura da matriz</i> | 50 |
| 4.1.2 – <i>Para abertura dos punções de vedação</i> | 51 |
| 4.2 – Especificação do sistema..... | 52 |
| 4.3 – Construção e funcionamento do protótipo | 53 |
| 4.4 – Questões relacionadas a vedação..... | 54 |
| 4.5 – Resultados dos testes sem restrição no diâmetro de expansão | 55 |
| 4.6 – Resultados dos testes usando restrição no diâmetro de expansão..... | 55 |
| 5 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO SISTEMA PARA PRODUÇÃO | 58 |
| 5.1 – Definição da peça e tipo da ferramenta..... | 58 |
| 5.1.1 – <i>Definição do blank</i> | 59 |
| 5.1.2 – <i>Definição das medidas da peça para produção</i> | 59 |
| 5.1.3 – <i>Definição do tipo de ferramenta e etapas do processo</i> | 60 |
| 5.2 – Cálculo dos esforços de abertura da matriz e punção de vedação | 62 |
| 5.3 – Definição do esquema hidráulico de fechamento da vedação no tubo..... | 64 |
| 5.4 – Definição do esquema hidráulico do amplificador de pressão | 64 |
| 5.5 – Sistema de alimentação do fluido em baixa pressão para enchimento do tubo | 70 |
| 5.6 – Detalhamento e funcionamento da ferramenta de produção | 71 |
| 5.6.1 – <i>Funcionamento da hidroconformação</i> | 73 |
| 5.7 – Análise estrutural em Cosmos Works de peças da ferramenta | 74 |
| 5.8 – Detalhamento e especificações da prensa de fechamento da Tromink | 80 |
| 5.9 – Custos para fabricação do sistema de hidroconformação para produção..... | 81 |
| 5.9.1 – <i>Dos materiais comprados</i> | 81 |

| | |
|--|------------|
| 5.9.2 – <i>Em processo de manufatura dos materiais</i> | 83 |
| CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 84 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 86 |
| APÊNDICE A – DESENHO DETALHADO DO SISTEMA PARA TESTE | 89 |
| APÊNDICE B – MONTAGEM E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA PARA TESTE | 91 |
| APÊNDICE C – DESENHO DETALHADO DO SISTEMA PARA PRODUÇÃO | 99 |
| ANEXO A – EXEMPLOS DE FERRAMENTAS E SISTEMAS DE HIDROCONFORMAÇÃO..... | 101 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Aplicação de peças hidroconformadas no automóvel. | 4 |
| Figura 2.1 – Estado uniaxial do corpo de prova no ensaio de tração..... | 8 |
| Figura 2.2 – Curva de ductilidade, da tensão com a deformação - BEER [2]. | 9 |
| Figura 2.3 – Diagrama de tensão e deformação com deformação plástica - BEER [2]..... | 10 |
| Figura 2.4 – Curva de tensão x deformação verdadeira - ALUMATTER [3] e AutoForm. | 11 |
| Figura 2.5 – Efeito do n na forma da curva - EDOUARD [4]. | 12 |
| Figura 2.6 – Alongamento dos grãos durante a laminação - SCHAEFFER [5]..... | 12 |
| Figura 2.7 – Fenômeno de orelhamento na estampagem - SCHAEFFER [5]. | 13 |
| Figura 2.8 – Corpo de prova padrão, observando deformações na largura e espessura - EDOUARD [4]. | 14 |
| Figura 2.9 – Método de amostragem para obtenção do R - EDOUARD [4]. | 14 |
| Figura 2.10 – Curva Limite de Conformação (CLC) - ALUMATTER [3]. | 15 |
| Figura 2.11 – Deformação através de grades e círculos gerados no Autoform..... | 16 |
| Figura 2.12 – Ensaio de pressão interna em tubos - SCHULER [6]. | 16 |
| Figura 2.13 – Resultados do ensaio de pressão interna em tubo - SCHULER [6]..... | 17 |
| Figura 2.14 – Processos de conformação hidrostática em tubos - CERVEIRA [1]. | 18 |
| Figura 2.15 – Exemplos de peças obtidas pelo processo de hidroconformação..... | 18 |
| Figura 2.16 – Etapas básicas do processo. | 19 |
| Figura 2.17 – Comparação entre técnica de fabricação convencional e a hidroconformação. | 20 |
| Figura 2.18 – Conceito de prensa vertical com travamento - de Souza..... | 21 |
| Figura 2.19 – Funcionamento da prensa vertical com travamento - de Souza..... | 21 |
| Figura 2.20 – Esquema hidráulico da prensa vertical com travamento da IFU - SIEGERT [7]. | 22 |
| Figura 2.21 – Sistema na forma de anel com cilindros montados no seu interior - LANGE [8]. | 23 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.22 – Sistema na forma de anel com porta ferramentas e cilindros em seu interior - LANGE [8]. | 24 |
| Figura 2.23 – Exemplo de peças com ressaltos e um esquema da ferramenta - LANGE [8]. | 24 |
| Figura 2.24 – Exemplo de peças simétricas e um esquema da ferramenta - LANGE [8]. | 25 |
| Figura 2.25 – Exemplo de peças com relevo e um esquema da ferramenta - LANGE [8]. | 25 |
| Figura 2.26 – Representação da pressão interna e funcionamento dos punções de vedação - LANGE [8]. | 26 |
| Figura 2.27 – Posição em que se encontra a matriz de fechamento - LANGE [8]. | 26 |
| Figura 2.28 – Esquema de montagem de uma ferramenta de hidroconformação em tubo. | 27 |
| Figura 2.29 – Ferramenta com movimentação lateral - LANGE [8]. | 28 |
| Figura 2.30 – Dados do aço NBR 5915 EM necessários para simulação - AutoForm. | 28 |
| Figura 2.31 – Suporte da tampa simulada no AutoForm-Hydro - AUTOFORM [9]. | 30 |
| Figura 2.32 – Partes que compõem a operação de dobramento do tubo - AUTOFORM [9]. | 30 |
| Figura 2.33 – Etapas do processo de simulação pelo AutoForm-Hydro - AUTOFORM [9]. | 31 |
| Figura 2.34 – Exemplo de uma peça estrutural e sua aplicação simulada - AUTOFORM [9]. | 31 |
| Figura 2.35 – Exemplo de peça simulada no PAM-TUBE 2G - ESI-GROUP [10]. | 32 |
| Figura 2.36 – Etapas do processo de simulação pelo PAM-TUBE 2G - ESI-GROUP [10]. | 33 |
| Figura 2.37 – Desenho em CAD de uma ferramenta de produção - SCHULER [6]. | 34 |
| Figura 2.38 – Ferramenta de produção - SCHULER [6]. | 34 |
| Figura 2.39 – Indicação de algumas funções da ferramenta - SCHULER [6]. | 35 |
| Figura 2.40 – Formação da aba de vedação - SCHULER [6]. | 35 |
| Figura 2.41 – Corte da ponteira de vedação feito por Laser - AMERICAN HYDROFORMERS [11]. | 36 |
| Figura 2.42 – Formação de rugas e fissura - MATTER [3]. | 37 |
| Figura 2.43 – Formação de nervura por tração e rugas - SCHULER [6]. | 38 |
| Figura 2.44 – Formação de regiões com água presa - SCHULER [6]. | 38 |
| Figura 2.45 – Comparação da simulação com a prática - SCHULER [6]. | 39 |
| Figura 2.46 – Modalidades de falha ou aspectos indesejados via Software - SCHULER [6]. | 39 |
| Figura 3.1 – Esquema com as variáveis para o calculo. | 40 |
| Figura 3.2 – Blank do sistema para teste. | 42 |
| Figura 3.3 – Peça final do sistema para teste. | 43 |
| Figura 3.4 – Blank do sistema para produção. | 43 |
| Figura 3.5 – Peça final do sistema para produção. | 44 |
| Figura 3.6 – Um elemento circular de tubo com pressão interna - MARCINIAK [13]. | 45 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.7 – Dados do aço SAE 1008 - Através do AutoForm. | 48 |
| Figura 4.1 – Desenho em CAD do sistema para teste..... | 52 |
| Figura 4.2 – Componentes usados no sistema para teste. | 53 |
| Figura 4.3 – Resultados dos testes nos tubos de aço SAE 1008 (1, 2 e 3) com expansão livre. | 56 |
| Figura 4.4 – Resultados dos testes nos tubos de aço SAE 1008 (4, 5 e 6) com anéis cortados. | 57 |
| Figura 4.5 – Resultados dos testes nos tubos de aço SAE 1008 (7, 8 e 9) com anéis contínuos. | 57 |
| Figura 5.1 – Forma visual da peça teste de produção..... | 59 |
| Figura 5.2 – Forma e medidas finais da peça para produção. | 60 |
| Figura 5.3 – Forma conceitual da ferramenta de hidroconformação..... | 61 |
| Figura 5.4 – Posição da ferramenta de hidroconformação. | 61 |
| Figura 5.5 – Sistema de vedação na extremidade do tubo. | 62 |
| Figura 5.6 – Especificação do cilindro hidráulico - NEUMAQ [16]..... | 64 |
| Figura 5.7 – Esquema hidráulico de fechamento da vedação no tubo..... | 65 |
| Figura 5.8 – Esquema da variação das áreas do amplificador..... | 65 |
| Figura 5.9 – Esquema básico do amplificador de pressão. | 66 |
| Figura 5.10 – Esquema do amplificador de pressão simultâneo - HIDRO-PAC [17]..... | 67 |
| Figura 5.11 – Especificações dos amplificadores de pressão - HIDRO-PAC [17]. | 67 |
| Figura 5.12 – Sistema de amplificadores de pressão - EPSI [18]..... | 68 |
| Figura 5.13 – Tipos de mangueiras SPIR STAR - FLUTROL [19]..... | 68 |
| Figura 5.14 – Foto de referência do equipamento Test Pac F200 - FLUTROL [19]. | 69 |
| Figura 5.15 – Esquema para referência da Bomba Hidropneumática - HASKEL [20]..... | 70 |
| Figura 5.16 – Desenho em CAD da ferramenta para produção..... | 71 |
| Figura 5.17 – Detalhes da parte interna da ferramenta. | 72 |
| Figura 5.18 – Blank, tubo sem conformação..... | 73 |
| Figura 5.19 – Tubo conformado pelos punções de vedação. | 73 |
| Figura 5.20 – Fluxo de entrada do fluido para dentro da peça..... | 74 |
| Figura 5.21 – Tubo hidroconformado do SISTEMA DE PRODUÇÃO..... | 74 |
| Figura 5.22 – Suporte cilindro preparado para a análise em COSMOS Works..... | 75 |
| Figura 5.23 – Distribuição de tensões superiores a 60 MPa no SUPORTE DO CILINDRO.. | 75 |
| Figura 5.24 – Deformações no SUPORTE DO CILINDRO..... | 76 |
| Figura 5.25 – Distribuição de tensões superiores a 15MPa na BASE SUPERIOR. | 76 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.26 – Deformações acima de 0,005mm na BASE SUPERIOR..... | 77 |
| Figura 5.27 – Distribuição de tensões superiores a 100 MPa na CAVIDADE FIXA..... | 77 |
| Figura 5.28 – Distribuição de tensões superiores a 30 MPa na CAVIDADE FIXA..... | 78 |
| Figura 5.29 – Deformações acima de 0,01mm na CAVIDADE FIXA..... | 78 |
| Figura 5.30 – Montagem da CAVIDADE SUPERIOR..... | 79 |
| Figura 5.31 – Distribuição de tensões superiores a 100 MPa na CAVIDADE SUPERIOR. .. | 79 |
| Figura 5.32 – Deformações acima de 0,03mm na CAVIDADE SUPERIOR..... | 80 |
| Figura 5.33 – Detalhamento da mesa da prensa 500T - TROMINK..... | 81 |

Figuras do APÊNDICE e ANEXOS

| | |
|---|-----|
| Figura A. 1 – Fechamento das matrizes por meio de parafusos..... | 93 |
| Figura A. 2 – Colocação dos punções de vedação para alinhamento das matrizes..... | 93 |
| Figura A. 3 – Aperto dos parafusos das matrizes com torquímetro..... | 94 |
| Figura A. 4 – Fechamento dos punções de vedação na prensa hidráulica..... | 94 |
| Figura A. 5 – Tubo com as ponteiros de vedação conformadas..... | 95 |
| Figura A. 6 – Colocação dos parafusos na tampa do punção de vedação inferior..... | 95 |
| Figura A. 7 – Colocação dos parafusos na tampa do punção de vedação superior..... | 96 |
| Figura A. 8 – Aperto dos parafusos das tampas dos punções de vedação com torquímetro.... | 96 |
| Figura A. 9 – Colocação do fluido água com óleo refrigerante..... | 97 |
| Figura A. 10 – Colocação da vedação e do pino acionador e proteção..... | 97 |
| Figura A. 11 – Sistema colocado e preparado para hidroconformação na prensa..... | 98 |
| Figura A. 12 – Eu junto à prensa hidráulica após a hidroconformação do tubo..... | 98 |
| Figura A. 13 – Ferramenta dupla para aumento de produção - SCHULER [6]..... | 102 |
| Figura A. 14 – Projeto e execução das ligações hidráulicas - SCHULER [6]..... | 102 |
| Figura A. 15 – Mais componentes da ferramenta de hidroconformação - SCHULER [6].... | 103 |
| Figura A. 16 – Bloco recambiável com sistema de estampagem - SCHULER [6]..... | 103 |
| Figura A. 17 – Exemplo de operação do sistema na prensa - SCHULER [6]..... | 104 |
| Figura A. 18 – Prensa de Hidroconformação montada por placas de aço - SCHULER [6].. | 104 |
| Figura A. 19 – Layout da linha de produção de sistema de Hidroconformação - SCHULER [6]..... | 105 |
| Figura A. 20 – Linha de produção da BMW AG, Alemanha - SCHULER [6]..... | 105 |

1 – INTRODUÇÃO

O termo hidroconformação é usado para descrever o processo de conformação de peças em matriz por meio da utilização de um fluido hidráulico, injetado na região interna da peça de trabalho, que conseqüentemente exerce a pressão de conformação, a fim de se obter peças tubulares com seções transversais diferentes. O processo de fabricação é utilizado principalmente pelas indústrias automobilística e aeronáutica para a produção de produtos de baixo custo, com peso reduzido e com maior integridade estrutural quando comparado com processos convencionais de conformação. Na Figura 1.1, aparecem exemplos de peças de um automóvel com aplicação do processo de hidroconformação.

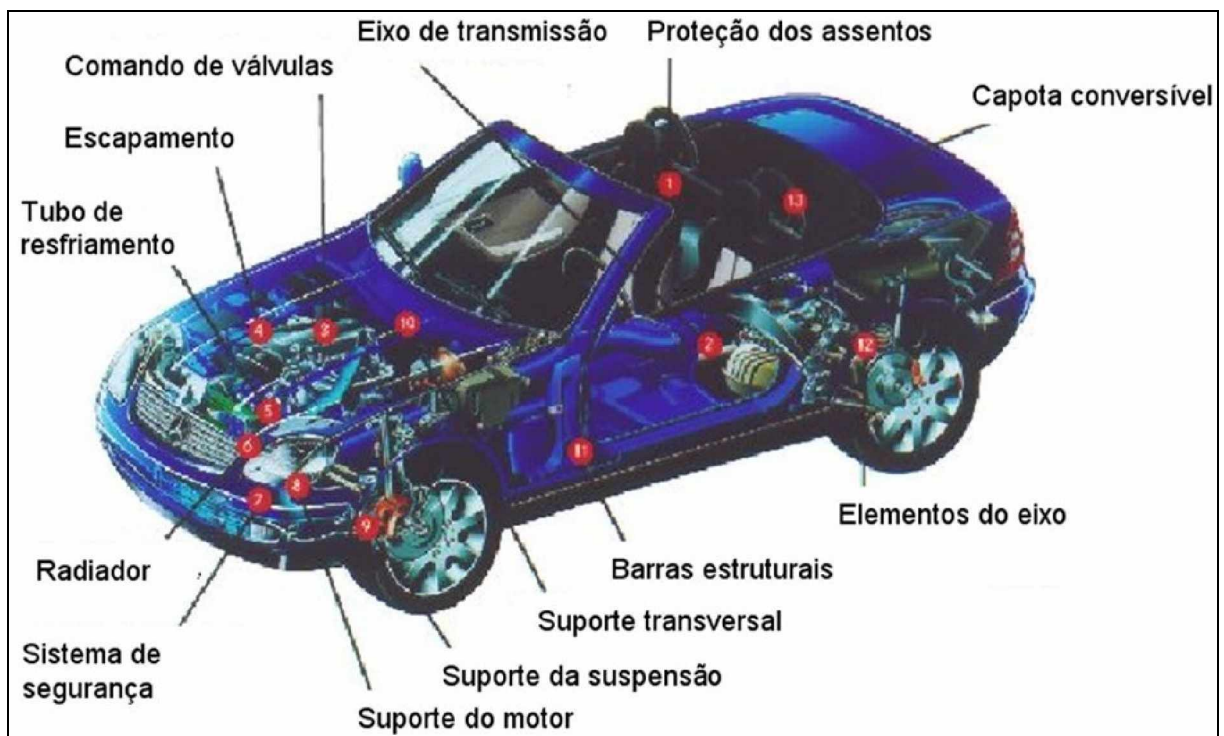


Figura 1.1 – Aplicação de peças hidroconformadas no automóvel.

O processo de hidroconformação é normalmente acompanhado por outros processos de conformação, tais como dobramento, com o objetivo de reduzir a área de contato entre o tubo e a matriz antes do processo de expansão hidráulica. Através do processo de hidroconformação é possível fabricar uma extensa variedade de produtos, incluindo barras estruturais, berços do motor, coletores de exaustão e outros, com custo de produção mais barato devido à redução do número total de processos. O interesse da indústria automobilística neste processo se deve à possibilidade de substituição de inúmeras peças estampadas e conjuntos soldados da carcaça e do chassi por uma única peça hidroconformada.

Diversos fatores influenciam no sucesso das peças hidroconformadas: as características inerentes do material, a geometria da peça, os parâmetros adotados, etc. Entre as maiores limitações do processo estão os fatores de falhas por estrição, enrugamento e ruptura, além de certo desconhecimento das melhores relações entre os parâmetros do processo.

É conhecido que no Brasil o processo de hidroconformação ainda é pouco utilizado nas indústrias. A região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul se destaca como fabricante de peças a partir do corte e conformação de chapas de aço e alumínio, fornecendo componentes para as montadoras de carros de passeio, caminhões e ônibus de várias marcas. Levando em consideração que as montadoras de veículos atuam mundialmente e que seus produtos são influenciados pelas tendências mundiais de usar produtos com formas tubulares de maior desempenho, faz-se necessário, com urgência, que as empresas no mercado busquem o domínio dos processos para obtenção das peças por meio destas tecnologias. Há a necessidade de se conhecer mais sobre o processo de hidroconformação de tubos e alcançar condições para sua implantação nos produtos que estão aparecendo no mercado brasileiro para fabricação.

Um dos principais objetivos da indústria de processamento de chapas metálicas é de minimizar custos e aperfeiçoar o processo de produção, a melhoria da precisão dimensional e da qualidade superficial das peças, redução do peso das peças, buscando melhorar seu desempenho e segurança durante o uso. Deste princípio parte a idéia deste trabalho, que tem como objetivo principal o estudo do processo de hidroconformação de tubos de aço.

Como primeiro passo, pretende-se identificar algumas das variáveis de influência e com isso desenvolver a melhoria do processo a fim de permitir:

- Redução do número de etapas nos processos produtivos;
- Redução do custo de fabricação com ferramental;
- Desenvolver e especificar um sistema de Hidroconformação em tubos;
- Absorção e disseminação da tecnologia junto às empresas parceiras no projeto.

Para tentar alcançar estes objetivos, será apresentado um estudo sobre o estado da arte da tecnologia de hidroconformação em tubos, o desenvolvimento de uma abordagem analítica usando tubos redondos, a construção de um sistema simplificado para teste do processo de hidroconformação, utilizando-se tubo de aço SAE 1008 com dimensões de Ø25,4mm com variação de espessura de 1,2 e 1,5mm.

Com os resultados do sistema para teste, especificar um sistema para produção, para o qual serão realizados os cálculos dos esforços de abertura da matriz e punção de vedação, definir o sistema hidráulico de fechamento da vedação do tubo e do sistema amplificador de pressão, detalhamento da ferramenta, análise estrutural das peças da ferramenta em Cosmos Works e um levantamento de custos para sua fabricação.

2 – ESTADO DA ARTE

2.1 – Princípios da conformação

2.1.1 – Definição

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

Um corpo quando submetido à tensão 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 pela Lei de Hooke através dos constantes elásticas, usualmente E e ν . Para causar deformação plástica, um nível particular de tensão deve ser alcançado; essa é a chamada tensão de escoamento do material. Para a maioria dos materiais dúcteis, tanto a extensão da deformação como a mudança na forma do corpo podem continuar até um grau elevado antes do rompimento, caso não acontece descarregamento [1].

2.1.2 – Ensaio de tração

O ensaio de tração uniaxial é um dos testes mais simples para se estudar o comportamento mecânico do material (Figura 2.1). Um corpo de prova com comprimento (L_0) e uma seção transversal (A_0) inicialmente é sujeito a uma força (F), com isso pode-se traçar uma curva de ductilidade (Figura 2.2) que demonstra a relação entre a tensão (σ) e a deformação em escala natural (ϵ) até o rompimento do material:

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

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.2)$$

onde:

F = força tensora

A = área instantânea da seção transversal

l = comprimento instantâneo do corpo de prova

l_0 = comprimento inicial do corpo de prova

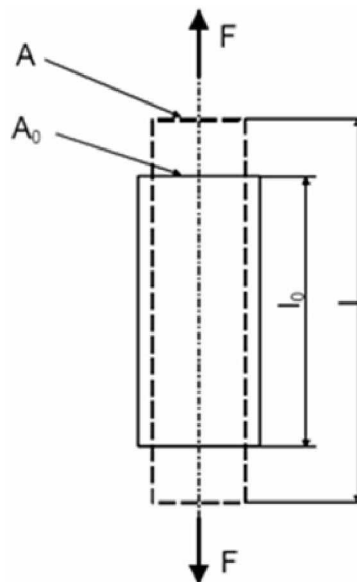


Figura 2.1 – Estado uniaxial do corpo de prova no ensaio de tração.

Caso retire-se a força e o material retorne ao seu estado inicial, o comportamento é dito elástico ou reversível. Para a maioria dos metais o comportamento elástico é linear. Portanto, a relação entre tensão e deformação é:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (2.3)$$

sendo E o módulo de Elasticidade ou de Young.

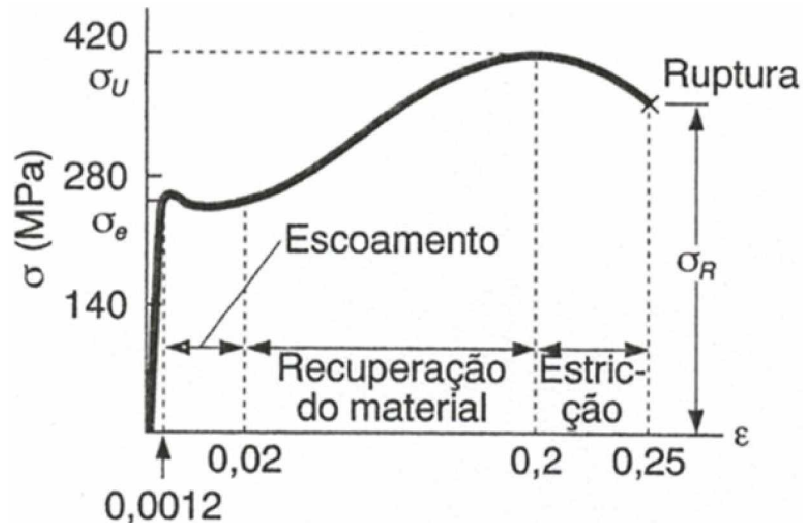


Figura 2.2 – Curva de ductilidade, da tensão com a deformação - BEER [2].

A um certo valor de deformação a tensão de escoamento é atingida. A partir desse ponto o comportamento do material se torna plástico ou irreversível, (Figura 2.2), ou seja, o estado inicial não é mais atingido com a retirada da carga. Esse é o ponto que interessa para a conformação de materiais, onde é necessária uma deformação permanente. A partir da tensão de escoamento a inclinação da curva muda consideravelmente.

A retirada do carregamento que age no corpo de prova na zona plástica resulta em uma deformação plástica permanente (ϵ^p), visto na Figura 2.3. A inclinação da curva durante o alívio de carga é assumida como sendo o mesmo que o da zona elástica, o módulo de Young é assumido como sendo constante. Assim, as deformações plásticas não afetam as propriedades elásticas do material. Essa é a base da teoria da plasticidade. A deformação total é decomposta em uma componente elástica e outra plástica:

$$\epsilon^{tot} = \epsilon^e + \epsilon^p \quad (2.4)$$

Para a maioria dos materiais de engenharia, um aumento de tensão é encontrado para deformação contínua. Quando, após o alívio de carga, o material é novamente submetido ao carregamento, a partir de (ϵ^p), a plasticidade reinicia em um ponto anterior à tensão plástica (σ_B). Após alguma deformação, a curva se reaproxima da curva que seria encontrada sem que houvesse o alívio de carga.

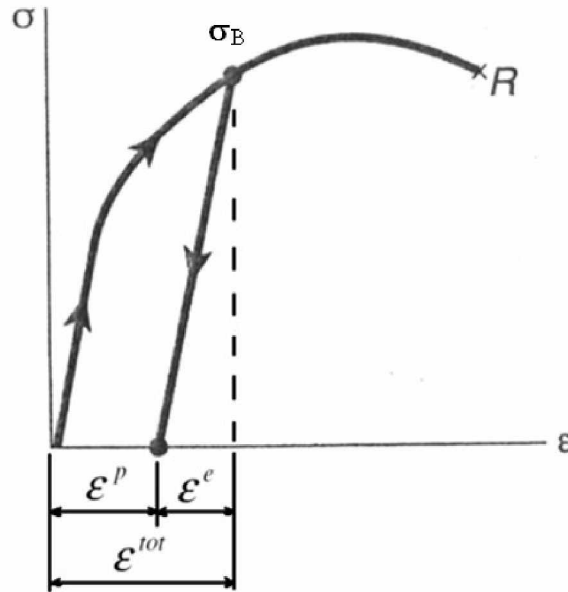


Figura 2.3 – Diagrama de tensão e deformação com deformação plástica - BEER [2].

2.1.3 – Tensão e deformação verdadeira

Para a avaliação do comportamento de resistência e deformação de chapas de aço na conformabilidade, procura-se utilizar a curva de tensão e deformação verdadeira. Ela apresenta os valores de tensão e deformação considerando a estricção que ocorre no corpo de prova durante o ensaio de tração. As curvas representadas na Figura 2.4 apresentam um crescimento contínuo nos valores de tensão, e são chamadas de curvas de tensão verdadeira x deformação verdadeira ou ainda conhecida como curva real.

A curva real para o gráfico *tensão x deformação* pode ser aproximadamente representada pela expressão exponencial do tipo:

$$\sigma = K * \epsilon^n \quad (2.5)$$

onde, K e n são constantes para cada material, denominados respectivamente “coeficiente de resistência” e “coeficiente de encruamento”, que descrevem completamente a forma da curva real. Embora essas grandezas sejam consideradas como constantes, elas podem variar conforme o processo de fabricação do material. K mede a tensão real quando $\epsilon = 1,0$ tendo,

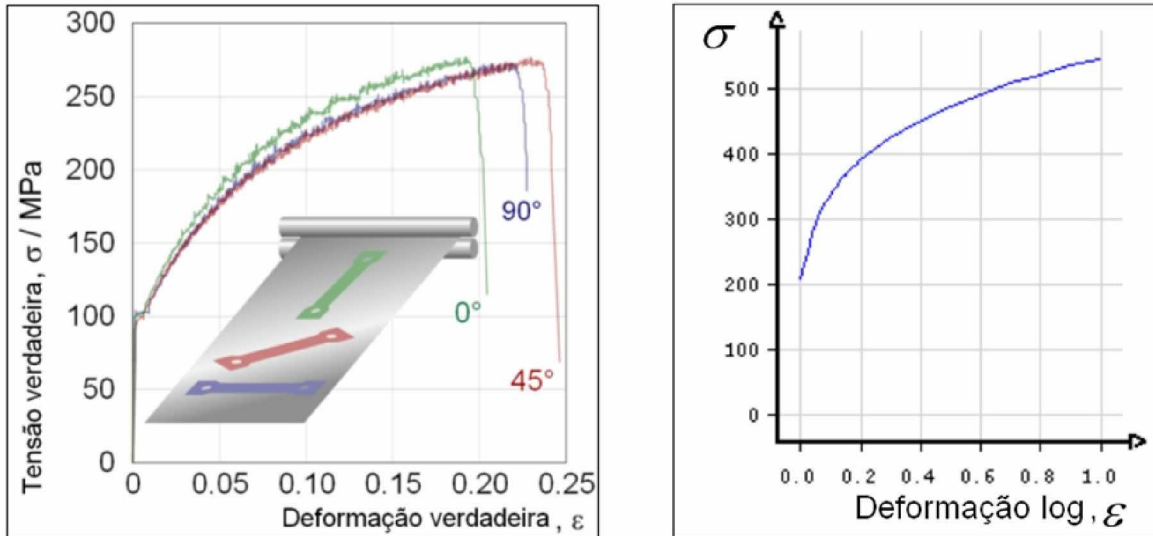


Figura 2.4 – Curva de tensão x deformação verdadeira - ALUMATTER [3] e AutoForm.

portanto, dimensão de tensão. Seu valor fornece alguma indicação do nível de resistência do material.

A deformação verdadeira, em cada instante, é obtida por:

$$\epsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (2.6)$$

onde l_0 é o comprimento inicial da região de medição no corpo de prova e l é o comprimento instantâneo.

2.1.4 – Coeficiente de encruamento (n)

O coeficiente de encruamento, mais conhecido como n , determina a habilidade do material de ser estirricionado, e o aumento de tensão para cada incremento de deformação. Quanto maior o valor de n , mais duro será o material. Quanto maior o valor de n , maior a resistência à estirricção.

Ainda pode ser considerado que o valor de n é como uma característica de grande importância, ele fornece a medida da capacidade ou a habilidade do material que poder distribuir a deformação uniformemente, principalmente para o estudo dos aços para estampagem. Quanto maior o valor de n de um material, maior será a inclinação da curva real

desse material e mais uniforme a distribuição das deformações na presença de um gradiente de tensões. Como consequência, para materiais com valores baixos de n , sua curva será mais horizontal (Figura 2.5).

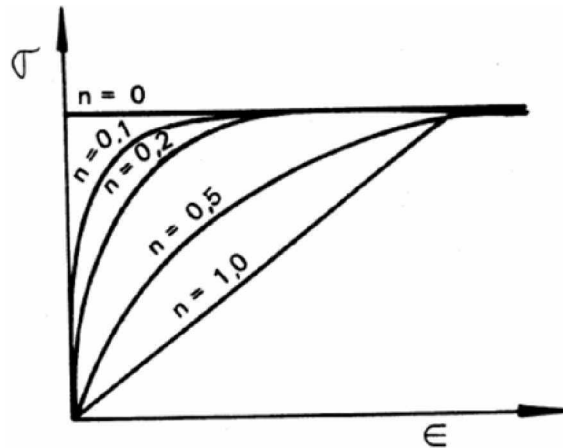


Figura 2.5 – Efeito do n na forma da curva - EDOUARD [4].

2.1.5 – Anisotropia e o parâmetro R

Durante o processo de laminação de chapas metálicas ocorre a deformação da microestrutura e se originam grãos mais alongados na direção da laminação (Figura 2.6).

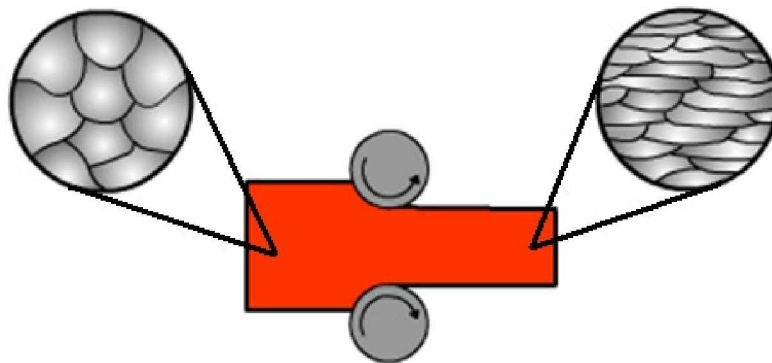


Figura 2.6 – Alongamento dos grãos durante a laminação - SCHAEFFER [5].

Em um material completamente isotrópico, todas as orientações dos grãos estão em uma base igual e o material é considerado isotrópico com respeito às propriedades mecânicas associadas. Na maioria dos casos, no entanto, existe uma tendência dos grãos terem certos planos cristalográficos ou direções, claramente alinhadas com a direção da primeira

conformação. Como resultado, alguns materiais permitem uma deformação mais fácil em algumas direções do que em outras, causando o fenômeno de orelhamento, como observado no repuxo de um copo (Figura 2.7). Esta condição cria anisotropia plástica, onde as propriedades na direção de laminação são diferentes das direções transversais.

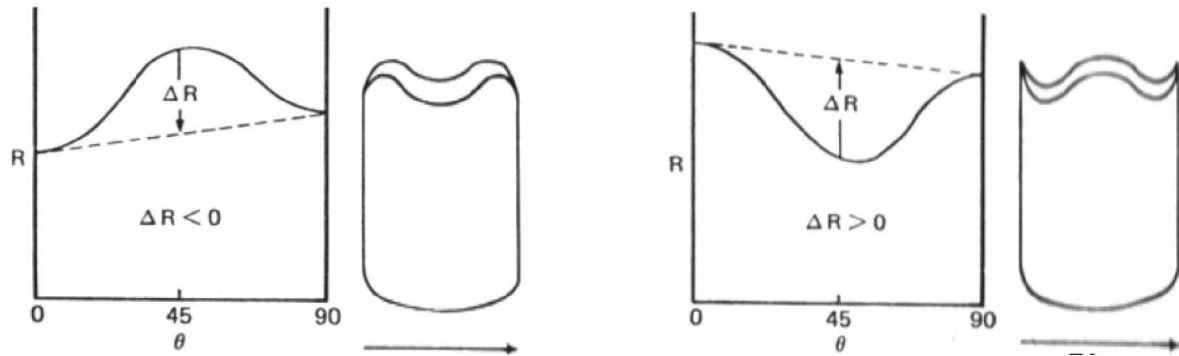


Figura 2.7 – Fenômeno de orelhamento na estampagem - SCHAEFFER [5].

A forma total da curva tensão-deformação, e propriedades como tensão de escoamento, força de tração e taxa de encruamento, são afetadas por esta orientação cristalográfica.

O índice de anisotropia plástica (R) é definido como a razão da deformação verdadeira na largura e a deformação verdadeira na espessura no teste de um corpo de prova padrão de comprimento útil de 50 mm (Figura 2.8). Um método de obter R é plotar a deformação na largura (ϵ_w) versus a deformação na espessura (ϵ_t) para várias amostras tracionadas até a estricção. Para a maioria dos materiais comuns de conformação, o resultado será uma linha reta e o valor de R será constante.

O parâmetro de anisotropia (R) pode ser obtido para diferentes direções na chapa. Normalmente, amostras são removidas de chapas a 0° , 45° e 90° da direção de laminação.

Testando-se chapas perfeitamente isotrópicas ou não direcionais, todos os valores de R seriam iguais a uma unidade. Entretanto, para a maioria dos materiais, há variações dos valores de R com a direção. Essa variação de R dentro do plano da chapa (Figura 2.9) é chamada de anisotropia planar.

Valores elevados de anisotropia significam menos instabilidade plástica, por esse motivo, valores altos são preferencialmente utilizados para que se possa aumentar a capacidade de deformação na largura com reduções pequenas na espessura.

