Victor Prado

DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO EM CAD PARA AUXILIAR O PROCESSO DE FABRICAÇÃO EM PRODUTOS DE CALDEIRARIA PARA HIDRELÉTRICAS

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço 01/02/05

Ass.:

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador : Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho

EESC-USP Biblioteca CAMPUS DE S. CARLOS

DEDALUS - Acervo - EESC 31100050123

São Carlos

2004

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **VICTOR PRADO**

Tese defendida e julgada em 14-12-2004 perante a Comissão Julgadora:

APROVADO

Prof. Associado **REGINALDO TEIXEIRA COELHO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Assoc. **JAIME GILBERTO DUDUCH**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **RENATO GOULART JASINEVICIUS**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **SILVIO ROBERTO IGNÁCIO PIRES**
(Universidade Metodista de Piracicaba/UNIMEP)

APROVADO

Prof. Dr. **LUIZ CARLOS DI SERIO**
(Fundação Getulio Vargas/FGV)

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

À minha esposa Ana Mara, que sempre me apoiou e acreditou em meus trabalhos. À minha filha Carolina, com sua alegria e energia contagiante, minha fonte de inspiração. Com muito amor e carinho, minha eterna gratidão a esta família maravilhosa.

AGRADECIMENTOS

À memória dos avós Antônio, Maria Natalina e Antonia, tios Walbert e Wanilda, por ensinar e transmitir a alegria da vida nos momentos difíceis.

Aos meus pais, Wanildo e Lourdes, que com seus princípios de vida, ensinaram me a vive-la com dignidade.

Ao amigo Edson Ebisui, pelo apoio e colaboração.

Ao meu orientador, Prof. Reginaldo Teixeira, pela dedicação na orientação do desenvolvimento desta tese.

Aos colegas de trabalho da IESA, pelo apoio, incentivo e sugestões, o meu profundo agradecimento.

Aos amigos "Liquida", Antonio Batista, Barone e Sérgio, por acreditar e aprimorar o trabalho.

Ao amigo João Leal, pela colaboração e sugestões no desenvolvimento da tese.

Ao amigo Marco Milliotti por incentivar e permitir o tempo necessário para dedicação ao trabalho.

À direção da IESA, pela confiança, incentivo e oportunidade de desenvolver este trabalho.

RESUMO

PRADO, V. (2004). Desenvolvimento de um aplicativo em CAD para auxiliar o processo de fabricação em produtos de caldeiraria para hidrelétricas. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

O planejamento da fabricação de peças de caldeiraria para hidrelétricas tais como caixa espiral, tubo de sucção e conduto forçado, necessita de bons conhecimentos em caldeiraria e muita experiência na área devido à complexidade dos cálculos, tornando-se uma tarefa trabalhosa e com muitas possibilidades de erros. A seqüência de operações, no entanto, é altamente repetitiva facilitando o desenvolvimento de um sistema computacional de apoio. O trabalho proposto a seguir tem como objetivo apresentar um sistema desenvolvido como um aplicativo em software CAD para auxiliar as tarefas de projetar e fabricar caixa espiral, tubo de sucção e conduto forçado. O sistema colocou o conhecimento técnico da engenharia industrial de hidrogeradores de uma empresa de bens de capital ao alcance de projetistas desta área, de forma a aumentar a produtividade nestas, e em outras atividades similares, minimizando as possibilidades de erro e padronizando os procedimentos de cálculos. Os resultados foram, entre outros, diminuição do tempo de geração das informações para o processo de fabricação, tais como croquis de delineamento e desenhos de montagem, acima de 90% e perda zero de peças na fabricação.

Palavras-chave : Fabricação caixa espiral, fabricação tubo de sucção, fabricação conduto forçado, CAD/CAM, Controle Numérico, caldeiraria.

ABSTRACT

PRADO, V. (2004). Development of a CAD application to improve the manufacturing process of hydroelectric weld parts. Ph.D. Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

The manufacturing process of hydroelectric weld parts, such as spiral cases, draft tubes and penstocks, demands good knowledge and experience in the area due to the calculations needed, revealing to be a difficult work with a high risk of errors. However, the operation sequence is highly repetitive which enables the development of a computational support system. This thesis has the purpose to present a system developed as an application in CAD software to aid the projecting and manufacturing activities of the spiral boxes, draft tubes and penstocks. Such system was disposed to the technical body of an industrial engineering department maintained by a heavy equipment company which manufactures hydro generators, so professionals were able to increase their productivity, being the system also used in similar areas, minimizing possibilities of mistakes and standardizing calculations procedures. Results were, among others, decrease of time needed to develop process information,such as sketch outlines and assembly drawings, above 90% and zero losses on parts production.

Keywords: Production spiral case, production draft tube, production penstock, CAD/CAM, Numeric control programming, weld parts.

LISTA DE SIGLAS E TERMOS

2D – vista em duas dimensões.

3D - Vista em três dimensões.

CAD – Projeto assistido por computador (Computer Aided Design).

CAE – Engenharia assistida por computador (Computer Aided Engineering)

CAPP – Planejamento de processo assistido por computador (Computer Aided Process Planning).

CAM – Fabricação assistida por computador (Computer Aided Manufacturing).

CHAPELONA - São equipamentos para auxiliar o corte térmico onde o desenho é feito em papel especial, guiado por uma luz para percorrer o traçado do desenho.

CN – Controle numérico ou comando numérico.

CNC – Comando numérico computadorizado.

LAYER – Recurso existente nos sistemas CAD para agrupar entidades.

MACRO – Rotina utilizadas em softwares comerciais para automatização de procedimentos semelhantes.

POLYLINE – recurso existente nos sistemas CAD que juntam as entidades (arcos e linhas) em um único elemento.

VIROLA – Componente de uma seção de caixa espiral, tubo de sucção ou conduto forçado. Pode ser um único elemento ou parte de uma seção no caso de haver divisão.

LASER – Amplificação da luz estimulada pela emissão de radiação (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

SUMÁRIO

RESUMO iv

ABSTRACT v

1 – INTRODUÇÃO 1

1.1 – Definição do problema 2

1.2 – Objetivo do trabalho 2

1.3 – Conteúdo da dissertação 4

2 – REVISÃO DA LITERATURA 5

2.1 – Sistemas CAD/CAM 5

2.1.1 – Evolução de sistemas CAD/CAM 6

2.1.2 – Programação nos sistemas CAD 7

2.1.3 – Sistemas CAD existente no mercado 7

2.1.3.1 – Sistemas de pequeno porte 8

2.1.3.2 – Sistemas de médio porte 8

2.1.3.3 – Sistemas de grande porte 9

2.1.4 – Benefícios da implantação de sistemas CAD 9

2.2- Desenvolvimento de chapas 10

2.2.1 – Processos de corte para chapas 13

2.2.1.1 – Processo de corte – oxicorte 13

2.2.1.2 – Processo de corte – plasma 14

2.2.1.3 – Processo de corte – laser 15

2.2.1.4 – Processo de corte – jato de água 16

2.3 – Máquinas de corte 17

2.3.1 – Máquina de corte pantográfica 17

2.3.2 – Máquina de corte CNC 17

2.4 – Conformação de chapas 19

2.4.1 – Processo de calandragem 19

2.4.2 – Processo de dobramento 21

3 – REALIDADE TECNOLÓGICA ANTERIOR 23

4 – METODOLOGIA EMPREGADA NO SISTEMA DESENVOLVIDO 26

4.1– Tipos de produtos onde o sistema computacional se aplica 26

4.1.1 – Caixa espiral 26

4.1.2 – Tubo de sucção 27

4.1.3 – Conduto forçado 28

4.2 – Modelamento do aplicativo 29

4.2.1 – Sistema CAD de apoio proposto 30

4.2.2 – Método de programação proposto 31

4.2.2.1 – Seção 31

4.2.2.2 – Chanfros de solda 35

4.2.2.3 – Planificação 36

4.2.2.4 – Compensação do perfil planificado 38

4.2.2.5 – Inversão do chanfro de solda 40

4.2.2.6 –Tipos de sobremetal permitido 40

4.2.2.7 – Tipos de junção 41

4.2.2.8 – Marcas e referência para programação CN 42

4.2.2.9 – Rampa de transição entre junção de emenda 43

4.2.3 – Geração de desenhos 44

4.2.3.1 – Desenhos *3D* 44

4.2.3.2 - Croquis de delineamento 45

4.3 – Requisitos de *software* e *hardware* 46

4.4 – Recurso humano necessário 46

5 – APLICAÇÕES DO SISTEMA DESENVOLVIDO 47

5.1 – Aplicação em "caixa espiral" 47

5.1.1 – Entrada de dados 47

5.1.2 – Desenho *wireframe* 3D 49

5.1.3 – Planificação da seção 50

5.1.4 – Referência de marcas para dobra 51

5.1.5 – Croqui de delineamento 2D 51

5.1.6 – Croqui de montagem 3D 53

5.1.7 – Geração de desenhos em 3D 53

5.2– Aplicação em "tubo de sucção" 54

5.2.1 – Entrada de dados 55

5.2.2 – Desenho *wireframe* 3D 56

5.2.3 – Planificação da seção 56

5.2.4 – Referência de marcas para dobra 57

5.2.5 – Croqui de delineamento 2D 58

5.2.6 – Geração de desenho 3D 59

5.3 – Aplicação em "conduto forçado" 60

5.3.1 – Entrada de dados para linhas 1 e 2 60

5.3.2 – Desenho *wireframe* 3D 62

5.3.3 – Planificação de uma seção 63

5.3.4 – Referência de marcas para dobra 63

5.3.5 – Croqui de delineamento 2D 64

5.3.6 – Montagem da linha "1" e "2" do conduto 64

5.3.7 – Bifurcação 65

5.3.7.1 – Entrada de dados 66

5.3.7.2 – Desenho *wireframe* 3D 66

5.3.7.3 – Planificação 67

5.3.7.4 – Marcas de referência e croqui de delineamento 2D 67

5.3.7.5 – Desenho 3D da bifurcação 68

5.3.7.6 – Desenho 3D da bifurcação com a linha 1 e 2 69

6 – DISCUSSÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO 70

6.1– Avaliação do sistema 71

6.2– Limitações do sistema 71

6.3– Resultados apresentados 72

6.3.1 – Caixa espiral 72

6.3.2 – Tubo de sucção 74

6.3.3 – Conduto forçado 75

6.4 – Comentários gerais 75

7 – CONCLUSÃO 78

8 – PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS 80

8.1– Implementação do memorial de cálculo da engenharia do produto 80

8.2 – Gerenciamento dos croquis de fabricação 81

8.3 – Geração de modelo com tipo "sólido 82

8.4 – Melhoria no croqui de delineamento utilizado em bifurcação 82

8.5 – Realização de orçamento de fabricação 84

8.6 – Seção elíptica para caixa espiral 84

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 85

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA 90

APÊNDICE

Apêndice A - Metodologia *Fishbone* para declaração do problema 92

Apêndice B - Mapa do processo antes do sistema desenvolvido 93

Apêndice C - Mapa do processo depois do sistema desenvolvido 94

Apêndice D - Exemplo de planificação de uma seção da caixa espiral 95

Apêndice E - Exemplo de visualização 3D - caixa espiral 99

Apêndice F - Exemplo de planificação de uma seção do tubo de sucção 100

1- INTRODUÇÃO

O surgimento de diversas inovações na área de computação, particularmente ligadas à parte gráfica tem capacitado a humanidade a um processo de evolução muito rápida nas últimas décadas. Estações gráficas de alto poder de processamento têm oferecido recursos extremamente poderosos para cálculos matemáticos, geração de desenhos, diversos tipos de controle, etc, e estando sempre voltado para alguma automação de tarefas.

A evolução para esta tecnologia baseia-se em *hardware* e *software*. Ao nível de *hardware*, este vem evoluindo rapidamente de maneira que os próprios computadores pessoais podem ser considerados exemplares de estação gráfica. Com a diminuição do custo, permitiu-se a sua disseminação para a grande maioria das empresas, de pequeno a grande porte.

O *software* também evoluiu muito, porém para a área gráfica, só foi possível a sua evolução devido ao acompanhamento de processamento do *hardware*. O *software* teve tamanha evolução, que permitiu a geração praticamente instantânea em diversas situações de desenho, como por exemplo, geração de desenhos em 3D, rotação e translação instantânea de peças, cálculos estruturais, etc. O que para o usuário parece transparente, demanda a existência de uma enorme quantidade de novas tecnologias utilizadas pelo *software*.

No setor metal mecânico essa evolução tem sido utilizada principalmente para o dimensionamento e detalhamento de projetos, assim como a sua manufatura originando diversos focos assistidos por computador, tais como a elaboração de desenho de peças (CAD), a manufatura do produto (CAM), o seu dimensionamento (CAE), entre outras siglas normalmente acompanhadas com auxílio do computador.

A manufatura assistida por computador (CAM) trouxe grandes benefícios para o desenho e geração de programas para máquinas com controles numéricos, onde atualmente, com a modernização das industrias, as máquinas-ferramentas, comandadas numericamente tornaram-se ferramentas essenciais para a garantia da produtividade da empresa. Paralelamente o CAM evoluiu de maneira que a geração de programas CN tornase uma tarefa onde o usuário não necessitaria possuir um conhecimento especial para utilizá-lo,

apenas conhecer o processo de fabricação. O próprio conhecimento tecnológico está presente em sistemas CAM, como por exemplo, as estratégias de usinagem (tipo hasters, pocket, etc), parâmetros de corte do ferramental, entre outras.

Para a área de caldeiraria, ainda existem lacunas que precisam ser preenchidas para facilitar o usuário na confecção de peças.

1.1– Definição do problema

A fabricação de peças voltada para a caldeiraria exige bom conhecimento técnico para definição do processo de delineamento das peças, pois envolve necessidade de planificação, definição de sobremetal para contração de solda, chanfros adequados para junção de emendas, planejar facilidade de solda para os operadores, etc. Boa parte consegue-se resolver através de formulação técnica, porém para alguns quesitos, a experiência fabril torna-se necessária para o saneamento de problemas.

A deficiência constatada no processo de delineamento de peças utilizando chapas metálicas como matéria-prima, originou um trabalho de avaliação das necessidades de melhoria, e como atuar para eliminar as deficiências e os problemas freqüentemente encontrados, os quais necessitavam ser corrigidos. Sendo assim, surgiu a necessidade de se desenvolver uma metodologia que abordasse a resolução dos problemas enfrentados para automatizar as tarefas do processo de delineamento das peças. Esses problemas são discutidos detalhadamente no capítulo 4.

1.2- Objetivo do trabalho

Os objetivos do presente trabalho de pesquisa são:

- Propor um software para automatizar as tarefas de delineamento do projeto e fabricação de caixas espiral, tubo de sucção e conduto forçado para tomada de água em turbinas de geração de energia hidrelétrica. A figura 1.1 mostra o fluxograma do programa.
- Desenvolver o software, segundo a proposta, de forma que seja integrado e permita a geração de desenhos de todo o processo de delineamento,

englobando os croquis de fabricação, planificação e checagem para visualização tridimensional. Através do *software* deve-se também gerar os desenhos tridimensionais para visualização do projeto, desenhos de croquis de fabricação bi-dimensional e tri-dimensional, mapa de acompanhamento de fabricação, e a planificação de formas geométricas simples e complexas.

- Testar a generalidade do software, aplicando-o a outros produtos semelhantes.

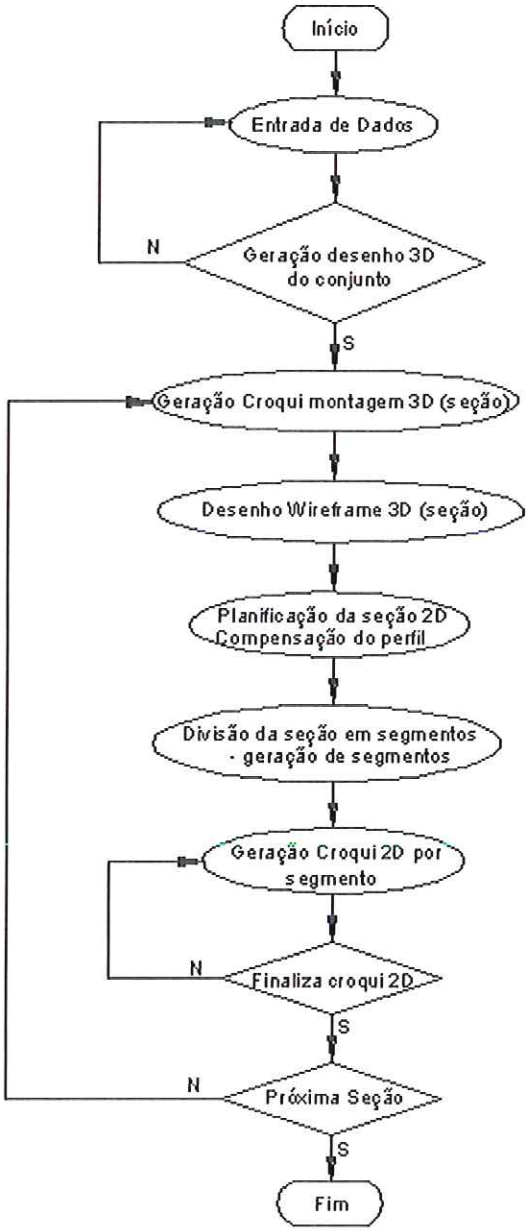


Figura 1.1 – Fluxograma do software proposto.

Com o sistema espera-se :

- aumento significativo de produtividade na geração de desenhos ;
- criar flexibilidade e facilidade para que usuários, não necessariamente da área de caldeiraria, possam operar o sistema ;
- diminuição e a eliminação de erros na geração da planificação das peças ;
- automação na geração de chanfros de solda ;
- flexibilidade para interação no processo da geração dos chanfros de solda .

1.3- Conteúdo da tese

A tese foi estruturada conforme os capítulos descritos a seguir.

No capítulo 2, "Revisão da literatura", trata de um estudo bibliográfico dos processos produtivos envolvidos no sistema. Relata a utilização de sistemas CAD, processos de planificação, corte térmico, solda e calandragem.

No capítulo 3, "Realidade tecnológica atual", mostra o estado atual da necessidade do desenvolvimento do sistema.

No capítulo 4, "Metodologia empregada no sistema desenvolvido", é apresentado o sistema assistido por computador integrando todos os processos envolvidos no delineamento das peças.

No capítulo 5, "Aplicações do sistema proposto", são mostrados os produtos que o sistema contempla e respectivos testes.

No capítulo 6, "Discussão do sistema desenvolvido", avalia o sistema desenvolvido assim como suas limitações. Apresenta os resultados obtidos utilizando uma empresa do setor de bens de capital como laboratório.

Por fim, nos capítulos 7 e 8, são apresentadas as conclusões do trabalho e propostas para desenvolvimentos futuros.

2 - REVISÃO DA LITERATURA

Como o sistema foi desenvolvido num ambiente CAD, o capítulo inicia descrevendo os diversos tipos de sistemas CAD existentes no mercado, focando a sua evolução, benefícios, bem como os métodos de programação em conjunto com o ambiente gráfico.

São relatadas algumas soluções computacionais para geração de desenho no formato CAD existentes de mercado.

Por fim, é feita uma breve revisão nos processos de fabricação onde o sistema proposto atua com maior enfoque, que são os processos de delineamento, corte térmico e conformação a frio.

2.1– Sistemas CAD/CAM

Sistemas CAD (Computer Aided Design / Projeto assistido por computador) são sistemas capazes de gerar qualquer tipo de desenho, seja ele voltado para as diversas áreas de ciências, como engenharia, arquitetura, agronomia, etc, que necessita relatar conhecimento técnico na forma gráfica (WANG,2002 ; BUXEY, 1992).

O CAD trabalha com diversas entidades gráficas tais como ponto, linhas,elipses ou perfil através de splines. São entidades já amplamente conhecidas como entidades básicas dos sistemas CAD, sendo que para as últimas gerações de sistemas CAD, vem-se aperfeiçoando de novas entidades como superfícies ou de modelamento sólido (AUTODESK, 2003).

Como exemplo, na área de engenharia civil e arquitetura os sistemas CAD trabalham com modelos de superfície devido à alta complexidade das geometrias exigidas, tal como modelamento de esculturas, catedrais e estádios (BENNET,2000 ; BURRY,2002).

CAM (Computer Aided Design / Fabricação assistida por Computador) são sistemas específicos para geração de programas CN (controle numérico) a partir da existência de um desenho feito em CAD. A integração entre CAD e CAM é alta devido ao aproveitamento das entidades de desenhos, e pode ser realizada em diversas maneiras. A técnica atual mais utilizada é através de *features*, descrito a seguir.

2.1.1 – Evolução de sistemas CAD/CAM

O avanço na tecnologia de CAD na área da engenharia mecânica vem-se baseando se na modelação sólida devido ao grande volume de informações necessárias para armazenamento. São geradas através do conceito de *features*.

O conceito de *features* vem ocorrendo nos últimos anos com o avanço da técnica de modelamento. Segundo WANG e MIAO (2002),*feature* é um conjunto de informações da geometria de entidades ou informações que possuem propriedades, que são relacionadas durante a fase do projeto. Estas informações podem incluir dados de geometria, topologia, mas também informações não geométricas como por exemplo propriedades do material, como por exemplo, aspereza, propriedades mecânicas, tolerância dimensional, etc. Inclui também informações para funções do tipo de aplicação, comportamento do material e fabricação. Para GYLDENFELDT e STROH (2004), as *features* estão sempre se renovando, pois a integração de informações entre sistemas CAD e CAM para projetos e processos de fabricação possuem alto potencial de evolução.

Assim como no CAD, as *features* desenvolvidas para o sistema CAM estão mais completas, detectando qualquer elemento originário do CAD para automaticamente seguir procedimentos de geração do programa controle numérico conforme processo de fabricação exigido (CAD/CAM Controls, 2002).

A meta ideal é que exista uma total intercambialidade entre dados de projeto, processos e programas CN, de modo que os sistemas CAD/CAM possuam qualquer tipo de solução desde o projeto até às máquinas ferramentas (Decoding the future, 2001). Para isto, já existem programas comerciais envolvendo a integração entre CAD, CAPP, e CAM. O CAPP gera parâmetros requeridos pelo CAM para gerar o código CN (RANGEL, 2002).

A utilização do CAD para projeto de um produto baseiase na geração de desenhos dos componentes em 3D. Todo o ambiente de desenvolvimento baseia-se em ferramentas para geração do componente em modelos sólidos. Para isto, os ambientes são independentes para a geração do modelo em 3D, a montagem em 3D dos componentes projetados, e o próprio

desenho utilizado para fabricação em 2D. Através do modelo sólido consegue se gerar qualquer tipo de corte ou vista da peça automaticamente.

O ambiente de montagem permite uma interação muito grande entre os componentes participantes, podendo prever simulações de interferência e movimentos cinemáticos. Qualquer alteração em peça individual pertencente a uma montagem é automaticamente corrigida neste ambiente.

2.1.2 – Programação nos sistemas CAD

Os sistemas CAD possuem uma estrutura de armazenamento de dados complexas e de alta condensação de informação. Para extrair essas informações, na grande maioria dos sistemas CAD de mercado existe linguagens para desenvolvimento específico de trabalho integrada com bibliotecas gráficas. Essas linguagens possuem os recursos normais de programação com sua estrutura morfológica e aproveita as rotinas de CAD que podem ser associadas e incluídas na programação.

Assim, num ambiente CAD é possível realizar tarefas de programações conforme necessidade do usuário. As linguagens mais conhecidas são: C++, Visual Basic, Visual Lisp e Lisp. Com o desenvolvimento de API´s torna-se possível utilizar qualquer linguagem para programar tarefas em ambiente CAD, tais como Delphi, Visual C, entre outras. Contudo, devem ser redigidas e compiladas separadamente do ambiente CAD para então serem utilizadas.

Através da manipulação das entidades geométricas tal como linha, arco ou superfície é possível extrair informações para cálculo de novas necessidades a partir de entidades básicas, para então suprir o desenvolvimento desejado. Dessa maneira é possível manipular a criação de simples macros para parametrização de desenhos até cálculos para geração de estruturas complexas.

2.1.3 – Sistemas CAD de mercado

Para SOUZA e COELHO (2003), os sistemas CAD existentes no mercado podem ser classificados em 2D e 3D devido à versatilidade de

trabalho. Vários sistemas podem realizar uma ampla gama de tarefas ou atender aplicação específica com maior ênfase. Assim, podese definir sistemas CAD em pequeno, médio e grande porte.

CHHUN estima que 40% dos fabricantes estão usando CAD 3D, e para DIEHL, SAAR e MCCOLLOGHT, 70% a 90% dos fabricantes de todos os tamanhos usam sistemas CAD em conjunto ou não com CAM.

2.1.3.1 – Sistemas de pequeno porte

São sistemas baseados normalmente em duas dimensões focando aplicações simples como layout ou desenhos de simples confecção. para áreas de mecânicas, elétrica, civil, e arquitetura. As entidades normalmente usadas neste porte são linhas, arcos, círculos,*splines*, podendo realizar em alguns casos a geração de desenho 3D. Tratase apenas de representação das entidades mencionadas que no formato 3D são conhecidos por desenhos em *wireframe.* Possui baixo custo para utilização, tanto em nível de software como hardware (SOUZA ; COELHO, 2003).

2.1.3.2 – Sistemas de médio porte

São sistemas CAD para representação tridimensional com recursos de modelamento em entidades tipo "sólido" ou "superfície". Assim, é possível realizar cálculos para obtenção de massa, volume, centro de gravidade e outros dados estruturais. Possui recursos de geração de desenhos 2D para qualquer vista ou corte específico a partir do modelo sólido3D. O arquivamento do desenho, por ser do tipo árvore topológica, permite uma fácil modificação da peça modelada ou a própria alteração na vista 2D, o que representa em qualquer nível da organização da estruturação da árvore, a atualização através de regeneração de desenho ou re-cálculo em todos os níveis (SOUZA ; COELHO, 2003).

A execução de uma peça pode ser feita parametricamente, ou seja, toda ela realizada através de parâmetros interligados entre si através de cotas ou fórmulas matemáticas. Portanto qualquer alteração em determinada cota, o modelo em 3D e o desenho em 2D é atualizado automaticamente.

Para empresas que possuem equipe de projeto, existe uma tendência para utilização deste tipo de CAD. Seus benefícios são extremamente valiosos para a qualdade do produto, tanto a nível de projeto como fabricação.

2.1.3.3 – Sistemas de grande porte

Além de todos os recursos mencionados acima, possui estruturação para gerenciamento total da estrutura do produto e desenhos, conhecido por PDM (Project Data Manager / Gerenciamento de dados de projeto), com acompanhamento detalhado das revisões de projeto. Os recursos para criação de montagens são mais potentes e completos, podendo fazer incursão a partir de peças interna à montagem, e ainda gerar arquivos de alta compactação para serem visualizados por outros setores para análise crítica do projeto, como clientes, processistas de fabricação, etc, conseguindo identificar todos os componentes da montagem.

Para alguns sistemas, estão sendo incorporados recursos para análise de esforços (CAE- Computer Aided Engineering / Engenharia assistida por computador) em peças modeladas tridimensionalmente.

2.1.4 – Benefícios da implantação de sistemas CAD

Os critérios para a avaliação de sistemas CAD são a portabilidade, expansibilidade, interface amigável e uso fácil, ser acessível para modificações, possuir interfaces para outros sistemas CAD, e alta velocidade de processamento. Estes critérios são observados para qualquer nível de CAD a ser adotado, tanto em 2D como para 3D, ou atépara futura integração.

Os sistemas CAD trazem inúmeros benefícios. Dentre eles, BENNET (1998) e BUXEY (1992) destacam os principais :

- melhora na qualidade do desenho, do gerenciamento e da manutenção ;
- a fácil verificação e redução de erros ;
- a integração de projetos e análises de atividades ;
- o aumento da produtividade dos projetistas ;

- redução de custos na implantação de novos produtos ;
- preços competitivos de produtos e serviços ;
- aumento do número de projetos desenvolvidos ;
- divulgação e criação de novas propostas para marketing ;
- diminuição do tempo requerido para novos desenvolvimentos e / ou alterações de projetos;
- diminuição de especialistas requeridos para a área ;
- redução do custo de fabricação ;
- diminuição ou até eliminação total de moldes miniaturas para avaliação do produto ;
- simulação virtual de aparência e custos de novos produtos;

Em conjunto com sistema de medição a laser (scanner), o processo de engenharia reversa está extremamente simplificado e rápido com a captura dos dados e sua manipulação para sistemas CAD (AJMAL, 2002).

A razão do uso desta tecnologia está no fato de alguns produtos possuírem superfícies esculturadas, e com a sua manufatura e uso em campo, pode necessitar ajuste ou reparo de geometria. Como exemplo, estruturas tubulares, tanques de plataformas marítimas, e recuperação arquitetônica de fachadas ou esculturas.

O escaneamento digital é uma poderosa técnica de levantamento de dados para sistemas CAD/CAM usados na industria naval (GOLDAN, 2003).

2.2- Desenvolvimento de chapas

O desenvolvimento de superfícies tem por objetivo juntar dois orifícios iguais ou não, semelhantes ou diferentes. Para LOBJOIS, uma superfície é desenvolvível quando é possível fender a superfície lateral de um sólido segundo uma reta determinada eestender perfeitamente esta superfície sobre um plano sem lhe fazer nenhuma deformação por martelamento.

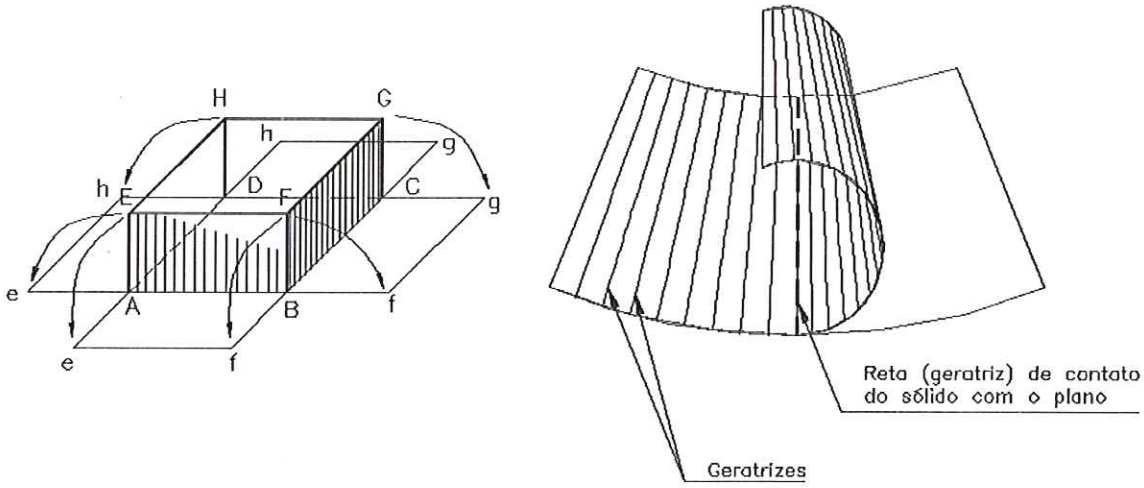


Figura 2.1 - Desenvolvimento de chapas (fonte : LOBJOIS, 1977).

Existem inúmeros métodos para realizar o desenvolvimento de superfícies para entidades como prisma, poliedro, cone, tronco de cone, pirâmide, etc. Para superfícies compostas[1] a teoria dos planos tangentes é o indicado para a realização do desenvolvimento.

A teoria dos planos tangentes diz que uma superfície côncava ou convexa é desenvolvível somente se passando sobre um plano, permanecer constante o contato com este plano através de uma superfície ou uma reta, ou seja, o plano é tangente à superfície ao longo duma geratriz. Devese determinar sempre duas bases, paralelas ou não, a seremconcordadas.

As figuras 2.2 e 2.3 mostram exemplos de figuras e superfícies compostas desenvolvíveis.

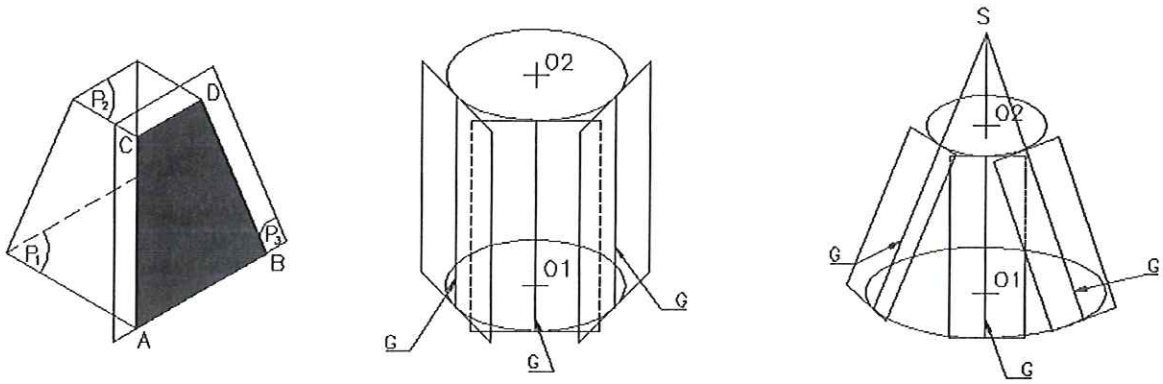


Figura 2.2 – Exemplos de figuras desenvolvíveis. (fonte : LOBJOIS, 1977)

[1] É a superfície lateral de um sólido contendo elementos para uma superfície geométrica desenvolvível (plano, cilindro, cone ou tronco de cone).

