

JOÃO PAULO PEREIRA MARCÍCANO

**MATRIZES DE FORJAMENTO**  
**PROJETO AUXILIADO POR COMPUTADOR**

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

São Paulo  
1995

OK

JOÃO PAULO PEREIRA MARCICANO

**MATRIZES DE FORJAMENTO**  
**PROJETO AUXILIADO POR COMPUTADOR**

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

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Valter Francisco Arruda Alves

São Paulo  
1995

Biblioteca da Escola Politécnica  
Universidade de São Paulo

**DEDALUS - Acervo - EPMN**



31600010018

Aos meus alunos da Escola Politécnica, que têm sido a grande razão e incentivo de meu aperfeiçoamento técnico. Desejo que minha dívida com vocês seja inesgotável.

## AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Valter Francisco Arruda Alves pelas diretrizes e permanente incentivo.

Aos colegas Fernando Antônio da Costa Nery, Gilmar Ferreira Batalha, José Luís Marra e José Lopes da Silva pela inestimável colaboração na execução deste trabalho.

# SUMÁRIO

**Lista de Tabelas**

**Lista de Figuras**

**Resumo**

**"Abstract"**

<b>1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Forjamento de Metais.....	1
1.2 Revisão da Literatura.....	4
1.3 Objetivos do Trabalho.....	7
Referências Bibliográficas.....	9
<b>2 Desenvolvimento do Programa.....</b>	<b>11</b>
2.1 Introdução.....	11
2.2 Especificação Funcional.....	11
2.3 Codificação.....	12
2.3.1 Estrutura de Dados.....	13
2.3.2 Algoritmos.....	17
2.4 Teste dos Módulos do Programa.....	22
2.5 Apresentação do Programa.....	22
2.5.1 Editor Gráfico.....	23
2.5.2 Editor de Dados.....	25
2.5.3 Pré e Pós Processador IGES.....	25
2.5.4 Projeto do Forjado.....	26
2.5.5 Cálculo da Máxima Força de Forjamento.....	27
2.6 Aplicação do Programa .....	29
Referências Bibliográficas.....	34

<b>3 Desenvolvimento de Ensaios e Cálculo da Força de Forjamento.....</b>	<b>35</b>
3.1 Introdução.....	35
3.2 Ensaios.....	36
3.2.1 Descrição dos Materiais e Equipamentos.....	36
3.2.2 Ensaio para Quantificação do Atrito.....	50
3.2.3 Ensaio para Determinação da Curva de Tensão de Escoamento	59
3.2.4 Ensaio de Forjamento.....	70
3.3 Cálculo da Força de Forjamento.....	75
Referências Bibliográficas.....	78
<b>4 Resultados e Discussão.....</b>	<b>79</b>
4.1 Resultados.....	79
4.2 Discussão.....	83
<b>5 Conclusões.....</b>	<b>85</b>
<b>Anexo 1 Padrão de Representação Gráfica IGES.....</b>	<b>86</b>
<b>Anexo 2 Método da Divisão em Elementos.....</b>	<b>91</b>
<b>Anexo 3 Projeto de Forjados.....</b>	<b>114</b>
<b>Apêndice 1 Expressões Utilizadas para o Cálculo do Valor da Força de Forjamento e sua respectiva Incerteza no Ensaio de Forjamento</b>	
<b>Apêndice 2 Listagem do Programa Fonte do Forjaxis</b>	

## LISTA DE TABELAS

2.1	Parâmetros associados ao tipo de equipamento	15
2.2	Módulos do programa	21
3.1	Especificações do transdutor de posição	37
3.2	Resultados da análise de regressão linear para determinação do coeficiente de calibração do transdutor de posição	40
3.3	Especificações do transdutor de pressão	40
3.4	Análise de regressão utilizada na determinação do coeficiente de calibração do transdutor de pressão	43
3.5	Especificações da prensa hidráulica	46
3.6	Escalas de leitura ajustadas no osciloscópio para ensaios de compressão e de forjamento	48
3.7	Valores de altura e diâmetros interno no ensaio do anel para condição a seco	54
3.8	Valores geométricos e fator de atrito calculados no ensaio do anel para condição a seco	54
3.9	Valores de altura e diâmetros interno no ensaio do anel para condição lubrificada com PTFE	55
3.10	Valores geométricos e fator de atrito calculados no ensaio do anel para condição lubrificada com PTFE	55
3.11	Valores de altura e diâmetros interno no ensaio do anel para condição lubrificada com óleo EP-48	56
3.12	Valores geométricos e fator de atrito calculados no ensaio do anel para condição lubrificada com óleo EP-48	56
3.13	Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de compressão	60
3.14	<b>K</b> e <b>n</b> obtidos por regressão logarítmica no <i>Lotus 123 R3</i>	68
3.15	Valor médio e desvio padrão dos coeficientes <b>K</b> e <b>n</b>	68
3.16	Intervalo de confiança para 95 % de confiabilidade dos coeficientes <b>K</b> e <b>n</b>	69

4.1	Máxima força de forjamento calculada e medida e seu respectivo erro relativo	80
4.2	Valores de máxima força de forjamento	82
A3.1	Valor de sobremetal	115
A3.2	Valores de ângulo de saída	116
A3.3	Expressões para cálculo de raio de canto e de filete	116



## LISTA DE FIGURAS

1.1	Matriz de forjamento	1
2.1	Fluxograma do programa principal	18
2.2	Fluxograma do procedimento de projeto do forjado	19
2.3	Fluxograma do procedimento de cálculo da máxima força de forjamento	20
2.4	Fluxograma do procedimento de edição gráfica	21
2.5	Tela do menu principal	23
2.6	Tela do editor gráfico	24
2.7	Tela do editor de campos	25
2.8	Tela de resultado do processamento gráfico	27
2.9	Tela de resultados numéricos	28
2.10	Configuração do forjado utilizado no estudo de caso 1	30
2.11	Valores calculados pelo programa	30
2.12	Meia seção da peça analisada	31
2.13	Meia seção do forjado calculado pelo <i>forjaxis</i>	33
2.14	Desenho da matriz a ser utilizada no ensaio de forjamento	33
3.1	Esquema de ligação do transdutor de posição	38
3.2	Curva de calibração do transdutor de posição para uma tensão de alimentação de 5 V	39
3.3	Esquema de ligação do transdutor de pressão	41
3.4	Curva de calibração do transdutor de pressão para tensão de alimentação de 5V	42
3.5	Representação esquemática da matriz de forjamento	45
3.6	Foto da prensa hidráulica utilizada nos ensaios	47
3.7	Dimensões do corpo de prova (6:3:2)utilizado no ensaio do anel	51
3.8	Curva de calibração	57
3.9	Foto dos corpos de prova utilizados no ensaio do anel	58
3.10	Dimensões do corpo de prova utilizado no ensaio de compressão	59

3.11	Registros de deslocamento (a) e de força (b) no ensaio de compressão para o corpo de prova 1	62
3.12	Curva de tensão de escoamento em função da deformação para o corpo de prova 1	63
3.13	Registros de deslocamento (a) e de força (b) no ensaio de compressão para o corpo de prova 2	64
3.14	Curva de tensão de escoamento em função da deformação para o corpo de prova 2	65
3.15	Registros de deslocamento (a) e de força (b) no ensaio de compressão para o corpo de prova 3	66
3.16	Curva de tensão de escoamento em função da deformação para o corpo de prova 3	67
3.17	Foto de corpos de prova utilizados no ensaio de compressão	69
3.18	Dimensões do corpo de prova utilizado no ensaio de forjamento	70
3.19	Dimensões do forjado obtido no ensaio de forjamento	71
3.20	Registros da força de forjamento (a) e do deslocamento (b) da matriz em função do tempo para condição a seco	72
3.21	Registros da força de forjamento (a) e do deslocamento (b) da matriz em função do tempo para condição lubrificada com óleo EP-48	73
3.22	Foto da matriz utilizada no ensaio de forjamento e seu respectivo forjado	74
4.1	Curvas de força de forjamento em função do deslocamento da matriz para condição a seco	81
4.2	Curvas de força de forjamento em função do deslocamento da matriz para condição lubrificada com óleo EP-48	82
A2.1	Elemento sob deformação	93
A2.2	Bloco sob deformação homogênea	97
A2.3	Representação esquemática da seção sob recalque para o caso de forjamento em matriz aberta sem canal de rebarba com escoamento plano	104

A2.4	Elemento utilizado na equação de equilíbrio para o caso de forjamento em matriz aberta sem canal de rebarba para escoamento plano	105
A2.5	Elemento utilizado na equação de equilíbrio para o caso de forjamento em matriz aberta sem canal de rebarba para escoamento axissimétrico	107
A2.6	Configuração geométrica e simbologia utilizada na formulação do caso de forjamento em matriz fechada com canal de rebarba para escoamento axissimétrico	109
A2.7	Configuração geométrica e simbologia utilizada na formulação do caso de forjamento em matriz fechada com canal de rebarba para escoamento plano	111
A3.1	Características geométricas do forjado	114
A3.2	Sequência de projeto do forjado	115

## RESUMO

O forjamento é um dos processos de fabricação mais utilizados na moderna Indústria Mecânica sendo responsável por parcela significativa da produção industrial principalmente no ramo automobilístico. O interesse crescente pela automação das atividades de engenharia no projeto, análise e planejamento do processo de fabricação motivaram o desenvolvimento de um programa de computador para auxílio ao projeto de matrizes de forjamento, através do projeto automático do forjado e cálculo da máxima força de forjamento. Foram ainda realizados estudos de casos, incluindo a obtenção de dados experimentais de calibração e verificação como fonte preliminar de avaliação e ensaio do programa desenvolvido.

## ABSTRACT

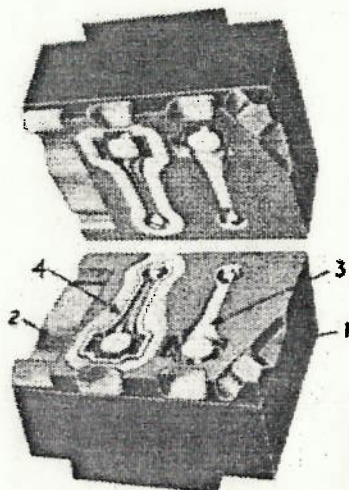
Forging is a manufacturing process of widespread usage in metalworking. It is utilized in the production of a important proportion of the mechanical components in the automotive parts industry. The increased interest in automating the activities of design, of process planning and analysis motivated the development of a microcomputer program as a helping tool for the die design process. The program uses a graphical interface for input data preparation and output data presentation and it allows the automatic generation of workpiece features and the calculation of maximum forging force. Case studies and experimental measurements for calibration and verification provide means of preliminary program testing and evaluation.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Forjamento de Metais

O forjamento é um processo de fabricação onde a forma do produto é obtida através da deformação plástica da matéria-prima pela aplicação de esforços compressivos por uma ferramenta. Esta ferramenta, denominada matriz de forjamento, controla a deformação definindo a forma do produto obtido; conforme representado na Figura 1.1.

A matriz de forjamento, construtivamente, é um bloco de aço dividido em duas partes, cada uma dessas partes possui, numa das faces as cavidades e o sistema de centragem e, na outra, encaixes para fixação no equipamento de conformação.



1, 2 e 3 : cavidades de pré-forma  
4 : cavidade final

Figura 1.1 - Matriz de forjamento - adaptada de DEGARMO (1990).

O sucesso do processo, ou seja, a obtenção de produtos perfeitos aliado a uma durabilidade razoável da matriz, depende do projeto adequado da matriz, principalmente das cavidades que controlam o escoamento plástico da matéria-prima.

O projeto mecânico da matriz de forjamento consiste em especificar a sua forma geométrica, dimensões, tolerâncias e material de construção. A sequência de projeto tradicionalmente adotada é a seguinte:(ALTAN, 1983)

- **Projeto do forjado:** a partir do desenho do produto gera-se o desenho do forjado, isto é feito através da aplicação de recomendações de projeto, apresentadas no Anexo 3.

- **Pré-formas:** Especificação das etapas intermediárias de conformação (pré-formas).

- **Projeto do bloco da matriz:** com o desenho do forjado e das etapas intermediárias de conformação, define-se o formato das cavidades e sua localização relativa no bloco, pode-se então determinar as dimensões externas da matriz, bem como dos sistemas de fixação e centragem.

- **Seleção do material da matriz:** em função das solicitações do processo é escolhido o material.

Para o projeto da matriz, é de interesse do projetista, o conhecimento da força necessária para o forjamento, este dado também é útil na seleção do equipamento de conformação.

A elaboração do projeto de uma matriz de forjamento é uma tarefa trabalhosa, porque envolve manipulações geométricas relativamente complexas, necessárias na fase de definição da forma do forjado e no estudo das etapas intermediárias de conformação.

As etapas de projeto de matrizes podem ser executadas com o auxílio de um computador digital. O computador pode aumentar bastante a produtividade e a qualidade da atividade de projeto. Além de executar operações de forma mais rápida, o computador é um meio eficiente para armazenar e recuperar informações, deste modo, é possível formar uma base de dados de projetos que podem auxiliar na elaboração de novos projetos.

Neste trabalho, aborda-se a utilização do computador no projeto de matrizes para forjamento, através da utilização de programas disponíveis comercialmente e de um

programa desenvolvido especialmente para o projeto de forjados e cálculo da máxima força de forjamento.

O programa desenvolvido, incorpora o método tradicional de projeto, analisando a forma geométrica da peça e fazendo as correções necessárias, baseado nas recomendações de projeto normalmente utilizadas pelos projetistas de matrizes de forjamento. O cálculo da máxima força de forjamento é efetuado aplicando-se o método matemático denominado "Método da Divisão em Elementos" ou "Slab Method" utilizando como dados a geometria do forjado e as condições de forjamento.

O método foi verificado experimentalmente através da comparação de valores de força de forjamento preditos pelo método e valores medidos. Este ensaio denominado ensaio de forjamento, simulou um caso de forjamento em matriz fechada com canal de rebarba.

Para calcular os valores da força de forjamento pelo método slab, deve-se conhecer a configuração geométrica do problema, a tensão de escoamento em função da deformação para as condições de deformação impostas e o valor do fator de atrito na interface.

O material utilizado no ensaio de forjamento foi o alumínio 1050 O e para este material não foi encontrado na literatura a tensão de escoamento em função da deformação e o valor do fator de atrito para as condições de realização do ensaio. Em função disto foram executados os ensaios de compressão para obtenção da tensão de escoamento e do anel para a determinação do fator de atrito.

Um estudo de caso utilizando o programa desenvolvido aplicado a um problema de forjamento estudado por Altan (1971) é apresentado e os resultados são comparados.



## 1.2 Revisão da Literatura

O processo de informatização do forjamento teve início nos anos 70, quando Altan e outros pesquisadores do Battelle Columbus Laboratories-USA, investigaram a possibilidade de uso de computadores na área de forjamento em matriz fechada com canal de rebarba (CALLEGARO; SCHAEFFER, 1988).

No trabalho pioneiro destes pesquisadores foi desenvolvido um programa para calcular o volume do forjado e as dimensões do canal de rebarba.

Em continuidade, BISWAS; KNIGHT apud CALLEGARO; SCHAEFFER (1988) estenderam o trabalho de Altan desenvolvendo um programa para o projeto de matrizes de forjamento para peças com simetria radial. Este programa foi implementado num computador IBM 1130.

No início dos anos 80, LUI; DAS (1981), utilizando um microcomputador, desenvolveram um programa para o projeto de matrizes de forjados com simetria axissimétrica. Neste programa a entrada da geometria da peça era feita de forma alfanumérica através da digitação das coordenadas, tolerâncias e raios de cada um dos vértices do contorno. Adicionalmente fornecia-se a posição da linha de rebarba e o ângulo de inclinação das paredes. O programa então gerava a geometria do forjado, através da modificação da forma geométrica da peça considerando: tolerância de forjamento, ângulos de saída, raios de arredondamento de canto e de filete e o canal de rebarba.

A forma geométrica do forjado podia ser obtida na forma de um desenho gerado por ploter ou através de listagem das coordenadas do contorno, ou ainda como programa para máquinas de usinagem comandadas numericamente.

Ainda nos anos 80, foi apresentado por CHOI; DEAN (1987) um programa de computador para projetar o bloco da matriz de forjamento em martelos. Este programa recebe como dados de entrada: o peso do martelo, energia do golpe, dimensões do canal de rebarba e forma geométrica das cavidades de pré-formas e da forma final, com estes

dados o programa calcula: a disposição das cavidades, as dimensões externas do bloco incluindo os canais de manipulação, e o "rabo de andorinha" para fixação à mesa do equipamento de conformação.

Os procedimentos de projeto adotados no programa são baseados em manuais de forjamento. A entrada e a saída de dados é feita de forma alfanumérica.

No final dos anos 80, VEMURI (1989), apresentou um "sistema especialista" para o projeto de pré-formas de forjados do tipo alma-nervura.

O programa foi desenvolvido utilizando-se a linguagem LISP em conjunto com FORTRAN. As regras de projeto de pré-formas foram obtidas nas seguintes fontes: manuais de forjamento, questionários respondidos por projetistas experientes e consultores especialistas em forjamento. Com estas informações traduzidas em regras, expandiu-se substancialmente as considerações para o projeto de pré-formas, passou-se a considerar os seguintes parâmetros: complexidade geométrica do forjado, forjabilidade, tensão de escoamento, velocidade e capacidade do equipamento de conformação, tolerância do forjado, tamanho do lote e temperatura de forjamento.

Ainda neste trabalho, foi sugerido a utilização do padrão IGES para representar os dados geométricos, mas apesar disto a entrada de dados é feita através de um arquivo que contém as coordenadas e raios dos vértices que definem o contorno da seção da peça a ser analisada.

Nos anos 90, KANG (1990) apresentou um procedimento para o projeto de pré-formas para forjamento em matriz fechada sem canal de rebarba, através de um programa de computador utilizando o Método de Elementos Finitos. Este procedimento é baseado na traçagem do caminho inverso de deformação a partir da configuração geométrica final.

O procedimento é apresentado na forma de um estudo de caso, onde são projetadas as pré-formas de uma pá de turbina. A pá deve ser gerada a partir de uma barra de seção circular, e durante o processo de forjamento não deve haver formação de rebarba. Este mesmo procedimento foi empregado por KIM; KOBAYASHI (1990), num

estudo de caso onde foram projetadas as pré-formas para forjados axissimétricos com seção em H, obtidas para materiais encruáveis e não encruáveis e para três configurações de nervura diferentes, com razão altura/largura igual a um, dois e três.

Ainda em 1990, FLASZKA et alii (1990), apresentaram um sistema para o projeto de matrizes de forjamento baseado em rotinas acopladas num programa de desenho comercial e no escoamento de materiais de simulação.

As rotinas desenvolvidas para a geração da geometria do forjado foram escritas em FORTRAN e implementadas numa "workstation Apollo 3000" e rodam sob o programa Auto-trol. Estas rotinas atuam de modo interativo, o usuário deve reconhecer e apontar as características geométricas da peça que devem ser alteradas.

A força de forjamento é calculada pelo "Slab Method" e a simulação do processo é feita por matrizes fabricadas em plástico que deformam o material modelo. Com relação a este método analítico ressalta-se que o mesmo tem sido utilizado com sucesso em vários casos de forjamento (LAHOTI; ALTAN, 1979).

Pela análise dos trabalhos acima citados percebe-se que os primeiros trabalhos eram bastante voltados para o projeto do forjado, mas os programas produzidos são limitados a geometrias simplificadas, não sendo possível produzir uma representação geométrica de peças de maior complexidade. Para produzir programas com mais recursos para o projeto de forjados seria necessário um grande esforço de programação, e nesta época começaram a se tornar populares os programas para desenho produzidos por empresas especializadas voltados para a elaboração de desenhos para projetos de engenharia e áreas afins. Alguns destes programas permitiam a geração de programas para máquinas de fabricação comandadas numericamente.

De um modo geral, os programas desenvolvidos por empresas comerciais costumam ter mais recursos e são constantemente atualizados por novas versões.