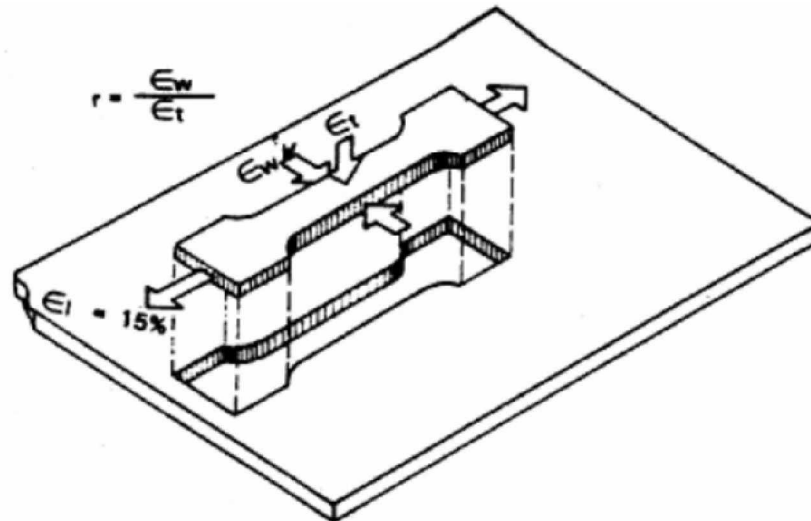


Figura 2.8 – Corpo de prova padrão, observando deformações na largura e espessura - EDOUARD [4].

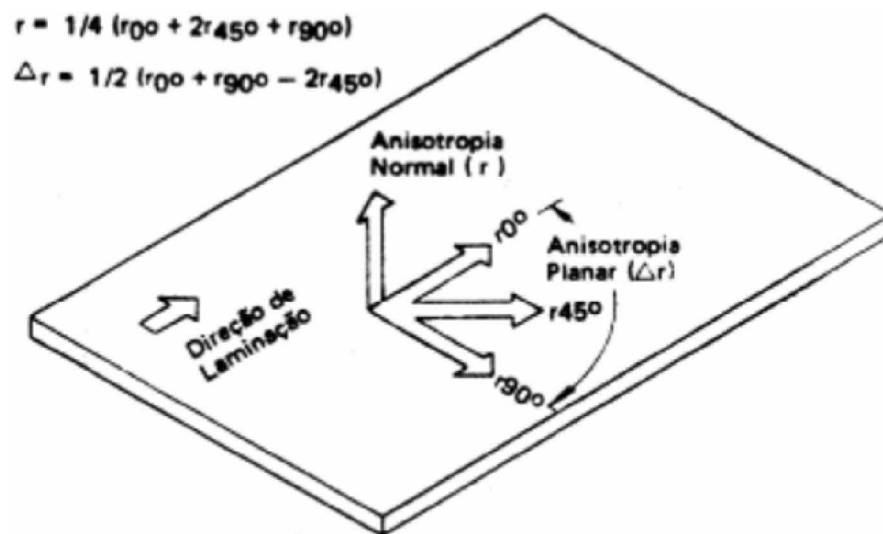


Figura 2.9 – Método de amostragem para obtenção do R - EDOUARD [4].

2.1.6 – Curva limite de conformação (CLC)

A curva limite de conformação (CLC) (Figura 2.10) fornece informações de como a combinação das principais deformações que ocorrem no processo de fabricação poderão dar origem a uma peça com defeito ou não. Examinar a CLC é uma das análises importantes a

serem executadas para se ter certeza do sucesso do projeto e execução de um determinado componente.

As deformações em diferentes locais de um componente estampado variam enormemente de um ponto para outro. É de interesse prático a determinação quantitativa dessas deformações.

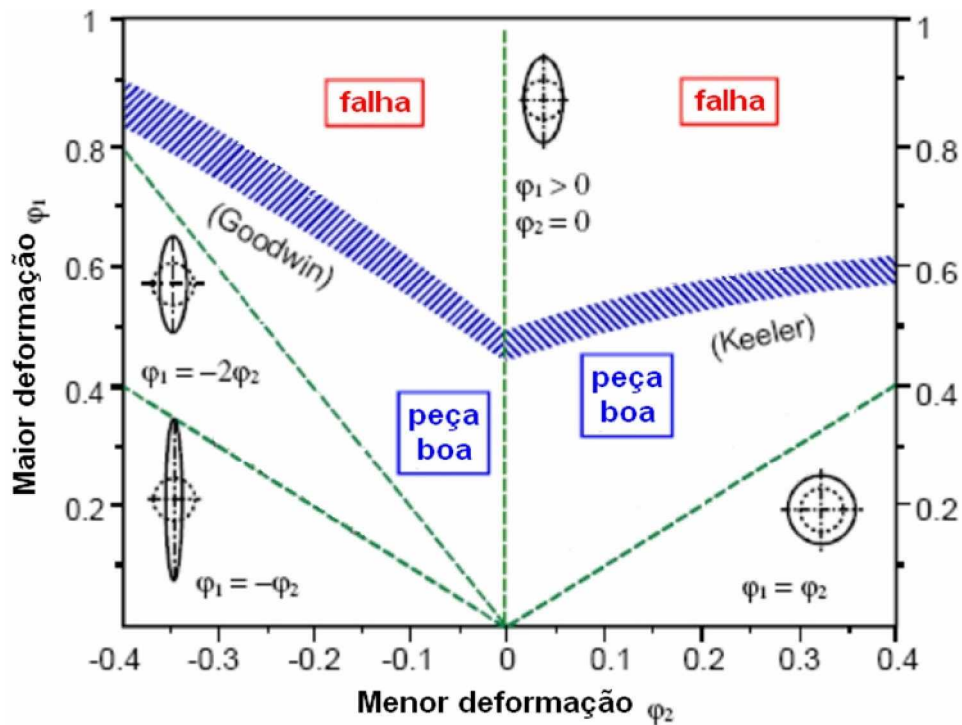


Figura 2.10 – Curva Limite de Conformação (CLC) - ALUMATTER [3].

Com o emprego de grades e círculos (Figura 2.11), é possível a obtenção das deformações. As grades devem ser colocadas sobre a chapa antes de ocorrer à estampagem. Após o processo, avaliam-se as deformações dessa rede que darão informações necessárias sobre a variação das deformações críticas.

2.1.7 – Ensaio de pressão interna em tubos

O maior uso do blank para este processo é o tubo de aço com costura. Sua obtenção é através da calandragem de uma chapa plana para a forma redonda e posterior solda de união das duas abas, realizando o seu fechamento. Trata-se seus parâmetros de conformabilidade, de uma forma geral como sendo uma chapa plana de aço como visto até aqui.

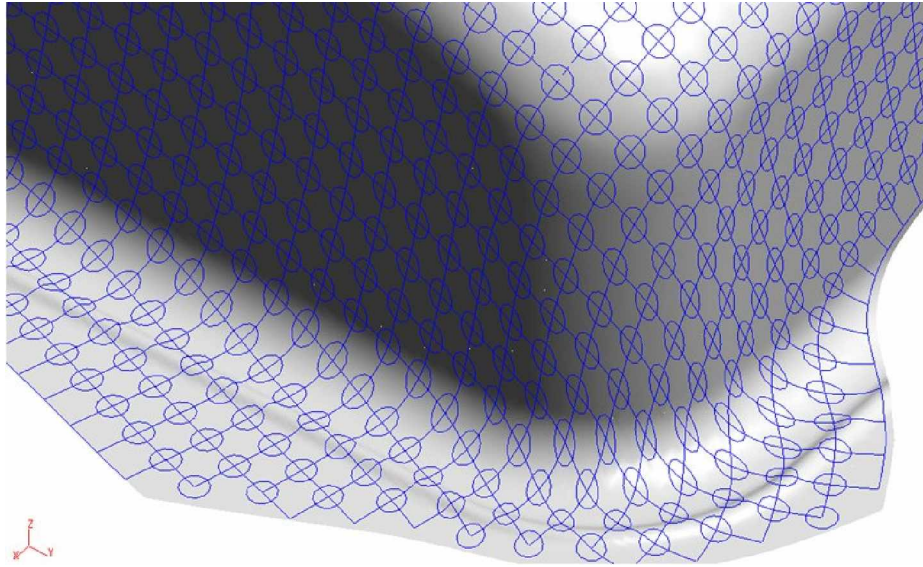


Figura 2.11 – Deformação através de grades e círculos gerados no Autoform.

De acordo com a Figura 2.12, os ensaios em tubos, são realizados da seguinte forma: o tubo é preso nas suas extremidades e feito o fechamento dos punções de vedação, então gerada uma pressão interna expandindo o tubo até o seu rompimento e a seguir são realizadas medições de sua circunferência a 120°.

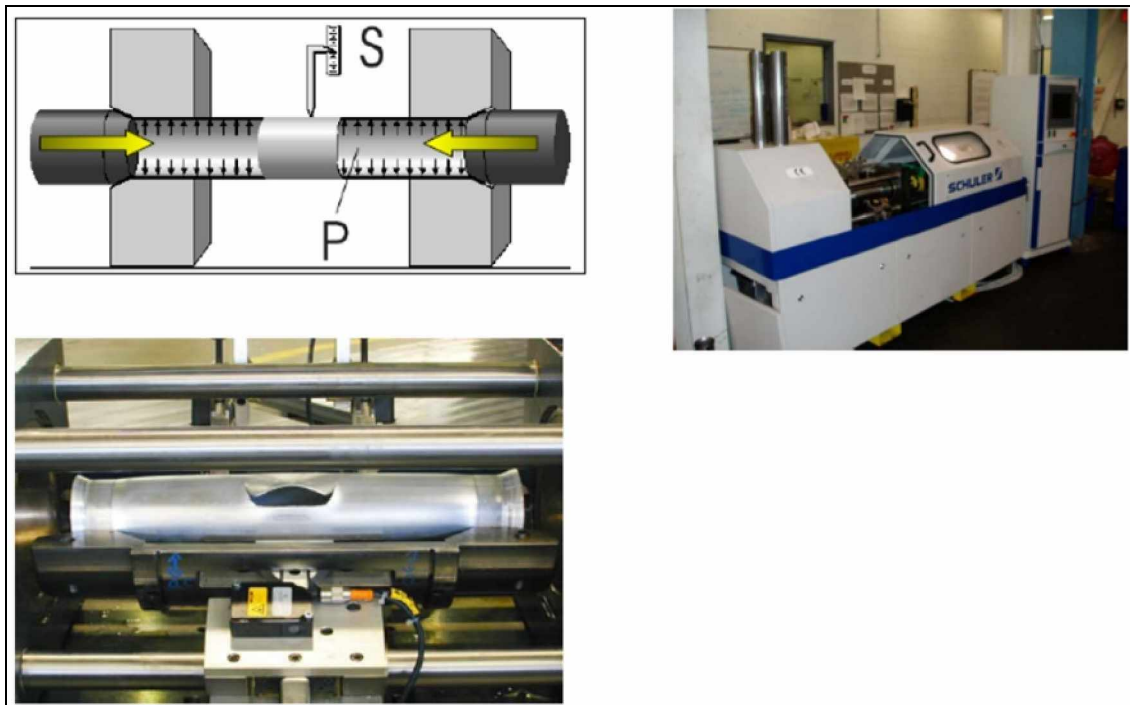


Figura 2.12 – Ensaio de pressão interna em tubos - SCHULER [6].

Os resultados alcançados pelo ensaio com a máquina de teste de pressão interna em tubo da empresa SCHULER estão na Figura 2.13. No primeiro diagrama aparece a curva com os valores de pressão (p) em relação à medida de aumento do seu raio (s) do tubo na direção radial; e no segundo, a curva de tensão (K_r) x deformação (ϕ) gerada pela máquina durante o ensaio.

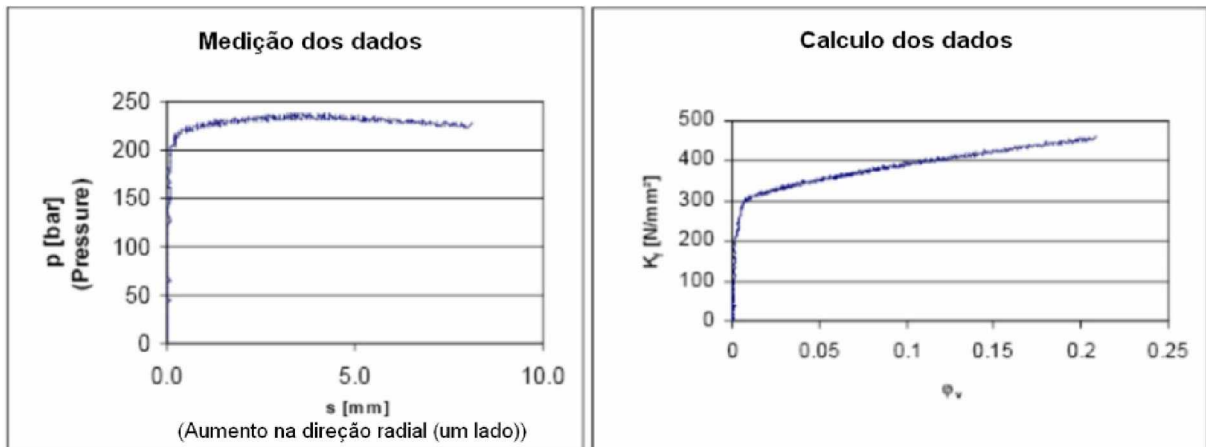


Figura 2.13 – Resultados do ensaio de pressão interna em tubo - SCHULER [6].

2.1.8 – Formas do blank e da conformação em tubos

O processo de conformação hidrostática é aplicado principalmente em peças tubulares, mas chapas planas soldadas em formato tubular também podem ser usadas. Tubos de aço, por exemplo, são em geral soldados longitudinalmente. No campo do alumínio são em geral utilizados tubos produzidos por extrusão. Assim como alumínio, podem ser utilizados também cobre, aço estrutural, aço com ligas e latão. Na Figura 2.14, aparece uma ordenação das características de conformação sobre as peças em relação aos processos hidrostáticos aplicados.

2.2 – Exemplos de peças

Na Figura 2.15, há alguns exemplos de peças que podem ser obtidas pelo processo de hidroconformação. Observa-se que as formas são as mais complexas possíveis, conforme a necessidade visual e funcional de sua aplicação.

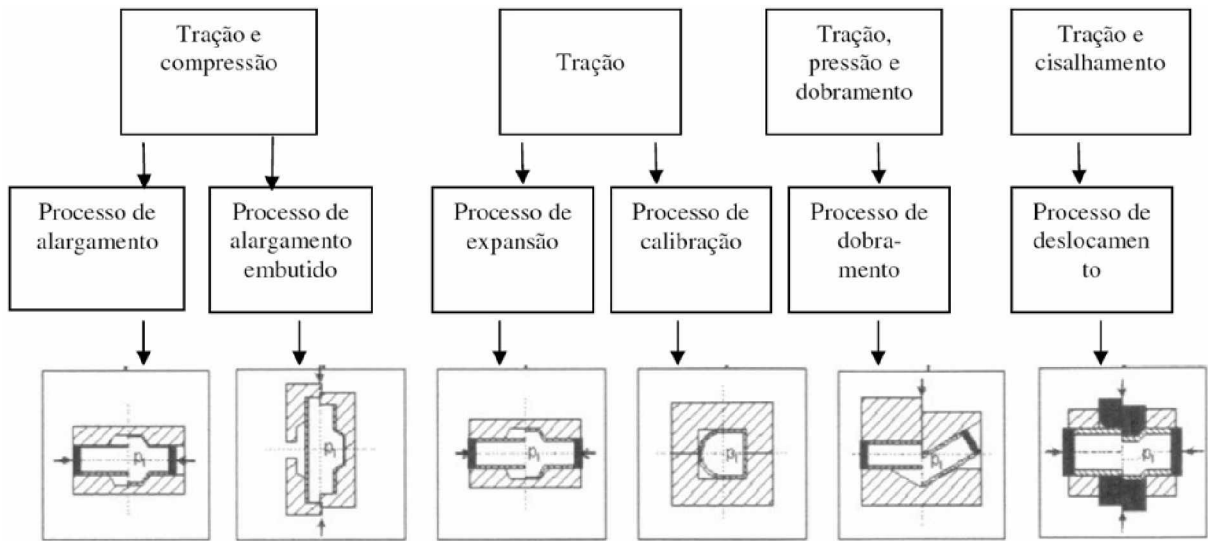


Figura 2.14 – Processos de conformação hidrostática em tubos - CERVEIRA [1].



Figura 2.15 – Exemplos de peças obtidas pelo processo de hidroconformação.

2.3 – Etapas básicas do processo

O processo de hidroconformação em tubos geralmente é acompanhado de outros processos. Entre eles estão o corte do tubo inicial, conforme o exemplo da Figura 2.16, seu dobramento em uma medida próxima ao formato da matriz de hidroconformação, a expansão do tubo pelo fluido hidráulico com elevada pressão interna ao tubo, e por último, o corte das ponteiros de vedação e eventuais furos e recortes da aplicação da peça.



Figura 2.16 – Etapas básicas do processo.

2.4 – Exemplo comparativo da técnica de fabricação convencional e hidroconformação

O processo de hidroconformação em tubos possui aspectos favoráveis em relação aos processos convencionais de obtenção de peças com formas tubulares. Na Figura 2.17, observa-se os aspectos da quantidade, durabilidade, custos de fabricação, custos de desenvolvimento e peso da peça em relação ao processo convencional de fabricação.

2.5 – Exemplos de prensas para o processo de hidroconformação

Para realização do processo de hidroconformação é necessário que se realize o movimento de fechamento das matrizes da forma da peça. Também, é necessário que a prensa mantenha uma força de fechamento superior à oriunda da pressão interna do processo, para conformar a peça. Na seqüência serão apresentados alguns tipos de prensas.



Figura 2.17 – Comparação entre técnica de fabricação convencional e a hidroconformação.

2.5.1 – Prensa de colunas verticais com travamento

Na Figura 2.18, tem-se o exemplo de uma prensa para realizar a função acima descrita, contendo balões com a descrição de cada um dos componentes da prensa.

Especificações técnicas da máquina:

Dimensões gerais: 1800x1200x1200 mm

Dimensões da mesa: 1000x800 mm

Força de fechamento: aprox. 1500 kN

Pressão de fechamento (cilindro de pequeno curso): 250 a 350 bar

Curso: aprox. 800 mm

Peso: aprox. 2,5 toneladas

De acordo com a Figura 2.18, há um cilindro de menor diâmetro e maior curso, chamado de “cilindro de abertura” que realiza a abertura da mesa placa superior da prensa. Também há outro cilindro de diâmetro maior, chamado de “cilindro de pequeno curso”, com menor curso de trabalho para manter a pressão ou força de fechamento.

Na Figura 2.19, observa-se a seqüência de funcionamento do sistema de bloqueio do curso maior e a movimentação da mesa da prensa pelo cilindro de diâmetro maior. O circuito hidráulico deve prever todos os movimentos mostrados nas três etapas da figura.

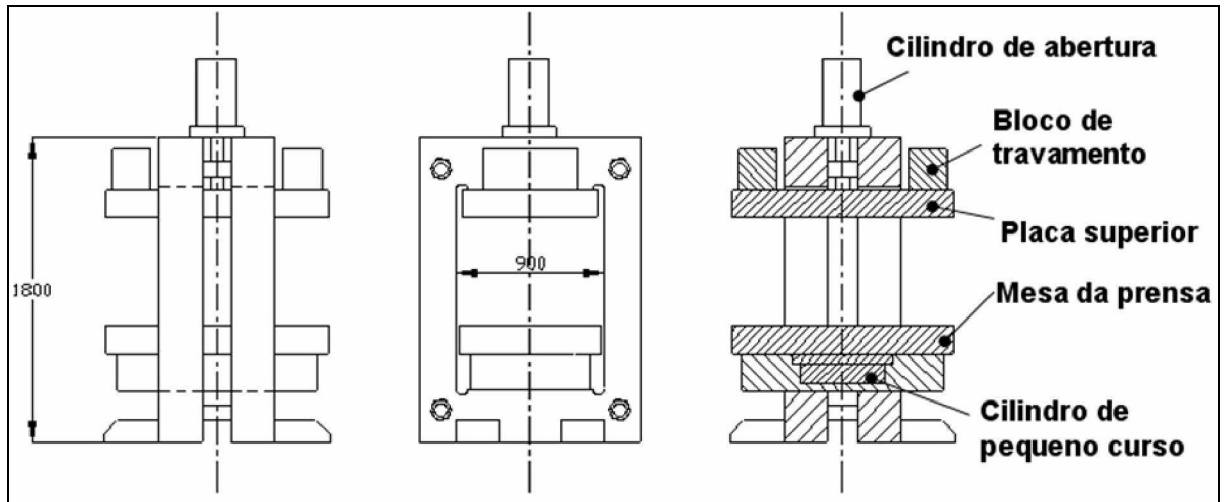


Figura 2.18 – Conceito de prensa vertical com travamento - de Souza.

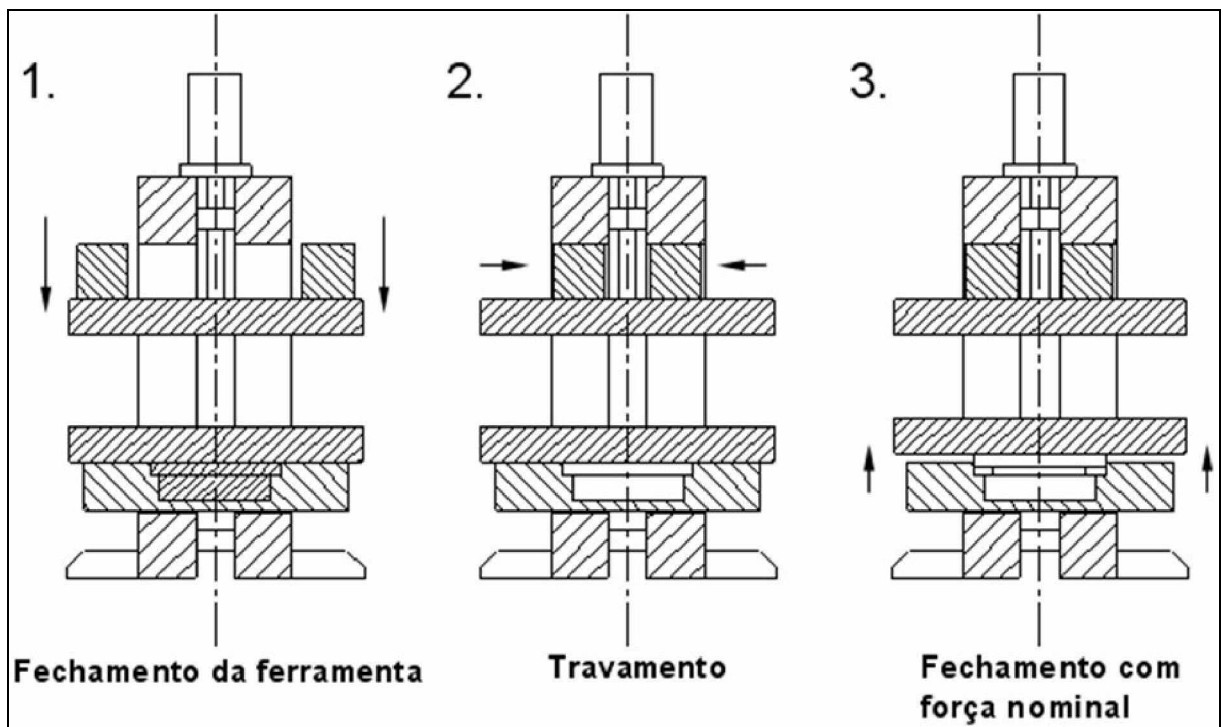


Figura 2.19 – Funcionamento da prensa vertical com travamento - de Souza.

Seguindo a mesma idéia conceitual das Figura 2.18 e Figura 2.19, é necessário observar que para realizar os movimentos na prensa é necessário um sistema hidráulico para dar potência aos cilindros e atuadores. Isso está esquematicamente representado no exemplo da Figura 2.20.

O Instituto de Conformação da Universidade de Stuttgart, Alemanha, (Institut für Umformtechnik - IFU) possui uma prensa deste tipo que foi instalada através de uma parceria entre o IFU, Schuler Hydrap, Müller Weingarten, Siempelkamp Pressen Systeme e Bosch Rexroth. Ainda na Figura 2.20 aparece o sistema de amplificação de pressão, visto na parte esquerda dessa, onde o fluido em alta pressão está sendo direcionado para dentro da peça a ser conformada.

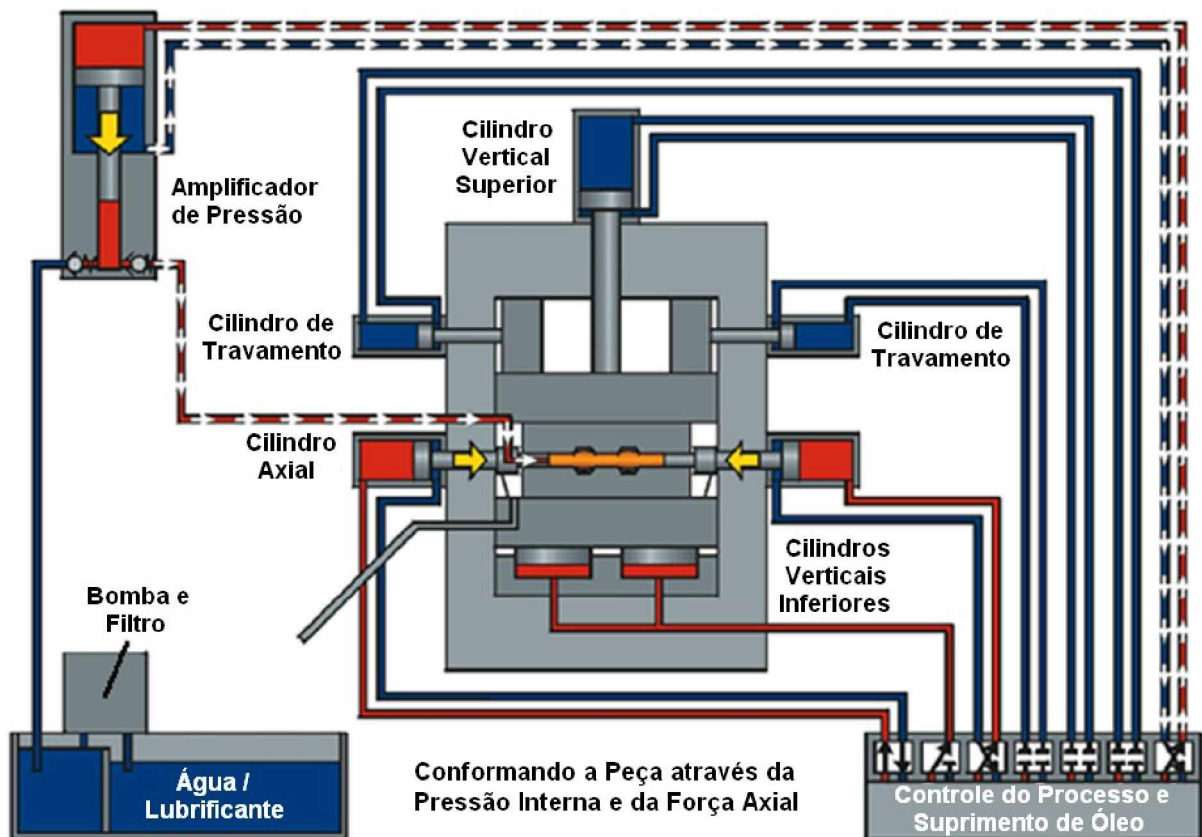


Figura 2.20 – Esquema hidráulico da prensa vertical com travamento da IFU - SIEGERT [7].

2.5.2 – Pressas dedicadas a hidroconformação e exemplo de processos possíveis

Em casos especiais, podem ser construídas pressas dedicadas ao processo, conforme necessidade. Na Figura 2.21, tem-se uma prensa que possui sua estrutura em forma de anel soldado ou fundido, no qual estão montados os cilindros com suas devidas funcionalidades.

Nota-se que o sistema possui o fechamento das placas no sentido vertical, através dos “cilindros de fechamento e de recalque”, e o “cilindro principal” serve para realizar a vedação do tubo dentro da matriz. Um “amplificador de pressão” esta ligado ao “cilindro principal”.

Assim, o fluido sob alta pressão é conduzido por dentro deste “cilindro principal” até o tubo a ser conformado.

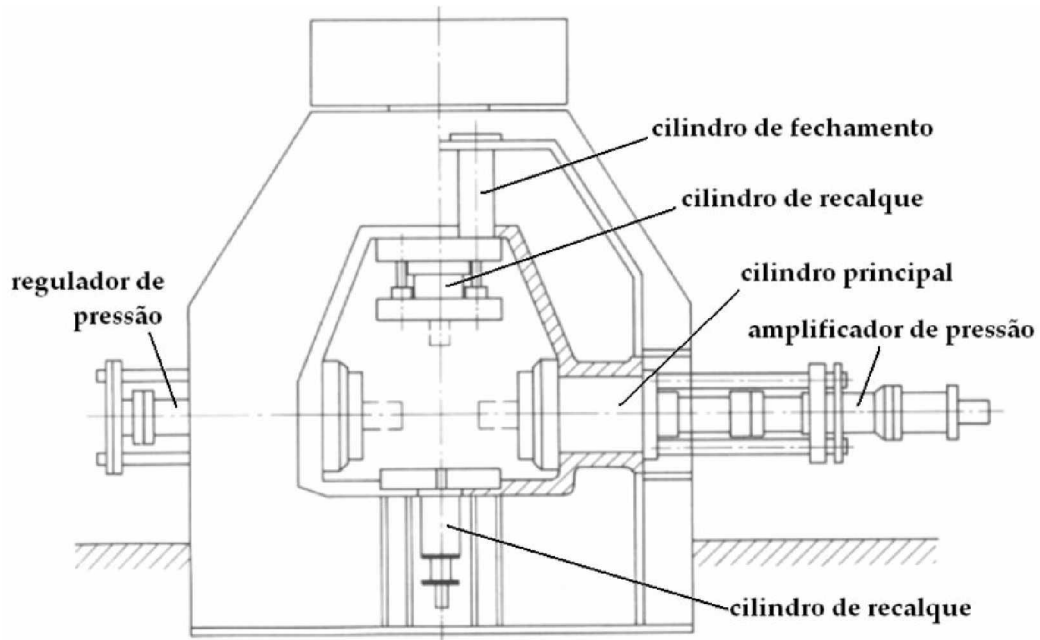


Figura 2.21 – Sistema na forma de anel com cilindros montados no seu interior - LANGE [8].

Ainda em outro exemplo (Figura 2.22) que também possui a forma de um anel montado por placas soldadas. Neste caso, dois “porta ferramentas” são acionados por cilindros verticais e dois “cilindros de fechamento interno” na posição vertical, sendo um em cada lado do sistema, através dos quais entra o fluido em alta pressão. No sistema ainda encontram-se dois “cilindros laterais”, que são usados ou não conforme necessidade da peça a ser fabricada, geralmente usados na fabricação de peças em foram de “T” ou “cruz”.

Existem vários tipos de geometrias de peças que podem ser conformadas por estes sistemas. Por exemplo, podem ser construídas peças com ressaltos como na Figura 2.23, onde se tem várias formas geométricas com ressaltos e um esquema da ferramenta. Neste caso, além da pressão interna, são usados dois cilindros de vedação com movimento de compressão axial no tubo e um terceiro e/ou quarto cilindro hidráulico de apoio à forma ressaltada da peça.

Pode-se ter ainda peças com geometrias do tipo da Figura 2.24, a superfície externa é redonda e/ou simétrica em torno de um eixo, onde é usada pressão interna para expansão, com deslocamento axial ao eixo da peça através dos punções de vedação e ao lado um esquema da ferramenta.

Na Figura 2.25, tem-se mais formatos de peças onde a superfície externa é com relevo variado e é usada pressão interna para expansão e deslocamento axial ao eixo da peça por meio dos punções de vedação; e ao lado um esquema da ferramenta.

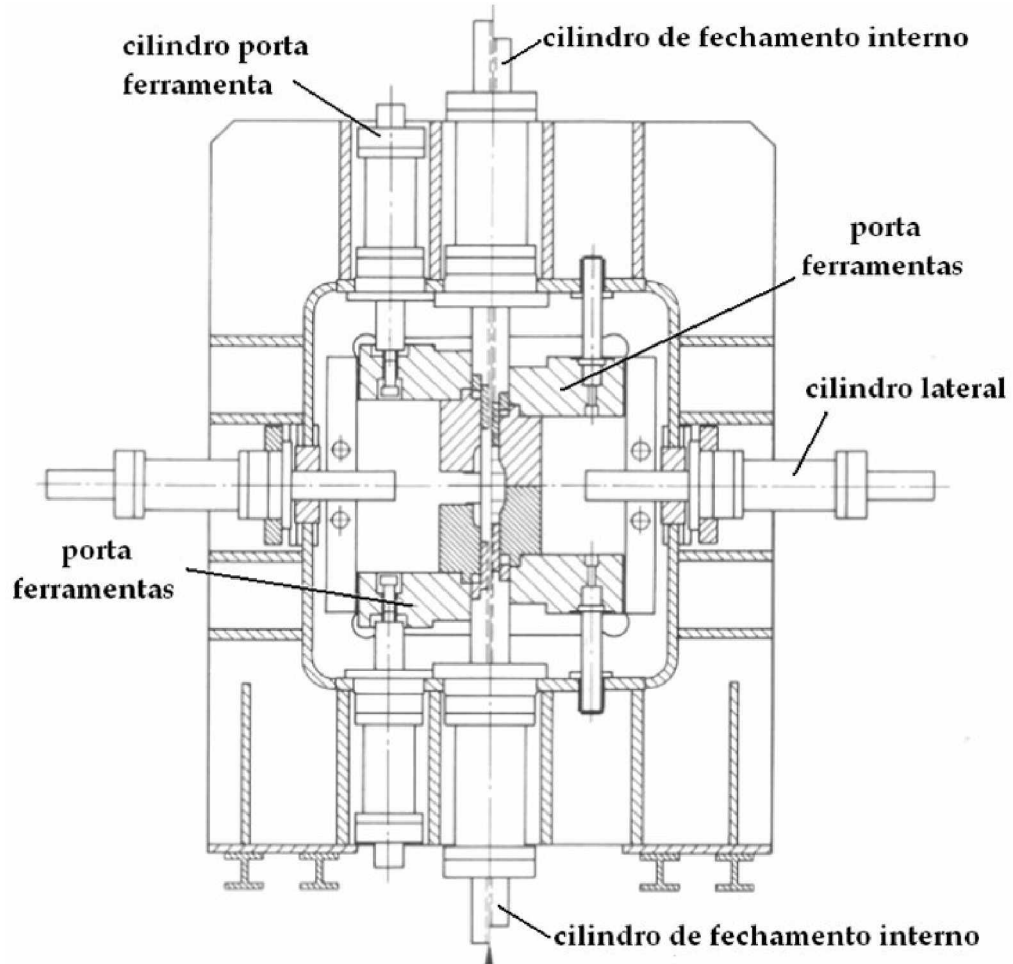


Figura 2.22 – Sistema na forma de anel com porta ferramentas e cilindros em seu interior - LANGE [8].

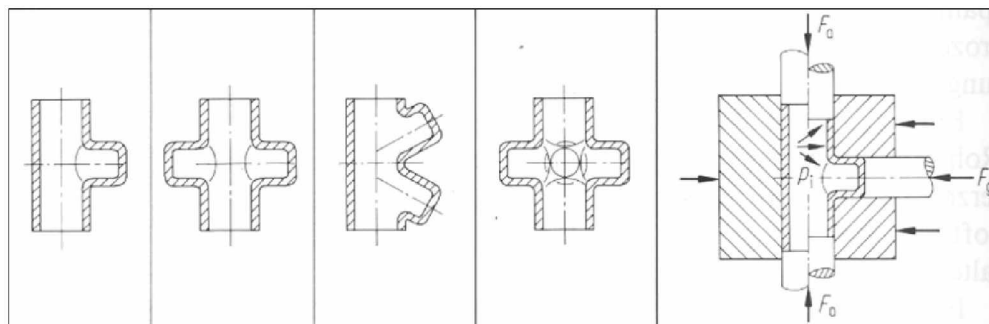


Figura 2.23 – Exemplo de peças com ressaltos e um esquema da ferramenta - LANGE [8].

