

SERGIO KENJI MORIGUCHI

**PROJETO E EXECUÇÃO DE
COMPONENTES DE BOMBAS
CENTRÍFUGAS APOIADOS POR
COMPUTADOR**

**Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia.**

**São Paulo
1997**

FD-2018

DEDALUS - Acervo - EPBC



31200030127

SERGIO KENJI MORIGUCHI

**PROJETO E EXECUÇÃO DE
COMPONENTES DE BOMBAS
CENTRÍFUGAS APOIADOS POR
COMPUTADOR**

**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.**

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**Orientador:
Prof. Dr. Douglas Lauria**

**São Paulo
1997**

AGRADECIMENTOS

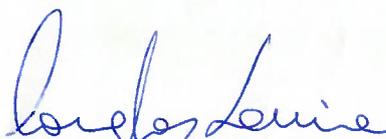
Agradeço a Deus que permitiu a conclusão deste trabalho e aos amigos que participaram comigo de todos os momentos de seu desenvolvimento. Sou grato pelos conselhos oportunos de meu orientador e por todos aqueles que estiveram a meu lado sempre me desejando sucesso. Dedico todo o trabalho realizado a minha amada esposa que me acompanhou em mais esta jornada.

São Caetano do Sul, 03 de abril de 1997.
À Secretaria de Pós-Graduação da EPUSP.

Prezados senhores,

Solicito a gentileza de anexar a **errata** ora apresentada nas cópias da dissertação de Sergio Kenji Moriguchi sob o título: Projeto e execução de componentes de bombas centrífugas apoiados por computador.

Tal solicitação prende-se à recomendação da banca examinadora.

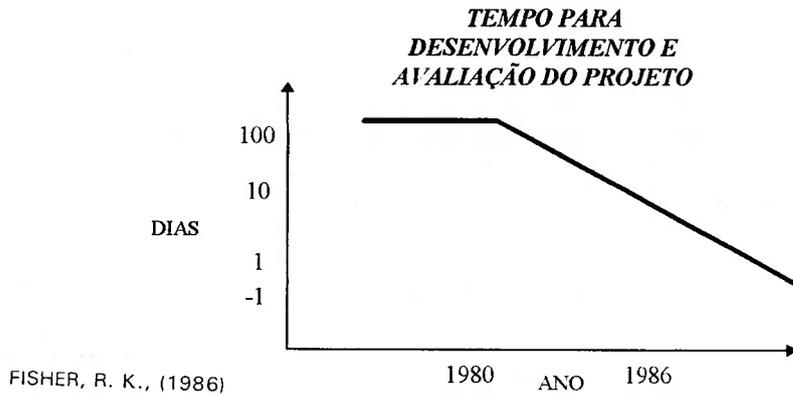


Prof. Dr. Douglas Lauria

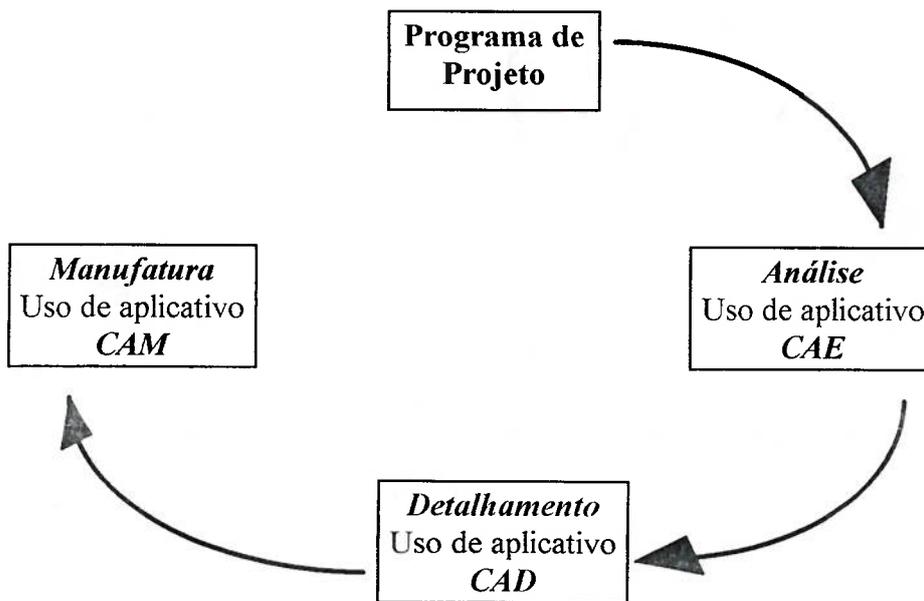
Mestres PMC.

Errata de: Projeto e execução de componentes de bombas centrífugas apoiados por computador
Por Sergio Kenji Moriguchi 03/04/97

2) Página 6, figura 1: substituir a figura inferior por:



3) Página 9, substituir a figura 2 por



4) Página 38, substituir o último parágrafo por:

A figura 19 mostra um desenho produzido por aplicativo CAD cedido pela indústria de bombas KSB.

5) Página 39, substituir o texto por: *Figura 19. Desenho produzido por sistema CAD cedido pela indústria de bombas KSB.*

6) Página 97, substituir no terceiro parágrafo: *superfícies de rotação* por *superfícies de revolução*.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FOTOGRAFIAS

LISTA DE FIGURAS DO APÊNDICE 1

LISTA DE SÍMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3. ESTRUTURA DO TRABALHO	9
3.1 O PROGRAMA DE PROJETO	11
3.1.1 ROTOR DA BOMBA CENTRÍFUGA	14
3.1.2 TELAS GERADAS PELO PROGRAMA - DIMENSIONAMENTO DO ROTOR DA BOMBA	19
3.1.3 GEOMETRIA DA CAIXA ESPIRAL	25
3.1.4 ARQUIVO DE DADOS	29
3.2 PADRONIZAÇÃO GRÁFICA DE RESULTADOS	32
3.3 PADRÃO GRÁFICO IGES (Initial Graphics Exchange Specification)	34
3.3.1 EXEMPLO	35
3.4 DETALHAMENTO DO PROJETO	40
3.5 MANUFATURA	41
3.5.1 MÉTODOS	41
3.5.2 ROTOR E CAIXA ESPIRAL	42
3.5.2 - 1 Modelos para fundição da bomba	43
3.5.2 - 2 Modelagem de uma pá	43
3.5.2 - 3 Moldes para a superfície externa do rotor	50
3.5.3 A USINAGEM AUTOMATIZADA NA MANUFATURA	50
3.5.3 - 1 Preparação para a usinagem do rotor	50
3.5.3 - 2 Preparação para a usinagem da caixa espiral	58
3.5.3 - 3 Fundição versus usinagem	61
3.5.3 - 4 Usinagem	62

3.5.3 - 5 Resultados do exemplo de projeto	65
3.5.3 - 6 Desenvolvimentos futuros	73
4. CONCLUSÕES	77
5 BIBLIOGRAFIA	80
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
7 APÊNDICE 1	83
7.1 O PROJETO DO ROTOR DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA	83
7.1.1 TRABALHO ESPECÍFICO INTERNO Y	83
7.1.2 MECANISMO DO FLUXO NO ROTOR	83
7.1.3 A INFLUÊNCIA DO NÚMERO FINITO DE PÁS	87
7.1.4 RESISTÊNCIA E ESCOLHA DA FORMA DO EIXO E DO ROTOR	91
7.1.5 PROCEDIMENTO GERAL DO CÁLCULO DAS PÁS	92
7.1.6 CURVATURA DAS PÁS DO ROTOR	95
7.1.7 CAIXA ESPIRAL	97
8 APÊNDICE 2. LISTAGEM DO PROGRAMA EM LINGUAGEM C	102

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE PROJETOS COMPLETOS DE TURBINAS DEVIDO AO AUXÍLIO DE COMPUTADORES.	6
FIGURA 2. ESTRUTURA DE TRABALHO	9
FIGURA 3. USO DE ARQUIVO NEUTRO EM PROGRAMAS GRÁFICOS.	11
FIGURA 4. FORMAS BÁSICAS DE UM ROTOR RADIAL E CAIXA ESPIRAL. (FIGURA GERADA A PARTIR DO PROGRAMA DE DIMENSIONAMENTO)	14
FIGURA 5. LARGURAS DO CANAL B_1 E B_2 E ÂNGULOS DE INCLINAÇÃO DAS PÁS β_1 E β_2 COM A DIREÇÃO TANGENCIAL. (FIGURA GERADA A PARTIR DO PROGRAMA DE DIMENSIONAMENTO)	18
FIGURA 6. TELA DO PROGRAMA DE CÁLCULO - DADOS SOBRE O ROTOR.	19
FIGURA 7. TELA DO PROGRAMA DE CÁLCULO - DADOS SOBRE O ROTOR.	20
FIGURA 8. TELA DO PROGRAMA DE CÁLCULO - PONTOS DA GEOMETRIA DAS PÁS DO ROTOR, RAIOS X ÂNGULO CENTRAL.	21
FIGURA 9. TELA DO PROGRAMA DE CÁLCULO - GEOMETRIA DO ROTOR: RAIOS X ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DAS PÁS EM RELAÇÃO A DIREÇÃO TANGENCIAL.	22
FIGURA 10. TELA DO PROGRAMA DE CÁLCULO - GEOMETRIA DO ROTOR: RAIOS X VELOCIDADE MÉDIA DO FLUIDO NO INTERIOR DO CANAL FORMADO ENTRE DUAS PÁS CONSECUTIVAS.	23
FIGURA 11. TELA DO PROGRAMA DE CÁLCULO - GEOMETRIA DO ROTOR: RAIOS X LARGURA DO CANAL FORMADO ENTRE DUAS PÁS CONSECUTIVAS.	24

FIGURA 12. TELA DO PROGRAMA DE CÁLCULO - GEOMETRIA DO ROTOR: RAIOS X PASSO ENTRE AS PÁS.	25
FIGURA 13. FORMAS BÁSICAS DA CAIXA ESPIRAL DE SEÇÃO CIRCULAR - ÂNGULO CENTRAL X RAIOS DA POSIÇÃO MAIS EXTERNA DO ROTOR. (FIGURA GERADA A PARTIR DO PROGRAMA DE DIMENSIONAMENTO)	26
FIGURA 14. TELA DO PROGRAMA DE CÁLCULO - FORMAS BÁSICAS DA CAIXA ESPIRAL DE SEÇÃO CIRCULAR: ÂNGULO CENTRAL X RAIOS DA SEÇÃO DO CARACOL.	27
FIGURA 15. TELA DO PROGRAMA DE CÁLCULO - FORMAS BÁSICAS DA CAIXA ESPIRAL DE SEÇÃO CIRCULAR : ÂNGULO CENTRAL X RAIOS DA SUPERFÍCIE EXTERNA DO CARACOL.	28
FIGURA 17. DESENHO DO ARQUIVO NEUTRO UTILIZADO PELO SOFTWARE MICROSTATION.	37
FIGURA 18. VISTA ISOMÉTRICA DO DESENHO DO ARQUIVO NEUTRO UTILIZADO PELO SOFTWARE MICROSTATION.	38
FIGURA 20. TELA CAPTURADA COM USO DO APLICATIVO CAD MICROSTATION - PERFIL TRIDIMENSIONAL A SER EMPREGADO NAS PÁS DO ROTOR.	52
FIGURA 21. TELA CAPTURADA COM USO DO APLICATIVO CAD MICROSTATION - SUPERFÍCIE DE REVOLUÇÃO GERADA PELA ROTAÇÃO DO PERFIL DE UMA PÁ DO ROTOR.	53
FIGURA 22. TELA CAPTURADA COM USO DO APLICATIVO CAD MICROSTATION - CONTORNOS QUE DEFINEM AS CAVIDADES A SER PROJETADAS NA SUPERFÍCIE DE REVOLUÇÃO GERADA PELA ROTAÇÃO DO PERFIL DE UMA PÁ DO ROTOR.	54
FIGURA 23. DESENHO DAS SUPERFÍCIES PARA USINAGEM DO ROTOR GERADAS NO APLICATIVO CAD MICROSTATION.	55
FIGURA 24. DESENHO DO ROTOR ABERTO A SER USINADO EM UMA SÓ PEÇA EM FRESADORA CNC.	56

FIGURA 25. DESENHO DA SUPERFÍCIE DA TAMPA DO MOLDE PARA CONFEÇÃO DE MACHOS GERADO NO APLICATIVO CAD MICROSTATION.	57
FIGURA 26. DESENHO DA SUPERFÍCIE A SER USINADA PARA MANUFATURA DA CAIXA ESPIRAL - CAVIDADE INTERNA. FIGURA GERADA PELO APLICATIVO CAM MASTERCAM.	59
FIGURA 27. DESENHO DA SUPERFÍCIE A SER USINADA PARA MANUFATURA DA CAIXA ESPIRAL - FORMA EXTERNA DO CARACOL. FIGURA GERADA PELO APLICATIVO CAM MASTERCAM.	60
DIAGRAMA 1. OTIMIZAÇÃO DA FORMA.	12
DIAGRAMA 2. FLUXOGRAMA DO PROGRAMA DE PROJETO.	13

LISTA DE FOTOGRAFIAS

- FOTOGRAFIA 1. MOLDE EM MADEIRA DAS PÁS DO ROTOR. 45**
- FOTOGRAFIA 2. MOLDE EM RESINA PARA PRODUÇÃO DAS PÁS DO ROTOR. 46**
- FOTOGRAFIA 3. CONJUNTO DE MOLDES CONFEÇÃO DO MACHO PARA ROTOR COMPLETO DE PÁS BIPARTIDAS SEM TAMPA. 47**
- FOTOGRAFIA 4. MOLDE PARA CONFEÇÃO DE MACHO DE MATERIAL CERÂMICO. 49**
- FOTOGRAFIA 5. FRESADORA CNC DE TRÊS EIXOS DO NÚCLEO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS DA ESCOLA DE ENGENHARIA MAUÁ. 63**
- FOTOGRAFIA 6. ROTOR DE PÁS DE SIMPLES CURVATURA. 64**
- FOTOGRAFIA 7. COMPONENTES USINADOS PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS: CAIXA ESPIRAL E ROTOR. 71**
- FOTOGRAFIA 8. MOLDES EM DIVERSOS MATERIAIS COM VARIAÇÕES NO CAMINHO DA FERRAMENTA. CERA EM AZUL, ALUMÍNIO E MADEIRA.72**

LISTA DE FIGURAS DO APÊNDICE 1

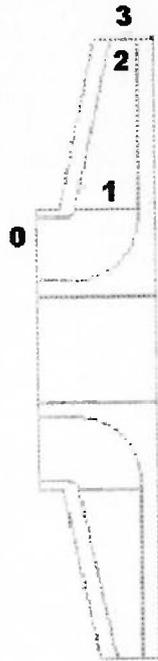
- FIGURA 1. REPRESENTAÇÃO DAS VELOCIDADES NO ROTOR RADIAL DE UMA BOMBA. A VELOCIDADE ABSOLUTA C RESULTA DA ADIÇÃO VETORIAL DA VELOCIDADE RELATIVA W E DA VELOCIDADE TANGENCIAL U . 84
- FIGURA 2. REPRESENTAÇÃO DAS VELOCIDADES NO ROTOR RADIAL DE UMA BOMBA. 85
- FIGURA 3. TRIÂNGULO DE VELOCIDADE PARA A ARESTA DE SUÇÃO QUANDO $\alpha_0 = 90^\circ$. 87
- FIGURA 4. ROTOR RADIAL LENTO (LINHAS CONTÍNUAS) E UM ROTOR RADIAL DE VELOCIDADE MÉDIA DESENVOLVIDO A PARTIR DESTES (LINHAS TRACEJADAS E TRAÇO-PONTO) 90
- FIGURA 5. FORMAS CARACTERÍSTICAS DE ROTORES. 91
- FIGURA 6. ROTOR RADIAL LENTO 93
- FIGURA 7. TRIÂNGULOS DE VELOCIDADE ARESTA DE PRESSÃO E DE SUÇÃO. 94
- FIGURA 8. ESBOÇO PERTINENTE AO CÁLCULO PONTO A PONTO DAS PÁS DE UMA BOMBA. 96
- FIGURA 9. CAIXA ESPIRAL 98
- FIGURA 10. ESPIRAL EM VISTA DE CORTE LONGITUDINAL 98
- FIGURA 11. CAIXA ESPIRAL COM SEÇÃO CIRCULAR 100

LISTA DE SÍMBOLOS

Y	trabalho específico interno
$Y_{pá}$	trabalho específico nas pás
H	altura de elevação
g	aceleração da gravidade local.
c	velocidade absoluta da partícula fluida observada
w	velocidade relativa (na direção das pás)
u	velocidade tangencial
α	ângulo da velocidade absoluta c com a direção tangencial u
r	raios
m	vazão mássica
$M_{pá}$	momento atuante nas pás
p	pressão fluida ou coeficiente de potência mínima
z	número de pás no rotor
S	momento estático da linha de corrente média entre as arestas de entrada e de saída
ψ	coeficiente empírico, que depende da forma de rotor e do tipo de sistema diretor
n	rotação do rotor
V	vazão em volume
n_q	rotação específica
τ_{adm}	tensão admissível a torção
d	diâmetro do eixo do rotor
V_{sp}	fluxo de perda de fluido no labirinto
b	largura do rotor
β	ângulo das pás na saída do rotor
s	espessura das pás
k	coeficiente de estrangulamento da seção do canal entre pás
d_n	diâmetro do cubo
D_s	diâmetro de sucção

Índices:

- 0** face de entrada do rotor (externa ao mesmo)
- 1** face de entrada das pás
- 2** face de entrada de saída das pás, interna ao rotor
- 3** face de saída do rotor, externa ao mesmo



RESUMO

O presente trabalho tem o objetivo de empregar recursos computacionais de hardware, software e periféricos de forma integrada para realizar o projeto e execução de bombas centrífugas.

A partir dos cálculos das dimensões básicas do rotor e da carcaça de uma bomba centrífuga são determinados parâmetros de projeto e a partir destes são gerados os arquivos de desenho correspondentes.

Aplicada a técnica de engenharia auxiliada por computador ou CAE aos arquivos de dados do equipamento, as informações do projeto, expressas de forma neutra e parametrizada, podem ser utilizadas diretamente em programas aplicativos específicos. Desta forma, torna-se possível a análise estrutural do projeto, verificação e impressão de desenhos e execução da usinagem de seus componentes.

Ao final do ciclo do trabalho tem-se condições de dimensionar e executar componentes de bombas apenas com auxílio do computador e periféricos. A aplicação destes procedimentos permite precisão otimização e redução de custos e tempo de manufatura de bombas centrífugas.

A manufatura pode ser feita utilizando-se a usinagem em máquinas CNC de modelos para confecção de moldes para fundição ou através da usinagem direta dos próprios componentes.

ABSTRACT

This paper deals with the use of hardware and software computational features and peripherals in an integrated form to design centrifugal pumps.

Calculations of the impeller and spiral casing basic dimensions are determined as design parameters and corresponding drawing files are generated.

Computer Aided Engineering technique is used in the equipment data files. The design information expressed in a neutral and parametric form enable the direct use of application softwares. This way, makes it possible to check and print out drawings and execute components machining.

At the work cycle end the use of the computer allows to dimension and manufacture the pump components reducing manufacturing time and costs.

Manufacturing can be made by CNC machining of the models for casting or direct machining of the components.

1. INTRODUÇÃO

Os projetos de engenharia têm sido uma das áreas mais beneficiadas com o desenvolvimento de métodos computacionais. Isto pode ser observado pela grande quantidade de programas aplicativos disponíveis no mercado, assim como pela utilização maciça destes na indústria.

Este trabalho se utiliza daqueles recursos estabelecendo um procedimento prático para fabricação de bombas centrífugas de simples curvatura, recursos estes oferecidos por um programa de dimensionamento integrável com programas comerciais CAD, CAE E CAM.

A rapidez na obtenção de resultados proporcionada pelos recursos computacionais permite ao usuário realizar múltiplos ante projetos para uma determinada aplicação. Deste modo torna-se simples a análise de alternativas diferentes para uma mesma instalação, pois a cada mudança de dados sobre o funcionamento, obtem-se automaticamente uma nova solução.

Os recursos computacionais vêm contribuir também na manufatura, dando maior velocidade aos processos de produção realizados em máquinas ferramentas. Controladas por computadores, as sequências de operações das máquinas podem ser programadas e executadas com rapidez, precisão e repetibilidade superiores a aquelas operadas por seres humanos.

Na fabricação de bombas centrífugas, particularmente na modelação, tarefas manuais e de interpretação de desenhos em papel podem ser substituídas por processos de transferência eletônica de dados.

Com estes dados são utilizadas ferramentas computacionais para testes, modificações e para a própria manufatura. A forma de

interpretação do projeto é simplificada e extremamente precisa. Uma vez gerados os dados da geometria, são compartilhados por todos os níveis do processo de produção.

A usinagem dos próprios componentes ou de seus moldes para a fundição realizada com recursos computacionais, vem substituir tarefas artesanais tradicionalmente feitas a mão.

Este trabalho foi realizado integralmente com recursos disponíveis no Núcleo de Métodos Computacionais da Escola de Engenharia Mauá em São Caetano do Sul - SP.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma amostra da atuação dos computadores nos projetos de engenharia mecânica relacionados com bombas centrífugas. É notável o crescimento geométrico do número de referências em função do tempo, bem como a profundidade de atuação dos computadores neste campo.

PECK (1968) se utiliza de computadores para projeto de bombas centrífugas estudando a influência do número finito de pás de um rotor na sua altura de elevação. Para o projeto preliminar das dimensões principais da bomba, o autor apresenta um número de parâmetros adimensionais para uma base de velocidade específica e equações matemáticas que serão dados de entrada para o programa computacional. Este estudo apresenta perdas hidráulicas internas, dimensões gerais do rotor, ângulos de ataque para o escoamento, estimativas para a direção e magnitude da velocidade de saída do fluido, determinação das áreas da voluta ou anel difusor e estimativa de parâmetros de cavitação.

O projeto de bombas centrífugas é mais uma arte do que uma ciência exata, é o comentário de BROPHY M. C. (1974). Em seu estágio inicial, o projeto de bombas centrífugas consistia em realizar considerações uni-dimensionais simples, especificando apenas parâmetros na entrada e na saída da bomba. Na atualidade, são empregadas considerações bi-dimensionais para analisar o campo de escoamento axissimétrico na determinação do que ocorre no interior do rotor entre a entrada e a saída do fluido. Este autor estabelece um processo de projeto que primeiramente considera a construção uni-dimensional do rotor a fim de determinar suas condições de operação. Um programa computacional incorpora o método da curvatura de linhas de corrente na determinação do escoamento axisimétrico, visando aproximar-se de suas condições reais. Finalmente o passo mais importante é o projeto das formas das pás em três dimensões. Este método resulta na construção mecânica

das pás usando as formas obtidas por seções que podem ser construídas nível por nível até a formação do canal completo.

Segundo CHACOUR, S. A., (1986) o desenvolvimento de programas para o cálculo preciso de escoamentos de fluidos determinam o estágio atual da aplicação de computadores para o projeto de bombas e turbinas. As geometrias de projetos propostos podem ter a qualidade e eficiência do escoamento avaliadas em laboratórios digitais. Correlações detalhadas entre os resultados de testes obtidos em laboratório utilizando-se modelos físicos e digitais são conduzidas em cada projeto visando aprimorar a capacidade de interpretação da análise do escoamento para próximas aplicações.

A análise do escoamento deve estar ligada de forma interativa com o software gerador da geometria e com o software de análise estrutural de modo que as formas do projeto possam ser rapidamente desenvolvidas e definidas considerando-se os aspectos estrutural e do escoamento. Aplicativos para manufatura comandando máquinas fresadoras CNC devem ser utilizados para a produção de modelos de teste ou manufatura em grande escala a partir de seu projeto.

Sistemas computacionais tem abreviado numerosos testes em modelos. O projeto dos canais de bombas e turbinas que anteriormente era desenvolvido ao longo de meses, agora pode ser desenvolvido em apenas um dia para novos mercados de máquinas.

Do exposto anteriormente pode-se concluir que muito se trabalha e publica, na área de projeto de máquinas hidráulicas e pouco, para não dizer nada, área de manufatura destas mesmas máquinas.

A parte mais importante em qualquer sistema de projeto é a capacidade de análise do escoamento. Enquanto grande progresso tem sido atingido na simulação de escoamentos, não há informações até o momento sobre programas que possam fornecer dados sobre a performance de bombas ou turbinas. Espera-se que em breve as

correlações observadas entre dados coletados de análises digitais e de testes em laboratório venham a dar condições para o estabelecimento de um sistema de projeto mais completo.

Programas gráficos interativos são interessantes para complementar sistemas, desenvolvendo as geometrias e representando a malha do escoamento para a análise mecânica. Há duas características importantes na geração desta geometria:

1. Geração automática de desenhos e malhas para análise.
2. Desenvolvimento de apenas uma descrição matemática das pás. Isto assegura que a análise, o modelo e o protótipo sejam feitos utilizando-se de uma geometria única.

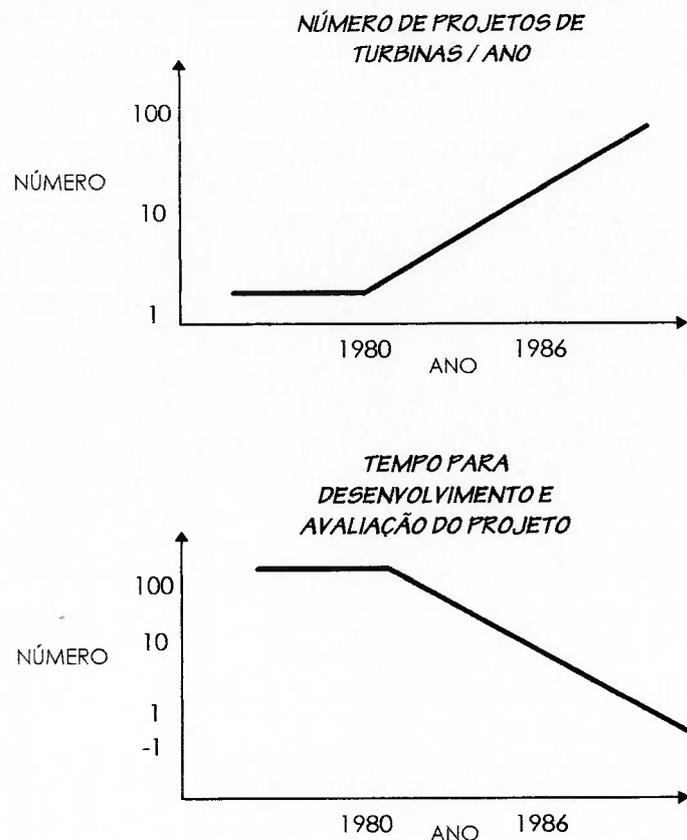


Figura 1. Evolução do número de projetos completos de turbinas devido ao auxílio de computadores.