Em função desses aspectos, as forjarias passaram a utilizar programas de desenho genéricos para elaboração do projeto de matrizes, OH apud CALLEGARO; SCHAEFFER (1988), cita vários programas deste tipo utilizados por forjarias. Estes

programas de acordo com ALTAN (1983), abreviam o tempo de projeto em 60 a 80%. Pode-se deduzir que o tempo de projeto pode ser ainda menor se as alterações no desenho da peça para definição da forma da cavidade forem feitas de forma automática. FLASZKA et alii(1990) em seu trabalho, se aproximou deste propósito acoplando as rotinas de projeto de forjado num programa de desenho genérico.

Uma alternativa para compatibilizar a utilização de programas de desenho comerciais com programas específicos que se utilizam de informações geométricas é a transferência de dados formatados através de um padrão comum; como exemplo cita-se o padrão IGES ("Initial Graphics Exchange Standart") que tem sido bastante utilizado em programas comerciais de uso genérico (ZEID, 1991). Neste caso pode-se formar um ambiente de projeto automatizado onde os programas utilizados em desenho, análise e planejamento do processo de fabricação interagem abreviando o tempo de projeto global.

Por fim resalta-se que a despeito das vantagens deste padrão, o mesmo não foi utilizado nos trabalhos acima mencionados.

### **1.3 Objetivos do Trabalho**

O presente trabalho tem os seguintes objetivos:

- a) Desenvolver um programa de computador para auxiliar no projeto de matrizes de forjamento.
- b) Avaliar o desempenho do programa proposto, através de estudos casos.
- c) Obter valores de força de forjamento, utilizados no programa, por método analítico e através de experimento.

O programa deverá atender aos seguintes requisitos: integrar-se com outros sistemas que normalmente são utilizados para projeto, análise e fabricação em engenharia mecânica; calcular a máxima força de forjamento; projetar automaticamente o forjado; possuir uma interface "amigável" com o usuário; representar graficamente a peça e o forjado analisados e poder ser utilizado em microcomputadores de baixo custo.

A avaliação desses requisitos será feita através de comparação com dados da literatura e elaboração de projeto de matriz..

O cálculo da máxima força de forjamento, utilizada no dimensionamento da matriz e seleção do equipamento de conformação, será feito através de um método analítico, denominado "Método da Divisão em Elementos", cujos valores preditos serão comparados aos obtidos por ensaios de forjamento. Serão ainda realizados ensaios para determinação das seguintes variáveis de natureza mecânica de processamento, ou seja, tensão de escoamento e fator de atrito., obtidas respectivamente através do "ensaio de compressão" e do "ensaio do anel"; como material ensaiado será utilizado o alumínio comercialmente puro.

## Referências Bibliográficas

- [ALTAN, 1983]: ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H.L. **Metal Forming: Fundamentals and Applications**. USA, ASM, 1983. p. 171-188.
- [ALTAN, 1971]: ALTAN, T.; FIORENTINO, R.J. Prediction of Loads and Stresses in Closed-Die Forging. **Journal of Engineering for Industry**, p. 477-483, may/1971.
- [DEGARMO, 1990]: DEGARMO, E.P.; BLACK, J.T.; KOHSER, R.A. **Materials and Processes in Manufacturing**. USA, Macmillan, 1990. p.423.
- [CHOI; DEAN, 1987]: CHOI, S.H. ; DEAN, T.A. Computer Aided Design of Die Block Layouts. **J. Mach. Tools Manufact**, v.27, n.1, p.91-103, 1987.
- [CALLEGARO,1988]: CALLEGARO, R.M.; SCHAEFFER, L. Sistemas apoiados por computador para uso no forjamento em matriz fechada. In: cbecimat, 8., Campinas-SP, 1988. **Anais**. Campinas, UNICAMP, 1988. p.286-288.
- [FLASZKA, 1990]: FLASZKA, W.G.; PARO, J.A.; KIVIVUORI, S.O.J. Computer-Aided Forging Design using model material simulation. **Journal of Materials Processing Technology**, v.24,p.403-409,1990.
- [LUI; DAS, 1981]: LUI, S.W.; DAS, M.K. Interactive design of axisymmetric forging dies using a desk-top computer. **Journal of Mechanical Working Technology**, v.5, n.1+2, p.85-103, 1981.
- [KIM; KOBAYASHI, 1990]: KIM, N.; KOBAYASHI, S. Preform design in H-shaped cross sectional axisymmetric forging by the finite element method. **Int. J. Mach. Tools Manufact.**, v.30, n.2, p.243-268,1990.
- [VEMURI, 1989]: VEMURI, K.R.; OH, S.I.; ALTAN, T. BID: A Knowledge-based system to automate blocker design. **Int. J. Mach. Tools Manufact.**, v.29, n.4, p.505-518, 1989.
- [KANG, 1990]: KANG, B.S.; KIM, N.; KOBAYASHI, S. Computer-aided preform design in forging of an airfoil section blade. **Int. J. Mach. Tools Manufact.**, v.30, n.1, p.43-52, 1990.

[ZEID, 1991]: ZEID, I. **CAD/CAM THEORY AND PRACTICE**. Singapore, McGraw-Hill, 1991. p. 446-471.

[LAHOTI; ALTAN, 1979]: LAHOTI, G.D.; ALTAN, T. Limitations, Applicability and Usefulness of Methods in Analyzing Forming Problems, **Ann. CIRP**, Vol. 28/2/1979, p. 473-485.

## 2. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA

### 2.1 Introdução

Para o desenvolvimento do programa adotou-se a metodologia recomendada pela Engenharia de Software.

Segundo esta metodologia, o desenvolvimento de um programa de computador passa por três fases principais (PRESSMAN, 1987):

- **Especificação Funcional:** nesta fase são descritas todas as funções que o programa deve atender.

- **Codificação:** baseado na especificação funcional, define-se a estrutura de dados e implementa-se os algoritmos necessários codificados em alguma linguagem de programação.

- **Testes:** verifica-se o atendimento da especificação funcional.

Na elaboração do programa, utilizou-se um microcomputador padrão IBM-PC, sistema operacional DOS e o sistema de desenvolvimento Turbo-Pascal versão 5.5 (SCHILDT, 1989).

### 2.2 Especificação Funcional

Nesta etapa de desenvolvimento do programa deve-se listar e descrever todas as funções a serem executadas.

O programa destina-se ao projeto do forjado e cálculo da máxima força de forjamento para o processo de forjamento em matriz fechada com canal de rebarba; para isso o programa deve executar as seguintes funções:



- Ler a forma geométrica da peça.
- Ler os parâmetros de processo.
- Calcular a forma geométrica do forjado.
- Calcular dados de processamento.
- Apresentar a forma geométrica do forjado.
- Apresentar os dados de processamento calculados.

Estas funções definem os dados de entrada que são: geometria da peça, parâmetros do processo e propriedades da matéria-prima; e os dados de saída: geometria do forjado e dados de processamento calculados.

Em decorrência destas funções, lista-se ainda as relacionadas ao o modo de operação do programa, isto é:

- Editar graficamente de modo interativo a geometria da peça;
- Importar a geometria da peça de outros programas;
- Armazenar em disco os dados de entrada e saída;
- Editar interativamente durante a leitura os dados de processo;
- Apresentar graficamente o forjado;
- Exportar a geometria do forjado para outros programas.

### **2.3 Codificação**

Nesta etapa, a especificação funcional é transformada numa sequência de instruções que compõem o programa de computador. Isto é feito através da definição da estrutura de dados e de algoritmos que são codificados de acordo com a linguagem de programação adotada.

### 2.3.1 Estrutura de Dados

A estrutura de dados é o modelo empregado internamente para representar as informações tratadas pelo programa. Através de uma análise baseada no método normalmente utilizado para projetar o forjado e calcular a máxima força de forjamento sem auxílio do computador chega-se ao seguinte conjunto de informações:

- Geometria da peça;
- Geometria do forjado;
- Dados do processo;
- Dados de processamento calculados;
- Propriedades do material;
- Regras de projeto de forjados.

Para representar a geometria da peça e a do forjado, optou-se pela decomposição em várias seções com aproximação do contorno por uma série de segmentos de retas unidos por segmentos de arco nas junções. Esta representação da geometria pode ser obtida pela utilização de um registro com os seguintes campos:

- Número de pontos da seção.
- Vetor com as coordenadas cartesianas dos pontos que definem o contorno da seção.
- Vetor com o valor dos raios de concordância.
- Posição da linha de rebarba, dada por sua ordenada.
- Posição da linha de simetria da seção dada por sua abscissa.

A implementação na linguagem Pascal desta estrutura de dados é a seguinte:

```
VetCor=array[1..NMaxPontos] of real;  
VetIdent=array[1..NMaxPontos] of char;  
  
TipoGeomForj = record  
    np:integer;  
    vx:VetCor;  
    vy:VetCor;  
    xs:real;  
    yr:real;  
    vr:VetCor;  
    vi:VetIdent;  
end;
```

A estrutura adotada para os dados de processo foi escolhida em função dos dados necessários ao cálculo da máxima força de forjamento. Esta estrutura é composta por dois registros, um para os dados do processo que são fornecidos e outro para os dados de processamento calculados. O registro dos dados de processo que são fornecidos ao programa é composto pelos seguintes campos:

- Temperatura da matriz.
- Temperatura da matéria- prima.
- Tipo do equipamento.
- Parâmetro 1 do equipamento.(vide Tabela 2.1)
- Parâmetro 2 do equipamento.(vide Tabela 2.1)
- Altura inicial da matéria-prima.
- Altura na etapa anterior de conformação na região da cavidade.
- Altura na etapa anterior de conformação na região da rebarba.
- Fator de atrito.
- Nome do arquivo que contém as propriedades do material.

em linguagem Pascal:

```
TipoDadosEntr = record
    TempMatriz : real;
    TempMatPrima : real;
    TipoEquip : char;
    par1 : real;
    par2 : real;
    HInicMatPrima : real;
    HEtapaAntCav : real;
    HEtapaAntReb : real;
    FatorAtrito : real;
    NomeArqMat : string;
end;
```

Tabela 2.1 - Parâmetros associados ao tipo de equipamento

Tipo do Equipamento	Parâmetro 1	Parâmetro 2
Prensa Excêntrica	velocidade angular [rpm]	curso de deslocamento da matriz [mm]
Martelo de Queda Livre	massa [Kg]	altura de queda [m]
Prensa Hidráulica	velocidade [mm/s]	não utilizado

O registro dos dados de processamento calculados é composto pelos seguintes campos:

- Temperatura média do forjado no final do processo de forjamento.
- Massa do forjado.
- Largura do canal de rebarba.
- Espessura do canal de rebarba.
- Fator de complexidade da seção.
- Tempo de contato.
- Velocidade média de deformação na cavidade.
- Velocidade média de deformação na rebarba.
- Taxa de deformação na cavidade.
- Taxa de deformação na rebarba.
- Deformação na cavidade.
- Deformação na rebarba.
- Tensão na entrada da cavidade.
- Tensão de escoamento na cavidade.
- Tensão de escoamento na rebarba.
- Força na cavidade.
- Força na rebarba.
- Máxima força de forjamento na seção.

em linguagem Pascal:

```
TipoDadosCalc = record
    TempMedia : real;
    Massa : real;
    w : real;
    t : real;
    FatorCompl : real;
    TempoContato : real;
    VelMediaCav : real;
    VelMediaReb : real;
    TaxaDefCav : real;
    TaxaDefReb : real;
    SyCav : real;
    SyReb : real;
    SyEA : real;
    Fc : real;
    Fr : real;
    Ft : real;
    DefCav:real;
    DefReb:real;
end;
```

As propriedades do material que são necessárias para o cálculo da máxima força de forjamento são armazenadas em um registro com os seguintes campos:

- Coeficientes **K** e **n** da relação  $\sigma = K \epsilon^n$  (vide anexo 2, item 2.2).
- Calor específico.
- Densidade.
- Temperatura de transição entre comportamento a frio e a quente.
- Tabela dos coeficientes **C** e **m** da relação  $\bar{\sigma} = C \cdot \dot{\epsilon}^m$  em função da temperatura e deformação (vide anexo 2, item 2.2).

em linguagem Pascal:

```
VetTabCm=array[1..NMaxLinColTabCm] of real;
MatTabCm=array[1..NMaxLinColTabCm,1..NMaxLinColTabCm] of real;
TipoTabCm = record
    nl:integer;
    nc:integer;
    vtemp:VetTabCm;
    vdef :VetTabCm;
    mC : MatTabCm;
    mn : MatTabCm;
end;

TipoPropMat = record
    K : real;
    n : real;
    c : real;
    p : real;
    TempTran : real;
    TabCm : TipoTabCm;
end;
```

Para as regras utilizadas no projeto do forjado não foi definida nenhuma estrutura de dados já que as mesmas foram implementadas no próprio algoritmo.

### 2.3.2 Algoritmos

Os algoritmos representam a lógica utilizada para implementar uma determinada função num programa de computador.

No desenvolvimento do programa foram utilizados vários algoritmos. Na parte de projeto do forjado os algoritmos foram baseados em recomendações de projeto de forjados, conforme descrito no anexo 3 deste trabalho, e para o cálculo da máxima força de forjamento adotou-se o procedimento da referência (SUBRAMANIAN; ALTAN, 1980).e as expressões descritas no anexo 2. Outros algoritmos, utilizados para o controle do fluxo de processamento, edição gráfica e entrada interativa de dados foram desenvolvidos.

A seguir, os algoritmos utilizados no programa são apresentados na forma de fluxogramas.

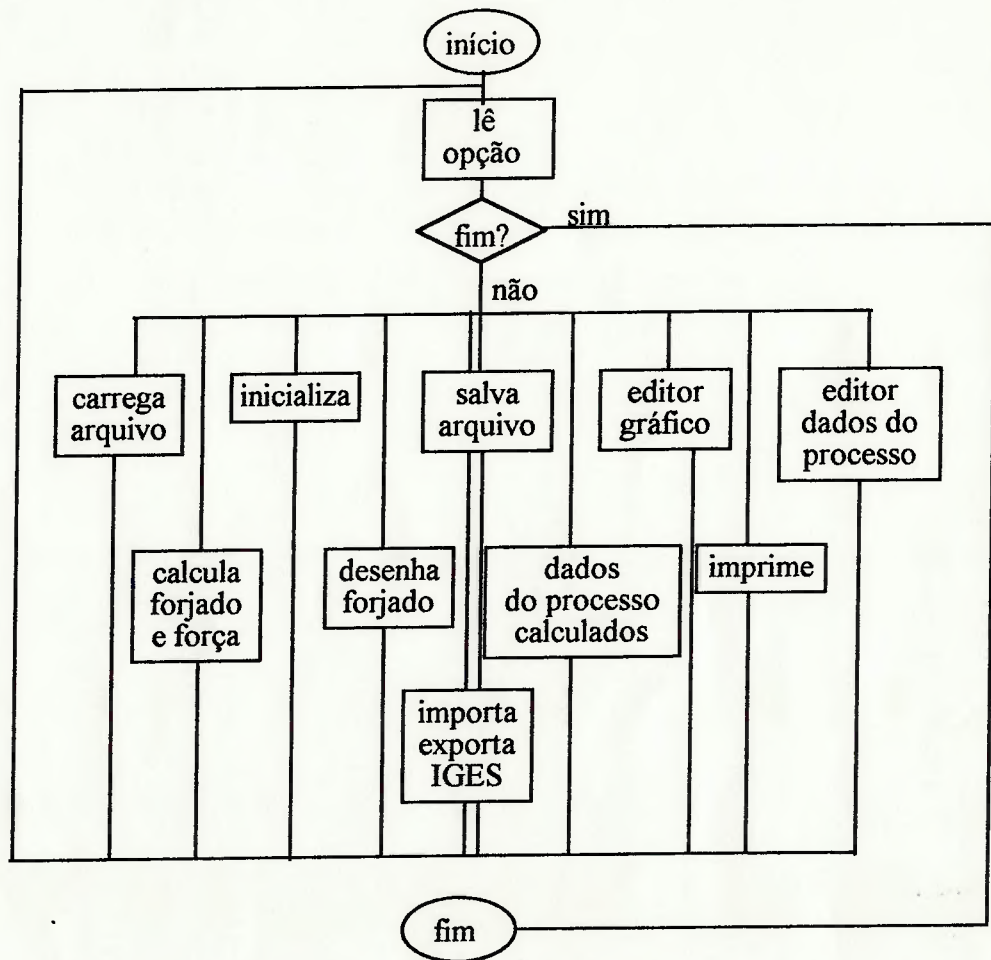


Figura 2.1 - Fluxograma do programa principal.

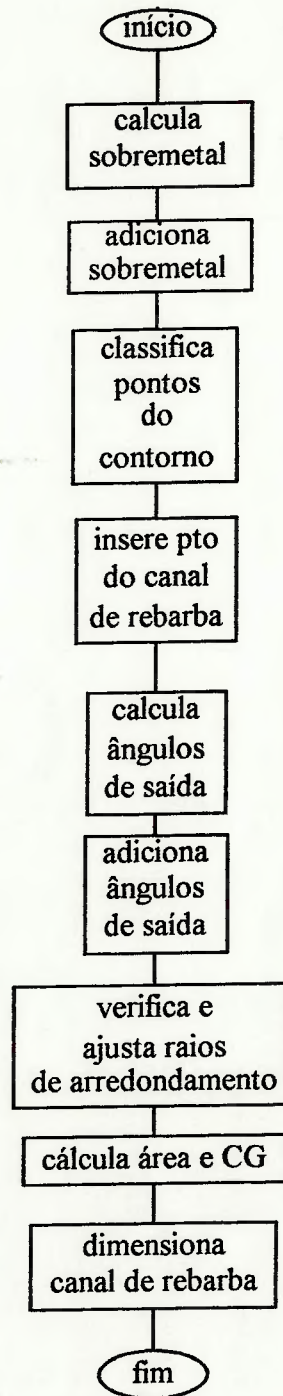


Figura 2.2 - Fluxograma do procedimento de projeto do forjado.



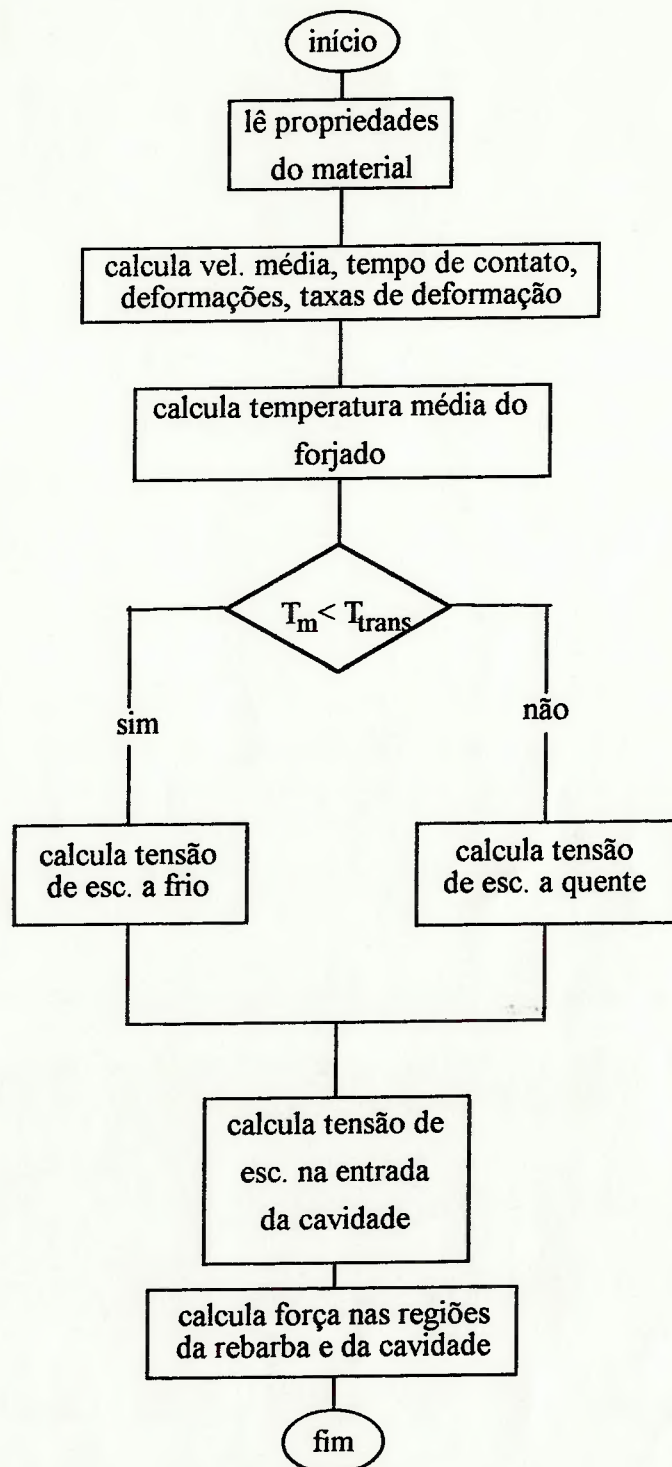


Figura 2.3 - Fluxograma do procedimento de cálculo da máxima força de forjamento.