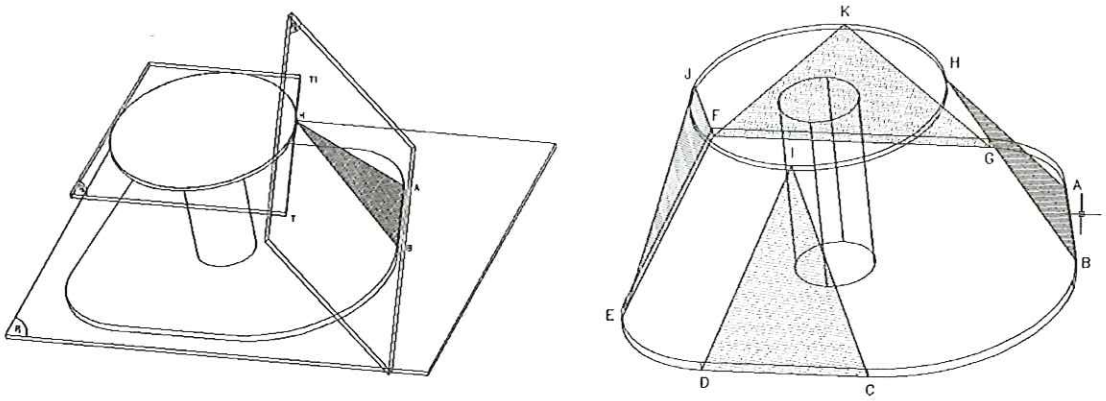


Figura 2.3 – Exemplos de superfícies compostas desenvolvíveis.
(fonte : LOBJOIS, 1977)

Outro método que pode ser utilizado para figuras de bases regular ou irregular, é o método da triangulação (ARAÚJO,1976 ; MARCOS 1975 ; LOBJOIS, 1977).

Trata-se de um método bastante simples que consiste em determinar na base inferior e superior uma mesma quantidade de pontos para então quebrar em pedaços no formato de triângulo, passando de ponto em ponto, até atingir a sua totalidade. A quantidade de pontos é o que determina a tolerância do cálculo do desenvolvimento.

Para ARAÚJO, MARCOS e LOBJOIS, o método pode ser aplicado para qualquer forma geométrica das bases,. A figura 2.4 mostra um exemplo de planificação onde as bases são círculos.

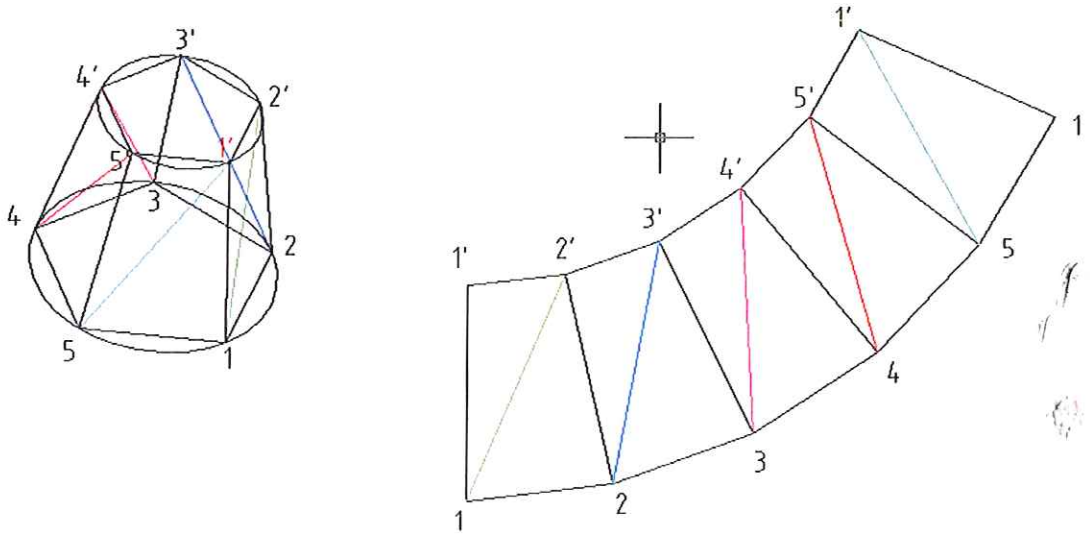


Figura 2.4 – Exemplo de planificação de um tronco de cone (base tipo círculo).

Como as distâncias entre os pontos das bases (por exemplo 1-1',1'-2' e 1-2) são conhecidas, desenha os comprimentos reais através da triangulação dos elementos, constituindo a planificação da figura.

Dependendo da figura geométrica das bases, necessitase ancorar pontos para que o método possa ser aplicado com sucesso, conforme pode ser visto na figura 2.3 (por exemplo, pontos IDC). O apêndice F mostra uma aplicação de planificação por triangulação neste formato.

2.2.1 - Processos de corte para chapas

Os tipos de processos para corte de chapas metálicas podem ser mecânico, térmico, descarga elétrica e abrasão. Para o corte por descarga elétrica utiliza-se eletro-erosão a fio com dois eixos de movimentação, contudo pode chegar até 5 eixos para cortar formas complexas.

No corte a abrasão tem-se o processo por jato d´água a alta pressão. Este tipo de corte vem crescendo substancialmente nas empresas, sendo em alguns casos substituindo o processo térmico.

Para EBISUI (1993), o sistema mais utilizado pelas industrias mecânicas para o processo de corte de chapas espessas é o processo térmico, que engloba os cortes para tipos oxicorte, plasma, e laser, sendo que estes processos visam a preparação da chapa para uma operação subseqüente como calandragem, soldagem de estruturas, ou usinagem para acabamento. Estes processos, com exceção do corte a laser, possuem qualidade dimensional e estrutural de acabamento não preciso.

2.2.1.1 - Processo de corte – oxicorte

O processo de oxicorte consiste na retirada de material através de um jato de oxigênio de alta pureza (mínimo de 99,5%). Primeiramente o material é aquecido a uma temperatura de ignição (entre 200°C e 300°C), e com a entrada do oxigênio há uma forte oxidação com a finalidade de remover o material. O oxigênio de corte reage com o material aquecido quando a temperatura de ignição do material for menor da temperatura de fusão. A

temperatura de ignição do material depende da composição do material (JOAQUIM, 2004c).

Este tipo de corte é muito bom para materiais até 0,3% de carbono. Nos aços ligados, não é possível corte por oxicorte convencional.

Normalmente existe um pré-aquecimento na chapa para iniciar o corte, ou seja, execução do furo inicial. Após o furo, a temperatura da chama é o responsável pelo aquecimento circundante, e quanto maior a temperatura, mais depressa o calor da chama é transmitido à peça.

A temperatura de trabalho da chama depende do gás a ser utilizado. Por exemplo, o gás metano atinge temperaturas entre 2600°C e 2800°C, o gás etileno entre 2800°C e 2900°C, o acetileno entre 3050°C e 3160°C.

A utilização deste processo é adotada para chapas em torno de 500 mm. Acima desta espessura são usados cortes nas operações de lingotamento onde a peças encontra-se a altas temperaturas.

2.2.1.2 - Processo de corte – plasma

O plasma é um gás eletricamente condutor cuja ionização causa a criação de elétrons livres e de íons positivos junto com os átomos de gás. Assim, o gás torna-se eletricamente condutor tendo a capacidade de transportar corrente (JOAQUIM, 2004d).

Um exemplo de plasma que ocorre na natureza é o relâmpago, que conduz a eletricidade de um lugar para outro. Neste caso, os gases do ar são os gases ionizados.

O corte a plasma utiliza um bico com orifício para constringir um gás ionizado em alta temperatura até que possa ser utilizado para derreter ou cortar a chapa. Assim, o arco-plasma derrete o material e a alta velocidade do gás remove o material derretido.

O plasma pode ser utilizado para qualquer tipo de aço carbono ,aço ligado e alumínio. É um processo mais eficiente e rápido que ooxicorte (podendo chegar em até 7 vezes), e atualmente é amplamente utilizado pelas industrias mecânicas de metal base até espessuras de chapas de até 50 mm conforme manual do fabricante "*Hypertherm*". Acima de espessura de 25 mm a

velocidade de corte diminui, e quanto mais espessa for a chapa menor a velocidade de corte.

O gás de corte ou gás plasma pode ser : ar, oxigênio, nitrogênio, mistura de argônio e hidrogênio.

O gás de proteção é utilizado para resfriar a tocha e também constringir o arco, cujo produto resulta no acabamento da peça e a qualidade da borda. Exemplos podem ser : ar, CO2, nitrogênio, mistura de AR e metano, oxigênio e nitrogênio. Os gases de proteção são escolhidos conforme o tipo de material pois qualquer contaminação pode causar perda da abertura do arco, baixa qualidade de corte ou vida dos consumíveis.

Para as indústrias onde o volume de corte é alto, o processo oxicorte está sendo trocado pelo processo a plasma. Apesar de maior investimento na aquisição do equipamento plasma, o retorno é rápido devido à alta produtividade.

2.2.1.3 - Processo de corte – laser

O LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) é um dispositivo que produz um feixe de radiação através da amplificação da luz. A aplicação de uma energia atravésde descarga elétrica, radiação luminosa, reação química, ou outra forma qualquer, aumenta o seu nível energético. O elétron de um átomo pula para um nível mais alto de energia, ficando assim num estado de excitação (JOAQUIM, 2004b).

O acréscimo energético causado pela excitação é liberado após um tempo de vida e o elétron volta ao seu nível energético original. Assim, criando condições para que o retorno do elétron seja controlado, teremos a chamada emissão estimulada. Através da canalização desta energiatorna-se possível obter um feixe de luz de alto poder energético na forma de calor.

A incidência de um laser sobre um ponto da peça é capaz de fundir e vaporizar até o material em toda sua volta. No caso particular do corte é necessário a utilização de umgás (CO2) cuja função é remover o plasma e o material fundido. Outros gases, como o nitrogênio (N2) e o hélio (H) são misturados ao dióxido de carbono (CO2) para aumentar a potência do laser (JOAQUIM, 2004b).

Atualmente o processo laser é capaz de efetuarcortes em chapas de aço carbono e aço ligado de até 20 mm. Para aços inoxidáveis e alumínio as espessuras são menores (em torno de 4 a 6 mm) devido à reflexão da luz.

Devido à grande precisão no corte, o processo de estampagem de chapas finas está sendo substituído pelo processo de corte a laser.

Para MONEZI (2004c), as vantagens são : alta velocidade no corte, grande precisão no corte, boa qualidade da superfície cortada, processo não ruidoso. Porém, é necessário um alto investimento inicial, dificuldadeem cortar materiais refletivos e de boa condutividade térmica.

Com os avanços da tecnologia, equipamentos mais baratos, o futuro indica uma possível substituição do plasma pelo laser nas aplicações industriais no corte de média espessura.

2.2.1.4 - Processo de corte – jato de água

O corte por jato d´água é caracterizado por uma energia de impacto (energia mecânica) através do jato de água de alta pressão sobre a superfície do material a ser cortado. A pressão exercida pelo jato supera a tensão de compressão entreas moléculas, efetivando o corte.

Para JOAQUIM e RAMALHO (2004a), o diâmetro do orifício de saída da água é da ordem de 0,1mm a 0,6 mm e a velocidade de 520 m/s a 920 m/s. A combinação destas variáveis resulta numa pressão de corte da ordem de 1500 a 4200 bar. Utiliza-se bomba de pistão ou bomba intensificadora para trabalhar com vazões de 2 a 4 litros por minuto.

Este processo é qualificado para cortar qualquer tipo de material metálico ou não metálico. Para material não metálico utilizase somente a água pura como elemento de corte, e para materiais metálicos e de elevada dureza e densidade, utiliza-se água com finas partículas abrasivas para efetuar o corte (JOAQUIM ; RAMALHO, 2004a).

A velocidade de corte é baixa comparando com processo plasma ou laser, com valores até inferiores ao processo oxicorte utilizando material metálico.

Possui vantagens de cortar qualquer material, não apresentar riscos de radiações, e não formar depósitos nas superfícies cortadas. Tem a

desvantagem no alto investimento dos equipamentos, baixa potência disponível e processo ruidoso.

2.3- Máquinas de corte

As máquinas de corte são equipamentos eletromecânicos cuja principal função é a de movimentar a tocha de corte a uma velocidade constante, definida pelo processo de corte adotado.

Existem diversos tipos e modelos destes equipamentos, desde os mais simples conhecidos como "tartarugas" até os mais complexos controlados por comando de controle numérico (CNC).

Para JOAQUIM e RAMALHO(2004c), as principais características técnicas a serem observadas em uma máquina de corte são:

- Capacidade de corte (espessura da chapa) ;
- Velocidade de corte ;
- Número de estações de corte (maçaricos) ;
- Área útil de corte (para máquinas estacionárias).

2.3.1 - Máquina de corte pantográfica

Neste equipamento, os maçaricos são acoplados a um dispositivo copiador, normalmente presos a uma mesa. O dispositivo copiador pode ser fotoelétrico ou mecânico, e a trajetória dos eixos é definida pelo dispositivo copiador. São equipamentos estacionários, sua velocidade de corte é controlada eletronicamente. Possuem recursos de abertura do gás de corte e sistema de compensação de altura do bico automáticos, localizados em um painel de comando central. São equipamentos muito utilizados em indústrias de médio porte, na produção de peças pequenas e médias seriadas e não seriadas.

2.3.2 - Máquina de corte CNC

São os equipamentos de corte com maior recurso, como controle automático de velocidade através do uso de motores digitais nos eixos de

movimentação, e CNC (comando numérico computacional) para gerar o próprio código CN.

De acordo com KOVACIC (2002), uma evolução da máquina CNC é a capacidade de ser autônoma e realizar as operações básicas de trabalho e planejamento do layout de corte. O comando possui caixas de diálogo de fácil interpretação pelo operador.

Tal como nas máquinas pantográficas, podem ser acoplados diversos maçaricos, porém, neste tipo os controles de velocidade e trajetória de deslocamento são feitos através de microprocessadores, possibilitando a utilização destes equipamentos integrada a sistemas computadorizados controlados pelo CNC. São equipamentos utilizados em indústrias de médio e grande porte, na produção de peças médias e grandes. Seus principais campos de aplicação são as caldeirarias pesadas.

Um equipamento com capacidade de corte em chapa acima de 6 metros pode ser equipada com estações oxicorte, plasma, laser ou jato d´água. Possui também estação para traçar as peças, sendo que estas estações podem ser do tipo mecânica (punção), deposição de óxidode zinco, laser ou plasma de baixa capacidade.

Desenvolvimento neste sentido segue que uma única estação a plasma seja capaz de cortar chapas de grandes espessuras ou apenas realizar a operação de traçar. O controle da fonte, a regulagem dos gases, o tipoda identificação do corte deverá ser comandado pelo controle numérico.

A figura 2.5 exemplifica um equipamento com mesa para corte de peças de 12 x 5 metros, estações oxicorte, plasma com capacidade até 50 mm (aço carbono).

Figura 2.5 – Máquina de corte CNC com cabeçote plasma (400A) e oxicorte com mesa 15x5 m (fonte : empresa IESA).

2.4– Conformação de chapas

Para realizar o processo de conformação de chapas em caldeiraria pesada, são dois os tipos básicos para execução. São eles : processo de calandragem e processo de dobramento.

Com o avanço da tecnologia, está sendo possível simular o evento da conformação pelo método de elementos finitos. Para DAMOULIS (2003) e YANG (2002), a simulação de processos de conformação com o método de elementos finitos (MEF) é uma ferramenta eficiente e de custo razoável para a simulação de processos de conformação antes da fabricação do ferramental

2.4.1 - Processo de calandragem

O processo de calandragem trata a operação de curvamento de chapas, conferindo à peça uma deformação permanente em raios específicos. A partir da chapa podem ser obtidos figuras geométricas com raio de curvamento dado, como por exemplo, cilindros, cones, tronco de cones ou outra superfície qualquer de revolução.

Existem dois tipos de calandra de 3 robs : a calandra de passo e a calandra piramidal.

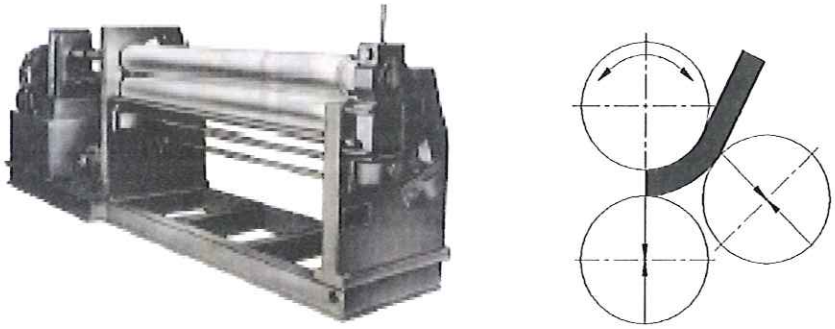


Figura 2.5 – Calandra de passo.

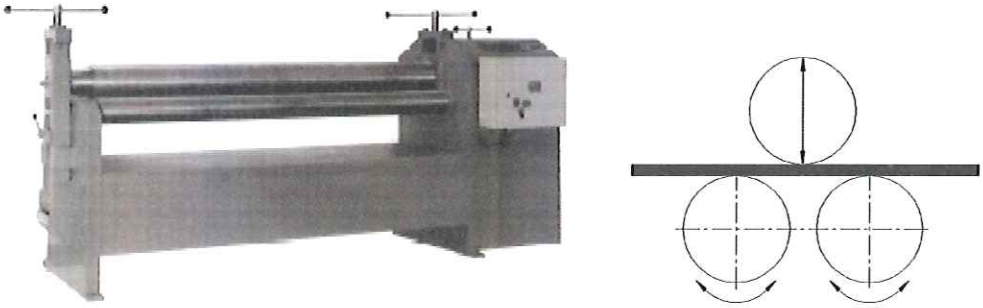


Figura 2.6 – calandra piramidal.

A calandra piramidal o rolo superior é ajustado para o controle da pressão. Este deslocamento determina o raio a ser calandado. O raio mínimo obtido é cerca de duas vezes o diâmetro do rolo superior para aços inoxidável e de uma vez e meia para aços carbono.

A calandra de passo é mais precisa e permite um raio mínimo menor, sendo no caso é o diâmetro do rolo superior mais 50mm. A folga entre os rolos alinhados é ajustável para várias espessuras e o rolo de trabalho pode ser deslocado para obtenção do raio determinado. Em ambos os casos podem conformar chapa com espessura de até 50 mm e largura de até 4 m.

A calandra de 4 rolos possui a vantagem de facilitar o trabalho de pré-curvamento. Na calandra de 3 rolos o précurvamento é feito manualmente, normalmente realizado em prensa.

Na calandra de 4 rolos o rolo superior lateral é ajustado para determinar o raio de curvatura, o rdo lateral oposto realiza a operação do pré curvamento. Possui capacidade de calandrar chapas de até 70 mm de espessura e comprimento de 5 metros.

Os fabricantes de calandras incorporaram na máquina a utilização de comando numérico. O CNC tem a função de controlar automaticamente o posicionamento dos rolos para atingir a curvatura desejada.

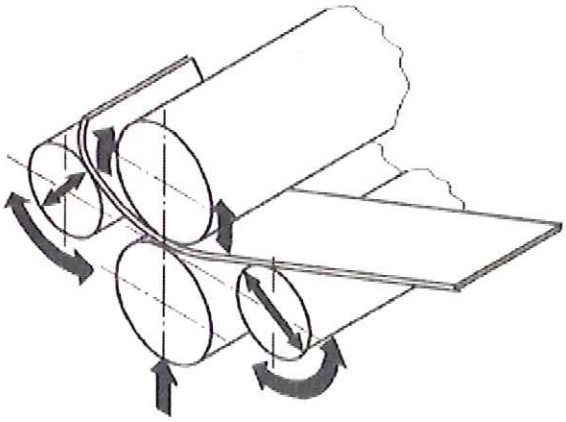


Figura 2.7 – Calandra de 4 rolos.

2.4.2 – Processo de dobramento

Segundo MESQUITA (1997), o processo de dobramento tem o objetivo de dobrar uma chapa por flexão, sendo a superfície externa tracionada e interna comprimida. A referência de tensão parte da linha neutra da chapa onde os valores máximos são as superfícies interna e externa da chapa . A figura 2.8 ilustra as tensões sob a chapa, e também as variáveis do processo

Uma parte dessas tensões estará abaixo do limite de escoamento e outra excedendo o limite. Assim, uma parte da chapa dobrada estará na região da deformação plástica permanente e outra não, e como resultado a chapa dobrada apresenta um "retorno elástico", conhecido por "springback", que deve ser compensado durante a operação da dobra.

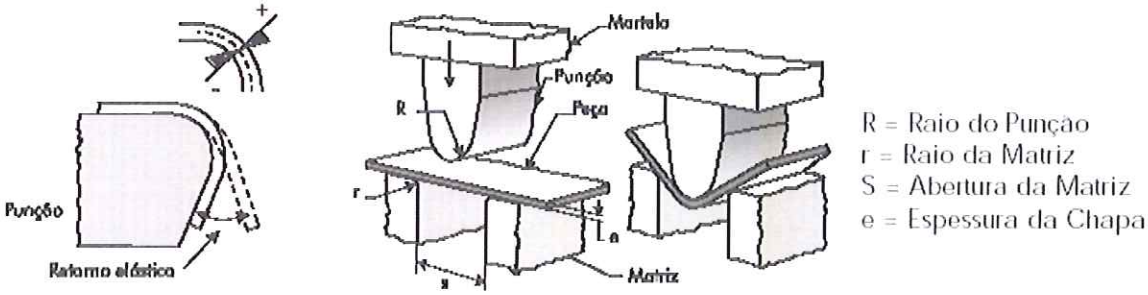


Figura 2.8 – Variáveis do processo de dobramento.
(fonte : MESQUITA, 1997).

O retorno elástico é uma função da resistência do material, do raio e ângulo de dobra, e espessura do material a ser dobrado. A espessura do material (e) a ser dobrado determina a abertura da matriz (S) que por sua vez determina o raio de dobra da matriz (r).

Em caldeiraria pesada, utiliza-se o processo de pré-curvamento na calandragem de raios.

3 – REALIDADE TECNOLÓGICA ANTERIOR

A empresa em cujas instalações se realizaram as atividades de desenvolvimento do sistema de apoio em CAD para automatização do processo de delineamento de desenhos para fabricação em caldeiraria é a IESA Projetos, Equipamentos e Montagens, localizada em Araraquara estado de São Paulo. Trata-se de uma empresa voltada para produção de bens de capital sob encomenda.

O escopo de fornecimento da empresa é distribuído em diversos centros de excelência, cujos principais produtos são voltados para:

- Geração de energia elétrica (turbinas hidráulicas, geradores elétricos com fabricação própria de barras estatóricas, carcaça de turbogeradores, comportas, conduto para captação e escoamento de água de rio, caixa espiral, tubo de sucção) ;
- Área de levantamento (pontes rolantes de grande porte para siderurgia ou usina hidrelétricas com capacidade de até 500 ton, portainers, guindastes) ;
- Equipamentos de processo (diversos modelos para vasos de pressão utilizados nas áreas petroquímica);
- Ferroviários (fabricação e reformas de vagões de cargas, reforma de vagões metroviários).

O foco do trabalho proposto está no setor de caldeiraria da empresa, buscando uma maior produtividade na elaboração dos processos de delineamento. Após a finalização dos desenhos gerados na área de engenharia do produto, o planejamento de fábrica os envia à engenharia industrial para elaboração do roteiro de fabricação. No roteiro são registradas as necessidades para cada operação do setor produtivo envolvido, e também as necessidades para delineamento de peças caldeiradas.

O processo, aqui chamado de delineamento, inclui :

- desenho de detalhamento para fabricação ;
- planificação com determinação de chanfros para solda, tipos de chanfros com referências de posicionamento ;
- desenho tridimensional de montagem .

Antes da disseminação de uso do projeto assistido por computador (CAD) pela empresa, em meados de 1986, algumas peças eram desenhadas e planificadas manualmente para então serem cortadas em pantógrafos óticos[2]. A única maneira de checagem, antes da fabricação, era a construção de "chapelonas" ou "cartolinas" em escala menor simulando montagens para saber se a planificação estava correta. Nesta época, nem se pensava, ainda, na correção do perfil. Na fabricação das primeiras caixas espirais não havia a compensação de sobremetal para o tipo de chanfro de solda usado. Este tópico é melhor explicado e detalhado no item 4.2.2.4 .

Com a introdução do CAD foi possível desenhar e planificar as chapas, porém, ainda de maneira artesanal, mas já era um fator de produtividade já muito significativo para uma atividade antes realizada totalmente na prancheta. Programas de cálculos, externos ao CAD, foram desenvolvidos para executar a planificação de peças com formas complexas, porém com limitações, hoje já corrigidas pelo CAD.

Assim, desde a introdução do CAD, não houve mais evolução significativa no processo de delineamento de peças oriundas de chapas metálicas dos produtos de geração de energia elétrica. As evoluções existentes estavam condicionadas à introdução de novos comandos e recursos do CAD, ou seja, o processo de correção para compensação do chanfro só era possível manualmente. O apêndice A mostra a metodologia "espinha de peixe" utilizada para ajudar na identificação do problema.

As informações do processo de delineamento, necessárias para o chão-de-fábrica são muito extensas e extremamente trabalhosas. Contudo, são processos extremamente parecidos e repetitivos que seguem uma sequência padrão :

- planificação das chapas;
- geração dos croquis de delineamento, inclusão de compensação de material e chanfros de solda ;
- geração de croqui de montagem para verificação individual da uma seção .

[2] São equipamentos de corte térmico onde o desenho é feito em papel especial, guiados por uma luz para percorrer o traçado do desenho.

Verificou-se que esta seqüência estava sendo um "gargalo" para a produção devido a :

- ser a primeira etapa do roteiro de fabricação e com inúmeros desenhos e planificações a serem gerados pela engenharia industrial.Qualquer atraso produziria efeito imediato no cronograma estabelecido;
- dependência exclusiva de técnicos especializados para a seleção dos processos de fabricação;
- número excessivo de tarefas, mesmo utilizando CAD, para realização do trabalho ;
- grandes perdas e danos quando um processo apresentava erro. O custo de reparo é muito grande devido ao fato da percepção ser somente na montagem. O prejuízo é constituído por perda de matéria prima, perda do processo de manufatura do corte da chapa, perda das horas da engenharia industrial, etc.

O fluxograma do processo de geração do delineamento das informações do produto que acarreta sérios problemas de produtividade é detalhado no apêndice B.

Desta forma, surge a necessidade de um processo automatizado com o objetivo de melhorar a produtividade da engenharia industrial. Pode-se dizer que o sistema desenvolvido é um módulo de CAM para a área de caldeiraria para peças de grande porte.

Através da pesquisa bibliográfica em algumas das principais bases de dados da área de engenharia mecânica, constatou-se que as maiorias dos artigos localizadas são referentes ao projeto hidráulico ou de dimensionamento estrutural do produto. A tentativa de localizar literatura associada com o processo de fabricação não foi satisfatória.

Buscou-se também nas empresas do setor de fabricação de produtos mecânicos de hidrelétricas, informações que pudessem levar a algum tipo de desenvolvimento na área. Assim , a tarefa de afirmar se existe software similar em outras empresas não teve êxito, talvez devido às restrições de informações no mercado.

Com base nestas evidências e levando em consideração a amplitude de ações desenvolvidas especificamente para os produtos em questão, leva a crer que o trabalho possui característica de pioneirismo.

4 – METODOLOGIA EMPREGADA NO SISTEMA DESENVOLVIDO

O desenvolvimento do sistema baseou-se em produtos de hidrogerador voltados para a área de caldeiraria pesada, itens que são característicos de bens de capital fabricados pela IESA, e que utilizam chapas metálicas espessas (entre 25 e 100 mm) como matéria-prima.

4.1- Tipos de produtos onde o sistema computacional se aplica

O sistema computacional se aplica aos produtos "caixa espiral", "tubo de sucção" e "conduto forçado", que são mostrados na figura abaixo.

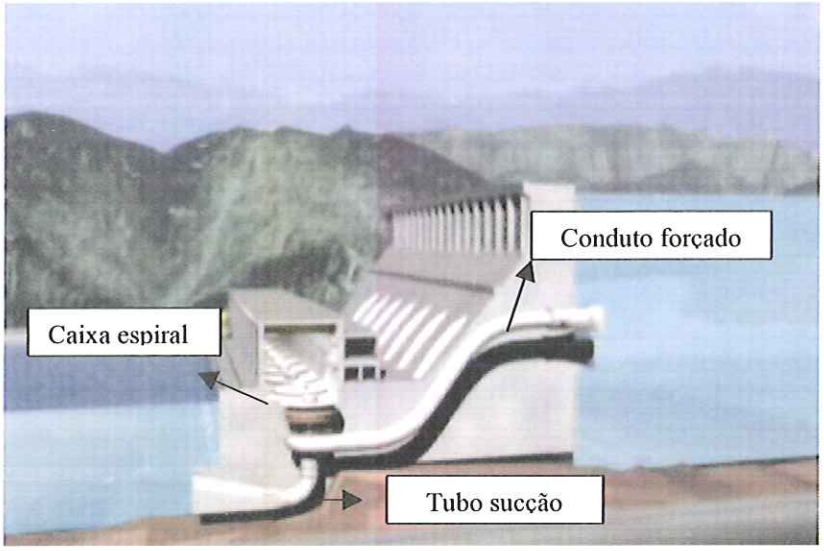


Figura 4.1 - Esquema de montagem de uma barragem hidrelétrica em corte detalhando os produtos em que o sistema computacional se aplica.

4.1.1 – Caixa espiral

A caixa espiral de um hidrogerador tem como finalidade captar a água e distribuir de maneira uniforme a uma turbina que dispara, então, todo o processo de geração de energia em usinas hidrelétricas. Seu projeto compreende um estudo hidráulico bastante minucioso, uma vez que se objetiva realizar o direcionamento do fluxo de água para as pás da turbina do gerador com a mínima perda de carga possível (MAJI ; BISWAS, 2000). Suas dimensões e formato são cuidadosamente estudados para que a energia cinética do fluxo seja aproveitada de maneira otimizada. Após o projeto geral e

definição de suas dimensões gerais, a fabricação deve também ser fiel ao projeto para que o resultado prático seja a menor perda de carga possível, de forma a proporcionar o maior aproveitamento da energia hidráulica. A caixa é assim composta por módulos de seções partindo da tomada d´água afunilando gradualmente em forma de caracol ao redor da turbina hidráulica. A figura 4.2 mostra, esquematicamente, o formato de uma caixa espiral.

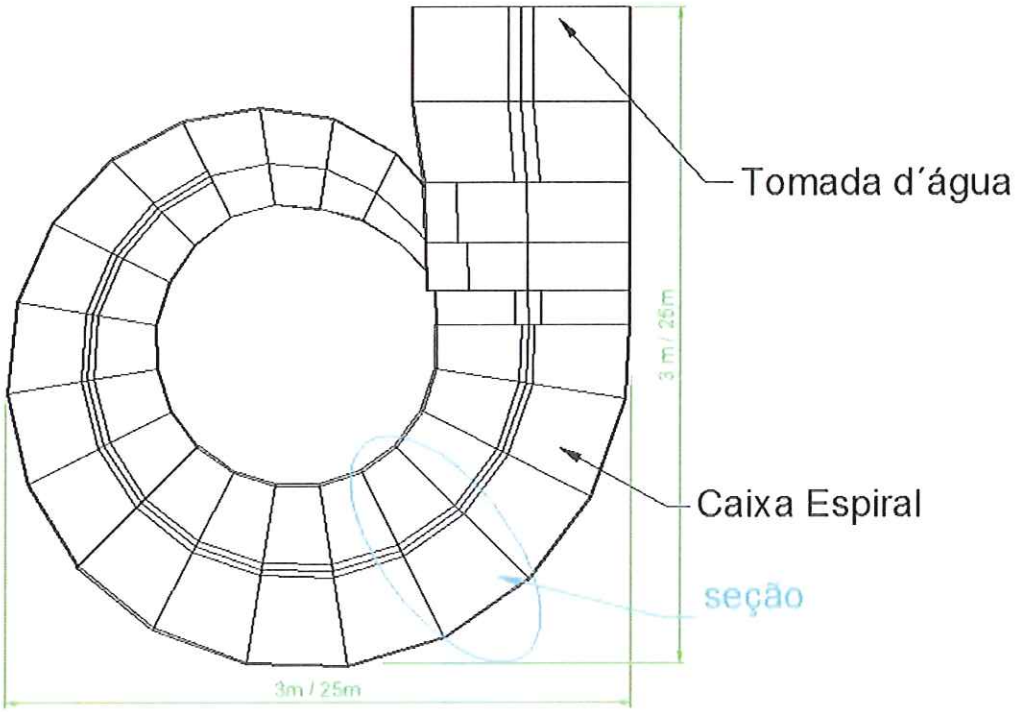


Figura 4.2 - Exemplo de uma caixa espiral.

4.1.2 – Tubo de sucção

O tubo de sucção é um equipamento que tem como função captar a água que passa pela turbina hidráulica levando-a de volta ao rio. Também é formado por módulos de seções com formato parecido ao de um "cotovelo". A figura 4.3 mostra o desenho esquemático do tubo de sucção.