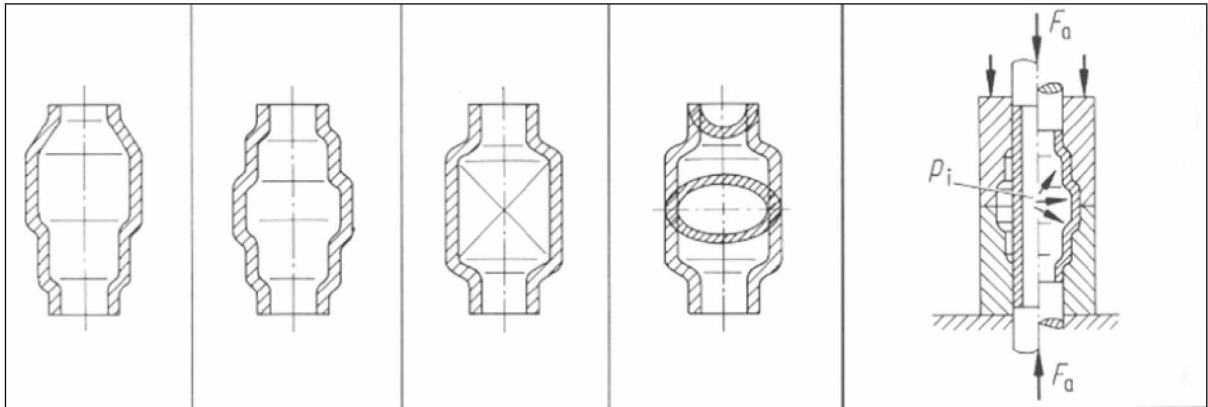


Figura 2.24 – Exemplo de peças simétricas e um esquema da ferramenta - LANGE [8].

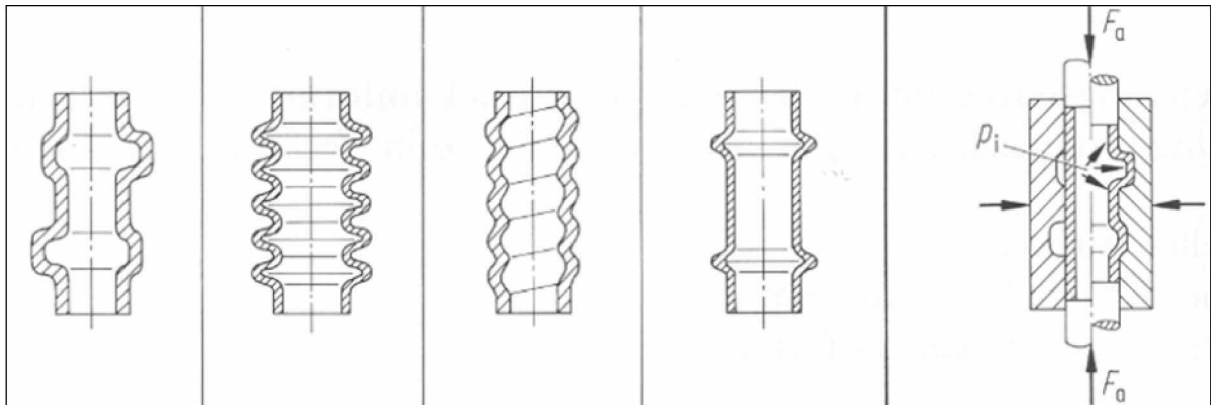


Figura 2.25 – Exemplo de peças com relevo e um esquema da ferramenta - LANGE [8].

2.6 – Conceitos de fechamento e movimentos dos cilindros de vedação

Nas cavidades da Figura 2.26, o esquema da ferramenta (1) possui pressão interna e movimento axial dos punções de vedação, criando tensões de tração no sentido radial do tubo e tensões de compressão no sentido axial. As ferramentas (2) e (3) por sua vez representam sistemas que só possuem pressão interna sem movimento axial de compressão no tubo pelos punções de vedação.

Mais um item a ser observado é a posição em que se encontram as matrizes de fechamento. A exemplo da Figura 2.27, nota-se que o sistema pode começar a ser pressurizado com a ferramenta ainda aberta e/ou, conforme a situação, somente após ter sido fechada. Na figura também são apresentados dois tipos de vedação que podem ser usados.

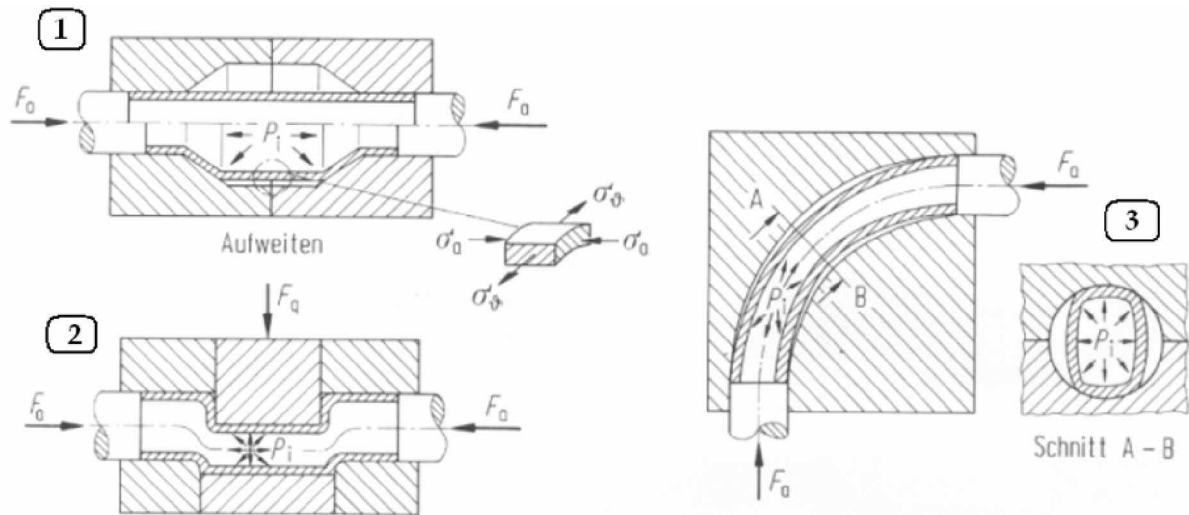


Figura 2.26 – Representação da pressão interna e funcionamento dos punções de vedação - LANGE [8].

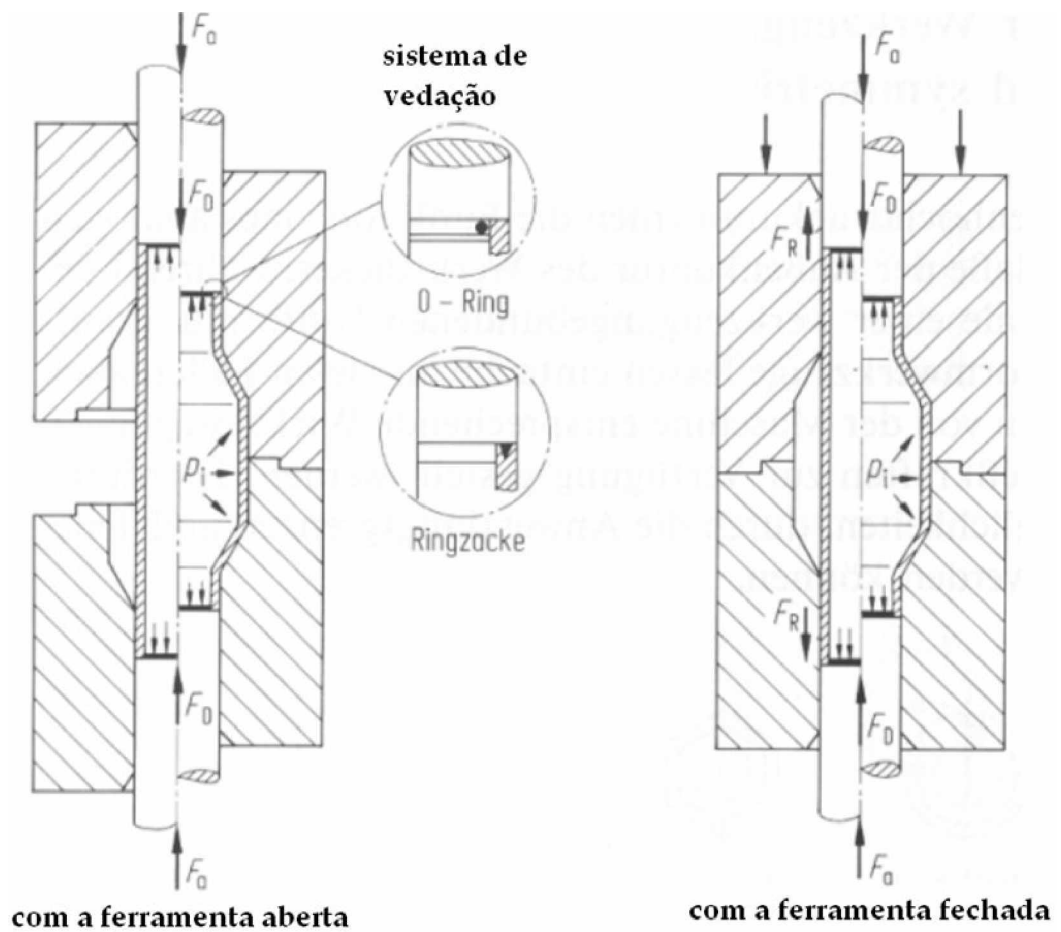


Figura 2.27 – Posição em que se encontra a matriz de fechamento - LANGE [8].

2.7 – Forma construtiva de ferramentas usadas no processo

São inúmeras as formas construtivas que podem e são usadas para criar as ferramentas de hidroconformação de tubos. Basicamente são formadas por uma cavidade que contem a forma final da peça e esta é bipartida e na direção axial do tubo, são colocados os cilindros de fechamento para dar a vedação da ponta do tubo. Estes cilindros e a cavidade precisam ser presos em placas que compõem a parte superior e inferior da ferramenta, conforme pode ser visto na Figura 2.28, onde se tem um fechamento vertical da ferramenta e cilindros laterais realizando a vedação.

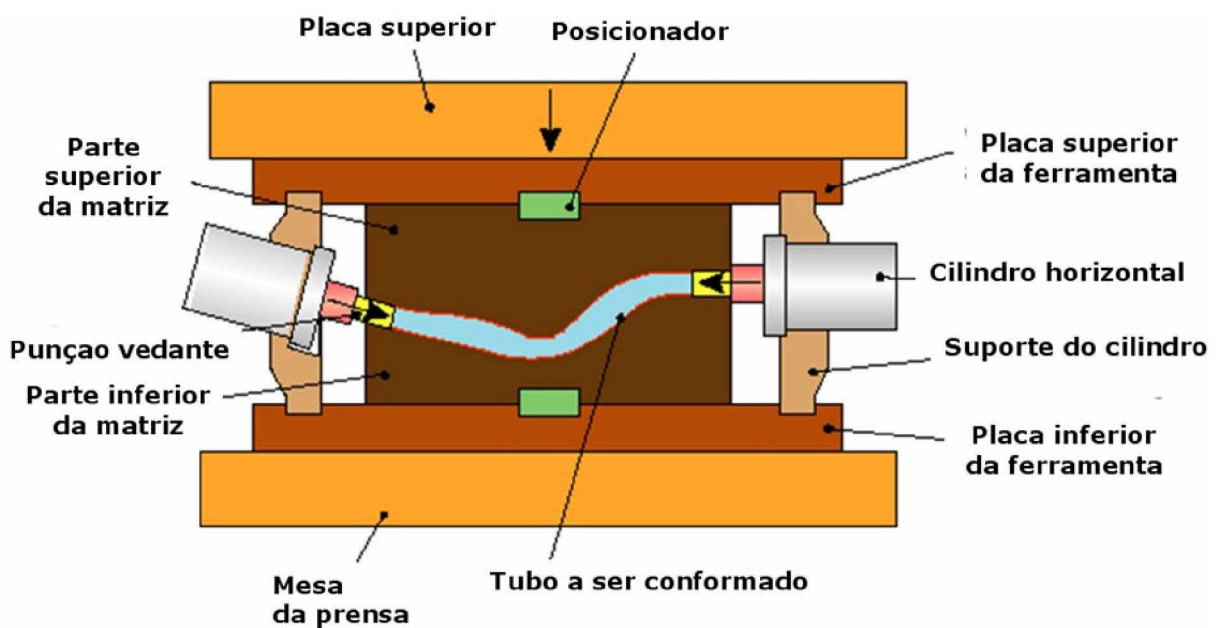


Figura 2.28 – Esquema de montagem de uma ferramenta de hidroconformação em tubo.

Pode-se ter ainda sistemas mais complexos, como o da Figura 2.29, que, além das características acima mencionadas, ainda tem um movimento lateral de gaveta da cavidade. Isto se deve pela complexidade da peça, sendo necessário um movimento a mais para realizar sua conformação.

2.8 – Exemplos de uso de Softwares para análise virtual do processo

No uso dos softwares de simulação para o processo de hidroconformação é necessário conhecer suas características, deverão ser fornecidos e preparados nas análises todos os dados que se pretende usar durante o procedimento real. Principalmente propriedades mecânicas do material da peça para realizar a simulação. Basicamente, os dados necessários

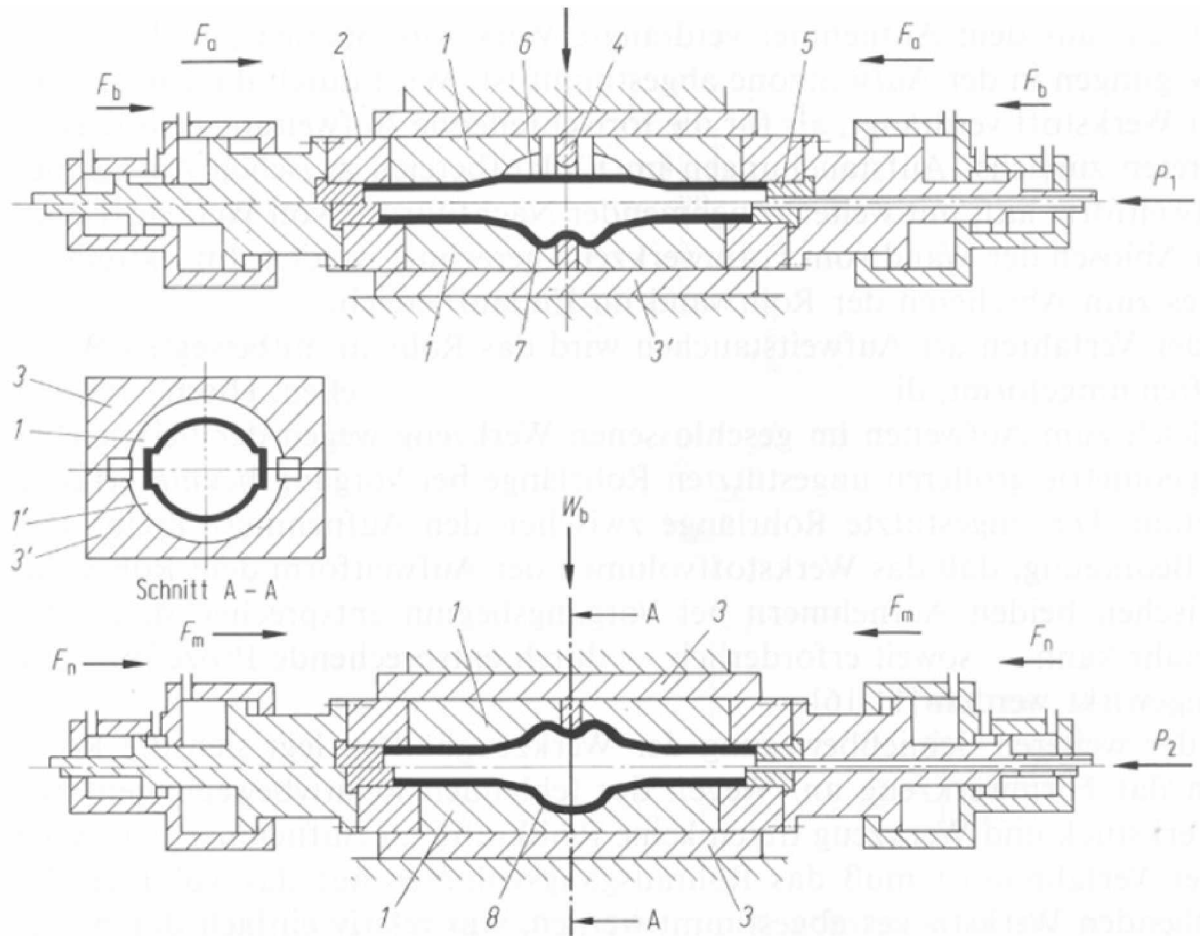


Figura 2.29 – Ferramenta com movimentação lateral - LANGE [8].

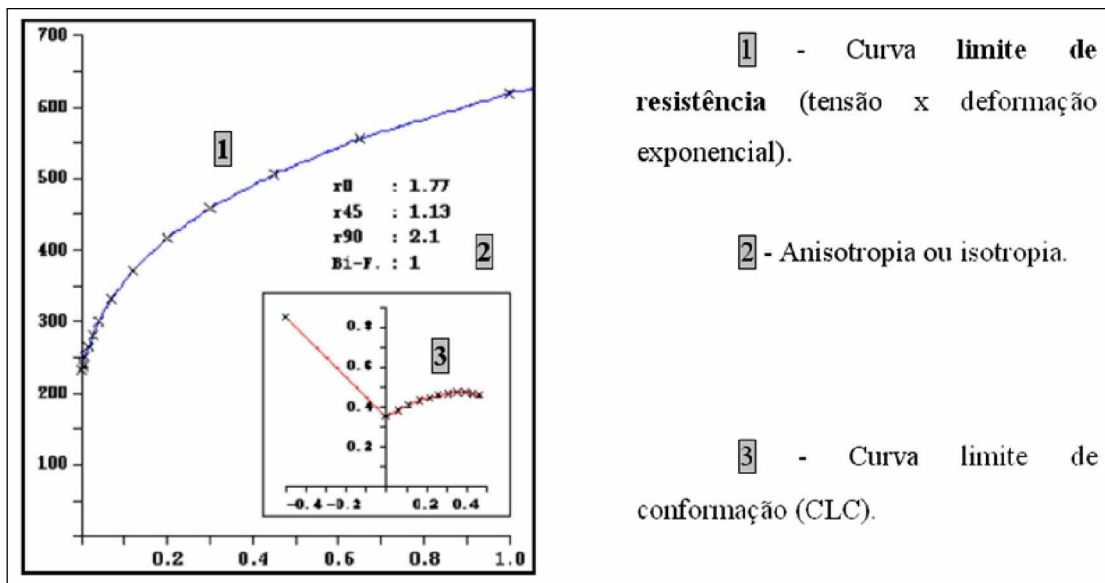


Figura 2.30 – Dados do aço NBR 5915 EM necessários para simulação - AutoForm.

para maioria dos softwares são os apresentados na Figura 2.30, onde no limite de resistência são usados apenas os valores após a deformação plástica do material, obtido através de ensaio de tração (ver item 2.1.2 – Ensaio de tração e 2.1.3 – Tensão e deformação verdadeira). Anisotropia ou isotropia, conforme propriedades mecânicas do material (ver item 2.1.5 – Anisotropia e o parâmetro R).

E por fim a curva limite de conformação do material (item 2.1.6 – Curva limite de conformação (CLC)), através da qual é possível verificar em cada região da peça simulada, qual o tipo de deformação existente, como no exemplo da (Figura 2.11 – Deformação através de grades e círculos gerados no Autoform.).

2.8.1 – HYDROFORMING da AutoForm

Na Figura 2.31 pode ser vista uma peça com aplicação de simulação do processo de hidroconformação em tubo. Da esquerda para direita aparece o desenho em CAD 3D; no meio o modelo preparado com as ponteiras de vedação pronta para a simulação e na direita os resultados visuais de uma característica verificada na simulação.

Encontra-se ainda na Figura 2.32 o exemplo da preparação do tubo na simulação. Nela são necessárias algumas ferramentas como grampos, matriz de dobra e matriz que pressiona, caracterizando o processo de dobramento do tubo preparando o mesmo para ser colocado na matriz de hidroconformação na simulação.

Na Figura 2.33 observa-se que na simulação devem ser realizadas as mesmas etapas necessárias ao processo real da hidroconformação. Têm-se as funções para realizar a análise virtual do processo no software desde o dobramento, recozimento (alívio de tensões), pré-conformação da peça e fechamento das matrizes até a hidroconformação.

Os resultados destas análises servem para visualizar as deformações, verificar a espessura da parede do tubo, a pressão interna para conformação, a tensão agindo na geometria da peça, entre outros. A Figura 2.34, oriunda da simulação real no software AutoForm-Hydro, apresenta uma peça estrutural da moto e sua aplicação.

2.8.2 – PAM-TUBE 2G da ESI Group

Assim como o software anterior, o PAM-TUBE 2G possui características avançadas de modelamento realístico do processo de hidroconformação em tubos. Na Figura 2.35 verifica-se o exemplo de uma peça simulada, onde pode ser visto da esquerda para direita;

inicialmente a peça (blank), os processos de dobra, desenho das geometrias de fechamento e vedação e, por fim, a peça conformada.

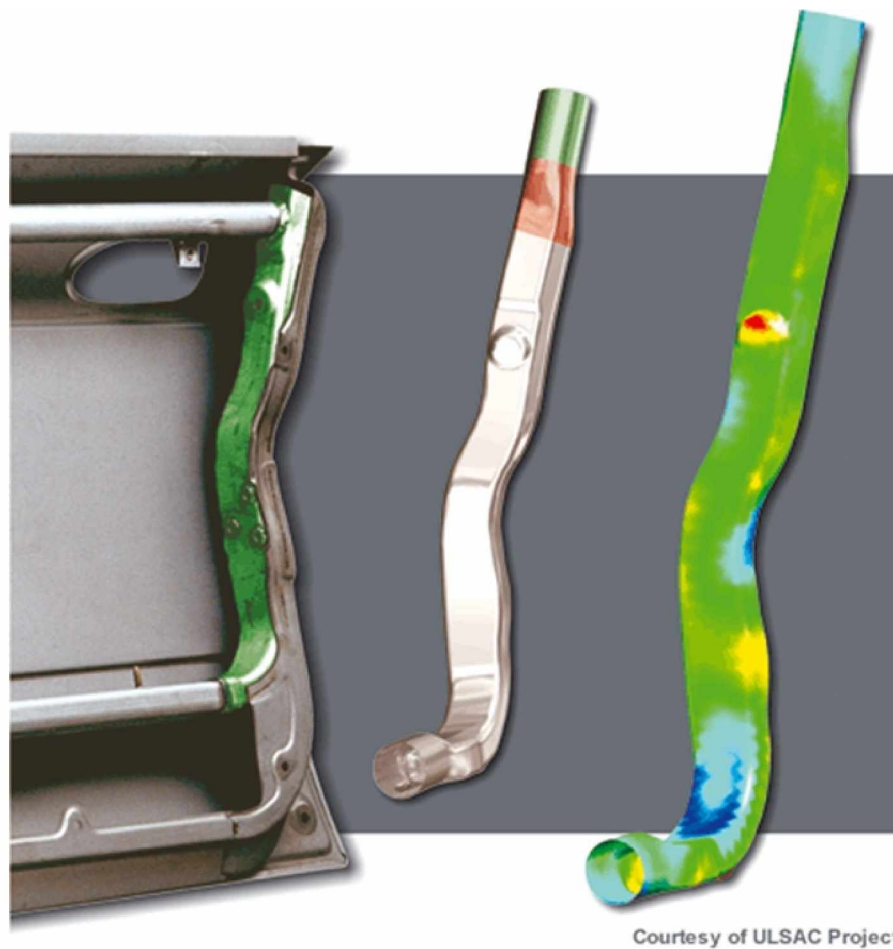


Figura 2.31 – Suporte da tampa simulada no AutoForm-Hydro - AUTOFORM [9].

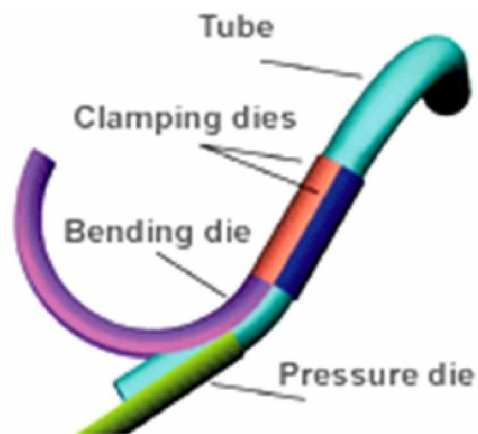


Figura 2.32 – Partes que compõem a operação de dobramento do tubo - AUTOFORM [9].

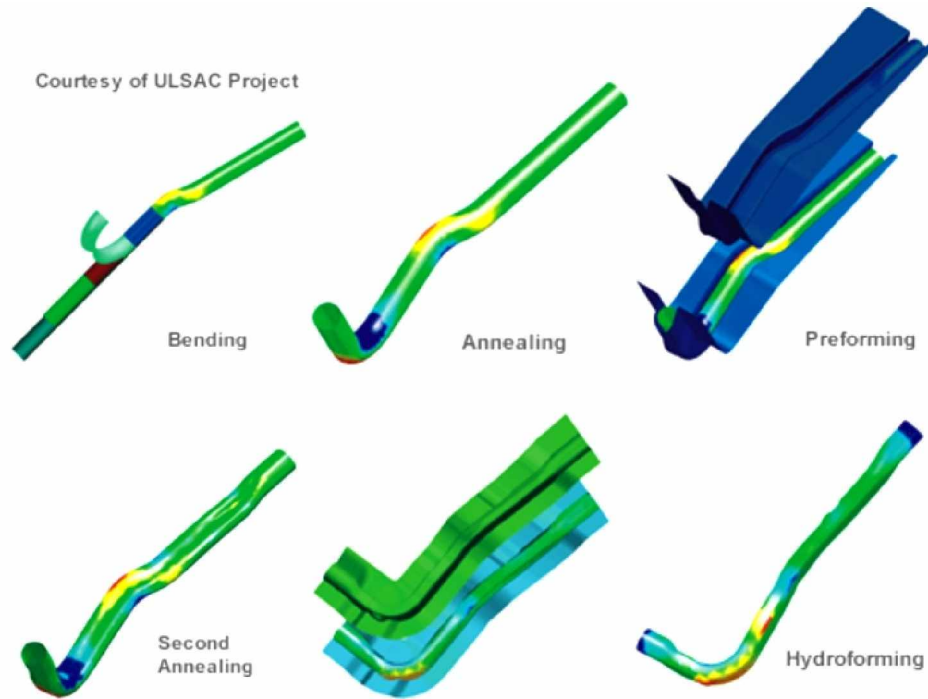


Figura 2.33 – Etapas do processo de simulação pelo AutoForm-Hydro - AUTOFORM [9].



Figura 2.34 – Exemplo de uma peça estrutural e sua aplicação simulada - AUTOFORM [9].

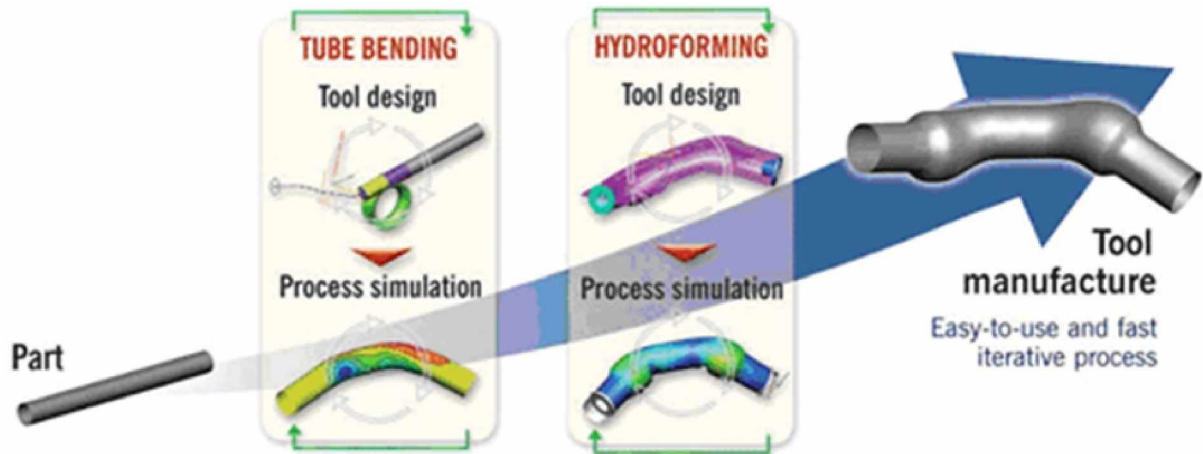


Figura 2.35 – Exemplo de peça simulada no PAM-TUBE 2G - ESI-GROUP [10].

Na Figura 2.36, de baixo para cima, demonstra-se no software a seqüência das operações desde uma estimativa de tensões, o modelamento das extremidades de vedação do tubo; modelamento do plano de abertura da cavidade, a geração das ferramentas e punções de vedação, o processo de dobra e, por fim, o solver da simulação montada para se obter os resultados.

2.9 – Exemplos de ferramentas de hidroconformação

A Figura 2.37 mostra o desenho de uma ferramenta de produção do processo de hidroconformação, em CAD 3D. Já a Figura 2.38 apresenta aspectos vantajosos de se realizar tratamento superficial de nitretação nos postigos que entram em contato com a peça para melhorar a fluência do material.

A Figura 2.39 apresenta a fotografia de uma ferramenta e a indicação de fixação do cilindro AXIAL de vedação, dos extratores e um furo para enchimento rápido.

Na Figura 2.40 aparece a forma do punção de vedação e o visual da peça antes e depois de sofrer o processo de expansão hidrostática. Destacando a forma final da ponteira de vedação no tubo após estar conformado. No ANEXO A, são apresentadas mais figuras com fotos e ilustrações de sistemas de hidroconformação.

2.10 – Corte das ponteiros de vedação do tubo

A ponteira de vedação do tubo é um artifício usado para possibilitar a vedação do tubo durante a conformação hidrostática da peça e, ao final, deve ser removida. Podem ser

feitos cortes simples com serra ou por estampo radial ao eixo do tubo, e no caso de formas de extremidade mais complexa pode ser usado corte por Laser como visto na Figura 2.41.

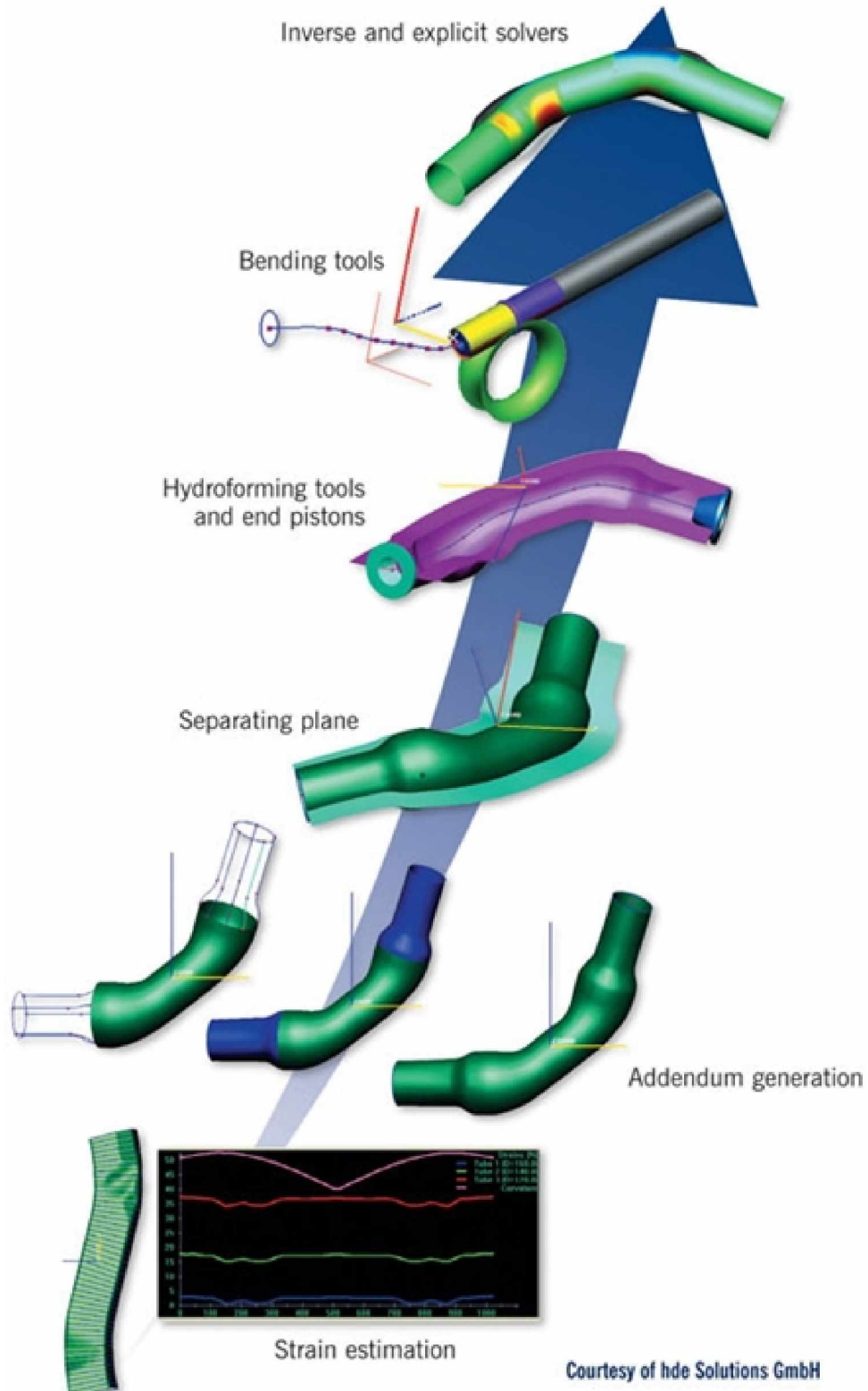


Figura 2.36 – Etapas do processo de simulação pelo PAM-TUBE 2G - ESI-GROUP [10].

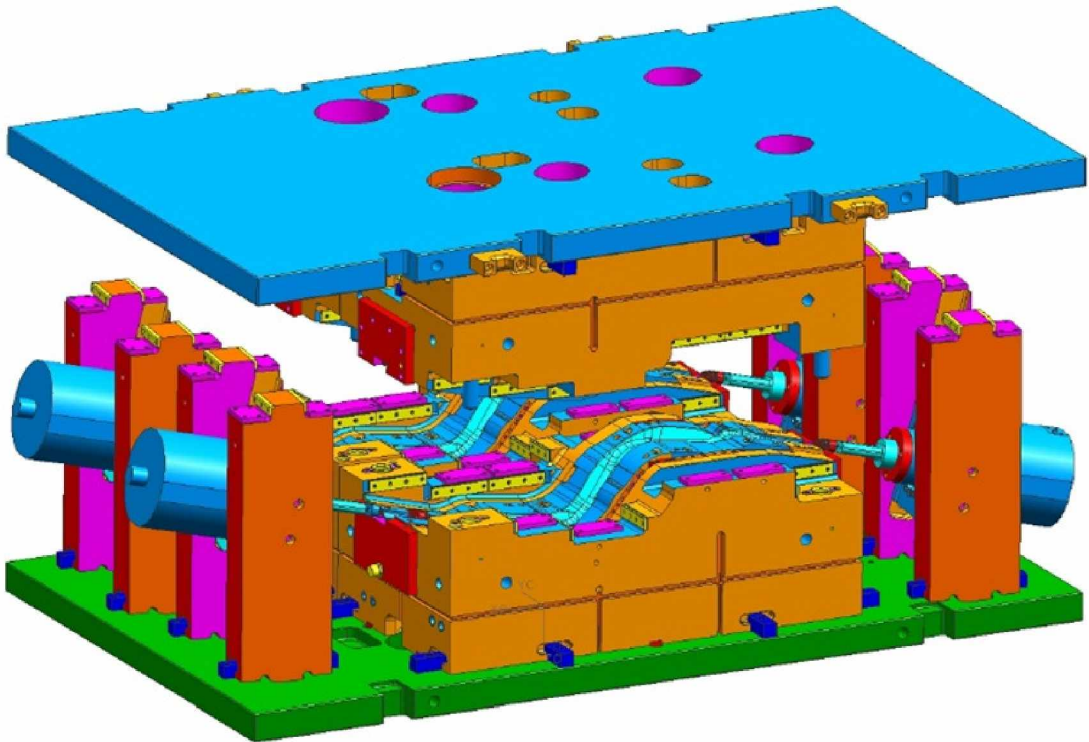


Figura 2.37 – Desenho em CAD de uma ferramenta de produção - SCHULER [6].



Redução da espessura da
peça na garganta.
Nitretando o posição
desta área o problema
reduziu
significativamente.

Figura 2.38 – Ferramenta de produção - SCHULER [6].