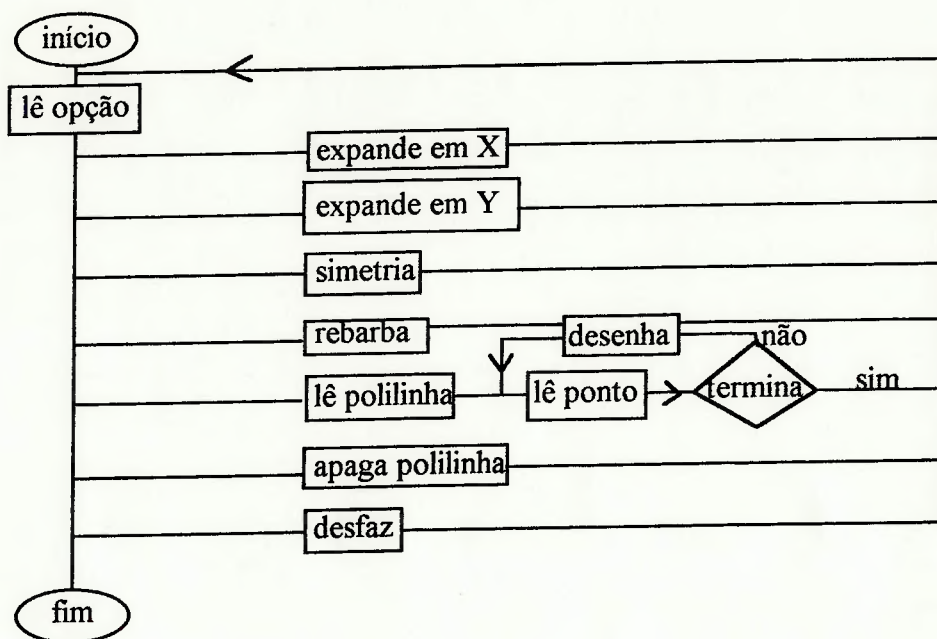


Figura 2.4 - Fluxograma do procedimento de edição gráfica.

O programa foi implementado de maneira modular, conforme apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Módulos do Programa.

Conteúdo do módulo	Nome do arquivo
Rotinas para entrada de dados interativa	UnEditor.pas
Definição da estrutura de dados	UnDefTyp.pas
Rotinas gráficas	UnGraf.pas
Rotinas para gerenciamento do sistema de arquivos	UnDados.pas
Rotinas para cálculo da máxima força de forjamento	UnCalc.pas
Rotinas para projeto do forjado	UnCalc.pas
Rotinas para importação e exportação no padrão IGES	UnIGES.pas
Programa principal	ForjAxis.pas

Note-se que nesta fase do desenvolvimento do programa o módulo que contém o programa principal foi batizado com o nome de forjaxis, doravante o programa será referenciado como FORJAXIS.

## **2.4 Teste dos Módulos do Programa**

Terminada a fase de codificação, o programa é compilado e executado, neste ponto pode-se introduzir dados e obter os resultados. O método de teste utilizado para verificar o programa foi do tipo "caixa preta". Neste teste é fornecido ao programa um conjunto de dados de resposta conhecida e a verificação consiste em comparar o resultado produzido pelo programa com a resposta previamente elaborada.

Na escolha dos dados deve-se tentar cobrir o maior número de alternativas, se possível esgotar todas as possíveis combinações dos dados de entrada.

O teste do tipo "caixa preta" é mais adequado quando aplicado a partes do programa, garantido o funcionamento das partes, é mais fácil testar o conjunto.

O programa foi testado ainda na fase de codificação, pela aplicação do teste "caixa preta" nos módulos, terminada a codificação, o programa como um todo foi testado pelo mesmo método.

## **2.5 Apresentação do Programa**

O programa de computador obtido gera automaticamente a geometria do forjado dada a correspondente geometria da peça e fornece o valor da máxima força de forjamento em função dos parâmetros do processo.

A interface do programa com o usuário é amigável, o fluxo de processamento é dirigido através de menus e sub-menus, a entrada de dados alfanuméricos é facilitada por

um editor de campos e a entrada e saída de dados geométricos pode ser feita através de um editor gráfico interativo.

O código executável do programa encontra-se num único arquivo denominado forjaxis.exe e para executá-lo digita-se na linha de comando do DOS o nome do programa e pressiona-se a tecla Enter, assim que o programa é carregado o usuário será indagado pelo menu principal de opções do programa, mostrado na Figura 2.5.

F O R J A X I S - MENU PRINCIPAL	
ARQUIVO : SEMNOME	
1 - Carrega Arquivo do Disco	9 - Imprime Resultados
2 - Novo Arquivo	10- Importa IGES
3 - Salva Arquivo	11- Exporta IGES
4 - Edita Geometria	12- Fin
5 - Edita Dados De Calculo	
6 - Calculo	
7 - Acessa Resultados Analiticos	
8 - Acessa Resultados Geometricos	

Mensagem : Digite sua opcao : \_

Figura 2.5 - Tela do menu principal.

### 2.5.1 Editor Gráfico

O editor gráfico possui recursos que permitem ao usuário incluir, modificar e visualizar interativamente as informações gráficas tratadas pelo programa, o desenho da peça e o desenho do forjado, respectivamente dado de entrada e dado de saída.

As ações do editor gráfico são controladas através de um menu com as seguintes opções:

- **Faixa x de exibição:** ajusta a escala horizontal de exibição, funcionando como zoom.
- **Faixa y de exibição:** análogo ao anterior, mas atua na vertical.
- **Posição da linha de simetria:** solicita o valor da abscissa da linha de simetria.
- **Posição da linha de rebarba:** solicita o valor da ordenada da linha de rebarba.
- **Polilinha:** inicia uma rotina onde são solicitadas as coordenadas e os raios de arredondamento dos pontos que definem o contorno da seção da peça. As coordenadas podem ser fornecidas em valores absolutos ou relativos ao ponto anterior, no caso de valores relativos podem ser em coordenadas retangulares ou cilíndricas.
- **Apaga:** é utilizado para apagar todas as definições de pontos.
- **Desfaz:** permite cancelar as últimas ações.
- **Fim:** termina a execução do editor gráfico e retorna para o menu principal salvando o desenho executado.

Uma amostra do editor gráfico é apresentada na Figura 2.6.

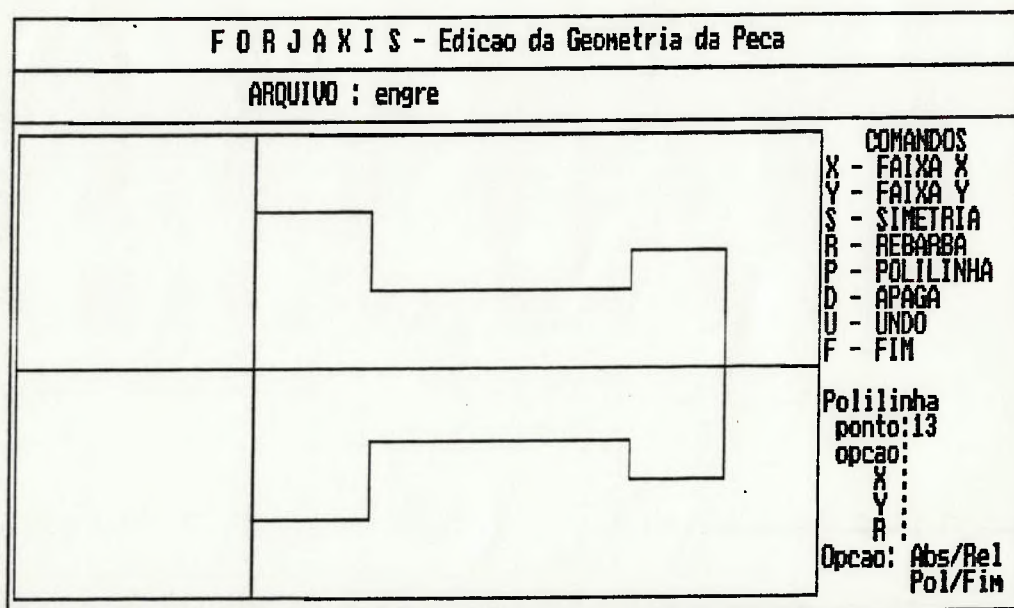


Figura 2.6 - Tela do editor gráfico

### 2.5.2 Editor de Dados

O editor de dados alfanumérico facilita o trabalho de introdução e correção dos valores digitados pelo usuário, é possível ir de um campo para outro em qualquer direção pressionando-se as teclas <TAB> e <Shift+TAB>, a edição termina quando no último campo é pressionada a tecla <ENTER>. Na Figura 2.7 apresenta-se a tela de edição de dados utilizada na leitura dos parâmetros do processo.

F O R J A X I S - Edita Dados de Calculo			
ARQUIVO : engre			
Temperatura da Matriz	(°C):	-	300.00
Temperatura da Materia-Prima	(°C):	-	1100.00
Altura Inicial da Materia-Prima	(mm):		60.00
Altura na Etapa Anterior da Cavidade	(mm):		60.00
Altura na Etapa Anterior do Canal de Rebarba	(mm):		60.00
Tipo de Equipamento(E-excentr.;M-martelo;H-hidraul.;P-parafuso): M			
Parametro 1	(rot (rpm) ; massa(Kg); Vel(mm/s) ;		1000.00
" 2	(curso(mm) ; altura(m) ; - ;		2.50
Nome do Arquivo de Dados do Material : AISI1016.mat			
Fator de Atrito m : 0.50			

Figura 2.7 - Tela do Editor de Campos

### 2.5.3 Pré e Pós Processador IGES

O pré e pós processador IGES permite ao programa trocar dados geométricos com outros programas através de arquivos formatados no padrão IGES. Este recurso possibilita entre outras coisas a leitura de desenhos produzidos em programas gráficos, o envio de dados geométricos para programas de análise de tensões, e também para

programas que geram instruções para máquinas operatrizes comandadas por computador.

Tanto na importação quanto na exportação o usuário é indagado por um nome de arquivo, este nome deve ser fornecido inclusive com extensão, pode-se incluir o caminho de busca do arquivo.

Os dados utilizados pelo programa podem ser armazenados e recuperados pelo módulo de gerenciamento de arquivos, cabe ao usuário associar um nome aos dados para identificá-los, o programa verifica a existência do arquivo alertando o usuário no caso de leitura e pedindo confirmação para sobrescrever no caso de gravação.

#### **2.5.4 Projeto do Forjado**

As transformações que convertem o desenho da peça em desenho do forjado são executadas pelo módulo de geração do forjado. Este módulo tem como dados de entrada a geometria da peça e as recomendações de projeto, e como dado de saída a geometria do forjado. Durante o processamento deste módulo são executadas sequencialmente as seguintes rotinas: cálculo e ajuste do sobremetal necessário; classificação dos vértices em vértices de canto ou de filete; inclusão da linha de rebarba; ajuste dos ângulos de saída; verificação e ajuste dos raios de arredondamento de canto e dimensionamento do canal de rebarba. Este módulo conjuntamente com o pré e pós processador IGES podem funcionar como uma rotina externa de normalização de forjados para aplicativos gráficos de uso geral. O usuário pode utilizar o programa gráfico de sua preferência na modelagem geométrica da peça, exportar o desenho da peça e importar o desenho do forjado que pode ser utilizado por exemplo na obtenção do desenho da matriz. Na Figura 2.8 apresenta-se o resultado de uma análise feita pelo módulo de geração do forjado.

### 2.5.5 Cálculo da Máxima Força de Forjamento

A força máxima de forjamento é calculada pelo módulo força máxima, este módulo tem como dados de entrada a geometria do forjado, os dados de processo e as propriedades do metal, e como saída o valor da força máxima e dados de processamento. Na Figura 2.9 apresenta-se o resultado de um processamento feito pelo módulo força máxima.

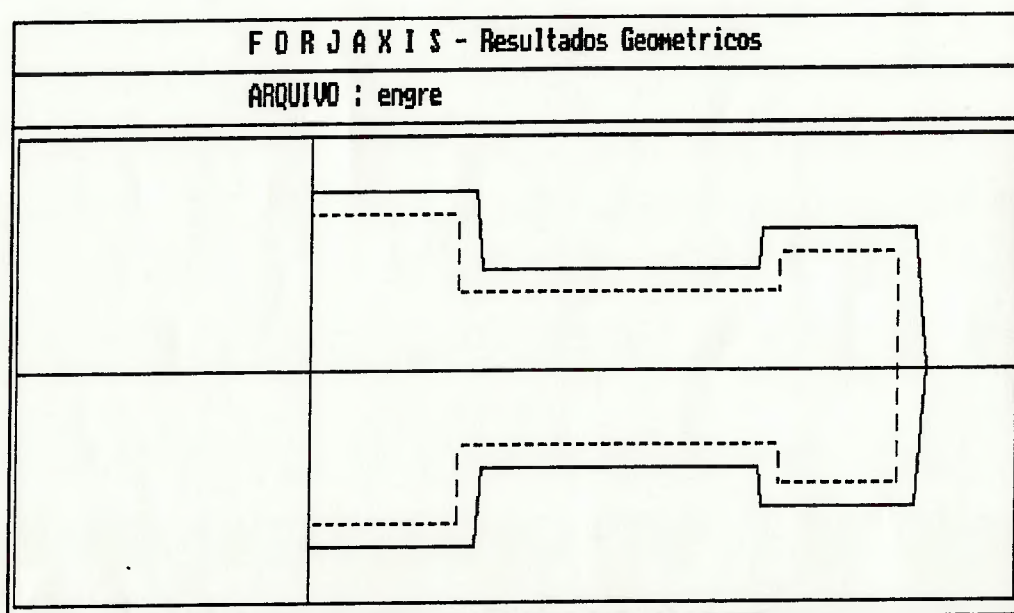


Figura 2.8 - Tela de resultado do processamento gráfico.



FORJAXIS - Resultados do Calculo	
ARQUIVO : engre	
Temperatura Media (°C) :	1100.00
Tempo de Contato ( s) :	0.01
Massa do Forjado (Kg) :	8.493
Canal de Rebarba w (mm) :	12.89
t (mm) :	3.91
Fator de Complexidade Z :	1.40
Vel. Media Cavidade(mm/s) :	3535.53
" Rebarba (mm/s) :	3535.53
Taxa Def. Cavidade (1/s) :	75.375
" Rebarba (1/s) :	110.649
Deformacao Cavidade :	0.574
" Rebarba :	2.732
Sy Cavidade (Kp/mm2) :	17.021
Sy Rebarba (Kp/mm2) :	17.911
Sy Entr. Cavidade(Kp/mm2) :	52.030
Forca Cavidade (Kp) :	2149662.49
Forca Rebarba (Kp) :	312278.56
Forca Total (Kp) :	2461941.06

Mensagem : Tecla Algo para Continuar

Figura 2.9 - Tela de resultados numéricos.

## 2.6 Aplicação do Programa

O programa foi utilizado em dois estudos de caso. O primeiro consiste em calcular o valor da máxima força de forjamento para a operação de forjamento apresentada por ALTAN; FIORENTINO (1971). O segundo na execução do projeto da matriz de forjamento a ser utilizada no ensaio de forjamento.

### Estudo de Caso 1 - Cálculo da máxima força de forjamento

Considerando-se a configuração do forjado apresentado no trabalho acima citado, reproduzida na Figura 2.10 , e as seguintes condições de processamento:

Material conformado: aço AISI 1043.

Equipamento de Conformação: prensa hidráulica.

Velocidade de Fechamento da Matriz: 0,026 m/s.

Temperatura de Trabalho: 1180° C.

Condição da interface: sem lubrificação.

Fator de Atrito: 0,4, estimado por ALTAN (1983).

Estes dados foram introduzidos no programa, os dados geométricos através do editor gráfico e os de processo no editor de campos. Executando-se a rotina de cálculo obteve-se os valores apresentados na Figura 2.11.

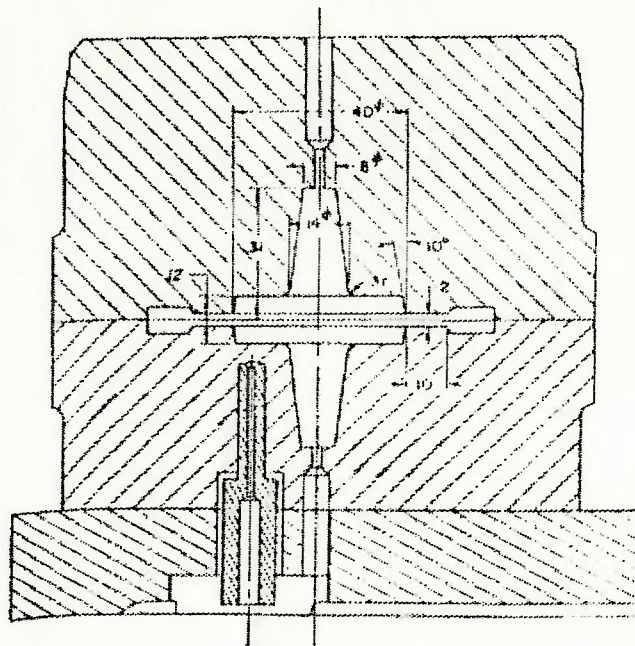


Figura 2.10 - Configuração do forjado utilizada no estudo de caso 1 - adaptada de ALTAN; FIORENTINO, 1971.

FORJAXIS - Resultados do Calculo	
ARQUIVO : compara	
Temperatura Media (°C) :	1180.00
Tempo de Contato ( s ) :	2.11
Massa do Forjado (Kg) :	0.149
Canal de Rebarba w (mm) :	10.00
t (mm) :	2.00
Fator de Complexidade Z :	1.25
Vel. Media Cavidade (mm/s) :	25.91
" Rebarba (mm/s) :	25.91
Taxa Def. Cavidade (1/s) :	1.019
" Rebarba (1/s) :	12.955
Deformacao Cavidade :	1.146
" Rebarba :	3.689
Sy Cavidade (Kp/mm <sup>2</sup> ) :	7.480
Sy Rebarba (Kp/mm <sup>2</sup> ) :	12.758
Sy Entr. Cavidade (Kp/mm <sup>2</sup> ) :	42.220
Forca Cavidade (Kp) :	54193.73
Forca Rebarba (Kp) :	41636.59
Forca Total (Kp) :	95830.32

Mensagem : Teclre Algo para Continuar

Figura 2.11 - Valores calculados pelo programa

## **Estudo de Caso 2 - Projeto da Matriz a ser Utilizada no Ensaio de Forjamento**

Neste estudo de caso procurou-se avaliar a utilidade do programa como ferramenta de auxílio na execução do projeto da matriz, como exemplo foi utilizada a matriz do ensaio de forjamento. Esta matriz pode produzir peças de formato cilíndrico de 8 mm de altura por 7,4 mm de diâmetro considerando-se um sobremetal de 1 mm , valor este adequado para peças desta dimensão.