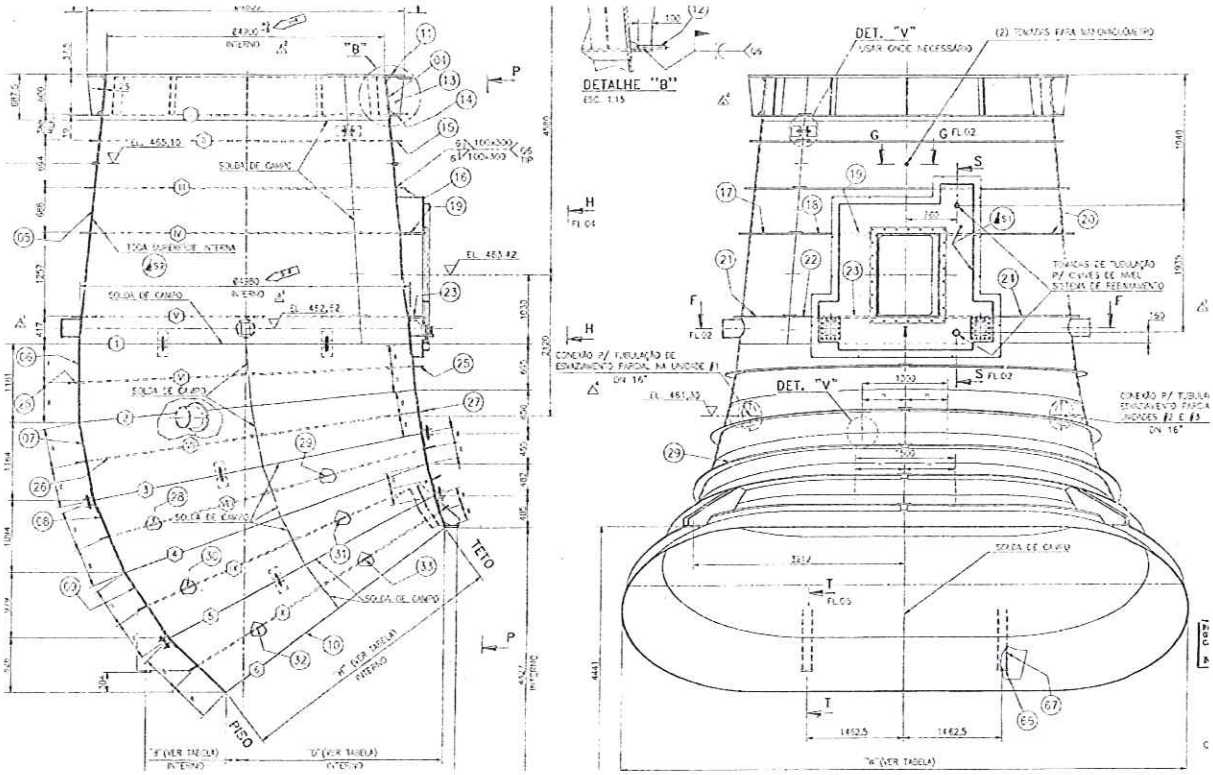


Figura 4.3 – Exemplo de tubo de sucção.

4.1.3 – Conduto forçado

Conduto forçado é um equipamento que canaliza a entrada da água do rio ou lago direcionando-a até a entrada da caixa espiral. Sua principal função é apenas a orientação da entrada de água para a caixa espiral, e conforme o projeto civil da hidrelétrica, pode haver bifurcação para uma mesma canalização do conduto, conforme exemplo da figura 4.4.

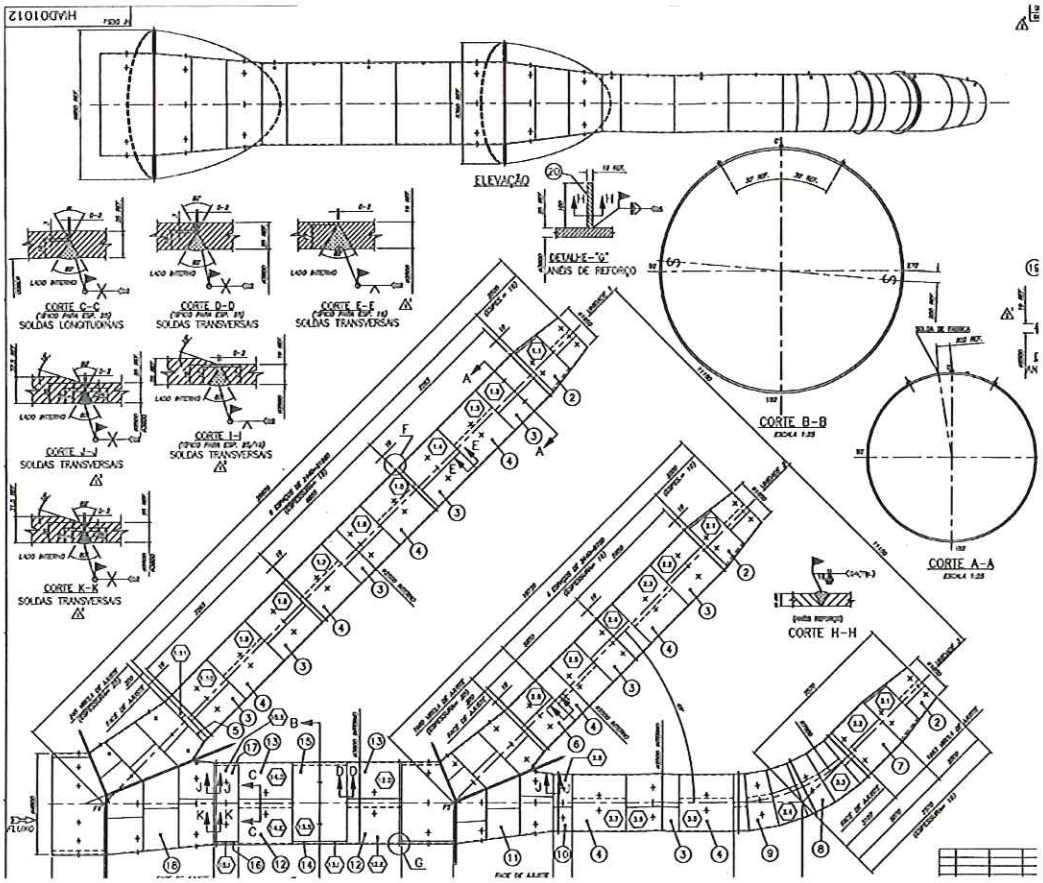


Figura 4.4 - Exemplo de um conduto forçado.

4.2– Modelamento do aplicativo

A premissa básica do sistema proposto é a integração de todos os procedimentos para o processo de delineamento de desenho parar confecção de croquis e cálculo de planificação para a fabricação, envolvendo processos de corte e dobra. Assim, as etapas previstas são :

- geração de desenhos tridimensional, a partir do desenho inicial vindo do estudo hidráulico, para visualização do projeto, uma vez que o desenho original é normalmente concebido em formato bidimensional ;
- planificação de cada seção cujo nome fabril mais conhecido é "virola";
- separação da seção em partes, adequando o tamanho à capacidade da máquina de corte de chapas ;
- existindo seções pequenas, o sistema facilita a união de partes de acordo com a otimização da chapa padronizada ;
- geração de croqui bidimensional para cada seção da virola desenvolvida facilitando o corte ;

- geração de croqui tridimensional para cada seção da virola com finalidade de auxiliar a montagem da seção ;
- geração de um mapa para acompanhamento das seções em fabricação.

O sistema desenvolvido segue basicamente esta ordem de procedimentos contudo numa única base de dados. O apêndice C mostra o mapa do processo após o desenvolvimento do sistema.

4.2.1 – Sistema CAD de apoio proposto

Para facilitar o desenvolvimento do sistema, buscou-se utilizar uma programação que possuísse recursos de biblioteca gráfica e de preferência num ambiente interno de um sistema CAD. Vários sistemas CAD de mercado possuem esta característica apropriada para um ambiente de desenvolvimento, como por exemplo um CAD específico para a geração de desenhos para o setor de "ferramentaria", tais como projetos de estampo, e dispositivos de fixação (CHRISTMAN, 2003), ou um CAD focado no desenvolvimento de estampo para processo de conformação (SAKAMOTO, 2001 ; JOLGAF, 2003).

Foi adotado o software AutoCAD-Mechanical Desktop[3] versão 2002 ou 2004 como ambiente CAD propicio para o desenvolvimento do sistema. Outro fator decisivo porém não determinante, é por ser o software adotado pela empresa há mais de 20 anos. Assim, teríamos a flexibilidade de um ambiente com recursos necessários para geração do sistema e também manter a total integração de leitura dos desenhos originados no AutoCAD.

As linguagens de programação utilizada para o desenvolvimento do sistema foram o "LISP", o "Visual Basic" e o "Dialogue Comunicate Linguage". O "LISP" é mais apropriado para uso nas rotinas de cálculo, o "Visual Basic" e o "DCL" na formatação de telas para entrada de dados.

Um dos recursos amplamente utilizados é o controle de vetores sobre entidades geométricas.

---

[3] Fornecido pela empresa AutoDesk de origem americana, com representação no Brasil.

4.2.2 – Método de programação proposto

O sistema foi desenvolvido para permitir a máxima parametrização de dados possível dentro do escopo do processo de delineamento. A interface foi planejada para permitir uma boa interatividade para o usuário.

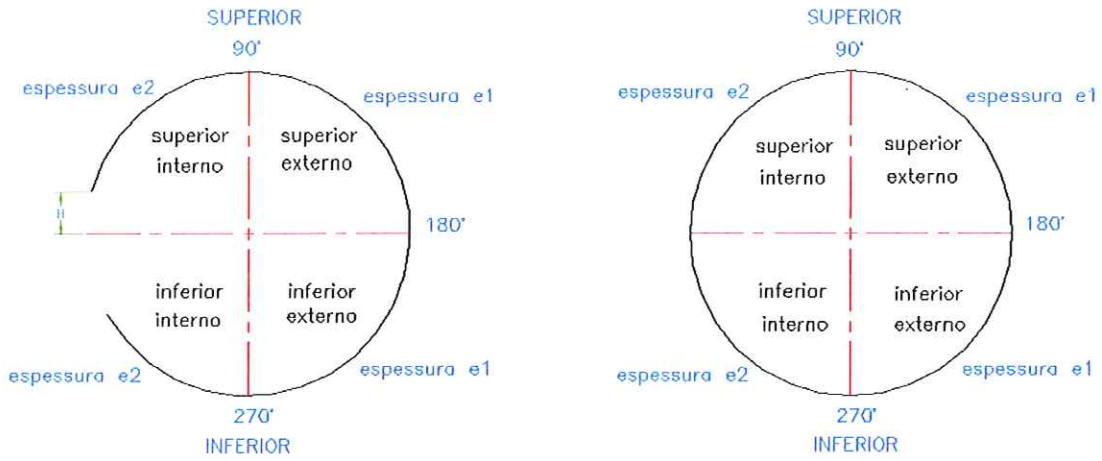
Numa única base de dados tem-se informações geométricas para a geração de cada seção, dados estes obtidos do desenho de projeto tais como raio interno, ângulo entre seções, abertura, etc. Também informações pertinentes à sua fabricação tais como valores de sobremetal, profundidade de solda, tipo de chanfro, entre outros.

É possível montar todo o processo de delineamento para cada obra realizada. Isto ajuda em consulta de procedimentos técnicos já realizadas. Também não necessita guardar desenhos em formato eletrônico ou papel já que são gerados rapidamente. Com este recurso tem-se uma economia considerável em custos de arquivamento.

Os tópicos a seguir detalham a formação do processo do delineamento.

4.2.2.1 – Seção

Conforme visto nas figuras 4.2 a 4.4 os equipamentos são constituídos por seções que formam a base da parametrização do sistema. A partir de cada seção define-se informação operacional para a geração do desenho e também do seu processo de fabricação. Na figura 4.5 são mostradas informações básicas para a composição de uma seção.



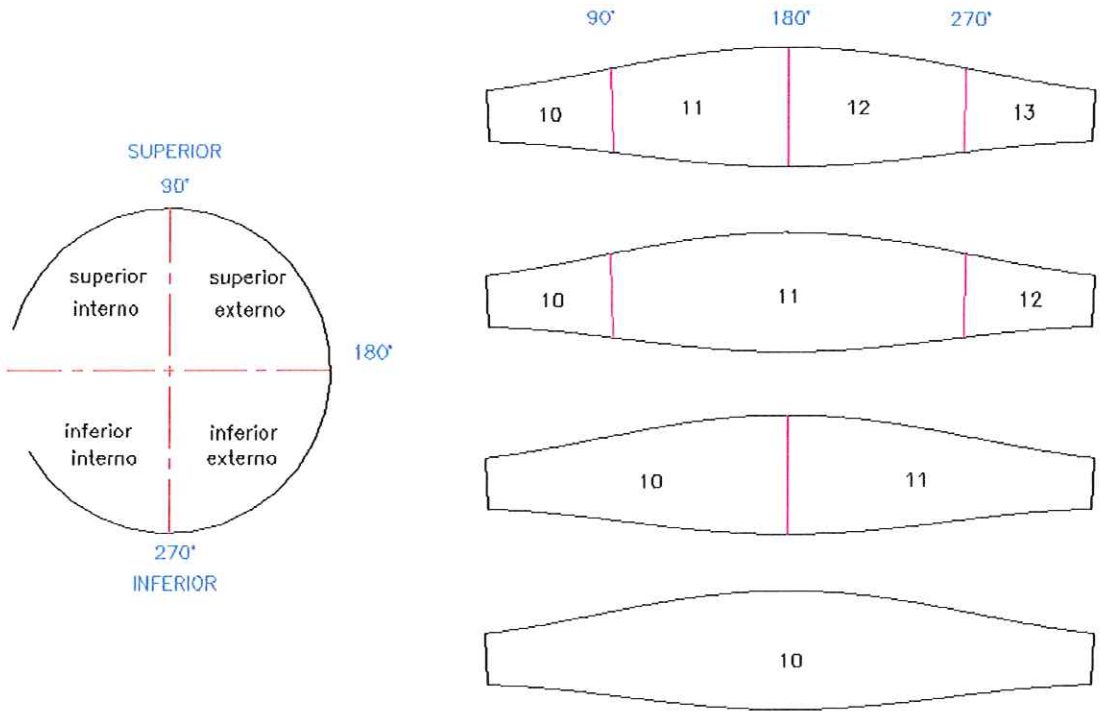
(a) seção na caixa espiral

(b) seção na tomada d´água, tubo de sucção, conduto forçado

Figura 4.5 – Identificação das posições da seção para os produtos.

Uma seção pode ser dividida em até 4 posições com opção de gerar valores de sobremetal em qualquer uma delas. O sistema permite atender todas as possíveis variedades de caldeiraria. No processo antigo, mesmo com o desenho CAD existente necessitava-se um enorme trabalho manual em ajustar o desenho na identificação das divisões. As figuras 4.6 a 4.8 ilustram essas possibilidades.

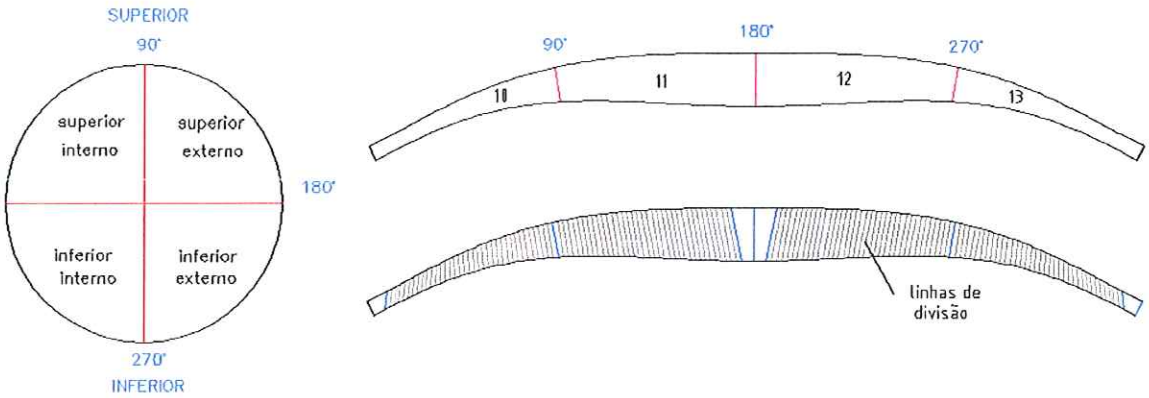
A diferença entre os produtos apresentados é que no casoda caixa espiral a divisão máxima permitida é em quatro posições e sempre determinada em quadrantes angulares pelo sistema (figura 4.6). Para o conduto forçado e tubo de sucção não existe limitação devido ao seu tamanho. Neste caso, o sistema permite que o usuário faça a escolha da linha de divisão (figura 4.7-b), ou através do perímetro da forma geométrica (figura 4.8b).



(a) Seção da caixa espiral

(b) planificação da seção (virola) em várias possibilidades: 4 peças, 3 peças, 2 peças, 1 peça.

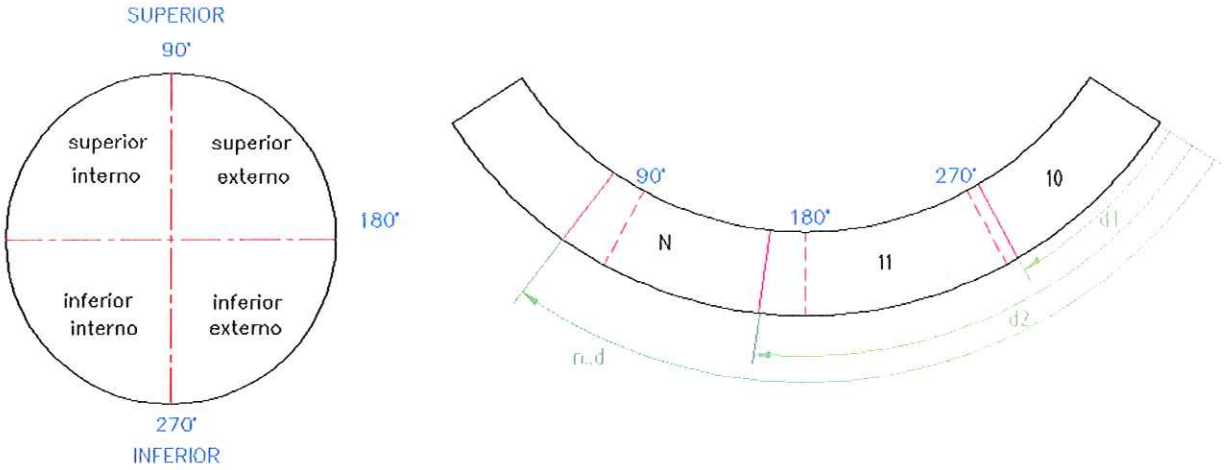
Figura 4.6 - Identificação parcial de dados para geração automática da divisão da virola.para caixa espiral e tomada d´agua.



(a) Seção do tubo de sucção

(b) planificação da seção (virola) em várias possibilidades, porém escolhendo a linha de divisão.

Figura 4.7 - Identificação parcial de dados para geração automática da divisão da virola.para tubo de sucção.



(a) Seção do conduto forçado *(b) planificação da seção (virola) em várias possibilidades, a partir de uma única referência.*

Figura 4.8 - Identificação parcial de dados para geração automática da divisão da virola.para conduto forçado.

Exceto no caso de bifurcação no conduto forçado, existem dados específicos para que seja efetuada a planificação. Como pode ser elementos de grande porte, normalmente a entrada da bifurcação pode ser dividida em até quatro seções, e as saídas em três seções. A figura 4.9 mostra o desenho esquemático em 2D de uma bifurcação.

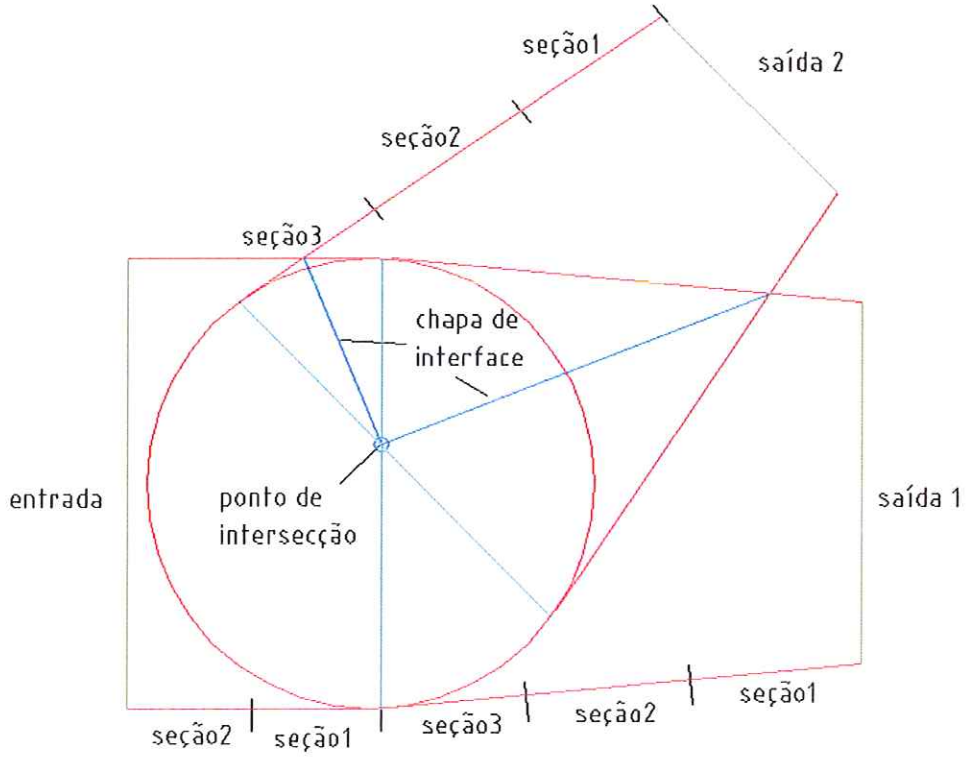


Figura 4.9 – Desenho esquemático 2D da bifurcação.

A planificação leva em consideração todo o elemento, sendo possível planificar somente a seção desejada. A figura 4.10 mostra o esquema de uma planificação da seção 3 sendo da saída 1 conforme visto na figura 4.9 .

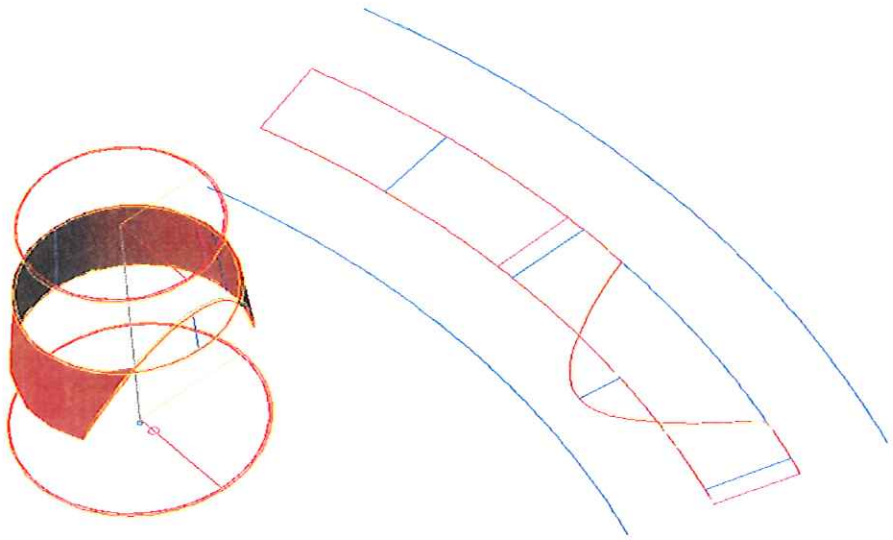


Figura 4.10 – Esquema da planificação de uma seção da bifurcação.

4.2.2.2 – Chanfros de solda

O sistema está capacitado a trabalhar em chanfro simples e chanfro duplo conforme visto na figura 4.11 . A determinação da escolha é baseada na espessura da chapa, sendo no caso, adotada acima de determinada espessura o chanfro duplo. O usuário pode também especificar a sua relação, ou seja, qual a porcentagem do chanfro duplo.

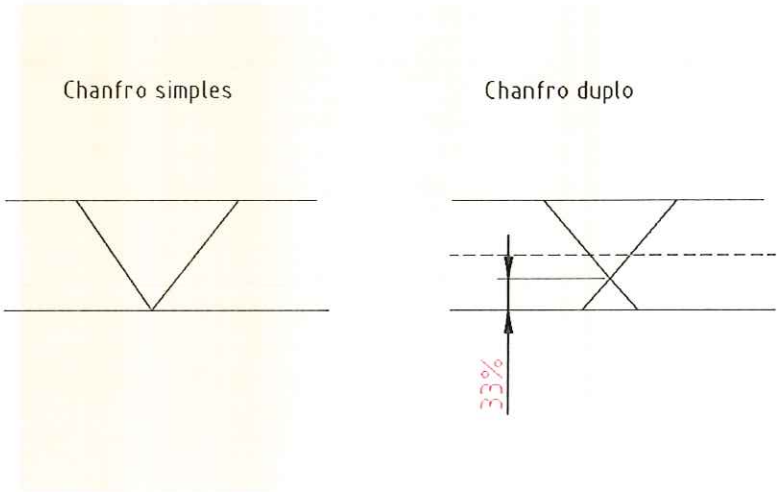


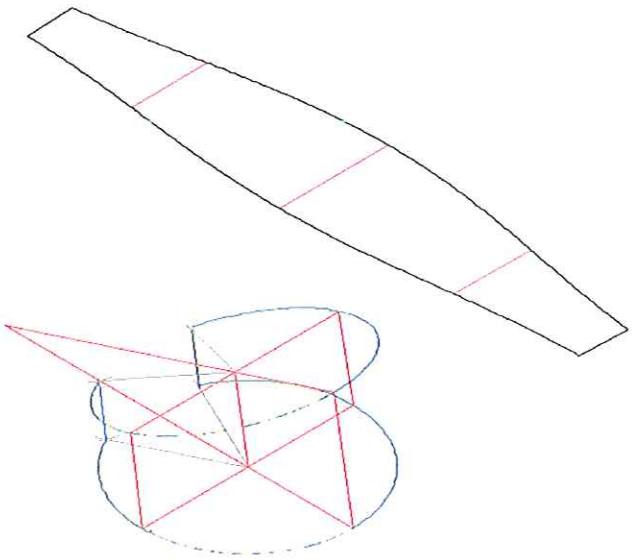
Figura 4.11 - Tipos de chanfro de solda.

4.2.2.3 – Planificação

A planificação efetuada pelo aplicativo desenvolvido é um fator determinante e o grande diferencial dos *softwares* de planificação existentes no mercado. Utiliza o método da triangulação (LOBJOIS,1977 ; MARCOS, 1975) para obter resultado de qualquer forma geométrica com alto grau de precisão. A precisão é obtida através da flecha entre aligação de dois pontos. Assim, o sistema pode gerar uma infinidade de pontos para a composição da planificação, sendo estes ligados através da entidade geométrica CAD conhecida por *polyline*[4].

Polyline é definido como um único elemento geométrico que pode agrupar diversas entidades como linhas e arcos. As linhas da composição formando a geometria do equipamento, no caso a seção de cada produto, são divididas em quantidades iguais de pontos através da flecha indicando o erro entre dois pontos, varrendo-se assim todo o perfil para a obtenção da peça planificada. As quantidades de divisões são iguais na base inferior e superior da seção conforme visto nas figura 4.6 a 4.8 .

No sistema desenvolvido, durante a planificação, cada ponto é compensado pelo perfil do tipo de chanfro adotado (figura 4.15), já que são espessuras de valores significativos (da ordem de 25 a 100 mm). As figuras 4.12 a 4.14 mostram a forma geométrica das seções dos produtos em estudo.



[4] Termo técnico para definição de agrupamento de linhas, definida pela empresa Autodesk (manual de referência e programação CAD).

Figura 4.12 - Seção planificada da caixa espiral.

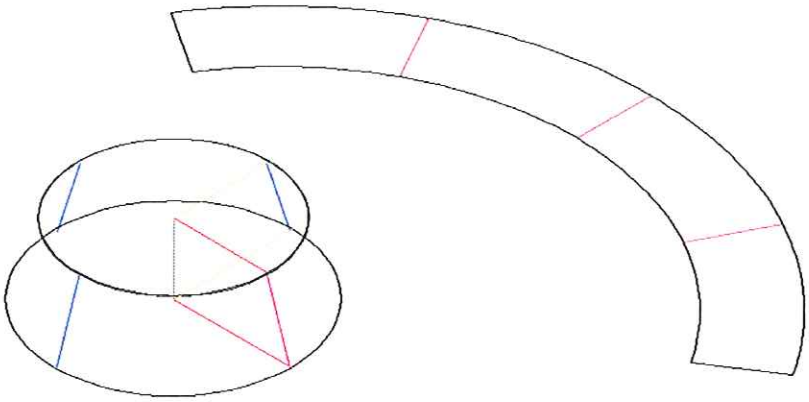


Figura 4.13 – Seção planificada do conduto forçado (formato tronco de cone).

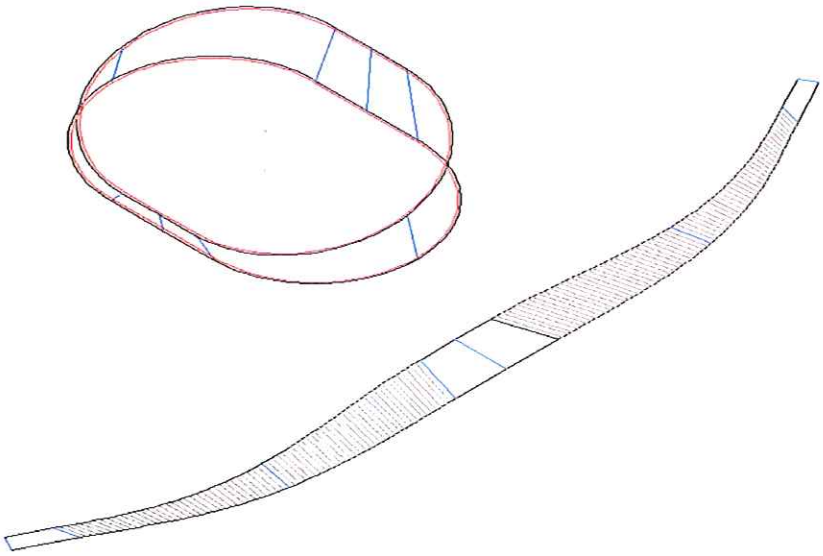


Figura 4.14 – Seção planificada do tubo de sucção.

Uma das razões para o desenvolvimento do módulo de planificação foi a carência do recurso de compensação nos programas comerciais, ou seja, a planificação é executada somente pela linha média da espessura da chapa.

No caso, os produtos em estudo utilizam chapas espessas (espessuras variando de 25 mm a 100 mm) necessitando assim a compensação em relação à linha neutra conforme o tipo de chanfro adotado (simples ou duplo). A compensação pode variar em até 20 mm ao longo do perfil da virola, sendo que o perfil pode atingir um perímetro superior a 20 metros. Este excesso ou falta de material torna extremamente trabalhoso e

custoso para a empresa adotar um procedimento de retrabalho em fábrica através do enchimento por cordão de solda, ou utilização de grafite para retirada do material. Isto também pode causar sérios problemas de empenamento na chapa, devido ao aquecimento e relaxamento de tesões de dobramento, dificultando ainda mais o seu manuseio e o perfeito fechamento das partes na montagem final.

4.2.2.4 – Compensação do perfil planificado

Observar que a figura 4.15 ilustra o fato de que cada ponto planificado pode ser aumentado ou diminuído em sua largura (corpo i e corpo i+1) devido ao tipo e ângulo do chanfro adotado. Sem o auxílio do sistema proposto estes ajustes são realizados de maneira artesanal, o que provoca atrasos e constantes correções.

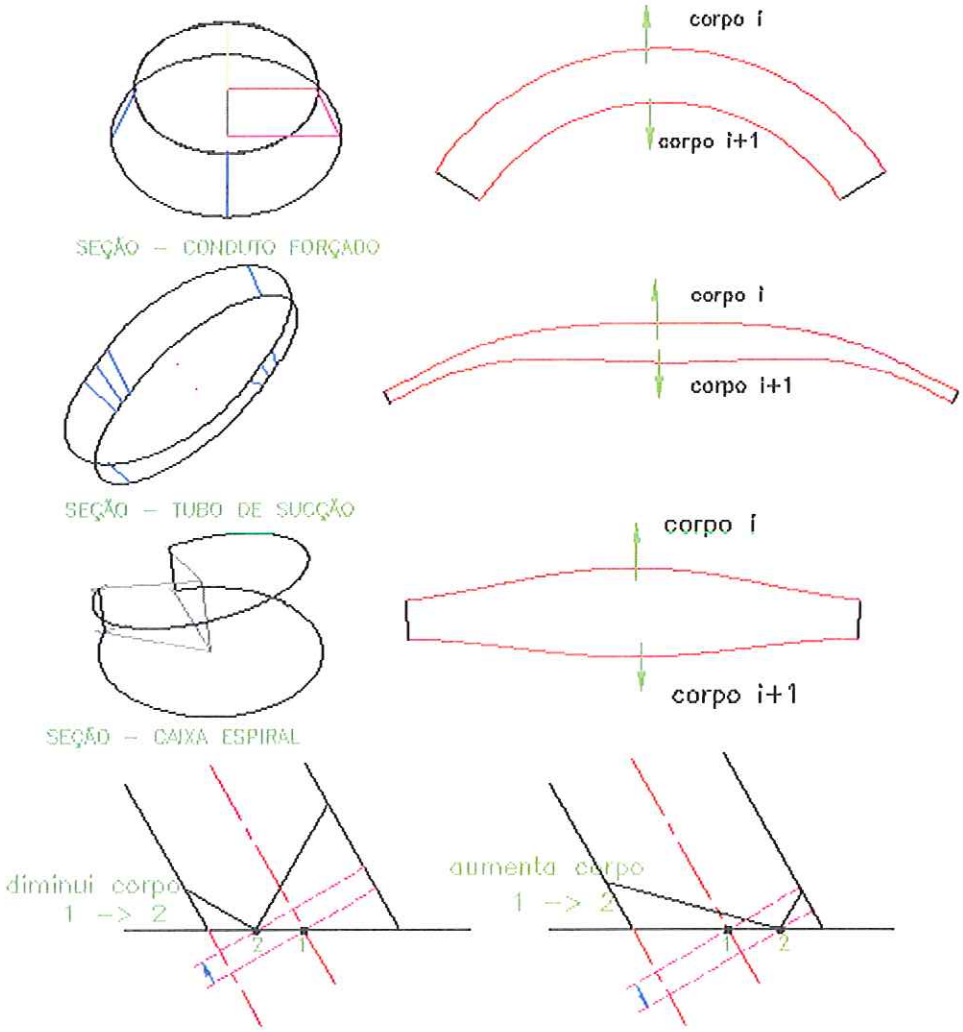


Figura 4.15 - Perfil planificado e compensado.

O chanfro duplo utilizado no "corpo i" e "corpo i+1" da figura 4.13 ilustra a necessidade de compensar o perfil no corte. Para grandes espessuras, ou seja, espessuras acima de 25,4 mm, a compensação é significativa e a linha média (ponto 1 / figura 4.15) utilizada na planificação deve ser corrigida (ponto 2 / figura 4.15).