O uso intensivo de sistemas computadorizados de projetos proporcionam resultados expressivos em se tratando das características da performance hidráulica e tem impacto significativo também na forma de obtenção do produto.

Como resultado da precisão dos projetos digitalmente testados, usuários destes projetos podem utilizá-los certos de que sua performance hidráulica foi otimizada.

O desenvolvimento das características hidráulicas é caracterizado pela interação entre métodos teóricos de cálculos utilizados em mecânica dos fluidos e testes de modelos, sintetizam os autores STROHMER, F; SEMPER, W. (1988). Métodos de cálculos atingiram um

estágio onde são capazes de prover soluções numéricas para um vasto número de casos e de realizar pré-seleções através da análise de alternativas para uma aplicação. Utilizando-se de programas computacionais que fazem a ligação entre projeto, sistema de testes de modelos com aquisição de dados, banco de dados com características de eficiência de rotores e características geométricas, tudo isto com precisão e a flexibilidade oferecida pelos computadores auxilia na otimização do projeto.

Nos últimos anos, tem sido desenvolvidas várias técnicas de análise e projeto de engenharia. O uso de computadores envolvendo simulações repetidas traz reduções de custo e tempo requerido para o desenvolvimento de projetos novos com economia de tempo despendido em testes de modelos ou protótipos. Segundo MEI, Z. Y., (1991), estas aplicações técnicas são conhecidas como engenharia auxiliada por computador ou CAE. Em geral CAE envolve o uso das ferramentas de software:

- modelamento de sólidos para visualização de produtos.
- simulações de performance como análise de escoamentos, tensão, deformação, térmica e dinâmica.
- detalhamento de projeto, cálculos e desenhos.
- controle numérico de máquinas operatrizes.
- testes de produto para garantir a qualidade da produção.

Os recursos oferecidos pelos computadores para o projeto e manufatura de máquinas hidráulicas são usados para várias tarefas diferentes. Dos itens acima, podemos chamar os dois primeiros de CAE-engenharia auxiliada por computador apenas para separar de termos igualmente conhecidos como: CAD-projeto auxiliado por computador, CAM-manufatura auxiliada por computador e CAT-teste auxiliado por computador.

Uma pesquisa realizada através de visitas às principais fábricas de bombas centrífugas no Brasil indica que a manufatura de bombas

centrífugas não utiliza plenamente os recursos computacionais para operações de usinagem. Essas operações restringem-se a desbastes e furações em peças fundidas que poderiam ser inteiramente usinadas como apresentado no item 3.5.3. deste trabalho.

3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Os recursos atualmente oferecidos pelos computadores, enfocados neste trabalho, não necessitam ser pertinentes a um sistema e nem a uma configuração específica de equipamentos. Isto permite que cada etapa possa ser realizada com aplicativos comerciais e com o emprego de computadores pessoais ou estações de trabalho.

O procedimento sugerido inicia-se com o dimensionamento dos componentes da bomba e seus benefícios estendem-se até a manufatura de rotores em peça única totalmente usinados em fresadoras CNC de cinco eixos, como visto em CHACOUR, S. A., (1986), ou para confecção dos moldes necessários para realizar a sua fundição. Um fator decisivo no processo de produção a ser empregado é o tamanho do lote a ser manufaturado, o que define a utilização do processo de fundição ou a usinagem dos componentes.

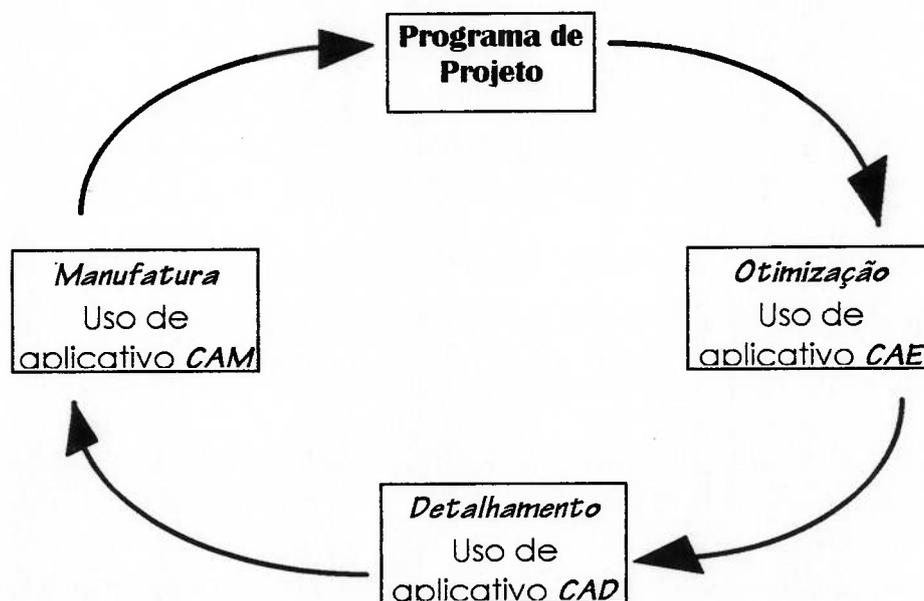


Figura 2. Estrutura de trabalho

As etapas de trabalho são:

- Utilização de programa de cálculo para dimensionamento dos componentes;
- Uso de aplicativo CAE para otimização da geometria;
- Uso de aplicativo CAD para detalhamento do projeto;
- Uso de aplicativo CAM para manufatura.

O programa de projeto permite através de cálculos a obtenção do dimensionamento e da geometria do rotor e do caracol de uma bomba centrífuga.

O uso do programa permite o projeto desses componentes e gera a partir de suas dimensões seus desenhos na forma de arquivos computacionais. As informações contidas nestes desenhos são armazenadas na forma de texto em código ASCII, baseados na norma IGES 4.0. Estes arquivos podem ser reconstituídos utilizando-se qualquer programa comercial gráfico compatível com o padrão.

O uso destes arquivos padronizados fornece para cada condição diferente de operação um novo resultado de projeto, que disponível na forma de desenhos será utilizado em programas de detalhamento, análise e manufatura, como sugere a figura 3.

No desenvolvimento do trabalho foram enfatizadas a produção de desenhos e manufatura, não sendo aplicada a otimização das geometrias com uso de aplicativos específicos para o escoamento. A definição dos procedimentos e resultados possíveis com o uso de aplicativos CAE serão apresentados a seguir.

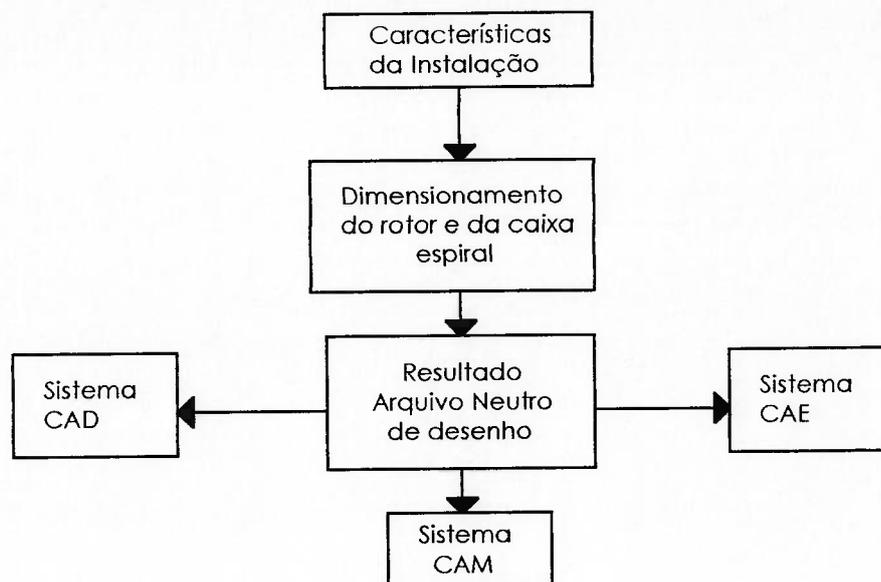


Figura 3. Uso de Arquivo Neutro em programas gráficos.

3.1 O PROGRAMA DE PROJETO

Um programa desenvolvido em linguagem C permite o cálculo da geometria do rotor e do caracol de uma bomba centrífuga a partir da aplicação das formulações clássicas de pré-projeto destes componentes de bombas, admitido escoamento unidimensional.

A partir deste pré-projeto deve-se dentro de um programa informatizado de desenvolvimento de máquinas, partir para a otimização da geometria e, após, para a manufatura. Por não ser o escopo deste trabalho, a otimização da geometria não será praticada, porém mostra-se no diagrama 1, sob forma de fluxograma, o procedimento para tal prática.

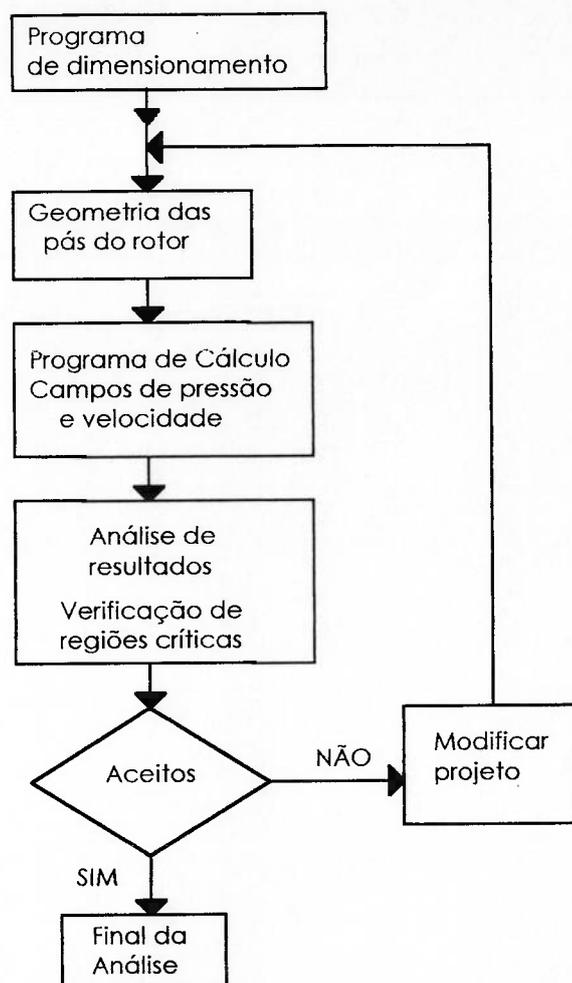


Diagrama 1. Otimização da forma.

O programa de pré-projeto, sem otimização, se apresenta de forma interativa. Devem ser preenchidos campos com os valores numéricos necessários para o dimensionamento dos componentes da bomba.

Os dados necessários ao dimensionamento da bomba referem-se ao seu ponto ótimo de operação e são:

- Vazão volumétrica,
- Carga no ponto ótimo,
- Rotação nominal.
- Ângulos de entrada e saída do fluido

O diagrama 2 apresenta a seqüência de procedimento do programa de pré-projeto.

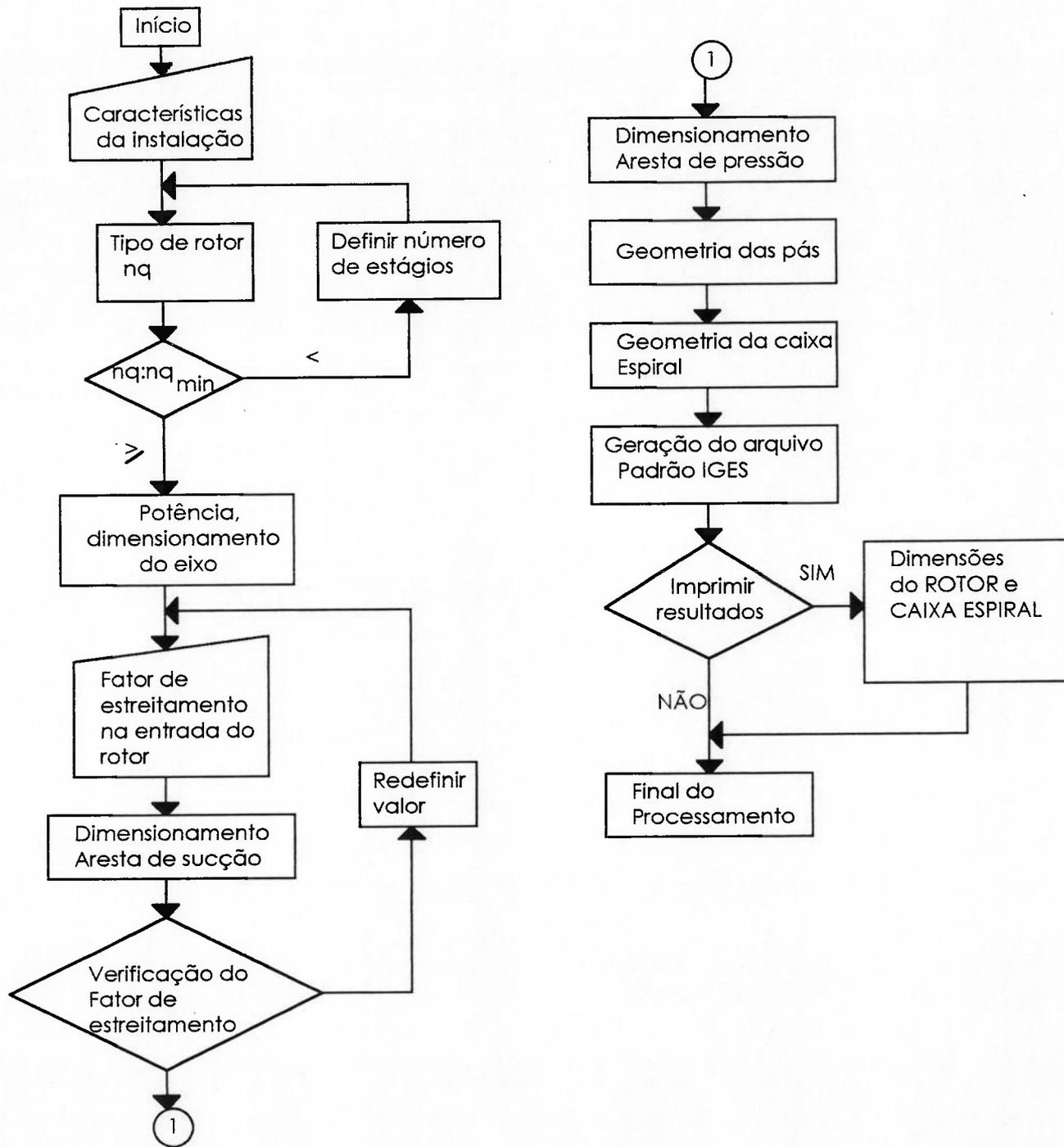


Diagrama 2. Fluxograma do Programa de Projeto.

Apenas com os parâmetros citados são efetuados os cálculos para definição da geometria dos componentes da bomba, obtendo-se o perfil da caixa espiral e a geometria do rotor, com a definição da forma de suas pás, das superfícies de sucção e de pressão (*figura 4*).

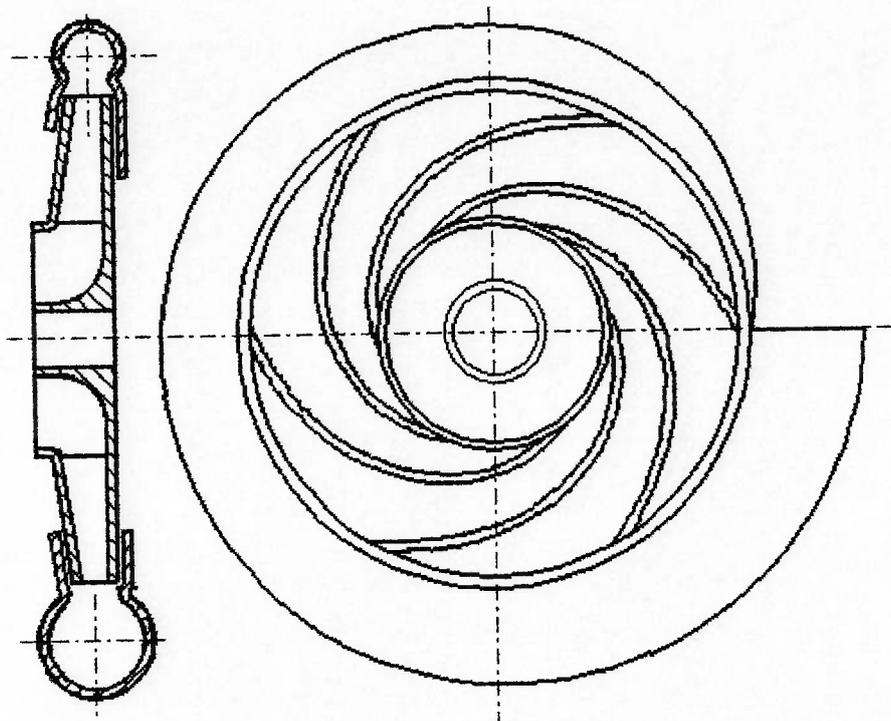


Figura 4. Formas básicas de um rotor radial e caixa espiral. (Figura gerada a partir do programa de dimensionamento)

3.1.1 ROTOR DA BOMBA CENTRÍFUGA

Inicialmente o programa calcula a partir dos dados da instalação a rotação específica nq , comparando-a com a rotação específica mínima para bombas de apenas um estágio.

A metodologia para os cálculos referidos encontra-se no apêndice 1.

Caso a rotação específica calculada seja menor que a mínima, igual a dez, deve-se aumentar o número de estágios, isto é, o número de rotores da bomba.

Para rotações específicas inferiores a dez, a relação entre os diâmetros da aresta de pressão e de sucção ultrapassa a 2,5, PFLEIDERER C., PETERMANN H. (1979). Nesta situação os canais das pás seriam muito longos e muito estreitos, e com isto, as perdas por atrito inviabilizariam o rotor.

O Programa analisa o valor de nq e determina automaticamente o número de estágios necessário para a bomba.

Com nq dentro do limite, segue-se com os cálculos.

Dimensionamento da aresta de Sucção

Nesta etapa calcula-se a potência do motor a utilizar com rendimento fixado em 70% ,como sugere PFLEIDERER, C.; PETERMANN, H. (1979). O diâmetro do eixo e valores provisórios para o fator de estreitamento na entrada do rotor, número de pás do rotor e as dimensões da aresta de entrada de fluido no rotor também são calculadas.

Estes valores provisórios dependem da relação entre o diâmetro de entrada e o diâmetro de saída do rotor. Quando do dimensionamento da aresta de pressão tais valores serão verificados.

A necessidade do fator de estreitamento surge devido ao número finito de pás do rotor. Com o fator introduz-se nos cálculos o efeito da espessura das pás do rotor. Para seu cálculo, o programa realiza iterações a partir de um valor estimado. Com este valor é calculado o ângulo de inclinação das pás na aresta de sucção do rotor da

bomba, em seguida toma-se um valor para o ângulo de inclinação na aresta de pressão e define-se o número de pás do rotor.

O número de pás do rotor é definido provisoriamente pois supõem-se o diâmetro externo do rotor ou de saída do fluido como sendo o dobro do diâmetro da entrada. Este valor será verificado quando do dimensionamento da aresta de pressão.

Finalmente com estes valores torna-se possível calcular o fator de estreitamento. A partir deste novo valor a sequência de cálculo é repetida sucessivamente até obter-se um erro menor que um por cento entre o valor estimado e o calculado. Vide diagrama 2.

A esta altura dos cálculos já se dispõe dos valores provisórios das seguintes variáveis referentes à face de sucção.

- Velocidade de entrada do fluido,
- Diâmetro entrada,
- Diâmetro do cubo,
- Diâmetro do furo para o eixo,
- Ângulo de entrada do fluido,
- Largura dos canais do rotor na entrada,
- Número de pás do rotor.

Dimensionamento da aresta de Pressão

Segue-se ao dimensionamento da aresta de sucção, o dimensionamento da aresta de pressão com o valor provisório do diâmetro de saída do rotor. Definido o rendimento nas pás em 83% como sugere PFLEIDERER, C.; PETERMANN, H. (1979), calcula-se as velocidades na saída do rotor, o diâmetro da saída e a largura dos canais na saída do fluido.

De posse do valor calculado do diâmetro da saída do rotor são recalculados o número de pás do rotor bem como os demais valores provisórios tanto da aresta de sucção como de pressão. São realizadas sucessivas iterações até que o erro entre os valores do diâmetro adotado e do calculado seja menor que um por cento.

As variáveis calculadas na aresta de pressão são:

- Velocidade de saída do fluido,
- Diâmetro de saída,
- Ângulo de saída do fluido,
- Largura dos canais do rotor na saída.

Geometria das pás do rotor

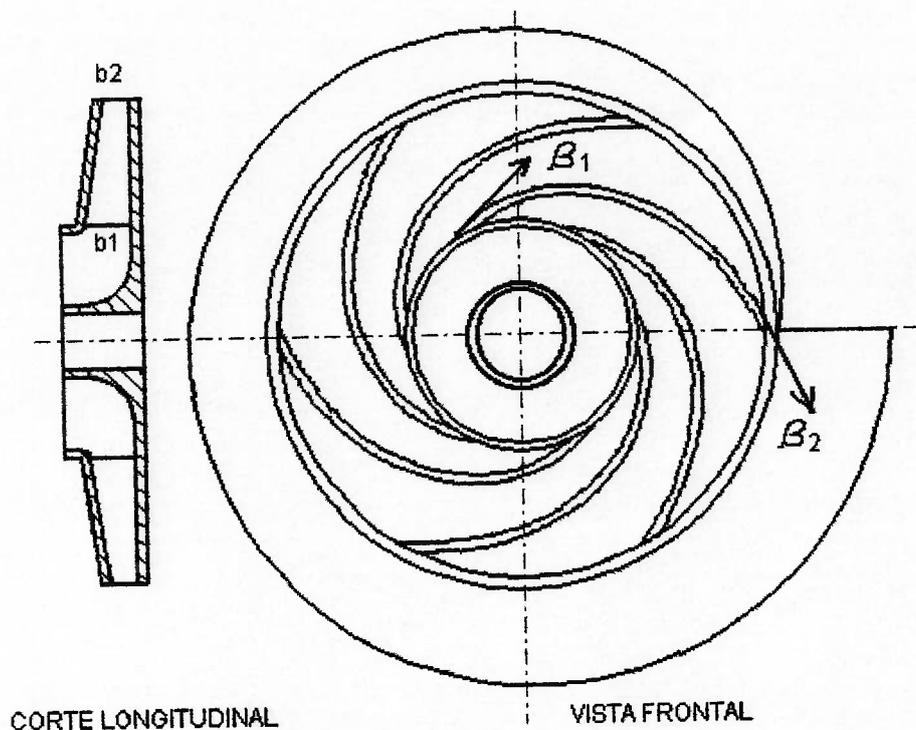


Figura 5. Larguras do canal b_1 e b_2 e ângulos de inclinação das pás β_1 e β_2 com a direção tangencial. (Figura gerada a partir do programa de dimensionamento)

A geometria das pás em corte longitudinal (Figura 5) é definida pelas larguras de entrada e saída do rotor (b_1 e b_2 , respectivamente), obtidas do cálculo anterior. O canal na parte anterior à entrada das pás é definido arbitrariamente tomando-se raios de curvatura a partir da largura da entrada do rotor.

Na vista frontal ao furo do eixo do rotor temos uma geometria curvada das pás. Do cálculo precedente do rotor são conhecidos os ângulos do fluido na entrada e na saída do rotor (β_1 e β_2 , respectivamente), ou seja, as direções do escoamento nas extremidades das pás, que devem ser ligadas por uma linha constante e levemente curvada. A geração desta geometria é obtida por uma integração descrita no apêndice 1.

Ao final desta etapa tem-se todos os valores dimensionais para a execução do desenho tridimensional do rotor da bomba.

3.1.2 TELAS GERADAS PELO PROGRAMA - DIMENSIONAMENTO DO ROTOR DA BOMBA

PROGRAMA DE PROJETO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS – PROB v. 1. 0		
Sergio Kenji Moriguchi		
DIGITE AS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DA BOMBA:		
VAZÃO	(Q em m ³ /s)	0.05
ALTURA DE ELEVAÇÃO	(h em metros)	50.00
ROTAÇÃO	(n em rpm)	1450
ÂNGULO DE ENTRADA BETA_0	(em graus)	16
ÂNGULO DE SAÍDA BETA_2	(em graus)	22
*** PARA EFETUAR O CÁLCULO TECLE F2 ***		

Figura 6. Tela do programa de cálculo - Dados sobre o rotor.

DADOS SOBRE A BOMBA

Numero de pas do rotor 'z'	=	7.00
Numero de estagios	=	4.99
Rotacao especifica 'Ng'	=	5.99

pressione a tecla ENTER para continuar

Figura 7. Tela do programa de cálculo - Dados sobre o rotor.

DADOS DO ROTOR DE SIMPLES CURVATURA			
raio	ang.rfi	raio	ang.rfi
59.635	0 :	106.84	104.3 :
61.995	7.4895 :	109.2	107.58 :
64.355	14.671 :	111.56	110.72 :
66.715	21.559 :	113.92	113.71 :
69.075	28.169 :	116.28	116.57 :
71.435	34.513 :	118.64	119.3 :
73.795	40.604 :	121	121.9 :
76.156	46.452 :	123.36	124.37 :
78.516	52.069 :	125.72	126.72 :
80.876	57.463 :	128.08	128.94 :
83.236	62.645 :		
85.596	67.621 :		
87.956	72.399 :		
90.316	76.988 :		
92.676	81.394 :		
95.036	85.623 :		
97.396	89.68 :		
99.757	93.572 :		
102.12	97.304 :		
104.48	100.88 :		

pressione a tecla ENTER para continuar

Figura 8. Tela do programa de cálculo - Pontos da geometria das pás do rotor, raio x ângulo central.