O desenho de meia seção da peça foi feito no programa AutoCad versão 12, conforme mostrado na Figura 2.12



Figura 2.12 - Meia seção da peça analisada

No AutoCad os dados geométricos da peça foram gravados no formato IGES, através do pré-processador do Autocad. Este arquivo é do tipo texto e é apresentado a seguir:

```

IGES file generated from an AutoCAD drawing by the IGES          S0000001
translator from Autodesk, Inc., translator version IGESOUT-3.04. S0000002
,,17HC:\USERS\JOAO\CIL,21HC:\USERS\JOAO\CIL.IGS,10HAutoCAD-12,12HIGESOUTG0000001
-3.04,32,38,6,99,15,17HC:\USERS\JOAO\CIL,1.0,1,4HINCH,32767,3.2767D1, G0000002
13H941117.154822,1.575D-10,0.1575,11HURiah Steel,13H Cocomo Joe's,6,0; G0000003
  110      1      1      1      00000000D0000001
  110      1      1      1      D0000002
  110      2      1      1      00000000D0000003
  110      1      1      1      D0000004
  110      3      1      1      00000000D0000005
  110      1      1      1      D0000006
110,0.0,-0.1575,0.0,0.1453,-0.1575,0.0; 1P0000001
110,0.1453,-0.1575,0.0,0.1453,0.1575,0.0; 3P0000002
110,0.1453,0.1575,0.0,0.0,0.1575,0.0; 5P0000003
S0000002G0000003D0000006P0000003 T0000001

```

Este arquivo de descrição da peça (Figura 2.12) gerado pelo AutoCad, foi lido no programa forjaxis pelo pré-processador IGES; sendo então analisado e gravado no formato IGES através do pós-processador do forjaxis. Este arquivo é apresentado a seguir.

```

Arquivo IGES gerado forjaxis          S0000001
,,1Hx,1Hx,1Hx,1Hx,32,38,6,99,15,1Hx,1.0,2,2HMM,32767,3.2767D1, G0000001
13H941107.094928,3.1D-8,31.0,1Hx,1Hx,6,0; G0000002
  110      1      1      1      D      1
  110      1      1      1      D      2
  110      2      1      1      D      3
  110      1      1      1      D      4
  110      3      1      1      D      5
  110      1      1      1      D      6
  110      4      1      1      D      7
  110      1      1      1      D      8
110, 0.000, -5.001,0, 4.691, -5.001,0; P      1
110, 4.691, -5.001,0, 5.040, 0.000,0; P      2
110, 5.040, 0.000,0, 4.691, 5.001,0; P      3
110, 4.691, 5.001,0, 0.000, 5.001,0; P      4
S0000001G0000002D      BP      4 T0000001

```

O desenho do forjado calculado pelo programa gravado no formato IGES foi lido pelo Autocad e o desenho obtido é reproduzido na Figura 2.13.



Figura 2.13 - Meia seção do forjado calculado pelo forjaxis

A partir do desenho do forjado, utilizando o AutoCad obteve-se o desenho da matriz de forjamento utilizada no ensaio de forjamento, conforme mostrado na Figura 2.14.

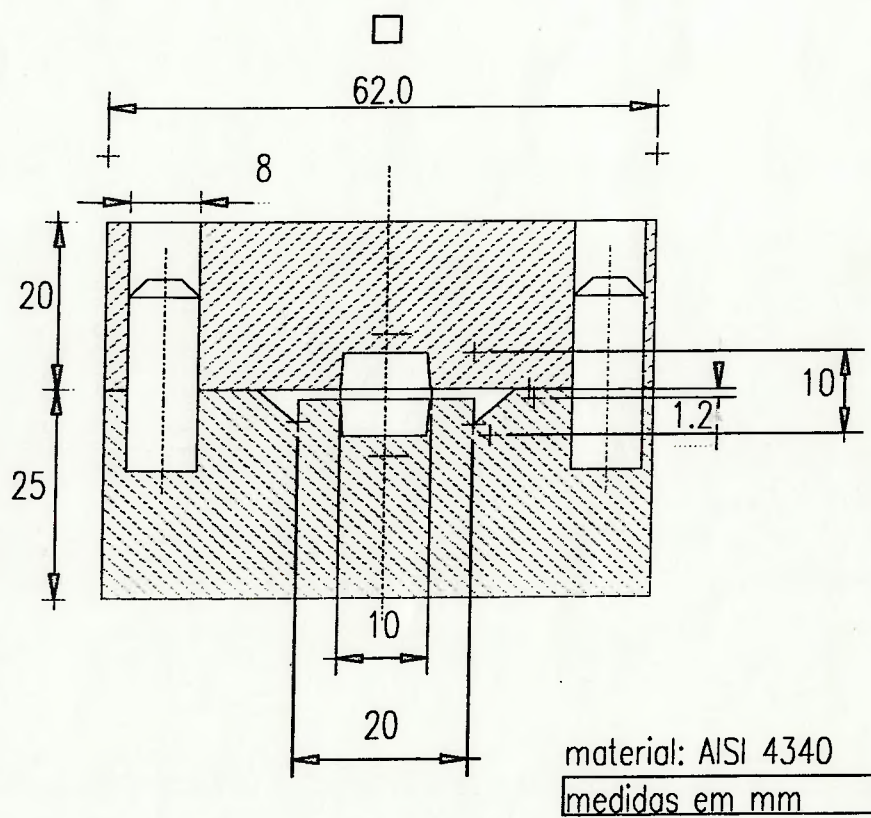


Figura 2.14 - Desenho da matriz a ser utilizada no ensaio de forjamento.

## Referências Bibliográficas

- [PRESSMAN, 1987]: PRESSMAN, R.S. **Software Engineering**. Singapore, McGraw-Hill, 1987.
- [SCHILDT, 1989]: SCHILDT, H. **Turbo Pascal Avançado**. New York, McGraw-Hill, 1989.
- [SUBRAMANIAN; ALTAN, 1980]: SUBRAMANIAN, T.L.; ALTAN, T. A Practical Method for Estimating Forging Loads with the use of a Programmable Calculator. **Journal Applied Metal Working**, v.1, n.2, p.60-68, 1980.
- [ALTAN, 1983]: ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H.L. **Metal Forming: Fundamentals and Applications**. USA, ASM, 1983. p. 168.
- [ALTAN; FIORENTINO, 1971]: ALTAN, T.; FIORENTINO, R.J. Prediction of Loads and Stresses in Closed-Die Forging. **Journal of Engineering for Industry**, p. 477-483, may/1971.

### **3. Desenvolvimento de Ensaios e Cálculo da Força de Forjamento**

#### **3.1 Introdução**

Com o intuito de comparar os valores de força de forjamento preditos pelo Método da Divisão em Elementos, implementado no programa de computador, foram realizados ensaios de forjamento para obtenção de valores experimentais de força para diferentes condições de processamento.

Na obtenção de valores de força através deste método analítico foi necessário determinar a curva de tensão de escoamento em função da deformação e os níveis de atrito. Na impossibilidade da obtenção dos valores destas variáveis na literatura, os mesmos foram obtidos experimentalmente, respectivamente através do "ensaio de compressão" e do "ensaio do anel".

Nos ensaios acima citados foi utilizado como matéria-prima o alumínio na condição AA 1050 O. Este material foi escolhido devido a sua baixa tensão de escoamento.

Os ensaios foram executados numa prensa hidráulica instrumentada com transdutores de posição e de pressão ligados a um osciloscópio digital interligado a um microcomputador.



## **3.2 Ensaaios**

### **3.2.1 Descrição dos Materiais e Equipamentos**

#### **Material Ensaiado**

Para a elaboração dos corpos de prova foi utilizado o alumínio com teor de pureza de 99,5%. Este material foi escolhido porque a sua tensão de escoamento é relativamente baixa e pode simular, quando deformado a temperatura ambiente, o comportamento de metais deformados a frio.

O material foi adquirido sob a forma de uma barra de seção circular com diâmetro de 31,75 mm na condição alumínio AA 1050F (como fabricado). A barra foi usinada dando origem aos três tipos de corpos de prova.

Após a usinagem, os corpos de prova foram tratados termicamente. O tratamento térmico utilizado foi o recozimento para alívio de tensões decorrentes dos processos de extrusão e de usinagem utilizados para conformar os corpos de prova. Os corpos de prova foram mantidos durante o período de uma hora a 400°C na presença do ar e o resfriamento foi feito no interior do forno após o desligamento do mesmo, em decorrência das paredes do forno serem de material refratário, conseguiu-se um resfriamento a taxa de 16°C/hora. Desta forma o material a ser ensaiado passou para a especificação AA 1050 O.

## Desengraxante

Na operação de limpeza dos corpos de prova foi utilizado o desengraxante industrial conhecido comercialmente como clorethene. Este produto é composto pelo tricloroetileno.

## Óleo lubrificante

Para simular uma das condições de lubrificação foi utilizado o óleo industrial Lubrax de especificação HR-48 EP.

## Trandutor de Posição

O transdutor de posição foi utilizado para medir a posição do cabeçote móvel da prensa, este transdutor é do tipo resistivo e suas especificações são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Especificações do Trandutor de Posição

Fabricante	Servus S.A.
Modelo	TPR-225
Curso útil	255 mm
Resistência	5 K $\Omega$ $\pm$ 20%
Resolução	0,01 mm
Linearidade	$\pm$ 0,07%
Corrente máxima	1 mA.

O transdutor empregado dispõe de três pontos de ligação que foram conectados de acordo com o esquema mostrado na Figura 3.1.

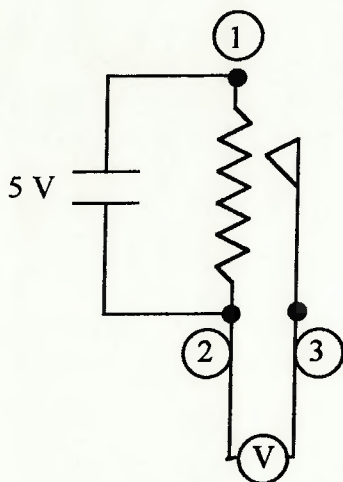


Figura 3.1 - Esquema de ligação do transdutor de posição

A relação entre o deslocamento aplicado e a variação de tensão observada foi obtida através da calibração do transdutor. A calibração foi feita pela medição da variação de tensão correspondente a um deslocamento conhecido. A tensão observada foi medida através de um multímetro digital enquanto que o deslocamento foi medido por um relógio comparador.

A Figura 3.2 mostra a curva de calibração do transdutor de posição, os valores medidos são representados pelos pontos quadrados enquanto que a curva interpolada é representada pela linha reta.

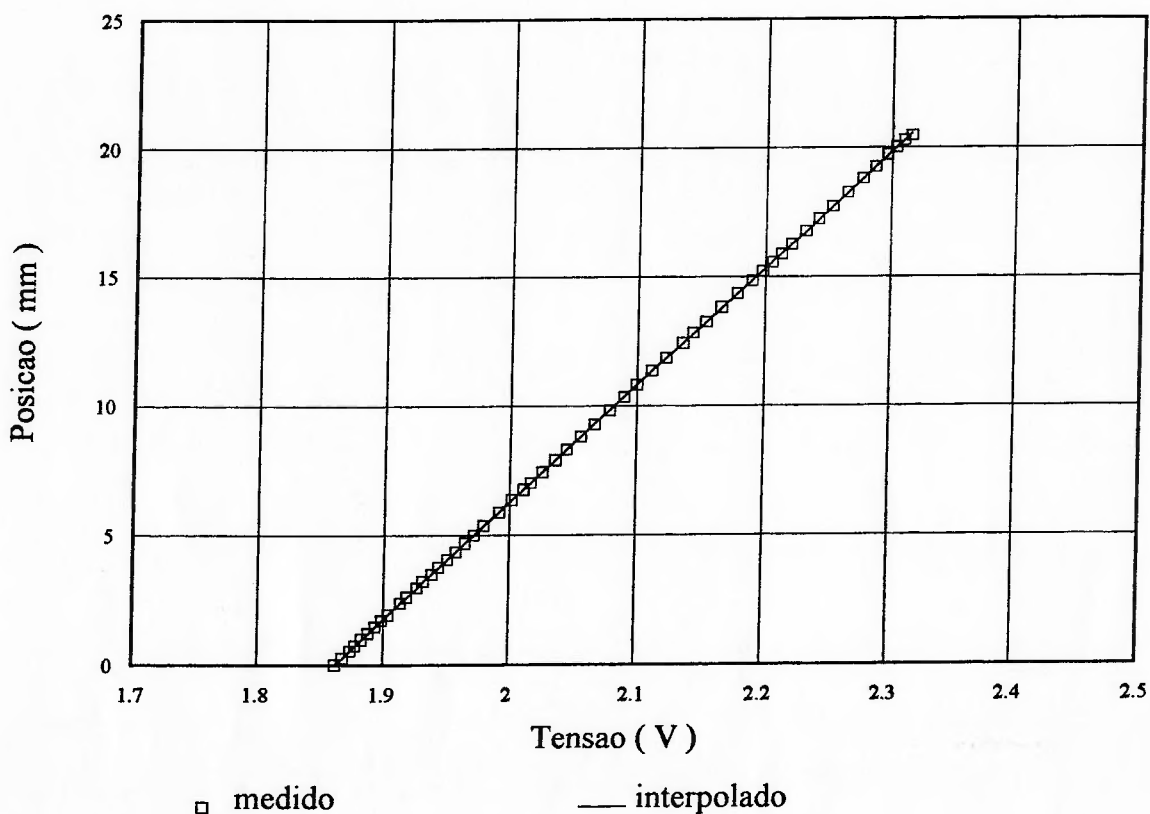


Figura 3.2 - Curva de calibração do transdutor de posição para uma tensão de alimentação de 5V.

A partir dos valores medidos, deslocamento e tensão, obteve-se o coeficiente que relaciona deslocamento e tensão através de uma análise de regressão linear. O coeficiente angular obtido na regressão linear fornece a relação entre a variação de posição em milímetros e a variação de tensão em volts. A análise de regressão foi feita pelas funções estatísticas disponíveis no Lotus 123 R 3. Os resultados da regressão são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Resultados da análise de regressão linear para a determinação do coeficiente de calibração do transdutor de posição

Coeficiente angular	45,22729 mm/V
Desvio padrão do coeficiente angular	0,020107 mm/V
Coeficiente linear	-84,2043 mm
Desvio padrão do coeficiente linear	0,020985 mm
Coeficiente de correlação $R^2$	0,99999
Intervalo de confiança do coeficiente angular para 95% de confiabilidade	45,227±0,005 mm/V

### Transdutor de Pressão

O transdutor de pressão utilizado é do tipo membrana. Suas especificações são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Especificações do transdutor de pressão

Fabricante	Sodmex
Pressão máxima	100 Bar
Sensibilidade	10 mV/V

Na instalação adotou-se o esquema de instalação apresentado na Figura 3.3.

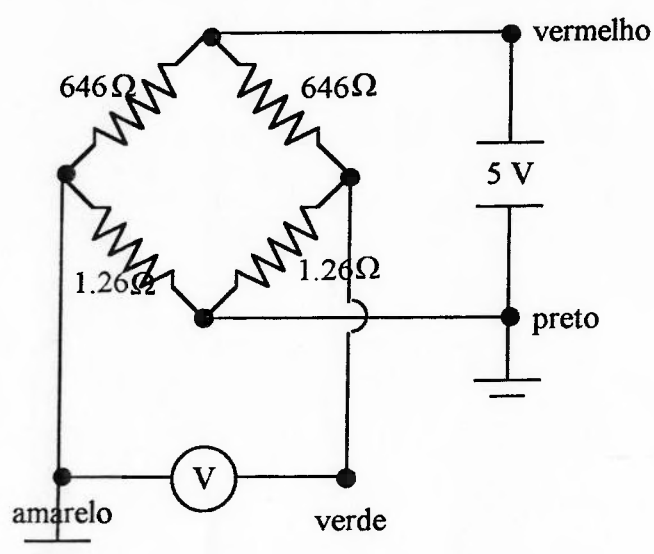


Figura 3.3 - Esquema de ligação do transdutor de pressão

A relação entre a variação de pressão e a variação de tensão medida foi obtida através da calibração do transdutor. Neste procedimento utilizou-se uma fonte de alimentação DC de 5V, um multímetro digital e um calibrador de manômetro. Para cada valor de pressão ajustado no calibrador de manômetro registrou-se a tensão correspondente, os pontos medidos são representados pelos quadrados e a linha reta representa a equação obtida através de uma análise de regressão linear na curva de calibração mostrada na Figura 3.4.

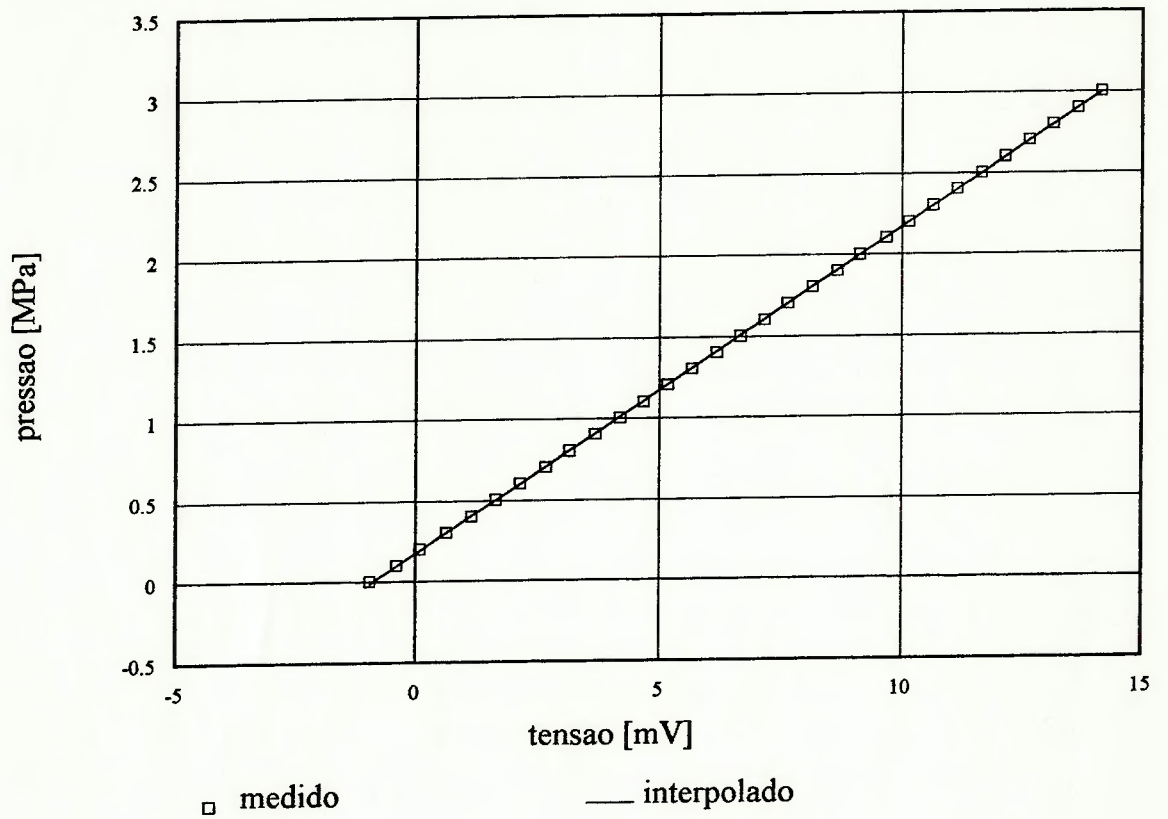


Figura 3.4 - Curva de calibração do transdutor de pressão para tensão de alimentação de 5 V.

A Tabela 3.4 mostra os valores obtidos na análise de regressão linear executada no programa Lotus 123R3.

Tabela 3.4 - Análise de regressão utilizada na determinação do coeficiente de calibração do transdutor de pressão

Coeficiente angular	0,1995051 MPa/mV
Desvio padrão do coeficiente angular	0,0001995 MPa/mV
Coeficiente linear	0,1712961 MPa
Desvio padrão do coeficiente linear	0,0049806 MPa
Coeficiente de correlação R2	0,99997
Intervalo de confiança do coeficiente angular para 95% de confiabilidade	0,19951±0,00007 MPa/mV

### Multímetro Digital

Para medir o valor da tensão durante a calibração dos transdutores e para aferir a tensão fornecida pela fonte de potência foi utilizado um multímetro digital da marca ECB modelo MDM 220.

### Fonte de Potência

Para alimentar os transdutores foi utilizada uma fonte de potência de corrente contínua da marca Hewlett-Packard modelo 6200B.