Convém salientar que esta compensação ocorre somente ao longo do corpo "i" e "i+1" de uma seção. Quando a seção possui emenda para a formação de uma virola (figura 4.6), o chanfro da emenda não necessita desta correção.

O resultado da correção pode ser visto na figura 4.16 se adotado o chanfro duplo em todo o percurso do "corpo i" e "corpo i+1". A linha primitiva, representada pelo ponto 1 está na cor preta, e a linha vermelha é a representação da correção pelo ponto 2.

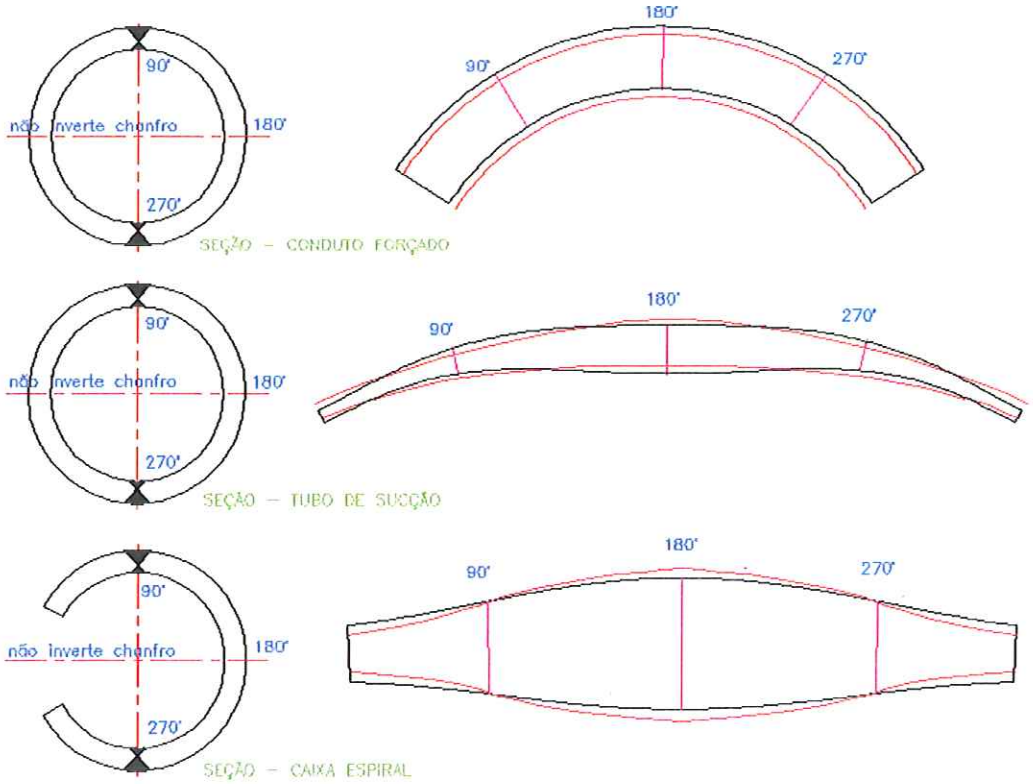


Figura 4.16 - Efeito da compensação dos pontos 1 e 2 planificado em função do chanfro de solda.

4.2.2.5 – Inversão do chanfro de solda

Somente para o caso da caixa espiral com dimensões básica superior a 15 metros (figura 4.2), a abertura do chanfro pode ser alternada. Verificar que no exemplo da figura 4.16 a abertura do chanfro maior está voltada para o lado externo e abertura do chanfro menor para o lado interno. Assim, para caixa espiral de grande porte, ao soldar a emenda entre seções que no caso é realizada em campo, existe uma facilidade natural da posição de solda em meia seção. A partir de sua metade (180°), existe uma inversão de posição onde o soldador encontra dificuldades para execução, ou seja, torna-se uma soldagem sobre cabeça.

Para deixar o soldador sempre em posição favorável de soldagem, o sistema prevê uma inversão de chanfro automática, cuja correção é invertida a partir da metade da seção. A figura 4.17 exemplifica o recurso tendo como referência o mesmo exemplo da figura 4.16. Observar que na metade da seção planificada (180°) existe um degrau no perfil.

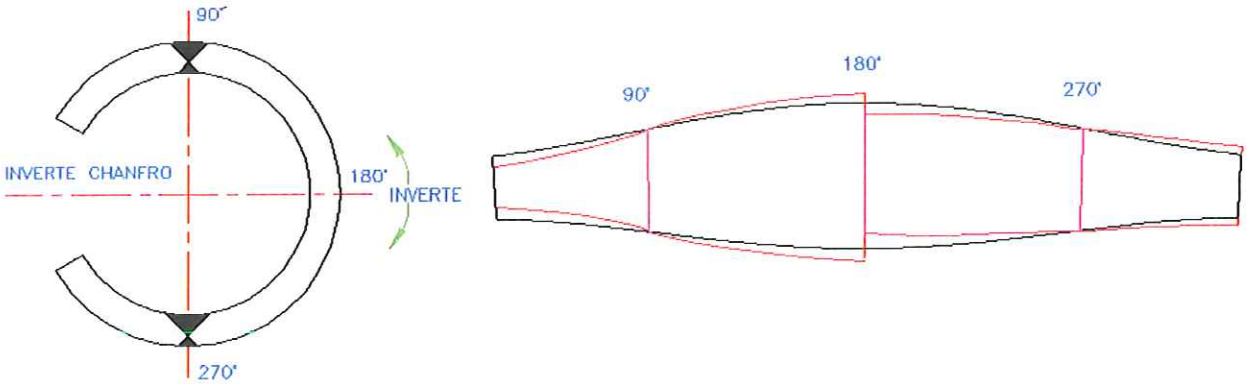


Figura 4.17 - Efeito da compensação dos pontos 1 e 2 planificado em função do chanfro de solda, com inversão à 180°, somente para caixa espiral.

4.2.2.6 -Tipos de sobremetal permitido

O sistema permite também a compensação de um sobremetal constante para o corpo e extremidades, conforme visto na figura 4.18. Este recurso pode ser usado em qualquer produto, normalmente em grandes obras.

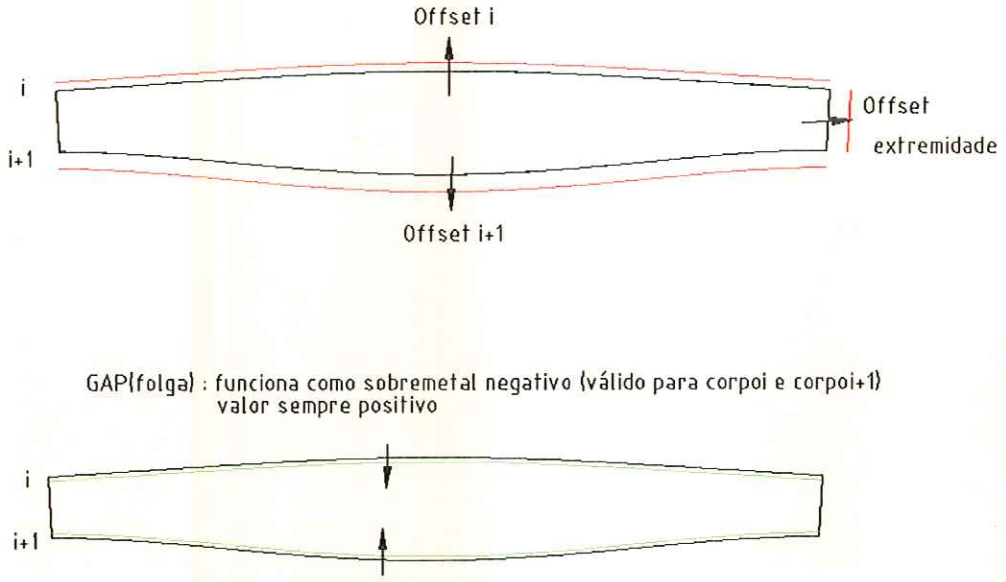


Figura 4.18 - Tipos de sobremetal permitido.

4.2.2.7 - Tipos de junção

O sistema permite ao usuário escolher o tipo de junção na extremidade de cada seção, ou seja, o programa após a planificação e a adição do valor da correção no perfil do corpo, também compensa cada ponto do perfil da extremidade com valores do tipo de junção adotada (figura 4.19). No caso, pode ser junção do tipo "prédistribuidor", "junção radial" e "junção com chapa de transição". A figura 4.19 mostra detalhes geométricos de formação da junção que pode ser adotada.

Esta característica é válida somente para seção com abertura (figura 4.5a – valor H). No caso, somente caixa espiral possui esta necessidade.

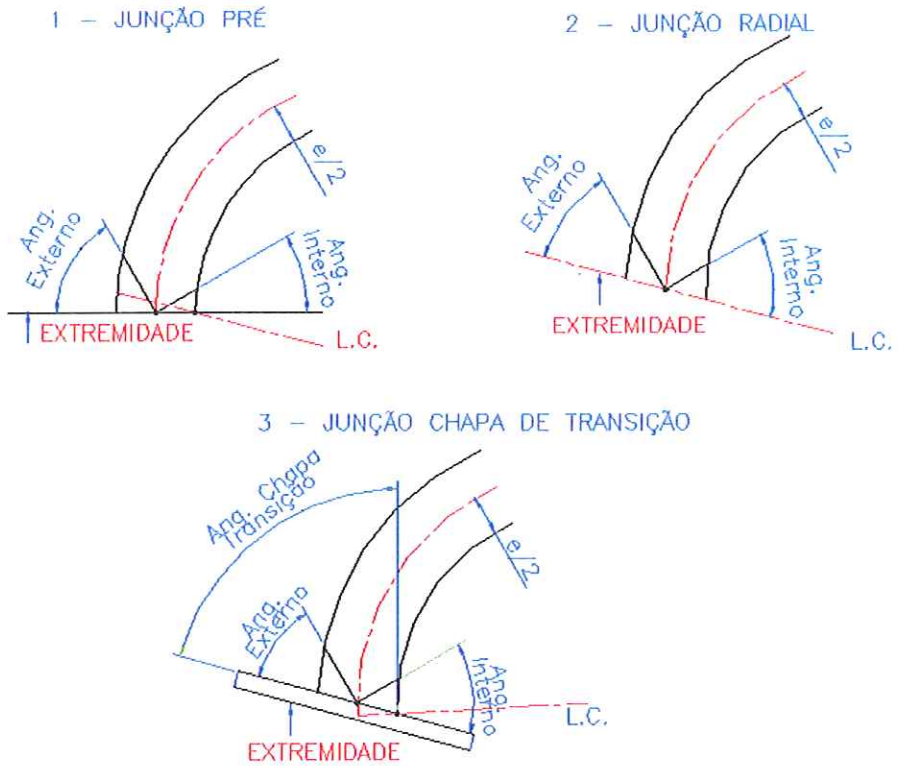


Figura 4.19 - Tipos de junção nas extremidades de cada seção.

4.2.2.8 – Marcas e referência paraprogramação CN

A preparação para dobrar a chapa constitui em si a formação da virola. Porém, devem existir referências na seção planificada para que na fase do corte da peça, venha com marcas que facilite a sua dobra.

Durante o processo de planificação, como são equalizadas as quantidades de pontos na borda superior e inferior, tornase possível especificar marcas conforme necessidade da dobra. As quantidades de pontos são determinadas pelo usuário e o tipo de referência pode ser próprio para pantógrafo com e sem cabeçote traçador. Para o primeiro caso é desenhado uma linha interligando as bordas superior e inferior, e no segundo são geradas marcas no formato "V".

A figura 4.20 mostra um exemplo de formação da referência para dobra.

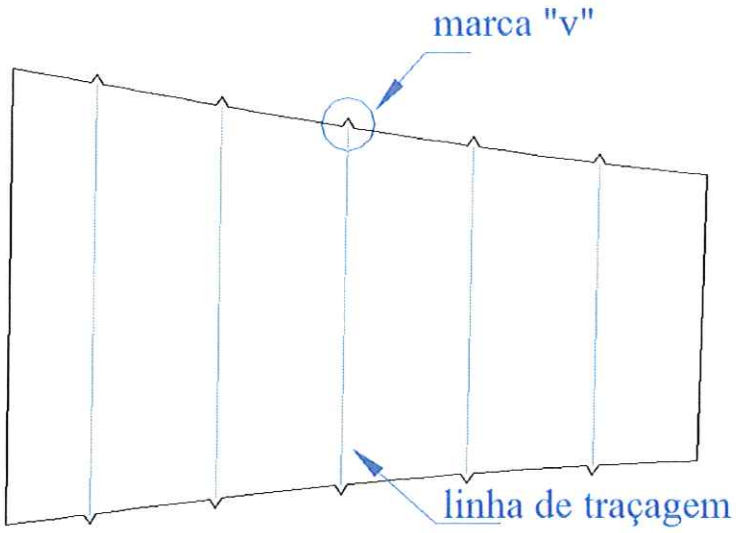


Figura 4.20 - Tipos de referência para beneficiar o processo da dobra.

4.2.2.9 – Rampa de transição entre junção de emenda

Ao trabalhar se com diferentes espessuras de chapas é saudável a execução de uma rampa de transição para suavizar a emenda. A rampa é uma proporção entre as espessuras de emenda das chapas.

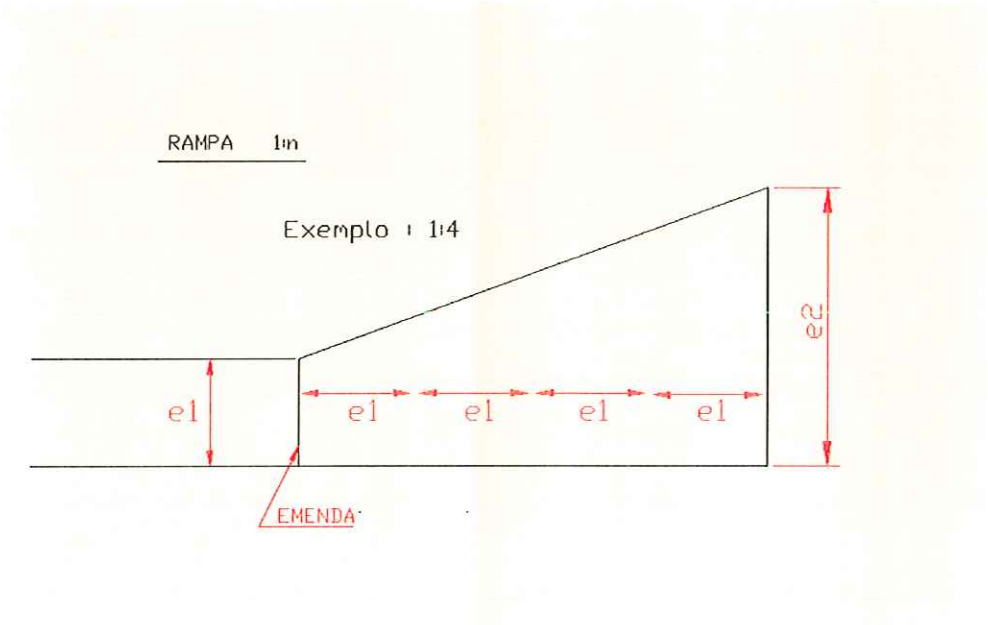


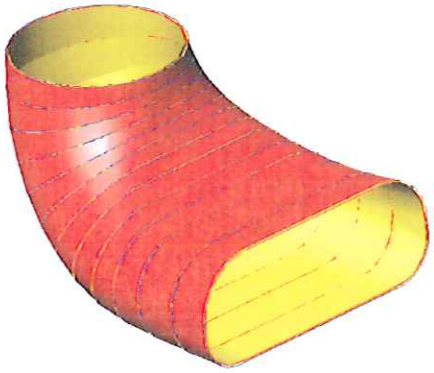
Figura 4.21 - Rampa de transição para chapas de diferentes espessuras.

4.2.3 - Geração de desenhos

Como já mencionado que o desenho do projeto hidráulico é realizado em 2D, o sistema prevê uma extensa gama de recursos para a geração de desenhos, podendo ser bidimensionais e tridimensionais.

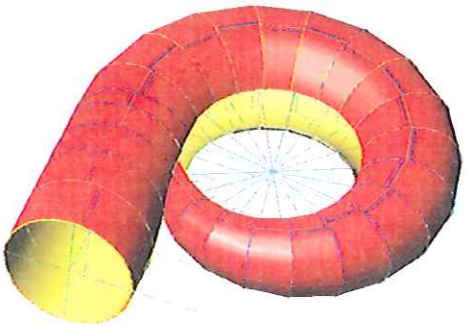
4.2.3.1 - Desenhos 3D

A visualização dos equipamentos em 3D tornou-se uma necessidade para os usuários, pois a partir da simples visualização do modelo em superfícies, permitiu a checagem imediata de dados para determinação da forma geométrica. Uma simples verificação, como o alinhamento das emendas de solda entre seções, proporcionou uma grande agilidade na qualidade do produto evitando possíveis re-trabalho (figura 4.22c). Os desenhos tridimensionais são gerados em superfícies.



(a) Tubo de sucção

(b) Bifurcação do conduto forçado



(c) Caixa Espiral

Figura 4.22 – Desenhos tridimensionais dos produtos.

4.2.3.2 - Croquis de delineamento

Os croquis de delineamento são desenhos detalhados para fabricação de peça, gerados no formato 2D. Neste momento, a seção planificada pode ser dividida em partes conforme determinação do usuário e, para cada parte gerada, gera-se o croqui de delineamento para ser usado na área de corte. O desenho é gerado praticamente de maneira automática, contendo as seguintes informações:

- perfil compensado devido ao chanfro escolhido (figura 4.17) ;
- máscara do formato gerado em função do tamanho do desenho, ou seja, o desenho do perfil sempre está na escala 1:1;
- o detalhe do chanfro de solda é gerado automaticamente, sendo somente o posicionamento de localização no desenho manipulado pelo usuário ;
- as cotas principais são geradas automaticamente atendendo a quase 100% da necessidade do desenho. Havendo alguma particularidade, o usuário também deve fazê-lo manualmente.

Os chanfros de solda foram preparados para realizar desenhos no tipo simples e duplo. A figura 4.23 mostra um desenho de um croqui de delineamento.

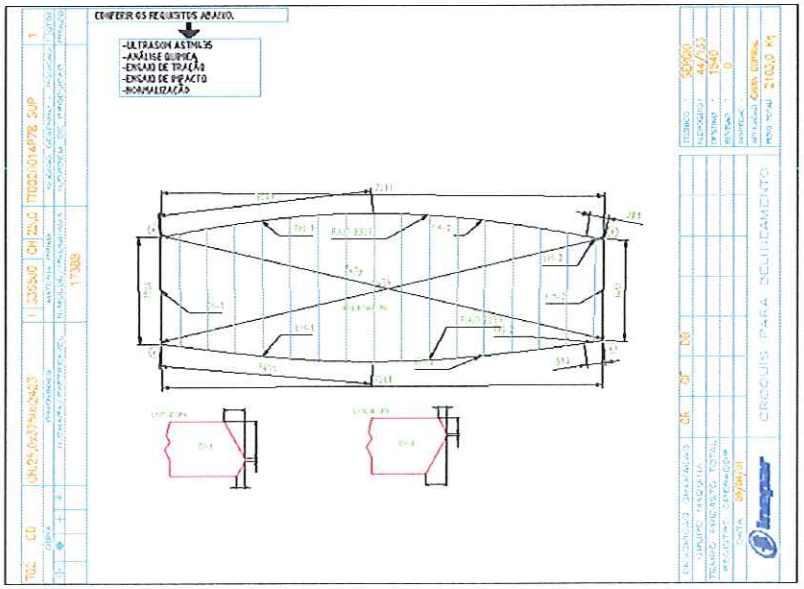


Figura 4.23 – Desenho 2D : croqui de delineamento.

4.3- Requisitos de software e hardware

O sistema foi desenvolvido numa plataforma CAD, utilizando recursos computacionais do software da AutoDesk. O sistema funciona na versão do Mechanical Desktop 2002 ou superior.

Para um bom desempenho do sistema torna-se necessário a seguinte configuração mínima de *hardware* : processador Pentium IV com clock de 1.6 Ghz, memória RAM de 256 Kbytes.

Para geração de itens planificados e desenhos de croquis, o processador Pentium III é suficiente para gerar bons resultados. Somente para geração de desenhos 3D, com várias seções simultaneamente, tornase necessário uma configuração melhor.

4.4- Recurso humano necessário

Para Oliveira e Coelho (2002), o profissional do futuro de chão de fábrica deverá lidar com diversas tecnologias de controle e monitoramento do processo de fabricação. Assim, o profissional a ser preparado para utilização do sistema, além do conhecimento do processo de fabricação do produto, deverá ter bons conhecimentos de micro-informática e CAD. São conhecimentos fundamentais para obtenção da qualidade sobre a informação gerada.

Um dos objetivos do trabalho é permitir que o profissional não especialista em caldeiraria possa realizar trabalhos técnicos de níveis complexos. Com a utilização deste sistema, torna-se possível realizar esta tarefa.

Como conseqüência, tem-se a ascensão dos especialistas para outras atividades consideradas específicas, as quais pudessem resolver problemas emergenciais em campo ou em processos de fabricação, fato que exige grande experiência para tomada de decisão.

5 – APLICAÇÕES DO SISTEMA DESENVOLVIDO

Este capítulo mostra exemplos de aplicação do sistema proposto para o processo de delineamento de peças para os produtos "caixa espiral", "tubo de sucção" e "conduto forçado". Para a "caixa espiral" e "tubo de sucção" os exemplos mostrados já foram aplicados e utilizados em obras. Para o "conduto forçado" foi simulado um exemplo de modo a explorar toda a sua potencialidade.

5.1– Aplicação em "caixa espiral"

O processo de delineamento da caixa espiral possui as seguintes etapas: desenho tipo *wireframe* 3D de cada seção (item 4.2.2.3), a planificação, a geração de referências para realizar o corte em pantógrafo CN (item 4.2.2.8), croqui de delineamento 2D para auxílio na fabricação eno processo oxicorte (item 4.2.3.2), e geração de croqui 3D para auxílio na montagem da seção.

5.1.1 – Entrada de dados

A figura 5.1 ilustra a entrada de dados no sistema, sendo que o item "a" mostra os dados gerais que servem a todas as seções. A figura 5.1(b) mostra uma tela de dados que corresponde à construção paramétrica de cada seção. A figura 5.1(c) mostra a entrada de dados com os detalhes para a fabricação de cada seção, tais como possibilidade de emenda nos quadrantes desejados, identificação de cada posição com respectiva espessura, sobremetal e tipo de chanfro que pode ser adotado na extremidade, entre outros.

O tipo de chanfro no corpo é definido para toda a caixa espiral, visto no caso, na figura 5.1(a) em dados gerais. O chanfro da extremidade é opcional, ou seja, é possível determina-lo de maneira genérica ou específica para cada seção. É possível verificar esta possibilidade na figura 5.1(c) a partir da especificação do chanfro para extremidade.

VIROLA - dados gerais

Informação Técnica

Obra: T053CD
Código Desenho: TTD050014
Revisão: 0
Título I.T.: Conformação
Código I.T.: ITC020180
Materia prima: 1A516D
Data emissão: 02/10/02
Emitente: TONINHO
Destino: 1610

Dados gerais

Angulo entre seções: 18
Deslocamento inicio tomada d'água: 504
Flecha (tolerância): 1
Qtde de divisões no trecho 180-90o: 8
Gap: 0
Move posição - referência p/ CN
Rampa (1:n): 3
Esp.limite chanfro simples: 19
Chanfro duplo (valor 0 a 1): 0.3
Angulo de inicio da tomada d'água: 9
Altura da marca: 3
Seção transição tomada dagua/inicio caixa espiral: 1
Traçagem
Marca (V)
Ambos

Sentido da Turbina

Horario
Anti-Horario

Inversão de Chanfro

Sim
Não

Tipo de Junção

Pré-distribuidor
Chapa de transição
Radial
Angulo chapa de transição superior: 70
Angulo chapa de transição inferior: 25

Próximo
Retorna
OK
Cancel
Help

Figura 5.1a – Entrada de dados gerais.

VIROLA - DADOS SEÇÃO

	Seção	Raio Interno (RI)	Linha centro turbina (ZI)	Abertura (H)
7	2	2338	7799	960
8	3	2320	7759	960
9	4	2299	7715	960
10	5	2274	7662	960
11	6	2244	7599	960
12	7	2211	7526	960

Próximo
Retorna
OK
Cancel
Help

Figura 5.1b – Entrada de dados paramétricos para desenho da seção.

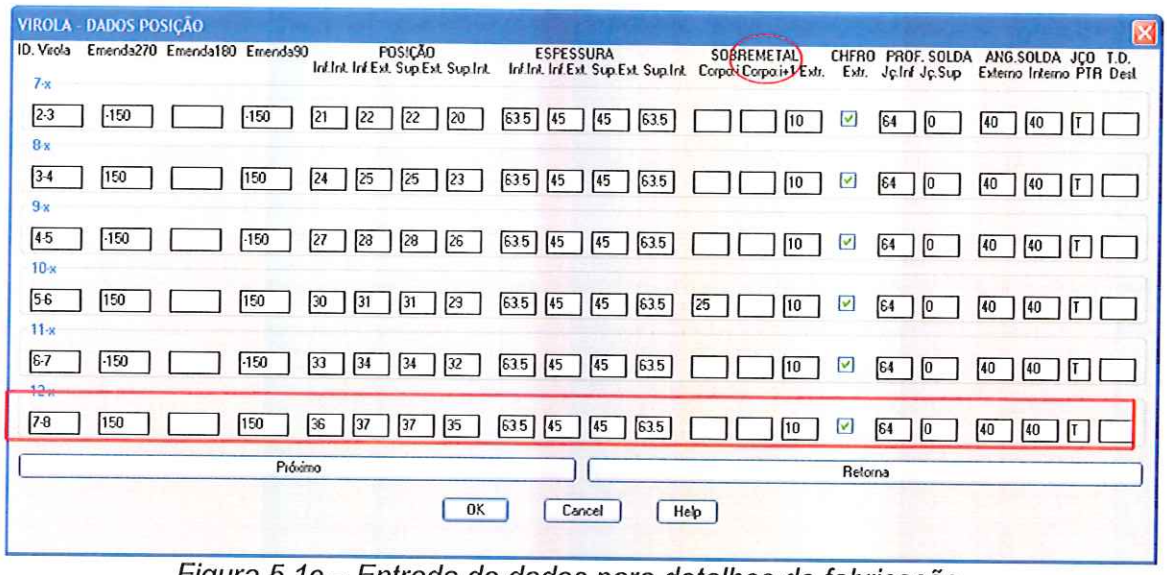


Figura 5.1c – Entrada de dados para detalhes de fabricação.

Observa-se que para a entrada de dados das informações paramétricas de desenho e de fabricação (figura 5.1b e figura5.1c), são válidas para até 36 seções.

5.1.2 – Desenho *wireframe* 3D

O desenho *wireframe* 3D utiliza os dados paramétricos para construção de sua geometria. A figura 5.2 mostra o resultado conforme dados da seção 6 e 7 identificados na figura 5.1b.

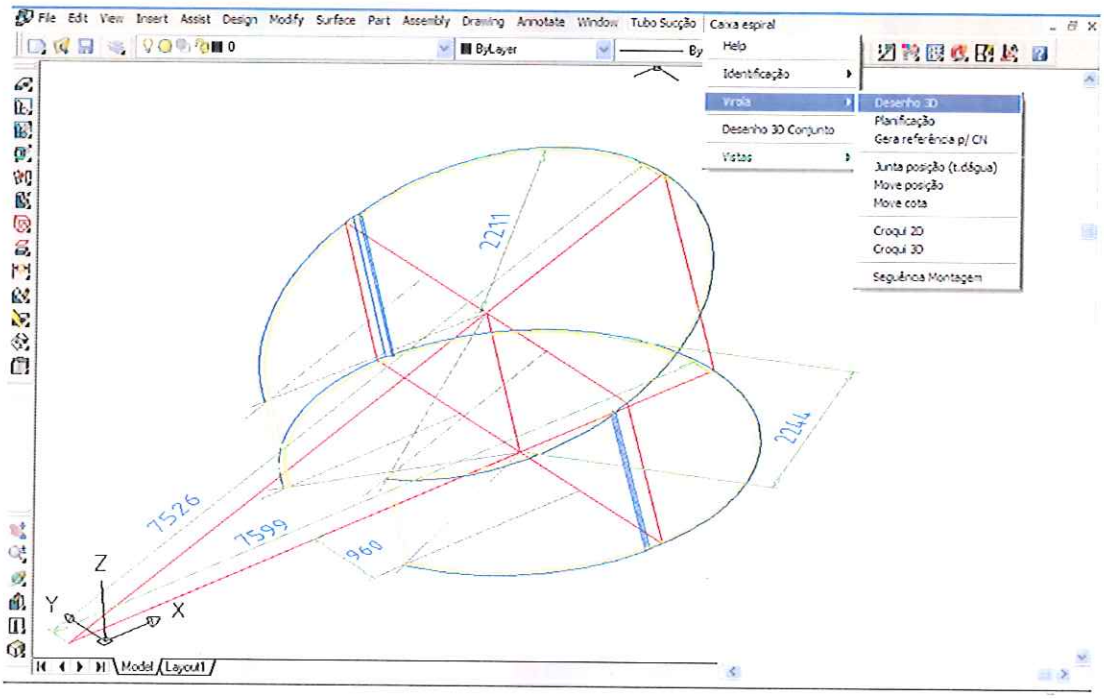


Figura 5.2 – Desenho 3D wireframe.

5.1.3 – Planificação da seção

A planificação é gerada com informações da tela de entrada conforme visto na figura 5.1(c). O exemplo a seguir mostra a planificação das seções 6 e 7. Observar o sobremetal de 150 mm nos quadrantes 90° e 270° . Este sobremetal é um recurso para estender onde será determinado o corte da peça para evitar que as emendas de solda coincidam entre seções. Isto é visto na figura 5.3 observando as linhas de cor "azul" que indicarão a separação das peças. Conforme o exemplo dado, haverá separação nos quadrantes de 90° e 270° .

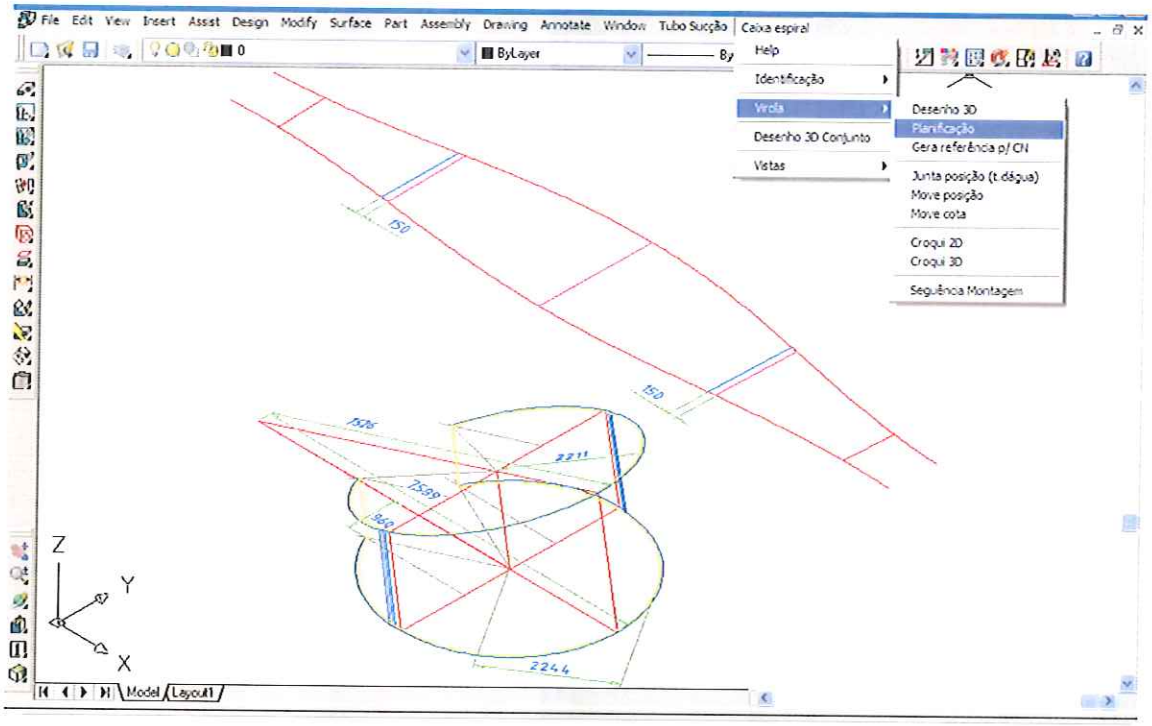


Figura 5.3 – Planificação da seção 6 e 7.

O processo de planificação consiste na divisão de pequenos segmentos de retas da base inferior e superior em números iguais de pontos, utilização do método da triangulação para geração do perfil planificado, e a correção conforme chanfro adotado.

O apêndice D mostra detalhes do procedimento.

EESC-USP Biblioteca CAMPUS DE S. CARLOS

5.1.4 – Referência de marcas para dobra

Neste momento, o perfil gerado na planificação é alterado com definições das marcas de dobra e identificação da posição, de modo a facilitar a separação da peça. As informações para quantidade de divisões, altura de marca, etc, são tratadas para todas as seções, visto na figura 5.1(a). Desta maneira, o perfil já está em condições de ser enviado para máquina de oxicorte.

A figura 5.4 mostra a divisão de marcas para orientação na calandra ou dobradeira. No caso, o pantógrafo da empresa não possui cabeçote "traçador", sendo utilizado portanto as marcas em "V" conforme visto no capítulo "4", e o próprio operador ligas os pontos através de marcador industrial. Este recurso é amplamente usado para auxiliar na operação de dobra.