DADOS DO ROTOR DE SIMPLES CURVATURA			
raio	ang.beta	raio	ang.beta
59.635	16.515 :	106.84	20.695 :
61.995	16.569 :	109.2	21.122 :
64.355	16.639 :	111.56	21.58 :
66.715	16.724 :	113.92	22.073 :
69.075	16.825 :	116.28	22.605 :
71.435	16.941 :	118.64	23.179 :
73.795	17.071 :	121	23.799 :
76.156	17.217 :	123.36	24.472 :
78.516	17.378 :	125.72	25.203 :
80.876	17.554 :	128.08	26 :
83.236	17.745 :		
85.596	17.953 :		
87.956	18.178 :		
90.316	18.42 :		
92.676	18.68 :		
95.036	18.96 :		
97.396	19.26 :		
99.757	19.582 :		
102.12	19.927 :		
104.48	20.298 :		

pressione a tecla ENTER para continuar

Figura 9. Tela do programa de cálculo - Geometria do rotor: Raio x ângulo de inclinação das pás em relação a direção tangencial.

DADOS DO ROTOR DE SIMPLES CURVATURA			
raio	veloc. cm	raio	veloc. cm
59.635	2.1562 :	106.84	1.9279 :
61.995	2.1448 :	109.2	1.9164 :
64.355	2.1334 :	111.56	1.905 :
66.715	2.122 :	113.92	1.8936 :
69.075	2.1106 :	116.28	1.8822 :
71.435	2.0991 :	118.64	1.8708 :
73.795	2.0877 :	121	1.8593 :
76.156	2.0763 :	123.36	1.8479 :
78.516	2.0649 :	125.72	1.8365 :
80.876	2.0535 :	128.08	1.8251 :
83.236	2.042 :		
85.596	2.0306 :		
87.956	2.0192 :		
90.316	2.0078 :		
92.676	1.9964 :		
95.036	1.9849 :		
97.396	1.9735 :		
99.757	1.9621 :		
102.12	1.9507 :		
104.48	1.9393 :		

pressione a tecla ENTER para continuar

Figura 10. Tela do programa de cálculo - Geometria do rotor: Raio x velocidade média do fluido no interior do canal formado entre duas pás consecutivas.

DADOS DO ROTOR DE SIMPLES CURVATURA			
raio	largura do canal (b)	raio	largura do canal (b)
59.635	20.794 :	104.48	13.197 :
61.995	20.109 :	106.84	12.982 :
64.355	19.475 :	109.2	12.777 :
66.715	18.887 :	111.56	12.582 :
69.075	18.34 :	113.92	12.395 :
71.435	17.831 :	116.28	12.217 :
73.795	17.355 :	118.64	12.047 :
76.156	16.91 :	121	11.885 :
78.516	16.492 :	123.36	11.729 :
80.876	16.1 :	125.72	11.581 :
83.236	15.731 :	128.08	11.439 :
85.596	15.383 :		
87.956	15.055 :		
90.316	14.745 :		
92.676	14.452 :		
95.036	14.174 :		
97.396	13.91 :		
99.757	13.66 :		
102.12	13.423 :		

pressione a tecla ENTER para continuar

Figura 11. Tela do programa de cálculo - Geometria do rotor: Raio x largura do canal formado entre duas pás consecutivas.

DADOS DO ROTOR DE SIMPLES CURVATURA			
raio	passo das pás (t)	raio	passo das pás (t)
59.635	53.528	104.48	93.778
61.995	55.647	106.84	95.897
64.355	57.765	109.2	98.015
66.715	59.883	111.56	100.13
69.075	62.002	113.92	102.25
71.435	64.12	116.28	104.37
73.795	66.239	118.64	106.49
76.156	68.357	121	108.61
78.516	70.476	123.36	110.73
80.876	72.594	125.72	112.84
83.236	74.712	128.08	114.96
85.596	76.831		
87.956	78.949		
90.316	81.068		
92.676	83.186		
95.036	85.305		
97.396	87.423		
99.757	89.542		
102.12	91.66		

pressione a tecla ENTER para continuar

Figura 12. Tela do programa de cálculo - Geometria do rotor: Raio x passo entre as pás.

3.1.3 GEOMETRIA DA CAIXA ESPIRAL

A caixa espiral de seção circular é utilizada para condução do fluxo à saída do rotor em toda a sua periferia. Para captar o fluido que escoar na direção radial em toda a extensão do rotor na parte externa tem-se uma seção variável da caixa espiral, iniciando-se com uma pequena seção e terminando com uma seção máxima. Esta variação de seção objetiva transformar a energia cinética à saída do rotor em energia de pressão à saída da bomba.

A partir de seu cálculo são obtidos raios ao longo de um arco de 360° . Isto significa que existe a mesma condição de fluxo ao longo de toda a circunferência do rotor, pois com o aumento da seção na espiral, há a redução da velocidade média tangencial. Partindo desta

condição de fluxo, obtem-se os pontos da geometria externa do caracol.

A geração desta geometria é obtida por uma integração descrita no apêndice 1 e vista na figura 13.

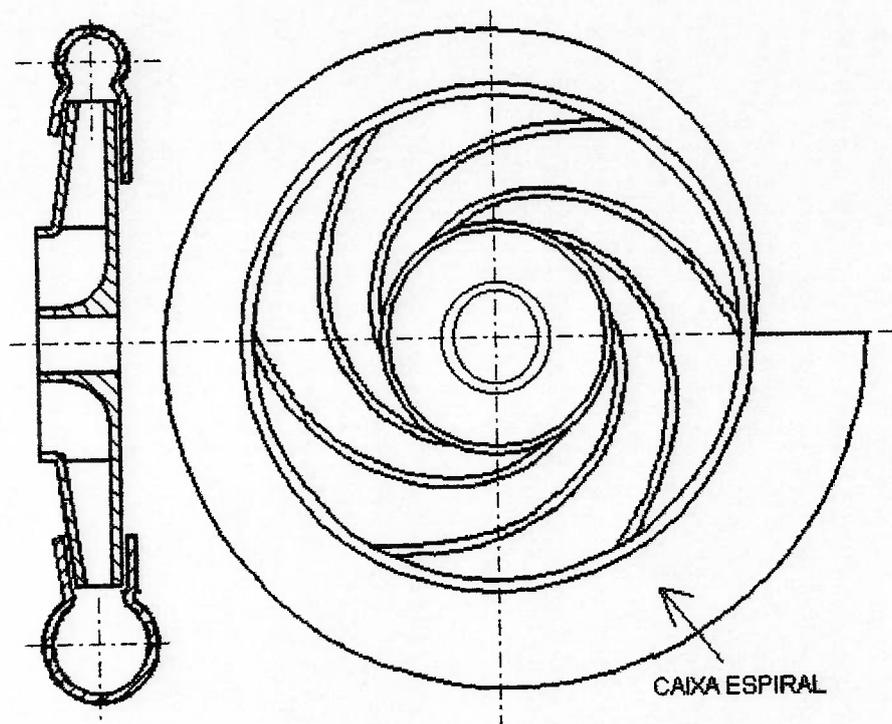


Figura 13. Formas básicas da caixa espiral de seção circular - Ângulo central x raio da posição mais externa do rotor. (Figura gerada a partir do programa de dimensionamento)

DADOS DA VOLUTA DE SECAO CIRCULAR

Angulo	Diametro do canal						
0	0	95	11.291	190	16.101	285	19.845
5	2.55	100	11.59	195	16.317	290	20.024
10	3.6133	105	11.882	200	16.531	295	20.202
15	4.432	110	12.168	205	16.743	300	20.378
20	5.124	115	12.448	210	16.952	305	20.553
25	5.7352	120	12.721	215	17.158	310	20.727
30	6.2888	125	12.99	220	17.363	315	20.9
35	6.7989	130	13.253	225	17.565	320	21.071
40	7.2745	135	13.512	230	17.765	325	21.241
45	7.722	140	13.766	235	17.963	330	21.41
50	8.1458	145	14.015	240	18.159	335	21.577
55	8.5495	150	14.261	245	18.353	340	21.744
60	8.9358	155	14.503	250	18.546	345	21.909
65	9.3068	160	14.741	255	18.736	350	22.073
70	9.6642	165	14.975	260	18.925	355	22.236
75	10.01	170	15.207	265	19.112	360	22.398
80	10.344	175	15.435	270	19.298		
85	10.668	180	15.66	275	19.481		
90	10.984	185	15.882	280	19.664		

pressione a tecla ENTER para continuar

Figura 14. Tela do programa de cálculo - Formas básicas da caixa espiral de seção circular: Ângulo central x raio da seção do caracol.

DADOS DA VOLUTA DE SECAO CIRCULAR							
Angulo	Linha externa	Angulo	Linha externa	Angulo	Linha externa	Angulo	Linha externa
0	134.48	95	145.77	190	150.58	285	154.33
5	137.03	100	146.07	195	150.8	290	154.51
10	138.1	105	146.36	200	151.01	295	154.68
15	138.91	110	146.65	205	151.22	300	154.86
20	139.61	115	146.93	210	151.43	305	155.04
25	140.22	120	147.2	215	151.64	310	155.21
30	140.77	125	147.47	220	151.84	315	155.38
35	141.28	130	147.73	225	152.05	320	155.55
40	141.76	135	147.99	230	152.25	325	155.72
45	142.2	140	148.25	235	152.44	330	155.89
50	142.63	145	148.5	240	152.64	335	156.06
55	143.03	150	148.74	245	152.84	340	156.23
60	143.42	155	148.98	250	153.03	345	156.39
65	143.79	160	149.22	255	153.22	350	156.56
70	144.15	165	149.46	260	153.41	355	156.72
75	144.49	170	149.69	265	153.59	360	156.88
80	144.83	175	149.92	270	153.78		
85	145.15	180	150.14	275	153.96		
90	145.47	185	150.36	280	154.15		

pressione a tecla ENTER para continuar

Figura 15. Tela do programa de cálculo - Formas básicas da caixa espiral de seção circular : Ângulo central x raio da superfície externa do caracol.

Após a definição de todos os valores para o dimensionamento do rotor e da caixa espiral o Programa de projeto além de apresentar telas com os resultados do dimensionamento da bomba, gera dois arquivos computacionais: um do tipo texto com informações completas sobre os resultados do dimensionamento e outro com informações para geração do desenho em padrão gráfico IGES.

DADOS DA VOLUTA DE SECAO CIRCULAR

Angulo (graus)	Diametro do canal (mm)	Raio externo (mm)
1 0	0.00	52.80
2 5	2.21	55.01
3 10	3.14	55.94
4 15	3.86	56.66
5 20	4.47	57.26
6 25	5.00	57.80
7 30	5.49	58.29
8 35	5.95	58.75
9 40	6.37	59.17
	:	
	:	
	:	
	:	
65 320	18.95	71.75
66 325	19.11	71.91
67 330	19.26	72.06
68 335	19.42	72.22
69 340	19.58	72.38
70 345	19.73	72.53
71 350	19.89	72.69
72 355	20.04	72.84
73 360	20.19	72.99

***** Aresta de succao *****

z = 7.00
numero de estagios = 16.00
cs (m/s) = 0.89
de (mm) = 12.99
dn (mm) = 15.99
ds (mm) = 42.02
d1 (mm) = 44.67
b1 (mm) = 8.45
t1 (mm) = 20.05
ypa (m²/s²) = 36.94

***** Aresta de pressao *****

b2 (mm) = 4.95
t2 (mm) = 45.14
c2m (m/s) = 0.80
u2 (m/s) = 7.90
diam2 (mm) = 100.57

***** FIM DO ARQUIVO *****

O arquivo em padrão gráfico é gerado em código ASC II que contém informações suficientes de seus desenhos em três dimensões para serem utilizadas por programas aplicativos CAD, CAE e CAM. Este arquivo segue a estrutura do padrão IGES compatível para conversão em todos os programas gráficos de engenharia. Maiores informações sobre este arquivo estão no item 3.2.

3.2 PADRONIZAÇÃO GRÁFICA DE RESULTADOS

No início do desenvolvimento dos programas gráficos, os programadores escreviam seus códigos com um estilo totalmente particular e pessoal, não havendo interesse ou preocupação por qualquer padronização.

O resultado disto foi a criação de programas aplicativos que só funcionavam numa determinada configuração. Dessa forma, não havia a possibilidade de se utilizar recursos gerados por um certo programa em outros. Logo, a falta de padronização veio a ser um fator limitante para a disseminação e o desenvolvimento de novas tecnologias.

A ampliação do uso dos computadores acelerou o desenvolvimento de novos aplicativos, motivando a formação de grupos de estudo empenhados na criação de padrões. O padrão direciona o processo de codificação oferecendo estruturas eficientes e testadas, persistindo também o diálogo entre configurações distintas de hardware.

Para amenizar o fato da existência de inúmeros códigos para a confecção de programas de computador e tipos de arquivos gerados por diferentes aplicativos foram criados também padrões em computação gráfica.

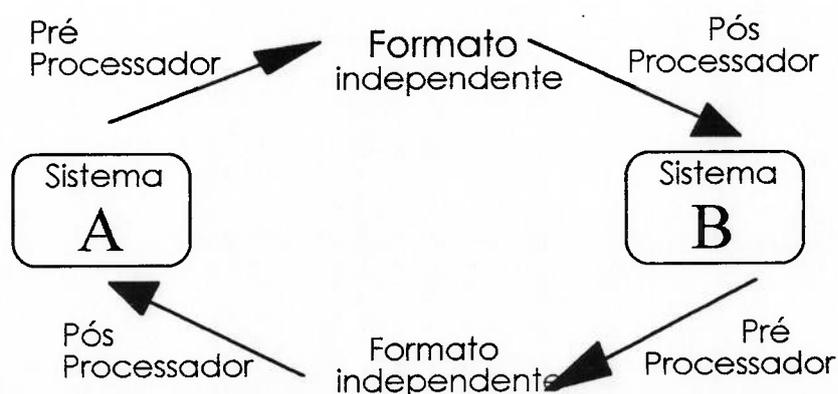


Figura 16. Utilização de arquivos neutros para transferência de dados.

A transferência de dados em computação gráfica se dá através de programas chamados pré e pós-processadores. O pré-processador faz com que as informações geradas por um sistema qualquer sejam enviadas a um arquivo de formato neutro, chamado de "METAFILE". As informações serão então armazenadas dentro deste arquivo, e estarão organizadas conforme o padrão utilizado no pré-processador. O pós-processador fará então o caminho inverso, interpretando as informações contidas no arquivo neutro (*figura 16*).

Na computação gráfica a padronização está intimamente ligada à portabilidade. Esta pode ser definida como sendo a facilidade de se adaptarem programas já existentes a ambientes diferentes daqueles em que foram concebidos.

A portabilidade de Dados é algo que se torna cada vez mais importante em Computação Gráfica. Com ela pode-se transferir desenhos e imagens já prontos, criados através de um aplicativo qualquer, para diferentes dispositivos de armazenamento, para outros computadores, ou para outro aplicativo.

Para que um desenho possa ser interpretado por equipamentos diferentes é necessário que seja codificado de uma forma específica e que os equipamentos possuam interpretadores para estas formas específicas de codificação.

Armazenar um desenho de uma forma padronizada possibilita que dados de saída de um determinado aplicativo possam ser processados por um outro. Integram-se desta forma vários processos, o que é bastante útil, principalmente em aplicativos CAD. Do mesmo modo é possível enviar ou receber desenhos através de linhas de comunicação de dados, como redes de telefonia por exemplo.

3.3 PADRÃO GRÁFICO IGES (Initial Graphics Exchange Specification)

O formato de padronização de desenhos IGES surgiu do comitê coordenado pelo NBS (National Bureau of Standards) através da indústria americana com representação da General Electric Company e da Boeing Company.

Utilizando o IGES pode-se representar modelos geométricos de coordenadas em duas dimensões ou representação em fio de arame (wireframe) em tres dimensões com superfícies curvadas ou planas, além de:

- entidades geométricas: curvas e superfícies B-spline;
- entidades de superfície regradada, cilindros e superfícies de revolução.
- várias fontes para textos;
- dados para o modelamento de elementos finitos;
- dados do produto para placas impressas;
- formato do arquivo binários (resultando em arquivos menores)

Os arquivos que representam os desenhos na forma de texto são em código ASCII de 80 colunas.

3.3.1 EXEMPLO

O arquivo neutro, abaixo transcrito, contém informações sobre o desenho do rotor em corte e em duas vistas e da caixa espiral, que podem ser vistos nas figuras 17 e 18.

Arquivo neutro gerado pelo programa de projeto em código IGES

```

Iges file generated from PROB v.1.0
Metafile
S0000001
S0000002
,,4HIGS1,7HARQUIVO,6HROTOR1,4HVER1,16,38,6,99,15,4HIGS1,1.0,2,2HMM
, G0000001
32767,3.276D1,7HYMD.HNS,1.0D-8,1.0180190998781D1,3HSKM,3HEEM,4,0;
G0000002
116 1 1 1 0 0 0 0 0D 1
116 0 0 1 0 0 0 0 0D 2
116 2 1 1 0 0 0 0 0D 3
116 0 0 1 0 0 0 0 0D 4
116 3 1 1 0 0 0 0 0D 5
116 0 0 1 0 0 0 0 0D 6
.
.
.
116 29 1 1 0 0 0 0 0D 57
116 0 0 1 0 0 0 0 0D 58
116 30 1 1 0 0 0 0 0D 59
116 0 0 1 0 0 0 0 0D 60
100 31 1 1 0 0 0 0 0D 61
100 0 0 1 0 0 0 0 0D 62
100 32 1 1 0 0 0 0 0D 63
100 0 0 1 0 0 0 0 0D 64
.
.
.
100 39 1 1 0 0 0 0 0D 77
100 0 0 1 0 0 0 0 0D 78
110 40 1 1 0 0 0 0 0D 79
110 0 0 1 0 0 0 0 0D 80
110 41 1 1 0 0 0 0 0D 81
110 0 0 1 0 0 0 0 0D 82
.
.
.

```

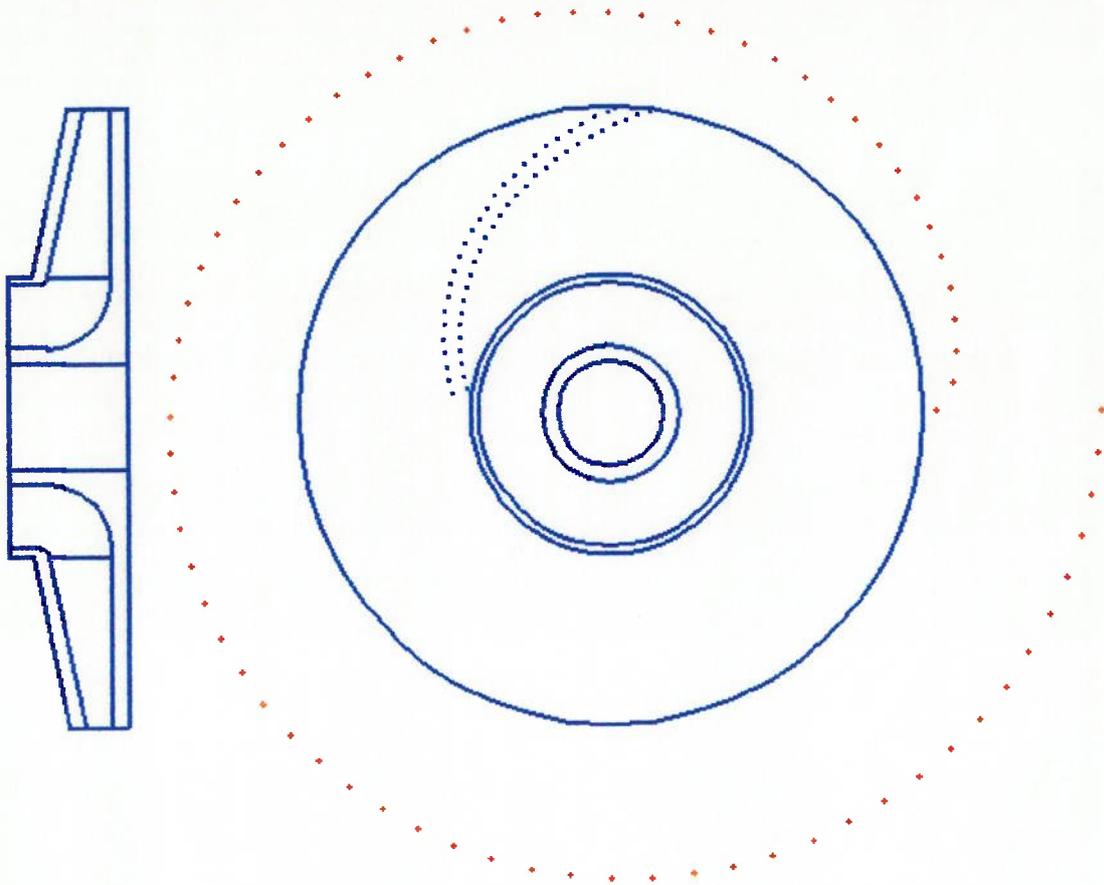



Figura 17. Desenho do arquivo neutro utilizado pelo software Microstation.

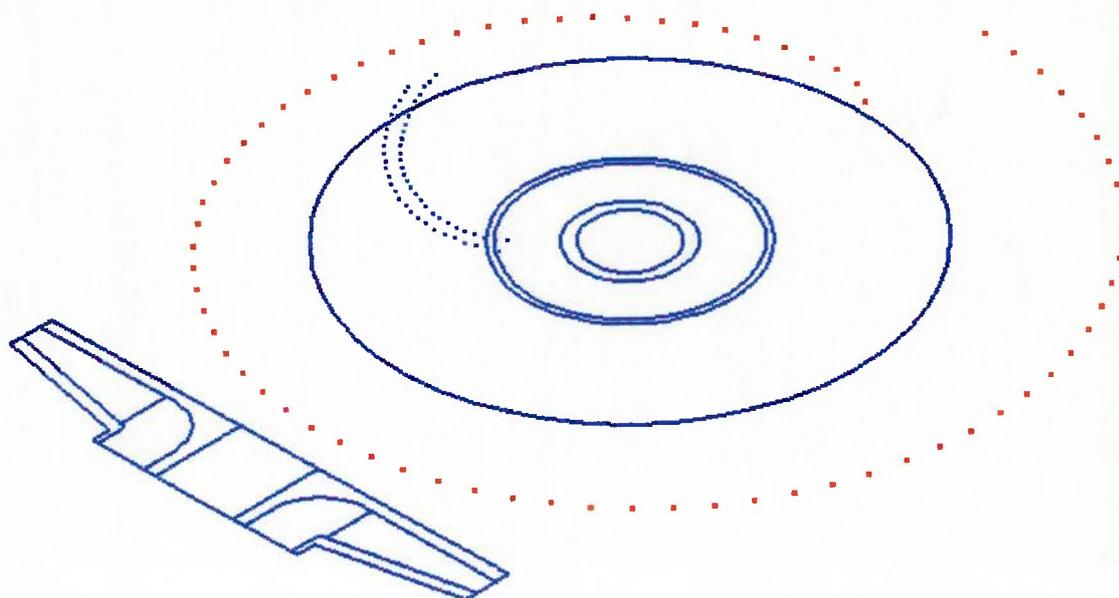


Figura 18. Vista Isométrica do desenho do arquivo neutro utilizado pelo software Microstation.

De posse da geometria dos componentes da bomba gerados pelo programa de projeto as próximas etapas são:

- Otimização da geometria, análise estrutural - não executada neste trabalho,
- Detalhamento dos componentes,
- Manufatura dos componentes.

A figura 19 mostra um desenho produzido por aplicativo CAD utilizado por uma indústria nacional de bombas centrífugas.

3.4 DETALHAMENTO DO PROJETO

Nesta etapa o projetista tem liberdade de aperfeiçoar a geometria dos componentes da bomba desenvolvendo detalhes referentes a seu funcionamento tais como labirintos, alterações da geometria etc.

O arquivo neutro gerado pelo programa de projeto pode ser reconstituído por um programa comercial CAD (Autocad, Microstation etc). O arquivo de desenho traz informações detalhadas do rotor da bomba e da caixa espiral e a partir de sua geometria são detalhados seus componentes.

Visando o perfeito compartilhamento de dados entre a geometria obtida pelo programa de projeto e os aplicativos comerciais, CAD, CAE e CAM utilizado pelo usuário, os dados da geometria são estabelecidos da maneira mais genérica possível, evitando-se a criação de níveis de desenho, uso de curvas, superfícies, criação de textos ou cotas. Deste modo, com a geometria básica constituída por pontos, retas e arcos tem-se uma perfeita migração de dados.

Para o rotor é necessária a inclusão de ressaltos, canais, chanfros não apresentados no desenho obtido pelo programa de projeto e a complementação da forma das pás, unindo-se os pontos gerados,

Dispostas as vistas do desenho e completado o detalhamento, o usuário deve então adicionar informações como cotagem, acabamento superficial, tolerâncias dimensionais, textos explicativos, desenhos de detalhes, listas de peças etc.

Através do programa CAD pode ser feita a impressão do desenho utilizando um traçador gráfico ou impressora (*Figura 19*).

3.5 MANUFATURA

3.5.1 MÉTODOS

Métodos de manufatura e controle de qualidade têm sido grandemente beneficiados com sistemas computacionais de projeto. A descrição tridimensional das superfícies do rotor resultante de sistemas computacionais são utilizadas para comandar a usinagem em fresadoras CNC de três e cinco eixos. Pás individuais e rotores inteiros podem ser usinados. Segundo FISHER R.K. (1986) as maiores pás já usinadas em máquinas CNC compõem uma turbina Francis de 6.7 metros de diâmetro externo.

Os rotores resultantes da usinagem têm melhor aparência e acabamento superficial e mantêm sua qualidade e uniformidade dimensional em todas as pás. Outros componentes tais como a caixa espiral também podem ser totalmente usinadas.