### Osciloscópio Digital

Um osciloscópio digital Gould série 400 foi utilizado para registrar os sinais enviados pelos transdutores durante a execução do ensaio. Este osciloscópio possui uma memória capaz de armazenar 501 valores para cada um dos canais. Os valores armazenados são discretizados em 240 níveis de tensão, variando de -120 a 120. Estes valores podem ser transferidos do osciloscópio para algum dispositivo através da



interface de comunicação, esta interface foi ligada a interface serial RS 232 do microcomputador descrito no item 3.2.3, possibilitando a transferência de dados do osciloscópio para o microcomputador. O osciloscópio foi configurado para transferir os dados no formato decimal e com velocidade de transmissão de 600 bauds. Os dados enviados pelo osciloscópio obedecem o seguinte formato:

$$STc = E, B, v_1, v_2, \dots, v_{501} \text{ CRLF}$$

onde:

c: canal de leitura, pode ser 1 ou 2;

E: escala vertical em unidade de tensão por divisão;

B: base de tempo em unidade de tempo por divisão;

$v_i$ : valor de tensão discretizado, varia de -120 a 120;

CRLF: retorno de carro e alimenta linha, utilizado para marcar o fim do conjunto de dados;

## **Microcomputador PC-XT**

Um microcomputador foi utilizado para o armazenamento dos dados lidos pelo osciloscópio durante a execução dos ensaios. Os dados eram transferidos do osciloscópio para o microcomputador quando a leitura da sequência de 501 pontos feita pelo osciloscópio era encerrada.

O processo de recepção e armazenado no computador foi controlado pelo programa XTalk que roda sob o sistema operacional DOS.

O microcomputador utilizado era do tipo IBM-PC, com processador 8088, disk-drive de 360 Kb, 640 Kb de memória RAM, interface serial e interface paralela.

## Microcomputador PC-AT 386

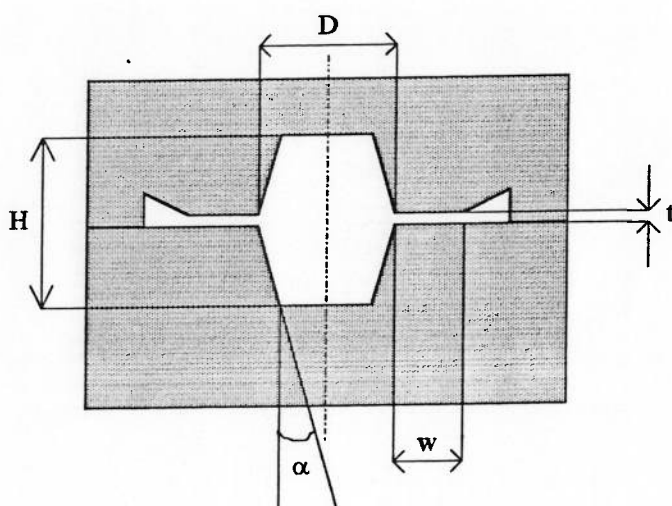
Para o desenvolvimento do programa de computador e para tratamento dos dados experimentais foi utilizado um microcomputador do tipo PC-AT 386SX 25 MHz de clock, com 4Mb de memória RAM, co-processador aritmético 387SX, unidades de disco flexível e rígido.

## Base articulada

Uma base articulada foi utilizada para garantir o paralelismo entre as faces das matrizes planas que foram utilizadas no ensaio do anel e no ensaio de compressão. A utilização deste dispositivo é recomendada pela norma ASTM E9-89a .

## Matriz de forjamento

Para conformar o corpo de prova no ensaio de forjamento foi fabricada uma matriz conforme representado na Figura 3.5.



onde:

D: diâmetro da cavidade = 10 mm;

H: altura da cavidade = 10 mm;

$\alpha$  : ângulo de saída = 4 °;

w: comprimento do canal de rebarba = 5 mm;

t : espessura do canal de rebarba = 1,2 mm.

Figura 3.5 - Representação esquemática da matriz de forjamento

A matriz foi fabricada em aço AISI 4043, por usinagem, conforme mostrado na Figura 2.14.

### **Prensa Hidráulica**

Para deformar os corpos de prova foi utilizada uma prensa hidráulica. As especificações deste equipamento são apresentadas na Tabela 3.5 e uma vista na Figura 3.6 .

Tabela 3.5 - Especificações da prensa hidráulica (NERY et alii, 1986)

Diâmetro interno do cilindro hidráulico	0,250 m
Área útil do cilindro hidráulico	0,0490 m <sup>2</sup>
Diâmetro da haste	0,095 m
Pressão máxima de trabalho do cilindro hidráulico	30,87 MPa
Curso total	0,20 m
Força máxima disponível	490 kN

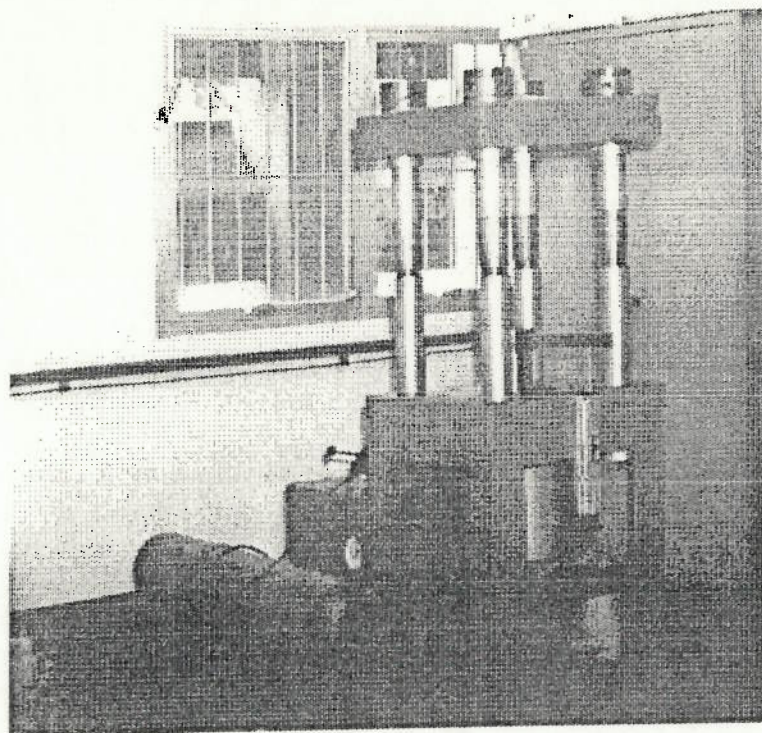


Figura 3.6 - Foto da prensa hidráulica utilizada nos ensaios.

### **Sistema de Aquisição de Dados**

A prensa, os transdutores, o osciloscópio e o microcomputador constituem um sistema para a obtenção da posição e da força aplicadas pela prensa em função do tempo.

Para a leitura da posição e da força durante a deformação de um corpo de prova adotou-se o seguinte procedimento:

a) Ajuste da escala de leitura do osciloscópio, em função da variação da grandeza a ser medida adotava-se a escala vertical para cada um dos canais, a base de tempo foi escolhida com base na velocidade de deslocamento da prensa e no curso necessário para deformar os corpos de prova, deste modo chegou-se aos valores apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Escalas de leitura ajustadas no osciloscópio para os ensaios de compressão e de forjamento

Ensaio	canal 1 (posição)	canal 2 (pressão)	tempo
compressão	0,1 V/divisão	0,5 V/divisão	5 s/divisão
forjamento	0,1 V/divisão	1 V/divisão	2 s/divisão

b) O corpo de prova era colocado na prensa e o cabeçote móvel posicionado próximo a ele.

c) O osciloscópio era colocado de prontidão a espera do sinal de "trigger".

d) O processo de leitura do osciloscópio era disparado através de uma descarga de capacitor na entrada de trigger externo e a prensa era posta em movimento.

e) O término do ensaio era determinado por inspeção visual, no caso do ensaio de compressão o deslocamento da prensa era acompanhado por um relógio comparador e no ensaio de forjamento quando ocorria o fechamento da matriz, neste instante o deslocamento da prensa era interrompido.

f) A transferência dos dados armazenados no osciloscópio para o microcomputador foi acionada no microcomputador através do envio da palavra ST1 para solicitar os dados lidos no canal 1 e ST2 para os dados do canal 2. No micro o programa XTalk controlou o processo de comunicação permitindo que os dados enviados pelo osciloscópio fossem armazenados em arquivo. Foi criado um arquivo para cada corpo de prova, a estes arquivos foi dada a extensão .dat. Os dados para cada um dos canais de leitura do osciloscópio tem o formato já descrito.

A partir dos dados dos arquivos .dat calculou-se a posição e a força através dos programas oscil.pas e curva.pas escritos em linguagem Pascal. O programa oscil.pas separa os valores entre vírgula colocando-os em linhas e o programa curva.pas calcula através das equações 3.1, 3.2 e 3.3 respectivamente a tensão lida, a posição e a força.

$$V = v_i * \frac{E}{30} \quad (3.1)$$

onde:

V: valor de tensão calculada;

$v_i$ : valor de tensão medida e discretizada;

E: escala de tensão utilizada na leitura (unidade de tensão/divisão)

$$X = V * K_r \quad (3.2)$$

$$F = \frac{1}{236,61} * K_p * A_c * V \quad (3.3)$$

onde:

X: posição da matriz ;

V: tensão calculada ;

$K_r$ : coeficiente de calibração do transdutor de posição;

F: força aplicada pela matriz ;

$K_p$ : coeficiente de calibração do transdutor de pressão;

$A_c$ : área do cilindro hidráulico;

1/236,61: constante utilizada em função do circuito amplificador de tensão.

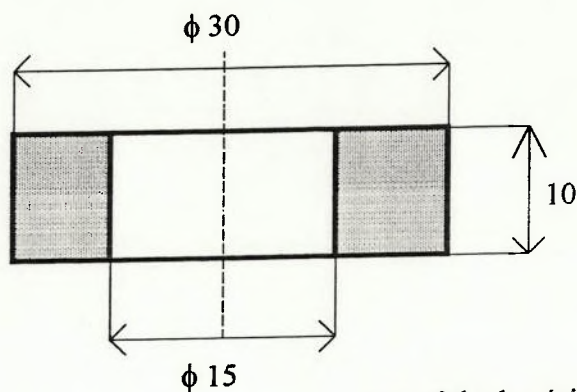
### 3.2.2 Ensaio para Quantificação do Atrito

O denominado "ensaio do anel" é o procedimento mais utilizado para determinar o nível de atrito no processo de forjamento (ALTAN, 1983a). Dependendo do modelo de atrito utilizado, o nível de atrito pode ser expresso pelo coeficiente de atrito " $\mu$ " (Modelo de Coulomb) ou pelo fator de atrito "m" (Modelo de Cisalhamento Constante), adotado neste trabalho - conforme considerações no Anexo 2.

Este ensaio consiste em comprimir entre matrizes planas, um corpo de prova de formato anelar, registrando a variação do diâmetro interno em função da redução da altura. A partir destes dados, o valor do fator de atrito pode ser obtido através de expressões analíticas (AVITZUR, 1968) ou por meio de gráficos de calibração (ALTAN, 1983b).

As curvas de calibração apresentadas por ALTAN (1983b) consideram o efeito do embarrilamento e por isso foram adotadas no presente trabalho. Estas curvas foram obtidas por simulação utilizando o Método dos Elementos Finitos e foram construídas para um conjunto de corpos de prova normalizados.

Os corpos de prova foram usinados de acordo com a relação diâmetro externo, diâmetro interno e altura, igual a 6:3:2; o que corresponde as dimensões: 30 mm de diâmetro externo, 15 mm de diâmetro interno e 10 mm de altura, conforme mostrado na Figura 3.7.



material: alumínio AA 1050 O  
tolerância: 0,1 mm

Figura 3.7 - Dimensões do corpo de prova (6:3:2) utilizado no ensaio do anel

Depois de usinados, os corpos de prova foram tratados termicamente, conforme descrito anteriormente; e após o tratamento térmico foram limpos com desengraxante.

Os ensaios foram executados para diferentes condições de interface peça-ferramenta, ou seja:

- Sem lubrificação ("a seco").
- Com lubrificação: óleo EP-48;  
PTFE.

No início do ensaio foi medido, com um paquímetro, a altura inicial e o diâmetro interno do corpo de prova em dois pontos. A cada incremento de deformação, o corpo de prova foi retirado da matriz e feitas as medidas no diâmetro interno e na altura em dois pontos defasados de 90°.

Neste ensaio foram medidas as seguintes grandezas:

- Alturas do corpo de prova medidas em dois pontos defasados de um ângulo de 90 graus, representadas por  $h_0$  e  $h_{90}$ .

- Diâmetros internos do corpo de prova, medidas em dois pontos defasados de um ângulo de 90 graus, representados por  $d_0$  e  $d_{90}$ .



Para a medição destas grandezas utilizou-se um paquímetro, sendo que o erro de leitura é da ordem de 0,025 mm, o que corresponde a metade da menor divisão da escala de leitura do paquímetro. (HOLMAN, 1989a)

Para calcular o valor médio e o intervalo de confiança do fator de atrito correspondente a cada condição de lubrificação, adotou-se o procedimento de cálculo descrito a seguir.

#### Procedimento para calcular o fator de atrito

1º) Calcula-se a altura e o diâmetro interno médios, para a condição inicial e para as etapas de deformação, pelas expressões:

$$\bar{h} = \frac{h_0 + h_{90}}{2} \quad (3.4)$$

$$\bar{d} = \frac{d_0 + d_{90}}{2} \quad (3.5)$$

e os respectivos desvios pelas expressões:

$$\delta\bar{h} = \frac{1}{2} \sqrt{\delta h_0^2 + \delta h_{90}^2} \quad (3.6)$$

$$\delta\bar{d} = \frac{1}{2} \sqrt{\delta d_0^2 + \delta d_{90}^2} \quad (3.7)$$

2º) Para cada etapa de deformação, calcula-se o decréscimo porcentual na altura e no diâmetro interno pelas expressões:

$$\Delta h_{\%} = \left( \frac{\bar{h}_i - \bar{h}}{\bar{h}_i} \right) * 100 \quad (3.8)$$

$$\Delta d_{\%} = \left( \frac{\bar{d}_i - \bar{d}}{\bar{d}_i} \right) * 100 \quad (3.9)$$

e seus respectivos desvios pelas expressões:

$$\delta \cdot \Delta h_{\%} = 100 \sqrt{\left(\frac{\delta \cdot \bar{h}}{\bar{h}_i}\right)^2 + \left(\frac{\bar{h}}{\bar{h}_i^2} \cdot \delta \cdot \bar{h}_i\right)^2} \quad (3.10)$$

$$\delta \cdot \Delta d_{\%} = 100 \sqrt{\left(\frac{\delta \cdot \bar{d}}{\bar{d}_i}\right)^2 + \left(\frac{\bar{d}}{\bar{d}_i^2} \cdot \delta \cdot \bar{d}_i\right)^2} \quad (3.11)$$

3º) A partir dos valores dos decréscimos percentuais da altura e diâmetro interno, interpola-se na curva de calibração da referência [ALTAN,1981b], obtendo-se deste modo, o valor do fator de atrito "m" para cada uma das etapas de conformação.

4º) Calcula-se as estimativas da média e do desvio padrão do fator de atrito para a amostra através das expressões:

$$\bar{x} = \frac{\sum m_i}{n} \quad (3.12)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (m_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.13)$$

5º) Determina-se o intervalo de confiança da média do fator de atrito para 95 % de confiabilidade através da expressão:

$$\bar{x} - t_p \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} < \bar{m} < \bar{x} + t_p \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.14)$$

A seguir, aplica-se o procedimento de cálculo para cada uma das condições de interface, assim sendo:

## Interface A Seco

Tabela 3-7: Valores de altura e diâmetro interno no ensaio do anel para condição a seco

$h_0$ [mm]	$h_{90}$ [mm]	$d_0$ [mm]	$d_{90}$ [mm]
10,15	10,15	15,00	15,00
8,95	8,75	14,25	13,90
7,00	7,00	12,75	12,70
6,40	6,55	12,30	12,20
6,00	6,10	11,80	11,40

Tabela 3-8: Valores geométricos e fator de atrito calculados no ensaio do anel para condição a seco

$h$ [mm]	$d$ [mm]	$\Delta h_{\%}$	$\delta \Delta h_{\%}$	$\Delta d_{\%}$	$\delta \Delta d_{\%}$	$m$
10,150	15,000					
8,850	14,080	12,81	0,24	6,13	0,16	1,00
7,000	12,730	31,03	0,22	15,13	0,16	0,78
6,480	12,250	36,16	0,21	18,33	0,15	0,70
6,050	11,600	40,39	0,21	22,67	0,15	0,70

Resultados:

$$\delta h = \delta d = 0,018 \text{ mm (incerteza)}$$

$$x = 0,80 \text{ (valor médio)}$$

$$s = 0,14 \text{ (desvio padrão)}$$

Intervalo de confiança para 95 % de confiabilidade:  $0,6 < m < 1$ , ou seja

$$m = 0,8 \pm 0,2$$

### Interface Lubrificada com tira de PTFE

Tabela 3-9: Valores de altura e diâmetro interno no ensaio do anel para condição lubrificada com PTFE

$h_0$ [mm]	$h_{90}$ [mm]	$d_0$ [mm]	$d_{90}$ [mm]
10,00	10,00	14,90	14,90
8,50	8,60	14,90	14,90
7,20	7,30	14,90	14,75
6,50	6,35	14,80	14,80
5,50	5,50	14,70	14,55

Tabela 3-10: Valores geométricos e fator de atrito calculados no ensaio do anel para condição lubrificada com PTFE.

$h$ [mm]	$d$ [mm]	$\Delta h_{\%}$	$\delta \Delta h_{\%}$	$\Delta d_{\%}$	$\delta \Delta d_{\%}$	$m$
10,000	14,900					
8,550	14,900	14,50	0,24	0,00	0,17	0,30
7,250	14,830	27,50	0,22	0,47	0,17	0,28
6,430	14,800	35,70	0,21	0,67	0,17	0,26
5,500	14,630	45,00	0,21	1,81	0,17	0,24

Resultados:

$$\delta h = \delta d = 0,018 \text{ mm (incerteza)}$$

$$x = 0,27 \text{ (valor médio)}$$

$$s = 0,03 \text{ (desvio padrão)}$$

Intervalo de confiança para 95 % de confiabilidade:  $0,22 < m < 0,32$ , ou seja

$$m = 0,27 \pm 0,05$$

### Interface Lubrificada com óleo EP-48

Tabela 3-11: valores de altura e diâmetro interno no ensaio do anel para condição lubrificada com óleo EP-48

$h_0$ [mm]	$h_{90}$ [mm]	$d_0$ [mm]	$d_{90}$ [mm]
10,20	10,15	14,80	14,90
8,80	8,75	14,45	14,60
7,60	7,50	14,30	14,35
7,30	7,35	14,20	14,10
5,90	5,95	13,00	13,12

Tabela 3-12: Valores geométricos e fator de atrito calculados no ensaio do anel para condição lubrificada com óleo EP-48.