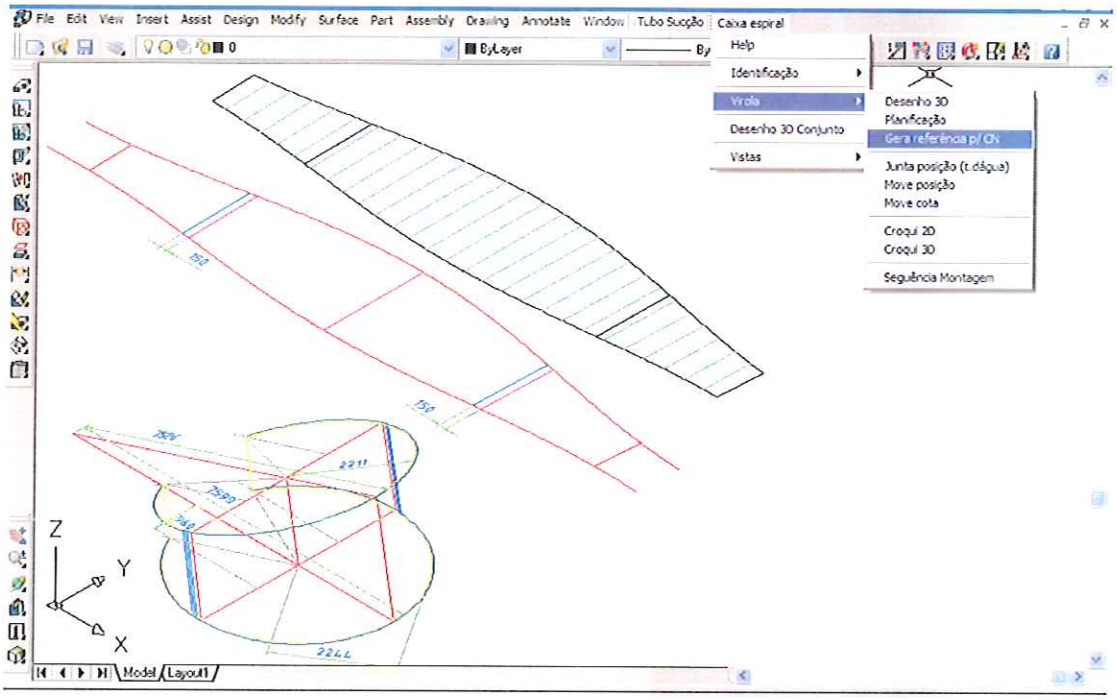


Figura 5.4 – Definição do perfil para ser cortado em máquina oxicorte e orientação de referência para dobra na calandra.

5.1.5 – Croqui de delineamento 2D

Como foi optado em duas divisões (90° e 270°), com apenas um clique no perfil, é realizado a construção do desenho emitido para fabricação

(croqui de delineamento). A figura 5.5 mostra as três peças no formato final a ser enviado à fabricação.

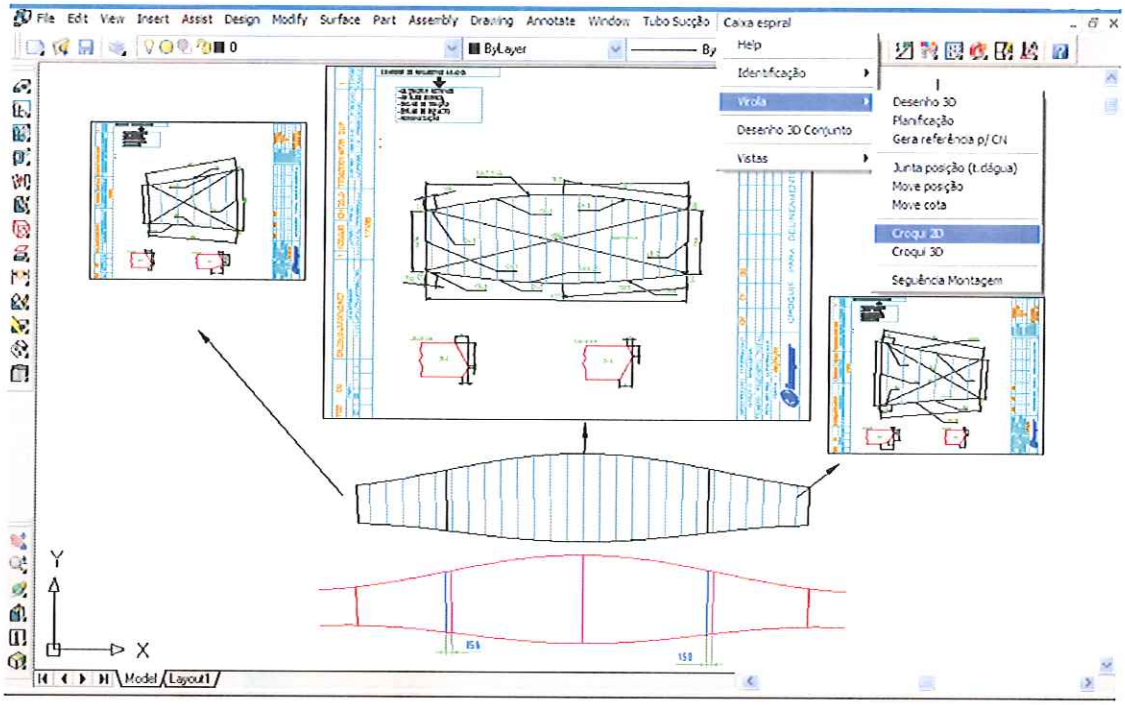


Figura 5.5a – Desenho de fabricação (croqui de delineamento).

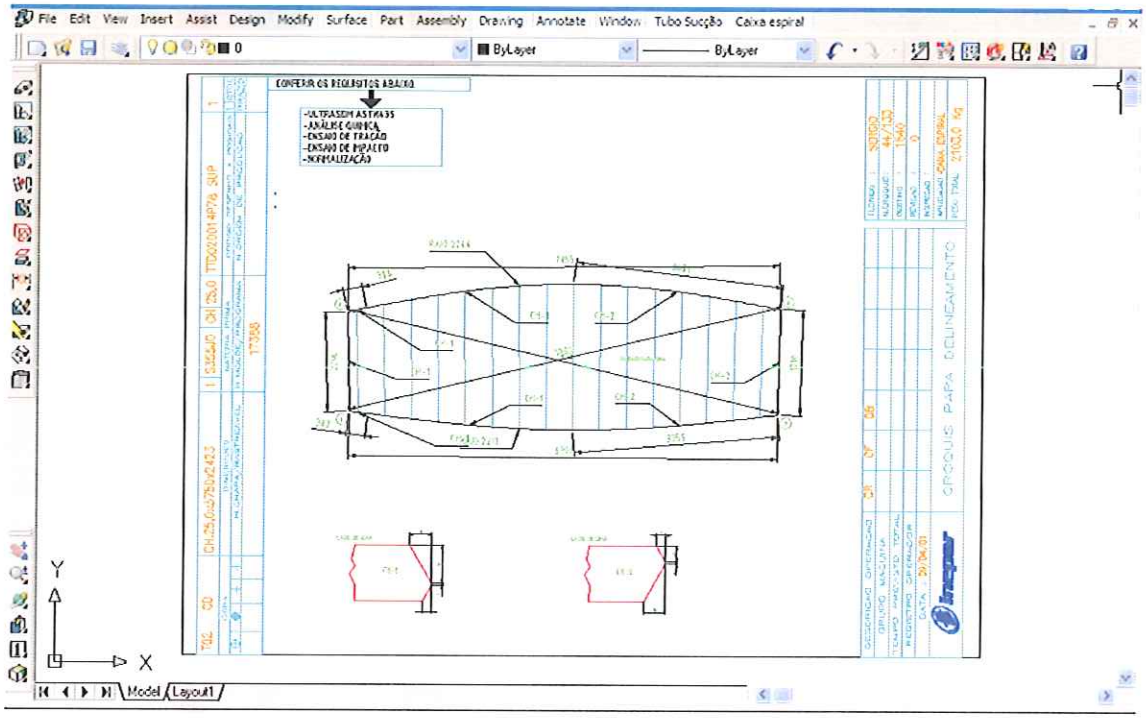


Figura 5.5b – Detalhe da virola maior.

Assim, o processo do croqui é repetido para as outras duas posições conforme figura 5.5(a), e também para todas as seções que compõem a caixa espiral

5.1.6 – Croqui de montagem 3D

O croqui de auxílio na montagem da seção pode ser gerado em qualquer momento após o desenho *wireframe* 3D.

O croqui de montagem, representado pela figura 5.6, é amplamente utilizada no setor de caldeiraria da empresa para conferência da montagem da seção, pois através de cotas principais e perímetro das bordas superior e inferior, os colaboradores da caldeiraria garante a montagem em campo sem ajustes de compensação.

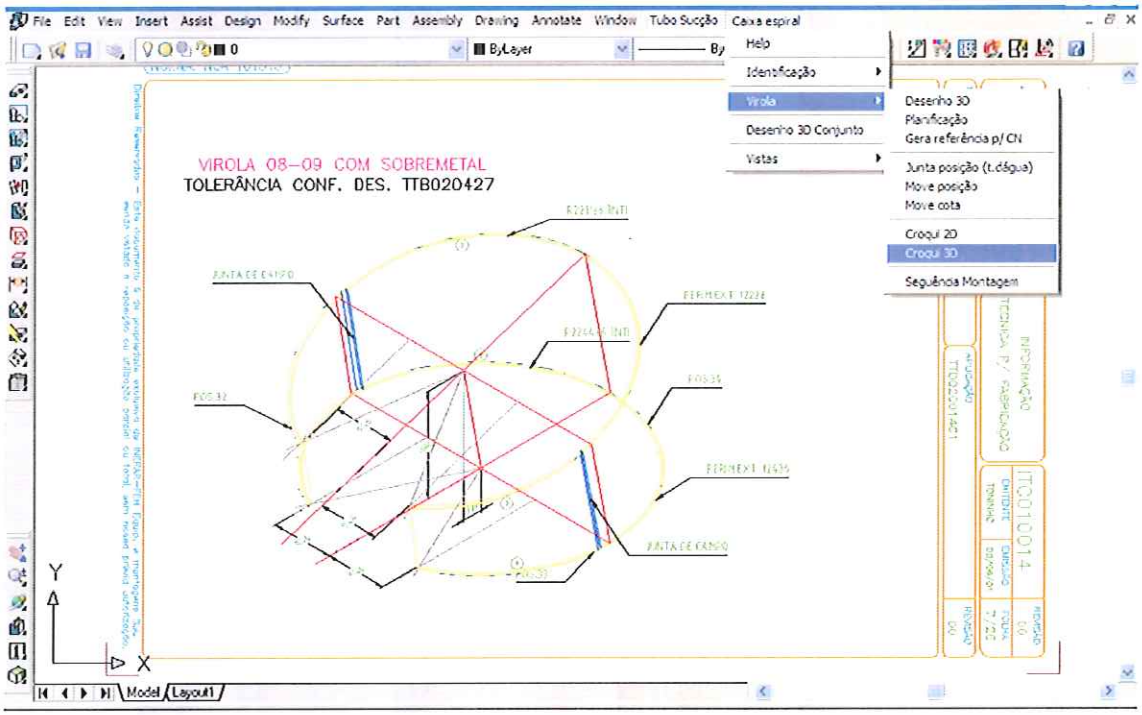


Figura 5.6 – Croqui de auxílio para montagem da seção.

5.1.7 – Geração de desenhos em 3D

O desenho para auxílio de montagem do conjunto pode ser realizado com qualquer quantidade das seções. A figura 5.7(a) mostra um exemplo de seis seções, já a figura 5.7(b) mostra a caixa espiral em 3D com sua total composição.

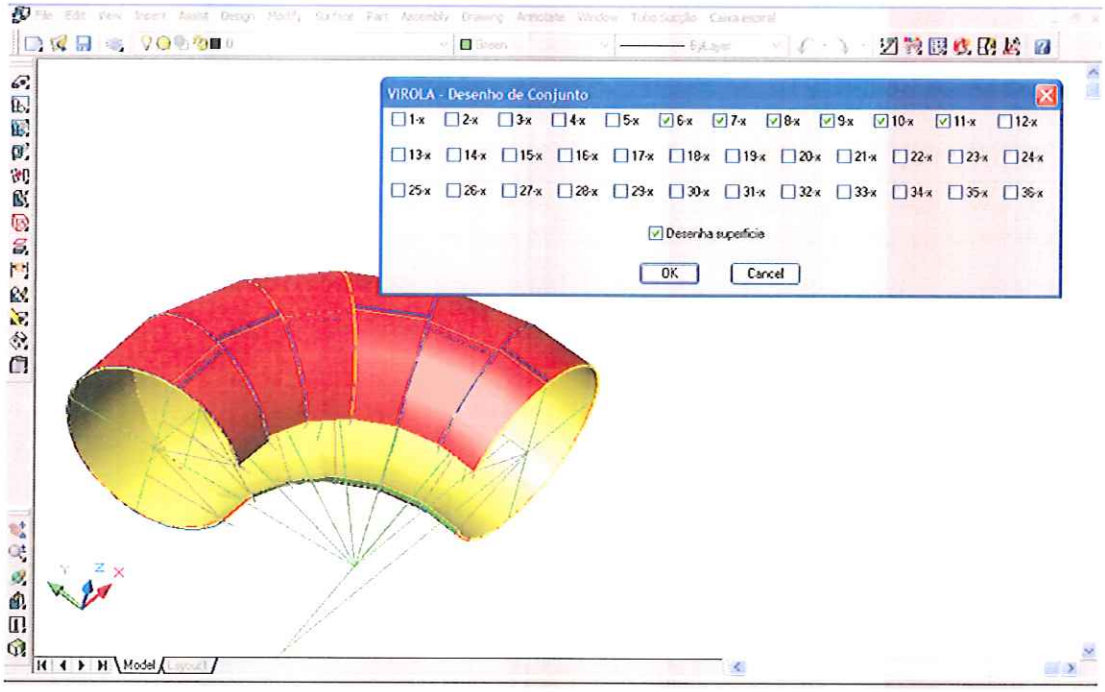


Figura 5.7a – Desenho de conjunto parcial.

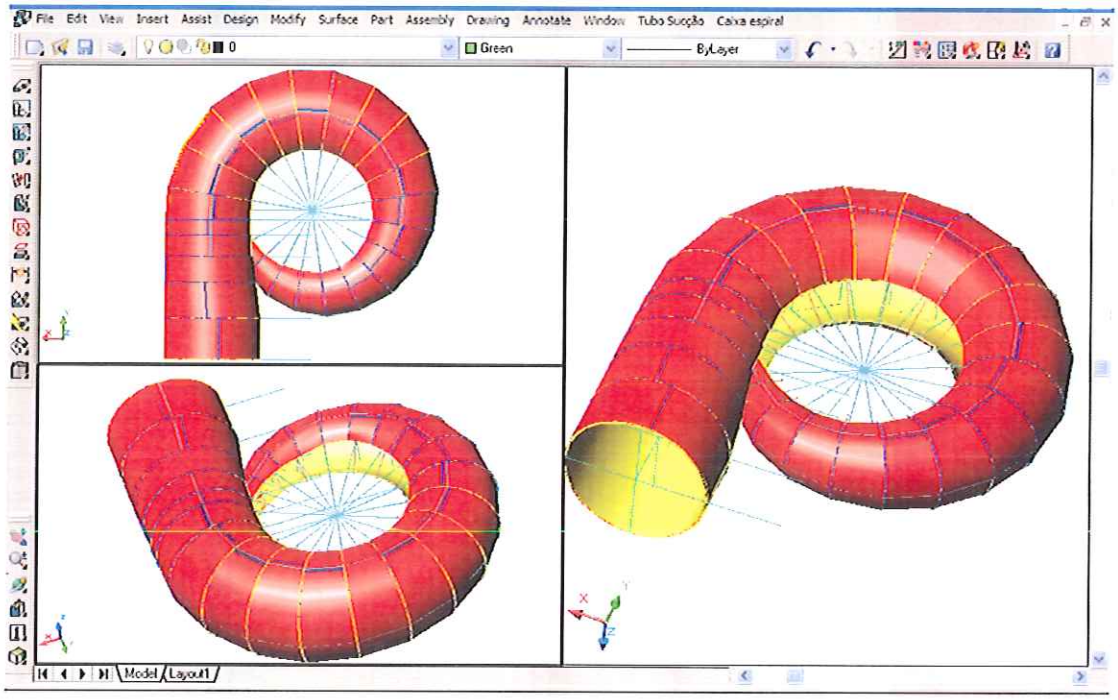


Figura 5.7b – Desenho do conjunto total.

O apêndice E detalha a geração de superfície de uma seção.

5.2– Aplicação em "tubo de sucção"

O processo de delineamento para tubo de sucção é muito semelhante ao da caixa espiral, seguindo praticamente todos os passos da caixa espiral.

5.2.1 – Entrada de dados

Análogo à caixa espiral, existem três telas específicas para preenchimento dos dados onde a primeira tela corresponde a dados gerais, sendo mais simples pois, neste produto a espessura é única para todo o conjunto.

A figura 5.8(a) mostra os dados genéricos para o tubo de sucção, tais como espessura da chapa, valor limite para determinação do tipo de chanfro e tolerância. A figura 5.8(b) mostra a tela depreenchimento dos dados paramétricos para geração de desenho, e a figura 5.8(c) apresenta opções de sobremetal em alguma seção. O sistema atende a necessidade para até 36 seções.

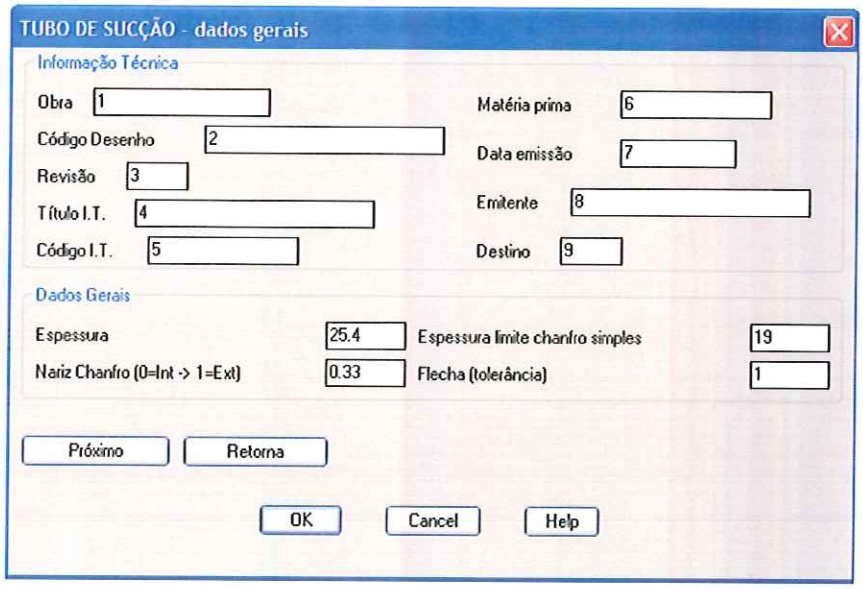


Figura 5.8a – Entrada de dados (tela de dados gerais).

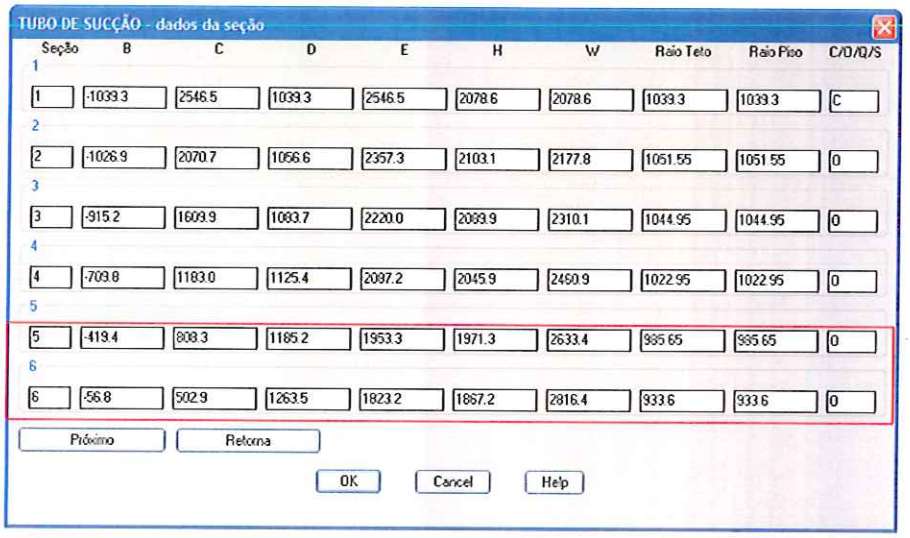


Figura 5.8b – Entrada de dados (dados geométricos).

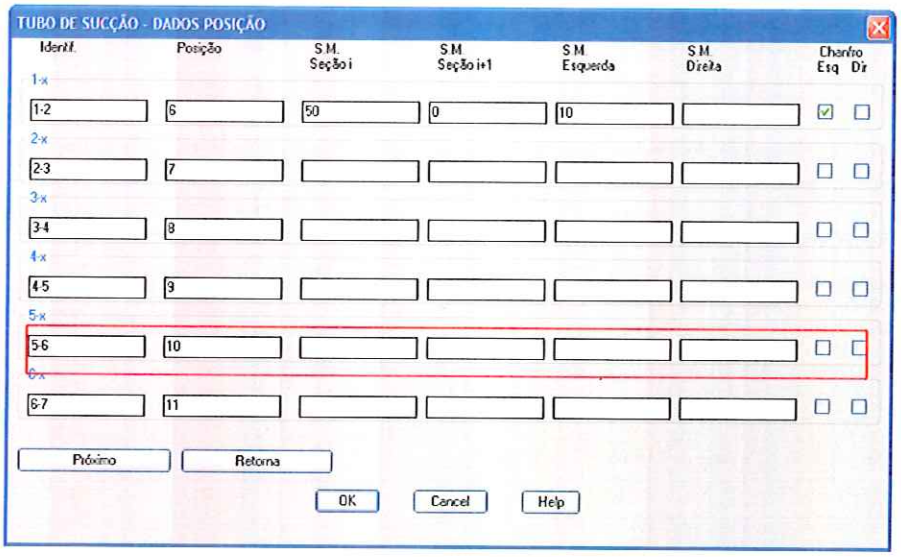


Figura 5.8c – Entrada de dados (dados de fabricação).

5.2.2 – Desenho *wireframe* 3D

Para o exemplo mostrado abaixo, segue o procedimento para delinear as peças que compõem as seções 5 e 6, identificadas na figura 5.8(b).

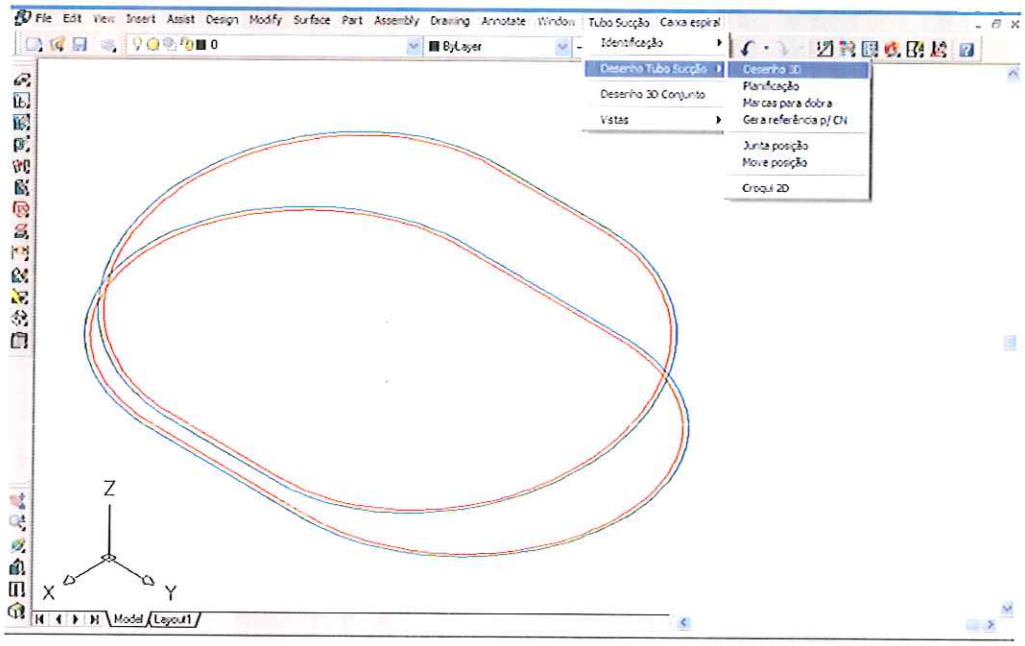


Figura 5.9 – Geração do desenho wireframe 3D.

5.2.3 – Planificação da seção

Após a execução do desenho, realiza-se a planificação mostrada na figura 5.10.

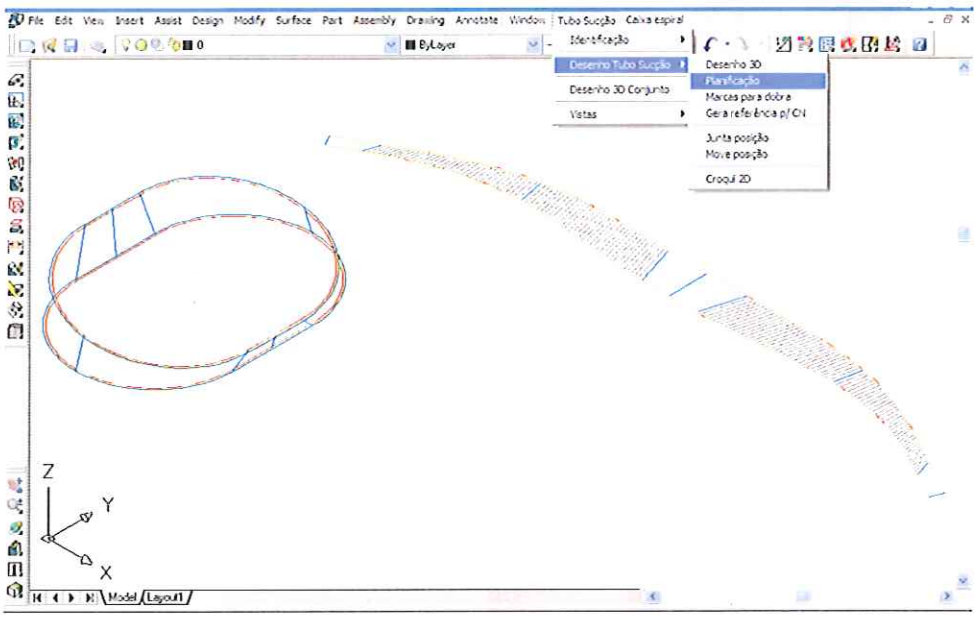


Figura 5.10 – Planificação da seção.

O apêndice F mostra detalhe da planificação de uma seção do "tubo de sucção" partindo de um círculo para um quadrado com cantos arredondados.

5.2.4 – Referência de marcas para dobra

Diferente da caixa espiral, onde as quantidades de marcas e definição de corte são padronizadas nos quatro quadrantes da virola planificada, na seção do "tubo de sucção" a quantidade de marcas é definida por escolha do usuário no momento de sua geração, conforme visto na figura 5.11. O usuário clica em linhas geratrizes que são geradas no ato da planificação para determinar a escolha de separaçãode peças.

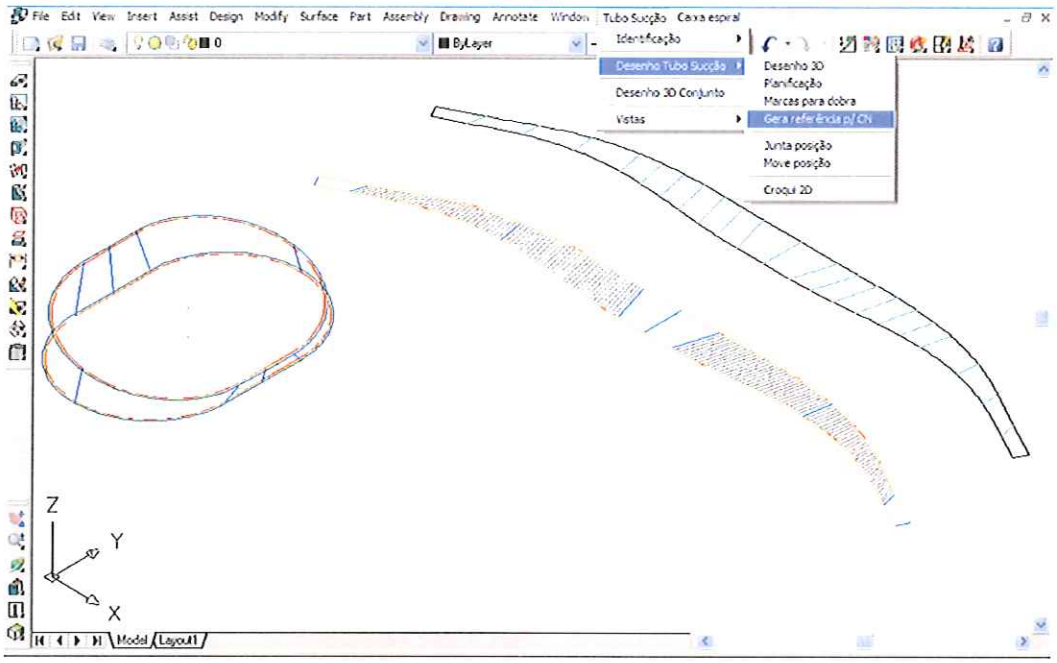


Figura 5.11 – Referência de marcas para dobra e separação da seção

5.2.5 – Croqui de delineamento 2D

Conforme as marcas de referência visto no item anterior, o exemplo mostra a seção dividida ao meio, sendo gerados os croquis de fabricação de duas posições.

Os croquis são gerados automaticamente e somente algumas indicações de posicionamento de cotas são as necessidades a serem determinadas pelo usuário. O desenho final é visto na figura 5.12.

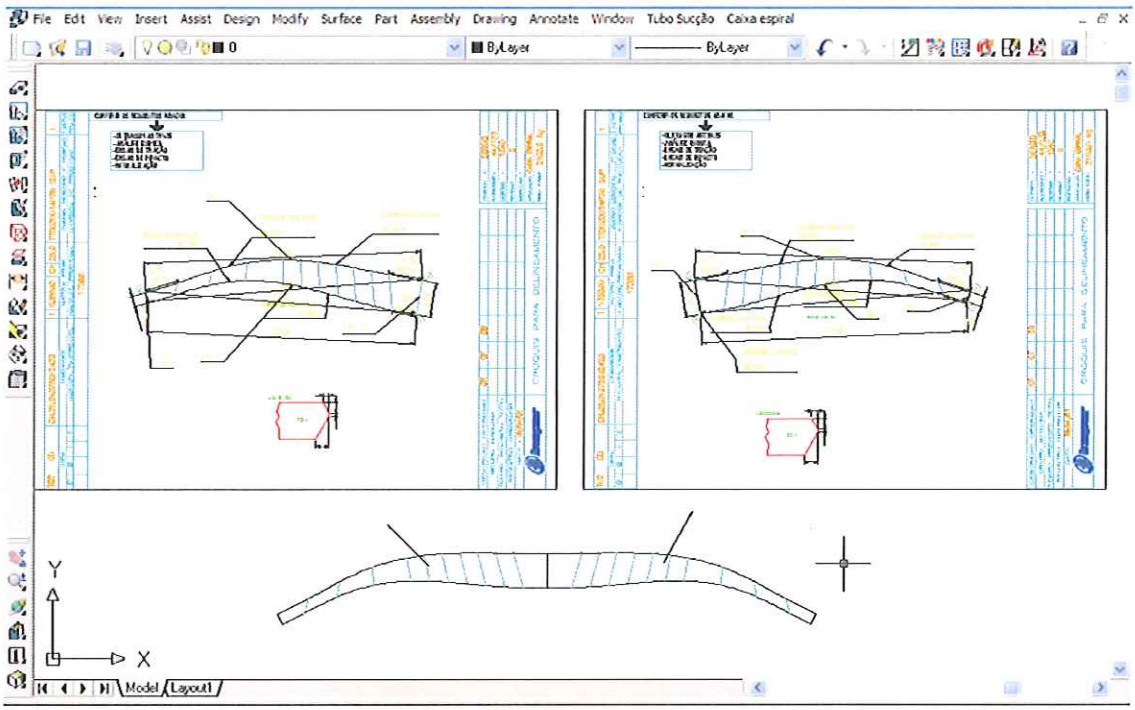


Figura 5.12 – Croqui de delineamento para duas posições.

5.2.6 – Geração de desenho 3D

A geração de desenhos com entidades geométricas de superfícies podem ser executadas parcialmente, sendo possível escolher as seções desejadas. A figura 5.13 mostra o desenho*3D* de todo o conjunto.