Todos os processos de manufatura pós projeto para componentes de bombas centrífugas podem ser melhorados quando auxiliados por computadores.

Após a realização de visitas técnicas às principais fábricas de bombas centrífugas instaladas em São Paulo, entre elas Sulzer, KSB e Mark Peerless, foi possível identificar a sequência de operações utilizada por estes fabricantes.

A forma de obtenção de rotores e da caixa espiral mais utilizada é a fundição, ideal para grandes produções. A usinagem tem sido usada para pequenos lotes e encomendas especiais e a soldagem por poucos fabricantes em máquinas especiais.

3.5.2 ROTOR E CAIXA ESPIRAL

A grande maioria de bombas centrífugas fabricadas no Brasil tem seus principais componentes produzidos utilizando-se o processo de fundição em metais específicos para o fluido de aplicação. Vamos nos ater ao rotor, componente cuja qualidade dimensional e superficial são fundamentais para um bom desempenho das bombas centrífugas.

A usinagem direta de rotores abertos está exemplificada nas páginas seguintes, porém, o exemplo mais crítico, a geração de moldes para fundição será detalhado a seguir.

A forma tradicional de produção de moldes é apresentada em 3.5.2 - 1, 3.5.2 - 2 e 3.5.2 - 3.

A proposta de produção de moldes por computador é apresentada em 3.5.3.

3.5.2 - 1 Modelos para fundição da bomba

A geração de moldes para a bomba é uma tarefa extremamente complexa, sendo usados materiais como madeira, resinas e metais. Suas dimensões são muito variadas e suas formas bastante complexas, fato que requer muita atenção para que o modelador possa reproduzir fielmente o que exige cada projeto.

A qualidade destes moldes vai influir diretamente no rendimento dos equipamentos projetados, uma vez que estes serão responsáveis pela orientação do escoamento.

A partir do recebimento do desenho dos componentes da bomba em duas ou mais vistas em papel, com tolerâncias de décimos de milímetros, o modelador tem de construir moldes que serão utilizados nos processos de fundição.

3.5.2 -2 Modelagem de uma pá

Obtenção dos machos

O modelo em madeira de uma pá do rotor é obtido através da montagem de vários compensados cortados cada um com um perfil diferente do outro. Esses compensados, de espessura especificada, ao serem dispostos uns sobre os outros devem repetir fielmente os parâmetros definidos pela cotação do desenho. Após sua colagem processa-se ao lixamento de suas arestas, formando uma das superfícies da pá. Esta superfície lixada deve estar dentro das tolerâncias requeridas pelo desenho.

Feito o lixamento de uma face da pá, esta é separada do bloco formado pelos compensados através de um corte. A face oposta à que sofreu o lixamento deve receber um acabamento semelhante observando-se a espessura requerida que em alguns casos deve ser variável ao longo de seu comprimento (Fotografia 1). Além das superfícies da pá propriamente dita, esta possui prolongamentos que

servirão como pinos de encaixe para a montagem da caixa de macho.

Outros moldes são necessários para compor a caixa de macho: moldes para a superfície externa inferior e para a superfície externa superior, onde são montadas as pás metálicas. Existem alguns moldes que devido a suas dimensões e curvatura das pás necessitam ter suas aletas modeladas em duas ou três partes para viabilizar a sua desmontagem. Outras substituem o molde para a superfície superior por um raspador que define esta superfície (Fotografia 3). O conjunto obtido com a montagem destas peças é denominado Caixa de macho que nesta situação está pronto para receber areia ou cerâmica para modelação.

Esta pá em madeira servirá somente para a confecção de um molde em resina para fundir peças idênticas em metal, geralmente alumínio.

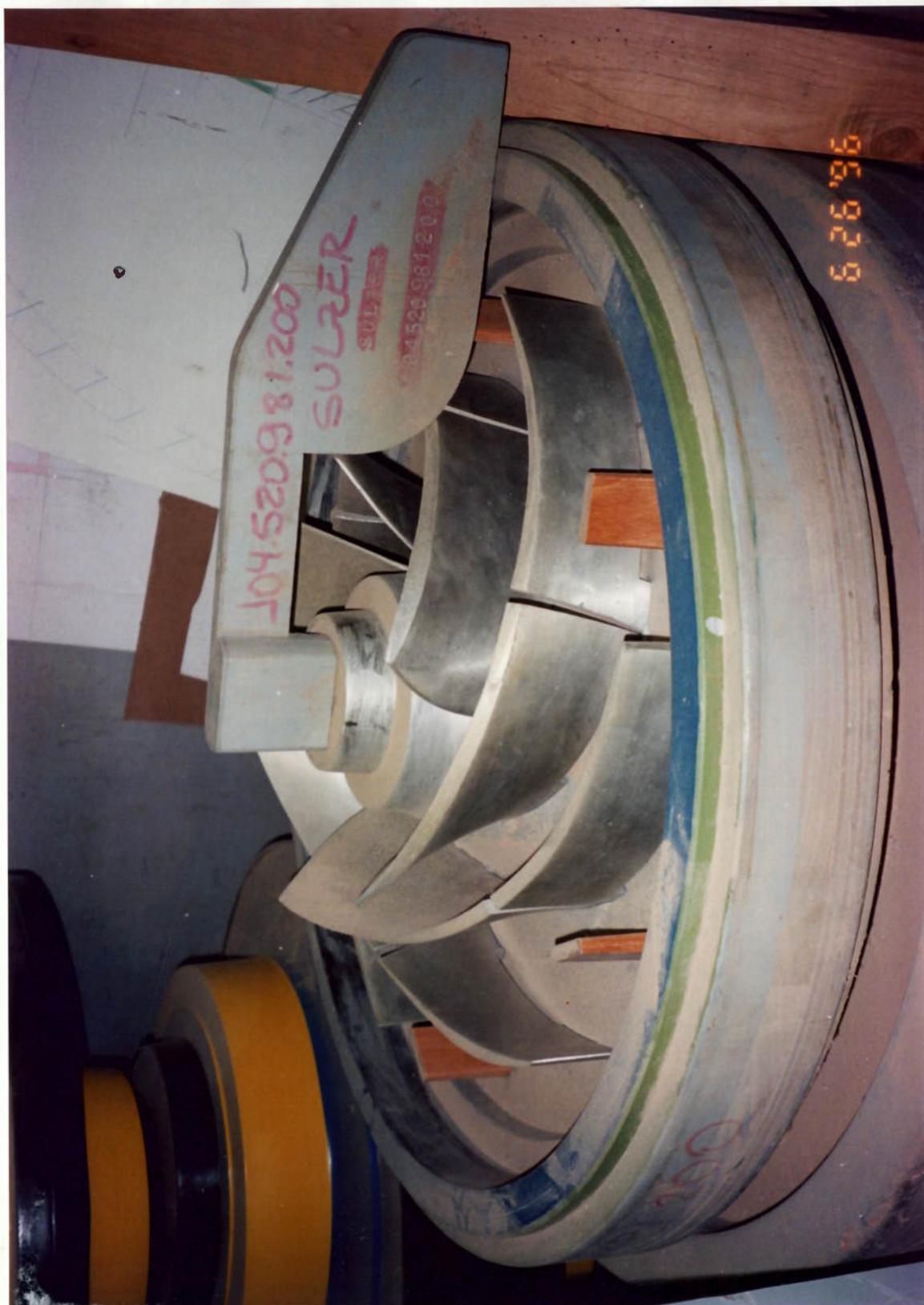
Este molde será utilizado apenas para produzir algumas pás metálicas utilizadas para compor a caixa de macho. A quantidade será estimada para o número de pás do projeto da bomba e eventualmente peças de reposição (Fotografia 2).



Fotografia 1. Molde em madeira das pás do rotor.



Fotografia 2. Molde em resina para produção das pás do rotor.



Fotografia 3. Conjunto de moldes confecção do macho para rotor completo de pás bipartidas sem tampa.

Quando se utilizam machos em cerâmica ao invés de areia, obtêm-se qualidade superior nas superfícies dos canais do rotor fundido e torna-se possível a inclusão de raios de concordância entre as superfícies das pás com as superfícies externas inferior e superior. Este fato acarreta em dificultar o trabalho manual da confecção dos moldes (Fotografia 4). A obtenção destes arredondamentos nos moldes com o auxílio da usinagem automatizada é direta e precisa bastando utilizar uma ferramenta com ponta esférica.



Fotografia 4. Molde para confecção de macho de material cerâmico.

3.5.2 - 3 Moldes para a superfície externa do rotor

Os moldes para obtenção das superfícies externas do rotor tem formas menos complexas e podem ser metálicos ou de madeira. Estes serão utilizados para produzir moldes em areia que ao ser montados com o macho em seu interior, estão prontos para o vazamento de metal líquido.

3.5.3 A USINAGEM AUTOMATIZADA NA MANUFATURA

3.5.3 - 1 Preparação para a usinagem do rotor

O programa de projeto está apto a gerar desenhos de rotores de pás de simples curvatura. Este tipo de rotor foi escolhido pela sua maior facilidade de manufatura podendo ser facilmente usinado em uma fresadora de três eixos. Quando em sua forma aberta o rotor de simples curvatura pode ser usinado e quando fechado deve ser fundido.

O rotor de simples curvatura utiliza um tipo de molde simplificado na produção de machos para fundição. O molde das pás é sempre feito em uma só peça. Deste modo tem-se a vantagem de usinar a forma das pás engastadas em uma de suas superfícies adjacentes seja a do lado da entrada do fluido ou a oposta.

A escolha da sequência de usinagem e a obtenção do caminho da ferramenta podem ser feitas de várias formas, porém, para o melhor resultado possível deve-se considerar:

- Qualidade de acabamento superior das superfícies
- Melhor tolerância dimensional
- Sequência de operações apropriada que permita a redução ou eliminação de arestas com rebarbas

- Velocidade da manufatura - Passos e profundidade de corte tendo como consequência menores tempos de produção

São utilizadas operações de manipulação dos elementos de desenho para obter superfícies e contornos para orientação da ferramenta. Tanto o rotor de simples curvatura aberto como seu molde para obtenção do macho que contém as pás do rotor pode ser feito em uma fresadora CNC de três eixos.

A forma da seção transversal dos canais ao longo do escoamento será sempre retangular, porém de dimensões variáveis. A figura 20, obtida com o aplicativo CAD Microstation, mostra o perfil tridimensional das pás que deverá ser usinado.

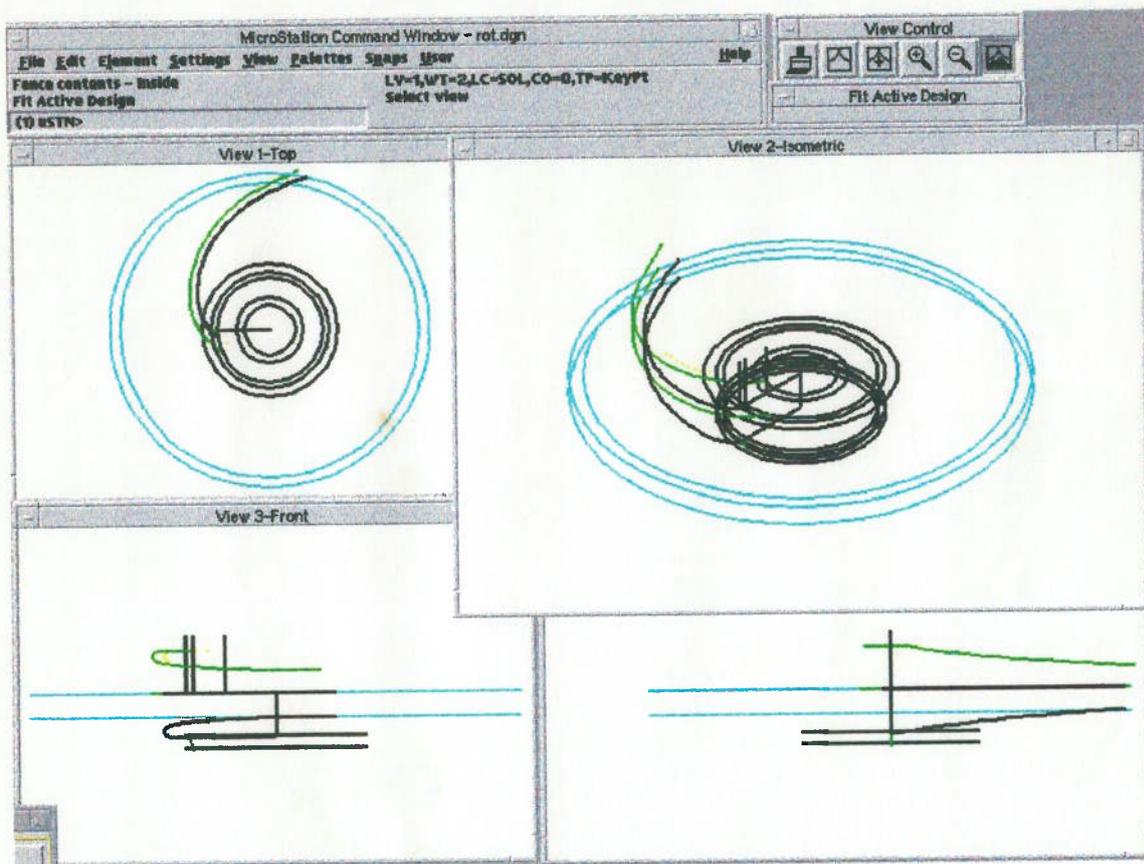


Figura20. Tela capturada com uso do aplicativo CAD Microstation - Perfil tridimensional a ser empregado nas pás do rotor.

Uma superfície de revolução é formada pela rotação do perfil da pá em torno do eixo de rotação do rotor, definindo a face do lado da entrada do fluido no rotor (Figura 21).

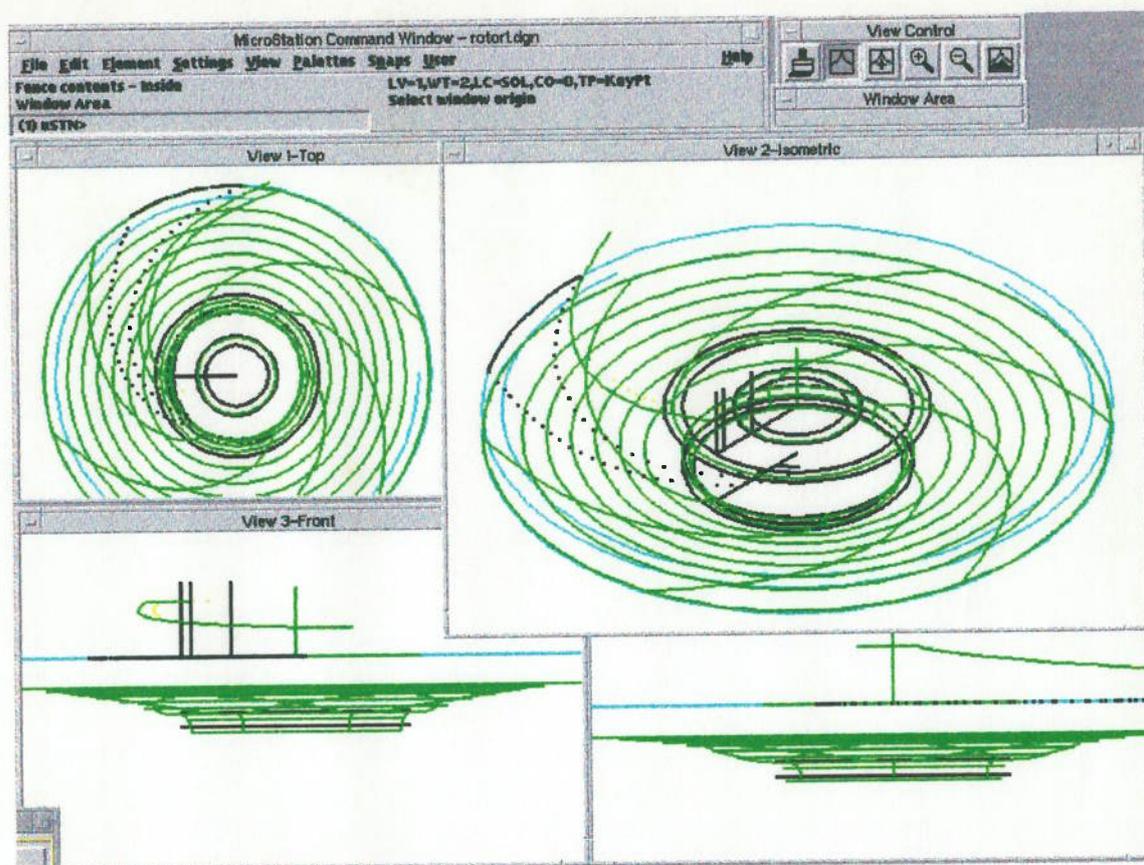


Figura 21. Tela capturada com uso do aplicativo CAD Microstation - Superfície de revolução gerada pela rotação do perfil de uma pá do rotor.

A partir dos canais formados entre duas pás consecutivas, forma-se um contorno plano fechado que será projetado sobre a superfície de revolução definida anteriormente. Desta projeção é gerada uma cavidade que será usinada formando então os canais entre pás do rotor. Esta usinagem é repetida através de sua rotação em torno do eixo de rotação do rotor (Figura 22).



Figura 22. Tela capturada com uso do aplicativo CAD Microstation - Contornos que definem as cavidades a ser projetadas na superfície de revolução gerada pela rotação do perfil de uma pá do rotor.

As informações da geometria do programa de projeto podem ser utilizadas para manufatura de diversas formas dependendo do processo produtivo. A figura 23 mostra as superfícies a serem usinadas para um rotor de duas peças ou molde para preparo do macho para as pás do rotor. As mesmas informações desta geometria podem ser utilizadas para gerar o caminho da ferramenta para usinagem de um rotor aberto de peça única (figura 24).

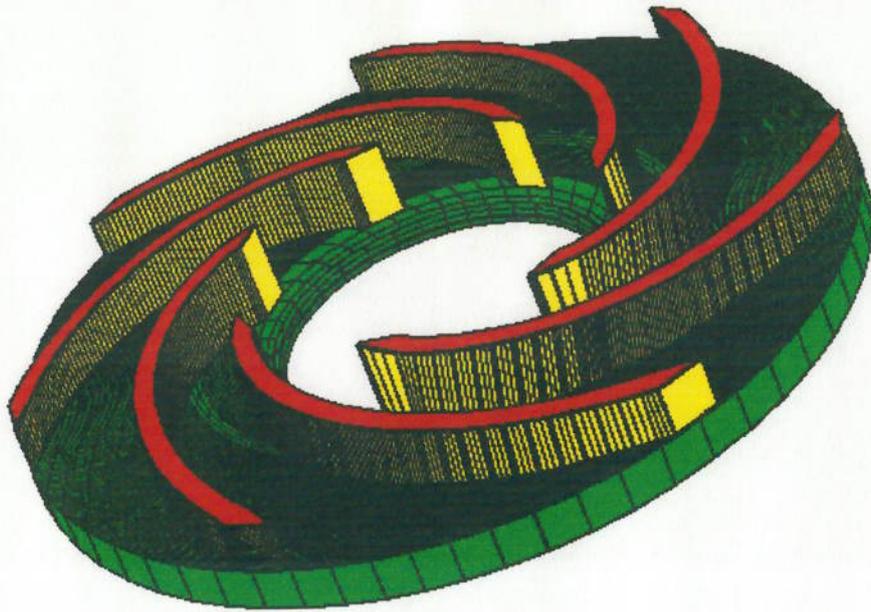


Figura 23. Desenho das superfícies para usinagem do rotor geradas no aplicativo CAD Microstation.

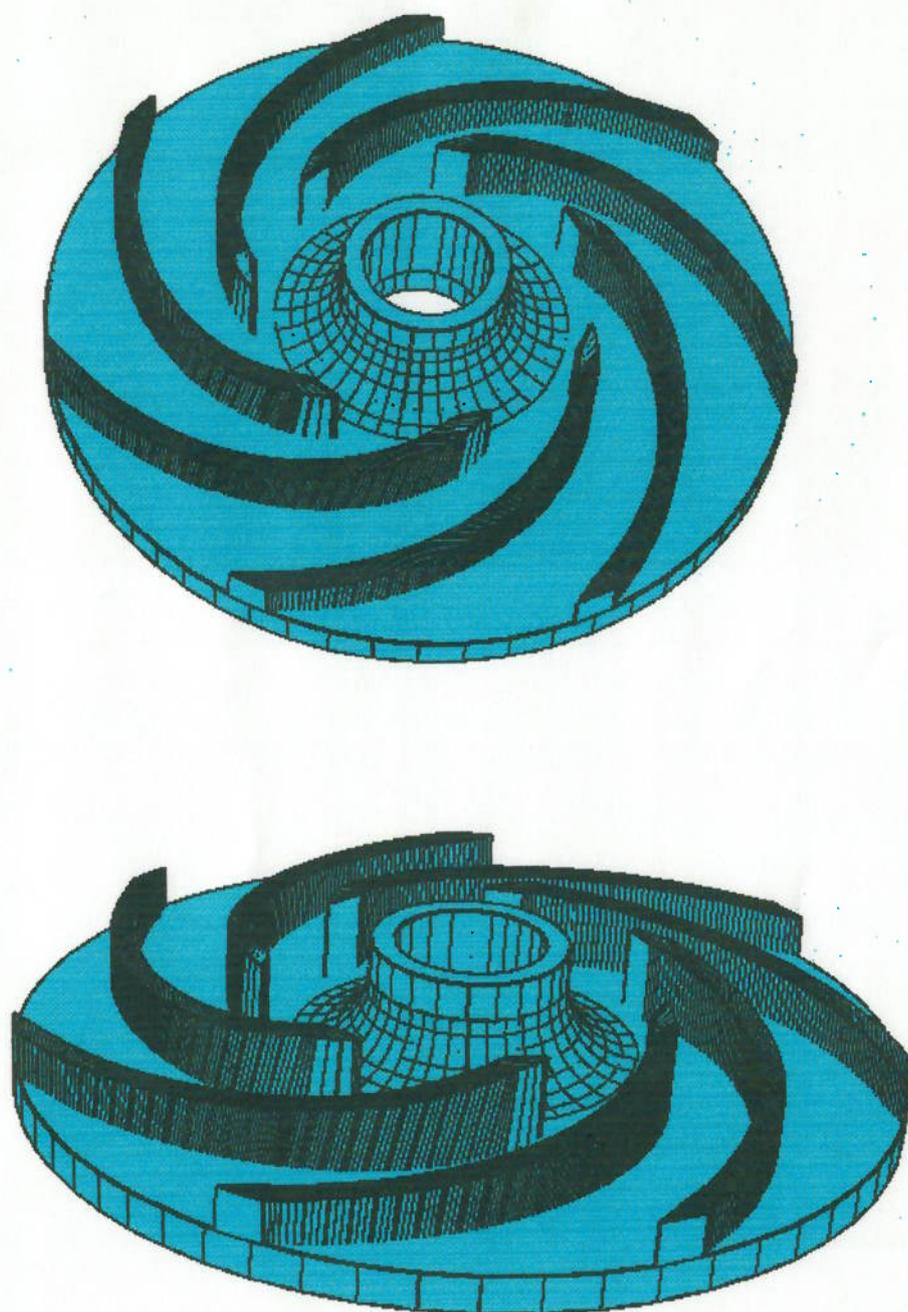


Figura 24. Desenho do rotor aberto a ser usinado em uma só peça em fresadora CNC.

Para este rotor, além da usinagem para os canais é necessária a conformação do cone para moldar uma das faces do cotovelo formado na entrada de fluido do rotor. No caso do molde para fundição, uma outra peça pode ser feita para servir como tampa para levar o molde já preenchido com areia para cura em forno (Figura 25). A usinagem destas peças deve ser realizada utilizando as informações dos desenhos gerados pelo programa de projeto e manipuladas pelo aplicativo CAM para definição dos caminhos da ferramenta em máquina CNC.

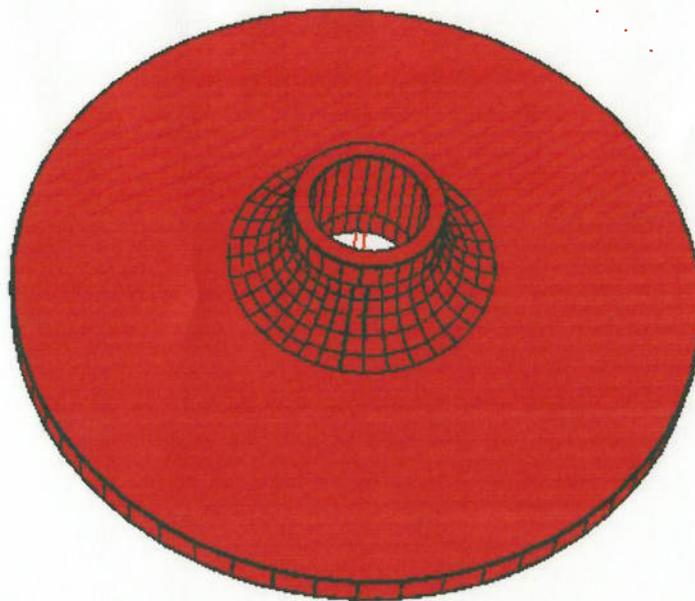


Figura 25. Desenho da superfície da tampa do molde para confecção de machos gerado no aplicativo CAD Microstation.

3.5.3 - 2 Preparação para a usinagem da caixa espiral

De maneira semelhante deve-se proceder para a geração da caixa espiral usinada ou para usinagem de seus moldes para fundição.

Na usinagem devem ser feitas duas peças simétricas, um desbaste para obtenção da concavidade com o formato de espiral e outro de uma superfície na parte externado do bloco. No caso da fundição, deve ser feito um molde bipartido para receber um macho com o formato interno do conduto de saída para o fluxo do rotor. As operações para obter o caminho da ferramenta para o comando da máquina CNC são bastante semelhantes.

Da mesma forma que nos desenhos do rotor, pontos para a obtenção da forma da caixa espiral são gerados pelo programa de projeto. Com o uso do aplicativo CAM deve-se unir os pontos da espiral de modo a criar uma curva definindo a sua forma.

Na extremidade mais afastada do centro desta espiral cria-se um novo arco de 180° em um plano perpendicular a direção tangente desta extremidade, cujo diâmetro definirá o tamanho do conduto na saída da caixa espiral.