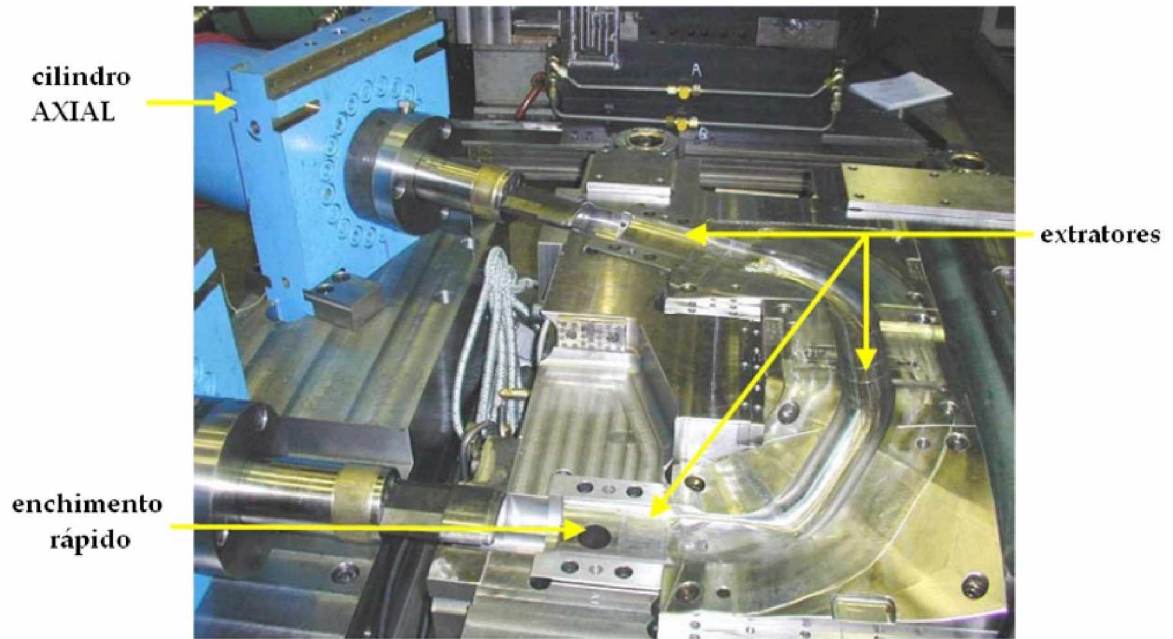


Figura 2.39 – Indicação de algumas funções da ferramenta - SCHULER [6].



Figura 2.40 – Formação da aba de vedação - SCHULER [6].



Figura 2.41 – Corte da ponteira de vedação feito por Laser - AMERICAN HYDROFORMERS [11].

2.11 – Falhas que podem ocorrer na hidroconformação de tubos

O sucesso das peças hidroconformadas se deve a diversos fatores dependentes das características inerentes ao material, da geometria da peça, dos parâmetros adotados e outros. Entre as maiores limitações do processo estão os fenômenos de falhas, além de certo desconhecimento das melhores relações entre os parâmetros do processo. Na hidroconformação de tubos, vários tipos de falhas podem acontecer, os principais mecanismos são:

- Flambagem
- Enrugamento
- Excesso de compressão axial, folding bac
- Fissuras
- Estricção

Os tipos de falha podem ser divididos em duas regiões distintas, aquelas ocorrendo devido a instabilidades plásticas, como flambagem, enrugamento, excesso de compressão axial; e aquelas devido à conformabilidade. Isso envolve a máxima alteração de forma na zona de conformação sem a ocorrência de fissuras ou estricção (no ponto onde a

conformabilidade foi excedida). A conformabilidade é dependente do material a ser conformado, a temperatura do material conformado, a velocidade de deformação e o estado de tensões.

Instabilidades plásticas são influenciadas por relações geométricas (por exemplo: comprimento da peça, espessura da parede da peça, diâmetro da peça), pelo estado de tensões, pelo limite de elasticidade e módulo de elasticidade durante a conformação. A ocorrência de fissuras ou estricções determinam que o limite de conformabilidade foi excedido.

O enrugamento (Figura 2.42) geralmente acontece na face interna de um raio formado e fissuras, nas superfícies externas.

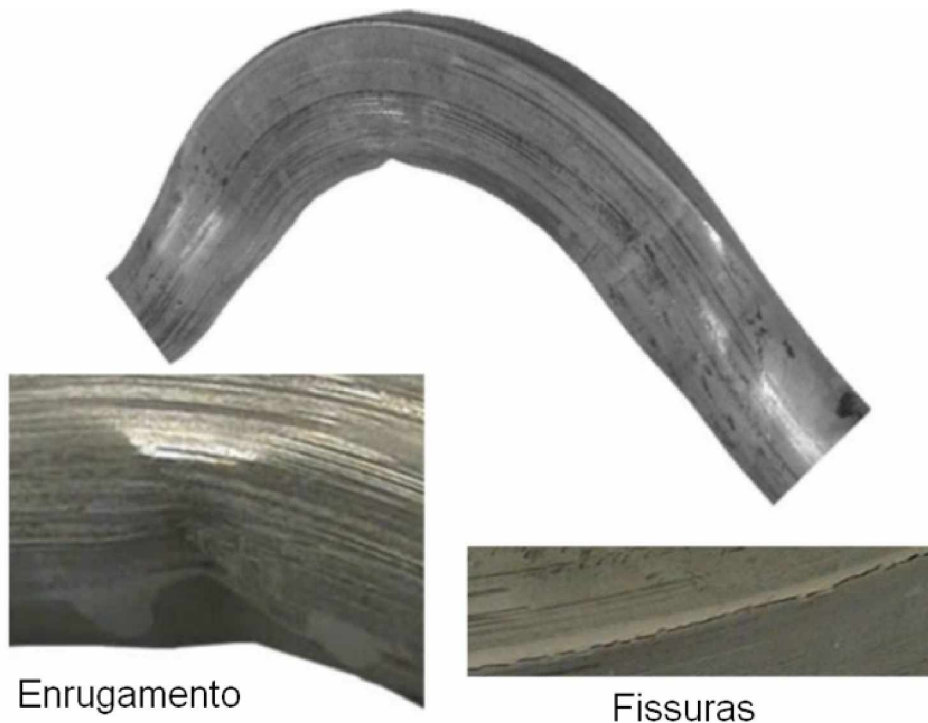
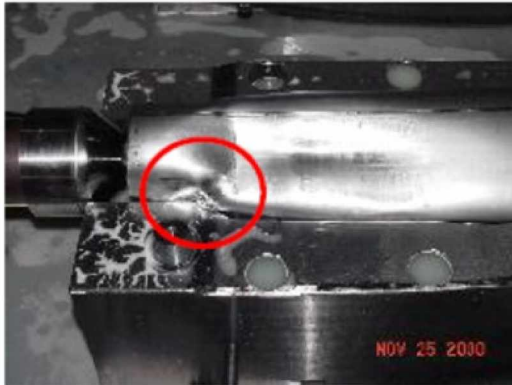


Figura 2.42 – Formação de rugas e fissura - MATTER [3].

Também podem ser encontrados problemas como os da Figura 2.43, onde ocorre a formação de nervuras por tração e rugas. Na Figura 2.44 encontra-se uma peça de regiões com água presa externamente entre o tubo e a matriz de conformação.



Nervura por tração



Rugas

Figura 2.43 – Formação de nervura por tração e rugas - SCHULER [6].



Regiões com água presa



Água presa

Figura 2.44 – Formação de regiões com água presa - SCHULER [6].

Na Figura 2.45 tem-se um comparativo entre a simulação do processo e o tubo após ser conformado. Nota-se que os mesmos problemas e aspectos apresentados na simulação ocorrem na peça real, indicando que os Softwares de simulação já estão reproduzindo virtualmente muito bem efeitos que ocorrem na peça durante sua conformação, sendo assim recomendados para validar as ferramentas e os processos produtivos antes de sua implantação nas linhas de produção da fábrica.

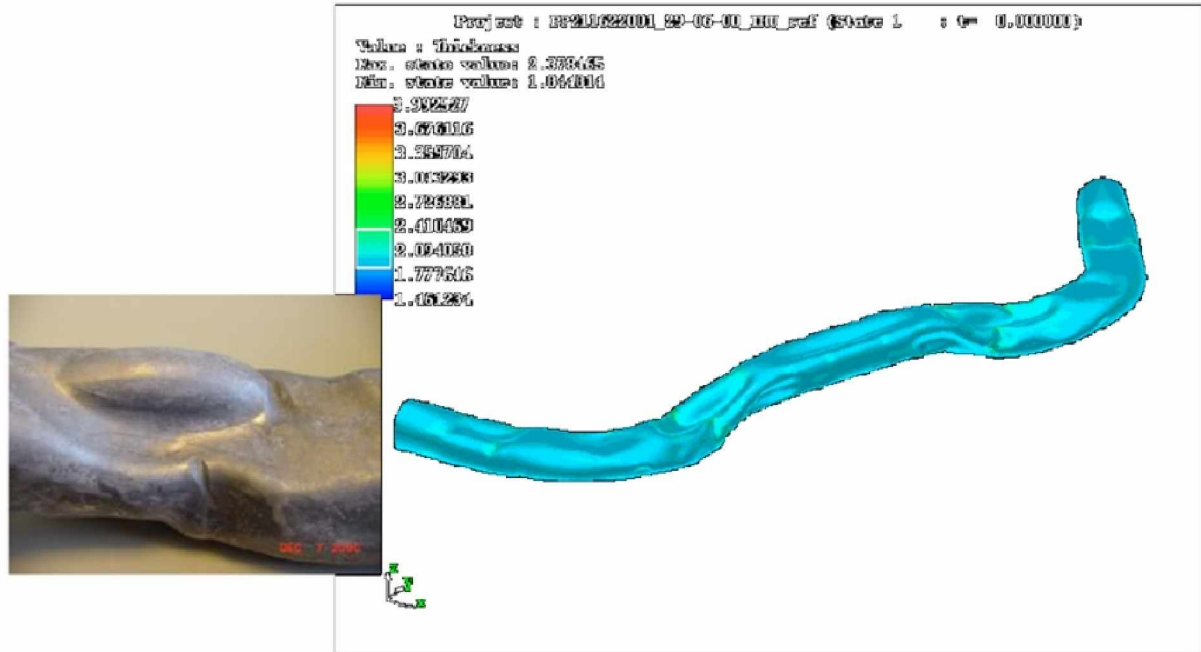


Figura 2.45 – Comparação da simulação com a prática - SCHULER [6].

A Figura 2.46 apresenta algumas modalidades de falhas que podem ocorrer durante o processo, como rupturas, dobras, amassamento e ruptura por tração, indesejados e que estão sendo visualizadas através dos resultados dos cálculos de simulações em softwares.

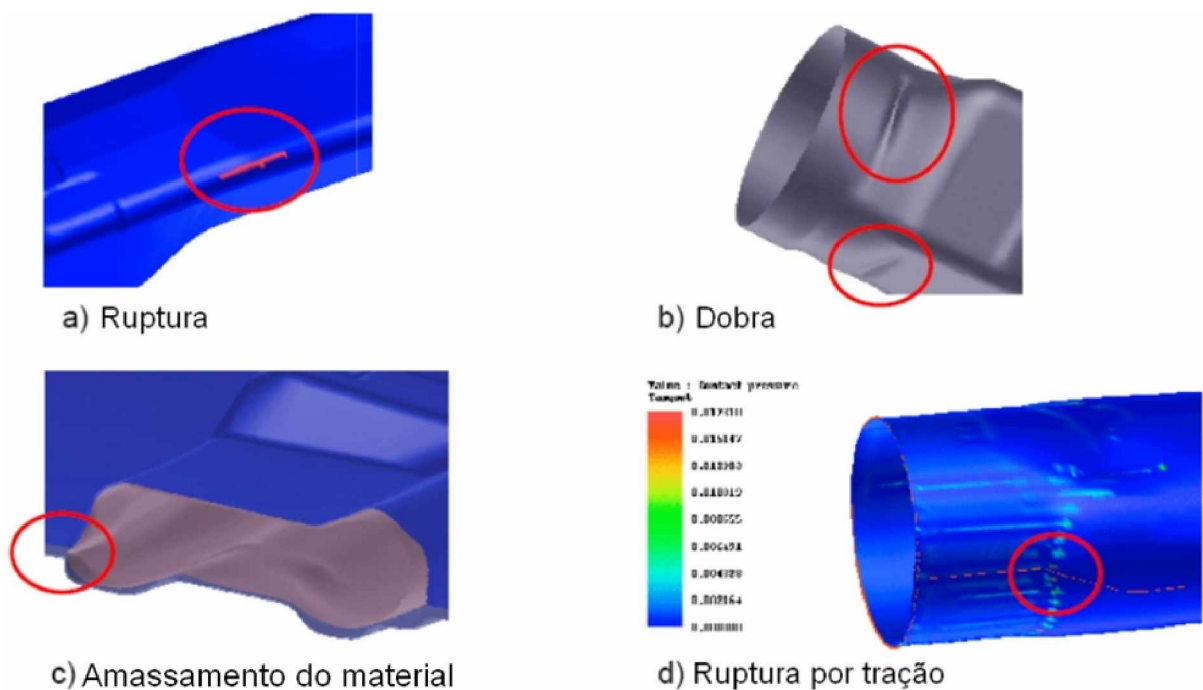


Figura 2.46 – Modalidades de falha ou aspectos indesejados via Software - SCHULER [6].

3 – ABORDAGEM TEÓRICA ANALÍTICA DO PROCESSO DE EXPANSÃO DE TUBOS

No processo de hidroconformação de tubos vários fatores devem ser avaliados para se chegar às melhores relações entre os parâmetros do processo. Por isto, existe a real necessidade de se verificar, mesmo que analiticamente, algumas das variáveis do processo. Optou-se por realizar cálculos baseados em métodos analíticos como orientação para o projeto dos sistemas. Observa-se ainda que, para a melhor determinação e validação do processo de hidroconformação, é recomendado o uso de softwares de análise específicos para o processo.

3.1 – Determinação da mínima pressão interna pelo método do vazo de pressão

Numa distribuição de tensões simétrica em relação a um eixo, a exemplo de tubos cilíndricos, como visto na Figura 3.1, pode-se calcular a mínima pressão interna necessária para que se tenha deformação plástica na parede externa do tubo.

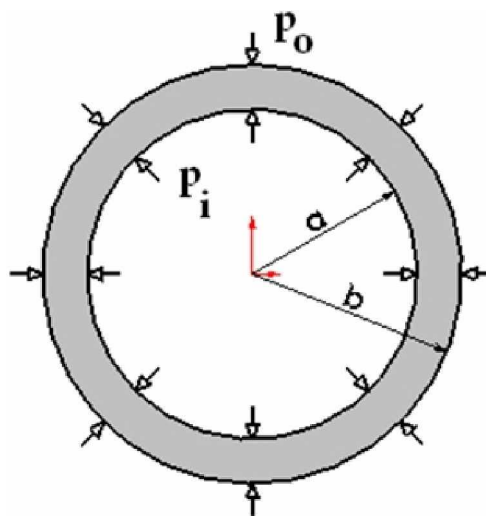


Figura 3.1 – Esquema com as variáveis para o cálculo.

A equação 3.1 (solução de Lamé) representa a expressão geral para os componentes de tensão normal circunferencial no tubo [12]:

$$\sigma_{\theta} = -\frac{a^2 b^2 (p_0 - p_i)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2} + \frac{p_i a^2 - p_0 b^2}{b^2 - a^2} \quad (3.1)$$

Considerando a pressão externa ($p_0 = 0$), podemos obter a relação entre a pressão interna e a tensão circunferencial (σ_{θ}) na parede externa onde ($r = b$):

$$p_i = \frac{\sigma_{\theta}}{2} \left(\frac{b^2}{a^2} - 1 \right) \quad (3.2)$$

Para toda parede entrar em escoamento, deve-se ter no mínimo ($\sigma_{\theta} = \sigma_e$, tensão de escoamento do material). Observando os dados ensaiados de um aço SAE 1008, usado no Software AutoForm, tem-se:

$$\sigma_{escoamento} = 26,5 \text{ kg} / \text{mm}^2$$

$$\sigma_{ruptura} = 36 \text{ kg} / \text{mm}^2$$

$$\sigma_{média} = \frac{(36 + 26,5)}{2} = 31,25 \text{ kg} / \text{mm}^2 \quad (\text{estimada})$$

3.1.1 – Determinação da mínima pressão interna SISTEMA PARA TESTE

| | | |
|--------|-----------------------------|----------------------------------|
| DADOS: | \varnothing ext. = 25,4mm | $b = 12,7\text{mm}$ |
| | Espessura = 1,2mm | $a = 12,7 - 1,2 = 11,5\text{mm}$ |

Pela equação 3.2 tem-se:

$$p_i = \frac{31,25 \text{ kg} / \text{mm}^2}{2} \left(\frac{(12,7)^2}{(11,5)^2} - 1 \right) = 3,43 \text{ kg} / \text{mm}^2$$

$$p_i \approx 343 \text{ bar}$$

3.1.2 – Determinação da mínima pressão interna SISTEMA PARA PRODUÇÃO

DADOS: \varnothing ext = 50,8mm b = 25,4mm
 Espessura = 1,5mm a = 25,4-1,5 = 23,9mm

Pela equação 3.2 tem-se:

$$p_i = \frac{32,25 \text{ kg} / \text{mm}^2}{2} \left(\frac{(25,4)^2}{(23,9)^2} - 1 \right) = 2,02 \text{ kg} / \text{mm}^2$$

$$p_i \approx 202 \text{ bar}$$

3.2 – Variação da espessura do tubo em função da expansão

Durante o processo de expansão do tubo o volume de material se mantém constante. Assim, pode ser feita uma estimativa da espessura que o tubo vai ter após ser conformado, desconsiderando, é claro, a severidade do processo e as formas geométricas da peça. Será verificada a variação do tubo do SISTEMA PARA TESTE e do tubo do SISTEMA PARA PRODUÇÃO, que são detalhados nos capítulos (4) e (5), respectivamente.

3.2.1 – Variação estimada da espessura para o tubo do SISTEMA PARA TESTE

Na Figura 3.2 está representado o tubo antes de ser conformado com diâmetro $\varnothing 25,4\text{mm}$ e espessura 1,2mm.

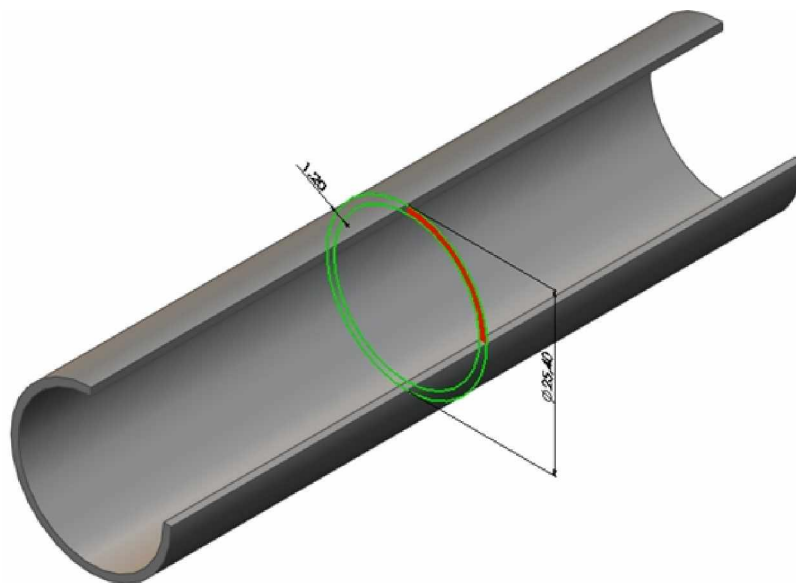


Figura 3.2 – Blank do sistema para teste.

Já na Figura 3.3 tem-se a forma da peça expandida onde, de acordo com a variação volumétrica, a medida da espessura da parede na parte central da peça ficará em 0,85mm. Isso representa uma redução de 30% na espessura da parede do tubo.

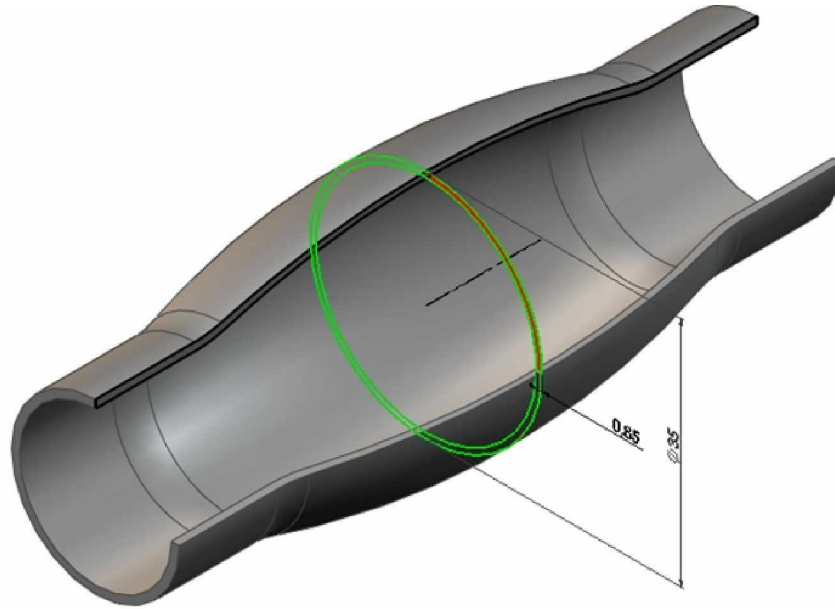


Figura 3.3 – Peça final do sistema para teste.

3.2.2 – *Varição estimada da espessura para o tubo do SISTEMA PARA PRODUÇÃO*

Na Figura 3.4 está representado o tubo antes de ser conformado com diâmetro Ø50,8mm e espessura 1,5mm.

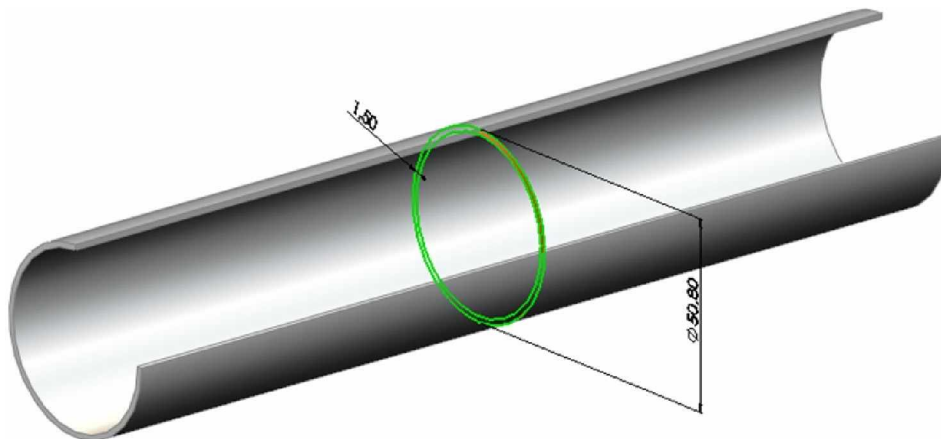


Figura 3.4 – Blank do sistema para produção.

Na Figura 3.5 tem-se a forma da peça expandida onde, de acordo com a variação volumétrica, a medida da parede do tubo ficará em torno de 1,17mm, Nesse caso representa uma redução de 22% na espessura da parede do tubo.

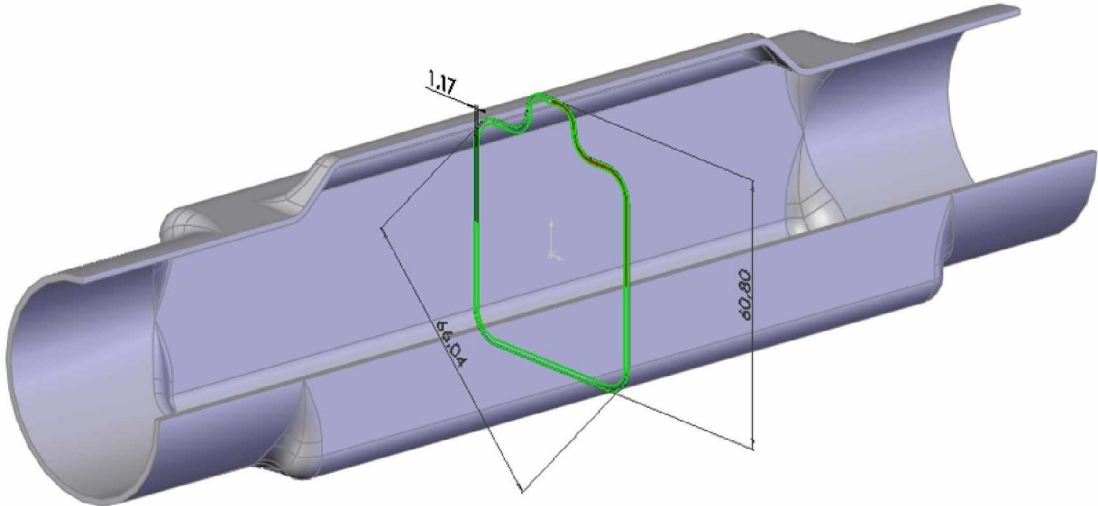


Figura 3.5 – Peça final do sistema para produção.

3.3 – Teoria sobre expansão livre de um cilindro pela pressão interna

Neste item será analisada a expansão de um tubo redondo sem mudança no comprimento. O tubo será conformado com deformação radial apenas. Isto é, a deformação no sentido axial será zero e o tubo permanecerá circular, mas o raio aumentará. A expansão de um elemento cilíndrico nesta modalidade é ilustrada na Figura 3.6. As deformações e tensões indicadas para um material isotrópico, são:

$$\varepsilon_{\phi} = \beta\varepsilon_{\theta} = 0; \quad \varepsilon_r = -(1 + \beta)\varepsilon_{\theta} = -\varepsilon_{\theta};$$

$$\sigma_{\phi} = \alpha\sigma_{\theta} = \frac{1}{2}\sigma_{\theta}; \quad \sigma_3 = 0 \quad (3.3)$$

utilizando: $\beta = 0$ e $\alpha = \frac{1}{2}$.

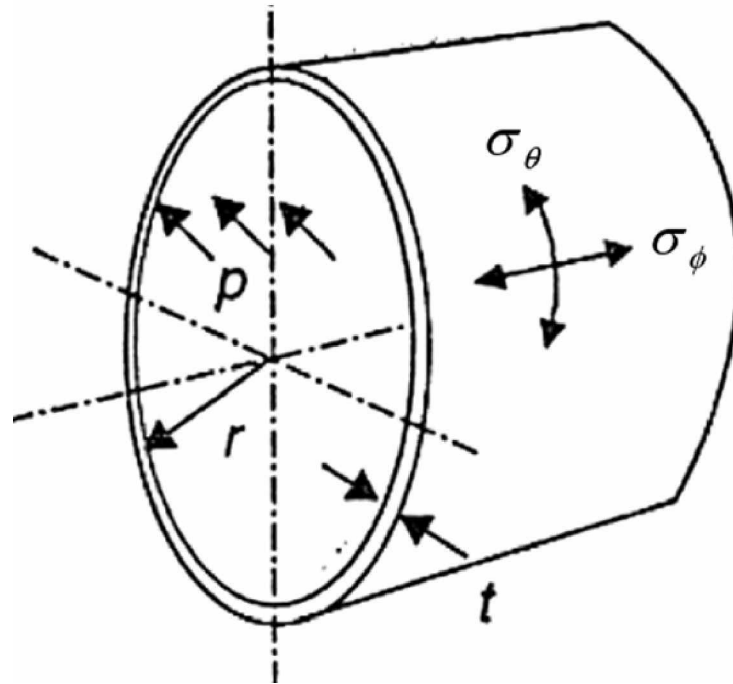


Figura 3.6 – Um elemento circular de tubo com pressão interna - MARCINIAK [13].

Como as propriedades do material obedecem à lei da tensão e deformação verdadeira, descrito no item (2.1.3), pela equação 2.5:

$$\bar{\sigma} = K * \bar{\epsilon}^n$$

E como as tensões ($\sigma_1 = \sigma_\theta$), ($\sigma_2 = \sigma_\phi = \sigma_\theta / 2$) e ($\sigma_3 = 0$), tem-se a tensão equivalente (ou tensão Von Mises) definida como [2]:

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \\ &= \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_\theta - \sigma_\phi)^2 + \sigma_\phi^2 + \sigma_\theta^2]} = \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_\theta / 2)^2 + (\sigma_\theta / 2)^2 + \sigma_\theta^2]} \\ &= \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_\theta / 2)^2 + (\sigma_\theta / 2)^2 + \sigma_\theta^2]} \qquad \sigma_v = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_\theta \end{aligned}$$

Tomando $\sigma_v = \sigma_f = \bar{\sigma}$, quando o material está no regime elasto plástico, fica:

$$\sigma_\theta = \frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma} = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_f \quad \text{e} \quad \bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}}\epsilon_\theta \quad (3.4)$$

De [2], obtém-se a relação entre a tensão (σ_θ) e a pressão interna para (Figura 3.6):

$$\sigma_\theta = pr/t \quad (3.5)$$

Pelas equações 3.4 e 3.5, a pressão fica:

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_f \frac{t}{r} \quad (3.6)$$

Para espessura do tubo inicial (t_0) e (r_0), a deformação e a espessura atuais ficam:

$$\epsilon_\theta = \ln \frac{r}{r_0} \quad \text{e} \quad t = t_0 \exp \epsilon_t = t_0 \exp(-\epsilon_\theta) = \frac{t_0 r_0}{r} \quad (3.7)$$

Desta, obtém-se a pressão característica para a expansão:

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} K \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r}{r_0} \right)^n t_0 \frac{r_0}{r^2} \quad (3.8)$$

Da equação 3.8, vemos que a pressão tenderá a diminuir enquanto o material se deforma no regime da plasticidade. Se o elemento tubular estiver expandindo livremente, a parede do tubo se diluirá e aumentará o raio. Ambos efeitos tenderão a diminuir a pressão. Dependendo do valor n , em algum ponto a pressão alcançará o seu valor máximo através dos efeitos de equilíbrio. Diferenciando-se a equação 3.8, tem-se que a pressão máxima ocorre quando $\epsilon_\theta = n/2$ [13].

É necessário considerar a possibilidade de estrição e de ruptura da parede do tubo dentro da região de maior concentração, porque essa deformação no trajeto do carregamento será ao longo da linha central vertical no espaço da tensão. Espera-se uma ruptura quando a deformação circunferencial tiver aproximadamente o valor n [13]. Assim, limita-se o caso a:

$$\ln \frac{r^*}{r_0} = n \quad (3.9)$$

então

$$p^* = \frac{2}{\sqrt{3}} K \left(\frac{2}{\sqrt{3}} n \right)^n \frac{t_0}{r_0} \exp(-2n) \quad (3.10)$$

onde r^* é o valor do raio em que o tubo se rompe. Deve-se ainda observar que o material do tubo geralmente é anisotrópico. Se as propriedades do ensaio de tração uniaxial forem medidas, o coeficiente de encruamento no sentido da circunferência não pode ser verificado com precisão e a ruptura pode ocorrer com tensões consideravelmente menores do que pela equação 3.10.

3.3.1 – Cálculo analítico da pressão interna pela equação 3.8 do SISTEMA PARA TESTE

Pela Figura 3.7, tem-se os dados:

$$n = 0,21$$

$$k = 643N/mm^2 = 64,3kg/mm^2$$

$$r = (35/2) = 17,5 - 1,2 = 16,3mm$$

$$r_0 = 25,4/2 = 12,7 - 1,2 = 11,5mm$$

$$t_0 = 1,2mm$$

Levando à equação 3.8, obtêm-se:

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} 64,3 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{16,3}{11,5} \right)^{0,21} 1,2 \frac{11,5}{16,3^2} = 3,186kg/mm^2$$

$$p \approx 318bar \quad (3.11)$$

O valor é menor do que $p_i \approx 343bar$ (do item 3.1.1).

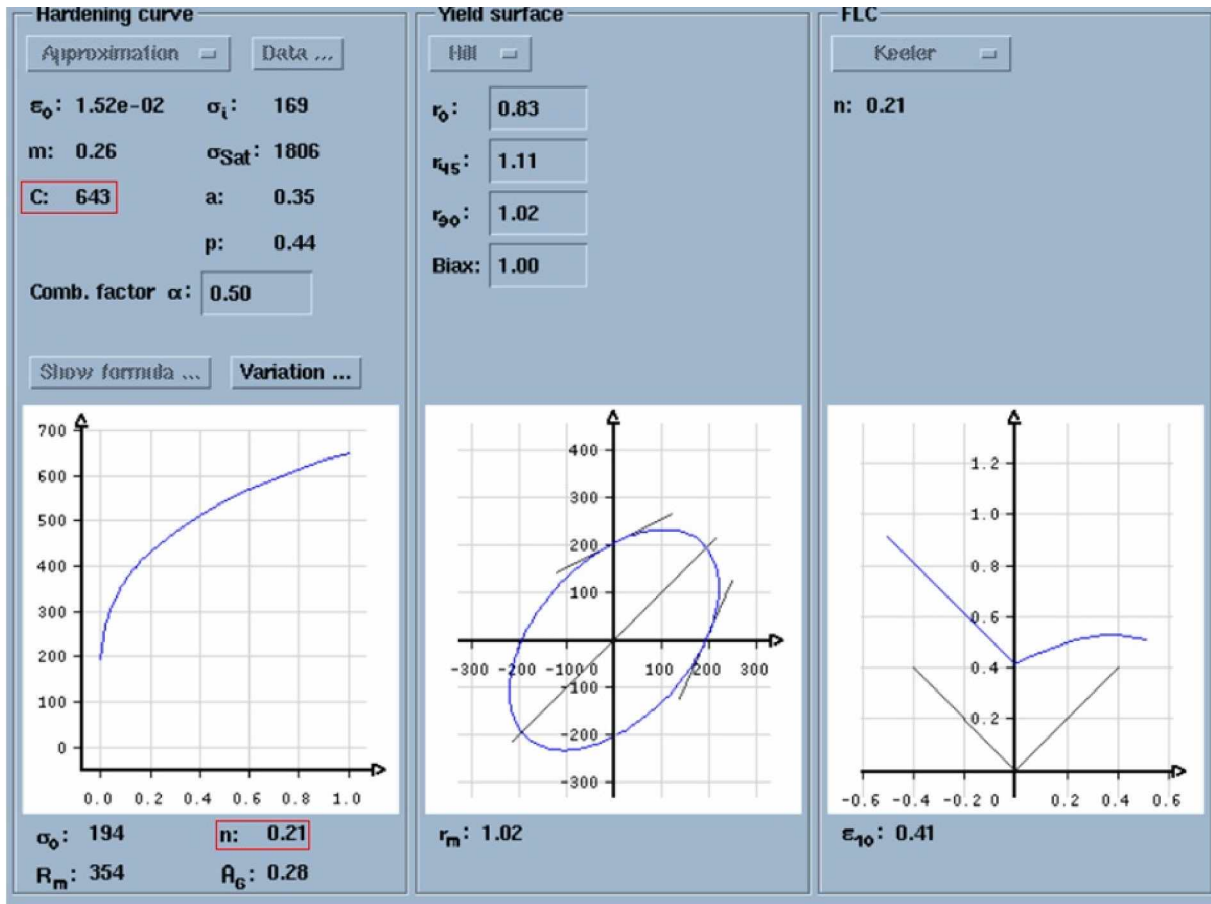


Figura 3.7 – Dados do aço SAE 1008 - Através do AutoForm.

3.3.2 – Cálculo analítico do “r” em função do “n” pela equação 3.9

Pela equação 3.9:

$$\ln \frac{r^*}{r_0} = n, \quad \rightarrow \quad r^* = r_0 e^n \quad (3.12)$$

Pela equação 3.12 e espessura do tubo = 1,2mm, tem-se:

$$r_{1,2}^* = r_0 e^n = (12,7 - 1,2) e^{0,21} = 14,18 \text{ mm}$$

$$d_{\text{externo}} = (14,18 + 1,2) * 2 = 30,77 \text{ mm}$$

Para a espessura do tubo = 1,5mm:

$$r_{1,5}^* = r_0 e^n = (12,7 - 1,5)e^{0,21} = 13,8mm$$

$$d_{externo} = (13,8 + 1,5) * 2 = 30,6mm$$

Obs.: Os valores dos diâmetros externos são apenas referenciais, pois após a conformação existe uma redução da espessura da parede do tubo, não podendo mais ser considerados os valores de 1,2 e 1,5mm usados no cálculo.