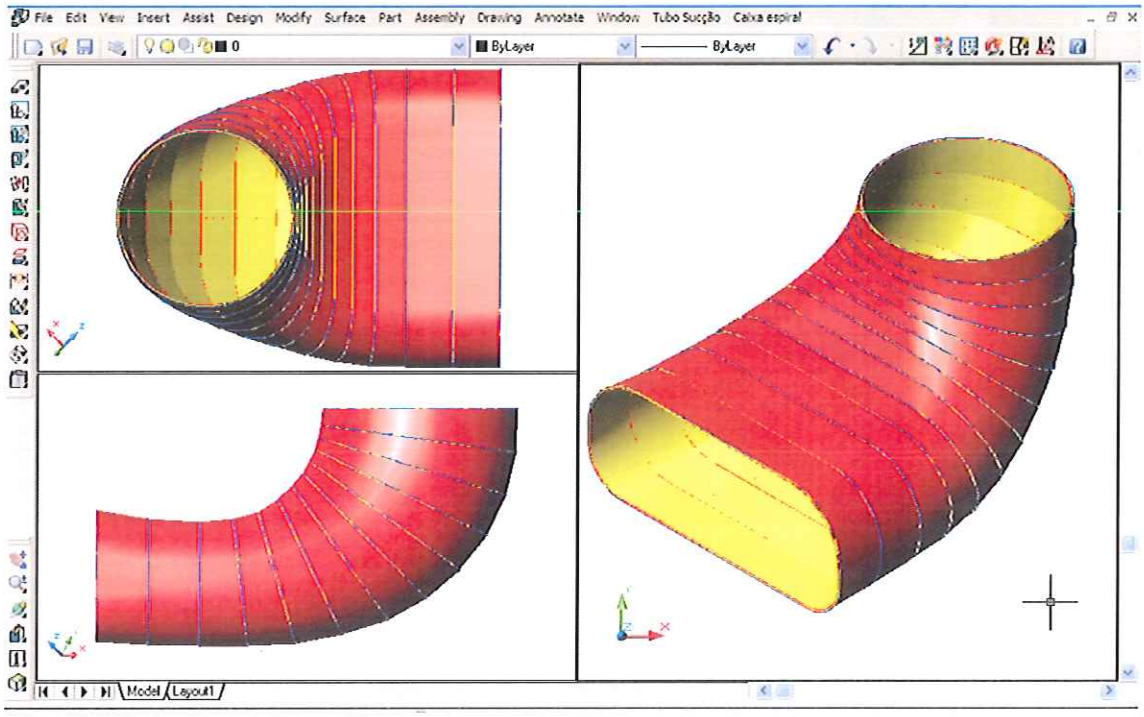


Figura 5.13 – Desenho 3D (modelamento com superfícies)

5.3– Aplicação em "conduto forçado"

Para o produto "conduto forçado", o exemplo mostrado a seguir não é de obra já realizada pois, ainda não houve pedido de fornecimento. Contudo, foi elaborado um exemplo para mostrar o potencial que o sistema oferece para geração de desenhos de delineamento e montagem das linhas de conduto. Assim, o exemplo detalha a formação de duas linhas de conduto conectadas por uma bifurcação, sendo a primeira composta por dez seções, e a segunda formada com quatro seções. A figura 5.14 mostra o arranjo de sua formação.

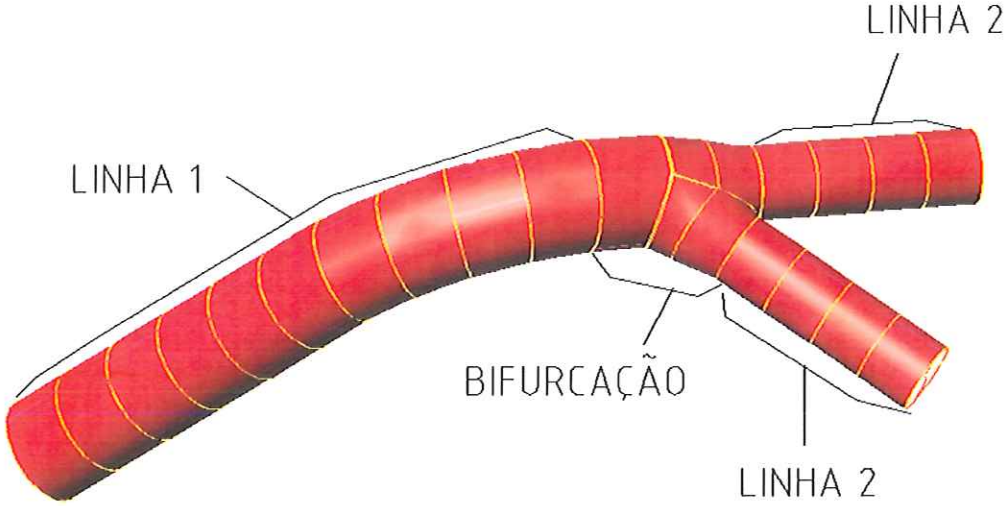


Figura 5.14 – Exemplo da linha de conduto.

5.3.1 – Entrada de dados para linhas 1 e 2

A linha "1" é composta de dez seções, porém são definidas apenas quatro seções. Todas possuem o mesmo raio na parte superior e inferior, 1800 mm, e comprimento de 2300 mm. A primeira seção é vista na figura 5.15(a) . As seções que formam a curva possuem o mesmo raio de 1800 mm, mas com inclinação, e são definidas pelas seções dois e três da figura 5.15(b) e 5.15(c) . A diferença está na emenda da solda, ou seja, uma está na emenda de solda (ver E0 na figura 5.15) e a outra a 2000 mm do inicio da planificação.

CONDUTO FORÇADO - dados gerais

INFORMAÇÃO TÉCNICA

Obra | Código Desenho | Revisão
Título I.T. | Código I.T. | Data emissão
Matéria prima | Emitente | Destino

DADOS GERAIS

Flecha (tolerância) 1 | Altura da marca 5 | Chanfro duplo (valor 0 a 1) 0.33
Qtde de divisões quadrante 4 | Rampa (1:n) 4 | ☑ Move posição - referência p/ CN
Gap | Esp limite chanfro simples 19 | ○ Traçagem ○ Marca (V) ⊙ Ambos

SEÇÃO

Identificação Virola 1 (1) Total 3

Montante

Raio 1800 | Coordenada Z 0 | Coordenada Z1 | Coordenada Z2 | Offset
⊙ Sem plano inclinação ○ Plano inclinação - Superior/Inferior ○ Plano inclinação - Direita/Esquerda

Jusante

Raio 1800 | Coordenada Z 2300 | Coordenada Z1 | Coordenada Z2 | Offset
⊙ Sem plano inclinação ○ Plano inclinação - Superior/Inferior ○ Plano inclinação - Direita/Esquerda

Linha de furos

Linha 1 -> Coordenada Z | Diam. furo | Angulos (ex:-30,0..)
Linha 2 -> Coordenada Z | Diam. furo | Angulos (ex:-30,0..)
Linha 3 -> Coordenada Z | Diam. furo | Angulos (ex:-30,0..)

Emendas (ex:S-300,E0...) E0 | Espessura (ex:19,45...) 50 | Id. posições (ex:10,11...) 11

Próximo | Retorna | Insere (novo) | Insere (c/dados) | Elimina Secão | Le arquivo | Salva arquivo | Limpa

OK | Cancel | Help

Figura 5.15a – Tela para entrada de dados (dados gerais)

SEÇÃO

Identificação Virola 2 (2) Total 3

Montante

Raio 1800 | Coordenada Z 0 | Coordenada Z1 | Coordenada Z2 | Offset
⊙ Sem plano inclinação ○ Plano inclinação - Superior/Inferior ○ Plano inclinação - Direita/Esquerda

Jusante

Raio 1800 | Coordenada Z 2300 | Coordenada Z1 1800 | Coordenada Z2 2500 | Offset
○ Sem plano inclinação ⊙ Plano inclinação - Superior/Inferior ○ Plano inclinação - Direita/Esquerda

Linha de furos

Linha 1 -> Coordenada Z 1000 | Diam. furo 350 | Angulos (ex:-30,0..) 0;120
Linha 2 -> Coordenada Z | Diam. furo | Angulos (ex:-30,0..)
Linha 3 -> Coordenada Z | Diam. furo | Angulos (ex:-30,0..)

Emendas (ex:S-300,E0...) E0 | Espessura (ex:19,45...) 50 | Id. posições (ex:10,11...) 22

SEÇÃO

Identificação Virola 3 (3) Total 3

Montante

Raio 1800 | Coordenada Z 0 | Coordenada Z1 | Coordenada Z2 | Offset
⊙ Sem plano inclinação ○ Plano inclinação - Superior/Inferior ○ Plano inclinação - Direita/Esquerda

Jusante

Raio 1800 | Coordenada Z 2300 | Coordenada Z1 1800 | Coordenada Z2 2500 | Offset
○ Sem plano inclinação ⊙ Plano inclinação - Superior/Inferior ○ Plano inclinação - Direita/Esquerda

Linha de furos

Linha 1 -> Coordenada Z 1000 | Diam. furo 350 | Angulos (ex:-30,0..) 0;120
Linha 2 -> Coordenada Z | Diam. furo | Angulos (ex:-30,0..)
Linha 3 -> Coordenada Z | Diam. furo | Angulos (ex:-30,0..)

Emendas (ex:S-300,E0...) E2000 | Espessura (ex:19,45...) 50 | Id. posições (ex:10,11...) 22

Figura 5.15b – Tela de dados (seção 2,3 e 4).

A linha dois é composta de quatro seções iguais sendo definida apenas por uma seção com raio de 1200 mm e comprimento de 1900 mm (figura 5.15c).

Figura 5.15c – Tela de dados (seção 4).

5.3.2 – Desenho *wireframe* 3D

A partir deste ponto é mostrado apenas o processo de delineamento da seção "2", visto na figura 5.15(b), pois o processo é repetitivo para o restante das seções. O resultado é visto na figura 5.16. Existe, assim, a necessidade de se gerar primeiro o desenho 3D da seção em *wireframe*, depois realizar a planificação.

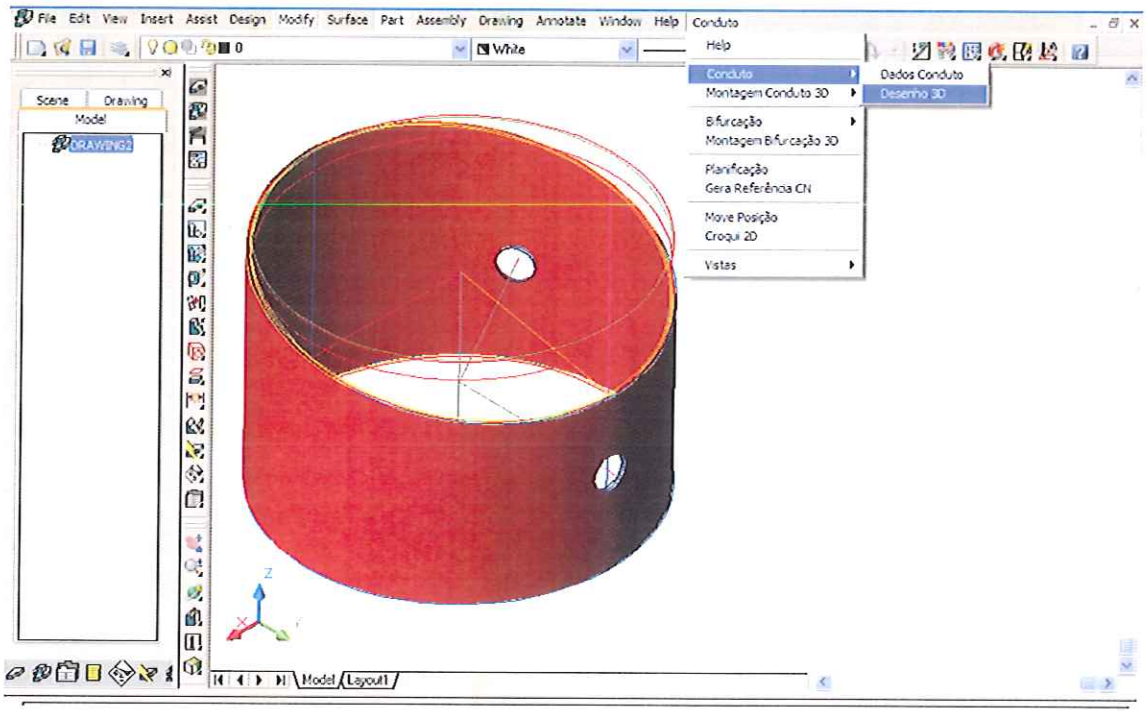


Figura 5.16 – Geração do desenho 3D tipo wireframe da seção dois.

5.3.3 – Planificação de uma seção

Como o exemplo da seção "2" trata de um formato de cilindro com uma das bocas inclinadas, o resultado final da planificação é visto na figura 5.17. Observa-se que é desenhado o perfil do cilindro no formato reto.

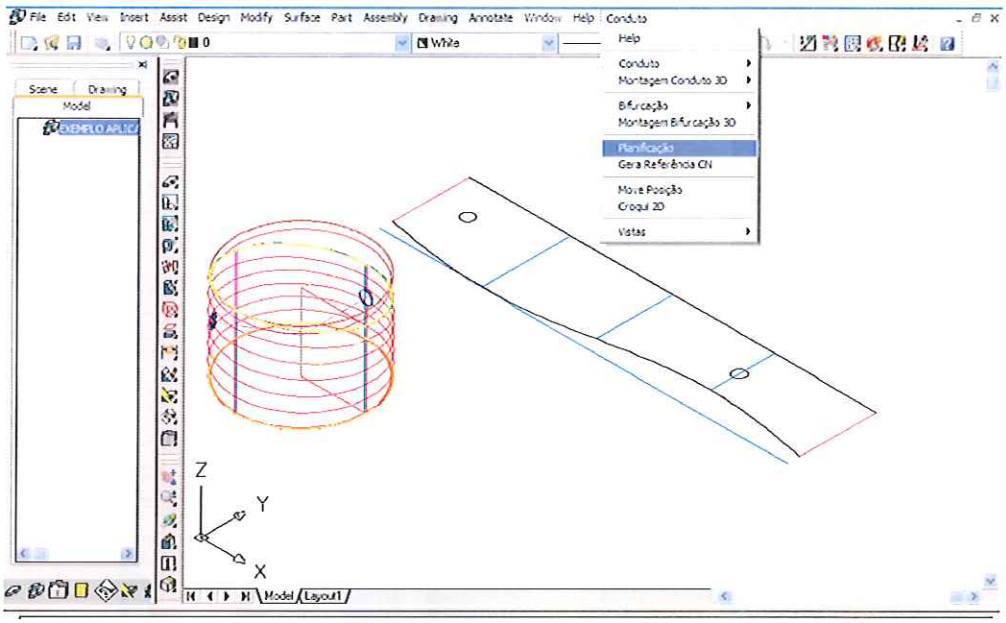


Figura 5.17 – Planificação da seção "2".

5.3.4 – Referência de marcas para dobra

Para referência de corte e dobra, a própria planificação se compõe como peça única a ser cortada na máquina oxicorte.. A figura 5.18 mostra a seção "2" com devidas referências.

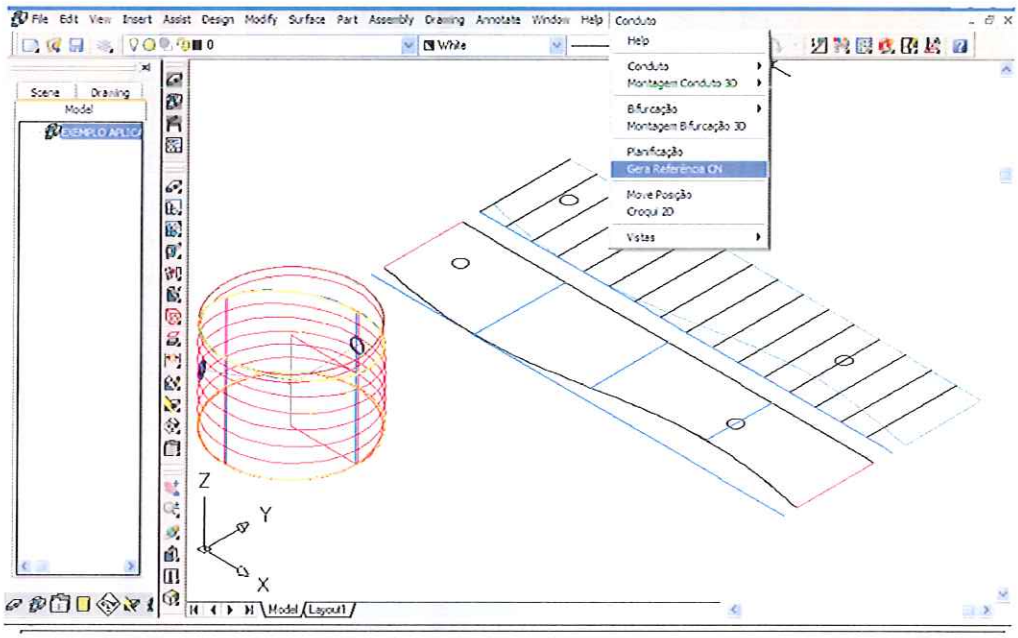


Figura 5.18 – Criação de referência para corte e dobra.

5.3.5 – Croqui de delineamento 2D

A figura 5.19 mostra o trabalho final que é a geração do croqui de delineamento, o qual segue para fabricação.

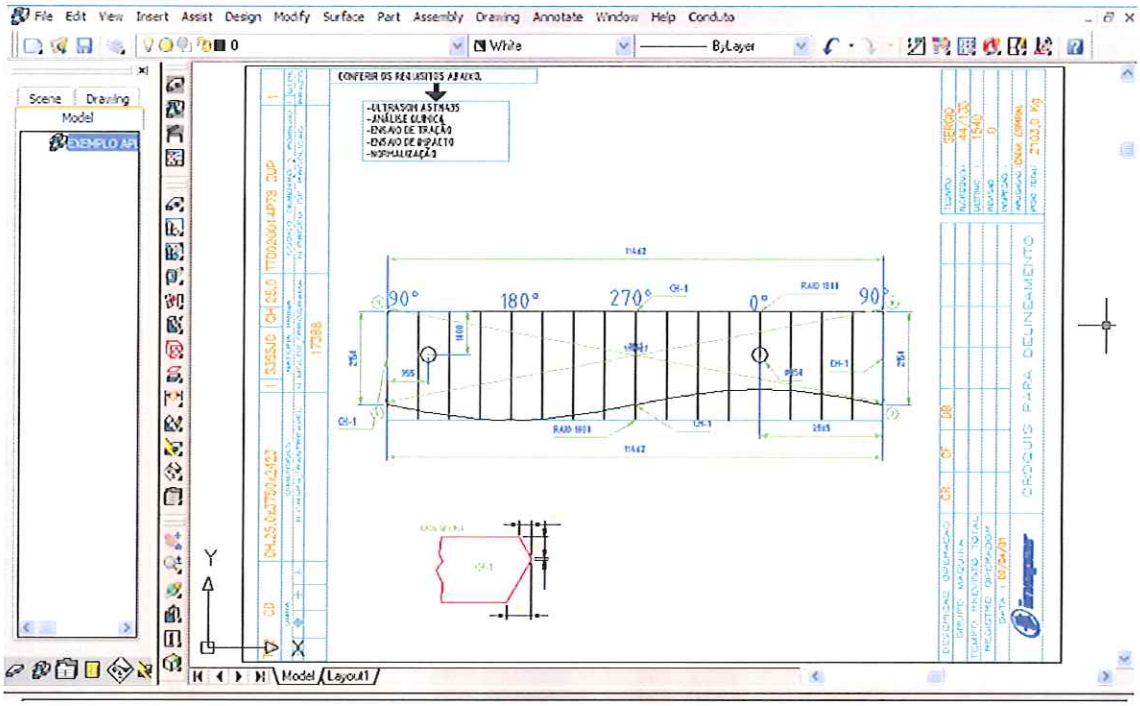


Figura 5.19 – Croqui de delineamento da seção "2".

Portanto, o processo é repetido para todas as seções que compõe o conduto.

5.3.6 – Montagem da linha "1" e "2" do conduto

Para este exemplo que possui várias seções de um mesmo tipo, é possível executar a montagem cadastrando os elementos que compõe a linha. Para retratar fielmente a montagem em campo, indicase no cadastro a rotação da seção para evitar a emenda de solda contínua entre seções próximas. A figura 5.20 mostra na tela o exemplo do cadastro de montagem para linha "1".

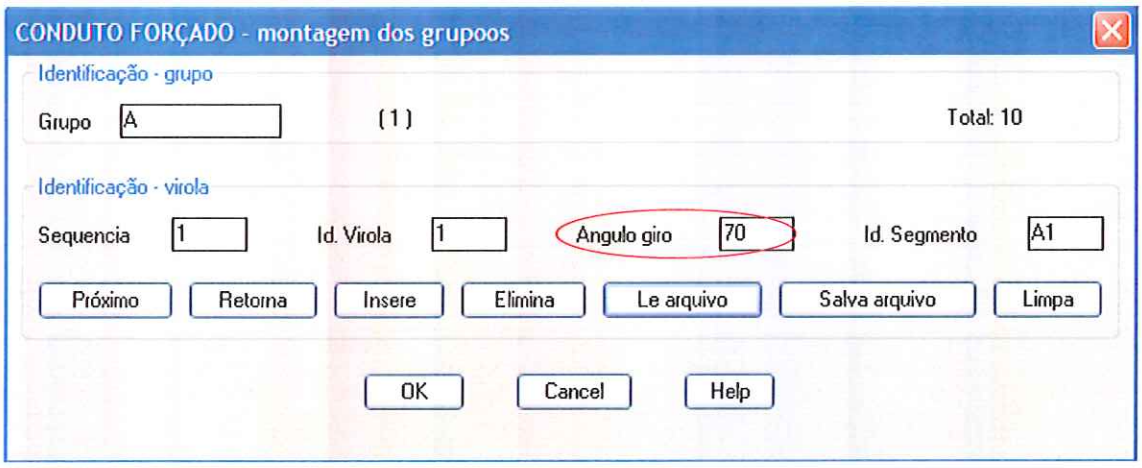


Figura 5.20 – Tela de entrada de dados para montagem da linha "1".

Com um único comando é possível realizar a montagem, a qual é vista na figura 5.21 .

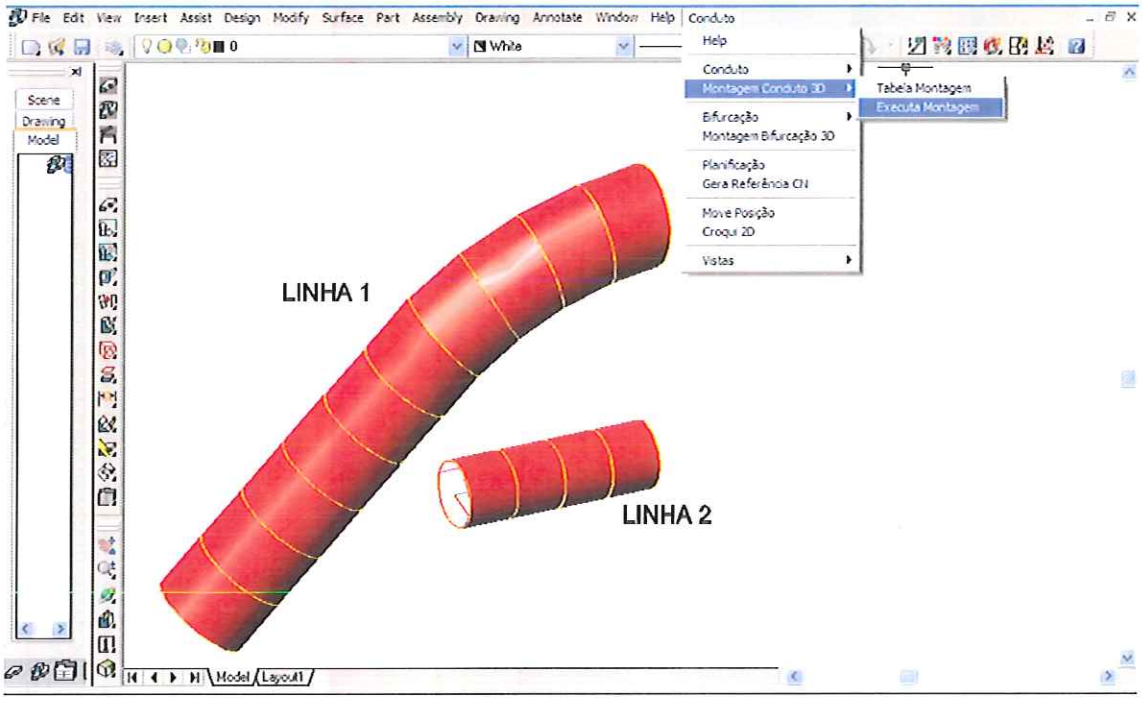


Figura 5.21 – Montagem da linha "1" e "2".

5.3.7 – Bifurcação

A bifurcação do exemplo acima possui uma entrada e duas saídas, sendo que para cada elemento são geradas duas seções distintas. Assim, a bifurcação é composta por seis virolas. O procedimento também é

análogo à seção simples do conduto. O elemento pode ser definido como sendo a "entrada" ou "saídas" da bifurcação (máximo três elementos).

5.3.7.1 – Entrada de dados

É exemplificado o processo de delineamento da primeira virola da saída "1". No caso, o cone formado é composto por duas virolas.

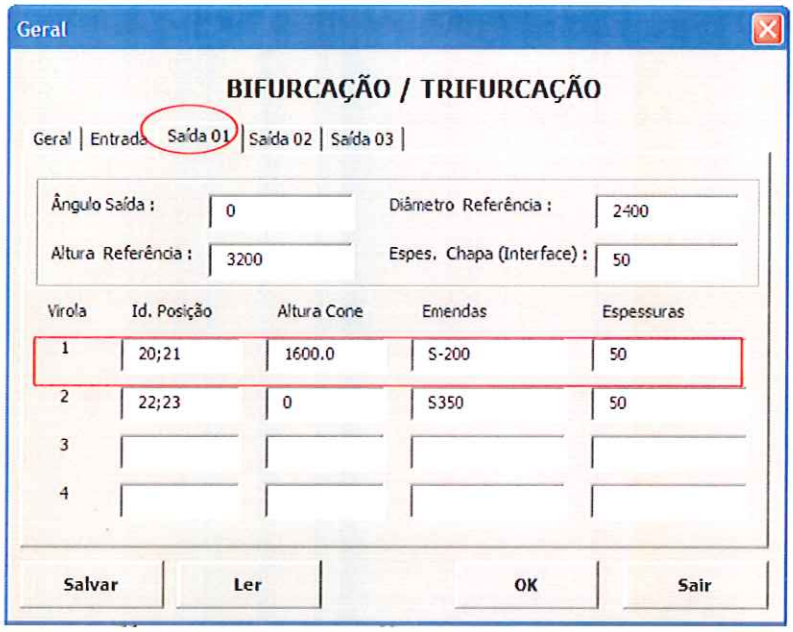


Figura 5.22 – Entrada de dados da bifurcação (saída "1").

5.3.7.2 – Desenho *wireframe* 3D

Gera-se então o desenho 3D tipo *wireframe* para preparação da planificação, visto na figura 5.23 .

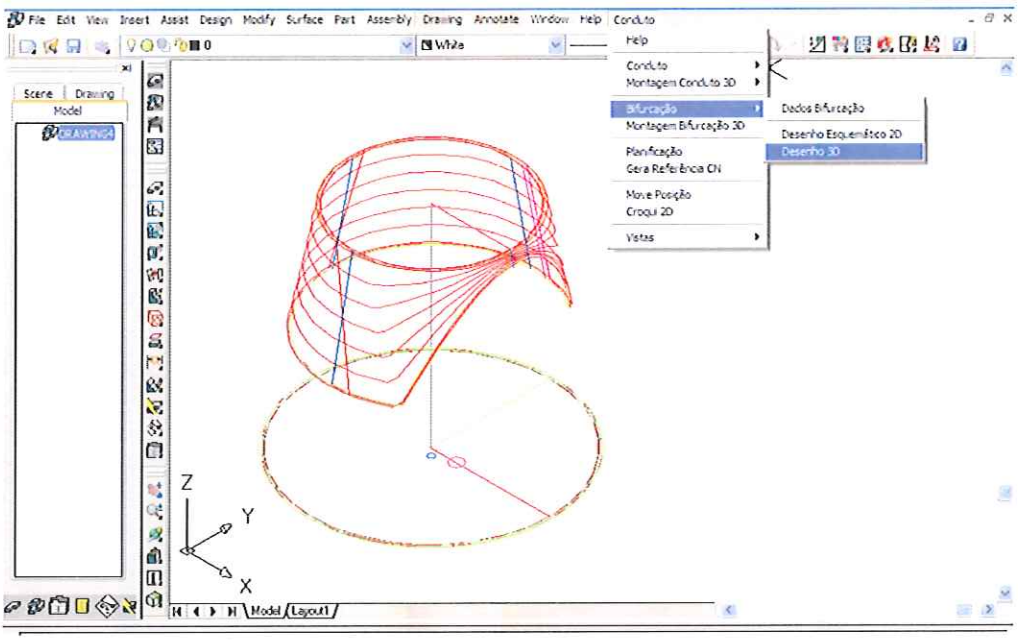


Figura 5.23 – Desenho wireframe da virola 1 (saída "1").

5.3.7.3 – Planificação

O sistema realiza a planificação gerando a figura abaixo.

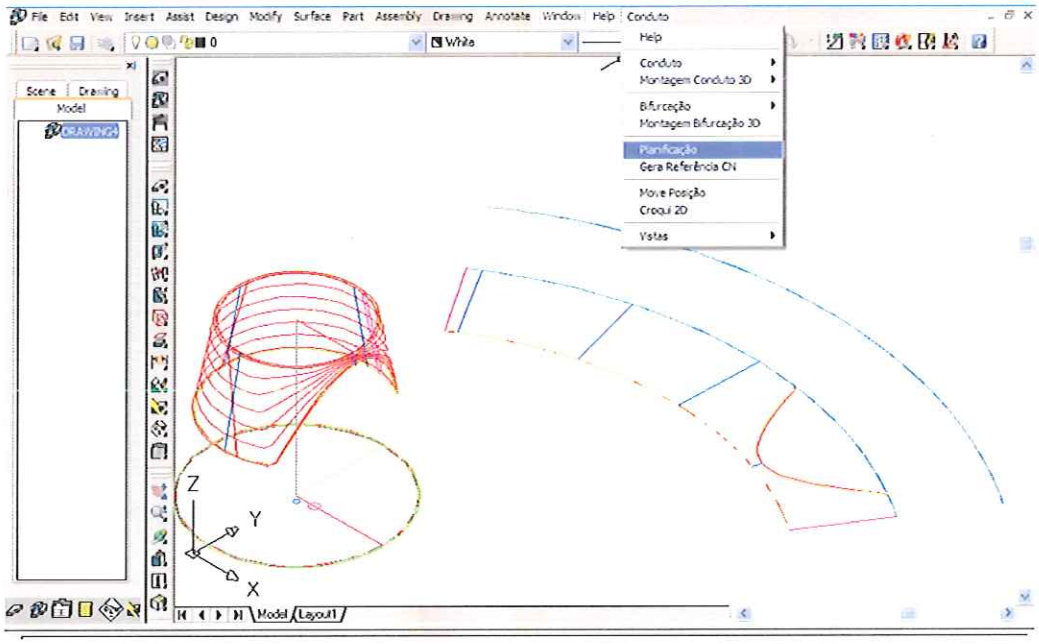


Figura 5.24 – Planificação da virola 1 (elemento : saída 1).

5.3.7.4 – Marcas de referência e croqui de delineamento 2D

Por fim, geram-se as marcas de referência para dobra e o croqui de delineamento conforme visto na figura 5.25 .

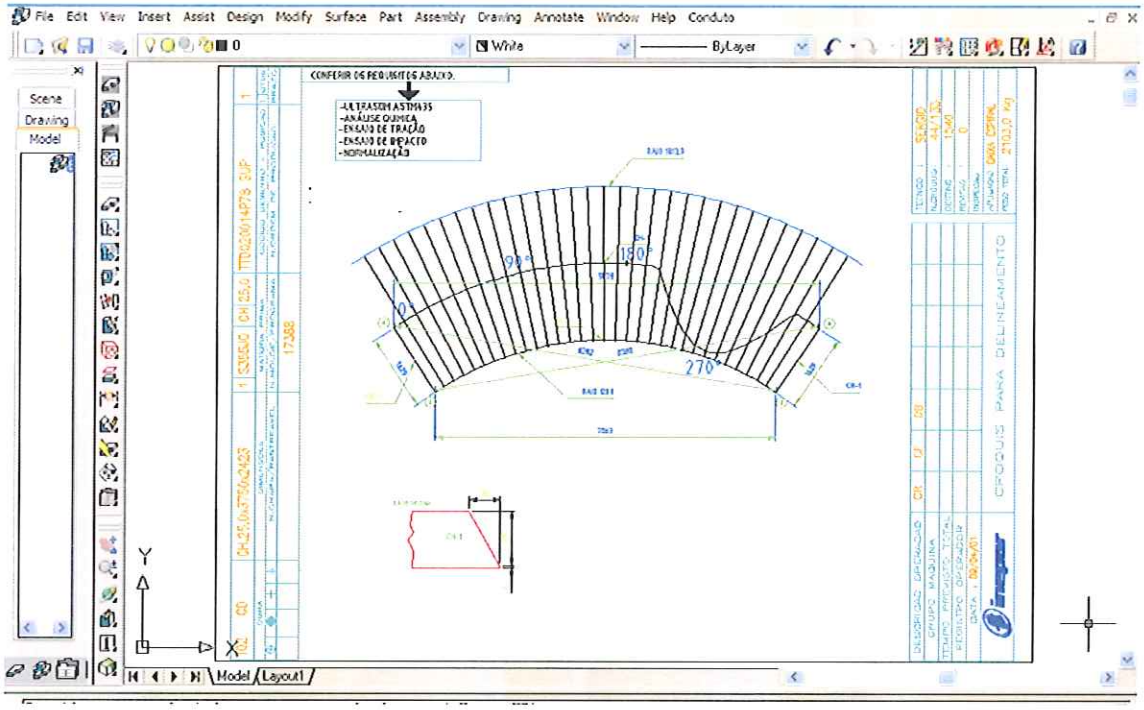


Figura 5.25 – Croqui de delineamento da virola 1.

5.3.7.5 – Desenho 3D da bifurcação

O sistema permite a montagem em 3D da bifurcação para análise, sendo também em formato de superfície.