O arco menor será transladado através da linha de centro da caixa espiral por uma operação de varredura, tendo seu diâmetro variável ao longo da espiral. Desta operação obtém-se a superfície interna da caixa espiral (Figuras 26) e a superfície externa (Figura 27).

Estas etapas são repetidas variando-se suas dimensões para gerar as superfícies que serão usinadas em fresadora CNC. Com este processo pode-se obter os moldes para o macho e os moldes para a superfície externa da caixa espiral.

As operações para a obtenção do caminho da ferramenta podem ser feitas de várias formas, porém deve-se estudar a melhor visando

obter um acabamento superior das superfícies e boa tolerância dimensional.

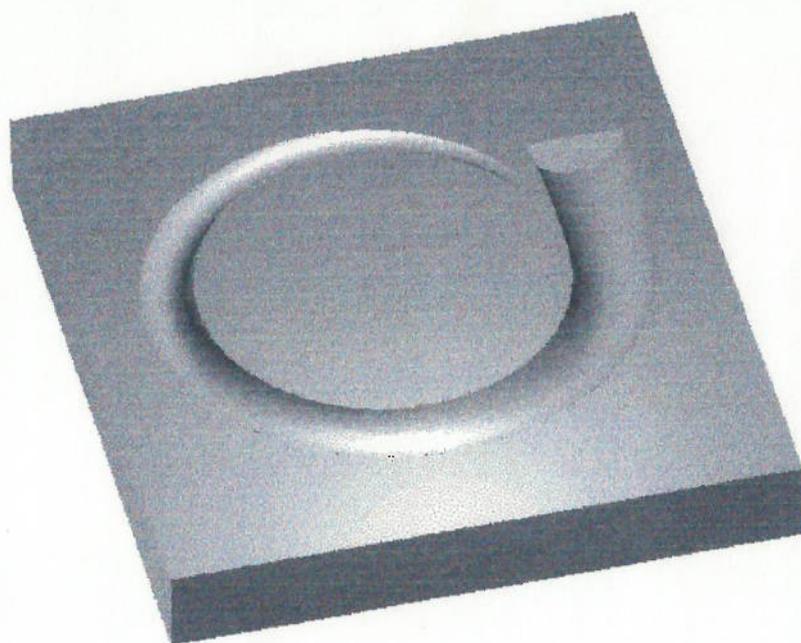


Figura 26. Desenho da superfície a ser usinada para manufatura da caixa espiral - Cavidade interna. Figura gerada pelo aplicativo CAM Mastercam.

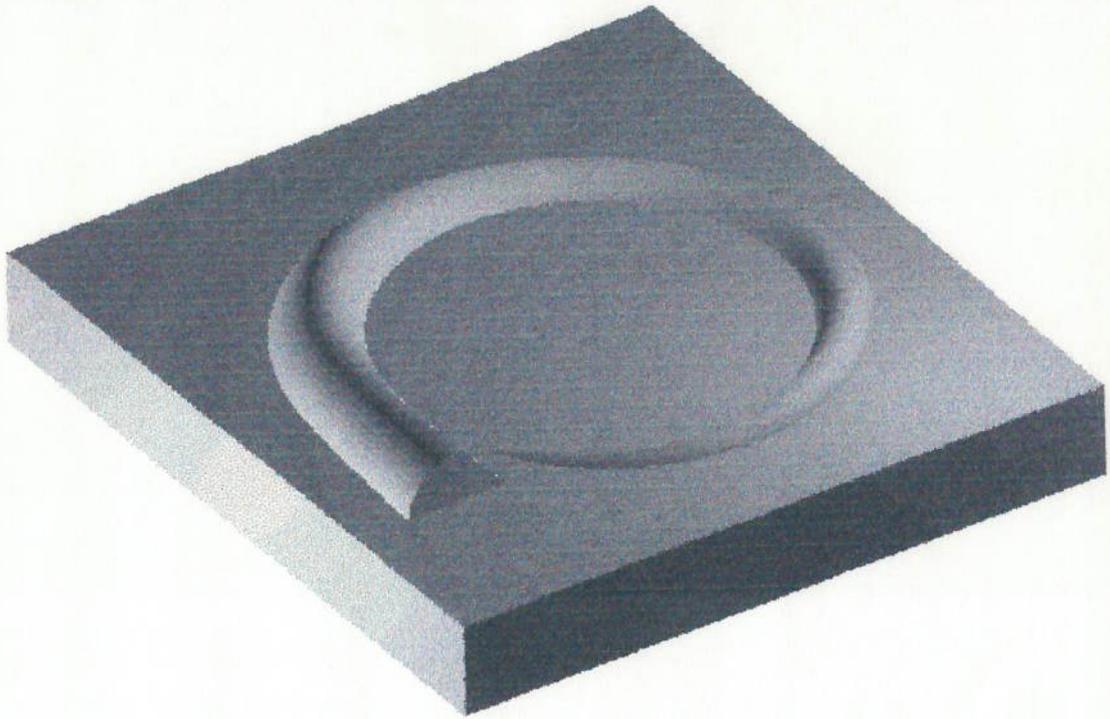


Figura 27. Desenho da superfície a ser usinada para manufatura da caixa espiral - Forma externa do caracol. Figura gerada pelo aplicativo CAM Mastercam.

3.5.3 - 3 Fundição versus usinagem

Para se concluir o processo de confecção do conjunto completo de moldes para a produção de um rotor são necessárias várias operações feitas manualmente o que acarreta em um longo período para sua conclusão, desde que se tenha os desenhos impressos com todos os seus detalhes. Este processo é concluído em média em duzentas horas de trabalho.

O presente trabalho sugere a eliminação de etapas de trabalho e de tarefas manuais para se concluir os moldes finais para a fabricação. Etapas intermediárias que necessitam da interpretação correta de desenhos impressos e destreza em operações manuais para obtenção de tolerâncias dimensionais requeridas tornam-se desnecessárias.

Com a eliminação destas, uma vez que o resultado gráfico que interessa à manufatura apresenta-se pronto, seus desenhos podem ser manipulados diretamente via aplicativos para a programação de um arquivo CNC.

De posse dos desenhos tridimensionais definitivos dos componentes pode-se realizar a usinagem direta em máquinas CNC. Os moldes finais do rotor e da caixa espiral necessários para a fundição podem ser feitos sem a necessidade de modelagens intermediárias.

Para realizar a manufatura utiliza-se novamente dos recursos computacionais para a geração de um arquivo para comandar as operações em máquinas CNC.

Nesta etapa é necessário o uso de um aplicativo CAM, através do qual serão recuperadas as informações do projeto. Estas informações geradas a partir do programa de projeto serão a base para definir cada uma das operações de usinagem dos componentes da bomba.

3.5.3 - 4 Usinagem

Utilizando o programa de projeto, foram gerados os desenhos dos componentes de uma bomba centrífuga para manufatura do rotor de simples curvatura e de sua caixa espiral. Com o uso do aplicativo comercial CAM Mastercam foram gerados os caminhos da ferramenta para comandar uma fresadora de três eixos na execução da usinagem do rotor e da cavidade do caracol.

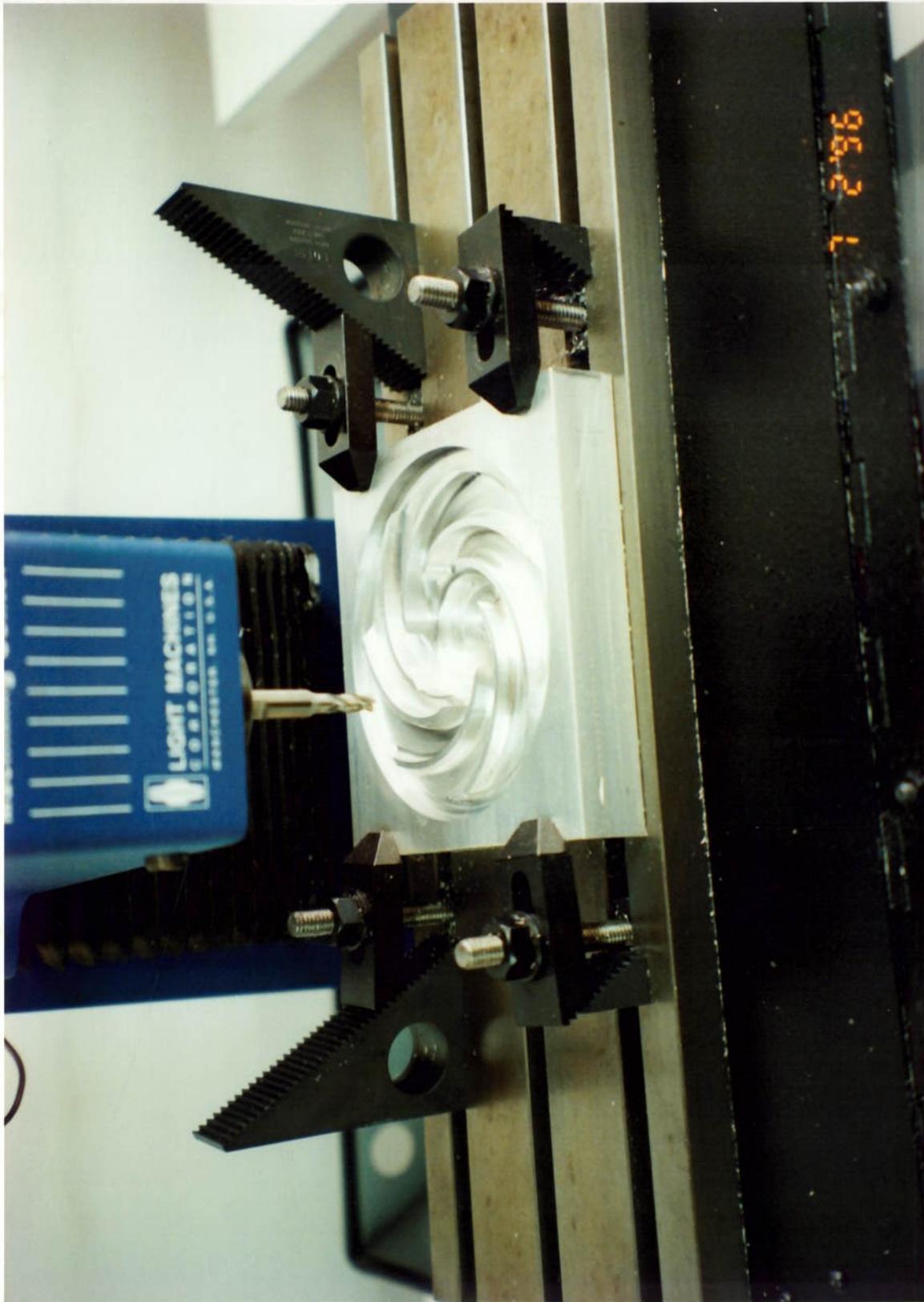
O equipamento utilizado foi uma fresadora TMC - 1000 Light Machines CNC de três eixos com motor de 1 HP. Deslocamentos máximos: na direção X de 287,02mm, na direção Y de 134,62mm e na direção z de 157,48mm. Resolução de 6,3 milésimos de milímetro e repetibilidade de posicionamento de +/- 12,7 milésimos de milímetro. O computador de comando é do tipo PC 486 DX.

Todos os equipamentos pertencem ao Núcleo de Métodos Computacionais da Escola de Engenharia Mauá (*Fotografia 5*).

Devido às limitações de dimensões e potência da fresadora disponível, os materiais usinados foram limitados a alumínio, cera para usinagem e madeira.



Fotografia 5. Fresadora CNC de três eixos do Núcleo de Métodos Computacionais da Escola de Engenharia Mauá.



Fotografía 6. Rotor de pás de simples curvatura.

3.5.3 - 5 Resultados do exemplo de projeto

Seguem os dados da bomba escolhida para manufatura:

Dados do projeto:

DIGITE AS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DA BOMBA:		
VAZÃO	(Q em m ³ /s)	0.05
ALTURA DE ELEVAÇÃO	(h em metros)	50.00
ROTAÇÃO	(n em rpm)	1450
ÂNGULO DE ENTRADA BETA_0	(em graus)	16
ÂNGULO DE SAÍDA BETA_2	(em graus)	22

Resultados:

Arquivo computacional gerado pelo Programa de projeto:

RESULTADOS DO PROGRAMA DE PROJETO DE ROTORES

DADOS DA INSTALACAO

VAZAO	(m ³ /s)	0.0500
ALTURA DE ELEVACAO	(m)	50.00
ROTACAO	(rpm)	1450.00
ANGULO DE ENTRADA BETA_0	(graus)	16.00
ANGULO DE SAIDA BETA_2	(graus)	22.00

PONTOS DAS PÁS DO ROTOR

	Raio	Angulo	Largura	Ang.beta	Vel. cm	Passo t
	(mm)	(graus)	do canal	(graus)	(m/s)	(mm)
1	83.22	0.00	31.37	16.02	3.20	87.14
2	87.69	10.43	29.90	16.06	3.19	91.83
3	92.16	20.32	28.58	16.11	3.17	96.51
4	96.63	29.70	27.39	16.18	3.16	101.19
5	101.10	38.61	26.30	16.26	3.14	105.87
6	105.57	47.09	25.30	16.35	3.13	110.55
7	110.04	55.16	24.39	16.46	3.11	115.23
8	114.51	62.86	23.55	16.57	3.10	119.91
9	118.98	70.21	22.77	16.69	3.08	124.60
10	123.45	77.23	22.05	16.83	3.07	129.28
11	127.92	83.94	21.38	16.97	3.06	133.96
12	132.39	90.36	20.76	17.13	3.04	138.64
13	136.86	96.50	20.18	17.29	3.03	143.32
14	141.33	102.39	19.63	17.46	3.01	148.00
15	145.80	108.03	19.12	17.65	3.00	152.69
16	150.27	113.44	18.65	17.85	2.98	157.37
17	154.74	118.62	18.20	18.05	2.97	162.05
18	159.22	123.60	17.77	18.27	2.95	166.73
19	163.69	128.38	17.37	18.50	2.94	171.41
20	168.16	132.96	17.00	18.74	2.92	176.09
21	172.63	137.36	16.64	19.00	2.91	180.78
22	177.10	141.58	16.30	19.26	2.89	185.46
23	181.57	145.64	15.98	19.55	2.88	190.14
24	186.04	149.53	15.68	19.84	2.87	194.82
25	190.51	153.27	15.39	20.16	2.85	199.50
26	194.98	156.86	15.11	20.49	2.84	204.18
27	199.45	160.31	14.85	20.83	2.82	208.86
28	203.92	163.61	14.60	21.20	2.81	213.55
29	208.39	166.79	14.36	21.59	2.79	218.23
30	212.86	169.83	14.13	22.00	2.78	222.91

DADOS DA VOLUTA DE SECAO CIRCULAR

	Angulo	Diametro	Raio
	(graus)	do canal	externo
	(mm)	(mm)	(mm)
1	0	0.00	223.51
2	5	7.89	231.40
3	10	11.20	234.70
4	15	13.75	237.26
5	20	15.92	239.42
6	25	17.83	241.34
7	30	19.57	243.07
8	35	21.17	244.68
9	40	22.67	246.18
10	45	24.08	247.59
11	50	25.42	248.92
12	55	26.69	250.20
13	60	27.92	251.42
14	65	29.09	252.60
15	70	30.22	253.73
16	75	31.32	254.82
17	80	32.38	255.89
18	85	33.41	256.92
19	90	34.42	257.92
20	95	35.39	258.90
21	100	36.35	259.85
22	105	37.28	260.79
23	110	38.19	261.70
24	115	39.09	262.59
25	120	39.96	263.47
26	125	40.82	264.32
27	130	41.66	265.17
28	135	42.49	266.00
29	140	43.30	266.81
30	145	44.11	267.61
31	150	44.89	268.40
32	155	45.67	269.18
33	160	46.44	269.94
34	165	47.19	270.70
35	170	47.93	271.44
36	175	48.67	272.17
37	180	49.39	272.90
38	185	50.11	273.61

39	190	50.82	274.32
40	195	51.51	275.02
41	200	52.21	275.71
42	205	52.89	276.39
43	210	53.56	277.07
44	215	54.23	277.74
45	220	54.89	278.40
46	225	55.55	279.05
47	230	56.20	279.70
48	235	56.84	280.34
49	240	57.47	280.98
50	245	58.10	281.61
51	250	58.73	282.23
52	255	59.35	282.85
53	260	59.96	283.47
54	265	60.57	284.07
55	270	61.17	284.68
56	275	61.77	285.28
57	280	62.36	285.87
58	285	62.95	286.46
59	290	63.54	287.04
60	295	64.12	287.62
61	300	64.69	288.20
62	305	65.26	288.77
63	310	65.83	289.34
64	315	66.39	289.90
65	320	66.95	290.46
66	325	67.51	291.01
67	330	68.06	291.56
68	335	68.61	292.11
69	340	69.15	292.66
70	345	69.69	293.20
71	350	70.23	293.74
72	355	70.76	294.27
73	360	71.30	294.80

***** Aresta de succao *****

z = 6.00
numero de estagios = 1.00
cs (m/s) = 3.20
de (mm) = 48.38
dn (mm) = 60.27
ds (mm) = 156.57
d1 (mm) = 166.43
b1 (mm) = 31.37
t1 (mm) = 87.14
ypa (m²/s²) = 590.96

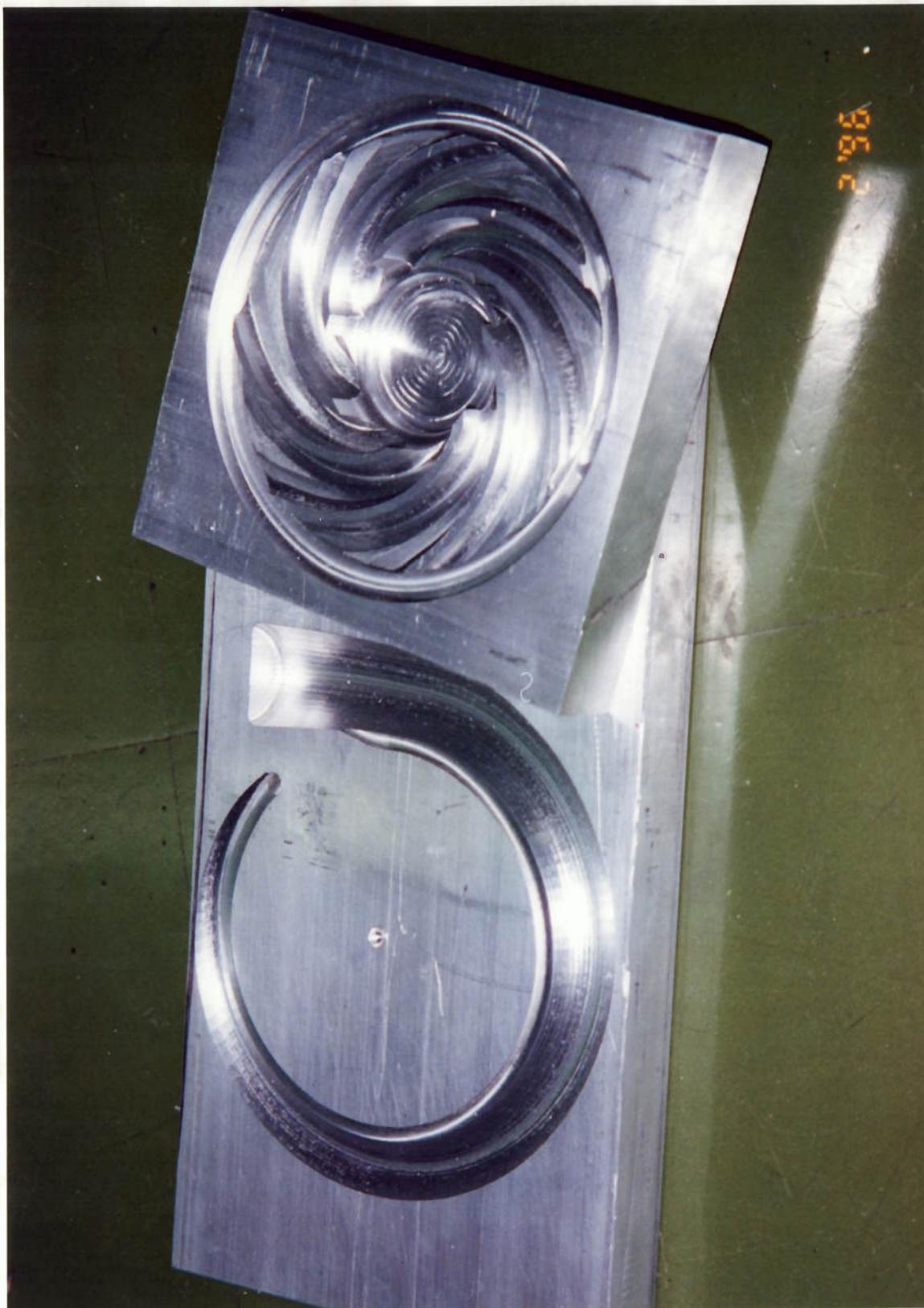
***** Aresta de pressao *****

b2 (mm) = 14.13
t2 (mm) = 222.91
c2m (m/s) = 2.88
u2 (m/s) = 32.32
diam2 (mm) = 425.72

***** FIM DO ARQUIVO *****

Relação de atividades relacionadas ao projeto e manufatura de bombas centrífugas utilizando método convencional e com uso de computadores. O tempo aproximado de projeto do exemplo é apresentado a seguir:

Auxílio de computadores	Tempo	Método convencional Fundição	Tempo
Geração de dados da geometria com uso do Programa de projeto - arquivo de informações e arquivo em padrão neutro	5 minutos	Calculadora	30 minutos
Manipulação do arquivo computacional da geometria - inclusão de detalhes	10 horas	Preparo de desenhos a partir dos dados da geometria	20 horas
Preparo do caminho da ferramenta para rotor e caracol + usinagem CNC	10 horas + 20 horas	Preparo dos moldes para machos	200 horas
		Fundição	
		Usinagem	
Montagem		Montagem	



Fotografia 7. Componentes usinados para bombas centrífugas: caixa espiral e rotor.



Fotografia 8. Moldes em diversos materiais com variações no caminho da ferramenta. Cera em azul, alumínio e madeira.

A possibilidade da usinagem direta dos próprios componentes mostra-se bastante interessante, uma vez que as operações envolvidas são as mesmas do preparo dos moldes para fundição a menos da fundição propriamente dita. Outra vantagem é a usinagem de detalhes como arredondamentos e acabamento superficial muito superiores.

De qualquer forma, obtém-se uma garantia de qualidade superior aos métodos tradicionais. Para decidir qual processo utilizar deve-se levar em conta os seguintes aspectos:

- Quantidade de peças a produzir
- Material a ser utilizado
- Tempo para desenvolvimento do projeto
- Tempo para produção de ferramental
- Nível de rendimento e qualidade requerida na aplicação
- Prazo para entrega do equipamento
- Custos envolvidos

Com o auxílio dos computadores a intervenção do operador na fabricação fica restrita a atividades intelectuais ou manuais simples que não requerem habilidade e destreza. Este fato trás um benefício extremamente positivo, pois o profissional tem a oportunidade de se ater a detalhes antes não observados e muitas vezes ignorados. Surge então a oportunidade de pesquisa dos processos atuais através da investigação de teorias já consagradas ou inovadoras.

3.5.3 - 6 Desenvolvimentos futuros

Otimização do projeto

A partir do programa de dimensionamento é possível a aplicação direta de seus resultados em programas aplicativos CAE.

Os arquivos tridimensionais da geometria do projeto obtidos pelo programa de dimensionamento são utilizados diretamente em

programas comerciais de cálculo estrutural, graças à forma adotada de padrões gráficos nestes arquivos.

Os programas CAE serão úteis para a simulação das condições normais de funcionamento da bomba centrífuga.

Esta simulação pode ser feita com a aplicação de carregamentos de esforços solicitantes definidos pelo projetista a partir do modelamento de uma malha que representa as superfícies dos componentes da bomba centrífuga.

A malha é formada a partir de pontos de apoio obtidos da geometria desenvolvida pelo programa de dimensionamento.

Sobre esta malha pode-se aplicar esforços como pressão, forças cortantes, momentos, ação de força gravitacional, ação de temperaturas específicas etc.

A partir deste estudo obtém-se tensões e deformações ocorridas em toda a estrutura das peças.

Com estes valores faz-se o refinamento do projeto, com a modificação de sua geometria, variando-se espessuras, furos, criando reforços ou variando-se os materiais utilizados até atingir um estado dimensional otimizado, obtido dos resultados da análise de cada alteração.

Os programas CAE podem influenciar o projeto de forma mais profunda, ao analisar as variações do escoamento do fluido no interior do rotor em função de modificações na sua geometria.

Tendo como especialidade a análise do escoamento, estes sistemas de computação permitem o cálculo de velocidades, pressões, tanto para escoamentos potenciais quanto reais em canais formados pelas pás do rotor.

Desta maneira a forma das pás pode ser otimizada com o estudo do campo de pressões e velocidades do escoamento entre duas pás consecutivas do rotor, bem como o perfil do canal entre as larguras de entrada e saída do fluido.

A tendência atual de mercado sugere sistemas completos para projeto mecânico. Este tipo de aplicativo inclui ferramentas de cálculo de resistência, geração de informações para manufatura e criação de desenhos para fabricação, manuais de operação e manutenção. Através de filtros de arquivos podem utilizar diretamente os dados dos desenhos gerados pelo programa de projeto.

Este tipo de aplicativo introduz a solução integrada de modelagem de sólidos paramétricos tridimensionais, montagens e superfícies, acelerando o processo completo do projeto à manufatura.

Todas as funções de criação de geometria e divisão de trabalho estão integradas podendo receber desenhos no formato IGES e arquivos de outros aplicativos CAD.

Parâmetros podem ser definidos como Restrições geométricas ou elementos construtivos, baseados em conceitos comuns de engenharia (furo, extrusão, chanfro etc.). Quando uma alteração é feita no desenho a definição de restrições atua para que as geometrias envolvidas se reposicionem automaticamente e sejam ajustadas ao se alterar estes parâmetros.