3.3.3 – Cálculo analítico da pressão interna máxima pela equação 3.10

Dados:

$$n = 0,21$$

$$k = 643N / mm^2 = 64,3kg / mm^2$$

$$r_0 = 25,4 / 2 = 12,7 - 1,2 = 11,5mm$$

$$t_0 = 1,2mm$$

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} 64,3 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} 0,21 \right)^{0,21} \frac{1,2}{11,5} \exp(-2 * 0,21) = 3,78kg / mm^2$$

$$p \approx 378bar$$

O valor é maior do que $p_i \approx 343bar$ (do item 3.1.1).

4 – CONSTRUÇÃO DO SISTEMA PARA TESTE

Sabendo-se da real necessidade de domínio da tecnologia de hidroconformação das empresas no Brasil e do imprescindível desenvolvimento tecnológico para a sobrevivência no mercado de conformação de peças metálicas das empresas, executou-se o primeiro contato experimental com o processo de hidroconformação em tubos de aço.

Buscou-se, para tal, desenvolver um sistema simplificado onde se pretende utilizar tubos de aço de diâmetro externo 25,4mm e com espessuras de 1,2 e 1,5 mm para realizar os testes em uma ferramenta em que duas cavidades bipartidas da peça serão fechadas e mantidas por meio de parafusos. E o acionamento da bomba de amplificação da pressão acontecerá pelo movimento da mesa superior de uma prensa hidráulica existente nas dependências do Centro Tecnológico do Colégio Evangélico Panambi.

Optou-se por um desenho para a peça a ser hidroconformada que tivesse apenas expansão do diâmetro mantendo a forma redonda, sem compressão axial, conforme visto na Figura 3.3.

4.1 – Cálculo dos esforços de fechamento

No dimensionamento do sistema para teste, realizaram-se os cálculos dos esforços de fechamento observando como referência uma pressão interna máxima de 2.000bar, e uma tensão admissível de 60 kg/mm^2 para o material dos parafusos de fechamento e fixação.

4.1.1 – Para abertura da matriz

Observou-se uma simplificação da área projetada da peça como referência para o cálculo:

DADOS: a=Ø ext. do tubo = 25,4mm
 b=comprimento = 100mm
 p=pressão interna = 20kg/mm²

A força é resultante da multiplicação da área projetada pela pressão, tendo-se:

$$\begin{aligned} F_{FECHAMENTO} &= A * p = (a * b) * p = (25,4mm * 100mm) * 20kg / mm^2 \\ F_{FECHAMENTO} &= 50.800kg \approx 51ton \end{aligned} \quad (4.1)$$

Na determinação dos parafusos adotou-se o uso de parafusos allen M12, onde o cálculo de sua área fica:

$$\begin{aligned} A &= r^2 * \pi = (10.5 / 2)^2 * \pi \\ A &= 86,59mm^2 \end{aligned}$$

A força do parafuso, considerando uma tensão admissível de 60 kg/mm², fica:

$$\begin{aligned} F_{PARAFUSO} &= A * \sigma_{adm} = 86,59mm^2 * 60kg / mm^2 \\ F_{PARAFUSO} &= 5.195,4kg \end{aligned} \quad (4.2)$$

Dividindo o resultado da equação 4.1 pela equação 4.2, o número de parafusos fica:

$$\begin{aligned} N &= \frac{F_{FECHAMENTO}}{F_{PARAFUSO}} = \frac{50.800kg}{5.195,4kg} = 9,77 \\ N &= 10 \text{ parafusos} \end{aligned}$$

4.1.2 – Para abertura dos punções de vedação

No cálculo da força de abertura dos punções de vedação adotou-se a área do diâmetro externo do tubo:

$$\begin{aligned} F_{VEDAÇÃO} &= A * p = (r^2 * \pi) * p = ((25.4mm / 2)^2 * \pi) * 20kg / mm^2 \\ F_{VEDAÇÃO} &= 10.134,14kg \end{aligned} \quad (4.3)$$

Dividindo o resultado da equação 4.3 pelo da equação 4.2, o número de parafusos fica:

$$N = \frac{F_{VEDAÇÃO}}{F_{PARAFUSO}} = \frac{10.134,14\text{kg}}{5.195,4\text{kg}} = 1,95$$

$$N = 2 \text{ parafusos}$$

Com a finalidade de padronizar a chave allen e a fixação dos parafusos das tampas dos punções de vedação contra as matrizes, adotou-se o uso de 4 parafusos em cada tampa.

4.2 – Especificação do sistema

Com o cálculo das quantidades de parafusos de fixação necessários para manter o fechamento, desenvolveu-se o desenho do projeto da ferramenta conforme a Figura 4.1, onde aparece o sistema proposto, que possui duas cavidades bi-partida (1) da peça teste, montadas por meio de parafusos (8). O detalhamento completo do projeto da ferramenta é demonstrado no APÊNDICE A.

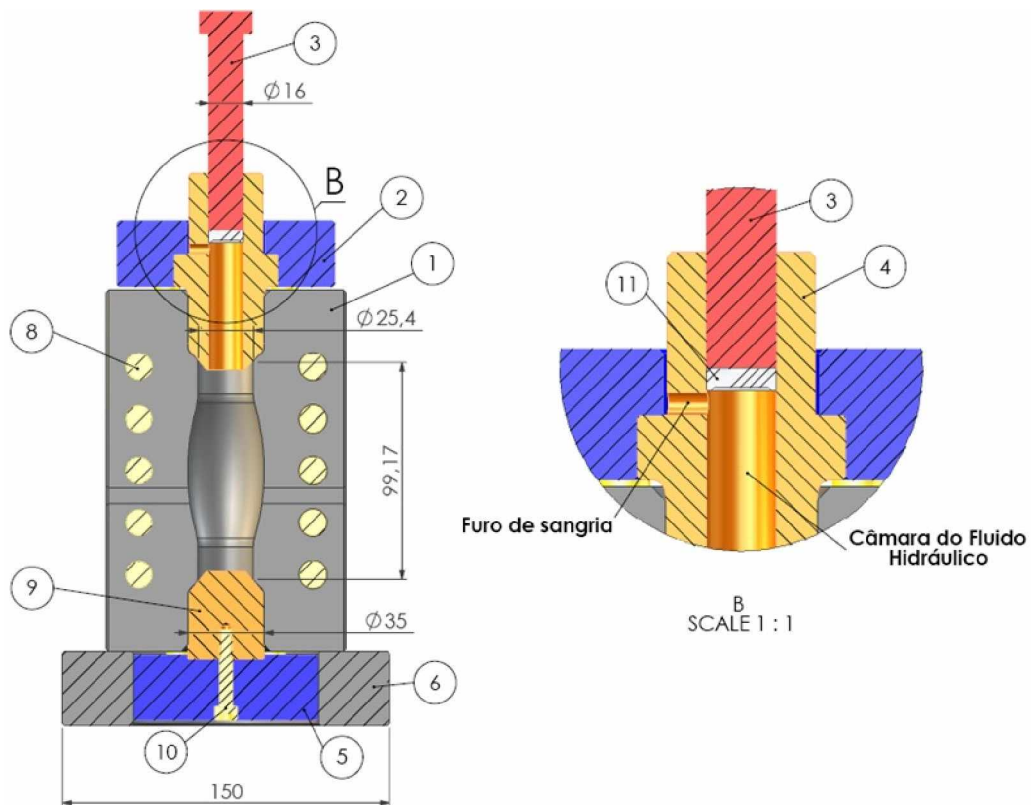


Figura 4.1 – Desenho em CAD do sistema para teste.

Os punções de vedação (4) e (9) são escorados pelos anéis (2) e (5) por meio de parafusos. No detalhe B da Figura 4.1 está o sistema de amplificação de pressão que funciona dentro do punção de vedação (4) que possui um furo central que serve de câmara do fluido hidráulico e guia para o pino (3). Ainda existe um furo lateral com a função de permitir a saída do ar quando é colocada a vedação de nylon (11) que é acionada pelo pino (3).

4.3 – Construção e funcionamento do protótipo

Na construção do protótipo, a fabricação (usinagem) das peças foi conforme o projeto da ferramenta do APÊNDICE A. Após, as peças foram tratadas termicamente por meio de têmpera e revenimento para alcançar uma dureza de aproximadamente 55HRC. Na Figura 4.2, observa-se os componentes do sistema já temperados: um tubo em uma das cavidades, parafusos de fixação, chave tipo cachimbo com uma ponteira sextavada e um torquímetro que será usado para apertar todos os parafusos com torque equivalente a 40kgf*m.




Figura 4.2 – Componentes usados no sistema para teste.

A seqüência de montagem e funcionamento do sistema é de acordo com as figuras do APÊNDICE B. A Tabela 4.1 relaciona a pressão indicada na prensa, à estimativa de pressão na câmara de fluido, segunda a relação das áreas do cilindro hidráulico da prensa e do pino de Ø16mm de diâmetro. A faixa de pressão para o teste fica em torno de 2 a 3 bar medidos no manômetro da prensa hidráulica, que possui na sua escala leitura de até 300 bar.

Tabela 4.1 – Dados de pressão da prensa e da câmara de fluido.

| Dados da prensa | | Prensa Hidráulica | | Câmara de Fluido |
|------------------------|------------------------|--------------------------|---------------|-------------------------|
| | | pressão [bar] | força [ton] | pressão estimada [bar] |
| Diâmetro do Cilindro | 20 cm | 1 | 0.31 | 156.25 |
| Área | 314.15 cm ² | 2 | 0.63 | 312.50 |
| Pressão máxima | 180 kg/cm ² | 3 | 0.94 | 468.75 |
| Força máxima | 56547 kg | 4 | 1.26 | 625.00 |
| | | 5 | 1.57 | 781.25 |
| | | 6 | 1.88 | 937.50 |
| | | 7 | 2.20 | 1093.75 |
| | | 8 | 2.51 | 1250.00 |
| | | 9 | 2.83 | 1406.25 |
| | | 10 | 3.14 | 1562.50 |
| | | 11 | 3.46 | 1718.75 |
| | | 12 | 3.77 | 1875.00 |
| | | 13 | 4.08 | 2031.25 |
| | | 14 | 4.40 | 2187.50 |
| | | 15 | 4.71 | 2343.75 |
| | | 16 | 5.03 | 2500.00 |
| | | 17 | 5.34 | 2656.25 |
| | | 18 | 5.65 | 2812.50 |
| | | 19 | 5.97 | 2968.75 |
| | | 20 | 6.28 | 3125.00 |
| | | 25 | 7.85 | 3906.25 |
| | | 30 | 9.42 | 4687.50 |
| | | 40 | 12.57 | 6250.00 |

| Dados do pino | |
|-------------------------|------------------------|
| Diâmetro do pino | 1.6 cm |
| Área | 2.0106 cm ² |
| | |
| Relação de áreas | 156.25 |



4.4 – Questões relacionadas a vedação

Num dos testes se observou a ocorrência de vazamento do fluido hidráulico pelas ponteiros de vedação usando uma pressão de fechamento inferior a 10bar e o mesmo torque aplicado aos parafusos das tampas de vedação. Isso indica que a força de conformação da ponteira de vedação era muito pequena, adotando-se assim, uma pressão de 40bar no manômetro da prensa hidráulica o que resulta numa força de 12,57 toneladas (Tabela 4.1). Observou-se ainda que a vedação na ponteira do tubo continuou acontecendo mesmo com a

variação do fluido hidráulico óleo e água com produto de refrigeração e das variações de comprimento da aba no tubo apresentadas acima usando a força de 12,57 toneladas.

Conforme pode ser visto na Tabela 4.1, a pressão necessária na unidade hidráulica da prensa é muito pequena, sendo difícil de ser regulada e medida uma pressão inferior ou próxima aos valores calculados nos itens (3.1) e (3.3). Esse fato impossibilitou uma melhor adequação ao processo de conformação do tubo.

Na vedação da atuação do pino da câmara de pressão, utilizou-se uma peça em nylon com o diâmetro externo 0.2mm maior do que o furo da câmara de pressão. O resultado obtido foi o funcionamento sem vazamentos durante o processo de amplificação da pressão.

Em relação ao tempo de montagem e operação do sistema até a retirada da peça, observou-se aproximadamente 30 minutos, considerando o uso da chave tipo cachimbo e o torquímetro para o aperto dos parafusos e duas movimentações da mesa da prensa hidráulica.

4.5 – Resultados dos testes sem restrição no diâmetro de expansão

Na Figura 4.3 o tubo (1) com diâmetro externo de 25,4mm e espessura de parede de 1,2mm é o resultado do teste usando óleo como fluido hidráulico. Ele teve a maior expansão \varnothing_{ext} 30,7mm, valor igual ao limite calculado para este tubo no item 3.3.2 – Cálculo analítico do “r” em função do “n” pela equação 3.9. O tubo (2), com espessura 1,5mm, usando como fluido o óleo, deformou apenas \varnothing 28,5mm. O tubo (3), com espessura de 1,5mm, usando água com produto de refrigeração para usinagem como fluido hidráulico, apresentou as mesmas características do tubo (2). Facilmente entende-se que as rupturas ocorreram quase na metade do seu comprimento.

Também se testou a variação do comprimento da aba de vedação, que no tubo (1) é de 4mm e nos tubos (2 e 3) é de 3mm, não apresentando problemas de vedação nas duas formas de abas apresentados. As abas são formadas quando se aperta os punções para dentro das extremidades do tubo com o movimento da mesa superior da prensa.

4.6 – Resultados dos testes usando restrição no diâmetro de expansão

Para reduzir o diâmetro da secção do meio do tubo, realizaram-se mais testes, usando anéis redutores do diâmetro de expansão.



Figura 4.3 – Resultados dos testes nos tubos de aço SAE 1008 (1, 2 e 3) com expansão livre.

Conforme a Figura 4.4 aparecem dois tipos de anéis cortados: um com corte em ângulo e outro com corte em paralelo. O primeiro, usado no tubo (4) com espessura de 1,5mm e o segundo, usado nos tubos (5 e 6) com espessura de parede de 1,2mm. A ruptura do material do tubo, neste caso não é mais na metade do seu comprimento e sim logo depois do comprimento de apoio do anel.

Dessa forma, buscou-se ainda um terceiro tipo de teste colocando um anel contínuo (Figura 4.5). Observa-se os efeitos causados nos tubos de aço de espessura 1,2mm. No tubo (7) é apresentado bom resultado de conformação. Embora os tubos (7) e (9) possuam as mesmas características de espessura e medidas do anel, eles apresentam resultados diferentes. No tubo (8) usou-se um anel mais largo para tentar evitar, ou melhor, minimizar a condição de sua ruptura. Contudo verificou-se que, mesmo com uma restrição de maior área na região de maior expansão do tubo, ele continuou rompendo.

Esses fatos indicam a existência de variáveis no processo, como pressão e velocidade de expansão, que não conseguem ser controladas e permitem uma variação dos resultados durante o processo de conformação.



Figura 4.4 – Resultados dos testes nos tubos de aço SAE 1008 (4, 5 e 6) com anéis cortados.



Figura 4.5 – Resultados dos testes nos tubos de aço SAE 1008 (7, 8 e 9) com anéis contínuos.

5 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO SISTEMA PARA PRODUÇÃO

Como a velocidade apresentada nos ensaios do sistema para teste não é compatível com um sistema produtivo de hidroconformação e existe a real necessidade de se conhecer as variáveis do sistema produtivo, a seguir serão apresentadas as especificações técnicas para um sistema de produção. Para tal, buscou-se uma peça teste para produção com mais detalhes de conformação que a anterior, mantendo a menor complexidade possível para ferramenta, evitando, por exemplo, sistemas com necessidade de compressão axial ao tubo, ou que tenham algum processo de dobra ou pré-compressão anterior à etapa de hidroconformação.

Será mostrado, neste capítulo, a especificação completa de um sistema para produção de uma peça teste, utilizando-se a prensa hidráulica da empresa Tromink. No estudo, será apresentada a definição da peça e do processo a ser utilizado, os cálculos de esforço de fechamento, os diagramas hidráulicos, alguns sistemas de amplificação de pressão, o detalhamento do funcionamento da ferramenta, a análise estrutural das principais peças estruturais da ferramenta e o levantamento dos custos para implementação do sistema industrial.

5.1 – Definição da peça e tipo da ferramenta

Definiu-se, então, que a peça teste de produção conteria em seu processo apenas a expansão interna do tubo de uma forma redonda para outro formato de maior diâmetro. Como mostra a Figura 5.1, o tubo manteve a forma redonda em sua extremidade e na parte do meio o formato redondo foi alterado para a forma quadrada. Neste quadrado ainda foi adicionado um relevo para aumentar a severidade da conformação.

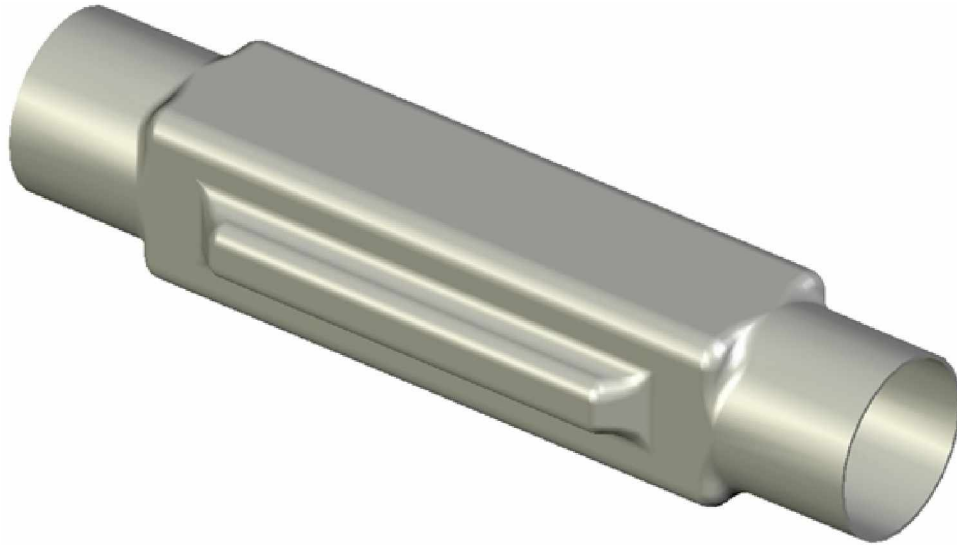


Figura 5.1 – Forma visual da peça teste de produção.

5.1.1 – Definição do blank

Para a definição do blank da peça teste de produção, pesquisou-se tubos de diâmetro, espessura e tipo de material comercial, e a existência de fornecedores de baixa quantidade para realização dos testes, adequando o diâmetro necessário para a peça teste conforme a disponibilidade do tubo encontrado no Brasil.

Inicialmente, verificou-se dois fornecedores de tubos, observando os dados fornecidos em seus catálogos: TUPER [14] e a ZAMPROGNA [15]. Como as duas empresas só vendem de tubos em grandes quantidades, precisou-se encontrar um distribuidor que tivesse alguma bitola em seu estoque para adequarmos nossa peça a esta medida.

O fornecedor encontrado foi à empresa SILENKAR, que fabrica peças de escapamento de motores à combustão. Ela trabalha com tubos costurados de diâmetro 2” (50,8mm) por 6 metros, com espessuras de 1,25 e 1,50mm, galvanizados, de aço SAE 1008 e aço SAE 1020, conforme a norma NBR 6591 que regulamenta a especificação dos tubos no Brasil.

5.1.2 – Definição das medidas da peça para produção

Ajustaram-se as medidas do desenho do produto, conforme definição do tubo comercial usado pela empresa SILENKAR. Na Figura 5.2, está o detalhamento da peça a ser hidroconformada no sistema para produção.

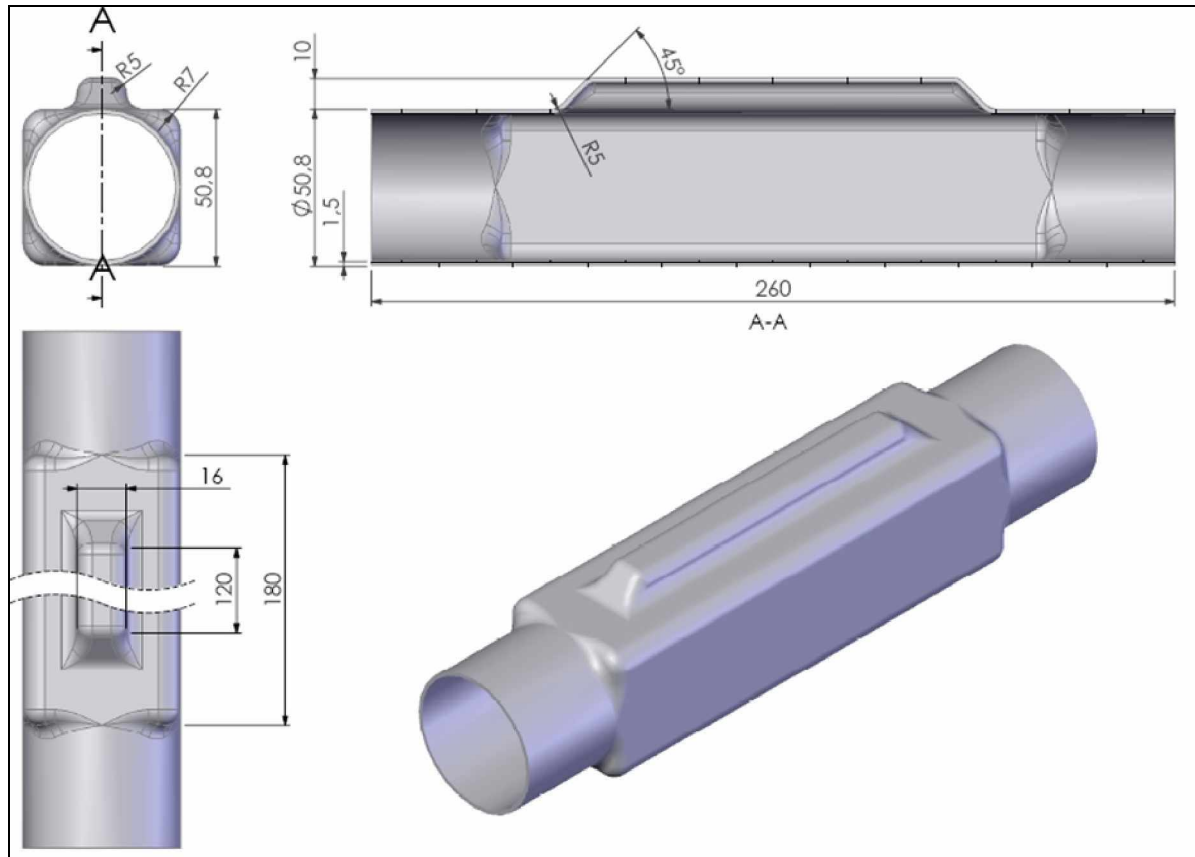


Figura 5.2 – Forma e medidas finais da peça para produção.

5.1.3 – Definição do tipo de ferramenta e etapas do processo

Nesta parte do projeto, buscou-se encontrar uma prensa hidráulica nas empresas da região para realizar o movimento de fechamento e manter a força de fechamento necessária à conformação. Também, a definição do sentido de abertura da matriz, sendo a cavidade da peça partida ao meio, como visto na Figura 5.3, onde as cavidades da peça aparecem em transparência.

Foi criado um postíço (Figura 5.4) que possibilita a troca do formato do detalhe, que poderá ser plano, ou conforme o relevo da Figura 5.1, ou ainda em formato a ser projetado com dimensão máximas do tamanho do postíço.

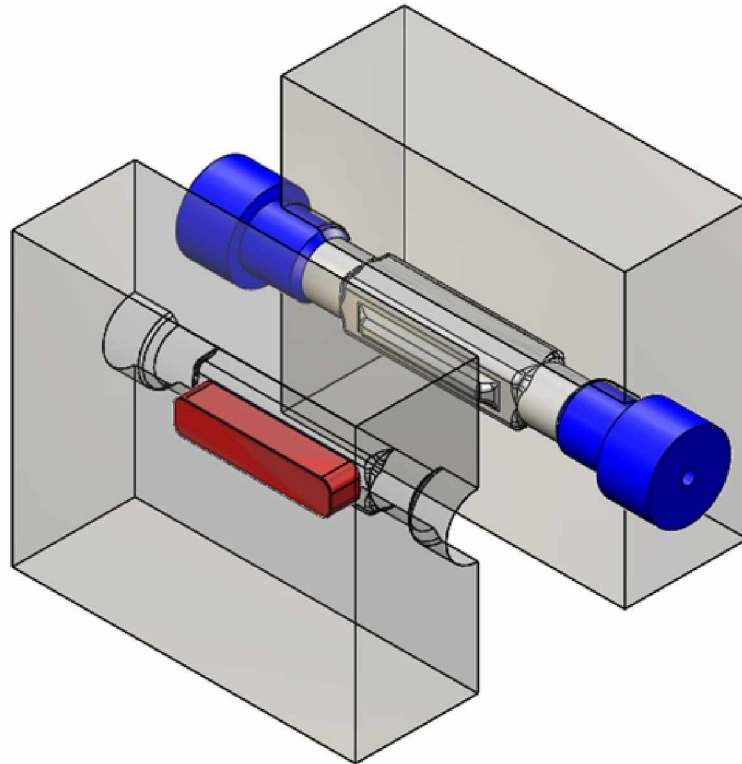


Figura 5.3 – Forma conceitual da ferramenta de hidroconformação.

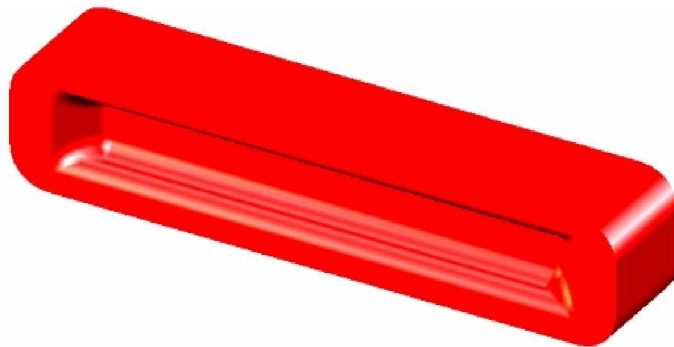


Figura 5.4 – Postiço da ferramenta de hidroconformação.

Na Figura 5.5 é apresentada uma folga axial do punção de vedação em relação a matriz. Esta folga serve para acomodar uma espessura do tubo que terá um comprimento maior que o comprimento final da peça. Quando o tubo é colocado dentro da matriz e realizado o fechamento dos punções de vedação, estes se expandem abrindo seu diâmetro e apertando a parede do tubo contra a face chanfrada das matrizes criando a ponteira de vedação entre a matriz, o tubo e o punção de vedação.

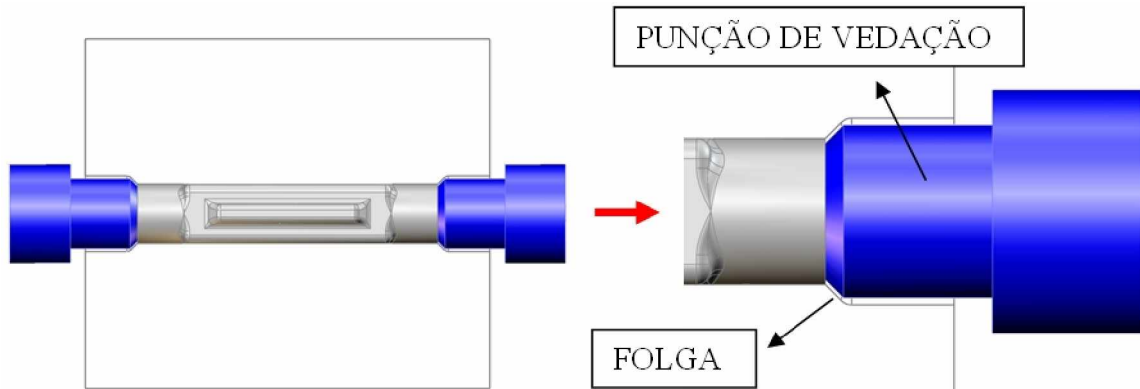


Figura 5.5 – Sistema de vedação na extremidade do tubo.

5.2 – Calculo dos esforços de abertura da matriz e punção de vedação

Para determinar os esforços de abertura da matriz em função da pressão aplicada internamente ao tubo, adotou-se a área projetada da peça para o cálculo.

DADOS: $a = \text{Ø ext. do tubo} = 50,8\text{mm}$
 $b = \text{Comprimento} = 260\text{mm}$
 $p = \text{Pressão interna} = 20\text{kg/mm}^2$

Como a força é a resultante da multiplicação da área projetada pela pressão, tem-se:

$$F = A * p = (a * b) * p = (50,8\text{mm} * 260\text{mm}) * 20\text{kg / mm}^2$$

$$F = 264.160\text{kg} \approx 265\text{ton}$$

Na determinação do diâmetro do cilindro de fechamento (necessário para realizar a vedação do tubo), adotou-se que Força (F_1) causada pela pressão interna do tubo seja menor ou igual a Força (F_2) do cilindro que manterá o fechamento do sistema.

DADOS: $\text{Ø ext. do tubo} = 50,8\text{mm} \rightarrow R_1 = 25,4\text{mm}$
 $\text{Ø êmbolo do cilindro} \rightarrow R_2 = ??$
 $\text{Pressão interna} = 2.000\text{bar} \rightarrow p_1 \approx 20 \text{ kg/mm}^2$

Na força mínima necessária para o fechamento do cilindro, tem-se:

$$F_1 = A_1 * p_1 = (R_1)^2 * \pi * p_1 = (25,4mm)^2 * \pi * 20kg / mm^2$$

$$F_1 = 40.535,4kg \approx 40,5ton$$

Para a determinação do diâmetro do cilindro adotou-se:

$$F_1 = F_2; \quad A_1 * p_1 = A_2 * p_2; \quad (R_1)^2 * \pi * p_1 = (R_2)^2 * \pi * p_2$$

$$R_2 = \sqrt{\frac{(R_1)^2 * p_1}{p_2}} \quad (5.1)$$

Pela equação 5.1 e considerando uma pressão do sistema hidráulico $p_2 = 200bar \approx 2,0$ kg/mm², tem-se:

$$R_2 = \sqrt{\frac{(25,4mm)^2 * 20kg / mm^2}{2,0kg / mm^2}} = 80,3mm$$

$$D_2 = 80,3 * 2 = 160,6mm$$

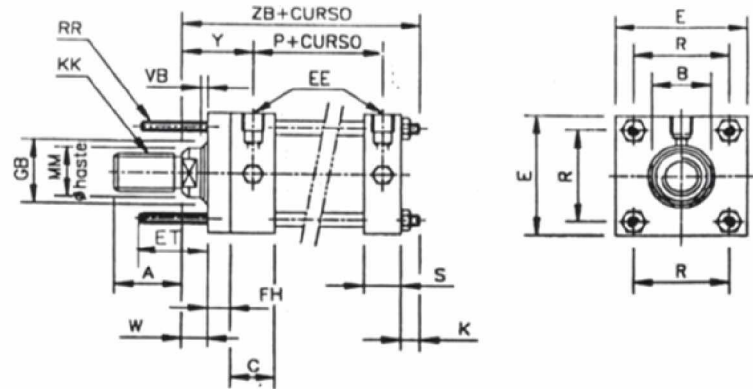
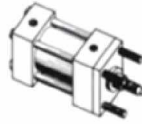
Conforme o catálogo de cilindros hidráulicos da empresa NEUMAQ [16] (Figura 5.6), tem-se os diâmetros dos cilindros de tirantes salientes dianteiros variando entre 6" (152,4mm) e 8" (203,2mm). Como só o cilindro de 8" atende à condição do diâmetro, pode-se reduzir a pressão de trabalho para 160bar conforme cálculo abaixo ele ainda atende à condição desta pressão.

Para pressão do sistema hidráulico = 160bar, $p_2 \approx 1,6$ kg/mm², tem-se:

$$R_2 = \sqrt{\frac{(25,4mm)^2 * 20kg / mm^2}{1,6kg / mm^2}} = 89,8mm$$

$$D_2 = 89,8 * 2 = 179,6mm$$

JIC - Tirantes Salientes Dianteiros



| Ø CILINDRO | MM | A | B | KK | W | Y | ZB | GB | VB | EE (NPT) | FH | C | S | K | P | R | E | RR | ET |
|---------------|-----------|-------|-------|-----------|------|------|-------|-------|-----|-------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-----------|-------|
| 1.1/2" | HN 1/2" | 15,9 | 9,5 | 3/8".24 | 15,9 | 48,9 | 173,7 | 27,0 | 6,4 | 3/8" | 9,5 | 37,5 | 31,1 | 10,0 | 75,9 | 41,4 | 63,5 | 3/8"-24 | 31,8 |
| | HI 5/8" | 19,0 | 14,2 | 7/16".20 | 15,9 | 48,9 | 173,7 | 27,0 | 6,4 | | | | | | | | | | |
| 2" | HN 1" | 28,6 | 22,0 | 3/4".16 | 19,0 | 56,9 | 198,1 | 46,0 | 6,4 | 1/2" | 15,9 | 37,5 | 31,1 | 13,5 | 78,1 | 52,0 | 76,2 | 7/16"-20 | 46,0 |
| | HP 1.1/4" | 41,3 | 26,8 | 7/8".14 | 25,4 | 63,3 | 204,5 | 46,0 | 6,4 | | | | | | | | | | |
| 2.1/2" | HN 1" | 28,6 | 22,0 | 3/4".16 | 19,0 | 57,9 | 202,4 | 46,0 | 6,4 | 1/2" | 15,9 | 37,1 | 30,9 | 13,5 | 81,4 | 64,8 | 88,9 | 1/2"-20 | 46,0 |
| | HI 1.3/8" | 41,3 | 28,6 | 7/8".14 | 25,4 | 64,3 | 208,5 | 51,0 | 6,4 | | | | | | | | | | |
| 3.1/4" | HP 1.3/4" | 50,8 | 38,1 | 7/8".14 | 30,3 | 69,2 | 213,4 | 64,0 | 6,4 | | | | | | | | | | |
| | HN 1.3/8" | 41,3 | 28,6 | 1".14 | 22,2 | 68,3 | 239,6 | 64,0 | 6,4 | | | | | | | | | | |
| 4" | HI 1.3/4" | 50,8 | 38,1 | 1.1/4".12 | 28,6 | 74,7 | 246,0 | 64,0 | 6,4 | 3/4" | 19,0 | 44,6 | 38,0 | 16,5 | 92,1 | 82,5 | 114,3 | 5/8"-18 | 58,7 |
| | HP 2" | 57,2 | 44,4 | 1.1/4".12 | 28,6 | 74,7 | 246,0 | 68,0 | 6,4 | | | | | | | | | | |
| 5" | HN 1.3/4" | 50,8 | 38,1 | 1.1/4".12 | 25,4 | 76,6 | 252,3 | 72,0 | 6,4 | 3/4" | 22,2 | 46,5 | 40,1 | 16,5 | 94,4 | 97,0 | 127,0 | 5/8"-18 | 58,7 |
| | HI 2" | 57,2 | 44,4 | 1.1/2".12 | 28,6 | 79,8 | 255,5 | 72,0 | 6,4 | | | | | | | | | | |
| 6" | HP 2.1/2" | 76,2 | 54,0 | 1.7/8".12 | 31,8 | 83,0 | 258,7 | 85,0 | 6,4 | | | | | | | | | | |
| | HN 2.1/2" | 76,2 | 54,0 | 1.7/8".12 | 34,9 | 85,7 | 296,8 | 116,0 | 9,5 | 3/4" | 22,2 | 46,8 | 42,0 | 24,0 | 107,9 | 126,7 | 165,0 | 7/8"-14 | 81,0 |
| 8" | HI 3.1/2" | 88,9 | 79,4 | 2.1/4".12 | 31,8 | 80,4 | 335,7 | 116,0 | 6,4 | 1" | 25,4 | 46,8 | 46,8 | 27,5 | 139,9 | 145,6 | 190,5 | 1".14 | 92,0 |
| | HP 4" | 101,6 | 92,0 | 2.1/4".12 | 31,8 | 80,4 | 335,7 | 120,0 | 6,4 | | | | | | | | | | |
| 8" | HN 3.1/2" | 88,9 | 79,4 | 2.1/4".12 | 31,8 | 96,6 | 418,9 | 116,0 | 6,4 | | | | | | | | | | |
| | HI 4.1/2" | 114,3 | 104,7 | 3.1/4".12 | 31,8 | 96,6 | 418,9 | 142,0 | 6,4 | 1.1/2" | 31,8 | 65,0 | 71,1 | 35,0 | 169,4 | 193,5 | 241,3 | 1.1/4"-12 | 114,3 |
| | HP 5.1/2" | 139,7 | 130,2 | 3.1/4".12 | 31,8 | 96,6 | 418,9 | 168,0 | 6,4 | | | | | | | | | | |

Figura 5.6 – Especificação do cilindro hidráulico - NEUMAQ [16].