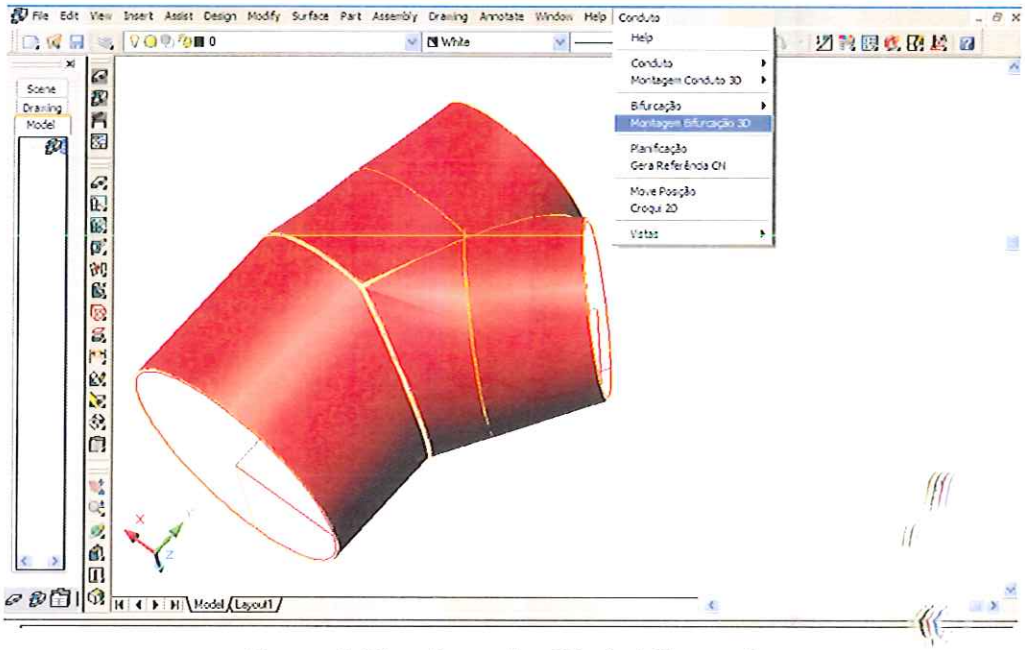


Figura 5.26 – Desenho 3D da bifurcação.

5.3.7.6 – Desenho 3D da bifurcação com a linha 1 e 2

De posse nos desenhos de montagem das linhas do conduto (figura 5.21 e 5.26) , monta-se a linha de conduto final conforme projeto, e visto na figura 5.27.

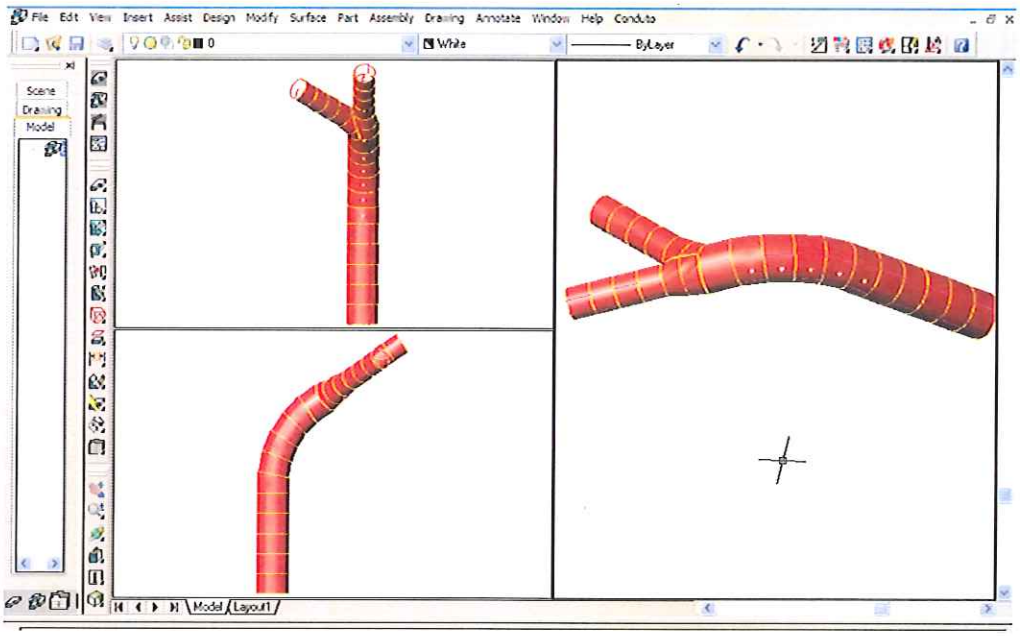


Figura 5.27- Montagem final do conduto forçado.

6 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O sistema computacional foi desenvolvido para a aplicação em engenharia industrial na fabricação de Hidrogeradores. Apesar da necessidade do sistema ter sido identificada somente nesta área observase que existe uma integração forte entre outros setores os quais são envolvidos indiretamente. Logicamente, o maior ganho observado, relatado e medido, provém da área de Hidrogeradores, porém outras áreas tiveram seu incremento de produtividade. São elas :

- *Área de Fabricação* : os croquis recebidos no chão de fábricas são os mesmos que eram originados manualmente, contudo o tempo de concepção e de envio foi substancialmente reduzido. Outra vantagem refere-se ao grau de precisão do croqui de delineamento, ou croqui de montagem gerado, eliminando totalmente os erros de perfil, cotas, perímetro, etc.

  Com as informações corretas de desenho, reduziu-se o tempo de re-trabalho entre técnicos da engenharia de caldeiraria e operadores para resolução de possíveis problemas.
- *Área de Geração* : foi o setor de maior ganho efetivo, com a agilização do processo de delineamento para envio à fabricação e eliminação do tempo de re-trabalho para correção ou para checagem das informações enviada à fábrica.

  Como a redução de erros de desenho foi praticamente para zero, eliminou-se também perda de matéria-prima e seu conseqüente processo passando pela área de Suprimentos e introdução em ambiente fabril.
- *Montagem em campo* : com o advento do primeiro teste do sistema com a produção de uma Caixa Espiral verificou-se que o melhor encaixe das virolas aumentou a produtividade e qualidade dos componentes (seções), diminuindo o ajuste que é realizado em campo.

  A figura 5.1 mostra a Caixa Espiral da unidade 01 da obra de Campos Novos, localizada em Santa Catarina, cuja fabricação foi executada totalmente sob o novo sistema.

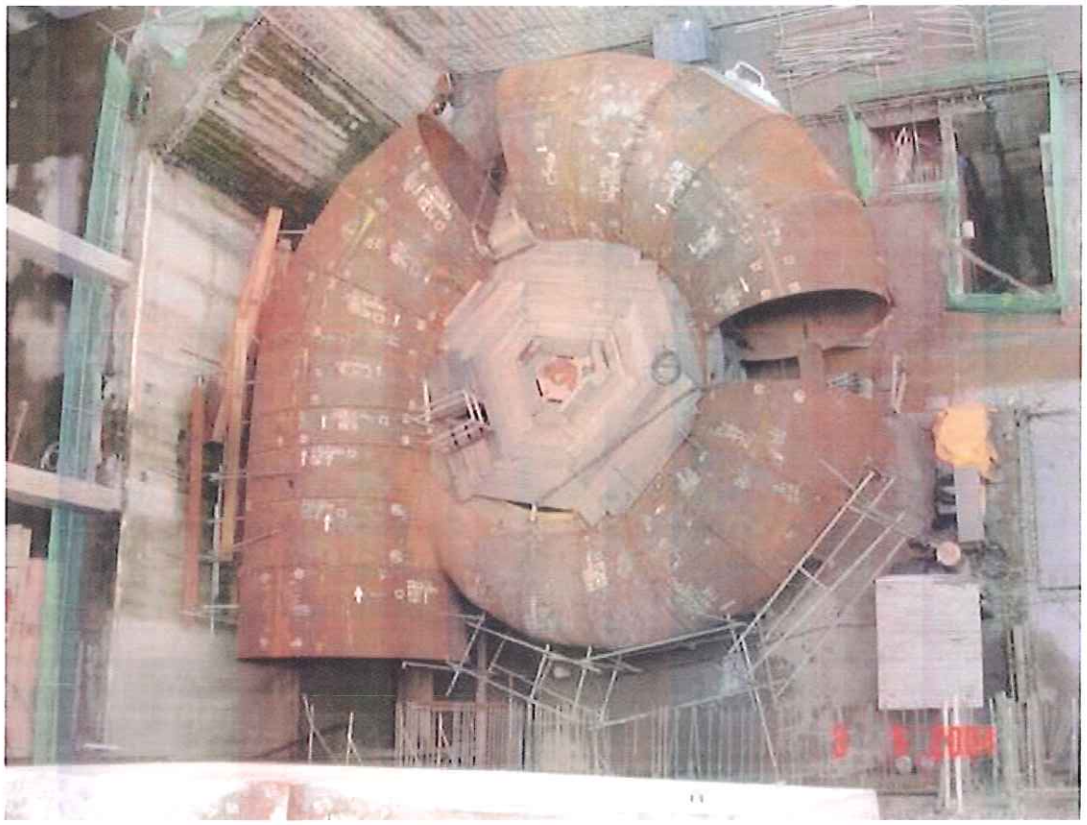


Figura 6.1 – Montagem em campo de uma unidade da caixa espiral.
(obra – Campos Novos – Santa Catarina)

6.1– Avaliação do sistema

Atualmente o sistema está sendo utilizado por três técnicos experientes de caldeiraria para avaliação e homologação. Foram testados dados de obras antigas para análise das virolas planificadas e como visto na figura acima, uma obra com dados reais de fabricação até o estágio de montagem.

Nos testes realizados, o sistema tem-se mostrado confiável, pois foram realizadas checagens manuais para validação dos resultados. Todos os testes executados manualmente de obras antigas, estão conforme cálculo.

6.2– Limitações do sistema

A grande limitação do sistema refere-se ao seu preenchimento de dados. Devido à enorme quantidade de campos a serem preenchidos pelo usuário, é possível a digitação errada dos valores numéricos através do

preenchimento de campos específicos, com mais de vinte itens para cada seção. Assim a checagem de dados torna-se cansativa e com possibilidades de erros devido ao grande volume de dados a serem preenchidos.

Existe uma limitação na geração do croqui de delineamento de seção da bifurcação que necessita uma interação manual pelo usuário. Isto é visto com mais detalhes no capítulo 8, item 8.4 (desenvolvimentos futuros).

O sistema desenvolvido é único e exclusivo para os produtos de geração de energia (conduto forçado, caixa espiral e tubo de sucção), não podendo ser generalizados para outros setores que também utilizam o processo de planificação, como por exemplo, os diversos tipos e formas de vasos de pressão, tanques de armazenamento, etc.

6.3 – Resultados apresentados

Os resultados apresentados a seguir são analisados em forma de redução de mão-de-obra para a engenharia industrial da área de Geração de Energia e Hidromecânicos.

6.3.1 – Caixa Espiral

Para determinar o ganho do novo sistema foram coletadas amostras de obras antigas realizadas no passado. O tempo especificado é computado desde a liberação do projeto junto ao planejamento de fábrica até a geração total de informações necessárias à fabricação, ou seja, todos os desenhos dos croquis de delineamento e montagem da caixa espiral disponível à fabricação.

As amostras de obras realizadas para caixa espiral foram divididas em três tipos devido à sua característica peculiar do tamanho da virola planificada, que pode ser executada em chapas padrões de mercado no tamanho de 2,4x12m. Assim, para obra de porte pequeno, a média de divisão das virolas ficou em duas partes, para obra de médio porte a média de divisão é de três partes, e para obra de grande porte a divisão de virola sempre é em quatro partes. A tabela 6.1 mostra o tempo gasto para a geração dos croquis

de delineamento e montagem para toda caixa espiral antes da implantação do sistema.

Obra	Porte do equipamento	Nro de divisão da virola	Qtde de emendas	Tempo gasto (horas)
Ponte de Pedra	Pequeno	2 partes	1	248
Sandillal	Pequeno	2 partes	1	268
Itiquira	Pequeno	2 partes	1	426
Corumbá	Médio	3 partes	2	324
Serra da Mesa	Médio	3 partes	2	360
Tucurui	Grande	4 partes	3	406
Ertan	Grande	4 partes	3	446

Tabela 6.1 – Amostra de obras contendo o tempo gasto para geração dos croquis de delineamento antes da implantação do sistema.

Determinando uma média para os tamanhos de obras, temos na tabela 6.2 o tempo médio estimado para obras de porte pequeno, médio e grande.

Classificação da Obra	Tempo médio gasto p/ delineamento (horas)
Pequeno	258
Médio	342
Grande	426

Tabela 6.2 – Tempo médio para delineamento da Caixa Espiral conforme tamanho.

A tabela 6.3 mostra uma comparação dos tempo para geração dos croquis de delineamento e croquis de montagem para toda caixa espiral antes da implantação do sistema e após uso do sistema.

Para tamanho de obra "pequeno" e "grande", os tempos tomados são uma simulação de obras antigas realizadas no novo sistema. Para obra de tamanho "médio", existe uma tomada de tempo real medido através da obra de Campos Novos.

Tipo Obra	Caixa Espiral (antigo)	Caixa Espiral (novo sistema)
Obra pequena	258 h	44 h
Obra média	342 h	48 h
Obra grande	426 h	56 h
Total	**1026 h**	**148 h**

Tabela 6.3 – Tempo simulado gasto para gerar croquis de delineamento e montagem para caixa espiral

Pode-se verificar que a redução de tempo é significativa com a utilização do sistema desenvolvido, variando entre 83 % para obras pequenas, 86 % para obras médias e 88 % para obras grandes.

6.3.2 – Tubo de Sucção

Seguindo o exemplo da caixa espiral, o tempo necessário para geração dos croquis de delineamento e montagem para tubo de sucção também é dividido em três categorias, determinadas pelo seu tamanho, que também acarreta em maior geração de croquis devido à divisão da virola. A tabela 6.4 mostra o tempo gasto no processo antigo para o processo de delineamento do tubo de sucção.

Obra	**Classificação**	**Tempo (horas)**
Ponte de Pedra	Médio	168
Corumbá	Médio	168
Serra da Mesa	Pequeno	112
Rio Jordão	Médio	168
Ertan	Grande	224

Tabela 6.4 – Amostra de obras contendo o tempo gasto para geração dos croquis de delineamento antes da implantação do sistema.

A tabela 6.5 mostra o comparativo de tempo entre o procedimento antigo com o novo sistema. Também neste caso foram realizadas simulações de obras antigas para a determinação do tempo.

Tipo Obra	**Tubo Sucção (antigo)**	**Tubo de Sucção (novo sistema)**
Pequeno	112 h	12 h
Médio	168 h	16 h
Grande	224 h	24 h
Total	**504 h**	**52 h**

Tabela 6.5 – Tempo gasto para gerar croquis de delineamento para tubo de sucção.

Verifica-se que a redução de tempo é significativa com a utilização do sistema desenvolvido, ficando numa média de 90 % de economia para os diversos tamanhos de obras.

6.3.3 – Conduto forçado

Para ilustrar o ganho para o produto "Conduto forçado" foi realizada uma simulação através de um exemplo criado, porém dentro da realidade de obras existentes. O exemplo criado baseia-se no seguinte:

- uma bifurcação onde a entrada é realizada em duas seções, e as duas saídas geradas em três seções cada, todas com tamanho diferente ;
- a linha de entrada composta de nove seções diferentes ;
- a linha de saída com nove seções dferentes.

Para este exemplo, normalmente numa obra podem existir até 30 seções por linha, porém apenas nove com formas diferentes. A tabela 6.6 mostra o comparativo de tempo entre a realização do trabalho na maneira convencional (manual) e o novo sistema.

	Qtde seções	**Tempo** (manual)	**Tempo** (novo sistema)
Linha de entrada (seções retas)	9	21 h	8 h
Linha de saída 1 (seções inclinadas)	9	30 h	8 h
Linha de saída 2 (seções inclinadas)	9	30 h	8 h
Bufurcação : (2 seções – entrada) (3 seções-saída 1) (3 seções-saída 2)	8	96 h	12 h
	Total	**177 h**	**36 h**

Tabela 6.6 – Comparativo de tempo gasto na realização do conduto forçado entre o modo convencional e o novo sistema.

6.4– Comentários gerais

Como a redução das horas de execução da engenharia industrial foi significativa, verificou-se também que indiretamente estava eliminando um possível gargalo com o aquecimento das vendas neste setor. Antes do desenvolvimento do sistema, o gargalo do processo ficava concentrado na engenharia industrial. O tempo de execução doscroquis de delineamento na

forma manual podia chegar em até 70 dias para uma única obra contendo caixa espiral e tubo de sucção.

A tendência de mercado é realizar no mínimo a fabricação de três projetos ao ano com estes componentes de caldeiraria. Assim,a empresa está apta a enfrentar novos desafios principalmente no quesito prazo de entrega, amplamente discutidos nos negócios, além de garantir maior qualidade e economia na fabricação do produto.

Com relação à elaboração dos croquis, toda a confecção era realizada por técnicos especialista em caldeiraria devido à sua alta complexidade. Com o sistema e um treinamento adequado a técnicos de menor experiência fabril, é possível treinar outros colaboradores a realizar essa tarefa.

Verificou-se que com apenas algumas simulações e com dados reais executados numa obra, a redução foi substancial conforme visto nas tabelas comparativas acima, contudo pode-se melhorar após domínio total dos recursos oferecidos pelo sistema. Acredita-se que o usuário possa ainda reduzir em 30% com um bom conhecimento e controle do sistema, e também algumas melhorias sugeridas no capítulo 8.

Um dos pontos alto percebido pelo sistema é que também está sendo utilizado como *marketing* para o mercado nacional, pois transmite ao cliente alto conhecimento sobre o produto e pode acabar facilitando a venda do serviço.

Esperava-se um ganho muito grande na montagem de fabricação de cada seção individual devido à eliminação de ajuste do perfil da virola. Isto acabou sendo realidade com a fabricação da obra de Campos Novos havendo uma redução substancial nos ajuste de montagem da seção. Contudo, não existe registro anterior confiável para obter histórico de retrabalho em fabricação.

Devido ao tamanho da caixa espiral, normalmente são montadas apenas as seções em ambiente de fábrica. As montagens entre seções são realizadas em campo e observou-se que através da primeira obra realizada pelo novo sistema, obteve-se alto grau de eficiência na montagem de uma caixa espiral em campo.

Para a obtenção desta eficiência do sistema, um fator fundamental não pode deixar de ser mencionado, que é o fator humano. Graças à grande cooperação dos especialistas da área de caldeiraria é que foi possível obter um ganho acima do esperado, pois foi incorporado ao sistema a tecnologia e a experiência.

Com certeza a evolução do sistema continuará e uma integração com a engenharia do produto fechará o ciclo de projeto e fabricação do produto, trazendo ainda maior economia. As melhorias previstas estão detalhadas no capítulo 8.

7 - CONCLUSÃO

O aplicativo desenvolvido para auxiliar o processo de fabricação de caldeiraria em produtos de hidrogeradores alcançou os objetivos propostos, sendo plenamente utilizável na área de engenharia industrial dos setores de geração de energia (caixa espiral e tubo de sucção) e hidromecânicos (conduto forçado).

Os principais resultados alcançados com o sistema foram :

- Redução de mais de 80% no tempo de elaboração dos croquis de delineamento e de montagem ;
- Redução e/ou a eliminação total de erros nos croqui de desenhos enviados para fabricação ;
- Melhoria substancial na qualidade do produto devido à eliminação de re trabalho nas seções (adição ou retirada de material) ;
- Atendimento dentro dos prazos estabelecidos pela necessidade de mercado ;
- Diminuição, ou a eliminação de re-trabalho em seções montadas em campo ;
- Ganho de tempo na mão-de-obra relativa à montagem em campo ;
- Maior produtividade na produção dos desenhos dos croquis de delineamento devido à confiabilidade das informações ;
- Redução de mais de 1.400 horas ao ano somente da engenharia industrial .

Com relação ao ganho financeiro, não é apropriado projetar um cálculo considerando apenas a redução da mão de obra da engenharia industrial. Existem outros ganhos que são conclusivos, porém difíceis de serem medidos e geram distorções em sua compreensão, tais como :

- Melhoria no prazo de entrega do produto. Isto pode ocasionar um enorme ganho para a empresa devido à certeza de que não haverá problemas de montagem durante a fase de fabricação. Atrasos nestes produtos levam a multas contratuais de grande valor diário pela não geração de energia elétrica da usina ;

- Redução de tempo na montagem do produto em campo. Numa hidrelétrica existem milhares de trabalhadores e centenas alocados somente na montagem da caixa espiral, considerado um elemento problemático nesta fase de montagem em campo devido à soldagem entre seções. Caso as seções não se encaixem perfeitamente, o re trabalho gerado é substancial. O impacto dessa economia não foi medido, mas com certeza, são valores significativos ;
- Ganho na qualidade do produto e a demonstração para clientes. Conforme mencionado anteriormente e ocorrido na prática, houve encontro entre a diretoria comercial da empresa e cliente para a demonstração do sistema como uma garantia no melhoramento contínuo no processo de fabricação. Logicamente não é o sistema desenvolvido que vai garantir o acordo, porém pode levar a empresa a conseguir pontos positivos para conclusão do fechamento do negócio ;
- Redução à perda zero de material. Como referência, o peso médio de uma caixa espiral de médio porte conforme visto na figura 6.1 é de 145 toneladas, e uma caixa espiral de grande porte pode checar a 400 toneladas, como por exemplo, usina de Tucuruí. Uma média histórica nos produtos caixa espiral e tubo de sucção, é a realização de um re trabalho da ordem de 10% do peso, sendo que além do custo da matéria-prima é necessário computar o custo de fabricação, que envolve corte, dobra e a montagem.

8 – PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

O sistema desenvolvido certamente possuirá uma vida de utilização muito longa principalmente por ser um integrador entre diversos tipos de produtos de caldeiraria pesada. O nível atual representa um avanço tecnológico muito grande, e abrange a maioria dos problemas que foram abordados pela necessidade e como foram solucionados.

Contudo, observou-se no capítulo 7 algumas limitações que podem ser melhoradas e representarão maior ganho de produtividade. A seguir são relacionados alguns tópicos já identificados eque devem sofrer melhorias futuras.

8.1- Implementação do memorial de cálculo da engenharia do produto

Este tópico é de fundamental importância para gerar uma integração entre a engenharia do produto e a engenharia de fabricação.

Para o caso de caixa espiral e tubo de sucção o projeto é realizado pela GE HYDRO INEPAR, localizada em CampinasSP. Existe uma parceria entre a GE HYDRO INEPAR e a IESA onde a primeira é responsável pelo fornecimento do projeto e assistência técnica, e a segunda pela fabricação e montagem, existindo assim uma sinergia muito grande entre as empresas.

Como visto no capítulo 7, onde a entrada de dados para utilização do programa, apesar de estar em forma amigável, é morosa e pode gerar erros devido ao seu grande volume de preenchimento. Está em fase de estudos uma integração que levará a um estágio de desenvolvimento inédito entre as empresas.

Proposta de melhorias :

- Incorporação do memorial de cálculo da engenharia do produto. O memorial é composto pela determinação das espessuras das chapas, previsão do volume de tinta, previsão do volume de solda.
- Geração dos desenhos da engenharia do produto de maneira automática para servir a clientes das obras ;
- Eliminação dos desenhos do produto para fabricação (engenharia industrial). Criação de arquivo de dados para integração de dados.

- Integração dos dados da engenharia de produto e engenharia de fabricação, evitando assim a necessidade de digitação das espessuras de chapas para as seções e dados geométricos que compõe a forma da seção.

As principais rotinas já estão desenvolvidas atualmente e é uma questão de adaptação para obter o desenho de projeto do produto o qual é distribuído para o cliente e fabricação, e adequar o já existente formulário de cálculo para o dimensionamento das chapas. No caso, é mais fácil o desenvolvimento deste módulo do sistema por não haver necessidade do detalhamento, o qual é necessário para a engenhara industrial de caldeiraria.

Com a integração dos dados para fabricação, esperase uma vantagem competitiva reconhecida mundialmente, além do fato de manter amplamente integrado técnicos de ambas as empresas.

8.2– Gerenciamento dos croquis de fabricação

Atualmente, o sistema desenvolvido não organiza os croquis de desenhos gerados. Esta organização é feita pelo próprio usuário, gravando em arquivos separados ou agrupando por número de seções.

Por exemplo, numa obra de caixa espiral é possível gerar até 150 desenhos entre croquis de delineamento e croquis de montagem.

O gerenciamento dos croquis tem por finalidade a fácillocalização do croqui para uma eventual consulta ou a própria regeneração devido à atualização de dados. Isto é possível, uma vez que os desenhos ficam em camadas[5] diferentes podendo ser vistos ou ocultados conforme necessidade.

Assim, em um mesmo arquivo de ambiente gráfico será possível manter todos os croquis de desenhos.

[5] O sistema CAD permite a realização de desenhos através de "layers" , por onde é possível cria-los a partir do nome da seção.

8.3– Geração de modelo em tipo "sólido"

O modelo 3D gerado é obtido através de superfícies devido a maior rapidez em sua geração. Existe a possibilidade de executar a criação do modelo usando o modelamento sólido.

Isto permitirá ao usuário usufruir as utilizadas do sistema CAD já existentes para possível consulta como por exemplo, localização do centro de gravidade, cálculo dos momentos de inércia, e outros.

8.4– Melhoria no croqui de delineamento utilizado em bifurcação

Devido à limitação do sistema, o croqui gerado para o caso de bifurcação, o usuário necessita executar algumas tarefas manualmente para ter o desenho em definitivo.

Logicamente, o sistema já realiza a parte mais difícil que é a planificação. Porém, também desenha a parte da planificação que fica constituída na seção adjacente, conforme exemplo dado no item 6.2 .

O exemplo abaixo ilustra quando uma planificação ultrapassa mais de uma seção. No caso, a seção 2 da saída1 da bifurcação ilustrada na figura 8.1(a) e (b) exemplifica como o programa gera o croqui atualmente. O ideal seria deixar a seção conforme os croquis de fabricação, onde a figura 8.2 mostra a situação atual e a figura 8.3 como deveria ser a situação ideal.

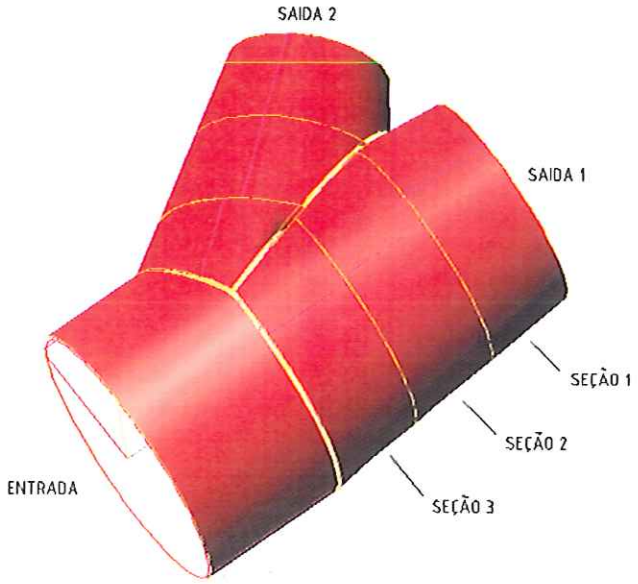


Figura 8.1a – Exemplo de planificação para bifurcação (saída 1).

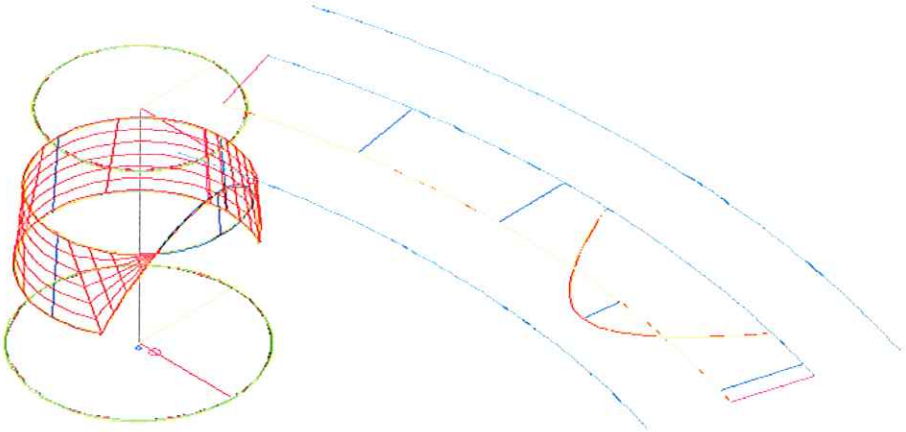


Figura 8.1b – Croqui de delineamento da seção 2 (bifurcação-saída 1).

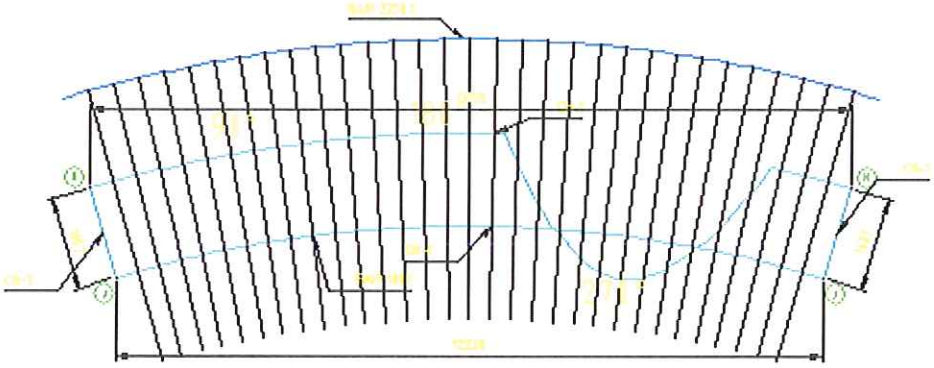


Figura 8.2 – Croqui de delineamento da seção 2 (situação atual).

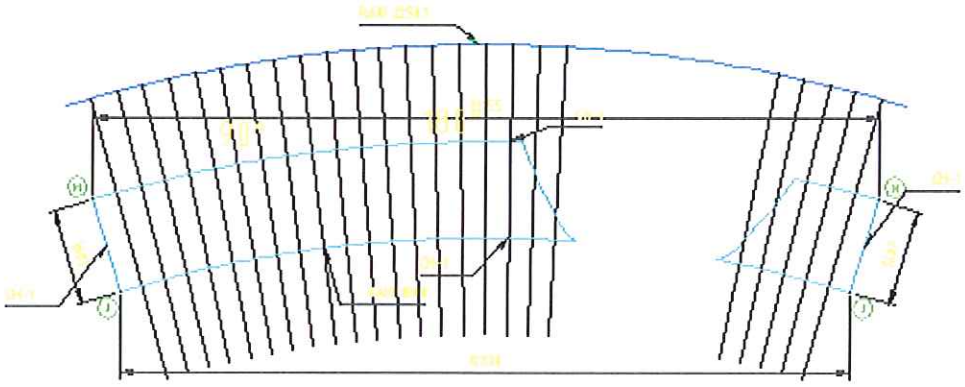


Figura 8.3 – Croqui de delineamento da seção 2 (situação ideal).

8.5– Realização de orçamento de fabricação

O sistema está preparado para determinar o custo de fabricação do produto considerando todo o processo, tais como, como mão de obra da engenharia industrial, fabricação (corte, dobra, solda)e montagem.

Segundo Veiga (1995), o papel da ferramenta CAD nos processos de negócios integra estruturas de desenho, lista de material, chegando a análise de custos com base nas informações do processo de fabricação.

O sistema não processa o custo do produto, porém possui informações necessárias para a geração do cálculo.

8.6– Seção elíptica para caixa espiral

Devido a restrições imposta por projetos hidráulicos , tornase necessário a seção da caixa espiral também ser definida com forma elíptica. No mercado interno, não temos casos que justifique esta forma de projeto, porém devido ao posicionamento da casa de força e o tamanho de seção, são condições que levam a este formato particular, como por exemplo, a caixa espiral do projeto "Três Gargantas" localizada na China (WUST, 1996).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGA, Manual de Oxicorte à Máquina. s.n.t. 31p.

AGA . Aplicações para corte e solda. Disponível em : www.aga.com.br/web /web2000/br/wpp.nsf/pages/aplic_cw. Acesso em : maio 2004.

AJMAL, A. ; LAPUSHNER, A. (2002). Reverse engineering for an integrated CAD/CAM system . *Chinese journal of mechanical engineering* v.15, p.84-90.

ARAUJO, E. (1976). Manual de caldeiraria e desenvolvimento de chapas. São Paulo: Hemus.

AUTODESK, AutoCAD release 10 (1988). Programmer's Reference. Autodesk Inc.

AUTODESK, AutoCAD release 10 (1988). Reference Manual. Autodesk Inc.

AUTODESK, AutoCAD release 12 (1992). Customization ManualPublication 100891. Autodesk Inc.

AUTODESK, AutoCAD release 12 (2003). Programmer's Reference. Publication 100191-01. Autodesk Inc.

AUTODESK, AutoCAD release 2002 (2003). Programmer's Reference. Autodesk Inc.

AUTODESK, AutoCAD release 2002 (2003). Reference manual. Autodesk Inc.

BENNET, R. E. (1988). Cost accounting for CAD. Computer mechanical enginnering p.29-35, nov./dez.

BENNETT, Paul (2000). The digital evolution . *Civil engineering* , august , p.50-55, aug.

BURRY, Mark (2002). Rapid prototyping, CAD/CAM and human factors . *Automation in Constrution*, n .11, p.313-333.

BUXEY, Geoff (1992). CAD-CAM in Australia: flexibility quality and manufacturing strategy. *Computer integrated manufacturing systems*, v.5, n.4, p. 300-310.

CAD/CAM (2002). Controls and factory automation.*Manufacturing engineering* v.129, n. 2, p.139-155, 2002.

CHHUN N. ; SAAR A. ; DIEHL B. ; MCCOLLOUGH T. (2001). Decoding the future of CAD/CAM . *American Machinist*, v.145, n.7, p.54-69, jul.

CHRISTMAN, A. (2003). A CAD modeler for toolmakers.*Machine desing*, v.75, n.23, p112-113, dec.

CRO, Manual da máquina pantográfica de oxicorte marca CRO tipo CN-2014 com controle GE 550 MPM. s.n.t. 57p.

DAMOULIS, L. G. (2003). Desenvolvimento de processo de conformação e chapas metálicas usando simulação computacional como ferramenta integrada no desenvolvimento de carrocerias automotivas. In: CONGRESSO BRASILEIRO ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO ABCM, maio 2003.

EBISUI, E. A. (1993). *Desenvolvimento e Implantação de um Sistema de Programação Comando Numérico para Corte Térmico de Chapas em uma empresa Produtora de Bens de capital sob encomenda.* Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1993.

GOLDAN, M. et al. (2003). As-built product modeling and reverse engineering in shipbuilding through combined digital photogrammetry and CAD/CAM technology. *Journal of ship production*, v.19, n.2, p.98-104 , maio.