Estes recursos são interessantes para a análise de interferência entre montagens. Pode-se posicionar componentes associando-os a elementos de desenho, como arestas, eixos ou faces, ou documentando montagens em vistas explodidas.

Este tipo de programa sugere a aquisição de um pacote suficiente para completar um ciclo desde o projeto até a manufatura. Neste caso, não é necessário o uso de arquivos neutros para migração de informações entre aplicações para realização de cada tarefa. O uso do arquivo neutro gerado pelo programa de projeto, neste caso, está relacionado a uma etapa anterior, a de geração da geometria básica a ser trabalhada.

Esta filosofia de trabalho vai de encontro com o uso do programa de projeto apresentado neste trabalho. É perfeitamente viável a adaptação de seus códigos para geração direta de dados da geometria dos componentes da bomba para serem compartilhados.

4. CONCLUSÕES

O Projeto e Manufatura de bombas centrífugas auxiliados por computadores proporcionam várias vantagens das quais podemos citar:

- Agilidade em atender encomendas de novos produtos
- Extinção de tarefas de cálculo manuais
- Geração automática da geometria básica dos componentes
- Uso de arquivos gráficos de padrão neutro permitem uso direto em programas aplicativos
- Extinção de tarefas manuais na confecção de moldes para fundição
- Maior precisão dimensional
- Melhor acabamento superficial
- Possibilidade de inclusão de detalhes como arredondamentos nas concordâncias entre superfícies
- Redução no tempo de projeto
- Redução no tempo de manufatura

Desvantagens do Projeto e Manufatura auxiliados por computadores:

- Custos envolvidos na aquisição de equipamentos de hardware, software e máquinas ferramenta CNC
- Necessidade de pessoal técnico qualificado em informática e máquinas CNC
- Necessidade de manutenção e atualização de equipamentos

O presente trabalho mostra que as vantagens oferecidas pelos recursos computacionais na atualidade são superiores às obtidas pelos métodos convencionais de projeto de bombas centrífugas.

As vantagens no caso de rotores totalmente usinados, para lotes em pequena escala, são claras, uma vez que com o arquivo da

geometria dos componentes pode-se concluir rapidamente as tarefas de preparação do caminho da ferramenta para a manufatura em máquinas CNC.

Para grandes lotes, no caso da fundição, a principal vantagem apresentada é a redução de tempo na preparação automatizada dos moldes.

Atualmente com o rápido avanço das tecnologias de informática os custos de equipamentos apresentam-se decrescentes em função de novos lançamentos.

A produção pelos métodos convencionais implica em custos relacionados à mão de obra especializada para a confecção artesanal dos moldes para fundição, pessoal técnico para realização do projeto dos componentes e pessoal para operação de máquinas na produção.

Os investimentos necessários para a produção auxiliada por computadores podem parecer altos à primeira vista, quando comparados aos custos da produção pelo método convencional.

Os investimentos exigidos são para computadores, programas computacionais e máquinas ferramenta CNC. Os valores apresentados podem ser desestimulantes considerando a necessidade de ser injetados em curto período de tempo.

Para decidir se o investimento vale a pena, deve-se analisar o prazo para a conclusão da manufatura. O fator determinante é a quantidade de novos projetos. A agilidade com o uso dos computadores favorece muito mais uma produção caracterizada por grande quantidade de projetos novos e sobretudo aquelas com lotes de poucas peças, que podem ser inteiramente usinadas.

Vale ressaltar que os custos para atualizações de equipamentos são inferiores à primeira versão adquirida em se tratando de software e que os valores para lançamentos de hardware na pior das hipóteses tem se mantido.

É preciso estar consciente de que a utilização destes recursos proporcionam benefícios que não se restringem à extinção de tarefas tediosas ou na agilização de processos existentes. Apesar da abundância dos recursos computacionais para a realização de funções bem específicas, cabe aos usuários a aplicação de forma sinérgica destes recursos para a resolução de problemas antes desprezados e no desenvolvimento de novas tecnologias.

5 BIBLIOGRAFIA

BLOOR, M. S. **The CAD/CAM Data Exchange Technical Centre.** Computer-Aided Engineering Journal, April 1986.

BROPHY, MICHAEL C. **Computer-Assisted Design of a Centrifugal Pump,** s.n.t.

CARSON, G. S. **Graphics Standards the future of ISO Graphics Standards.** IEEE Computer Graphics & Applications, 1988.

CHACOUR, S. A.; FISHER, R. K.; COLWILL, W. H. **Computer Aided Pump and Turbine Design - The results after six years,** Simpósio da IAHR, Montreal 1986.

FUCHSLOCHER; SCHULZ. **Bombas - Funcionamiento, cálculo y construcción.** Barcelona, Editorial Labor, 1964.

KALMAR, LÁSZLÓ. **Computer Aided Design of Compressor-Impellers,** Proceedings of The seventh conference on Fluid Machinery, Budapest 1983.

LAZARKIEWICZ, S.; TROSKOLANSKI, A. T. **Impeller Pumps.** Warsaw, Pergamon Press Ltd. 1965.

MEI, Z. Y. **Mechanical Design and Manufacturing of Hydraulic Machinery.** Cambridge, University Press, 1991.

MURAHASHI, Y.; YAMAMOTO, Y. **Common language for multilateral communication between different CAD/CAM drawing databases.** Computer-Aided design, v.21, n.10, 1989.

OWEN, J.; BLOOR, M. S. **Neutral formats for product data exchange: the current situation.** Computer-Aided design, v.19, n.8, 1987.

PASQUILL, K. G. **Practical uses of IGES.** Computer-Aided design, v.10, n.6, 1988.

PECK, J. F. **Design of centrifugal pumps with computer aid.** Proc Instn Mech Engrs, Vol 183, Pt 1 No 17, 1968.

PFLEIDERER, C.; PETERMANN, H. **Máquinas de fluxo.** Livros técnicos e científicos editora S. A. 1979.

SHEPHERD, B. J. **Graphics standards: issues and approaches.** Computer-Aided design, v.19, n.8, 1987.

SMITH, B. M. **CAD/CAM Data Exchange Leaps Beyond IGES.** The S. Klein Computer Graphics Review, 1987.

SMITH, B.; RINAUDOT, G. R.; REED, K. A.; WRIGHT, T. **Initial Graphics Exchange Specification (IGES), Version 4.0,** Society of Automotive Engineers, Inc. 1988.

SOEUVEN, RENÉ; OLLING, GUS. **Advanced CAD/CAM Systems. State of the art and future trends in feature technology.** Chapman & Hall, 1995.

SPARKS, M. R. **Looking at GKS.** Computer-Aided design, v.21, n.4, 1989.

STEPANOFF, A. J. **Flow Pumps.** New York, John Wiley & Sons, Inc. 1957.

STROHMER, F.; SEMPER, W. **Computer Aided Representation of Turbine Characteristics and Optimization of Hydraulic Layout,** Turboinstitut Conference on Hydraulic Machinery, Ljubljana 1988.

WARTHEN, B. D. **PDES Shape Data Exchange Technology.** Computer-Aided Engineering, february 1990.

WARTHEN, B. D. **PDES-A CAD Standard for Data Exchange.** Unix World, 1988.

WARTHEN, B. D. **Product Data International.** v.2, n.2,1991.

ZEID; IBRAHIM. **CAD/CAM - Theory and Praticce,** Mc Graw - Hill, 1991.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BROPHY, MICHAEL C. **Computer-Assisted Design of a Centrifugal Pump**, s.n.t.

CHACOUR, S. A.; FISHER, R. K.; COLWILL, W. H. **Computer Aided Pump and Turbine Design - The results after six years**, Simpósio da IAHR, Montreal 1986.

MEI, Z. Y. **Mechanical Design and Manufacturing of Hydraulic Machinery**. Cambridge, University Press, 1991.

PECK, J. F. **Design of centrifugal pumps with computer aid**. Proc Instn Mech Engrs, Vol 183, Pt 1 No 17, 1968.

PFLEIDERER, C.; PETERMANN, H. **Máquinas de fluxo**. Livros técnicos e científicos editora S. A. 1979.

STROHMER, F.; SEMPER, W. **Computer Aided Representation of Turbine Characteristics and Optimization of Hydraulic Layout**, Turboinstitut Conference on Hydraulic Machinery, Ljubljana 1988.

7 APÊNDICE 1

7.1 O PROJETO DO ROTOR DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA

7.1.1 TRABALHO ESPECÍFICO INTERNO Y

A variação de energia entre as faces de pressão e sucção de uma Máquina de Fluxo pode ser tratada como diferença trabalho por unidade de massa do fluido que escoar pela máquina. Esta variação é chamada de *trabalho específico interno Y* ($Nm/kg=J/kg=m^2 / s^2$). O trabalho específico interno Y mostra de quanto varia o trabalho de 1 kg de fluido ao passar pela máquina de fluxo. Em bombas o trabalho aumenta e em turbinas diminui.

Usualmente no caso de máquinas de fluxo submetidas a campos gravitacionais fixos, ao invés do trabalho específico interno, é comum utilizar o conceito da altura de elevação H (medida em m). Neste caso temos:

$$Y = gH$$

Onde g representa a aceleração da gravidade local.

7.1.2 MECANISMO DO FLUXO NO ROTOR

Ao se observar o fluxo através de um rotor radial como o da figura 1, nota-se que o fluxo visto por um observador que se move juntamente com o rotor é completamente diferente daquele visto por um observador parado nas vizinhanças da máquina. Chama-se de *velocidade absoluta* àquela que uma partícula do fluxo tem com relação ao observador parado, e *velocidade relativa* àquela vista pelo observador movendo-se com o rotor. A utilização de dois índices, um para cada aresta da pá é necessária pois ocorre uma mudança no estado do fluxo na passagem do rotor ao espaço exterior. Os índices

1 e 2 se referem a medidas nas pás, enquanto que os índices 0 e 3 se referem à forma do fluxo não perturbado imediatamente fora do rotor.

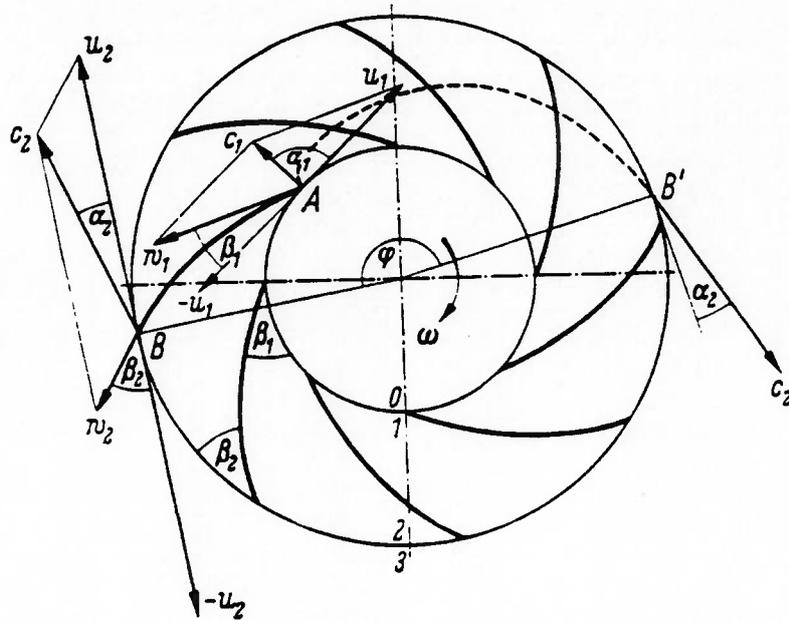


Figura 1. Representação das velocidades no rotor radial de uma bomba. A velocidade absoluta c resulta da adição vetorial da velocidade relativa w e da velocidade tangencial u .

Na figura 2 temos as superfícies de controle como superfícies de rotação em torno do rotor imediatamente atrás da aresta de pressão, superfícies cilíndricas I e II. Apesar do número de pás ser finito, admitamos que o fluxo através das superfícies de controle seja unidimensional e estacionário. Para isso, admitimos que o fluxo uniforme que se forma a distância suficiente do rotor se prolongue até as superfícies de controle, tomando isto como uma representação simplificada da distribuição desigual de velocidades que ocorre na realidade ao longo das pás.

As forças normais resultantes das forças que agem nas superfícies de controle cilíndricas, ou seja as pressões no fluido, não criam nenhum momento de rotação sendo então desprezadas. Um tal momento de rotação aparecerá devido à impulsão do fluido que passa pelas superfícies de

controle e através de efeitos de viscosidade, ou seja, de forças tangenciais. Ainda para a figura 2, denotamos:

c_0, c_3 As velocidades médias do fluxo ao atravessar as superfícies de controle dos lados de sucção e de pressão do rotor respectivamente,

α_0, α_3 Os ângulos destas velocidades com a direção tangencial,

r_1, r_2 Os raios dos cilindros circulares nos quais se situam as arestas de sucção e de pressão das pás, respectivamente (nos cálculos tomaremos $r_1 = r_0$ e $r_2 = r_3$),

$\dot{m} = \rho \dot{V}$ O fluxo de acionamento (fluxo de massa), em kg/s.

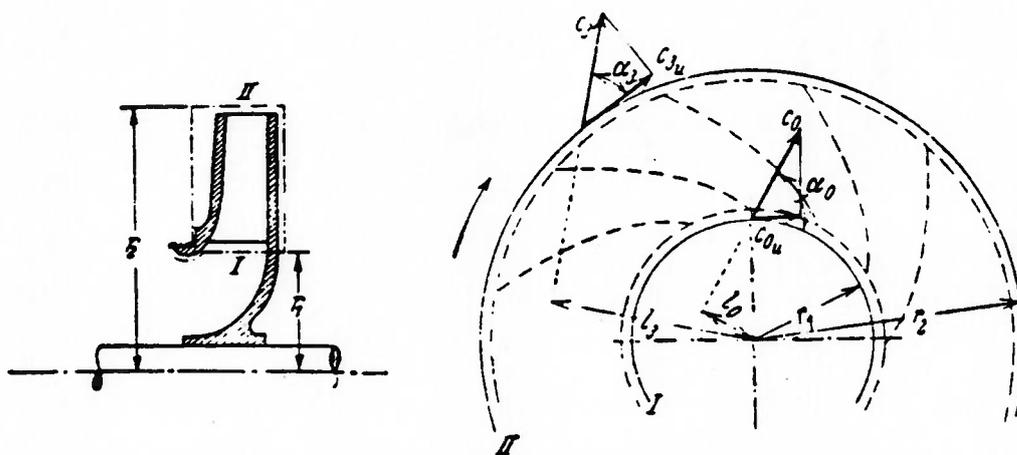


Figura 2. Representação das velocidades no rotor radial de uma bomba.

Com esta notação, ocorrem, independentemente da direção do fluxo no interior do rotor, as seguintes forças nos círculos das superfícies de controle:

Na superfície I a força de impulsão $\dot{m} c_0$ na direção de c_0 com o braço de alavanca $l_0 = r_1 \cos \alpha_0$, produz o momento:

$$M_0 = -\dot{m} c_0 l_0 = -\dot{m} c_0 r_1 \cos \alpha_0$$

Na superfície II a força de impulsão $\dot{m}c_3$ na direção de c_3 com o braço de alavanca $l_3 = r_2 \cos \alpha_3$, produz o momento:

$$M_3 = \dot{m}c_3 l_3 = \dot{m}c_3 r_2 \cos \alpha_3$$

Assim o momento transmitido pelas pás fica:

$$M_{pá} = M_3 + M_0$$

ou,

$$M_{pá} = \dot{m}(r_2 c_3 \cos \alpha_3 - r_1 c_0 \cos \alpha_0)$$

como: $c_3 \cos \alpha_3 = c_{3u}$ e $c_0 \cos \alpha_0 = c_{0u}$ a equação anterior pode ser escrita

$$M_{pá} = \dot{m}(r_2 c_{3u} - r_1 c_{0u})$$

Denotando por ω a velocidade angular do rotor, o trabalho nas pás $Y_{pá}$ resulta em

$$M_{pá}\omega = \dot{m}Y_{pá}$$

ou,

$$Y_{pá} = \omega(r_2 c_{3u} - r_1 c_{0u})$$

Substituindo as velocidades tangenciais do rotor nos raios r_1 e r_2 , por $u_1 = r_1\omega$ e $u_2 = r_2\omega$, temos a *equação fundamental das máquinas de fluxo*:

$$Y_{pá} = u_2 c_{3u} - u_1 c_{0u}$$

Usualmente os rotores de bombas recebem o fluxo diretamente, ou seja, sem aletas diretoras especiais, e portanto livre

de vorticidade o que resulta em $\alpha_0 = 90^\circ$, representação na figura 3. Com isto $c_{\theta u} = 0$. Substituindo na equação fundamental temos:

$$Y_{pá} = u_2 c_3 \cos \alpha_3 = u_2 c_{3u}$$

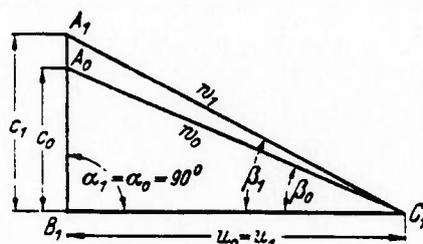


Figura 3. Triângulo de velocidade para a aresta de sucção quando $\alpha_0 = 90^\circ$.

7.1.3 A INFLUÊNCIA DO NÚMERO FINITO DE PÁS

Para *bombas* a consideração do fluxo ser congruente com as pás ou que o número de pás seja infinito tornam necessárias correções para o cálculo de seu trabalho específico. Bombas assim calculadas teriam um trabalho nas pás $Y_{pá}$ muito pequeno e não alcançaria o trabalho específico interno Y desejado.

esta grande diferença decorre de que as distâncias finitas entre as várias pás causam uma desigualdade do fluxo ao longo de um círculo paralelo e, assim, o fluxo relativo não acompanha toda a variação de direção prevista pelas pás. No caso de turbinas ocorre o mesmo, mas o efeito final é usualmente desprezível.

PFLEIDERER, C. (1979); sugere que sem se corrigir estes resultados podem haver erros de 35% ou superiores. Seu método de correção baseado na hipótese de uma distribuição regular de pressão em qualquer forma de pá resulta na fórmula:

$$Y_{pá\infty} = Y_{pá}(1 + p)$$

com

$$p = \psi' \frac{r_2^2}{zS}$$

onde

r_2 é o raio na aresta de pressão do rotor

z é o número de pás

S é o momento estático do segmento AB da linha de corrente média entre as arestas de entrada e de saída, em relação ao eixo de rotação, figura 3, ou seja:

$$S = \int_{r_1}^{r_2} r dx,$$

ψ' é um coeficiente empírico, que depende da forma de rotor e do tipo de sistema diretor.

Os dados necessários para a fixação da forma do rotor são a rotação do rotor n , a vazão V e Y . Tomam-se inicialmente V e Y constantes e deixa-se a rotação variar. As simplificações com $\alpha_0 = 90^\circ$ nos permitem dizer que u_2 , ou nD_2 será proporcional a \sqrt{Y} . Desta forma, o diâmetro externo do rotor D_2 varia de modo inversamente proporcional à rotação, e os rotores radiais do tipo mostrado na figura 4 com linha contínua, representam um tipo de construção lento, forma \angle . Se agora deixamos a rotação aumentar, a aresta externa da pá move-se para dentro, por exemplo até o menor diâmetro D'_2 .

Desejando-se manter constante a forma da aresta de sucção da pá com a redução do diâmetro para D'_2 , ou seja, situar a pá entre os diâmetros D_1 e D'_2 , esta ficaria muito curta em comparação com sua largura e, com isso, sua superfície que é determinante para a transmissão de trabalho, ficaria muito pequena. Por essa razão a aresta de sucção da pá deve ser sempre movida para dentro, com o que ela chega a ultrapassar a boca de sucção do rotor.

O rotor tomará então a forma desenhada com traço-ponto e denotada // que é chamada de *rotor radial de média velocidade*. Se a rotação aumentar ainda mais, a aresta de pressão somente poderá se aproximar do eixo se for situada inclinada. Aparece então o rotor semi-axial da forma /// (figura 5) o *rotor rápido*, no qual o valor médio do diâmetro externo fica menor devido à colocação inclinada da aresta de pressão. Se a aresta de pressão for ainda mais inclinada, obtém-se como caso externo o rotor axial, ou hélice, da forma // na qual a aresta de pressão é praticamente radial.

Estas quatro formas de rotor são também obtidas quando se mantêm constantes a rotação n e o trabalho específico Y e se aumenta o volume de fluxo \dot{V} . Neste caso a aresta de pressão fica constante enquanto que D_s tem que aumentar. Desta maneira aparece o rotor de média velocidade desenhado com linha tracejada na figura 5. Juntamente com o aumento do diâmetro de sucção D_s até o valor D''_s , ocorre também um alargamento do rotor e pode-se reconhecer que o rotor assim desenvolvido assemelha-se perfeitamente em todos os pontos ao obtido anteriormente.

É interessante a definição de um coeficiente para caracterizar o tipo de forma de rotor, devido as diferenças entre as várias formas. Este coeficiente deve ser independente do tamanho do rotor, de maneira que rotores com forma geometricamente semelhante tenham o mesmo coeficiente de forma do rotor.

Atualmente esse coeficiente é conhecido como *rotação específica* n_q que representa um critério de similaridade para todas as bombas de rotor. Quando dois rotores são geometricamente e dinamicamente similares, eles tem a mesma rotação específica. A rotação específica é a condição de similitude para caracterizar um projeto conhecido, representa simultaneamente a capacidade de aceleração, a capacidade de engolimento e o recíproco da capacidade de trabalho da máquina.

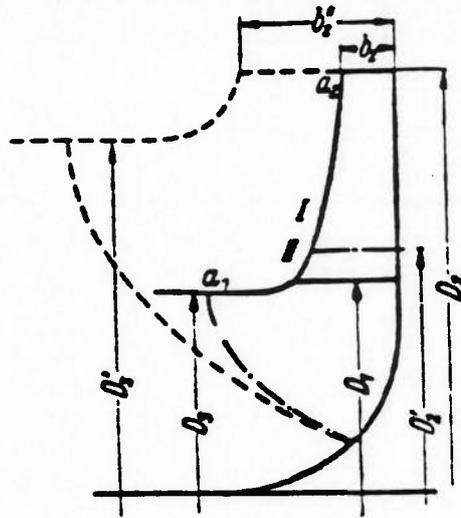


Figura 4. Rotor radial lento (linhas contínuas) e um rotor radial de velocidade média desenvolvido a partir deste (linhas tracejadas e traço-ponto)

$$n_q = 333n \frac{\sqrt{\dot{V}}}{Y^{3/4}}$$

O mesmo valor numérico de n_q é obtido da equação

$$n_q = n \frac{\sqrt{\dot{V}}}{H^{3/4}}$$

Para as formas de rotor mostradas na figura 5 valem os seguintes intervalos aproximados de variação dos valores do coeficiente:

Forma I	$n_q = 10$ a 30
Forma II	$n_q = 30$ a 60
Forma III	$n_q = 50$ a 150
Forma IV	$n_q = 110$ a 150 ou mais

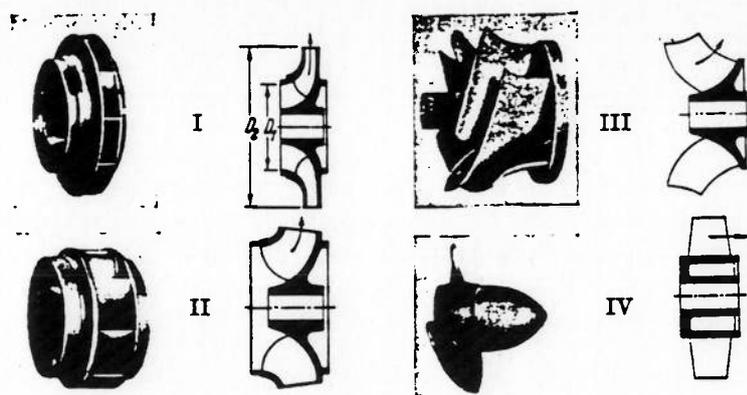


Figura 5. Formas características de rotores.

7.1.4 RESISTÊNCIA E ESCOLHA DA FORMA DO EIXO E DO ROTOR

Critérios de resistência devem ser observados para a escolha da forma do rotor de uma bomba bem como para seu eixo. Para rotores radiais a furação aproximada do eixo deve ser determinada antes do cálculo das pás. Esta determinação preliminar é feita com base em uma solicitação de torção τ_{adm} que deve ser estimada por um valor limite inferior.

O diâmetro do eixo é obtido em função do conjugado Md que o eixo deve transmitir e da solicitação de torção admissível τ_{adm} .

$$d = \sqrt[3]{\frac{16}{\pi} \cdot \frac{Md}{\tau_{adm}}}$$

O eixo pode ser disposto em várias posições, horizontal, vertical ou inclinada. O eixo horizontal possibilita a operação mais conveniente e a construção mais simples, porém necessita de um maior espaço para a disposição do equipamento.

As pás do rotor sofrem solicitações das forças centrífugas e da pressão do fluxo do fluido. No caso do fluido for um gás, as solicitações se devem principalmente às forças centrífugas, enquanto que a pressão do fluido terá sua importância no uso de líquidos e

assim mesmo em máquinas rápidas. A solicitação pela pressão do fluido é tanto maior quanto mais elevada for a rotação específica. A velocidade tangencial máxima admissível de um rotor é determinada pela cavitação e não pela resistência do eixo.

7.1.5 PROCEDIMENTO GERAL DO CÁLCULO DAS PÁS

Sejam dados da instalação desejada, o fluxo volumétrico \dot{V} , o trabalho específico interno Y e a rotação n , inicialmente calcula-se a rotação específica $n_q = 333n\sqrt{\dot{V}/Y^{3/4}}$ para se ter idéia de qual forma de rotor esperar. Se o valor de n_q for menor que o limite inferior será necessário subdividir Y , ou seja adotar uma solução com vários estágios.

Considerando o rotor lento da figura 6 ($n_q = 10$ a 30), cujas arestas interna e externa serão tomadas paralelas ao eixo, tem-se uma forma simplesmente curvada para as pás radiais, cujo ângulo na entrada e na saída deveremos determinar.