$h$ [mm]	$d$ [mm]	$\Delta h_{\%}$	$\delta \Delta h_{\%}$	$\Delta d_{\%}$	$\delta \Delta d_{\%}$	$m$
10,175	14,850					
8,775	14,525	13,76	0,23	2,19	0,17	0,50
7,550	14,325	25,80	0,22	3,54	0,17	0,40
7,325	14,150	28,01	0,22	4,71	0,17	0,41
5,925	13,060	41,77	0,21	12,05	0,16	0,40

Resultados:

$\delta h = \delta d = 0,018$  mm (incerteza)

$x = 0,43$  (valor médio)

$s = 0,05$  (desvio padrão)

Intervalo de confiança para 95 % de confiabilidade:  $0,35 < m < 0,51$ , ou seja

**$m = 0,43 \pm 0,08$**

### Curva de Calibração

A Figura 3.8 mostra os pontos utilizados para a determinação do valor do fator de atrito por interpolação.

redução de diâmetro interno (%)

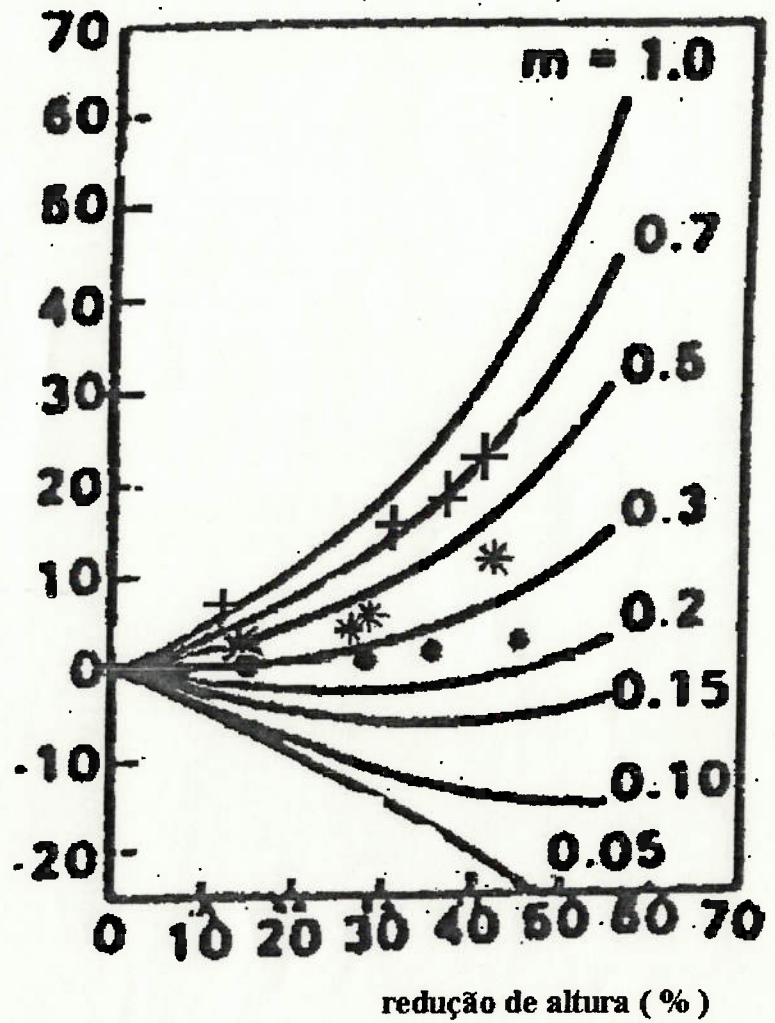


Figura 3.8 - Curva de calibração - adaptado de ALTAN (1983b).

A título de registro apresenta-se na Figura 3.9 a foto dos corpos de prova utilizados no ensaio do anel.

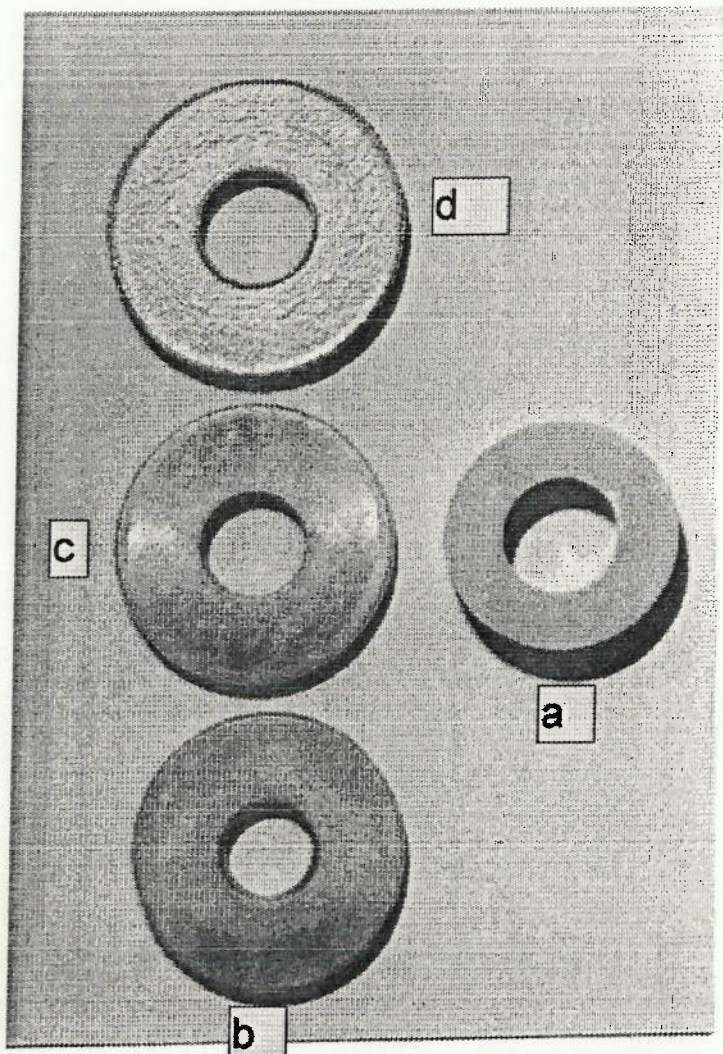


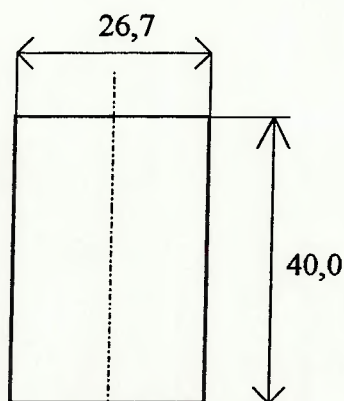
Figura 3.9 - Foto dos corpos de prova utilizados no ensaio do anel: forma inicial (a), formas finais para condição a seco (b), com óleo EP-48 (c), e com PTFE (d).

### 3.2.3 Ensaio para Determinação da Curva de Tensão de Escoamento

Para determinar a curva de tensão de escoamento em função da deformação, do alumínio AA 1050 O foi utilizado o ensaio denominado "Ensaio de Compressão". Este ensaio consiste em comprimir, entre matrizes planas, o corpo de prova e registrar a força de compressão em função do deslocamento da matriz. (DITER, 1984)

Na realização do ensaio foram seguidas as recomendações da norma ASTM E9-89a. Esta norma recomenda o uso de corpos de prova de formato cilíndrico, dando bastante liberdade de escolha das dimensões; entretanto a referência (DIETER, 1984) aconselha a utilização de corpos de prova com relação altura/diâmetro entre 1,5 e 2, o valor adotado foi de 1,5.

Os corpos de prova de formato cilíndrico foram usinados com as dimensões mostradas na Figura 3.10.



material: alumínio AA 1050 O  
tolerância: 0,1 mm

Figura 3.10 - Dimensões do corpo de prova utilizado no ensaio de compressão

Estes corpos de prova foram ensaiados para as seguintes condições de processamento: temperatura ambiente; e para condição de lubrificação com óleo EP 48.



Foram utilizadas três amostras, cujas dimensões iniciais são apresentadas na Tabela 3.13

Tabela 3.13 - Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de compressão

cdp	altura [mm]	diâmetro [mm]
1	40,00	26,65
2	40,00	26,75
3	40,05	26,80

Após a usinagem, as amostras foram tratadas termicamente, limpas com desengraxante, e então aplicado o lubrificante (óleo EP 48).

Durante o ensaio, as leituras de força de compressão, e de posição da matriz foram feitas pelo sistema de aquisição de dados.

A deformação e a tensão de escoamento efetivas para cada ponto medido foram calculadas pelas seguintes expressões:

$$\bar{\epsilon} = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \quad (3.15)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{\pi r^2 \left(1 + \frac{2mr}{3h\sqrt{3}}\right)} \quad (3.16)$$

onde:

h: altura instantânea do corpo de prova, dada por:

$$h = h_0 - X \quad (3.17)$$

onde X é o deslocamento da matriz;

$h_0$ : altura inicial do corpo de prova;

r: raio instantâneo do corpo de prova, dado por:

$$r = r_0 \sqrt{\frac{h_0}{h}} \quad (3.18)$$

onde  $r_0$  é o raio inicial do corpo de prova;

m: fator de atrito.

F : força de compressão medida

; estas expressões estão deduzidas no Anexo 2.

Como mencionado anteriormente, o ensaio foi conduzido a temperatura ambiente, portanto abaixo da temperatura de recristalização do alumínio; neste caso pode-se utilizar a correlação exponencial entre a deformação e a tensão de escoamento, na forma da equação:(ALTAN, 1983d)

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n \quad (3.19)$$

Para cada corpo de prova foi obtido um conjunto de dados; a partir dos quais os coeficientes "K" e "n" foram calculados por regressão logarítma.

Os registros de força e de deslocamento, em função do tempo; e as respectivas curvas interpoladas para os três corpos de prova, são apresentados nas Figuras 3.11 à 3.16.

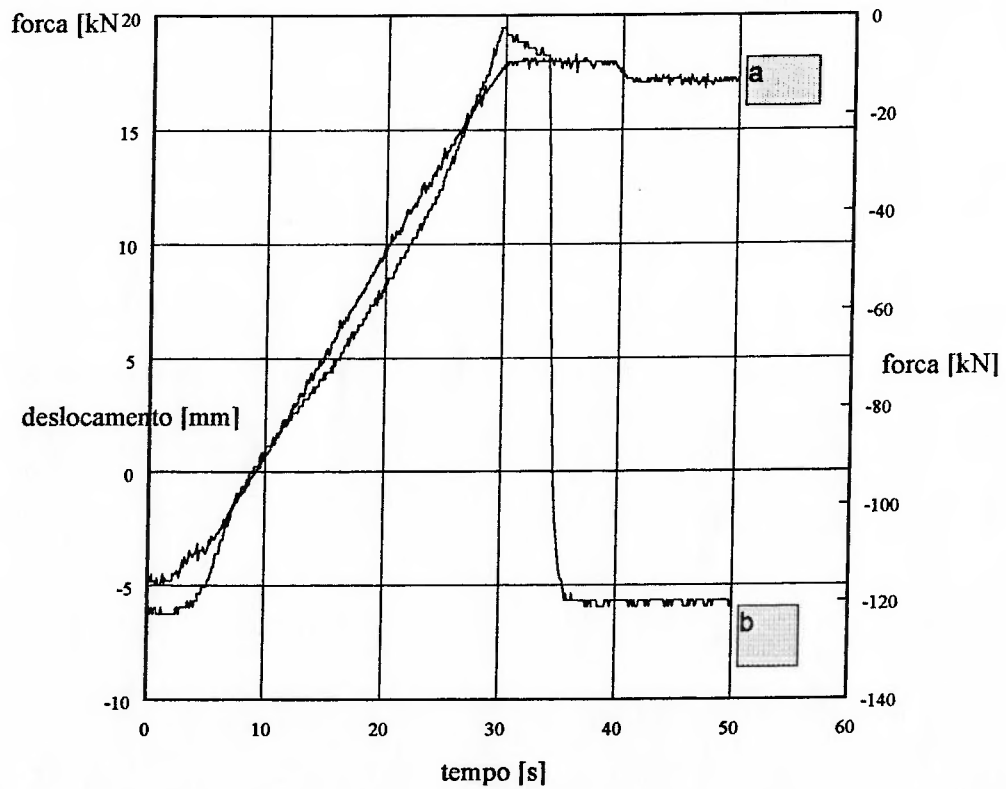


Figura 3.11 - Registros de deslocamento (a) e de força (b) no ensaio de compressão para o corpo de prova 1

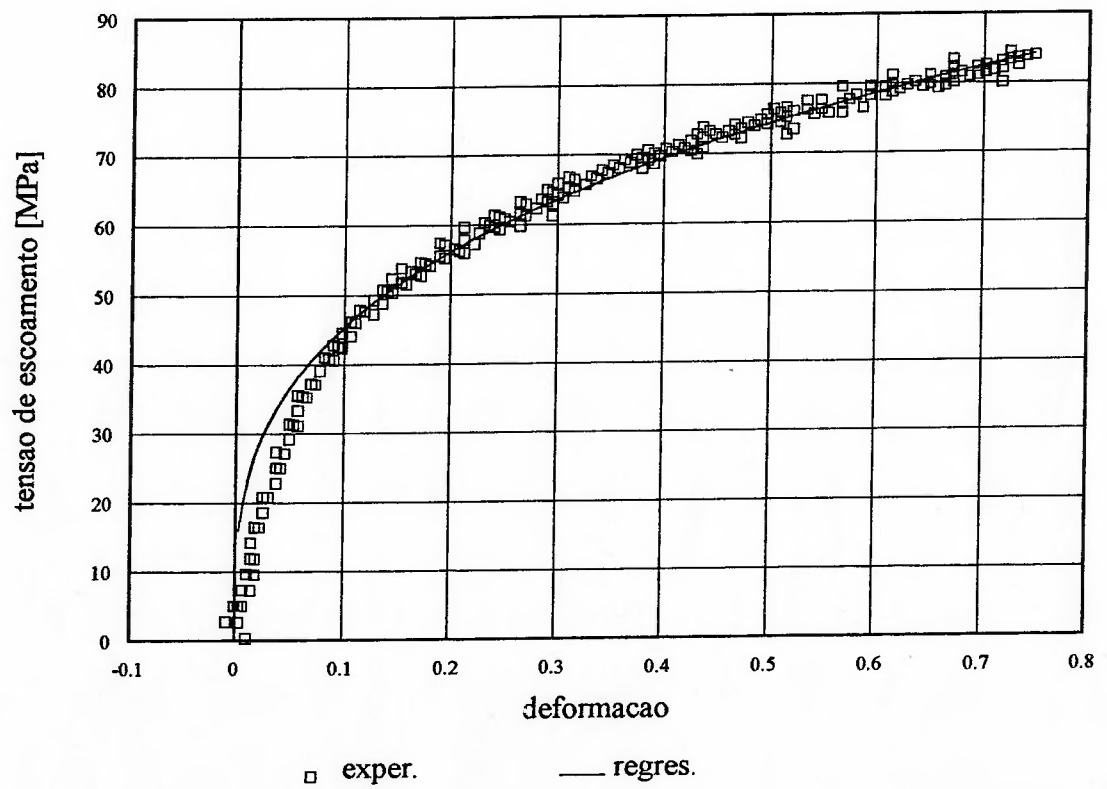


Figura 3.12 - Curva de tensão de escoamento em função da deformação para o corpo de prova 1.

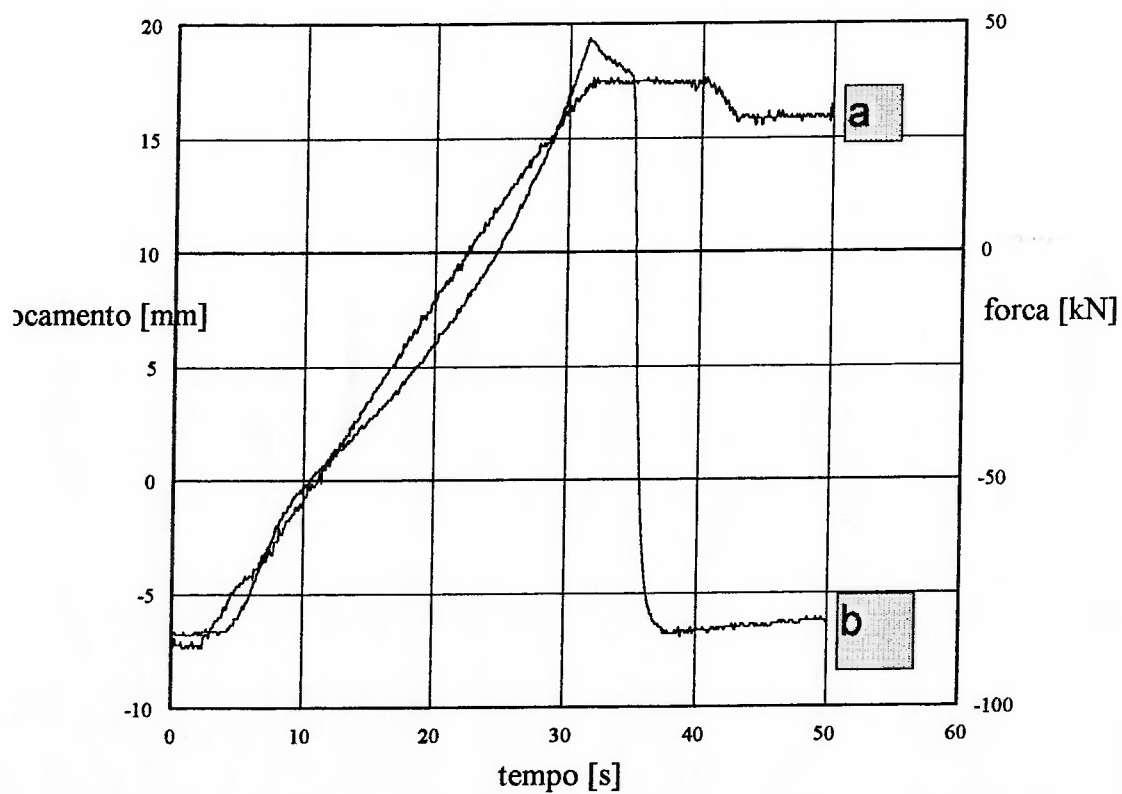


Figura 3.13 - Registros de deslocamento (a) e de força (b) no ensaio de compressão para o corpo de prova 2

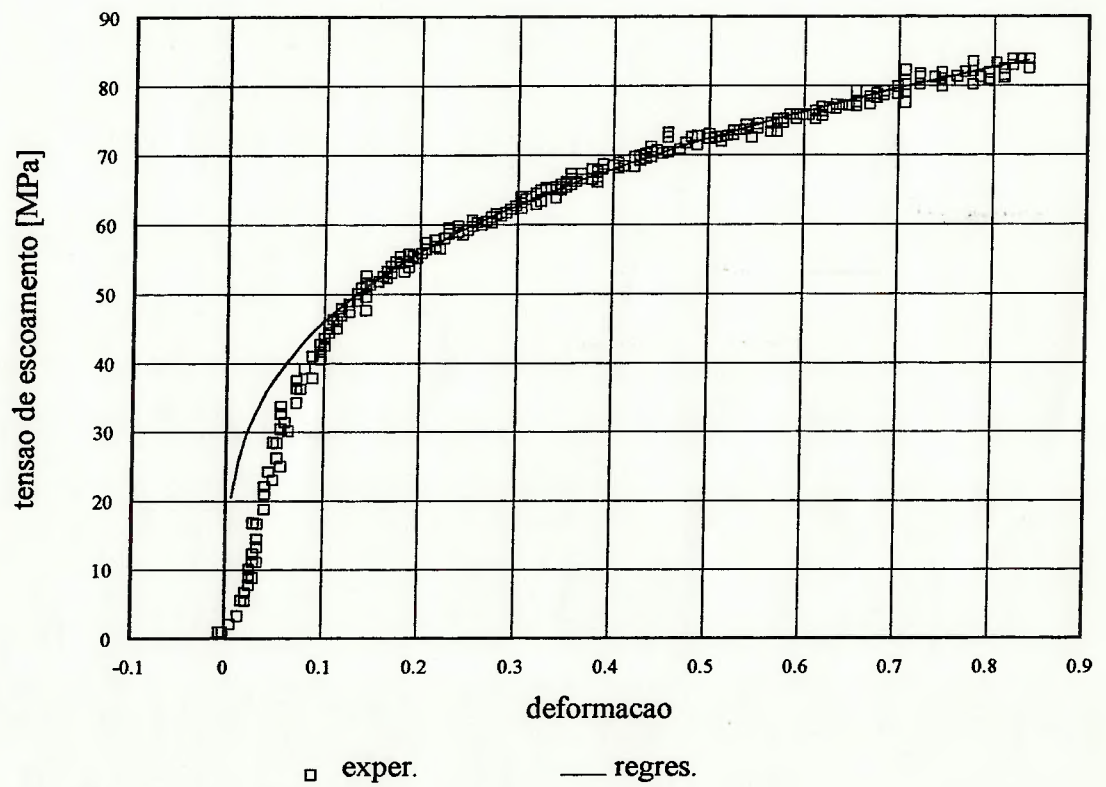


Figura 3.14 - Curva de tensão de escoamento em função da deformação para o corpo de prova 2.