5.3 – Definição do esquema hidráulico de fechamento da vedação no tubo

Na Figura 5.7 está o esquema hidráulico do sistema de fechamento. Nele aparece a unidade hidráulica gerando a pressão e vazão, duas válvulas e os cilindros de fechamento 1 e 2 que compõem o sistema.

5.4 – Definição do esquema hidráulico do amplificador de pressão

O sistema amplificador funciona pela variação das áreas dos cilindros, conforme Figura 5.8. Em A2 está entrando a pressão do sistema hidráulico, usualmente de 140 a 200bar, e este cilindro com êmbolo de área maior aciona a haste A1, de área menor, gerando uma ampliação da pressão do fluido de entrada da BAIXA PRESSÃO. A divisão da área A2, pela

A_1 , multiplicado pelo valor da pressão P_2 , visto na equação 5.2, representa o valor da pressão amplificada.

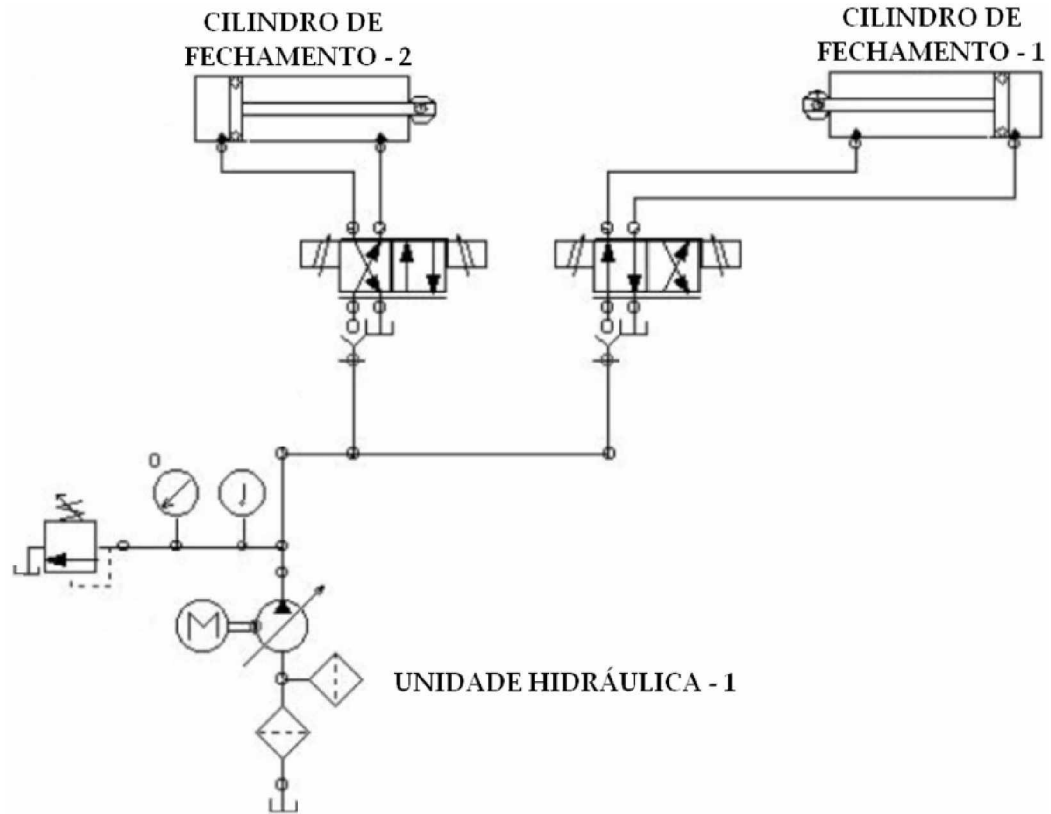


Figura 5.7 – Esquema hidráulico de fechamento da vedação no tubo.

$$A_1 * p_1 = A_2 * p_2$$

$$p_{1(\text{alta_pressão})} = \frac{A_2 * p_2}{A_1}$$

(5.2)

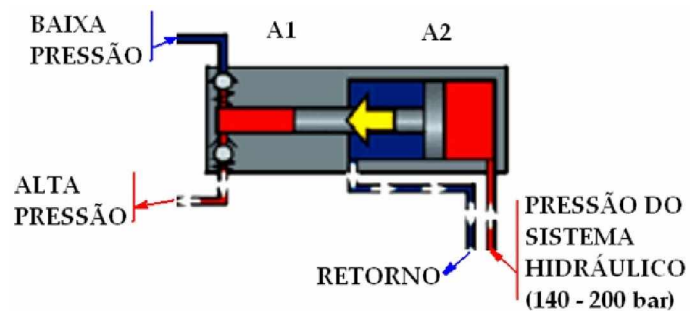


Figura 5.8 – Esquema da variação das áreas do amplificador.

O esquema apresentado na Figura 5.8 realiza o aumento da pressão somente em um sentido de movimento do cilindro, sendo necessário retornar o cilindro e avançá-lo para ter-se uma nova geração do aumento de pressão.

Na Figura 5.9 há o esquema hidráulico básico para este amplificador de pressão, onde aparece uma unidade hidráulica gerando a pressão e vazão, uma válvula para alternar o movimento do cilindro, um cilindro maior ligado a um menor e do menor saindo a pressão amplificada para o interior da peça.

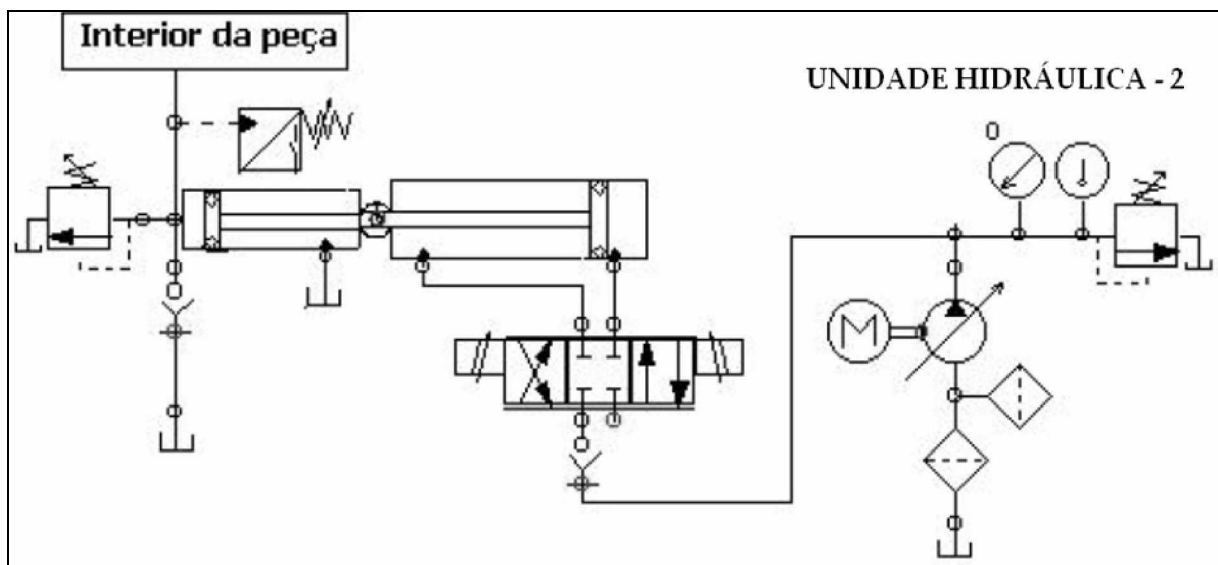


Figura 5.9 – Esquema básico do amplificador de pressão.

Considerando os dados acima, pesquisou-se alguns sistemas de ampliação de pressão existentes no mercado. Conforme catálogos da empresa HIDRO-PAC [17], existem sistemas como o da Figura 5.10 que atuam simultaneamente admitindo fluido em baixa pressão e enviando fluido em alta pressão, acionado por um cilindro de haste passante que fica na parte central do sistema com ele consegue-se a ampliação da pressão nos dois sentidos de movimentação do cilindro.

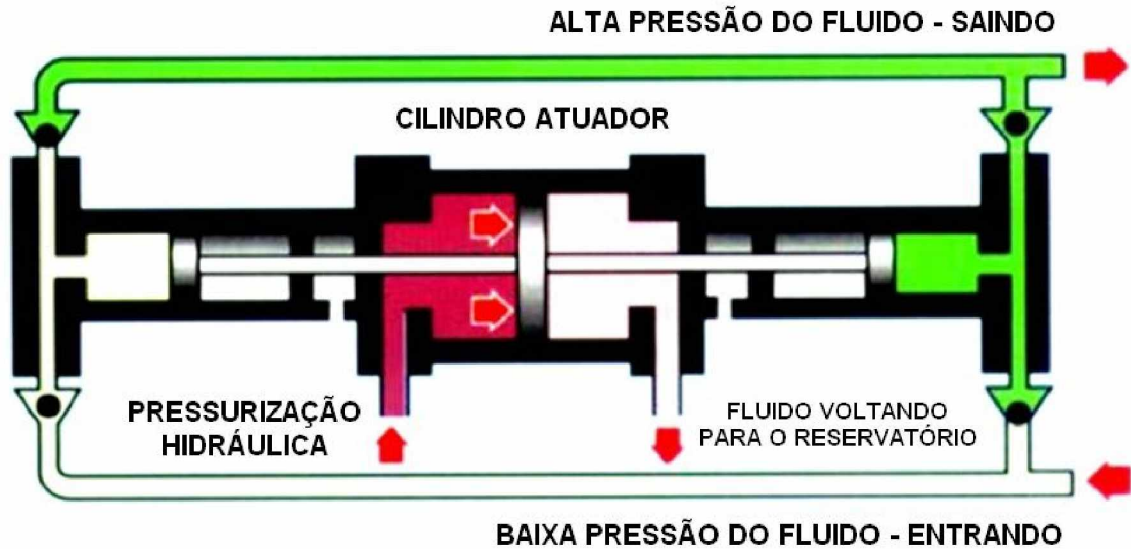


Figura 5.10 – Esquema do amplificador de pressão simultâneo - HIDRO-PAC [17].

Ainda de acordo com a [17] estas bombas de alta pressão podem ser fornecidas conforme especificações da Figura 5.11, podendo chegar a aproximadamente 7.000bar de pressão.

Specifications

| Model | Pressure | | Capacity | | Power | | Weight | | Reservoir | | Inlet Connection | Discharge Connection |
|-----------|----------|-----|----------|------|-------|------|--------|----|-----------|-------|------------------|----------------------|
| | psi | MPa | gpm | lpm | hp | KW | lb | kg | gal | liter | | |
| P15-03CX | 15,000 | 105 | 0.25 | 0,95 | 3 | 2,25 | 200 | 90 | 10 | 40 | 1/4 FNPT | SF375CX |
| P15-05CX | 15,000 | 105 | 0.40 | 1,50 | 5 | 3,75 | 200 | 90 | 10 | 40 | | 3/8 x .203 HP |
| P30-03CX | 30,000 | 210 | 0.12 | 0,46 | 3 | 2,25 | 200 | 90 | 10 | 40 | 1/4 FNPT | F250C |
| P30-05CX | 30,000 | 210 | 0.20 | 0,75 | 5 | 3,75 | 200 | 90 | 10 | 40 | | 1/4 x .083 HP |
| P60-03CX | 60,000 | 415 | 0.06 | 0,20 | 3 | 2,25 | 200 | 90 | 10 | 40 | 1/4 FNPT | F250C |
| P60-05CX | 60,000 | 415 | 0.10 | 0,40 | 5 | 3,75 | 200 | 90 | 10 | 40 | | 1/4 x .083 HP |
| P100-03CX | 100,000 | 690 | 0.03 | 0,10 | 3 | 2,25 | 200 | 90 | 10 | 40 | 1/4 FNPT | F312C150 |
| P100-05CX | 100,000 | 690 | 0.06 | 0,20 | 5 | 3,75 | 200 | 90 | 10 | 40 | | 5/16 x .062 HP |

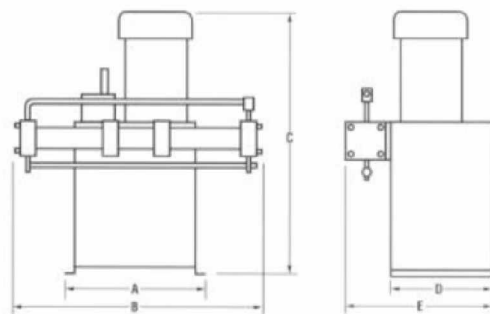


Figura 5.11 – Especificações dos amplificadores de pressão - HIDRO-PAC [17].

Na Figura 5.12 é apresentado o sistema de amplificação de pressão da empresa EPSI [18] que pode chegar a pressões de 7.000bar, conforme os modelos do fabricante.

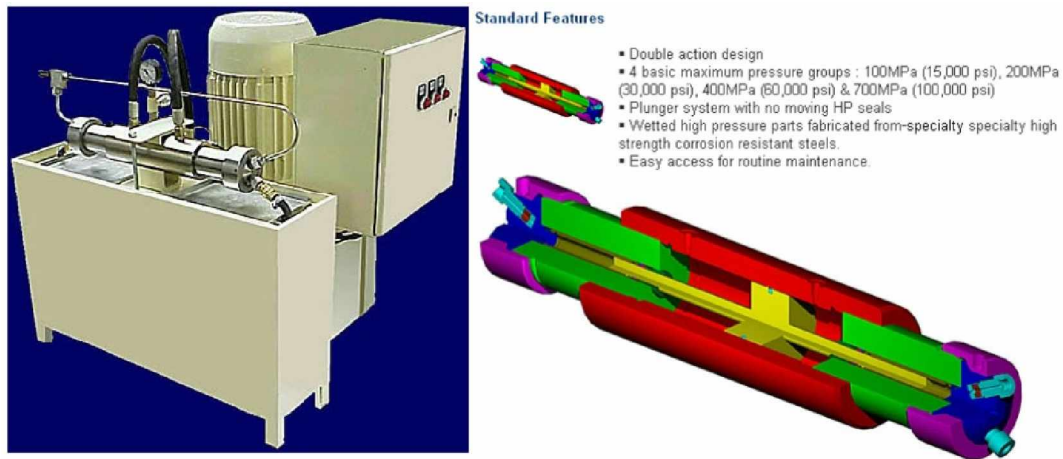


Figura 5.12 – Sistema de amplificadores de pressão - EPSI [18].

Como faz-se necessária a condução do fluido hidráulico sob alta pressão para o punção de vedação, e existe movimento linear neste punção, o meio de transmissão deve ser flexível, utilizando-se para tal, mangueira hidráulica. Na Figura 5.13 estão alguns modelos de mangueiras hidráulicas importadas pela empresa FLUTROL [19] que podem chegar a pressões de trabalho de até 3.200bar.



Figura 5.13 – Tipos de mangueiras SPIR STAR - FLUTROL [19].

A FLUTROL também faz a importação dos sistemas de amplificação de pressão (Figura 5.14) sendo uma possível parceira para a realização dos testes do sistema para produção projetado.



Figura 5.14 – Foto de referência do equipamento Test Pac F200 - FLUTROL [19].

O Test Pac F 200 é acionado com ar comprimido de compressor e eleva a pressão de líquidos como óleos, água com 5 % de óleo solúvel, água salina e outros.

O conjunto é composto basicamente de:

1. Bomba Hidropneumática Haskel (Figura 5.15) para pressão até 50.000 psi (3.448 bar) com vazão de 0 à 0.983 litros/min. Modelo DSHF-302.

- Corpo em aço inox com conexões rosqueáveis, retenções de alta vedação e separação entre a seção de líquido e a de ar comprimido, evitando contaminação.

- Haste / Pistão de alta resistência à corrosão, revestida com cromo duro.

- Gaxetas, anéis e buchas, desenhadas para alto desempenho e elevada durabilidade.

- Motor pneumático com potência equivalente a 2 HP. Trabalha com pressão de 25 a 150 psi (1,8 a 10,34 bar) de ar ou nitrogênio.

2. Filtro, regulador de pressão de ar, conexões, válvula de isolamento e manômetro para controle do ar de entrada.
3. Manômetro de alta resistência para até 60.000 psi com corpo em aço inox, que suporta fortes pulsações, pois é montado com glicerina.
4. Válvula de retorno ou despressurização em aço inox para pressão de até 60.000 psi.
5. Conexões e tubulação de saída em aço inox super-dimensionados para o serviço com alta pressão, montados e testados.
6. Skid aberto em aço inox para montagem e proteção do conjunto.
7. Reservatório em Inox com capacidade para 05 litros.
8. Válvula de segurança de pressão.
9. Pressostato para desligar automaticamente a Bomba quando na pressão de teste.

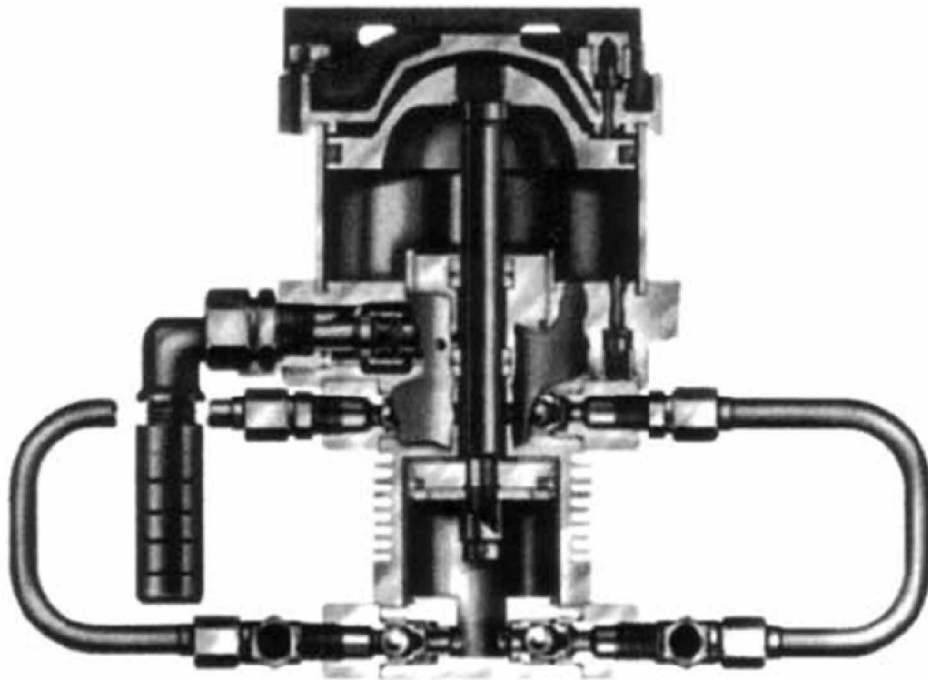


Figura 5.15 – Esquema para referência da Bomba Hidropneumática - HASSEL [20].

5.5 – Sistema de alimentação do fluido em baixa pressão para enchimento do tubo

Como os sistemas de alta pressão possuem baixa vazão, é necessário o uso de uma bomba de líquido em paralelo com a bomba de alta pressão para realizar o enchimento de

fluido hidráulico no tubo. Quando ocorre o aumento da pressão interna a bomba de alta pressão passa a realizar a tarefa de movimentar o fluido para dentro do tubo para sua conformação.

Além disso, ao se iniciar o enchimento do fluido no tubo, existe ar dentro dele e para retirá-lo faz-se necessário o uso de uma válvula para evacuação do ar.

5.6 – Detalhamento e funcionamento da ferramenta de produção

Com base no item 5.1.3, onde foi mostrado a forma de abertura das cavidades e o sistema de vedação do tubo dentro da matriz, é apresentado agora o desenho da ferramenta, visto na Figura 5.16 e detalhado no APÊNDICE - C. A ferramenta aparece separada pela linha de abertura definida para colocar e retirar o tubo. Formando o lado inferior que durante o processo ficará parado na mesa da prensa; e o lado superior que se movimentará junto com o martelo da prensa conforme os movimentos de abertura e fechamento necessários durante a operação.

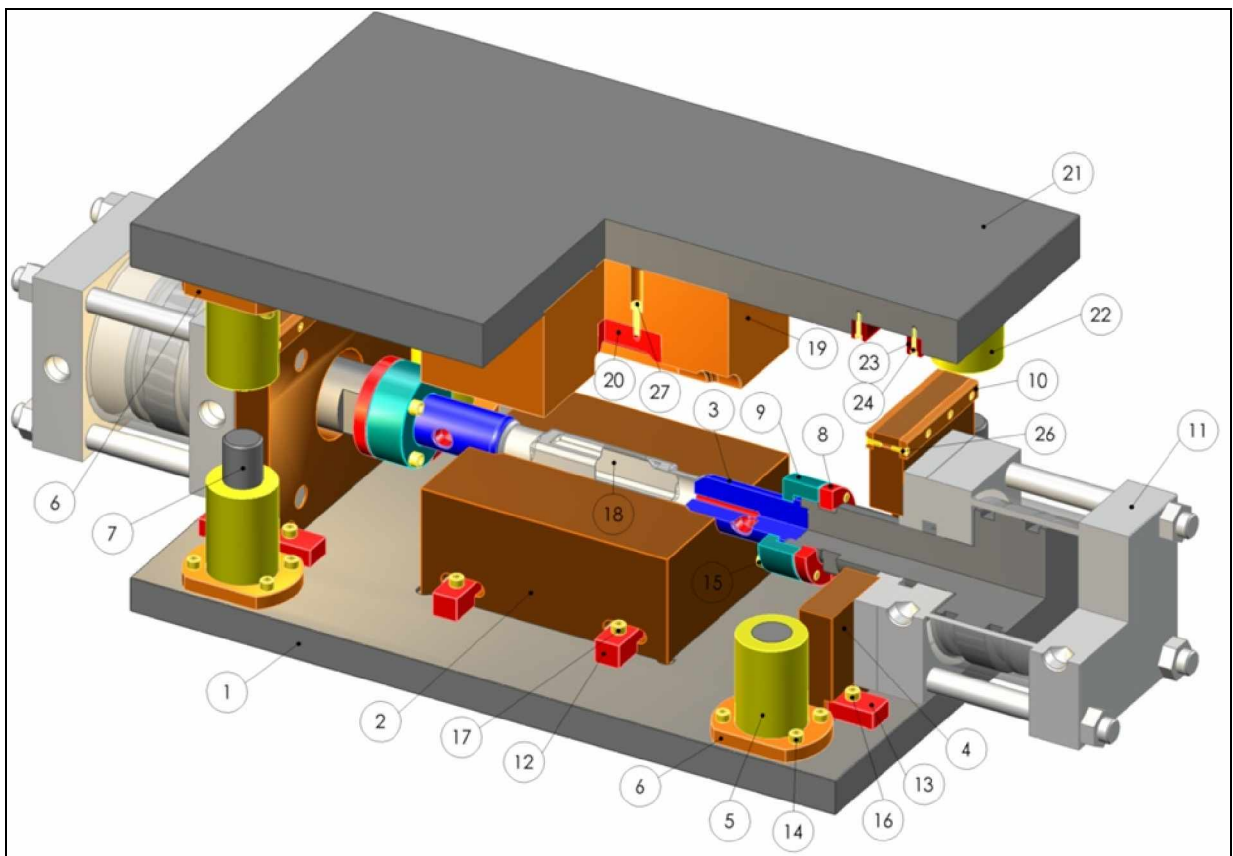


Figura 5.16 – Desenho em CAD da ferramenta para produção.

Pode-se verificar que a parte inferior é formada pela cavidade (2), uma base (1) que suporta a cavidade, as colunas guias compostas pelas peças (5), (6) e (7), e os suportes (4) dos cilindros hidráulicos. A cavidade (2) é encaixada na base (1) e presa por meio de grampos (12). O suporte (4) do cilindro também é encaixado na base (1) e preso por meio dos grampos (13).

A parte superior é formada pela cavidade (19), presa na base superior (21), que é guiada pela bucha (22) na coluna (7), formando o alinhamento entre os dois lados da ferramenta.

No detalhe da Figura 5.17 podem ser vistos os componentes que fazem parte do suporte do cilindro hidráulico (11) e sua ligação com o punção de vedação (3).

O suporte (4) do cilindro (11) é engastado na parte inferior da ferramenta e na parte superior possui um encosto móvel, feito através das peças (10) e (23) que serão temperadas e retificadas para resistir ao desgaste causado pelo movimento entre a parte superior e a inferior da ferramenta.

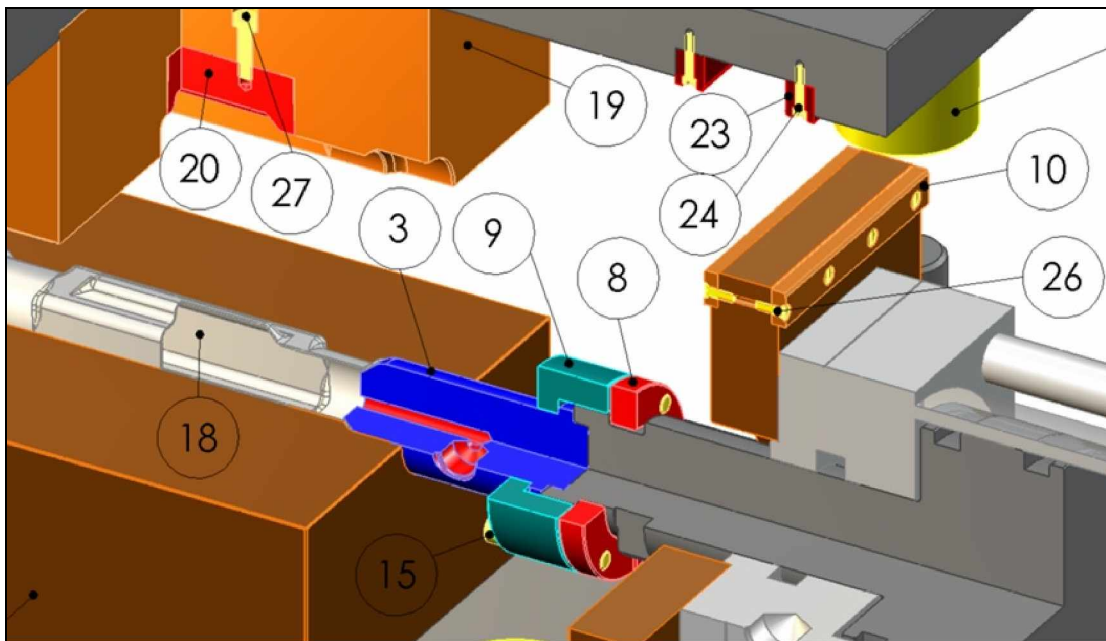


Figura 5.17 – Detalhes da parte interna da ferramenta.

Na parte central da Figura 5.17, pode-se observar que o punção (3) é engastado ao cilindro de vedação (11) e sua união é feita pelo anel (9) com o anel bipartido (8) que está preso por parafusos o postiço (20) é preso dentro da cavidade superior (19) por meio dos parafusos (27).

5.6.1 – Funcionamento da hidroconformação

Com as cavidades (2) e (19) abertas e os punções de vedação (3) recuados, coloca-se o tubo (blank) (Figura 5.18) dentro da cavidade (2). No primeiro passo, faz-se o movimento do martelo da prensa unindo a cavidade superior com a inferior.

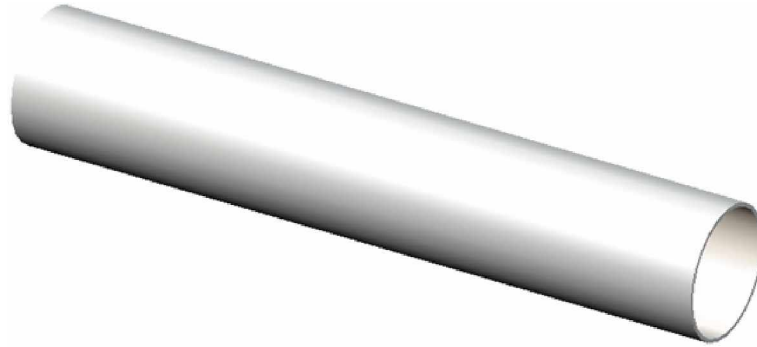


Figura 5.18 – Blank, tubo sem conformação.

No segundo, o avanço dos dois punções de vedação (3) por meio dos cilindros hidráulicos (11) de forma simultânea, até que os mesmos parem de se movimentar, formando uma aba no tubo, conforme Figura 5.19.

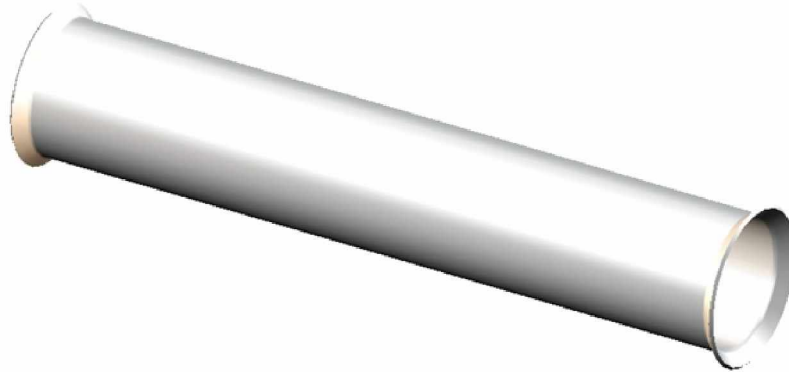


Figura 5.19 – Tubo conformado pelos punções de vedação.

No terceiro, mantendo as pressões de fechamento das matrizes e dos punções de vedação, injeta-se o fluido hidráulico, conforme setas da Figura 5.20, por meio de uma bomba de baixa pressão e alta vazão fazendo o enchimento da parte interna do tubo e observando que, na extremidade oposta à entrada do fluido, deverá ser feita a sangria do ar existente dentro do tubo.

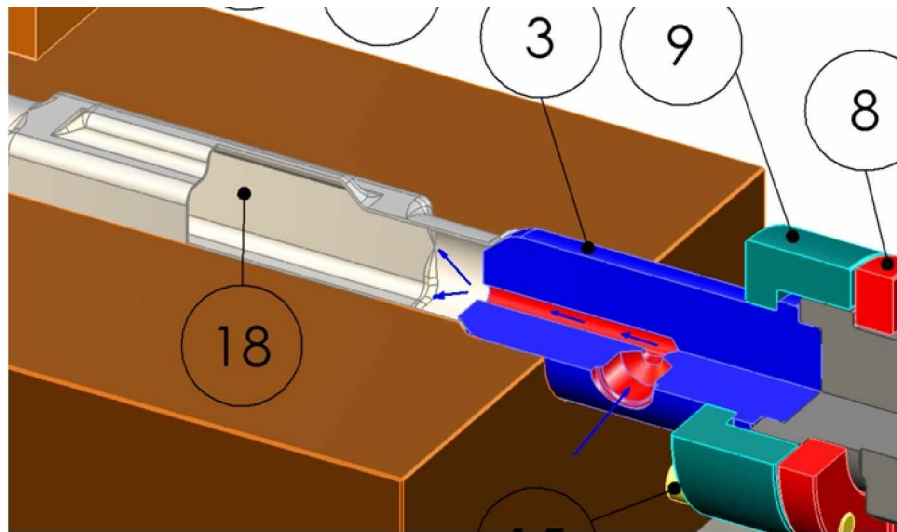


Figura 5.20 – Fluxo de entrada do fluido para dentro da peça.

O quarto passo, ocorre com o aumento da pressão interna de enchimento que faz entrar em ação a bomba de alta pressão, aumentando a pressão do fluido e fazendo com que a força resultante deforme plasticamente o tubo até atingir as paredes das cavidades, formando a peça da Figura 5.21.



Figura 5.21 – Tubo hidroconformado do SISTEMA DE PRODUÇÃO.

5.7 – Análise estrutural em Cosmos Works de peças da ferramenta

Nesta etapa do projeto, apresentam-se algumas análises estruturais realizadas com o auxílio do software COSMOS Works rodando dentro do software CAD SolidWorks. Na Figura 5.22 está a visualização da peça Suporte Cilindro engastada na extremidade inferior e apoiada na outra extremidade, na região central, quatro furos sendo solicitados com uma força axial ao seu diâmetro, simulando a força de reação do cilindro de fechamento.

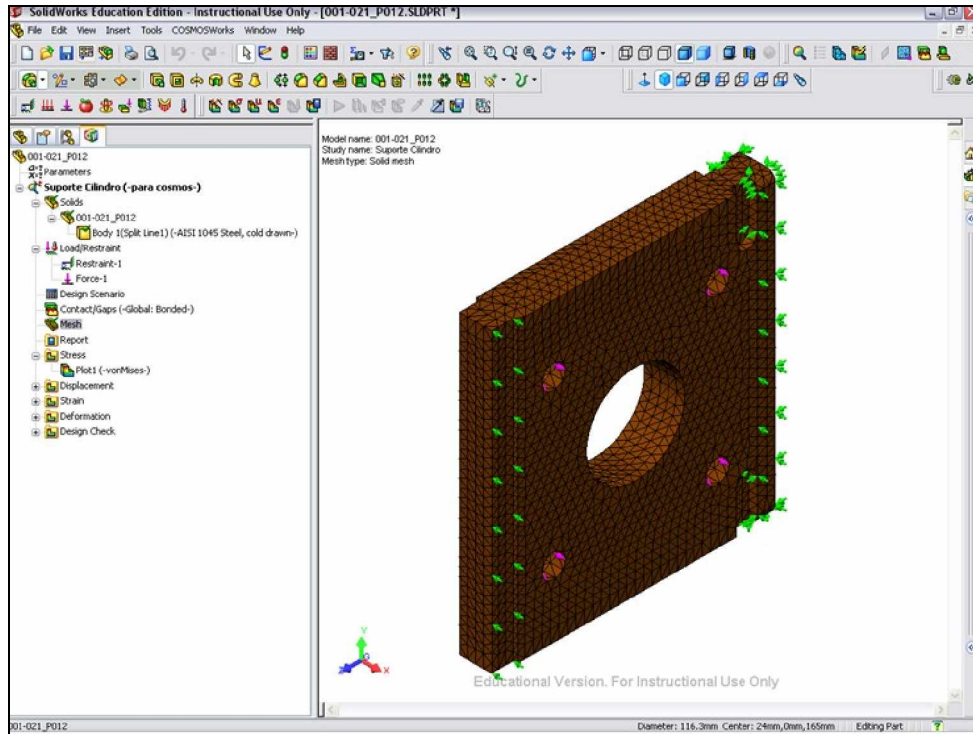


Figura 5.22 – Suporte cilindro preparado para a análise em COSMOS Works.

Nas Figuras 5.23 e 5.24 tem-se a distribuição das tensões (Von Mises) e deformação provocados pela aplicação da carga de 60T que o cilindro hidráulico poderá fornecer no caso de se usar uma pressão de 200 bar.

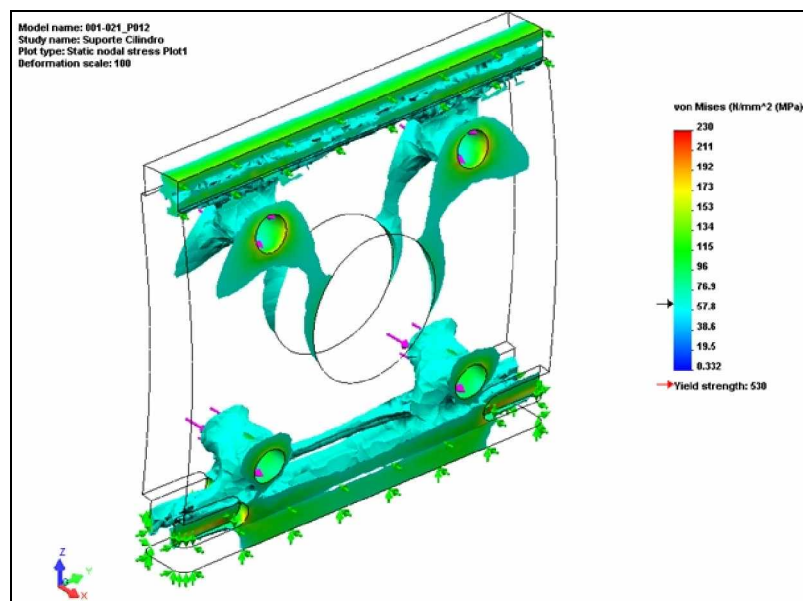


Figura 5.23 – Distribuição de tensões superiores a 60 MPa no SUPORTE DO CILINDRO.