Através do rotor de uma bomba flui a soma do fluxo útil \dot{V} e do fluxo de perda de fluido no labirinto \dot{V}_{sp} . Através desta soma denotada por \dot{V}' , e de acordo com o valor do fluxo de perda a esperar é estimada entre 1 a 5% maior que \dot{V} .

$$\dot{V}' = \dot{V} + \dot{V}_{sp} \approx (1,01 \dots 1,05) \dot{V}$$

Com a equação da continuidade aplicada na aresta de sucção temos:

$$\dot{V} = \frac{\pi}{4} (D_s^2 - d_n^2)$$

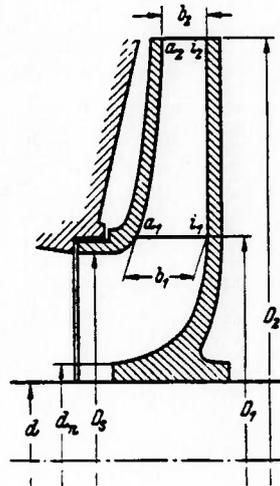


Figura 6. Rotor radial lento

Os triângulos de velocidade estão apresentados na figura 7.

A equação da continuidade referida a D_1 determina a largura do rotor b_1 na aresta interna das pás, veja na figura 6. O diâmetro D_1 , no qual ficam situadas as pontas das pás, será tomado um pouco maior que D_s .

$$b_1 = \frac{\dot{V}}{\pi D_1 c_{0m}}$$

O ângulo das pás β_1 é obtido através do triângulo de velocidades. Este é dado pelo ângulo do fluxo na entrada β_1 na aresta de sucção. A espessura das pás s_1 deve ser tão pequena quanto a fabricação permita. O número das pás pode ser obtido da fórmula

$$z = k_z \frac{D_2 + D_1}{D_2 - D_1} \operatorname{sen} \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}$$

Onde k_z é um coeficiente empírico, que é tanto menor quanto maior for a relação s_1/D_1 , pois o canal no raio interno não deve ser muito estreitado pela espessura s_1 .

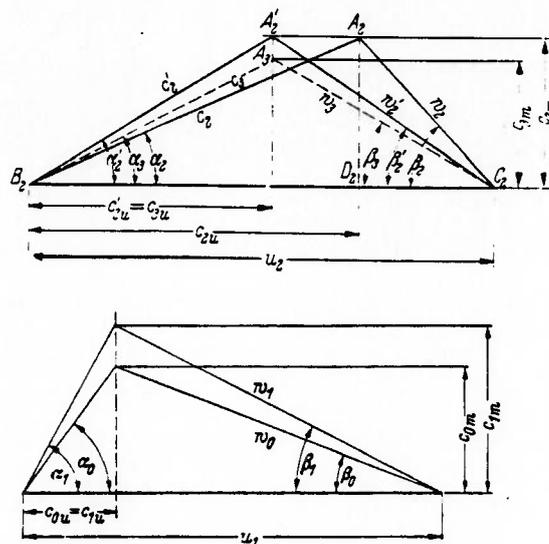


Figura 7. Triângulos de velocidade aresta de pressão e de sucção.

A largura do rotor na aresta de pressão é dada por

$$b_2 = \frac{\dot{V}'}{\pi D_2 c_{2m}}$$

7.1.6 CURVATURA DAS PÁS DO ROTOR

No projeto das pás deve-se evitar variações bruscas do raio de curvatura, pois estas podem causar acumulações da camada limite, mesmo no canal de aceleração. Assim no caso em que não é possível usar para a pá um único arco de círculo, é melhor usar uma curva de forma não circular que mude de curvatura constante e suavemente do que uma sequência de arcos de círculo com raios de curvatura muito diferentes, o que levaria a mudanças abruptas de raio na transição entre eles.

A curvatura suavemente modificada pode ser obtida pelo método de *cálculo ponto a ponto*. Pás assim concebidas são usadas para o fluxo retardado das bombas, por que neste caso as exigências são maiores que no caso do fluxo acelerado das turbinas. Esta maneira de cálculo será inicialmente explicada para o caso de pás radiais.

Fixando-se a variação do ângulo β em função de r entre os valores limites dados β_1 e β_2 , a pá pode ser calculada através de etapas de pequenos valores Δr , adicionando-se de cada vez o ângulo β correspondente. Tal processo, entretanto, apesar de trabalhoso e impreciso, nada mais é do que uma integração. Assim, é mais correto executar numericamente esta integração calculando-se o ângulo polar $POA = \varphi$ mostrado na figura 8, que corresponde a cada raio individual r e adicionando-o a OA . A determinação de φ é feita a partir do raciocínio seguinte:

No triângulo preenchido $PP'T$, cujo lado PT representa o arco no ângulo central infinitamente pequeno $d\varphi$ e que é retângulo em T , vem:

$$\overline{PT} = r d\varphi$$

e como,

$$\overline{PT} = \frac{\overline{P'T}}{\operatorname{tg}\beta}$$

Como $\overline{P'T}$ representa o aumento infinitamente pequeno dr do raio r , pode-se escrever, após igualar as duas expressões precedentes,

$$rd\varphi = \frac{dr}{\operatorname{tg}\beta}$$

$$d\varphi = \frac{dr}{r \operatorname{tg}\beta}$$

Obtém-se então, integrando entre r_1 e r e multiplicando simultaneamente por $180/\pi$, de maneira que φ já esteja em graus

$$\varphi^0 = \frac{180}{\pi} \int_{r_1}^r \frac{dr}{r \operatorname{tg}\beta}$$

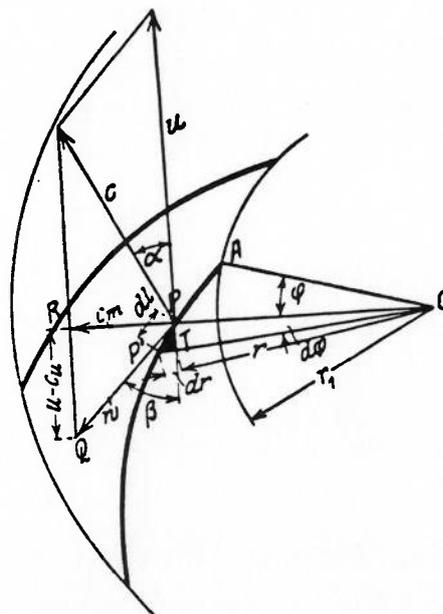


Figura 8. Esboço pertinente ao cálculo ponto a ponto das pás de uma bomba.

7.1.7 CAIXA ESPIRAL

Para a condução na saída do fluxo na periferia do rotor será usada uma caixa espiral. Deve-se levar em conta que devido às forças centrífugas do fluido que passa pelo rotor, a pressão deve aumentar do interior para a parte mais externa e de acordo com Bernoulli, a velocidade deve sofrer o efeito inverso tendo seu valor reduzido. Como a condição do fluxo é a mesma ao longo de toda a circunferência do rotor a velocidade média de uma seção da espiral diminuirá em função do aumento da seção na direção radial. Esta última condição deve ser sempre satisfeita, pois o fluxo no rotor deve permanecer simétrico com relação ao eixo. Da mesma forma ao longo de cada circunferência paralela na espiral, deve existir a mesma condição de fluxo, ou seja, também na caixa espiral o fluxo deverá ser simétrico com relação ao eixo.

Inicialmente, este raciocínio mostra que, para cada ponto da caixa espiral, a equação do vórtice vale

$$c_u r = K$$

As paredes laterais da caixa espiral podem ser projetadas como superfícies de rotação. Colocando-se a linha de saída na circunferência interna da caixa espiral em X, ela poderá ser tomada como início da espiral (figura 9). Se as trajetórias de fluxo de forma espiral, calculadas a partir de sua aresta de saída X, tiverem completado 360° , estará projetada a caixa espiral juntamente com suas superfícies laterais.

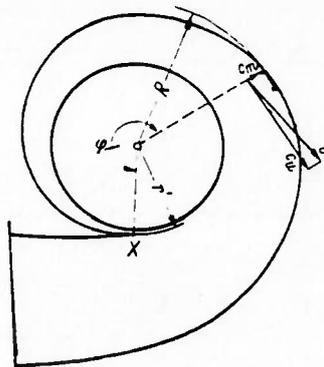


Figura 9. Caixa espiral

O limite externo AB de cada seção da espiral (figura 10) entre as superfícies laterais que permanecem constantes ao longo de toda a circunferência, resulta do conjunto dos pontos de intersecção das trajetórias do fluxo, passando pelas linhas de saída adotadas com os planos longitudinais correspondentes. Se as superfícies laterais forem paralelas entre si e perpendiculares ao eixo, então elas terão a forma de espirais logarítmicas e seu limite externo AB se comporta como uma reta em todas as seções.

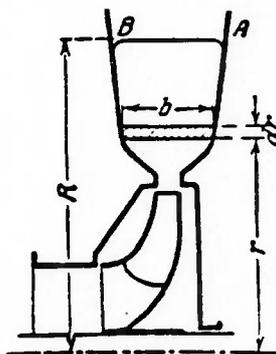


Figura 10. Espiral em vista de corte longitudinal

Considerando o corte segundo um plano longitudinal situado sob um ângulo arbitrário φ (figura 12) com relação à aresta de entrada X da espiral e neste corte considerar-se a faixa plana

$df = b dr$, que corresponde a uma variação muito pequena do raio r (figura 10). A vazão para a seção fica:

$$d\dot{V}_\varphi = df c_u = \frac{b dr K}{r}$$

Se r' for o raio na entrada X da espiral, então passará pela seção considerada entre o raio r' e o limite exterior com o raio R, o fluxo parcial

$$\dot{V}_\varphi = \int_{r=r'}^{r=R} d\dot{V}_\varphi = K \int_{r'}^R \frac{b dr}{r}$$

Este coincide com a parte do fluxo que sai do rotor no arco da circunferência correspondente ao ângulo central φ , onde

$$\dot{V}_\varphi = \frac{\varphi}{360^\circ} \dot{V}$$

Onde \dot{V} é a vazão total que entra na caixa espiral e φ é o ângulo medido em graus. Igualando-se as expressões anteriores, vem

$$\varphi = \frac{360^\circ K}{\dot{V}} \int_{r'}^R \frac{b dr}{r}$$

A partir desta é possível determinar a variação de φ em função de R.

Para a seção transversal circular segue-se a notação da figura 11:

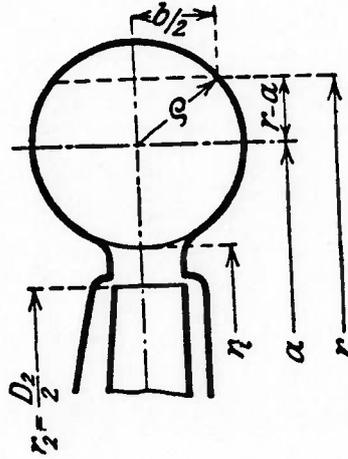


Figura 11. Caixa espiral com seção circular

$$\left(\frac{b}{2}\right)^2 + (r-a)^2 = \rho^2$$

Substituindo b na equação de φ temos:

$$\int_r^R \frac{b \, dr}{r} = 2 \int_{a-\rho}^{a+\rho} \frac{\sqrt{\rho^2 - (r-a)^2} \, dr}{r} = 2\pi \left(a - \sqrt{a^2 - \rho^2} \right)$$

$$\varphi = \frac{720^\circ K}{\dot{V}} \pi \left(a - \sqrt{a^2 - \rho^2} \right)$$

Como a distância mínima $r_i = a - \rho$ para todas as seções é fixada pela posição da lingueta, toma-se então $a = r_i + \rho$.

$$\varphi = \frac{720^\circ K}{\dot{V}} \pi \left[r_i + \rho - \sqrt{r_i(r_i + 2\rho)} \right]$$

No projeto da espiral prefere-se estimar φ e calcular ρ . Por isso é mais conveniente usar esta equação na forma:

$$\rho = \frac{\varphi}{C} + \sqrt{2r_i \frac{\varphi}{C}}$$

Com

$$C = \frac{720^\circ \pi K}{\dot{v}}$$

8 APÊNDICE 2. LISTAGEM DO PROGRAMA EM LINGUAGEM C

GER.C

```

#include <stdio.h>    //Bomba com novos dados
#include <stdlib.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
#include <graphics.h>
#include <conio.h>
#include <string.h>

#include "ger.h"

main()
{
char s_n;

v= h= n= beta0= beta2= 0;

inicio:

    clrscr();

v.1.0 printf("\n\n          PROGRAMA DE PROJETO DE BOMBAS CENTRIFUGAS - PROB
");
printf("\n          Sergio Kenji Moriguchi ");

printf("\n\n          DIGITE AS CONDICICOES DE OPERACAO DA BOMBA: ");
printf("\n\n          VAZAO (Q em m3/s)          %5.4f", v);
printf("\n          ALTURA DE ELEVACAO (h em metros) %3.2f", h);
printf("\n          ROTACAO (n em rpm)          %3.2f", n);
printf("\n          ANGULO DE ENTRADA BETA_0 (em graus) %3.2f", beta0);
printf("\n          ANGULO DE SAIDA BETA_2 (em graus) %3.2f", beta2);
printf("\n\n\n\n\n\n          *** PARA EFETUAR O CALCULO TECLE F2 ***");

entrada( &v, &h, &n, &beta0, &beta2);

modo_graf();
rotor();
caixa();
iges2();
arqtxt();
volta();
n=n*60;

tentenovo:
printf("\n\n\n\n\n\n          PARA REPETIR CALCULO TECLE 'R')");
printf("\n          PARA FINALIZAR TECLE 'F')");
(s_n) = getche();

switch (s_n)

```

```

    {
        case 'r' :    goto inicio;
        case 'R' :    goto inicio;
        case 'f' :    goto fim;
        case 'F' :    goto fim;
        default :

            clrscr();
            printf("\n\n\n\n\n Opcao invalida ! Tecla 'R' ou 'F'\n");
            goto tentenovo;

    }
fim:
    clrscr();
    printf("\n\n\n\n\n          PROGRAMA DE PROJETO DE BOMBAS
CENTRIFUGAS\n\n\n\n");
    printf("          FIM DA SESSAO !");
}

```

ENTRADA.C

```

#include <stdio.h>    //Entrada de dados
#include <stdlib.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
#include <graphics.h>
#include <conio.h>
#include <string.h>

#include "gere.h"

void entrada( float *v, float *h, float *n, float *beta0, float *beta2)

    {
        int x=61, y=8;
        char ent(char *,int *,int *);
        int cascii();
        char str[10], ctrl;

        for(;;)
        {
            gotoxy(x,y);
            str[0]= cascii();

            switch(str[0])
            {
                case -80:    /* seta para baixo */
                    if(y == 12 ) y= 8;
                    else
                        y++;
                    continue;
            }
        }
    }

```

```
case -72: /* seta para cima */
if(y == 8 ) y= 12;
else
y--;
continue;

case '0':
case '1':
case '2':
case '3':
case '4':
case '5':
case '6':
case '7':
case '8':
case '9':
case '.':

ctrl = ent (str,&x, &y);
break;

case 27: clrscr(); //ESC
exit(0);

case -60: return; //f2

default:continue;
}

switch(y)
{
case 8:
*v = atof(str);
if (ctrl == 'b') y= 9;
if (ctrl == 'c') y= 12;
if (ctrl == '2') return;
continue;
case 9:
*h = atof(str);
if (ctrl == 'b') y= 10;
if (ctrl == 'c') y= 8;
if (ctrl == '2') return;
continue;
case 10:
*n = atof(str);
if (ctrl == 'b') y= 11;
if (ctrl == 'c') y= 9;
if (ctrl == '2') return;
continue;
case 11:
*beta0 = atof(str);
```

```
        if (ctrl == 'b') y= 12;
        if (ctrl == 'c') y= 10;
        if (ctrl == '2') return;
        continue;
        case 12:
        *beta2 = atof(str);
        if (ctrl == 'b') y= 8;
        if (ctrl == 'c') y= 11;
        if (ctrl == '2') return;
        continue;
    }
}
}
```

```
char ent(char *str,int *x,int *y)
```

```
{
int cascii();
char ch;
int i=1;
str[1]=NULL;

for (;;)
{
gotoxy(*x-6,*y);
cprintf("      ");
gotoxy(*x-i+1,*y);
cprintf("%s ",str);
gotoxy(*x,*y);
ch=cascii();
switch(ch)
{
case '0':
case '1':
case '2':
case '3':
case '4':
case '5':
case '6':
case '7':
case '8':
case '9':
case '.':

str[i]=ch;
str[i+1]=NULL;
i++;
continue;
```

```

        case 8:      /* back space */
        if(i) i--;
        str[i]=NULL;
        continue;

        case -60:    /* f2 calculo imediato */
        return('2');

        case -80:    /* seta para baixo */
        return('b');

        case -72:    /* seta para cima */
        return('c');

        case 27: clrscr(); //ESC
        exit(0);

        default:continue;
    }
}

```

```

// CASCII.C 25/MAR/91
// Funcao: leitura de caracter e retorno de codigo ASCII
// retorna codigo ASCII se caracter normal
// retorna (-)codigo ASCII se codigo estendido
int cascii(void)
{
    union REGS r;
    r.h.ah= 0;
    int86(0x16, &r, &r);
    return( (r.h.al) ? r.h.al : -r.h.ah );
}

```

GRAF.C

```

#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <graphics.h>
#include "gere.h"

void modo_graf()          /*** vai para o modo grafico
{
    /* request auto detection */
    int gdriver=DETECT , gmode, errorcode;

    /* register a driver that was added into graphics.lib */
    errorcode = registerbgidriver(EGAVGA_driver);

    /* report any registration errors */
}

```

```
if (errorcode < 0)

{
    printf("Graphics error: %s\n", grapherrormsg(errorcode));
    printf("Press any key to halt:");
    getch();
    exit(1); /* terminate with an error code */
}

/* initialize graphics and local variables */
initgraph(&gdriver, &gmode, "");

/* read result of initialization */
errorcode = graphresult();
/* an error occurred */
if (errorcode != grOk)
{
    printf("Graphics error: %s\n", grapherrormsg(errorcode));
    printf("Press any key to halt:");
    getch();
    exit(1);
}
}
```

ROTOR.C

```
#include <stdio.h> //calculo do rotor da Bomba
#include <stdlib.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
#include <graphics.h>
#include <conio.h>
#include <string.h>

#include "gere.h"

void rotor()
{
    setfillstyle(SOLID_FILL,cf);
    bar(getmaxx(),getmaxy(),0,0); /* preencher fundo */

    // v=0.016;
    // h=96;
    // n=1450;
    // beta0=14;
    // beta2=26;

    g=9.81; ren=0.7; errocoef=1; errodiam2=1;
    w=0; y=0; i=0; nq=0; ro=1000;
    fim=30;
    setcolor(14);
}
```

```
n=n/60;
w=2*3.1416*n;

//Trabalho especifico
y=g*h;

//Rotacao nq
nq=333*n*sqrt(v)/(pow(y,3.0/4.0));
//printf("nq = %5.2f\n", nq);
if (nq<10) i=pow(20/nq,4.0/3.0); //Adota-se com multiplos estagios
if (nq<10) i = ceil(i); //torna o valor decimal em inteiro arredondando
//para o valor superior - ceil

else i=1;
//printf("i = %5.2f\n", i);
// getch();
/* select the text style */
setcolor (14);
settextstyle(1, 0, 1);

//Trabalho especifico por estagio
dy=y/i;
//printf("Trab. espec. por estagio (Y) = %5.2f\n", dy);

//Fluxo acionado
vl=1.05*v;
// printf("fluxo acionado (vl)= %5.3f\n", vl);

//Aresta de Succao
p=ro*v*y/ren; //potencia
// printf("potefetiva (Pef em W)= %5.2f\n", p);
p=p/(1000*0.74); //transformacao de KW para CV

//Potencia do motor 1,15*Pef
p=p*1.15;

//diametro do eixo
double Tadm=140,mt=1; //Utilizando Tadm = 140Kgf/cm^2
n = n*60;
mt = 71620*p/n;

de=(pow(16*mt/(Tadm*3.1415),1.0/3.0));
// printf("P=pef*1.15 do motor = %5.2f\n", p);
// printf("Mt=71620*P/n = %5.2f\n", mt);
// printf("de sem chaveta em cm= %5.2f\n", de);

//Adota-se devido a necessidade de chavetar
de = de*1.05*10;
// printf("de com chaveta em mm (1.05*de) = %5.2f\n", de);
// getch();
upde = ceil(de); //torna o valor decimal em inteiro arredondando
```

```

//para o valor superior - ceil

    dn = upde*1.23;    //em milímetros
//    printf("upde= %5.2f\n", upde);
// getch();
    coef_vort=1;
    k=0.8;
    n=n/60;

    ds=pow(4*vl/(3.1416*3.1416*k*coef_vort*n*tan(beta0*3.1416/180)),1.0/3.0)*1000;
//    printf("beta0 = %5.2f\n", beta0);
//    ds=pow(4*vl/(3.1416*3.1416*k*coef_vort*n*tan(beta0)),1.0/3.0)*1000;
//    printf("ds em mm= %5.2f\n", ds);
//    printf("vl= %5.2f\n", vl);
//    printf("beta0= %5.2f\n",beta0);
//    printf("n rps= %5.2f\n", n);
//    printf("dn em mm= %5.2f\n", dn);
//    ds=ds/1000;
//    dn=dn/1000;
    cs=vl*4*1000000/(3.1416*(ds*ds-dn*dn));
//    printf("cs em m/s = %5.2f\n", cs);
    d1=1.063*ds;    //em milímetros
    u1=w*d1/(2*1000);    //em metros/segundo

    coef_estr=1.25;    //valor adotado fator de estr. do canal
//                    //devido a espessura das pas
    d2=2*d1;    //valor inicial de d2 em mm a ser verificado

//getch();
cleardevice();
    if (errodiam2 >= 0.01)
//while (pow(pow(errodiam2,2),0.5) >= 0.01)
    {

    if (errocoef>=0.01)
    {
        coef_estr0 = coef_estr;
        beta1 = (atan(cs*coef_estr/u1))*180/3.1416; //em graus
        kz = 6;    //coef. empirico
        //printf("beta1 = %5.2f\n", beta1);
        z = kz*(d2+d1)/(d2-d1)*sin(((beta1*3.1416/180)+(beta2*3.1416/180))/2);
        //printf("numero de pas calculado z = %5.2f\n", z);

        double um = 1.0;
        double result;

        result = fmod(z,um);
        //printf("The remainder of (%lf / %lf) is %lf\n", z, um, result);
        if (result>=0.50) upz = ceil(z); //torna o valor decimal em inteiro
    }
}
arredondando

//para o valor superior - ceil

```

```

else upz = floor(z);
z = upz;
//printf("numero de pas z = %5.2f\n", z);

t1=3.1416*d1/z; //em mm
s1=3.0; //espessura das pas em mm
sigma1=s1/sin(beta1*3.1416/180); //em mm
coef_estr=t1/(t1-sigma1/1000);
// printf("t1 = %5.2f\n", t1);
// printf("d1 = %5.2f\n", d1);
// printf("sigma1 = %5.2f\n", sigma1);
// printf("beta1 = %5.2f\n\n", beta1);
// printf("coef_estr = %5.4f\n", coef_estr0);
// printf("coef_estr calculado = %5.4f\n\n", coef_estr);
// getch();

errocoef=(coef_estr0-coef_estr)/coef_estr0;
//printf("porcentagem de erro do coef = %5.3f\n\n", errocoef);

if (errocoef<0)
    errocoef=errocoef*(-1);
    //getch();
    //printf("errocoef posit = %5.4f\n\n", errocoef);

}
else ;

b1 = vi*1000/(3.1416*d1*cs);
//printf("coef_estr calculado = %5.4f\n\n", coef_estr);
//printf("cs velocidade media na entrada do fluido em m\s = %5.2f\n", cs);
//printf("b1 largura das pas na entrada do fluido em mm = %5.2f\n", b1);
//printf("de diametro de eixo em mm = %5.2f\n", de);
//printf("dn diametro do cubo em mm = %5.2f\n", dn);
//printf("ds diametro da boca de succao em mm = %5.2f\n", ds*1000);
//printf("d1 diametro na entrada na entrada das pas em mm = %5.2f\n\n",
d1*1000);
//getch();

//Aresta de pressao

ypa = dy/0.83;
csi = 0.85;
pressao = 8*csi/(3*z);
ypainf = ypa*(pressao+1);
c2m = 0.9*cs;
x = tan(beta2*3.1416/180);
u2 = (c2m/(2*x))+sqrt((c2m*c2m/(4*x*x))+ypainf);
diam2 = 2*u2*1000/w;
errodiam2 = (d2-diam2)/(d2);
// printf("d2 = %5.4f\n", d2);
// printf("diam2 = %5.2f\n", diam2);

```



```

//      printf("d1 = %5.2f\n", d1);
//      printf("d2 = %5.2f\n", d2);
//      getch();

cm[inicio]=cs;           //VARIACAO LINEAR DE cm
cm[fim]=c3;
deltacm=(cm[fim]-cm[inicio])/(fim-inicio);

rw[inicio]=w1;          //VARIACAO LINEAR DE w
rw[fim]=w2;
deltarw=(rw[fim]-rw[inicio])/(fim-inicio);

/* clear the screen */
cleardevice();
setfillstyle(SOLID_FILL,cf);
bar(getmaxx(),getmaxy(),0,0);           /* preencher fundo */

fim=30;
rr[fim]=d2/2;
rr[1]=d1/2;

for (passo=1;passo<=fim;passo++)
{

    rr[passo+1]=rr[passo]+deltarr;

    rt[passo]=3.1416*2*rr[passo]/z;

    cm[passo+1]=cm[passo]+deltacm;

    rw[passo+1]=rw[passo]+deltarw;

    rbeta[passo]=asin((s1/rt[passo])+(cm[passo]/rw[passo]))*180/3.1416;

    rb[passo]=vl*1000*1000/(3.1416*2*rr[passo]*cm[passo]); //em mm

    ra[passo]=1/(rr[passo]*tan(rbeta[passo]*3.1416/180));
    ra[0]=0;
    // printf("ra = %5.2f\n", ra[passo]*1000);

    rdeltaf[passo]=deltarr*(ra[passo]+ra[passo-1])/2;
    rdeltaf[1]=0;
rsdeltaf[0]=0;
    // printf("rsdeltaf[0] = %5.2f\n", rsdeltaf[0]);
    rsdeltaf[passo]=rsdeltaf[passo-1]+rdeltaf[passo];
    rsdeltaf[1]=0;
    rfi[passo]=180*rsdeltaf[passo]/3.1416;
    rfi[1]=0;
}