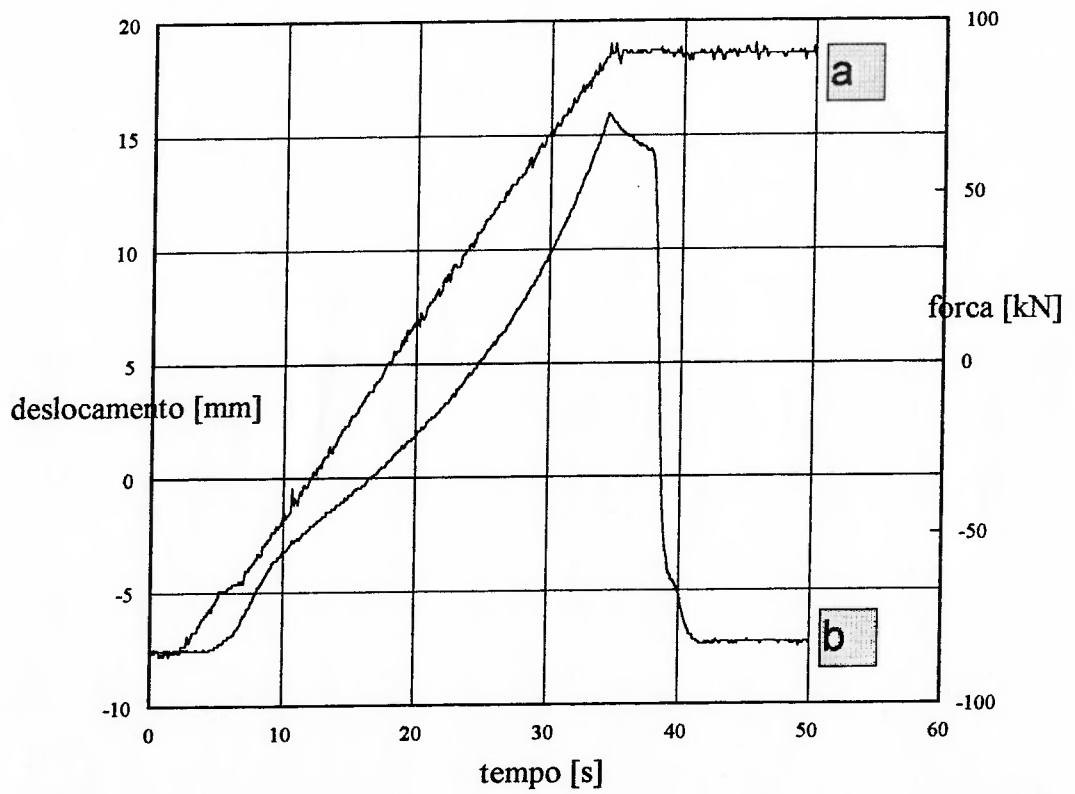


Figura 3.15 - Registros de deslocamento (a) e de força (b) no ensaio de compressão para o corpo de prova 3

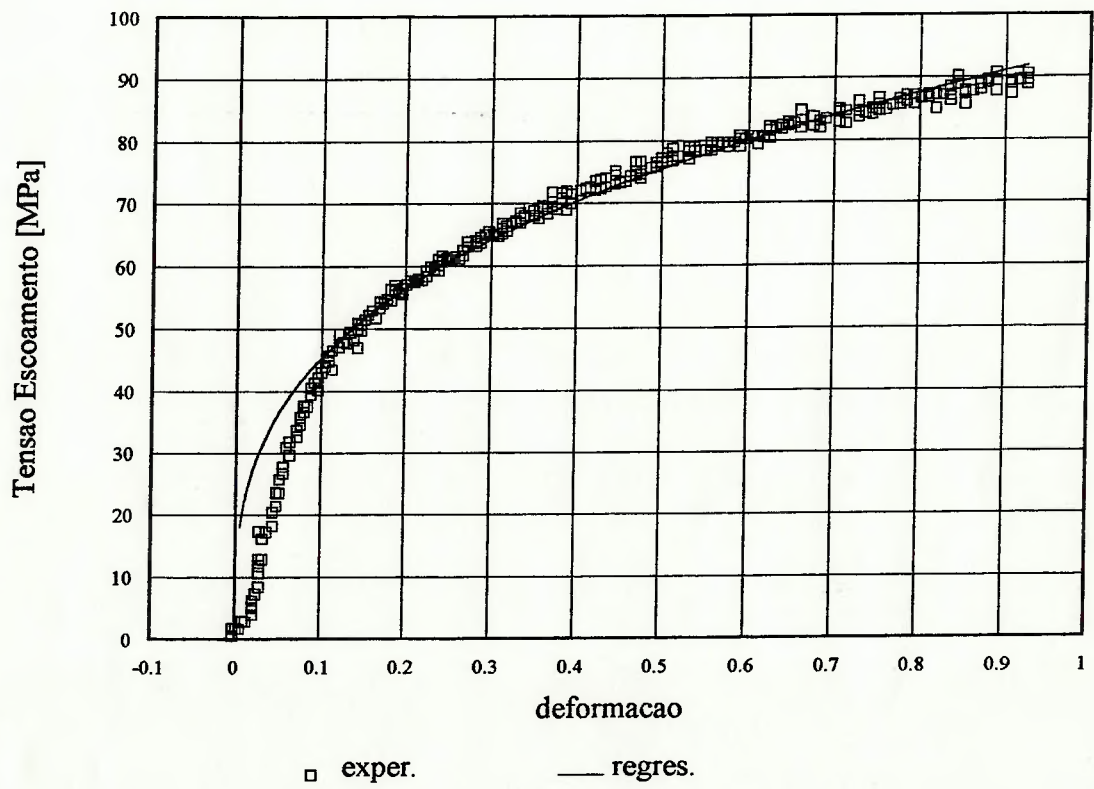


Figura 3.16 - Curva de tensão de escoamento em função da deformação para o corpo de prova 3.



### Análise estatística

A Tabela 3.14, mostra os valores de K e n obtidos por regressão logarítmica para cada um dos corpos de prova.

Tabela 3.14 - K e n obtidos por regressão logarítmica no *Lotus 123R3*

corpo de prova	K [MPa]	n	Coefficiente de correlação R <sup>2</sup>
1	92	0,308	0,9907
2	88	0,282	0,9932
3	94	0,318	0,9903

A estimativa da média e do desvio padrão de K e n para uma distribuição do tipo normal foram calculadas pelas expressões abaixo (HOLMAN, 1989b) e são mostradas na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 - Valor médio e desvio padrão dos coeficientes K e n

	média	desvio padrão
K [MPa]	91	3
n	0,303	0,019

Os intervalos de confiança da média de K e n para 95% de confiabilidade são apresentados na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 - Intervalo de confiança para 95% de confiabilidade dos coeficientes K e n

coeficiente	intervalo de confiança para 95% de confiabilidade
K [MPa]	$91 \pm 7$
n	$0,30 \pm 0,05$

A título de registro apresenta-se na Figura 3.17 a foto dos corpos de prova utilizados no ensaio de compressão.

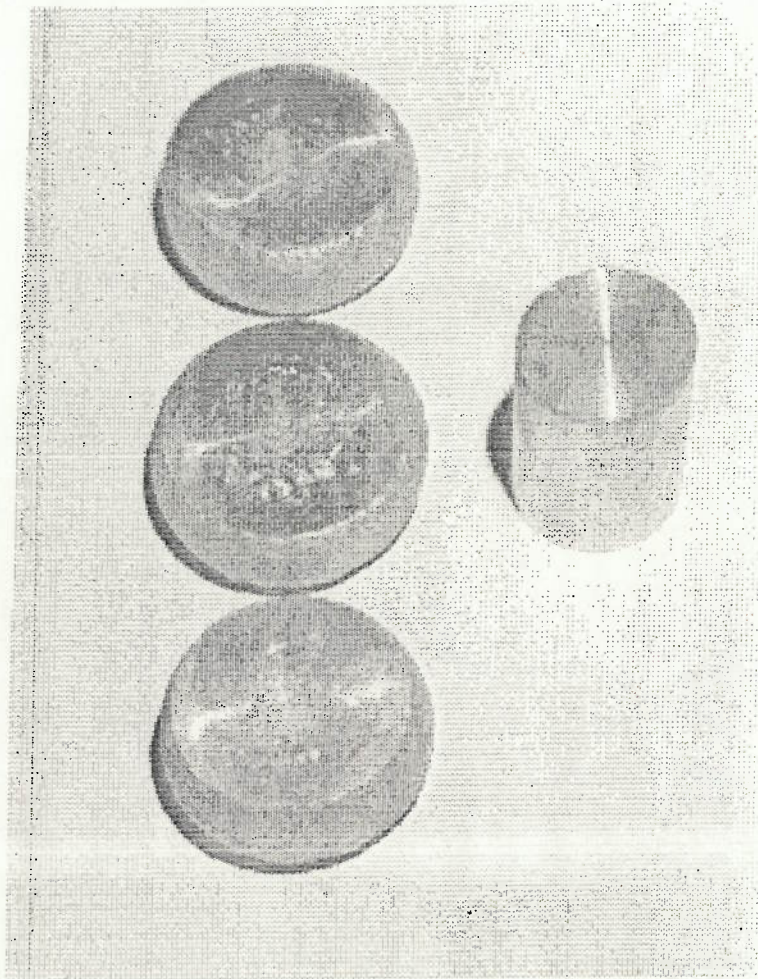


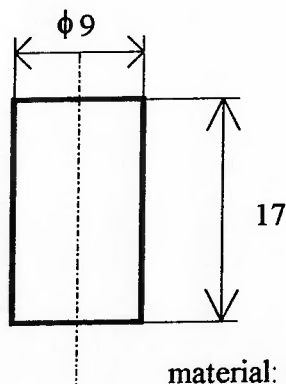
Figura 3.17 - Foto de corpos de prova utilizados no ensaio de compressão.

### 3.2.4 Ensaio de Forjamento

Com objetivo de se comparar valores experimentais de força de forjamento em função do deslocamento da matriz, com valores preditos pelo Método da Divisão em Elementos, foi realizado o ensaio denominado "ensaio de forjamento".

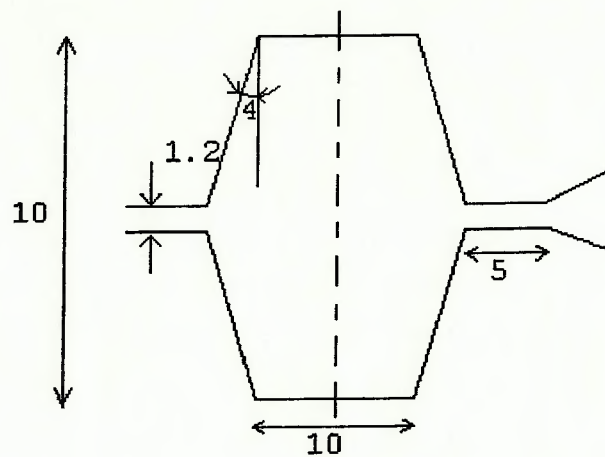
Neste ensaio foi simulado um caso de forjamento a frio, em matriz fechada com canal de rebarba; para as condições de interface "a seco" e lubrificada, com óleo EP-48. Cabe resaltar que o projeto da matriz utilizada neste ensaio foi executado com auxílio do programa desenvolvido neste trabalho. O desenvolvimento deste projeto encontra-se pormenorizado no Capítulo 2, item 2.1.2.

As dimensões do corpo de prova e do produto forjado são mostradas respectivamente nas Figuras 3.18 e 3.19.



material: alumínio AA 1050 O  
tolerância: 0,1 mm

Figura 3.18 - Dimensões do corpo de prova utilizado no ensaio de forjamento



material Al 1050

Figura 3.19 - Dimensões do forjado obtido no ensaio de forjamento

Os corpos de prova foram usinados, tratados termicamente, e limpos com desengraxante.

Durante a execução destes ensaios, a posição da matriz e a força de forjamento foram lidas pelo sistema de aquisição de dados. Estas leituras são apresentadas nas Figuras 3.20 e 3.21.

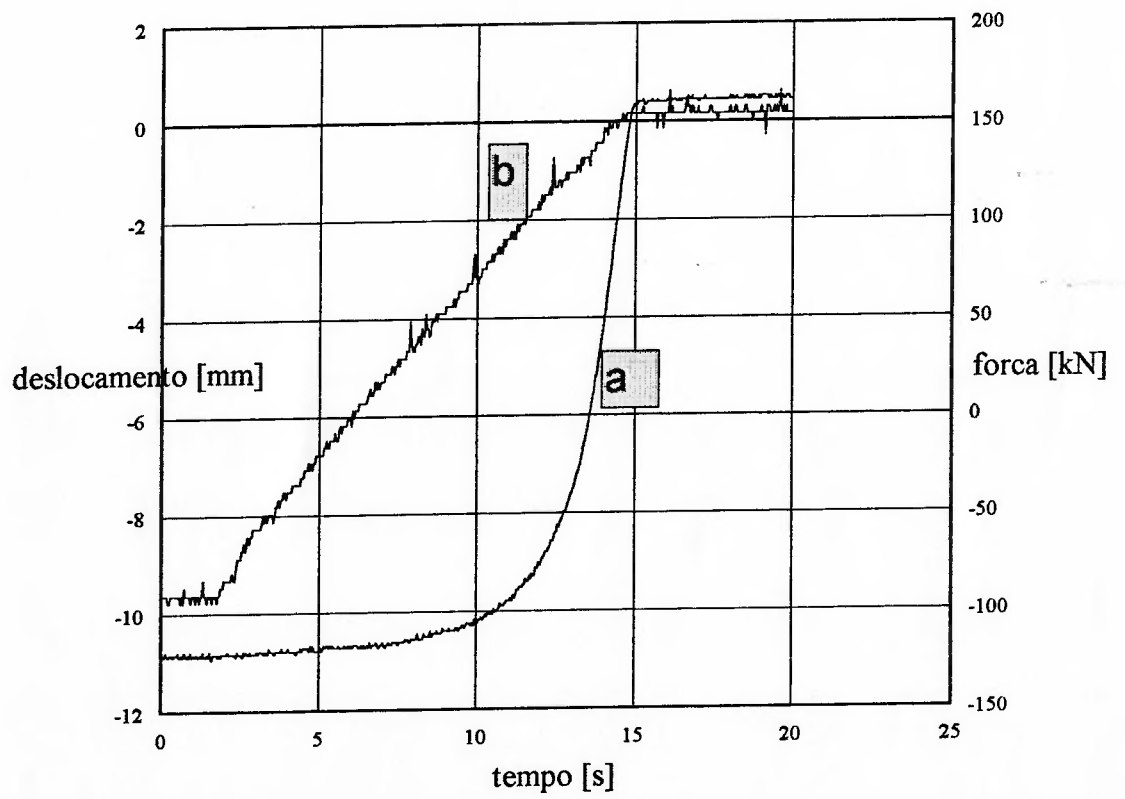


Figura 3.20 - Registros da força de forjamento (a) e do deslocamento (b) da matriz em função do tempo, para a condição a seco.

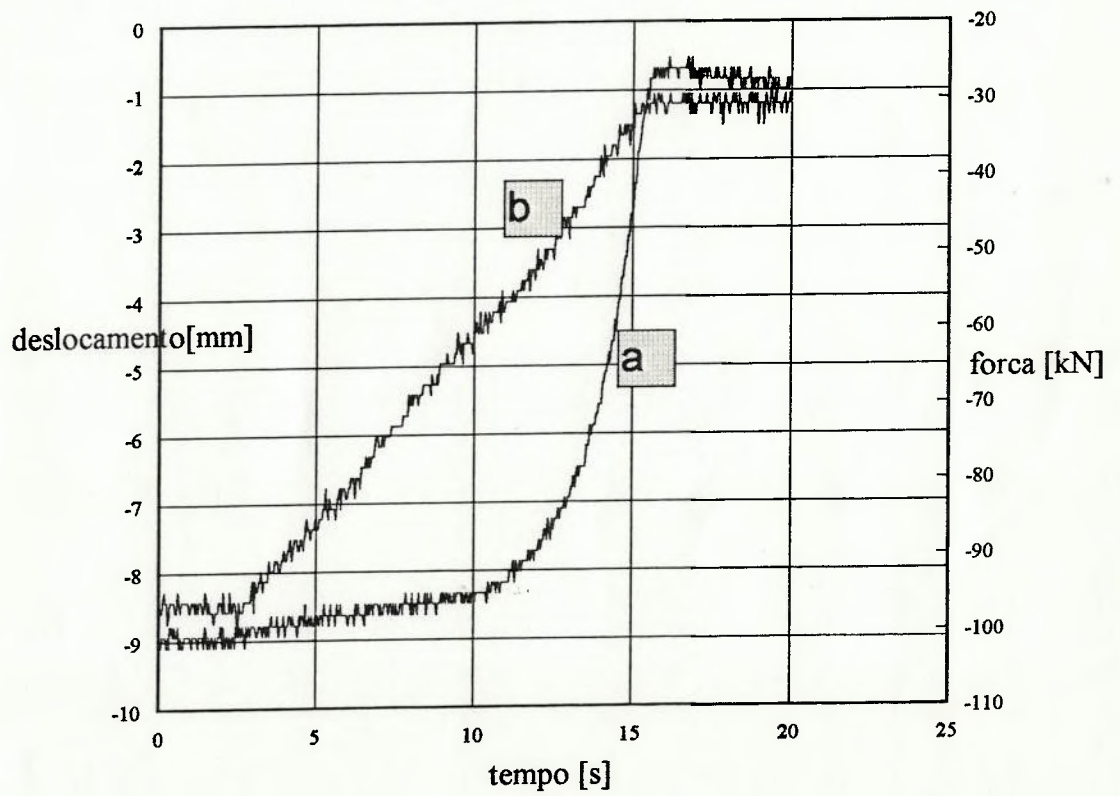


Figura 3.21 - Registro da força de forjamento (a) e do deslocamento (b) da matriz em função do tempo, para a condição lubrificada com óleo EP-48.

A título de registro apresenta-se na Figura 3.22 a foto da matriz e respectivo forjado.

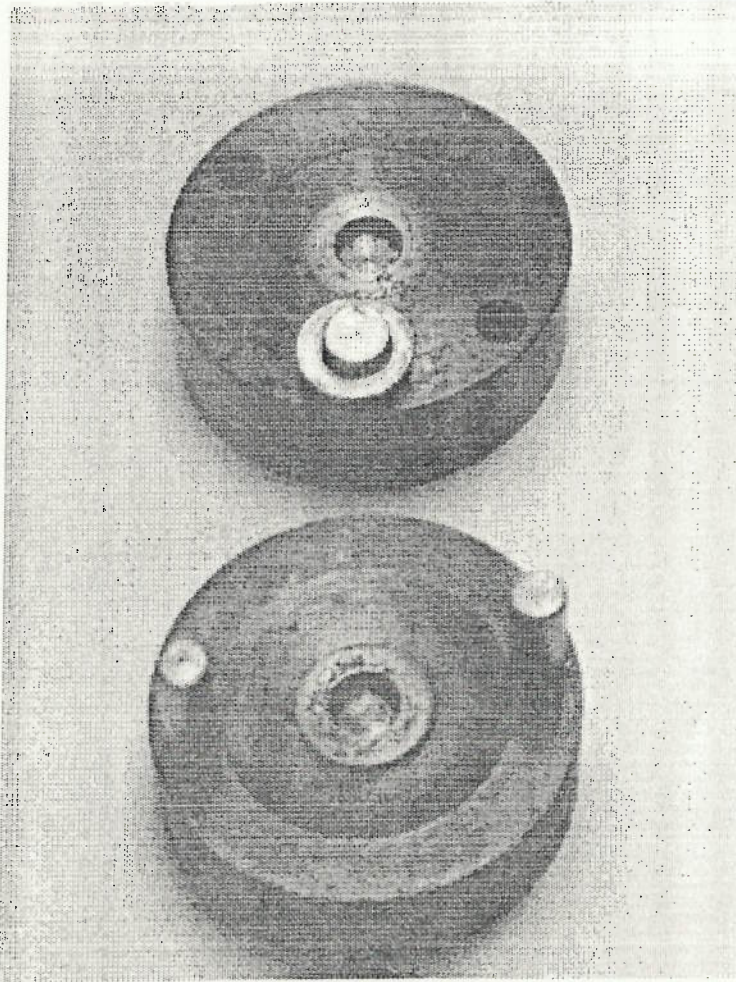


Figura 3.22 - Foto da matriz utilizada no ensaio de forjamento e seu respectivo forjado

### 3.3 Cálculo da Força de Forjamento

A predição da força de forjamento em função do deslocamento da matriz, para as condições de interface adotadas no ensaio de forjamento, foi obtida através do Método da Divisão em Elementos, cuja formulação é apresentada no Anexo 2.