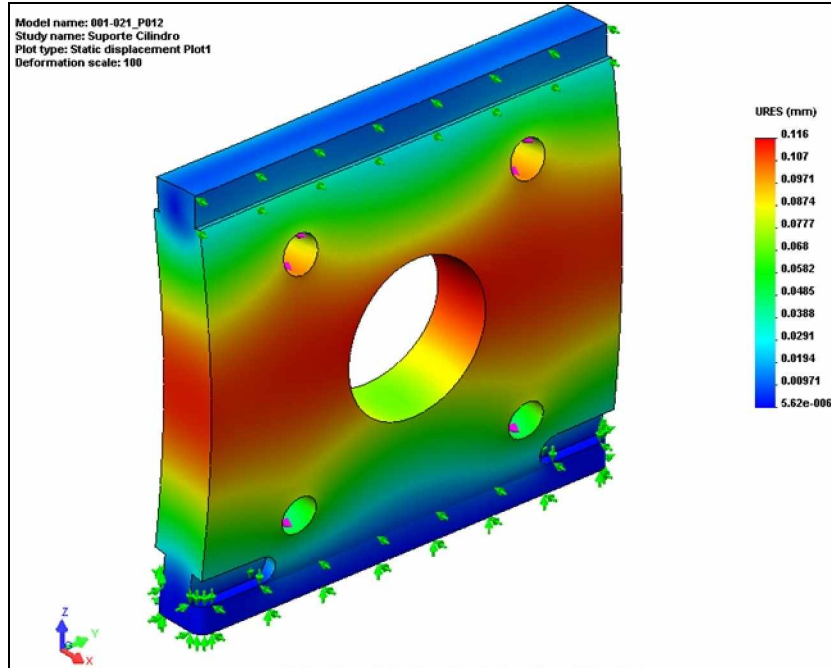


Figura 5.24 – Deformações no SUPORTE DO CILINDRO.

Nas Figuras 5.25 e 5.26 está representada a distribuição das tensões (Von Mises) e deformação provocados pela aplicação da carga de 30T do suporte do cilindro hidráulico fornecido na face externa do rebaixo onde fica alojado, e da força de fechamento 265T aplicada na parte central.

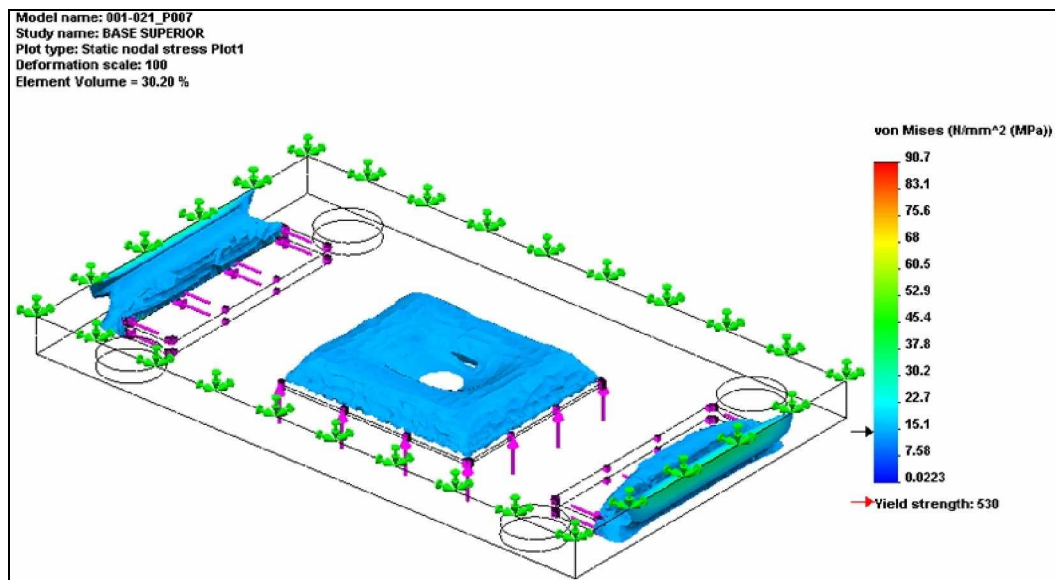


Figura 5.25 – Distribuição de tensões superiores a 15MPa na BASE SUPERIOR.

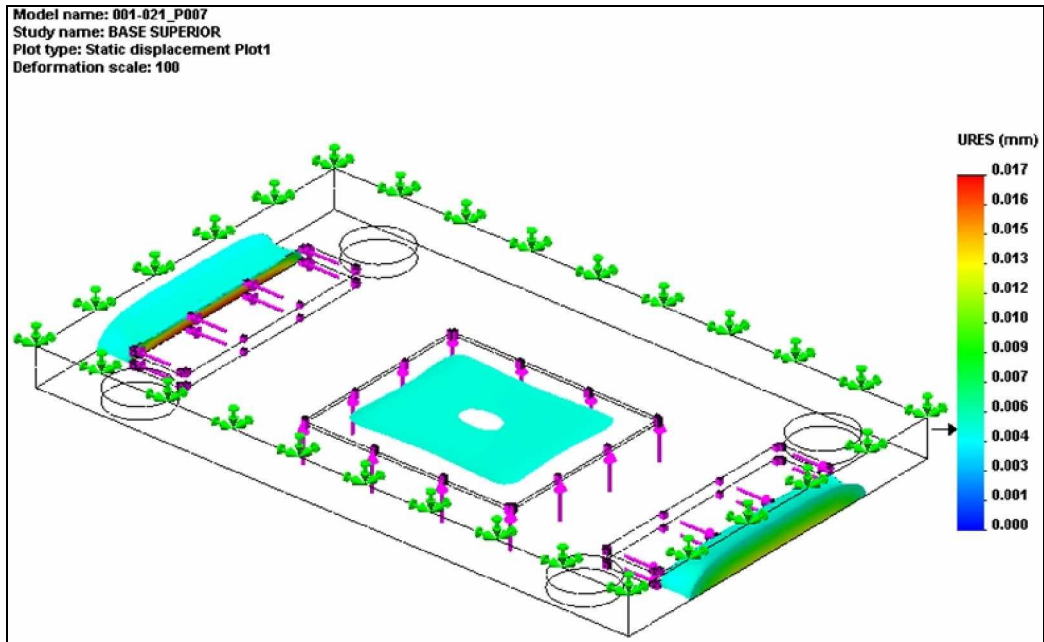


Figura 5.26 – Deformações acima de 0,005mm na BASE SUPERIOR.

As Figuras 5.27 e 5.28 apresentam a distribuição das tensões (Von Mises) provocadas pela aplicação da pressão uniforme de 2.000 bar do tubo contra as paredes internas da cavidade. Nelas estão destacadas as tensões superiores a 100 MPa (Figura 5.27) e superiores a 30 MPa (Figura 5.28). Considerando que esta peça será temperada, tem-se a possibilidade de chegar a uma tensão de escoamento de 1.500 MPa, bem superior aos 650 MPa necessários na região de maior concentração.

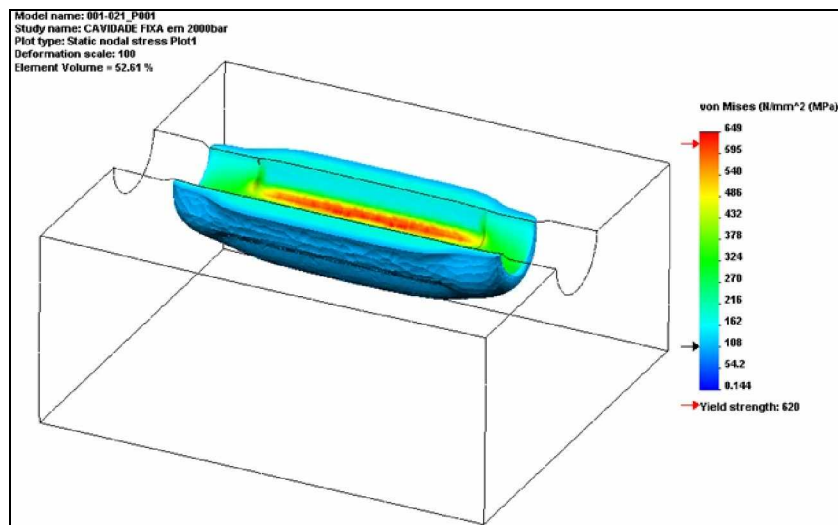


Figura 5.27 – Distribuição de tensões superiores a 100 MPa na CAVIDADE FIXA.

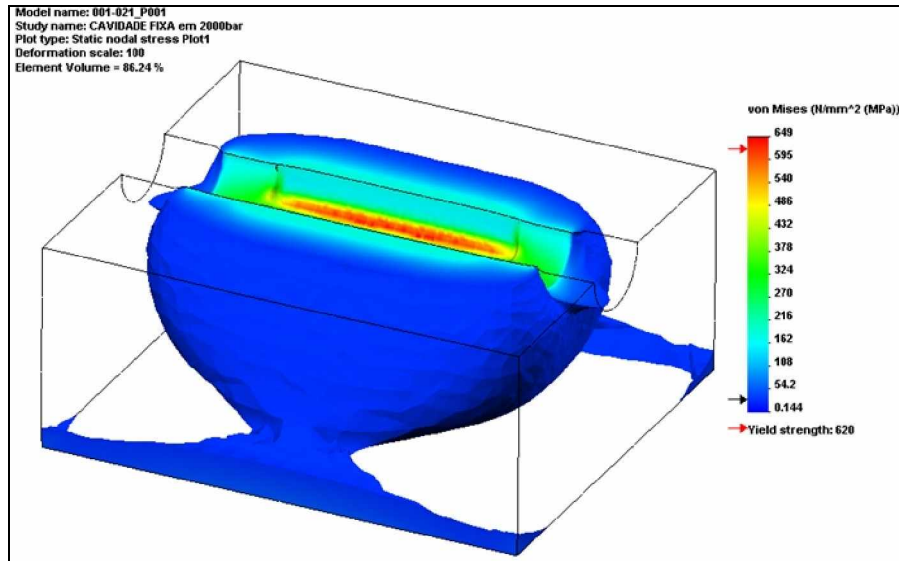


Figura 5.28 – Distribuição de tensões superiores a 30 MPa na CAVIDADE FIXA.

Ainda, na Figura 5.29, tem-se a deformação causada pela aplicação da pressão uniforme de 2.000 bar do tubo contra as paredes internas da cavidade.

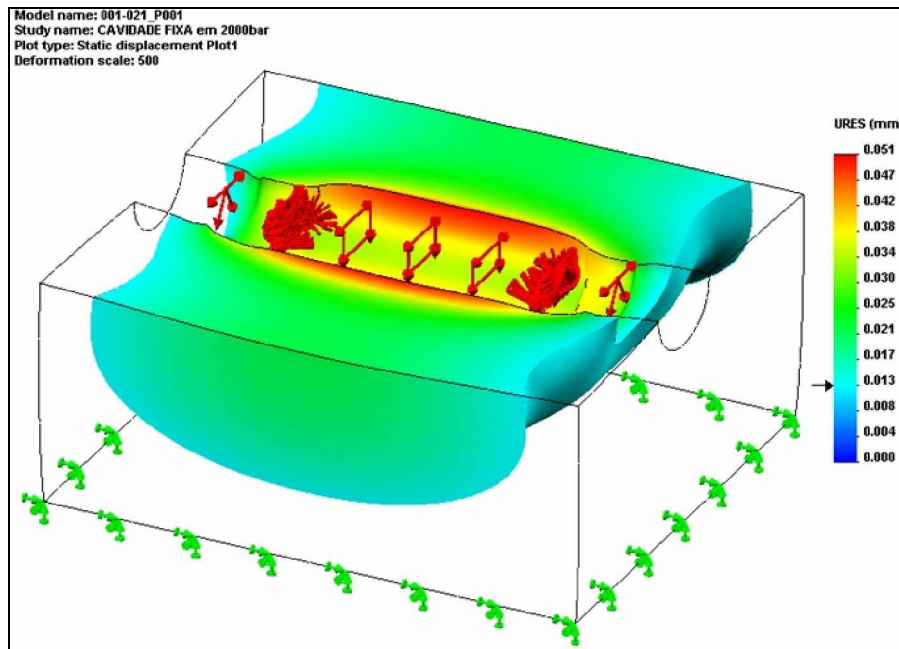


Figura 5.29 – Deformações acima de 0,01mm na CAVIDADE FIXA.

No caso da CAVIDADE SUPERIOR houve a necessidade de se fazer uma análise de montagem, conforme Figura 5.30. Onde o postigo aparece posicionado dentro do bloco

principal e atribuíram-se características de contato, para os elementos de cálculo das superfícies que se relacionam entre os dois componentes.

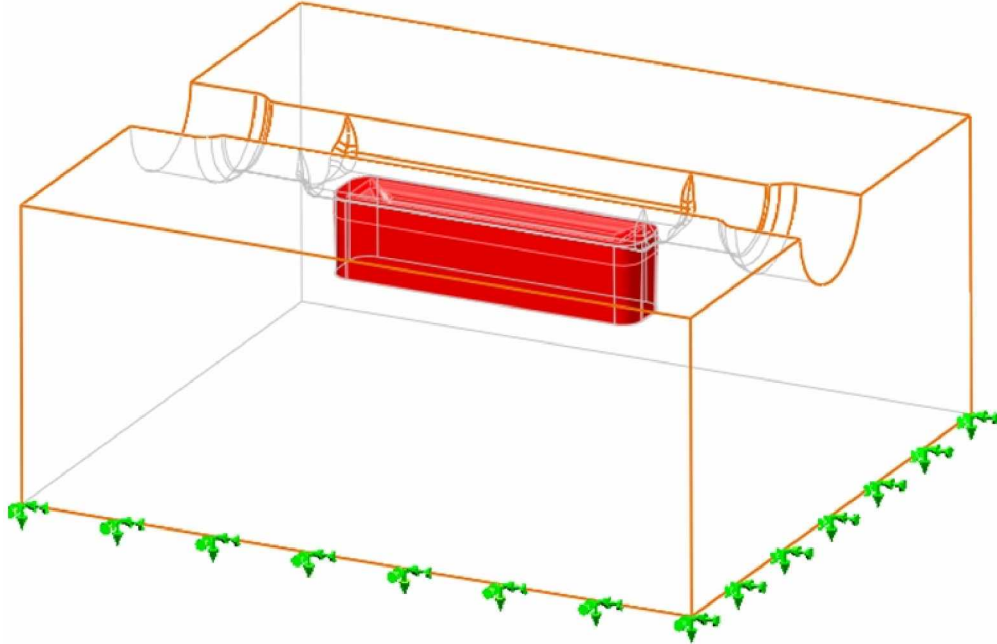


Figura 5.30 – Montagem da CAVIDADE SUPERIOR.

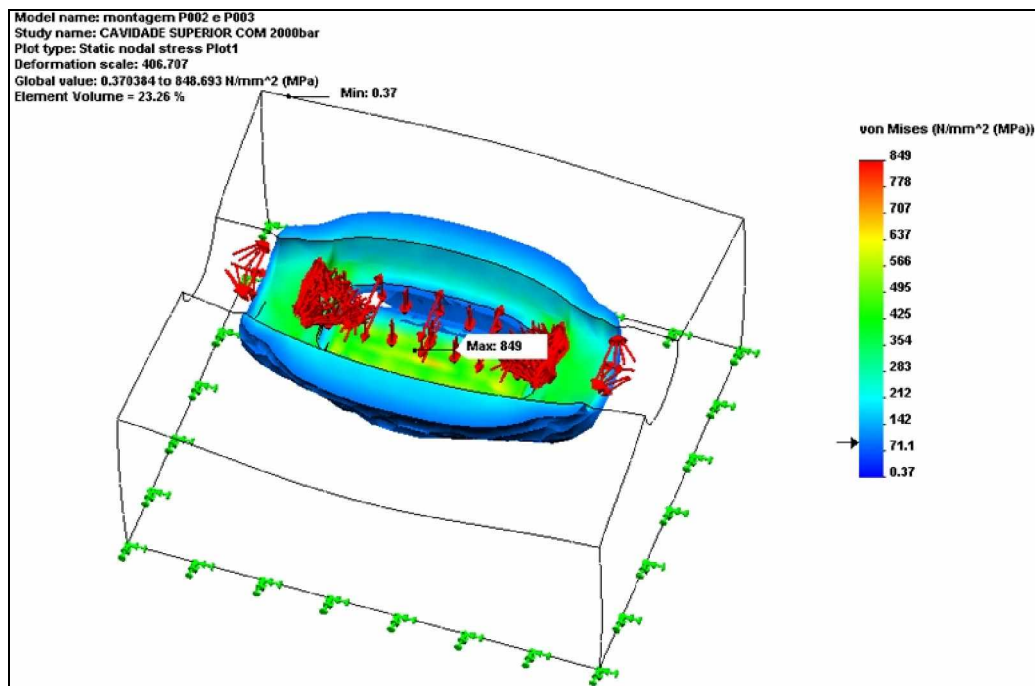


Figura 5.31 – Distribuição de tensões superiores a 100 MPa na CAVIDADE SUPERIOR.

As Figuras 5.31 e 5.32 apresentam a distribuição das tensões (Von Mises) e deformações provocadas pela aplicação da pressão uniforme de 2.000 bar do tubo contra as paredes internas da cavidade. Na Figura 5.31 estão destacadas as tensões superiores a 100 MPa e, considerando que esta peça será temperada, tem-se a possibilidade de chegar a uma tensão de escoamento de 1.500 MPa, ainda superior aos 850 necessários na região de maior concentração.

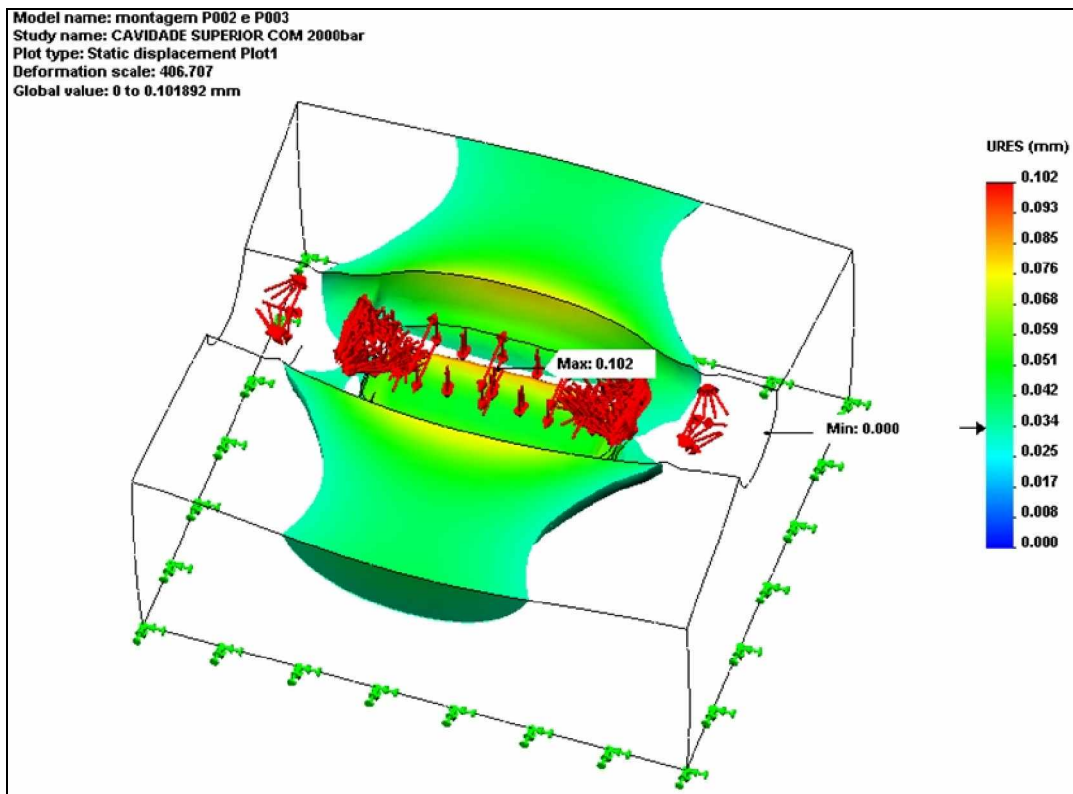


Figura 5.32 – Deformações acima de 0,03mm na CAVIDADE SUPERIOR.

5.8 – Detalhamento e especificações da prensa de fechamento da Tromink

Como a empresa Tromink Industrial Ltda é uma das parceiras do projeto de desenvolvimento do sistema de hidroconformação em tubos, e tem-se a necessidade de uma força de fechamento de 265T conforme item 5.2, poderá ser utilizada a prensa especificada na Figura 5.33. Ela tem 500T de força de fechamento com curso de abertura e de trabalho suficientes para realizar a operação, devendo apenas ser regulada para manter a pressão de fechamento.

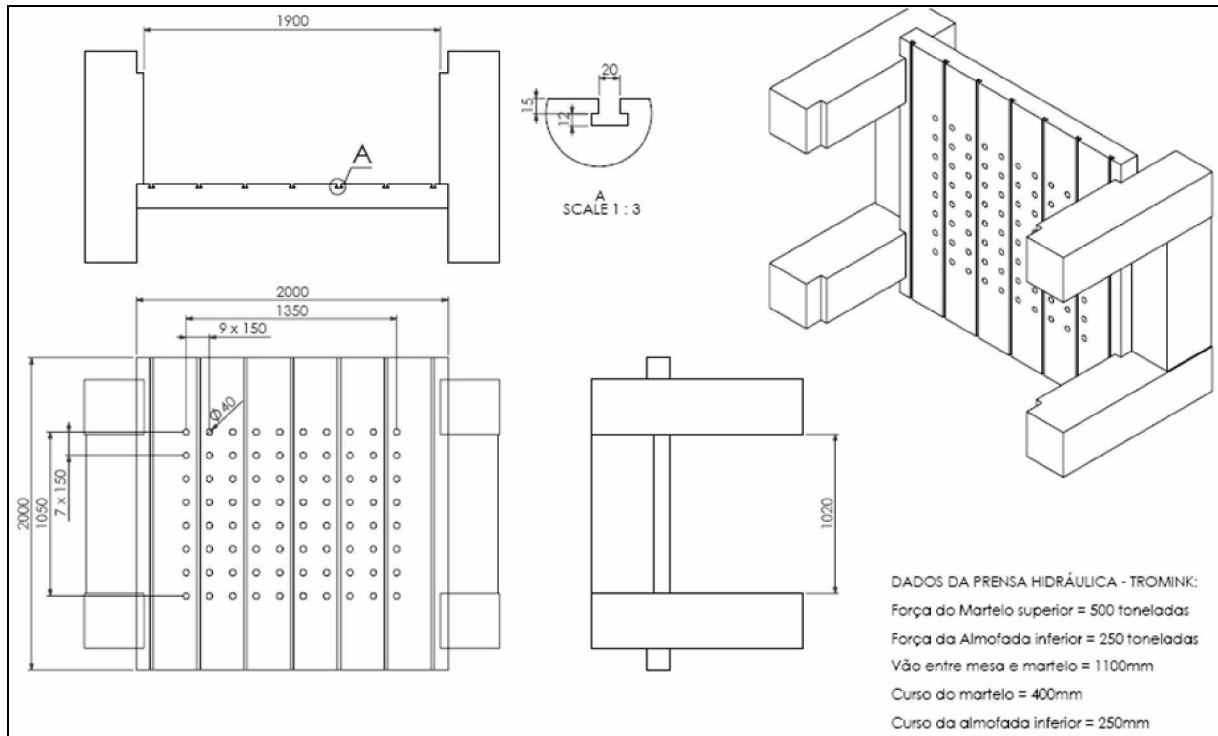


Figura 5.33 – Detalhamento da mesa da prensa 500T - TROMINK.

5.9 – Custos para fabricação do sistema de hidroconformação para produção

5.9.1 – Dos materiais comprados

AÇOS E PARAFUSOS:

Dos materiais a comprar, tem-se na tabela 5.1 uma lista prévia com posição, código, descrição, quantidade, tipo de material, dimensões, e custo já multiplicado pela quantidade das peças. O custo estimado é considerando para aço SAE 1045, R\$ 5,00/kg e para o aço ferramenta, que sofrerão tratamento térmico R\$ 25,00/kg.

Tabela 5.1 – Lista de material da ferramenta para produção.

| Pos | Código | Descrição | Quant. | Material | Dimensões | Custo |
|--------------|--------------|-------------------------|--------|--------------|--------------|------------------|
| 1 | 001-021_P006 | base fixa | 2 | aço SAE 1045 | 62x600x1000 | 3.197,91 |
| 2 | 001-021_P001 | cavidades | 2 | aço D2 | 150x300x350 | 6.587,18 |
| 3 | 001-021_P004 | fechamento do tubo | 2 | aço VC 131 | Ø75x161 | 300,34 |
| 4 | 001-021_P012 | suporte cili fechamento | 2 | aço SAE 1045 | 48x330x350 | 474,25 |
| 5 | 001-021_P013 | base da coluna | 8 | aço SAE 1045 | Ø100x164 | 432,55 |
| 6 | 001-021_P015 | anel de base coluna | 8 | aço SAE 1045 | Ø150x20 | 143,12 |
| 7 | 001-021_P016 | coluna guia | 4 | aço VC 131 | Ø50x120 | 198,78 |
| 8 | 001-021_P017 | braçadeira de ligação | 4 | aço SAE 1045 | Ø125x18 | 24,85 |
| 9 | 001-021_P005 | anel prendedor punção | 2 | aço SAE 1045 | Ø125x50 | 54,67 |
| 10 | 001-021_P010 | lingueta suporte cilind | 4 | aço VC 131 | 10x24x350 | 106,18 |
| 12 | 001-021_P018 | granpo matrizes | 8 | aço SAE 1045 | 33x35x45 | 23,24 |
| 13 | 001-021_P019 | granpo cilindro | 8 | aço SAE 1045 | 25x40x65 | 29,67 |
| 14 | PACC-M12x35 | Parafuso Allen | 16 | ----- | M12x35 | 80,00 |
| 15 | PACC-M12x70 | Parafuso Allen | 8 | ----- | M12x70 | 48,00 |
| 16 | PACC-M12x40 | Parafuso Allen | 8 | ----- | M12x40 | 40,00 |
| 17 | PACC-M12x50 | Parafuso Allen | 8 | ----- | M12x50 | 40,00 |
| 18 | 001-021_P01 | parafuso tipo fenda | 28 | aço | M6x20 | 42,00 |
| 21 | 001-021_P003 | postigo ressalto | 1 | aço D2 | 34x40x160,14 | 58,64 |
| 24 | 001-021_P011 | lingueta suporte base | 4 | aço VC 131 | 20x25x350 | 209,01 |
| 25 | 001-021_P021 | bucha guia | 4 | bronze | Ø62xØ50x60 | 96,91 |
| 26 | PACC-M10x35 | Parafuso Allen | 18 | ----- | M10x35 | 54,00 |
| 27 | PACC-M6x30 | Parafuso Allen | 28 | ----- | M6x30 | 56,00 |
| TOTAL | | | | | | 12.297,28 |

DO SISTEMA HIDRÁULICO:

02 – Cilindros hidráulicos de Ø 8” (203,2mm) x 50mm de curso. Fornecidos pela empresa NEWMAQ. Especificados conforme Figura 5.6 acima, custam em torno de R\$ 3.300,00 x 2 = **R\$ 6.600,00**.

01 – Unidade hidráulica de porte médio. Com bomba, reservatório, válvulas direcionais, válvula de alívio de pressão e manômetro de pressão; com capacidade de pressão de até 200bar. Em torno de **R\$ 3.500,00**.

DO SISTEMA AMPLIFICADOR:

01 – Equipamento portátil montado com uma bomba hidropneumática marca Haskel modelo DSHF-302. Pressão de saída regulável até 30.000 psi (2.000bar). Especificações conforme Figura 5.13 da empresa FLUTROL, custa **R\$23.895,00**.

DA MANGUEIRA DE ALTA PRESSÃO:

01 – Mangueiras marca Spir Star, modelo 5/6, montada com terminais em aço inox tipo M9 com porca giratória. Máxima pressão de trabalho 2.620 bar e diâmetro interno de 5 mm. Lance de 3 metros. Especificações conforme Figura 5.13 da empresa FLUTROL, custam **R\$ 1.593,60**.

SOMANDO UM SUBTOTAL INICIAL DE CUSTOS EM MATERIAIS DE:

R\$ 47.888,88 ~ **R\$ 48.000,00**

5.9.2 – Em processo de manufatura dos materiais

Usinagem em fresadora, custo estimado em R\$ 7.500,00.

Usinagem em torno, custo estimado em R\$ 2.500,00.

Tratamento térmico, considerando em 300 kg * R\$ 7 /kg = R\$ 2.100,00.

Ajustagem e montagem estimados em R\$ 4.000,00.

SOMANDO UM SUBTOTAL (ESTIMADO) EM MANUFATURA DE: R\$ 16.100,00

TOTAL GERAL (ESTIMADO) ~ R\$ 64.100,00

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O assunto do desenvolvimento do sistema de hidroconformação em tubos de aço é de larga abrangência. Muitos fatores como características do material, da geometria da peça, dos parâmetros adotados para o processo, entre outros, são responsáveis pelas limitações e falhas que podem ocorrer durante a conformação do produto podendo levar as peças a defeitos como: estrições, enrugamentos, ruptura, etc.

Na abordagem teórica analítica do processo de expansão do tubo a relação de proximidade dos valores das pressões calculadas pela solução de Lamé e na expansão livre, é muito importante. E possibilita ainda, na expansão livre, para o caso de tubos com formato redondo, a aproximação dos limites dos valores de expansão e da pressão necessária internamente ao tubo para sua conformação.

A construção do *sistema para teste* possibilitou observar aspectos como velocidade de funcionamento do processo, necessidade da etapa de conformação da ponteira de vedação no tubo (que não é possível ser realizada pelos parafusos) e, principalmente, o trabalho da câmara de amplificação de pressão. Essa última, demonstrou bom funcionamento na tarefa de vedar e aumentar a pressão interna no tubo para realizar a conformação.

Os testes de hidroconformação dos tubos de aço provam a necessidade de usar, principalmente, materiais (tubos) com melhores propriedades de conformabilidade e que possibilitam deformações plásticas maiores antes de romper.

As recomendações para o “*sistema para teste*” são:

- Criar uma prensa hidráulica com menor relação entre áreas do cilindro hidráulico e o pino, possibilitando uma regulação mais adequada da pressão;

- Uso de válvula proporcional de vazão para controlar o avanço do cilindro hidráulico, minimizando os efeitos de variação da velocidade de avanço do cilindro quando da redução da pressão interna no tubo.

No “*sistema para produção*”, recomenda-se sua implantação para possibilitar o ganho da experiência necessária sobre o processo prático da hidroconformação em tubos de aço, dando condições para aplicação da tecnologia em peças reais na linha de produção das empresas.

Este trabalho representou apenas o início sobre o estudo do assunto “*processo de hidroconformação em tubos*”. Há a necessidade de prosseguir estudos teóricos acompanhados de aplicações práticas sobre o processo de conformação em tubos por meio de fluido hidráulico injetado na parte interna do produto. Com isso pode-se chegar a um maior conhecimento sobre as melhores relações entre os parâmetros do processo. Por outro lado, o uso de softwares de simulação específicos é indispensável para obter-se bons produtos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]–**CERVEIRA**, Renato Luiz Portela. DESENVOLVIMENTO DE ESTUDOS DE CONFORMAÇÃO HIDROSTÁTICA. Bolsa Fapesp, Processo 01/10909-9; período de bolsa: 01/2002 a 12/2002. Disponível em:
<www.poli.usp.br/pmr/lefa/download/PMR_FAPESP_Renato2003.pdf> Acesso em: 18 nov. 2006.

[2]–**BEER**, F.P. e JOHNSTON Jr., E.R. - Resistência dos Materiais. São Paulo, 3ª Edição, Editora Mc-Graw Hill do Brasil, 1996.

[3]–**ALUMATTER**. European Aluminium Association e MATTER. Disponível em:
<<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=191&pageid=2144416766>>. Acesso em: 27 nov. 2006.

[4]–**EDOUARD** Hassib Srour Junior, DETERMINAÇÃO DO GRAU DE CONFORMABILIDADE DE CHAPA DE AÇO PARA SUPORTE DE COLUNA DE DIREÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE SIMILAR NACIONAL, Dissertação à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Curitiba Novembro, 2002. Disponível em:
<www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_004.pdf> Acesso em : 5 dez. 2006.

[5]–**SCHAEFFER** Lirio, Conformação de Chapas Metálicas, Editora Imprensa Livre, Porto Alegre, 2004.

[6]–**SCHULER**, AG . International Messepräsenz / Symposien / Workshops. Da Alemanha. Disponível em:

<http://www.schulergroup.com/de/80news/20internationale_messepraesenz/index.html>.

Acesso em: 10 nov. 2006.

[7]–**SIEGERT**, Klaus; **AUST**, Matthias. Presses accessories offer options for hydroformers, October 9, 2003. Disponível em:

<http://www.thefabricator.com/Hydroforming/Hydroforming_Article.cfm?ID=736> Acesso

em : 09 nov. 2006.

[8]–**LANG**E, Kurt. Handbuck für Industrie und Wissenschaft, Band 4: Sonderverfahren, ProzeBsimulation, Werkzeugtechnik, Produktion. Editora: Springer-Verlag. Stuttgart, Deutschland, 1993.

[9]–**AUTOFORM**. Autoform Hydroforming Package. Disponível em:

<http://www.autoform.com/products/product_hydroforming.html> Acesso em : 05 nov. 2006.

[10]–**ESI-GROUP**. The Virtual Try-out Space. Disponível em:

<http://www.esi-group.com/SimulationSoftware/Tube_bending/> Acesso em : 05 nov. 2006.

[11]–**AMERICAN HYDROFORMERS**. Laser Cutting. Disponível em:

<<http://www.americanhydroformers.com/>> Acesso em : 20 nov. 2006.

[12]–**TIMOSHENKO** Goodier, Teoria da Elasticidade (3^a ed.), Editora Guanabara Dois S. A., Rio de Janeiro, 1980.

[13]–**MARCINIAK**, Z. **DUNCAN**, J. L. **HU**, S. J. Mechanics of Sheet Metal Forming, Butterworth-Heinemann, 2002 (ISBN:0 7506 5300 0)

[14]–**TUPER**. Manual de tubos de aço com costura. Disponível em:

<<http://www.tuper.com.br/tubos/catalogos.php>>. Acesso em: 10 out. 2006.

[15]–**ZAMPROGNA**. Catálogo de tubos de aço carbono com costura . Disponível em: <<http://www.zamprogna.com.br/zamprogna/frame13.html>>. Acesso em: 11 out. 2006.

[16]–**NEUMAQ**. Catalogo de cilindros hidráulicos. Disponível em: <<http://www.neumaq.com.br/int/produtos.htm>>. Acesso em: 20 out. 2006.

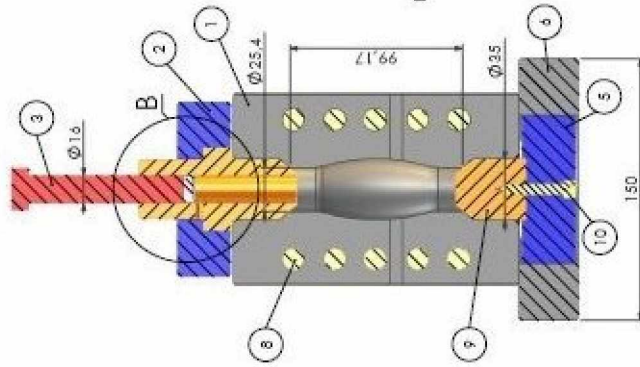
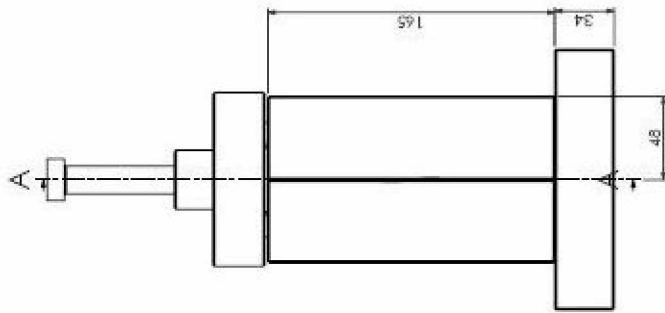
[17]–**HIDRO-PAC**. How high pressure pumps work. Disponível em: <<http://www.hydropac.com/HTML/howpumps.html>>. Acesso em: 15 nov. 2006.