```

```

posx = 0;
pixel = 0;
rodape = 80;

fim = 30;

    setfillstyle(SOLID_FILL,cf);
    bar(getmaxx(),getmaxy(),0,0);          /* preencher fundo */

    outtextxy(posx,pixel,"DADOS DO ROTOR DE SIMPLES CURVATURA");

for (passo=1;passo<=fim;passo++)          //angulo rfi*****
    {
    if (pixel >getmaxy()-rodape) posx=posx+200;
    if (pixel >getmaxy()-rodape) pixel=0;
    if (pixel == 20) outtextxy(posx,pixel," raio");

    sprintf(trr,"%10.5g",rr[passo]);
    outtextxy(posx,pixel+40,trr);
    sprintf(trfi,"%10.5g",rfi[passo]);
    if (pixel == 20) outtextxy(posx+100,pixel," ang.rfi");
    outtextxy(posx+100,pixel+40,trfi );
    if(passo==fim) outtextxy(180,getmaxy()-30,"pressione a tecla ENTER para
continuar");
    outtextxy(posx+190,pixel+40,"|");
    pixel=pixel+20;
    }
    //printf("rfi = %5.2f\n", rfi[30]);
    getch();

    /* clear the screen */
cleardevice();
setfillstyle(SOLID_FILL,cf);
bar(getmaxx(),getmaxy(),0,0);          /* preencher fundo */

posx=0;
pixel=0;
    outtextxy(posx,pixel,"DADOS DO ROTOR DE SIMPLES CURVATURA");
    for (passo=1;passo<fim+1;passo++) //angulo beta*****
        {
        if (pixel >getmaxy()-rodape) posx=posx+200;
        if (pixel >getmaxy()-rodape) pixel=0;
//    deltarr[passo]=(rr[fim]-rr[inicio])/(fim-inicio);
        rr[passo+1]=rr[passo]+deltarr;
        if (pixel == 20) outtextxy(posx,pixel," raio");
        sprintf(trr,"%10.5g",rr[passo]);
        outtextxy(posx,pixel+40,trr);

        sprintf(trbeta,"%10.5g",rbeta[passo]);
        if (pixel == 20) outtextxy(posx+100,pixel," ang.beta");
        outtextxy(posx+100,pixel+40,trbeta );
        }

```

```

        outtextxy(posx+190,pixel+40,"|");
        if(passo==fim) outtextxy(180,getmaxy()-30,"pressione a tecla ENTER para
continuar");
        pixel=pixel+20;
    }

        getch();
        /* clear the screen */
cleardevice();
setfillstyle(SOLID_FILL,cf);
bar(getmaxx(),getmaxy(),0,0);          /* preencher fundo */

posx=0;
pixel=0;
outtextxy(posx,pixel,"DADOS DO ROTOR DE SIMPLES CURVATURA");
for (passo=1;passo<fim+1;passo++)      //VELOC. cm*****
    {

        if (pixel >getmaxy()-rodape) posx=posx+200;
        if (pixel >getmaxy()-rodape) pixel=0;
//      deltarr[passo]=(rr[fim]-rr[inicio])/(fim-inicio);
        rr[passo+1]=rr[passo]+deltarr;
        if (pixel == 20) outtextxy(posx,pixel," raio");
        sprintf(trr,"%10.5g",rr[passo]);
        outtextxy(posx,pixel+40,trr);

        sprintf(tcm,"%10.5g",cm[passo]);
        if (pixel == 20) outtextxy(posx+100,pixel,"veloc. cm");
        outtextxy(posx+100,pixel+40,tcm);
        if(passo==fim) outtextxy(180,getmaxy()-30,"pressione a tecla ENTER para
continuar");
        outtextxy(posx+190,pixel+40,"|");
        pixel=pixel+20;
    }

        getch();
        /* clear the screen */
cleardevice();
setfillstyle(SOLID_FILL,cf);
bar(getmaxx(),getmaxy(),0,0);          /* preencher fundo */

posx=0;
pixel=0;
rodape=100;
outtextxy(posx,pixel,"DADOS DO ROTOR DE SIMPLES CURVATURA");
for (passo=1;passo<fim+1;passo++)      //largura b do
canal*****
    {
        if (pixel >getmaxy()-rodape) posx=posx+220;
        if (pixel >getmaxy()-rodape) pixel=0;
    }

```

```

//  deltarr[passo]=(r[fim]-r[inicio])/(fim-inicio);
r[passo+1]=r[passo]+deltarr;
if (pixel == 20) outtextxy(posx,pixel," raio");
sprintf(trr,"%10.5g",r[passo]);
outtextxy(posx,pixel+60,trr);

sprintf(trb,"%10.5g",rb[passo]);
if (pixel == 20) outtextxy(posx+100,pixel," largura");
if (pixel == 20) outtextxy(posx+100,pixel+10,"do canal (b)");
outtextxy(posx+100,pixel+60,trb );
if(passo==fim) outtextxy(180,getmaxy()-30,"pressione a tecla ENTER para
continuar");
outtextxy(posx+190,pixel+60,"|");
pixel=pixel+20;
}

getch();
/* clear the screen */
cleardevice();
posx=0;
pixel=0;

setfillstyle(SOLID_FILL,cf);
bar(getmaxx(),getmaxy(),0,0);          /* preencher fundo */

outtextxy(posx,pixel,"DADOS DO ROTOR DE SIMPLES CURVATURA");
for (passo=1;passo<fim+1;passo++)      //passo t*****
{
rt[1]=3.1416*2*r[1]/z;
if (pixel >getmaxy()-rodape) posx=posx+220;
if (pixel >getmaxy()-rodape) pixel=0;
//  deltarr[passo]=(r[fim]-r[inicio])/(fim-inicio);
r[passo+1]=r[passo]+deltarr;
if (pixel == 20) outtextxy(posx,pixel," raio");
sprintf(trr,"%10.5g",r[passo]);
outtextxy(posx,pixel+60,trr);

sprintf(trt,"%10.5g",rt[passo]);
if (pixel == 20) outtextxy(posx+100,pixel," passo");
if (pixel == 20) outtextxy(posx+100,pixel+10,"das pas (t)");
outtextxy(posx+100,pixel+60,trt );
if(passo==fim) outtextxy(180,getmaxy()-30,"pressione a tecla ENTER para
continuar");
outtextxy(posx+190,pixel+60,"|");
pixel=pixel+20;
}

getch();
cleardevice();

```

}

CAIXA.C

```
#include <stdio.h> //CALCULO DA CAIXA ESPIRAL
#include <stdlib.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
#include <graphics.h>
#include <conio.h>
#include <string.h>

#include "gere.h"

void caixa()
{
cleardevice();

double C, k;
char tteta[5], traio[5];
fim = 73;
double deltateta;
c = 1; r3 = 1; k = 1;

//printf("CAIXA ESPIRAL PARA INSTALACAO"); //ENTRADA DE DADOS DA INSTALACAO
//printf("\n\VAZAO (v em m3/s) = %7.5f\n",v);
//printf("\n\ALTURA DE SUCCAO (h em metros) = %7.5f\n",h);
//printf("\n\ROTACAO (n em rpm) = %7.5f\n",n);
//printf("\nv' = %7.5f\n",v);
//printf("\nY = %7.5f\n",y);
//printf("\nw = %7.5f\n",w);
//printf("\nd2 = %7.5f\n",d2);

//printf("\n          *** APERTE UMA TECLA ***",n);

//getch();
cleardevice();

setfillstyle(SOLID_FILL,cf);
bar(getmaxx(),getmaxxy(),0,0); /* preencher fundo */

k = dy/w;

C = 720*3.1416*k/v;

r3 = d2*1.05/2000;

//printf("\nk = %7.5f\n",k);
//printf("\nC = %7.5f\n",C);
```

```
//printf("\ny = %7.5f\n",y);
//printf("\nw = %7.5f\n",w);
//printf("\nv = %7.5f\n",v);

//getch();

//*****DADOS PARA INTEGRACAO*****

teta[inicio] = 0;           //VARIACAO LINEAR DE teta
teta[fim] = 360;
pixel = 0;
posx = 0;

setfillstyle(SOLID_FILL,cf);
bar(getmaxx(),getmaxy(),0,0);           /* preencher fundo */

    deltateta=(teta[fim]-teta[inicio])/(fim-inicio);
    outtextxy(posx,pixel,"DADOS DA VOLUTA DE SECAO CIRCULAR");

for (passo=1;passo<fim+1;passo++)
    {
    if (pixel >getmaxy()-100) posx=posx+150;
    if (pixel >getmaxy()-100) pixel=0;
    if(passo==fim) outtextxy(180,getmaxy()-30,"pressione a tecla ENTER para
continuar");
    teta[passo+1]=teta[passo]+deltateta;

    raio[passo]=(teta[passo]/C)+(pow(2*r3*(teta[passo]/C),0.5));
    if (pixel==20) outtextxy(posx,pixel,"Angulo");

    sprintf(tteta,"%4.5g",teta[passo]);
    outtextxy(posx,pixel+50,tteta );

    if (pixel == 20) outtextxy(posx+60,pixel,"Diametro");
    if (pixel == 20) outtextxy(posx+60,pixel+10,"do canal");
    sprintf(traiio,"%10.5g",2000*raio[passo]); //diametro em mm
    outtextxy(posx+40,pixel+50,traio );
    outtextxy(posx+140,pixel+50,"|");
    pixel=pixel+20;
    }

    pixel=0;
    posx=0;
    getch();
    cleardevice();

setfillstyle(SOLID_FILL,cf);
bar(getmaxx(),getmaxy(),0,0);           /* preencher fundo */

    outtextxy(posx,pixel,"DADOS DA VOLUTA DE SECAO CIRCULAR");
```

```

    for (passo=1;passo<fim+1;passo++)
    {
    if (pixel >getmaxy()-100) posx=posx+150;
    if (pixel >getmaxy()-100) pixel=0;
    if (passo==fim) outtextxy(180,getmaxy()-30,"pressione a tecla ENTER para
continuar");

    if (pixel==20) outtextxy(posx,pixel,"Angulo ");
    sprintf(tteta,"%4.5g",teta[passo]);
    outtextxy(posx,pixel+50,tteta );

    if (pixel == 20) outtextxy(posx+60,pixel," Linha ");
    if (pixel == 20) outtextxy(posx+60,pixel+10," externa");
    // linha externa a partir do centro do rotor
    sprintf(trai0,"%10.5g",(1000*(2*raio[passo]+r3)));
    outtextxy(posx+40,pixel+50,traio );
    outtextxy(posx+140,pixel+50," | ");
    pixel=pixel+20;
    }

//printf("**** APERTE UMA TECLA ****,n);

    getch();

cleardevice();
}

```

IGES.C

```

//***** Abre e escreve arquivo emIGES *****
#include <stdio.h> //Bomba com novos dados
#include <stdlib.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
#include <graphics.h>
#include <conio.h>
#include <string.h>

#include "gere.h"

void iges2()

{
double x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7,
x8, y0, y1, y2, y3, y4, y5, y6, y11, y12, y13, y14, y15, y16;
double br2, br, deltar, ar, m, cr;

    b1=b1*1000;
    b2=b2*1000;

    x1=d2/5-(d1/2-ds/2)-b1-2*s1;

```

```
x2=d2/5-(d1/2-ds/2)-b1;
x3=d2/5-s1-b1;
x4=d2/5-b1;
x5=d2/5-b2-s1;
x6=d2/5-b2;
x7=d2/5;
x8=d2/5+s1;
y0=d2/2;
y1=d2/2+upde/2;
y11=d2/2-upde/2;

//printf("d2 = %5.2f\n", d2);
//printf("b1 = %5.2f\n", b1);
//printf("b2 = %5.2f\n", b2);
//printf("s1 = %5.2f\n", s1);
//getch();

y2=d2/2+dn/2;
y12=d2/2-dn/2;
y3=d2/2+dn/2+b1;
y13=d2/2-dn/2-b1;
y4=d2/2+ds/2;
y14=d2/2-ds/2;
y5=d2/2+d1/2;
y15=d2/2-d1/2;
y6=d2;
y16=0;

FILE *fp;
int ent = 116;
int a0 = 0;
int a1 = 1;
int a2 = 2;
int linha = 1;
int llinha = 1;
int passo = 1;
int lzi = 0;
int lzf = 0;
int zcen = 0;

double rxa[30];
double rxb[30];
double rya[30];
double ryb[30];

double axc[10];
double ayc[10];
double axi[10];
double ayi[10];
double axf[10];
```

```
double ayf[10];
```

```
double lxi[25];  
double lxf[25];  
double lyi[25];  
double lyf[25];
```

```
lxi[0]=x8;  
lyi[0]=y6;  
lxf[0]=x5;  
lyf[0]=y6;
```

```
lxi[11]=x8;  
lyi[11]=y16;  
lxf[11]=x5;  
lyf[11]=y16;
```

```
lxi[1]=x6;  
lyi[1]=y6;  
lxf[1]=x4;  
lyf[1]=y5;
```

```
lxi[12]=x6;  
lyi[12]=y16;  
lxf[12]=x4;  
lyf[12]=y15;
```

```
lxi[2]=x5;  
lyi[2]=y6;  
lxf[2]=x3;  
lyf[2]=y5;
```

```
lxi[13]=x5;  
lyi[13]=y16;  
lxf[13]=x3;  
lyf[13]=y15;
```

```
lxi[3]=x4;  
lyi[3]=y5;  
lxf[3]=x7;  
lyf[3]=y5;
```

```
lxi[14]=x4;  
lyi[14]=y15;  
lxf[14]=x7;  
lyf[14]=y15;
```

```
lxi[4]=x7;  
lyi[4]=y3;  
lxf[4]=x7;  
lyf[4]=y6;
```

lxi[15]=x7;
lyi[15]=y13;
lxf[15]=x7;
lyf[15]=y16;

lxi[5]=x8;
lyi[5]=y6;
lxf[5]=x8;
lyf[5]=y0;

lxi[16]=x8;
lyi[16]=y16;
lxf[16]=x8;
lyf[16]=y0;

lxi[6]=x8;
lyi[6]=y1;
lxf[6]=x1;
lyf[6]=y1;

lxi[17]=x8;
lyi[17]=y11;
lxf[17]=x1;
lyf[17]=y11;

lxi[7]=x1;
lyi[7]=y0;
lxf[7]=x1;
lyf[7]=y5;

lxi[18]=x1;
lyi[18]=y0;
lxf[18]=x1;
lyf[18]=y15;

lxi[8]=x1;
lyi[8]=y2;
lxf[8]=x4;
lyf[8]=y2;

lxi[19]=x1;
lyi[19]=y12;
lxf[19]=x4;
lyf[19]=y12;

lxi[9]=x1;
lyi[9]=y4;
lxf[9]=x2;
lyf[9]=y4;

```
lxi[20]=x1;
lyi[20]=y14;
lxf[20]=x2;
lyf[20]=y14;
```

```
lxi[10]=x1;
lyi[10]=y5;
lxf[10]=x3;
lyf[10]=y5;
```

```
lxi[21]=x1;
lyi[21]=y15;
lxf[21]=x3;
lyf[21]=y15;
```

```
axc[0]=d2;
ayc[0]=d2/2;
axi[0]=axc[0]+d2/2;
ayi[0]=ayc[0];
axf[0]=axi[0];
ayf[0]=ayi[0];
```

```
axc[1]=axc[0];
ayc[1]=ayc[0];
axi[1]=axc[0]+d1/2;
ayi[1]=ayc[0];
axf[1]=axi[1];
ayf[1]=ayi[0];
```

```
axc[2]=axc[0];
ayc[2]=ayc[0];
axi[2]=axc[0]+ds/2;
ayi[2]=ayc[0];
axf[2]=axi[2];
ayf[2]=ayi[0];
```

```
axc[3]=axc[0];
ayc[3]=ayc[0];
axi[3]=axc[0]+dn/2;
ayi[3]=ayc[0];
axf[3]=axi[3];
ayf[3]=ayi[0];
```

```
axc[4]=axc[0];
ayc[4]=ayc[0];
axi[4]=axc[0]+upde/2;
ayi[4]=ayc[0];
axf[4]=axi[4];
ayf[4]=ayi[0];
```

```
//printf("axc[0] = %5.2f\n", axc[0]);
```



```
        linha=linha+1;
        llinha=llinha+1;
        fprintf(fp,
"\n%8d%8d%8d%8d%8d%8d%8d%8dD%7d",ent,a0,a0,a1,a0,a0,a0,a0,linha);
        linha=linha+1;
    }

//escreve D para os diametros e arcos

    fim = 8;
    ent = 100;

    for (passo=0;passo<fim+1;passo++)
    {
        fprintf(fp,
"\n%8d%8d%8d%8d%8d%8d%8d%8dD%7d",ent,llinha,a1,a1,a0,a0,a0,a0,linha);
        linha=linha+1;
        llinha=llinha+1;
        fprintf(fp,
"\n%8d%8d%8d%8d%8d%8d%8d%8dD%7d",ent,a0,a0,a1,a0,a0,a0,a0,linha);
        linha=linha+1;
    }

//escreve D para as linhas

    fim = 21;
    ent = 110;

    for (passo=0;passo<fim+1;passo++)
    {

        fprintf(fp,
"\n%8d%8d%8d%8d%8d%8d%8d%8dD%7d",ent,llinha,a1,a1,a0,a0,a0,a0,linha);
        linha=linha+1;
        llinha=llinha+1;
        fprintf(fp,
"\n%8d%8d%8d%8d%8d%8d%8d%8dD%7d",ent,a0,a0,a1,a0,a0,a0,a0,linha);
        linha=linha+1;
    }

//escreve P para os pontos da pa
    linha = 1;
    llinha = linha;
    ent = 116;
    fim = 30;

    for (passo=1;passo<fim+1;passo++)
    {
        rx[passo]=axc[0]-(rr[passo]*cos(-rfi[passo]*3.1416/180));
        ry[passo]=ayc[0]-(rr[passo]*sin(-rfi[passo]*3.1416/180));
    }
}
```

```

//getch();

    m=1;
    br2 = 1;
    br = 1;
    deltar = 1;
    ar = 1;
    cr = 1;
    fim = 29;
    for (passo=1;passo<fim+1;passo++)
    {
        m = (ry[passo+1]-ry[passo])/(rx[passo+1]-rx[passo]);
        br2 = ry[passo+1]+(rx[passo+1]/m);
        ar = 1+((1/m)*(1/m));
        br = (-2*rx[passo+1])-(2*br2/m)+(2*ry[passo+1]/m);
        cr = (rx[passo+1]*rx[passo+1])+(br2*br2)-
(2*br2*ry[passo+1])+(ry[passo+1]*ry[passo+1])-(s1*s1/4);
        deltar = (br*br)-(4*ar*cr);
        rxa[passo] = (-br+(pow(deltar,1.0/2.0)))/(2*ar);
        rxb[passo] = (-br-(pow(deltar,1.0/2.0)))/(2*ar);
        rya[passo] = (-rxa[passo]/m)+br2;
        ryb[passo] = (-rxb[passo]/m)+br2;

//      printf("axc[0] = %5.2f\n", axc[0]);
//      printf("m = %5.2f\n", m);
//      printf("br2 = %5.2f\n", br2);
//      printf("ar = %5.2f\n", ar);
//      printf("br = %5.2f\n", br);
//      printf("cr = %5.2f\n", cr);
//      printf("deltar = %5.2f\n", deltar);
//      printf("rxa[passo] = %5.2f\n", rxa[passo]);
//      printf("rxb[passo] = %5.2f\n", rxb[passo]);
//      printf("rya[passo] = %5.2f\n", rya[passo]);
//      printf("ryb[passo] = %5.2f\n", ryb[passo]);
// getch();
    }

fim=29;
    for (passo=1;passo<fim+1;passo++)
    {
        fprintf(fp,
"\n%d,%8.2f,%8.2f,%8.2f;%41dP%7d",ent,rxb[passo],ryb[passo],rb[passo],linha,linha);

        linha=linha+1;
        llinha=llinha+2;
    }

    ent = 116;
    fim = 29;
    for (passo=1;passo<fim+1;passo++)
    {

```

```
fprintf(fp,
"\n%d,%8.2f,%8.2f,%8.2f;%41dP%7d",ent,rx[a[passo],ry[a[passo],rb[passo],linha,linha);
linha=linha+1;
llinha=llinha+2;
}

//escreve P para os pontos da caixa espiral

fim = 73;
for (passo=1;passo<fim+1;passo++)

{
raiorr[passo]=raio[passo];

rxca[passo]=axc[0]+(1000*(2*raio[passo]+r3)*cos(teta[passo]*3.1416/180));
ryca[passo]=ayc[0]+(1000*(2*raio[passo]+r3)*sin(teta[passo]*3.1416/180));
fprintf(fp,
"\n%d,%8.2f,%8.2f,%8d;%41dP%7d",ent,rxca[passo],ryca[passo],a0,linha,linha);

linha=linha+1;
llinha=llinha+2;
}

//escreve P para os diametros do rotor e ARCOS DA VISTA AXIAL

zcen = 0;
axc[0] = d2;
ayc[0] = d2/2;
fim = 8;
ent = 100;
for (passo=0;passo<fim+1;passo++)

{
fprintf(fp, "\n%3d,%3d,%8.2f,%8.2f,%8.2f,%8.2f,%8.2f,%8.2f;%10dP%7d",
ent,zcen,axc[passo],ayc[passo],axi[passo],ayi[passo],axf[passo],ayf[passo],linh
a,linha);

linha=linha+1;
llinha=llinha+2;
}

//escreve P para as linhas do corte axial

fim = 21;
ent = 110;
lzi = lzf = 0;
for (passo=0;passo<fim+1;passo++)

{
```

```
        fprintf(fp,
"\n%3d,%8.2f,%8.2f,%8d,%8.2f,%8.2f,%8d;%14dP%7d",ent,lxi[passo],lyi[passo],lzi,lxf[passo]
,lzf[passo],lzf,llinha,linha);

        linha=linha+1;
        llinha=llinha+2;
    }

    fprintf(fp, "\nS%7dG%7dD%7dP%7d%40dT%7d",a2,a2,llinha-1,linha-1,a0,a1);

    /* close the file */
    fclose(fp);
    //printf("fim do iges ");
    //getch();
}
```

VOLGRAF.C

```
    /** retorna ao modo texto
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <graphics.h>

#include "gere.h"

void volta()
{
    // getch();
    closegraph();
    // return 0;
}
```

ARQTXT.C

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
#include <graphics.h>
#include <conio.h>
#include <string.h>

#include "gere.h"

void arqtxt()
{
//*****ESCREVE ARQUIVO TEXTO COM RESULTADOS*****

    FILE *skm;
```

```

/* open a file for update */
skm = fopen("riges.TXT", "w+");

int numero = 1;
// fimcaixa=73;
fim = 30;
/* write some data to the file */

fprintf(skm, "      RESULTADOS DO PROGRAMA DE PROJETO DE ROTORES");

fprintf(skm, "\n\n      DADOS DA INSTALACAO");
fprintf(skm, "\n\n VAZAO          (m^3/s) %5.4f", v);
fprintf(skm, " \n ALTURA DE ELEVACAO   (m) %3.2f", h);
fprintf(skm, " \n ROTACAO           (rpm) %3.2f", n*60);
fprintf(skm, " \n ANGULO DE ENTRADA BETA_0 (graus) %3.2f", beta0);
fprintf(skm, " \n ANGULO DE SAIDA BETA_2 (graus) %3.2f", beta2);

fprintf(skm, "\n\nPONTOS DAS PuS DO ROTOR");
fprintf(skm, "\n      Raio | Angulo | Largura | Ang.beta | Vel. cm | Passo t |");
fprintf(skm, "\n      |      | do canal |      |      |      |");
fprintf(skm, "\n      (mm) | (graus) | (mm) | (graus) | (m/s) | (mm) |");

for (passo=1;passo<fim+1;passo++)

    {
    fprintf(skm, "\n%4d | %8.2f | %8.2f | %8.2f | %8.2f | %8.2f |", numero,
    rr[passo], rfi[passo], rb[passo], rbeta[passo], cm[passo], rt[passo]);
    numero=numero+1;
    }

fprintf(skm, "\n\nDADOS DA VOLUTA DE SECAO CIRCULAR");
fprintf(skm, "\n      Angulo | Diâmetro | Raio |");
fprintf(skm, "\n      | do canal | externo |");
fprintf(skm, "\n      (graus) | (mm) | (mm) |");

numero = 1;
fim = 73;
for (passo=1;passo<fim+1;passo++)

    {

    fprintf(skm,
"\n%4d | %8.0f | %9.2f | %9.2f |", numero, teta[passo], 2000*raiorr[passo], 1000*(2*raiorr[passo]+r3));
    numero=numero+1;
    }
fprintf(skm, "\n\n***** Aresta de succao *****\n");
fprintf(skm, "z = %5.2f\n", z);
fprintf(skm, "numero de estagios = %5.2f\n", i);
fprintf(skm, "cs (m/s) = %5.2f\n", cs);

```

```
fprintf(skm,"de (mm) = %5.2f\n", de);
fprintf(skm,"dn (mm) = %5.2f\n", dn);
fprintf(skm,"ds (mm) = %5.2f\n", ds);
fprintf(skm,"d1 (mm) = %5.2f\n", d1);
fprintf(skm,"b1 (mm) = %5.2f\n", b1);
fprintf(skm,"t1 (mm) = %5.2f\n", t1);
fprintf(skm,"ypa (m^2/s^2) = %5.2f\n", ypa);

fprintf(skm,"\n***** Aresta de pressao *****\n");
fprintf(skm,"b2 (mm) = %5.2f\n", b2);
fprintf(skm,"t2 (mm) = %5.2f\n", t2);
fprintf(skm,"c2m (m/s) = %5.2f\n", c2m);
fprintf(skm,"u2 (m/s) = %5.2f\n", u2);
fprintf(skm,"diam2 (mm) = %5.2f\n", diam2);

fprintf(skm,"\n\n ***** FIM DO ARQUIVO *****\n");
/* close the file */
fclose(skm);
}
```