GYLDENFELDT, C. V. ; STROH, C. (2004). CAM : automático, integrado, virtual e simples. *Máquinas e metais*, n.463, ago.

HYSPEED HT4400 Plasma Arc Cutting System (2001) Instruction Manual P/N 803580 revision 4. Hanover, NH-USA: Hypertherm, Inc., nov.

JASCHKE, J. (1962). Desenvolvimento de chapas. Tradução Jurgen Kansog. São Paulo: Editor Polígono .

JOAQUIM, R. ; RAMALHO, J. Processo de corte- Jato de água. Disponível em: <www.infosolda.com.br/jato_de_agua.htm> . Acesso em : abril 2004 (a).

JOAQUIM, R. ; RAMALHO, J. Processo de corte– Laser . Disponível em : <www.infosolda.com.br/corte_laser.htm >. Acesso em : abril 2004 (b).

JOAQUIM, R. ; RAMALHO, J. Oxicorte: Equipamentos de corte e técnicas . Disponível em : <www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php? id_pag =703>. Acesso em : maio 2004 (c).

JOAQUIM, R. ; RAMALHO, J. Processo de corte– Plasma . Disponível em : <www.infosolda.com.br/corte_plasma.htm>. Acesso em : maio 2004 (d).

JOLGAF, M. et al. (2003). Development of a CAD/CAM system for the closed die forging process. *Journal of Materials*, p.436-442.

KOVACIC, M. (2003). Evolutionary programming of a CNC cutting machine. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.22, n.1-2, p.118-124.

LOBJOIS, C. (1977). Desenvolvimento de chapas: para aprendizes e oficiais funileiros e caldeireiros. Tradução Edson Bini. São Paulo: Editora Hemus.

MACHINE-side reference guide 80640 (2000). Hanover, NH-USA: Hypertherm, Inc., sept.

MAJI, P. K. ; BISWAS, G. (2000). Analyis of flow in the platespiral of a reaction turbine using a streamline upwind Petrov-Galerkin method. *Internacional journal for numerical methods in fluids*, n.34, p.113-144, 2000.

MARCOS, F. (1975). Corte e dobragem de chapas. São Paulo: Hemus.

MESQUITA, E. L. A. ; RUGANI, L. L. (2004) . Conformação dos aços inoxidáveis, 1997. Disponível em: <www.acesita.com.br/download/apostila _aco_inox_conformacao.pdf> . Acesso em : abril / 2004.

MIAO, H. K. et al. (2002). CAD-CAM integration using machining features. *Computer integrated manufacturing*, vol.15, n. 4, p.296-318.

MONEZI, C. Corte por laser. Disponível em : <www.meusite.mackenzie .com.br/seminarios/1_2003/usinagens_especiais_28052003_resumo.pdf> . Acesso em abril 2004 (c).

OLIVEIRA, J. F. G. ; COELHO, R. T. (2002). Automação de chão de fábrica. *Produto & Serviços São Paulo*, n.312 ,p.83-88 ,dez.

PRADO, V. (1995). *Desenvolvimento e implantação de um sistema de geração e transmissão de programas comando numérico para centros de usinagem e tornos*. 132 p. Dissertação (Mestrado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

RANGEL, F. ; SHAH J. J. (2002). Integration of commercial CAD/CAM system with custom CAPP using orbix middleware and corsa standard. *American sociate mechanical engineering*, p.299-309 , out.

SAKAMOTO, S. et al.(2001). Construction of PC-based intelligent CAD system for cold forging process design-integration of CAD system and development meted. *Journal of materials processing technology*, n.119, p.58-64.

SOUZA, A. F. ; COELHO, R. T. (2003). O caminho para atingir o estado da arte é o bom entendimento. *Máquinas e metais*, n.455, p.82-89.

VEIGA, H. A. et al. (1995). Aplicação de ferramentas CAE/CAD/CAPP em processos de negócios definidos pela reengenharia. In: CONGRESSO SOBRE CAE/CAD/CAM & COMPUTAÇÃO GRÁFICA ; Sobracon.

WANG, H. F. et al. (2002). CAD/CAM integrated system in collaborative development environment. *Robotics and computer integrated manufacturing* p.135-145.

WUST, M. ; BUCHMAIER H. (1996). The design and manufacture of China´s largest Francis units. *Hydropower & Dams*.

YANG, D. Y. et al. (2002). Integration of CAD/CAM/CAE/RP for the development of metal forming process. *Journal of materials processing technology*, n.125-126, p.26-34.

BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

CAO, S. et al. (1997). Numerical simutation of three dimensional turbulent flow through turbine spiral casing. *American sociate mechanical engineeiing* , p.1-5, jun.

CHERNY, S. G. et al. (2003). Methods for three dimensional flows computation in hydraulic turbines. *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modeling* v.18, n.2, p.87-104.

DATTA, R. et al (2002). Weldability characteristics of shielded metal arc welded high strength quenched and tempered plates. *Journal of materials engineering and performance*, v.11 , p.5-10.

KAMETANI, H. et al. (1998). Development of 200 mm thick HT980 steel plate and its aplicattion study to penstock bifurcation. *Welding in the world* , n.41 , p.515-526.

LARSON, J. et al. (2000). Object oriented cam design through the internet. *Journal of intelligent manufacturing*, n.11 , p.515-534.

MARJAVAARA, B. D. et al. (2004). Automatic design of hydropower flows: the draft tube. *Americam society mechanical engineering*, v.1 , p.299-307 , 2002.

SARRAGA, R. F. (2004). Modifying CAD/CAM surfaces according to displacements prescribed at a finite set of points. *Computer aided design*, n.36 , p.343-349.

SHREIBER, G. P. (1977). Usinas Hidrelétricas. São Paulo, Editora : Edgard Blucher; Rio de Janeiro, Engevix.

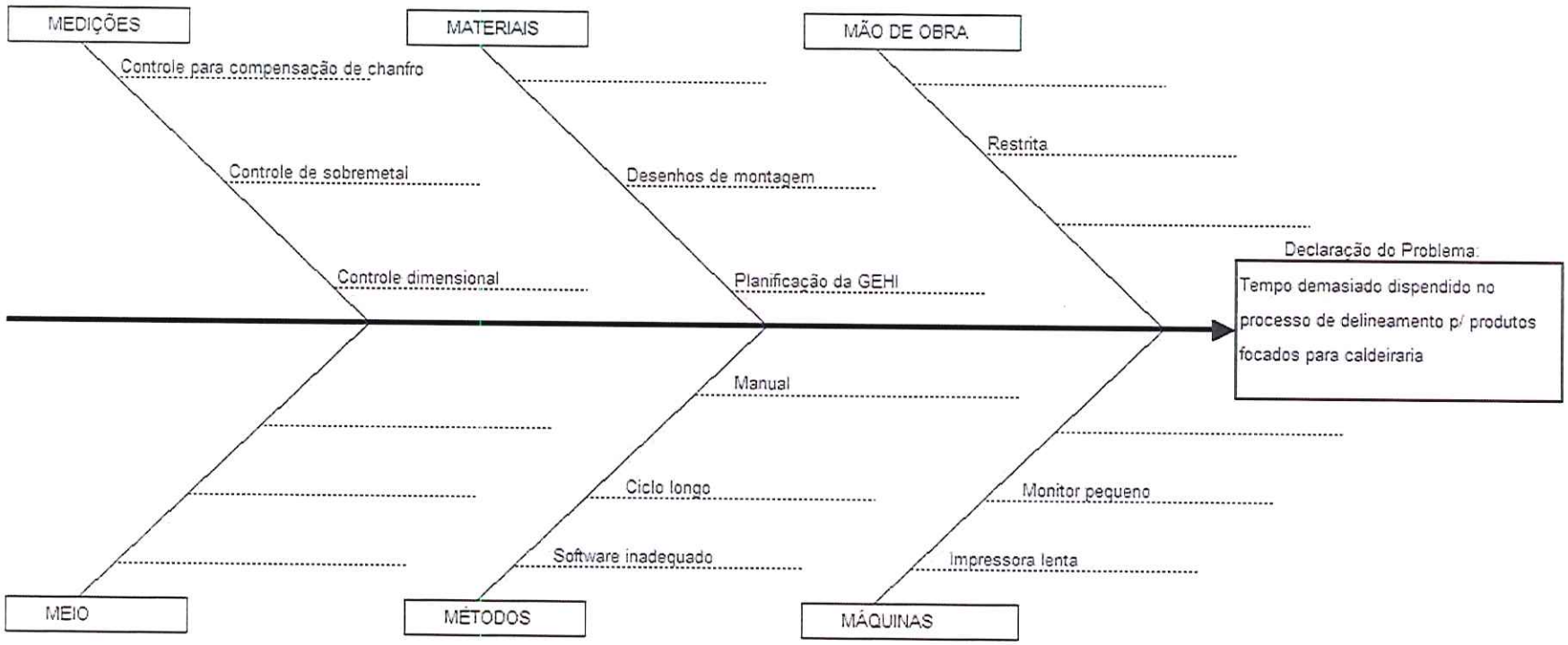
TAN, K. T. et al. (1998). A new approach to an integrated CAD meted for surface ship design. *Naval engineers journal*, p.35-48, jan.

VU, T. C. et al. (1991). Development of a new hydraulicdesign tool for spiral casing / distributor geometry. *The waterpower'91 : a new view of hydro resources* , p.791-799.

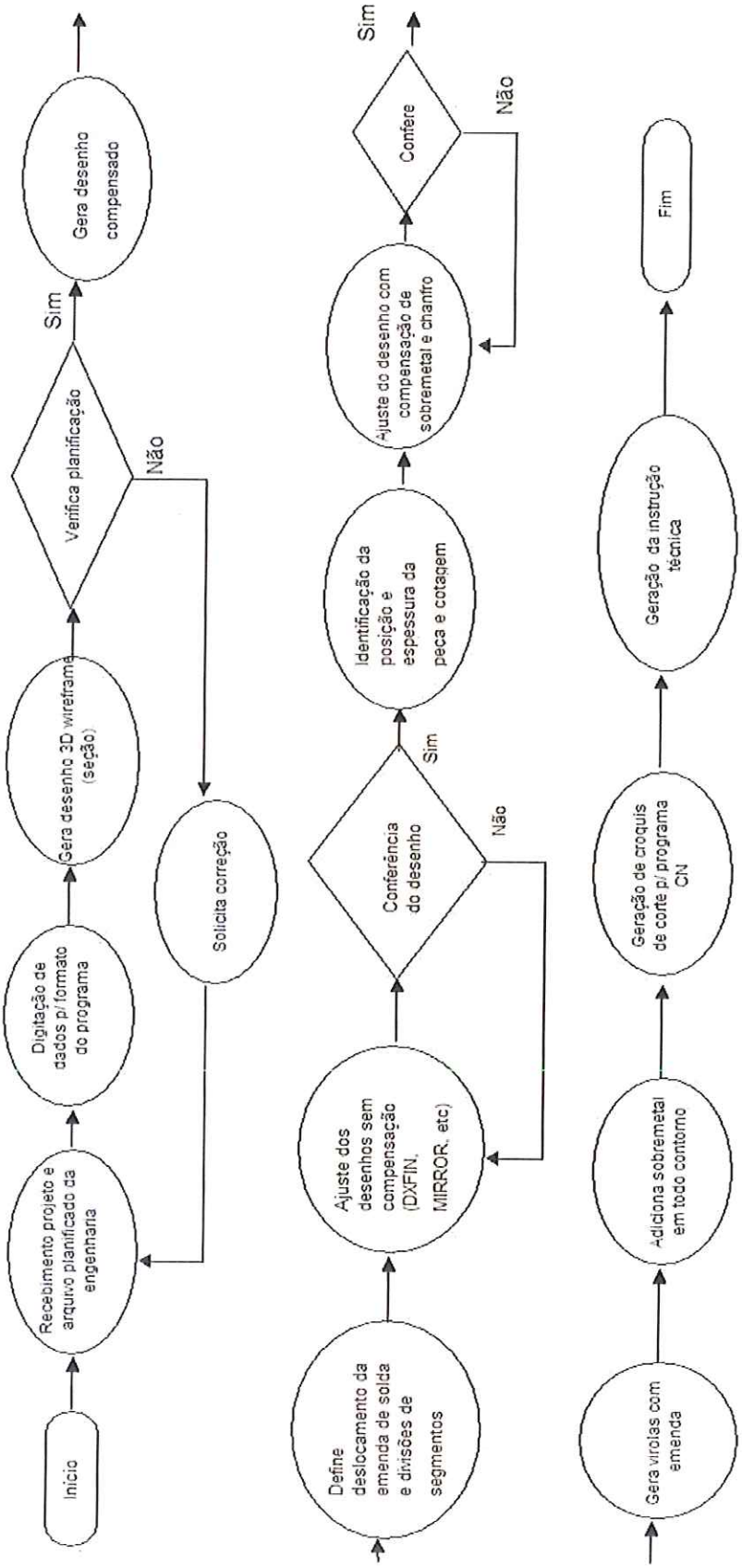
YUAN, W. ; RUDOLF, S. (2000). Numerical simulation of the draft tube and tailwater flow interaction. *Journal of hydraulic research*, p.73-81, dez.

ZHOU, Y. et al. (1992). The optimal design for an internal stiffener plate in a penstock bifurcation. *Journal of pressure vessel technology*, v.114 , p.193-199 , maio.

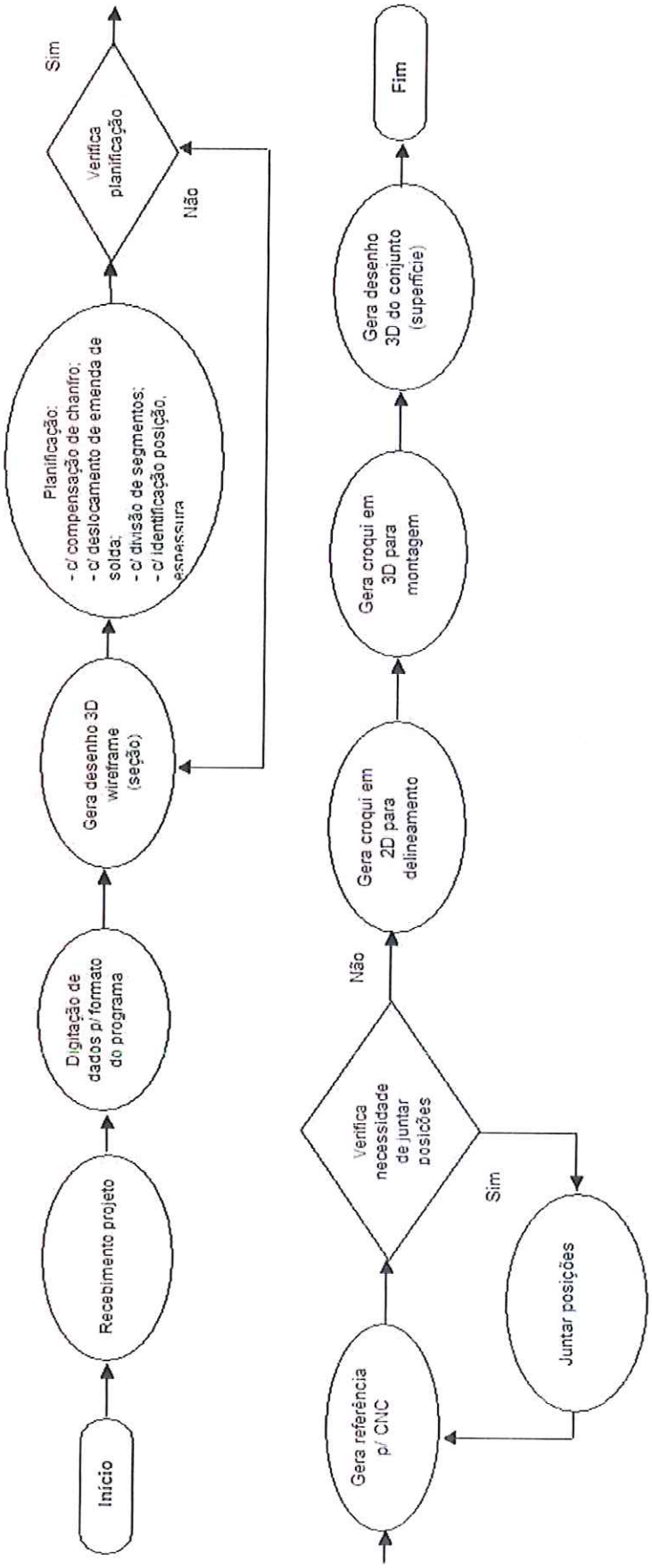
APÊNDICE A - Metodologia *Fishbone* para declaração do problema



APÊNDICE B - Mapa do processo antes do sistema desenvolvido



APÊNDICE C - Mapa do processo depois do sistema desenvolvido



APÊNDICE D - Exemplo de planificação de uma seção da caixa espiral.

Passo 1 : Geração do desenho de uma seção da caixa espiral, conforme dados paramétricos. Os dados necessários para geração do desenho são :

- raio da base superior (raio 1) ;
- raio da base inferior (raio 2) ;
- comprimento da base superior (Z1) ;
- comprimento da base inferior (Z2) ;
- ângulo entre base superior e inferior (Ângulo).

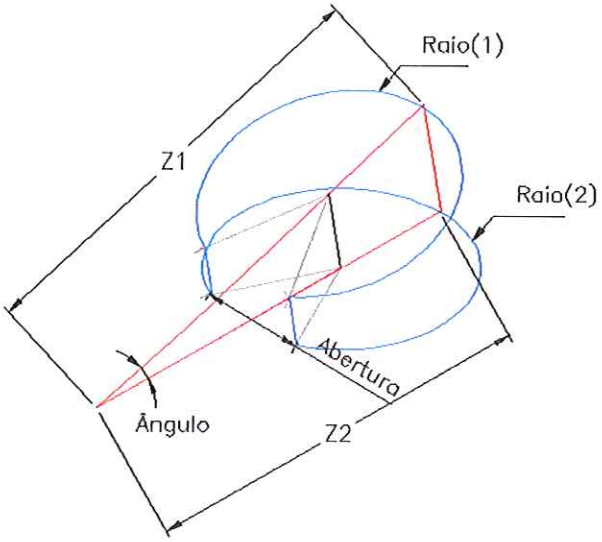


Figura A.1 – Dados paramétricos de geometria.

Passo 2 : Localização dos quadrantes a 90º , 180º e 270º .

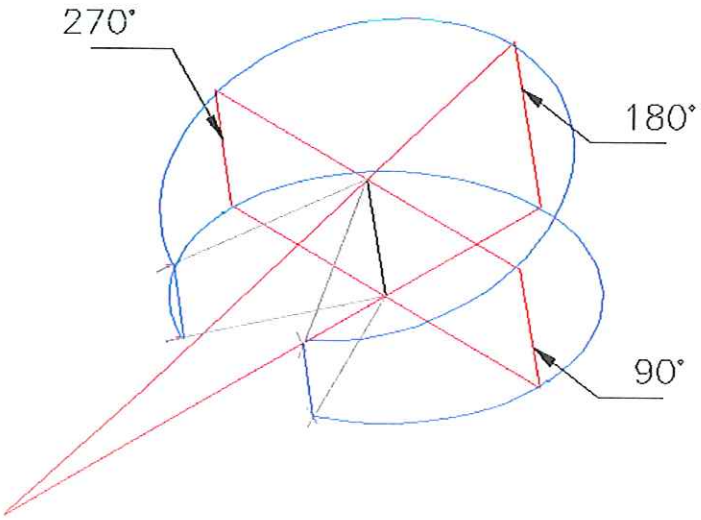


Figura A.2 – Identificação dos quadrantes.

Passo 3 : Divisão em segmentos da base superior e inferior.

As entidades "círculo 1" e "círculo 2" (base superior e inferior) são transformadas em vários pedaços de linhas. A quantidade de ponto deve ser a mesma na base superior e inferior, sendo definida pela tolerância.

As linhas de ligações dos pontos da base superior com a base inferior formam as geratrizes de planificação. Como exemplo, são as linhas 1-1", 2-2", etc.

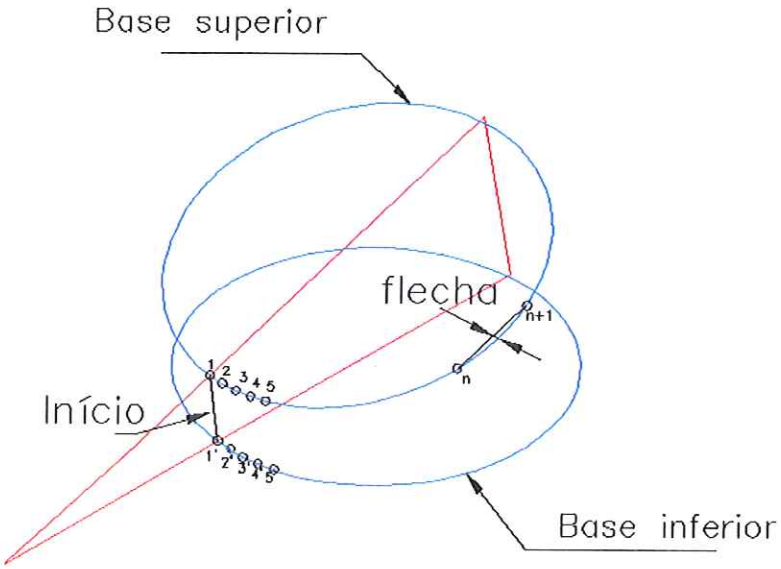


Figura A.3 – Identificação dos pontos e geratrizes.

Passo 4 : Planificação pela linha média.

A seção é planificada utilizando a linha média da espessura da chapa como referência. Em todos os casos a planificação é realizada na sua totalidade, ou seja, considerando que o desenho não possua abertura.

Com a utilização do método da triangulação é feita a planificação, pois os pontos e as geratrizes são conhecidos.

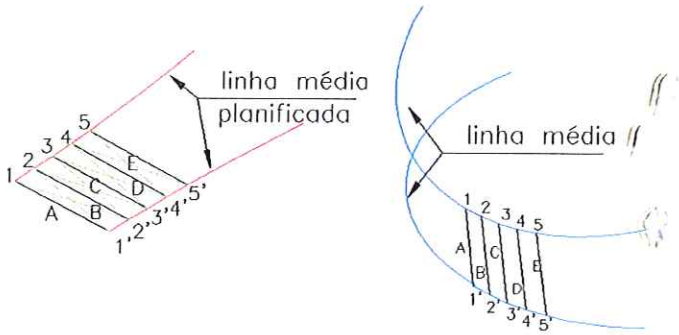


Figura A.4 – Planificação pela linha média.

Passo 5 : Localização dos limites de separação.

Os limites são as aberturas e o deslocamento da emenda de solda relativo aos quadrantes.

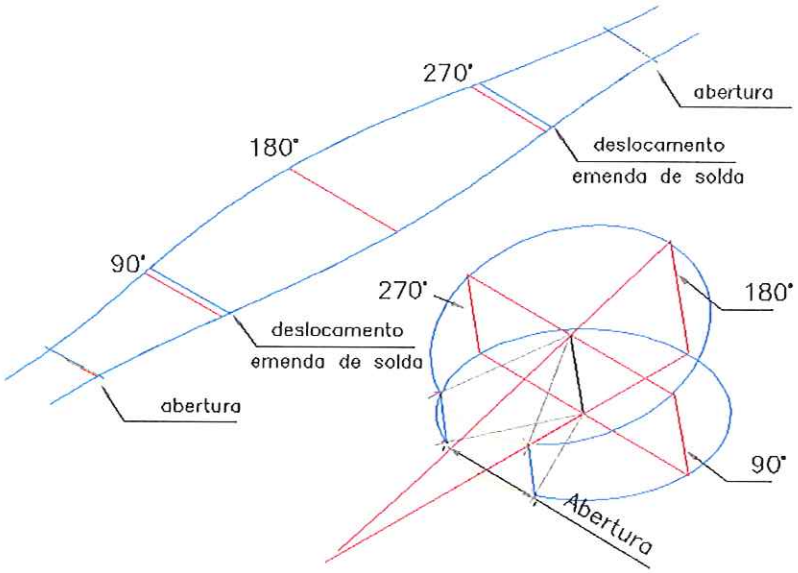


Figura A.5 – Identificação dos limites.

Passo 6 : Compensação do chanfro de solda (nariz).

Para cada geratriz planificada conforme figura A.3, calculase a compensação de material do perfil planificado pois estão definidos a geometria (triangulo abc), a espessura da chapa e o tipo de solda. Como exemplo, nariz de solda a 1/3 do lado interno.

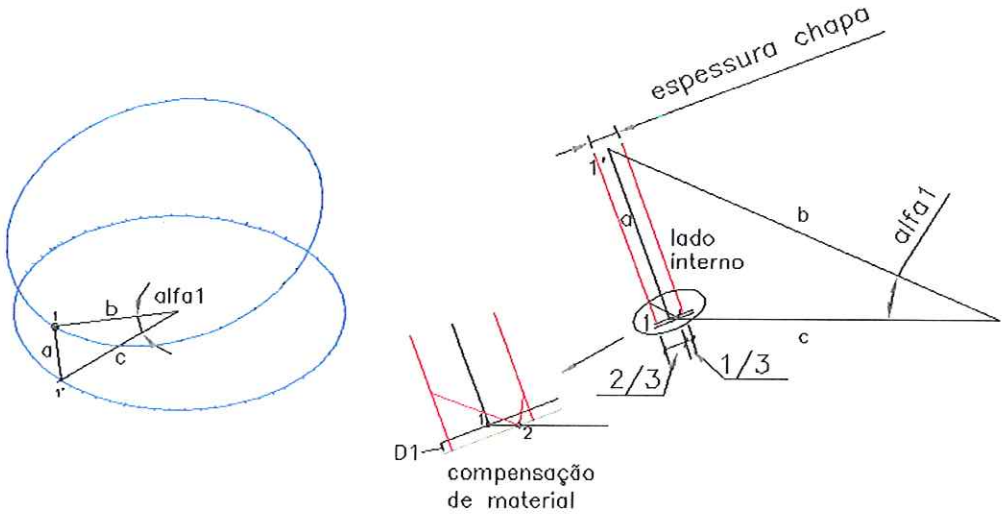


Figura A.6 – Compensação do chanfro.

Passo 7 : Efeito da compensação.

Os perfis planificados pela linha média e o compensado são desenhados.

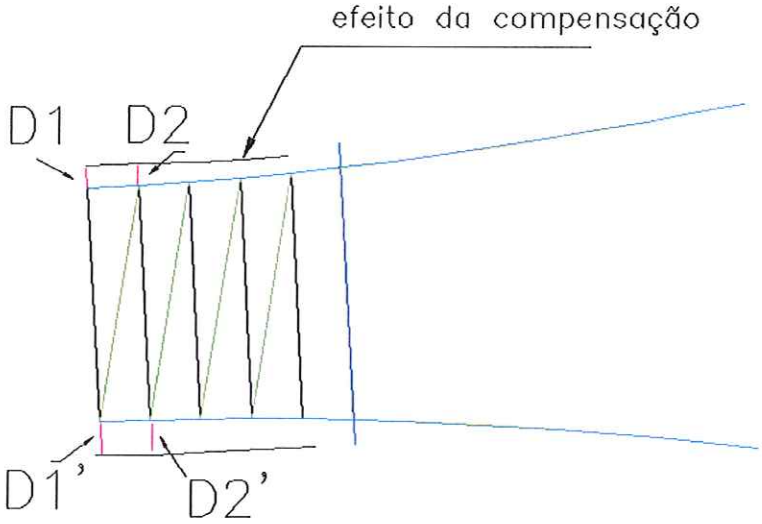


Figura A.7 – Desenho do perfil compensado.

APÊNDICE E - Exemplo de visualização 3D- caixa espiral.

Passo 1 : Geração do desenho de uma seção da caixa espiral conforme dados paramétricos. O raio 1 e 2 (figura A.1) leva em consideração o valor da espessura da chapa, gerando assim raios externo e interno.

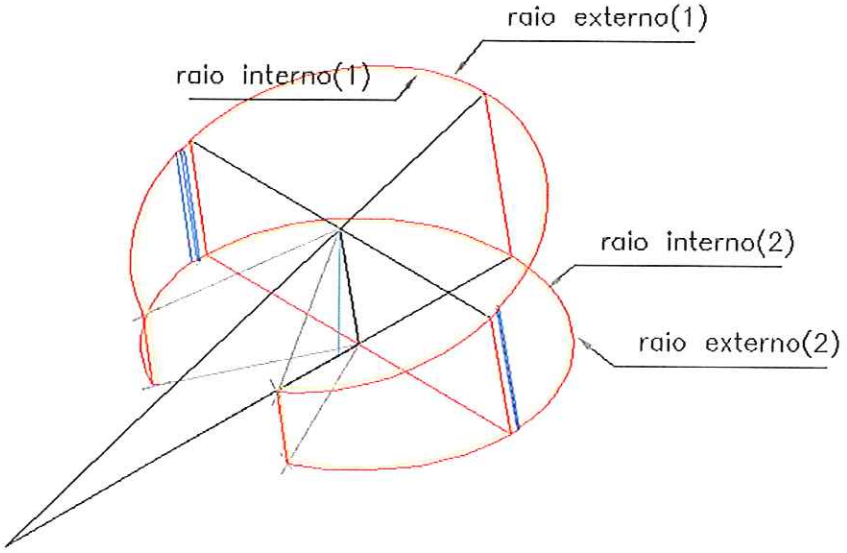


Figura A.8 – Desenho em wireframe conforme dados paramétricos.

Passo 2 : Geração de superfícies.

São geradas superfícies para cada seção do tipo "Loft". A superfície amarela representa o lado interno da chapa (gerado pelo raio interno 1 e 2). A superfície vermelha representa o lado externo (gerado pelo raio externo 1 e 2).

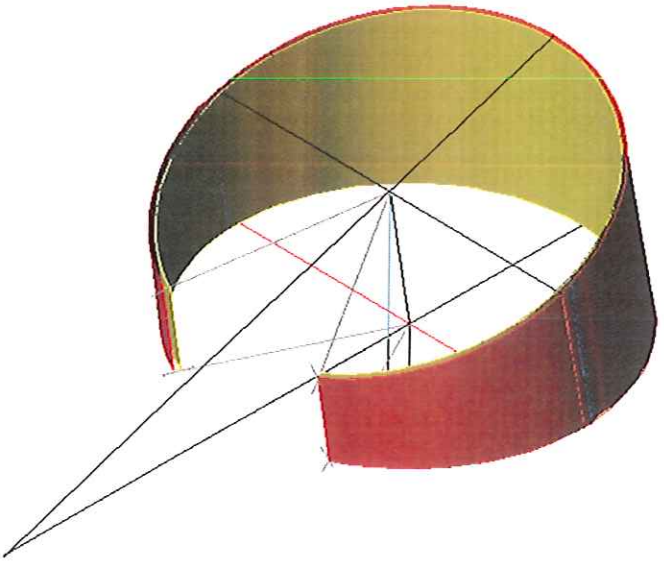


Figura A.9 – Representação da chapa, lado interno e externo.

APÊNDICE F - Exemplo de planificação de uma seção do tubo de sucção.

Neste exemplo, temos a base superior sendo um círculo e a base inferior um quadrado com os cantos arredondados.

O início da planificação por triangulação se dá no segmento 11', sendo o ponto 1 (inicio do círculo) como âncora para o segmento de reta do quadrado. A partir do início do arco de arredondamento os segmentos 22', 3-3',etc, são as referências para a cortinuidade da triangulação até atingir o quadrante da base superior a 90º (ponto 6). Repete-se o procedimento de ancorar o ponto 6 para o segmento de reta da base inferior (ponto 6').

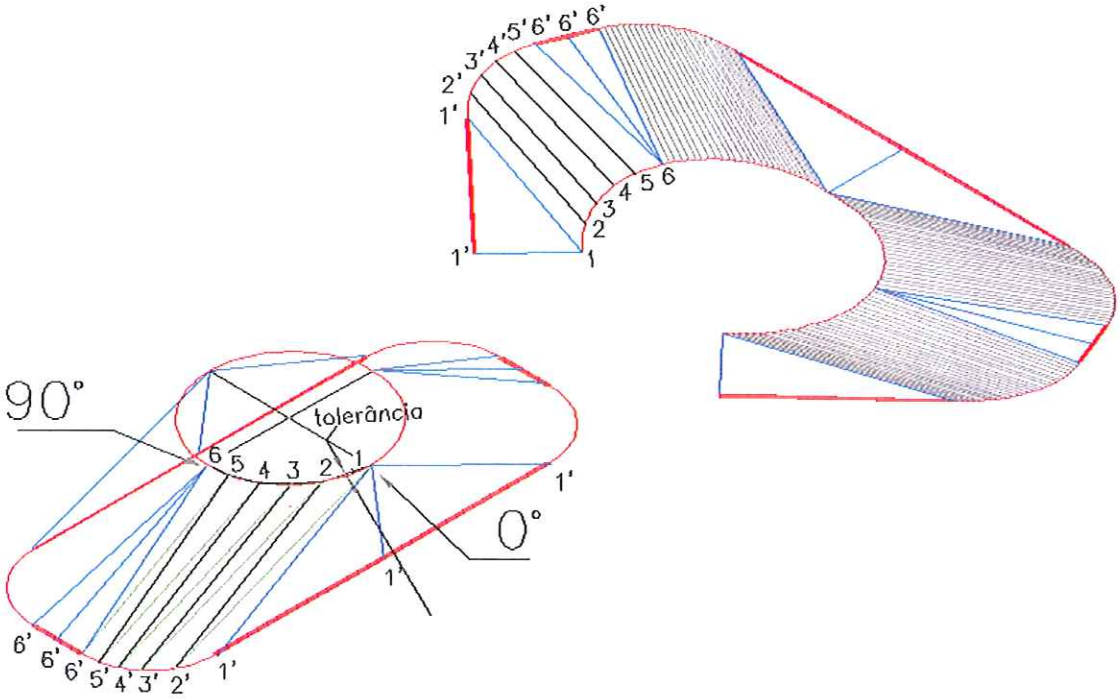


Figura A.10 – Exemplo de planificação do tubo de sucção onde a base superior é um círculo e a base inferior um quadrado com cantos arredondados.

EESC-USP Biblioteca Campus de S. Carlos