[18]–**EPSI**. Engineered Pressure Systems Inc. Disponível em: <<http://www.epsi-highpressure.com/en/index.html>>. Acesso em: 15 nov. 2006.

[19]–**FLUTROL**. Solução em alta pressão. Disponível em: <<http://www.flutrol.com.br/downloads.htm>>. Acesso em: 15 nov. 2006.

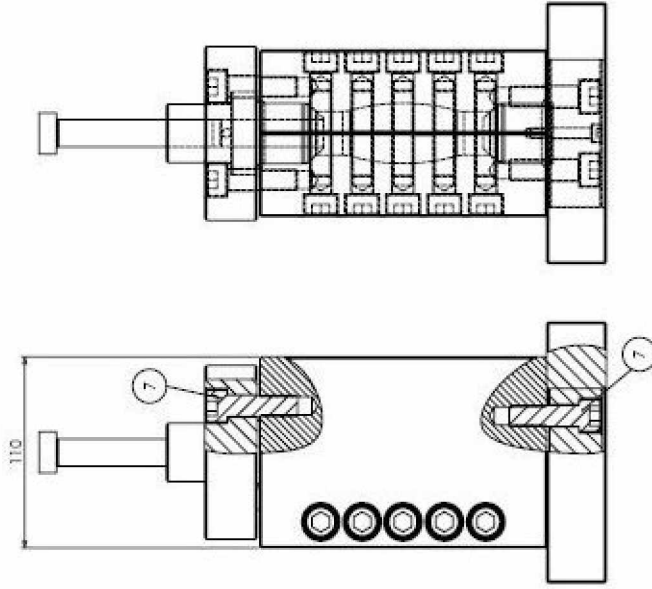
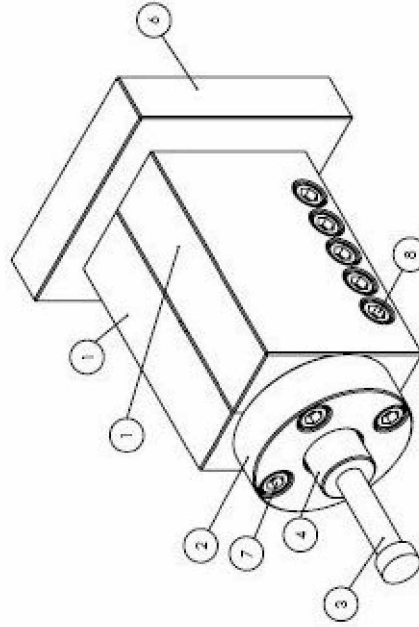
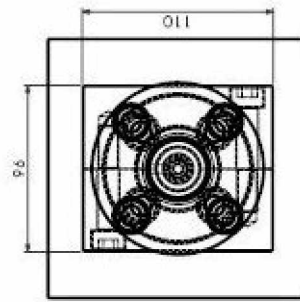
[20]–**HASKEL**. High Pressure. Disponível em: <<http://www.haskel.com/>>. Acesso em: 18 nov. 2006.

APÊNDICE A – DESENHO DETALHADO DO SISTEMA PARA TESTE



Furo de sangria
Câmara de fluido
hidráulico

SCALE 1 : 1



| Pos. | Quantidade | Descrição | Quantidade | Tratamento | Exatidão |
|------|------------|----------------------|------------|------------|------------|
| 1 | 1 | Capa | 1 | Temp 250°C | ±0,10/0,15 |
| 2 | 1 | Tampa de vedação | 1 | Temp 250°C | ±0,10/0,15 |
| 3 | 1 | Eixo - 16x31 | 1 | Temp 250°C | ±0,10/0,15 |
| 4 | 1 | Porca - 16x31 | 1 | Temp 250°C | ±0,10/0,15 |
| 5 | 1 | Anel de vedação | 1 | Temp 250°C | ±0,10/0,15 |
| 6 | 1 | Tampa de vedação | 1 | Temp 250°C | ±0,10/0,15 |
| 7 | 1 | Junta de base | 1 | Temp 250°C | ±0,10/0,15 |
| 8 | 1 | Tampa de base | 1 | Temp 250°C | ±0,10/0,15 |
| 9 | 1 | Tampa Alim. - DN 5/2 | 1 | Temp 250°C | ±0,10/0,15 |
| 10 | 1 | Tampa Alim. - DN 5/2 | 1 | Temp 250°C | ±0,10/0,15 |
| 11 | 1 | Tampa Alim. - DN 5/2 | 1 | Temp 250°C | ±0,10/0,15 |

Laboratório de Projetos

Proj: 7/12/2004
Des: 7/12/2004
Escala: 1:2
Massa: 0,03 g

Proj: 7/12/2004
Des: 7/12/2004
Escala: 1:2
Massa: 0,03 g

Proj: 7/12/2004
Des: 7/12/2004
Escala: 1:2
Massa: 0,03 g

APÊNDICE B – MONTAGEM E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA PARA TESTE

Descrição da montagem e funcionamento do sistema para teste:

Da Figura A. 1 até a Figura A. 3 tem-se o fechamento das cavidades usando o torquímetro para calibrar o torque nos parafusos. Na Figura A. 4 aparece o sistema montado entre as mesas da prensa hidráulica com os punções de vedação em suas posições e sem a colocação dos parafusos nas tampas. Neste momento, é feito o fechamento apertando os punções para dentro das extremidades das placas da cavidade com o movimento da mesa superior da prensa, conformando o tubo até o formato observado na Figura A. 5.

Após, o sistema é retirado da prensa hidráulica e colocado em uma morsa para colocação dos parafusos nas tampas dos punções de vedação, Figura A. 6 e Figura A. 7. Na Figura A. 8 é mostrada a calibragem dos parafusos com auxílio do torquímetro.

Na operação de hidroconformação ainda usou-se uma bacia de aço inox, onde se colocou o conjunto da ferramenta montado dentro, a fim de que o fluido hidráulico excedente, ou de vazamento, pudesse ser recolhido. Na Figura A. 9 é mostrado o enchimento do tubo e da câmara com o fluido hidráulico (água com fluido de refrigeração).

A Figura A. 10 mostra a colocação da vedação de nylon e o pino acionador, onde é colocada uma proteção (fundo de uma garrafa de refrigerante de 2 litros) para evitar que eventual esguicho de fluido hidráulico expire saindo da bacia.

Na Figura A. 11 aparece o sistema para teste montado entre as mesas da prensa hidráulica para realização dos testes de hidroconformação. E na Figura A. 12 o processo concluído.



Figura A. 1 – Fechamento das matrizes por meio de parafusos.

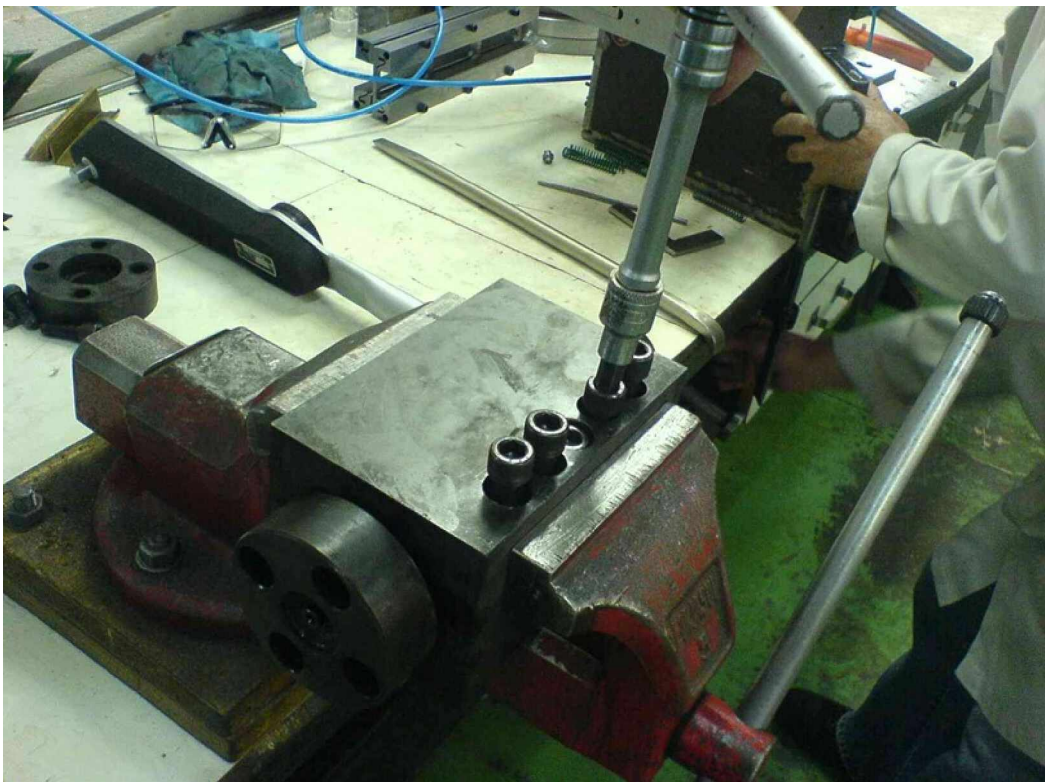


Figura A. 2 – Colocação dos punções de vedação para alinhamento das matrizes.

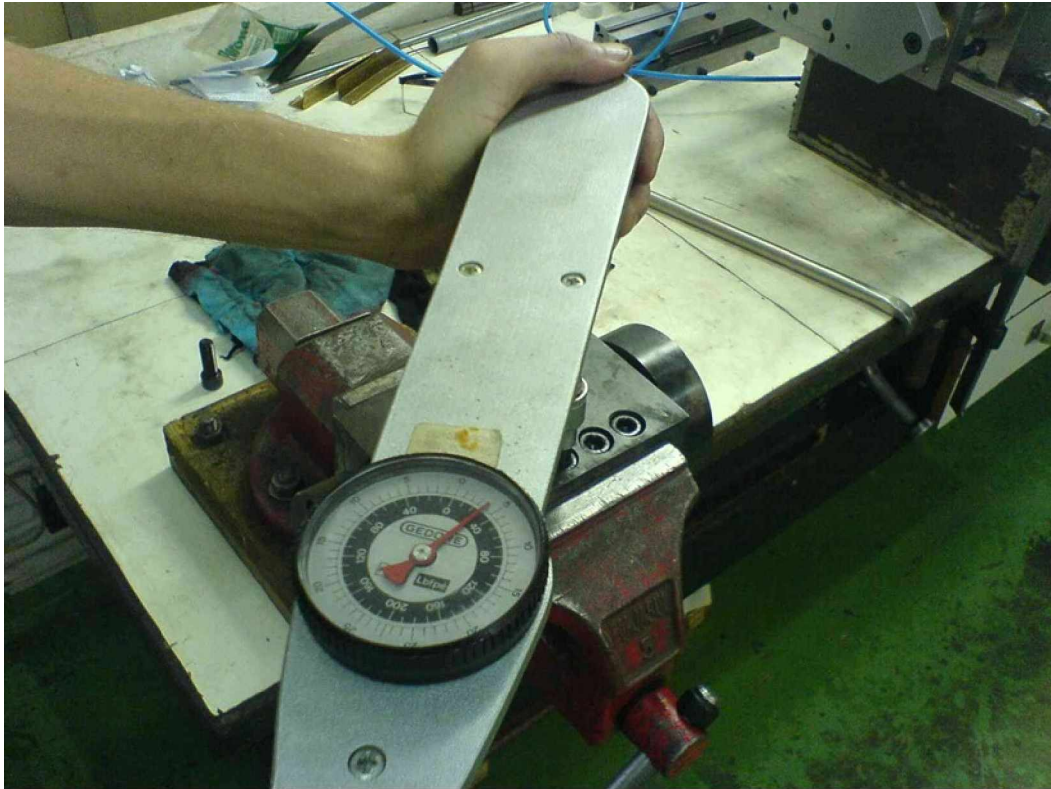


Figura A. 3 – Aperto dos parafusos das matrizes com torquímetro.



Figura A. 4 – Fechamento dos punções de vedação na prensa hidráulica.



Figura A. 5 – Tubo com as ponteiros de vedação conformadas.



Figura A. 6 – Colocação dos parafusos na tampa do punção de vedação inferior.



Figura A. 7 – Colocação dos parafusos na tampa do punção de vedação superior.



Figura A. 8 – Aperto dos parafusos das tampas dos punções de vedação com torquímetro.



Figura A. 9 – Colocação do fluido água com óleo refrigerante.



Figura A. 10 – Colocação da vedação e do pino acionador e proteção.

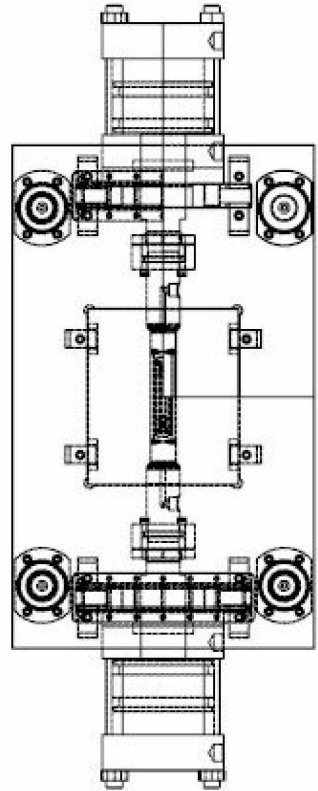
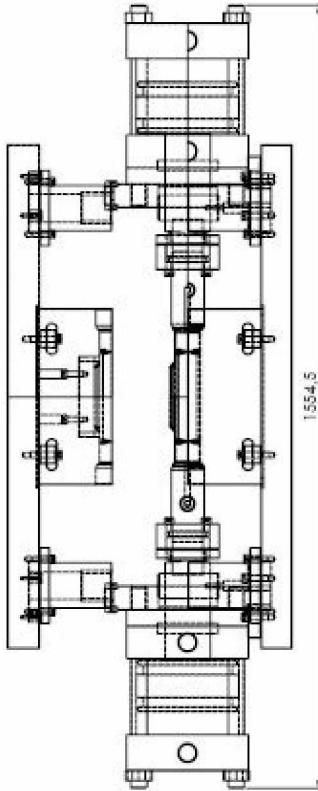
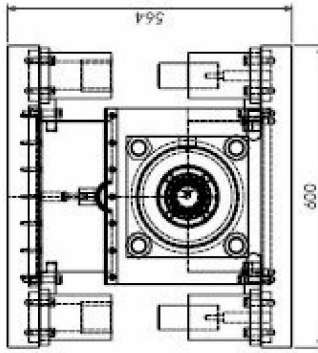
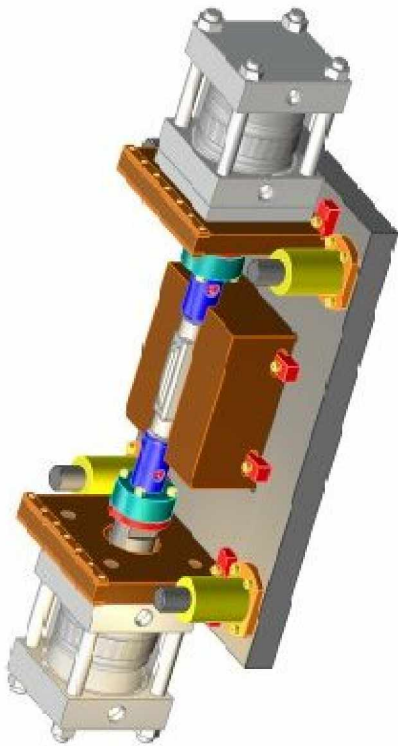
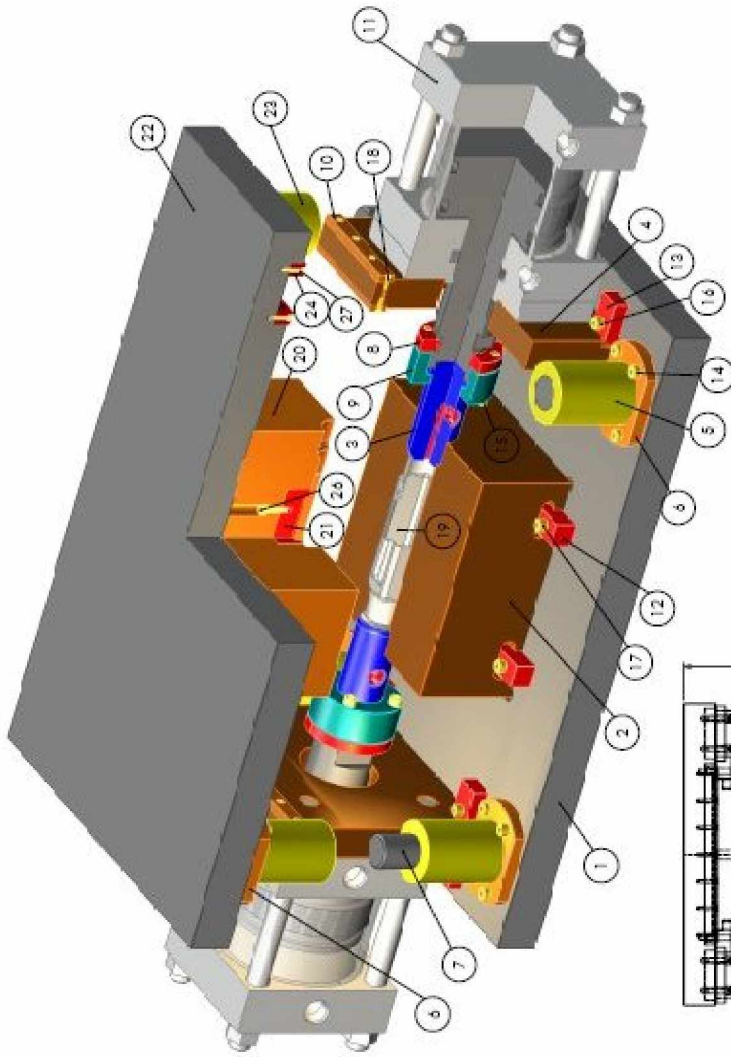


Figura A. 11 – Sistema colocado e preparado para hidroconformação na prensa.



Figura A. 12 – Eu junto à prensa hidráulica após a hidroconformação do tubo.

APÊNDICE C – DESENHO DETALHADO DO SISTEMA PARA PRODUÇÃO



| Pos. | Código | Descrição | Quant. | Material | Tratamento | Dimensões |
|------|-------------------|--------------------------|--------|---------------|------------------|---------------|
| 1 | 001-024-P006 | base fixa | 1 | alço SAE 1045 | --- | 626x30x1000 |
| 2 | 001-024-P001 | carvedado inferior | 1 | alço D2 | temp. 55HRC | 150x30x380 |
| 3 | 001-024-P004 | fechamento do tubo | 2 | alço VC 131 | temp. 56 HRC | Ø77x161 |
| 4 | 001-024-P012 | suporte cil. fechamento | 2 | alço SAE 1045 | --- | 48x30x380 |
| 5 | 001-024-P013 | base da coluna | 4 | alço SAE 1045 | --- | Ø100x154 |
| 6 | 001-024-P015 | anel de base coluna | 8 | alço SAE 1045 | --- | Ø150x20 |
| 7 | 001-024-P016 | coluna guia | 4 | alço VC 131 | temp. 55HRC | Ø65x130 |
| 8 | 001-024-P017 | braseadeira do líquido | 4 | alço SAE 1045 | --- | Ø125x18-1x4x4 |
| 9 | 001-024-P005 | anel protetor parafuso | 2 | alço SAE 1045 | --- | Ø125x50 |
| 10 | 001-024-P010 | ingletado suporte cilind | 4 | alço VC 131 | temp. 55HRC | 100x20x30 |
| 11 | 001-024-C003 | Cilindro de fechamento | 2 | alço | 288° x curso 50x | --- |
| 12 | 001-024-P018 | grupo motor | 8 | alço SAE 1045 | --- | 35x25x45 |
| 13 | 001-024-P019 | grupo cilindro | 8 | alço SAE 1045 | --- | 25x40x65 |
| 14 | PAOC-M12x35 | Parafuso Allen - DN 912 | 16 | --- | --- | M12x35 |
| 15 | PAOC-M12x70 | Parafuso Allen - DN 912 | 8 | --- | --- | M12x70 |
| 16 | PAOC-M12x40 | Parafuso Allen - DN 912 | 8 | --- | --- | M12x40 |
| 17 | PAOC-M12x50 | Parafuso Allen - DN 912 | 8 | --- | --- | M12x50 |
| 18 | 001-021-PFenda-01 | separação tipo fenda | 28 | alço | --- | M8x20 |
| 19 | 001-024-C002-FECA | --- | 1 | --- | --- | --- |
| 20 | 001-024-P002 | carvedado superior | 1 | alço D2 | temp. 55HRC | 150x30x380 |
| 21 | 001-024-P003 | acabado resaca | 1 | alço D2 | temp. 55HRC | 34x40x160-14 |
| 22 | 001-024-P007 | base móvel | 1 | alço SAE 1045 | --- | 62x60x1000 |
| 23 | 001-024-P014 | suporte bucha guia | 4 | alço SAE 1045 | --- | Ø100x154 |
| 24 | 001-024-P011 | ingletado suporte base | 4 | alço VC 131 | temp. 55HRC | 20x20x30 |
| 25 | 001-021-P021 | bucha guia | 4 | bronze | --- | 25x20x50x60 |
| 26 | PAOC-M10x35 | Parafuso Allen - DN 912 | 16 | --- | --- | M10x35 |
| 27 | PAOC-M8x30 | Parafuso Allen - DN 912 | 28 | --- | --- | M8x30 |

COLÉGIO AVANÇADA EM TI
LABORATÓRIO DE PROJETO MECÂNICO
 Centro Tecnológico e de Formação Profissional

Projeto 30/11/2006 **Lubr. / Man.**
Des. 30/11/2006 **Man.**
Escala: 1:7 **Materia:** 1206978.99

Projeto 001-021_C_001

ANEXO A – EXEMPLOS DE FERRAMENTAS E SISTEMAS DE HIDROCONFORMAÇÃO

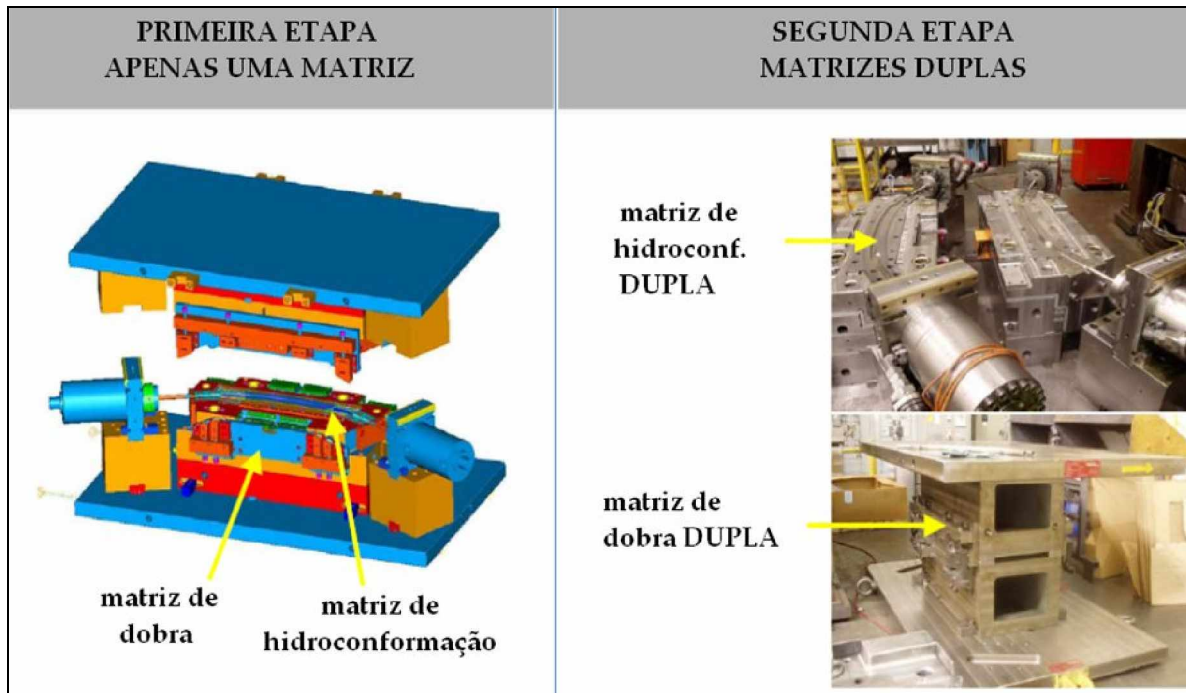


Figura A. 13 – Ferramenta dupla para aumento de produção - SCHULER [6].



Figura A. 14 – Projeto e execução das ligações hidráulicas - SCHULER [6].

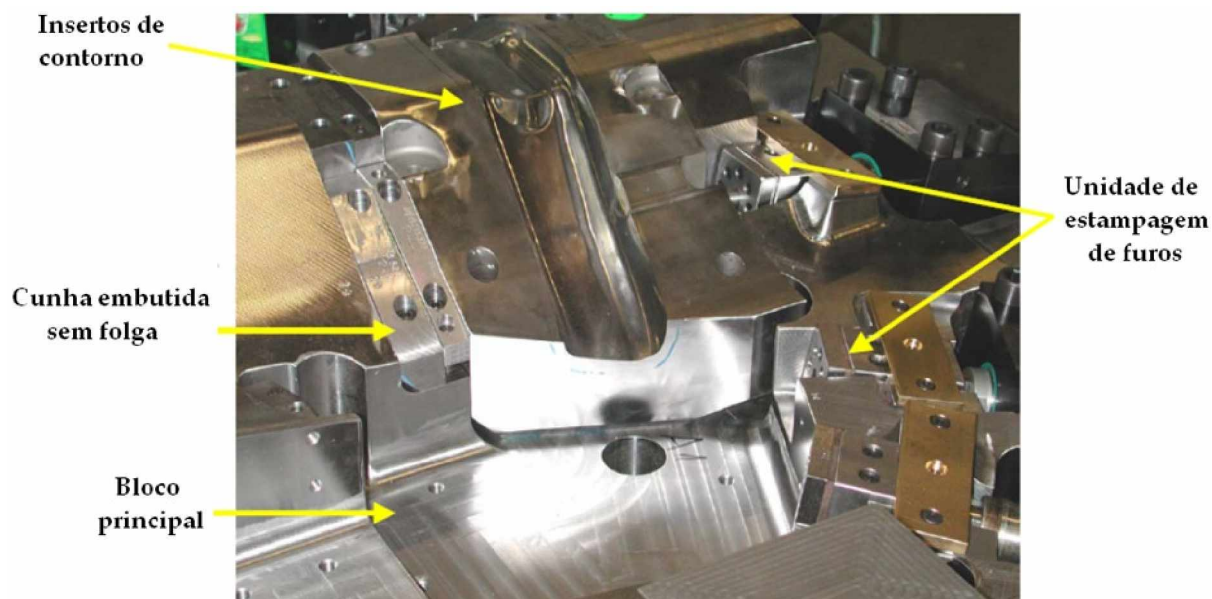


Figura A. 15 – Mais componentes da ferramenta de hidroconformação - SCHULER [6].

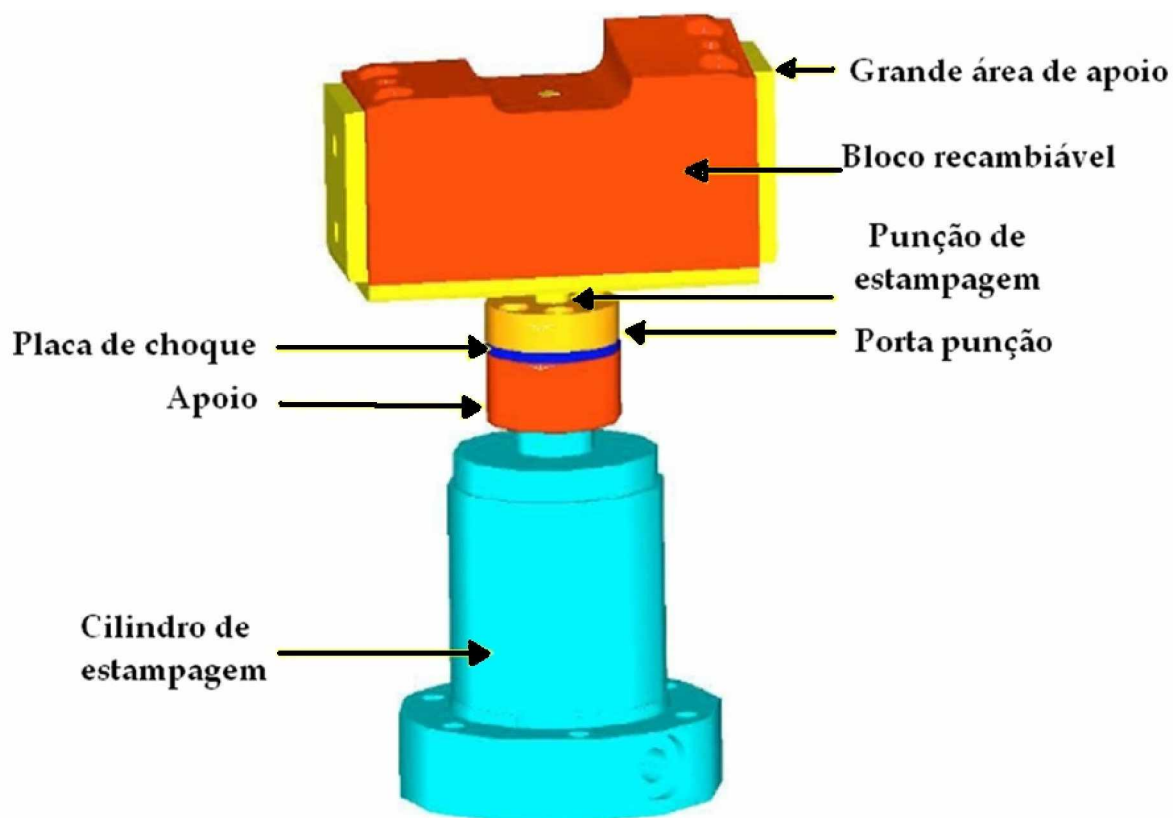


Figura A. 16 – Bloco recambiável com sistema de estampagem - SCHULER [6].



Figura A. 17 – Exemplo de operação do sistema na prensa - SCHULER [6].

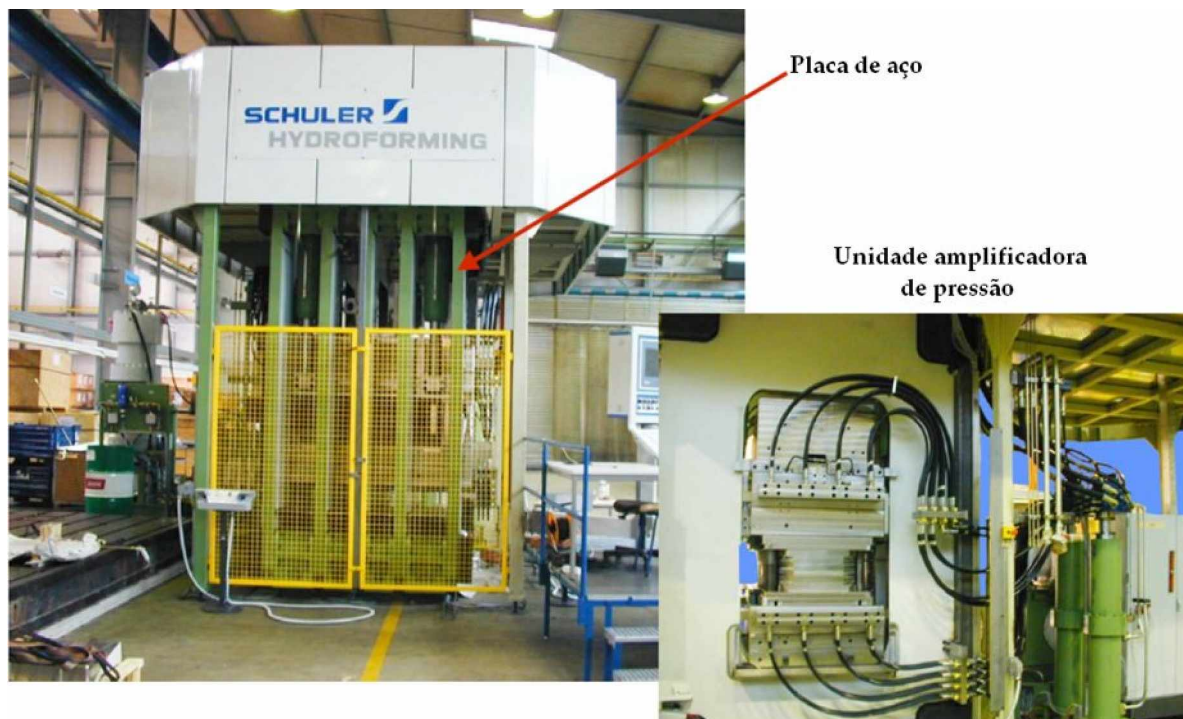


Figura A. 18 – Prensa de Hidroconformação montada por placas de aço - SCHULER [6].

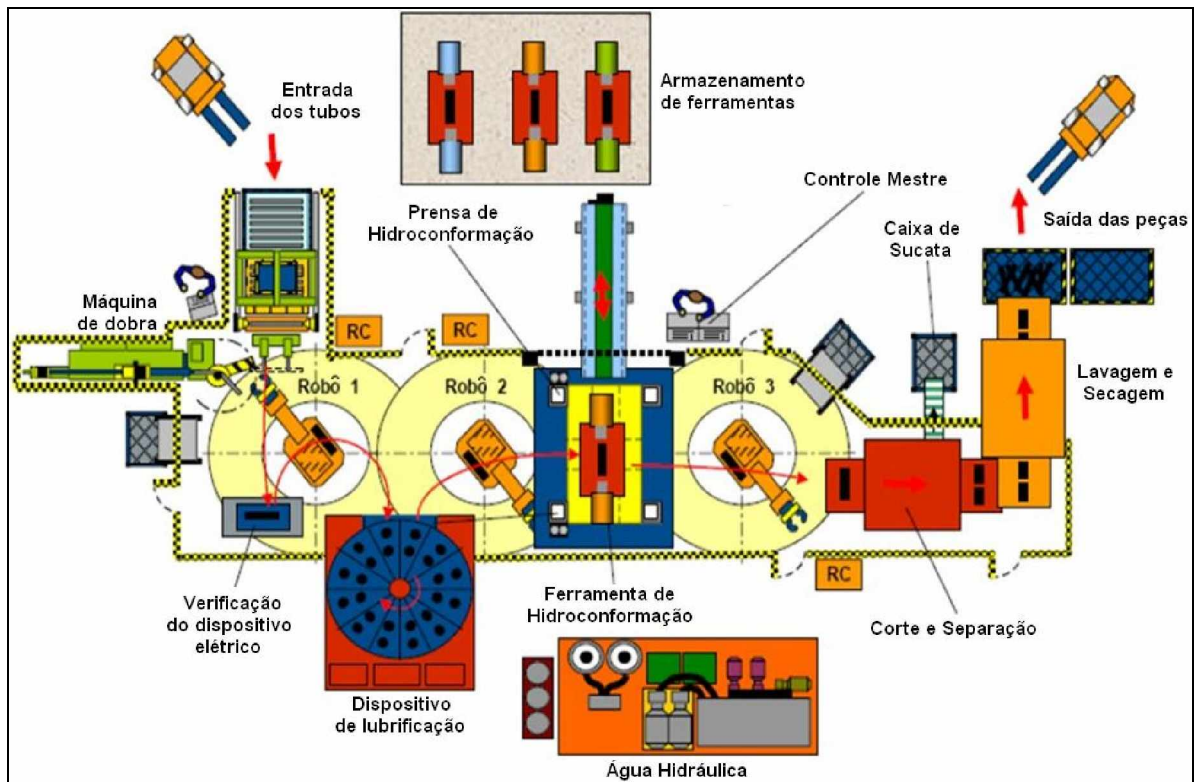


Figura A. 19 – Layout da linha de produção de sistema de Hidroconformação - SCHULER [6].



Figura A. 20 – Linha de produção da BMW AG, Alemanha - SCHULER [6].