Para aplicação do método, considera-se que no ensaio de forjamento, o corpo de prova de formato cilíndrico, inicialmente é recalado até atingir as paredes laterais da matriz; a partir deste ponto começa a se formar o canal de rebarba. Em razão disto, na modelagem foi utilizada as equações aplicadas ao recalque axissimétrico e ao forjamento axissimétrico em matriz fechada com canal de rebarba, resultando as seguintes expressões:

Para recalque axissimétrico

$$L = \bar{\sigma} \pi r^2 \left( 1 + \frac{2mr}{3h\sqrt{3}} \right) \quad (3.20)$$

onde:

- L: força de forjamento;
- $\bar{\sigma}$ : tensão de escoamento efetiva;
- r: raio instantâneo do cilindro;
- m: fator de atrito;
- h: altura instantânea do cilindro.

e para forjamento axissimétrico em matriz fechada com canal de rebarba:

$$P_u = P_f + P_a \quad (3.21)$$



onde:

P<sub>fa</sub>: força na região do canal de rebarba, dada por:

$$P_{fa} = 2\pi\sigma_f \left[ -\frac{2}{3} \frac{m}{\sqrt{3}} \frac{1}{t} (R^3 - r^3) + \left( 1 + 2 \frac{m}{\sqrt{3}} \frac{R}{t} \right) \left( \frac{R^2 - r^2}{2} \right) \right] \quad (3.22)$$

P<sub>ca</sub>: força de forjamento na região da cavidade, dada por:

$$P_{ca} = 2\pi r^2 \left( \frac{m}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_c}{3} \frac{r}{h} + \frac{\sigma_{ea}}{2} \right) \quad (3.23)$$

R: raio total ( $R = r + w$ )

$\sigma_{ea}$ : tensão na entrada da cavidade, dada por:

$$\sigma_{ea} = \left( \frac{2}{\sqrt{3}} m \frac{w}{t} + 1 \right) \sigma_f \quad (3.24)$$

w: largura do canal de rebarba;

t: espessura do canal de rebarba;

$\sigma_f$ : tensão de escoamento na região de rebarba;

$\sigma_c$ : tensão de escoamento efetiva na região da cavidade.

A força de forjamento calculada pelas expressões acima depende de vários parâmetros do processo; como os valores destes parâmetros são afetados por incertezas, faz-se necessário determinar a incerteza do valor calculado através de análise de propagação de erros.

As expressões para determinar o erro da força foram obtidas com o auxílio do programa para manipulação simbólica DERIVE, este programa permite que as expressões deduzidas sejam gravadas no formato da linguagem Pascal. Estas expressões foram inseridas no programa SlabErro, apresentado no Apêndice 1. Este programa foi

utilizado para calcular a força de forjamento e seu respectivo erro em função do deslocamento da matriz.

As curvas da força de forjamento e do intervalo de confiança, para 95% de confiabilidade, serão apresentadas no capítulo de resultados.

## Referências Bibliográficas

- [NERY et alii, 1986]: NERY, F.A.C.; GETSCHKO, N.; BRESCIANI F<sup>o</sup>, E. Máquina para ensaios de forjamento e estampagem. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 41., São Paulo, 1986. **Anais.** São Paulo, ABM, 1986. p. 411-418.
- [ALTAN, 1983a]: ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H.L. **Metal Forming: Fundamentals and Applications.** USA, ASM, 1983. p. 85
- [ALTAN, 1983b]: ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H.L. **Metal Forming: Fundamentals and Applications.** USA, ASM, 1983. p. 86.
- [ALTAN, 1983c]: ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H.L. **Metal Forming: Fundamentals and Applications.** USA, ASM, 1983. p.49 e 138.
- [ALTAN, 1983d]: ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H.L. **Metal Forming: Fundamentals and Applications.** USA, ASM, 1983. p. 55.
- [AVITZUR, 1968]: AVITZUR, B. **Metal Forming: processes and analysis.** New York, McGraw-Hill, 1968. p. 81-90.
- [HOLMAN, 1978a]: HOLMAN, J.P. **Experimental Methods for Engineers.** 5.ed. New York, McGraw-Hill, 1989. p. 37-47.
- [HOLMAN, 1978b]: HOLMAN, J.P. **Experimental Methods for Engineers.** 5.ed. New York, McGraw-Hill, 1989. p. 49-84.
- [DIETER, 1984]: DIETER, G.E. **Workability Testing Techniques.** USA, ASM, 1984. p.55-58.

## **4. Resultados e Discussão**

### **4.1 Resultados**

Os resultados do trabalho podem ser apresentados levando em consideração os seguintes aspectos:

Programa elaborado.

Aplicação do programa.

Comparação de valores de força preditos e medidos no ensaio de forjamento.

#### **Programa Elaborado**

O programa elaborado no decorrer deste trabalho executa o projeto de forjados a partir do desenho da peça, e calcula a máxima força de forjamento para o processo de forjamento em matriz fechada com canal de rebarba, para trabalho a quente e a frio, em peças com simetria radial.

#### **Aplicação do Programa**

Levando-se em consideração a aplicação do programa aos casos apresentados no Cap. 2 item 2.6, obteve-se os seguintes resultados: Para o caso 1, foram obtidos o valor da máxima força de forjamento e o erro relativo ao valor experimental obtido por ALTAN, apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Máxima força de forjamento calculada e medida e seu respectivo erro relativo.

<b>Valor medido por experimento (segundo ALTAN)</b>	<b>1180 KN</b>
<b>Valor calculado pelo programa</b>	<b>958 KN</b>
<b>Erro relativo ao valor obtido por experimento</b>	<b>-18.8 %</b>

Os resultados do caso 2, podem ser verificados no desenvolvimento do projeto da matriz; conforme já detalhado (Cap. 2, item 2.6)

Apesar da relativa simplicidade da matriz projetada pode-se avaliar qualitativamente que haveria redução do tempo de projeto relativo a execução do mesmo de forma tradicional, já que todas as transformações necessárias para projeto do forjado foram feitas de forma automática pelo programa restando ao projetista a complementação do projeto no programa de desenho.

## Comparação de valores de força

Em decorrência da realização dos ensaios de forjamento e da aplicação do método analítico para determinação da força de forjamento, foram obtidos os resultados: apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2.

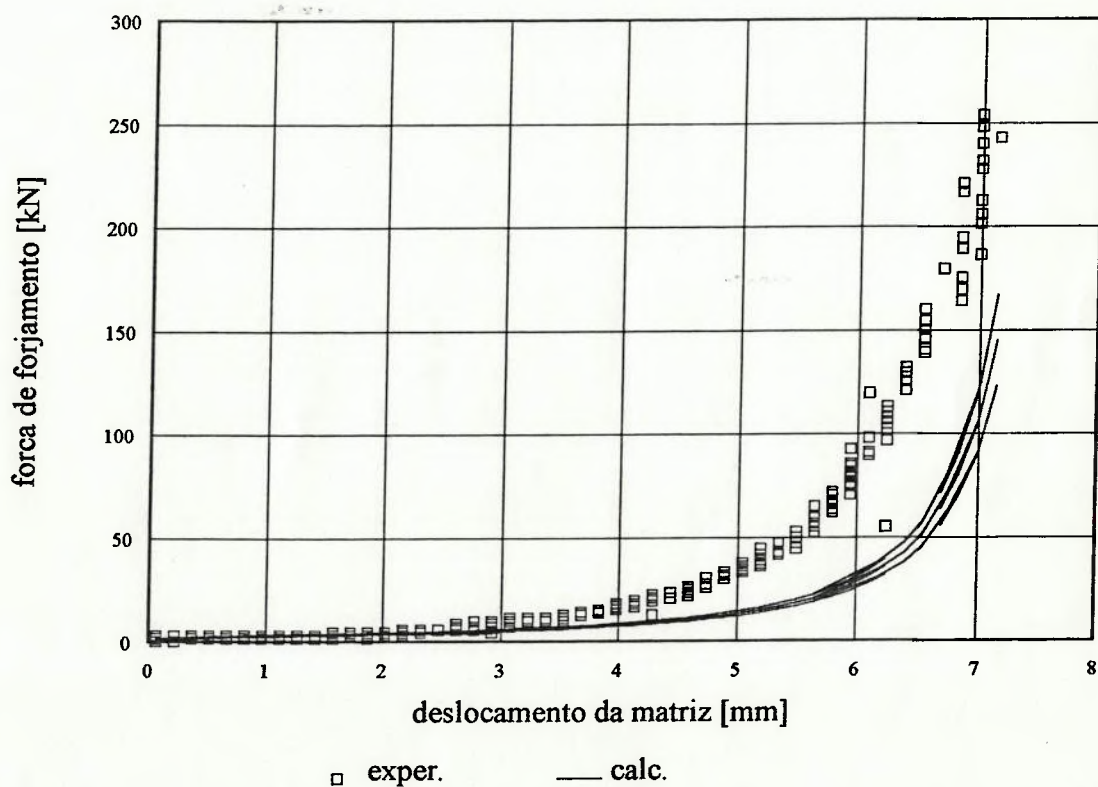


Figura 4.1 - Curvas de força de forjamento em função do deslocamento da matriz para condição a seco.

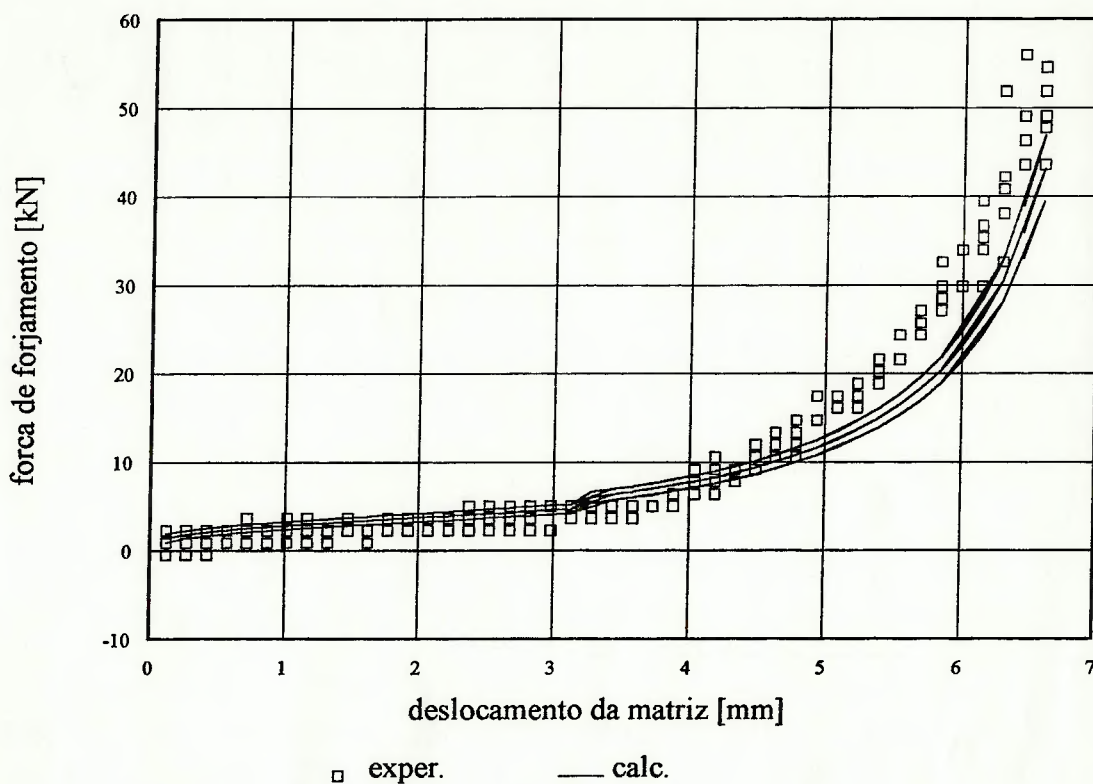


Figura 4.2 - Curvas de força de forjamento em função do deslocamento da matriz para condição lubrificada com óleo EP-48.

Tabela 4.2 - Valores de máxima força de forjamento

Condição de Lubrificação	sem lubrificação	lubrificação com óleo EP-48
Força Medida [kN]	211	45
Força Predita [kN]	107	37
erro %	-49,3	-17,8
fator de atrito	0,80	0,43

## 4.2 Discussão

O programa *Forjaxis* elaborado no presente trabalho, foi implementado de acordo com as especificações obtidas através da análise dos trabalhos mencionados na revisão bibliográfica e levando-se ainda em consideração os seguintes aspectos: utilização em microcomputadores em função do seu custo relativamente baixo; facilidade de operação e integração com outros programas relacionados às atividades de engenharia.

Apesar do editor gráfico incluído no programa se limitar a modelagem de peças que podem ser representadas de forma bidimensional, o programa é capaz de analisar peças com formas mais complexas através da utilização do padrão de representação geométrica IGES. Desta forma o usuário pode utilizar um programa gráfico de maior capacidade que o editor gráfico incorporado, separar as seções a serem analisadas e transferi-las ao programa. No programa estas seções serão analisadas e caso necessário modificadas e podem ser devolvidas ao programa de desenho, onde agrupadas as seções obtém-se o forjado correspondente. Este procedimento foi adotado na elaboração do projeto da matriz do ensaio de forjamento.

Além da integração do programa com o *AutoCad*, utilizado para geração de desenho, verificou-se a compatibilidade de transferência de dados geométricos com os seguintes programas: *Algor*, utilizado para análise por Método dos Elementos Finitos e *SmartCAM* utilizado para geração de programas para máquinas de controle numérico. Desta forma, em microcomputador padrão IBM PC, foi verificada a integração do programa num ambiente automatizado de projeto. Pode-se esperar uma integração em outras plataformas não DOS, já que o padrão IGES é bastante difundido e os dados são gravados em arquivo do tipo texto segundo o padrão de representação de caracteres ASCII. Neste caso a adoção do padrão IGES possibilitou a ampliação da aplicabilidade do programa nas tarefas de projeto e fabricação em engenharia mecânica.



No programa foi implementado um analisador de seção de peças, este analisador "entende" a forma geométrica da peça e executa determinadas alterações. No caso em questão, o analisador adapta a forma da peça às restrições geométricas impostas pelo processo de forjamento em matriz fechada com canal de rebarba. Este mesmo analisador pode ser adaptado para ser utilizado em outros processos de fabricação onde há limitações da forma geométrica, como por exemplo: fundição e moldagem de plástico por injeção.

O cálculo da máxima força de forjamento foi implementado para seções com escoamento radial, mas pode-se adicionar rotinas para o cálculo da força em seções de escoamento plano.

Desta forma, o programa produzido neste trabalho agrega as especificações sugeridas e implementadas nos diversos trabalhos apresentados na revisão da literatura, nos aspectos de projeto do forjado e cálculo da máxima força de forjamento, e melhorias que permitem ao programa analisar e gerar forjados automaticamente da mesma forma que um projetista e poder transferir os dados do projeto para outros programas com recursos de desenho, análise e geração de programas CNC, permitindo a integração num ambiente automatizado de projeto e fabricação.

Quanto ao aspecto do cálculo da máxima força de forjamento pelo método analítico slab observa-se que os valores obtidos através do mesmo são menores que o valor real medido experimentalmente, conforme pode ser verificado nos resultados do estudo de caso 1 (Tabela 4.1) e nos ensaios de forjamento (Tabela 4.2). Segundo LAHOTI; ALTAN (1979, op cit Cap 1) isto ocorre devido a parcela de energia relacionada ao cisalhamento interno do material que é desprezada na dedução do método conforme apresentado no Anexo 2. Isto introduz erros de magnitude desconhecida, embora esses autores citam diversos casos onde o método produziu resultados satisfatórios. Baseando-se ainda nas considerações acima apresentadas, pode-se verificar que há coerência no aumento da discrepância do valor predito de força, com o aumento do valor do fator de atrito, conforme pode ser observado nas Figuras 4.1 e 4.2.

## 5. Conclusões

Em decorrência do desenvolvimento do trabalho conclui-se que:

- I. O programa elaborado é capaz de auxiliar o projetista na elaboração de projeto de matrizes de forjamento com canal de rebarba, através do projeto automático do forjado a partir da geometria da peça, e cálculo da máxima força de forjamento para dimensionamento da matriz e seleção da capacidade do equipamento de conformação em função dos parâmetros de processo, trazendo as vantagens inerentes aos programas de computador utilizados nas áreas de projeto.
- II. Em termos de contribuição do trabalho a esta área de conhecimento, menciona-se o algoritmo de projeto automático do forjado e utilização do padrão IGES para transferência de dados.
- III. A definição de padrões de representação de informações tais como o IGES , implementado no programa, contribui para o aumento da integração de programas e sistemas computacionais utilizados em engenharia, aumentando a utilidade e generalidade dos mesmos.
- IV. O Método da Divisão em Elementos utilizado no programa para o cálculo da máxima força de forjamento deve ser utilizado com cautela pois as discrepâncias podem ser relativamente grandes em função do fator de atrito e configuração de escoamento do metal.

## ANEXO 1

### Padrão de Representação Gráfica IGES

#### 1.1 Histórico (ZEID, 1991)

No final da década de 70, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos reconheceu a necessidade de transferir dados de modelamento geométrico entre diferentes tipos de sistemas CAD/CAM. Em setembro de 1979, representantes do governo e da indústria se uniram para desenvolver um método para intercâmbio de dados. O resultado destes esforços foi a criação do Initial Graphics Exchange Specification, conhecido como IGES, que foi publicado em janeiro de 1980 como IGES versão 1.0 .

Em maio de 1980, a ANSI (American National Standards Institute) através do comitê Y14.26 votou para adotar a versão 1.0 do IGES como padrão para o intercâmbio digital de dados de produto, nesta época um esboço do padrão foi distribuído para avaliação pública. Em setembro de 1981, a ANSI adotou o documento Y14.26M e o IGES passou a ser um padrão da ANSI.

Desde então, o IGES recebeu três revisões, a versão 2.0 foi lançada em fevereiro de 1983, a versão 3.0 em abril de 1986 e a versão 4.0 em junho de 1988.

Durante sua existência, o IGES estimulou o estudo de novas formas de representação de dados de produtos com o objetivo de modelar os quatro tipos de dados do produto, de certa forma, direta ou indiretamente outros padrões como o SET ("Standard d' Exchange et de Transfert") da companhia francesa Aerospatiale e o DIN

TAP da Alemanha sofreram grande influência dos conceitos utilizados na formulação do IGES.

Desde seu lançamento, o IGES teve grande aceitação entre usuários e vendedores de sistemas CAD/CAM, devido a sua popularidade espera-se que desenvolvimentos e melhorias ocorram com o decorrer do tempo garantindo a existência futura do padrão, e mesmo que outros padrões o substituam, provavelmente devido ao seu pioneirismo os novos padrões deverão de alguma forma serem compatíveis com o IGES.

## **1.2 Estrutura do Arquivo IGES (ZEID, 1991)**

Padrão para transferência de dados descritivos de produtos. Os dados descritivos de um produto podem ser classificados em quatro tipos: formato, complementares do formato, projeto e fabricação.

Os dados do tipo formato informam a geometria e a topologia do produto. Atributos de entidades como fonte, cor, camada e anotações fazem parte deste tipo.

O tipo complementar do formato inclui dados gráficos como imagens sombreadas e dados do modelamento geométrico como unidades de medida, resolução gráfica mínima para apresentação dos dados e precisão de valores numéricos.

Os dados de projeto contém informações sobre dados geométricos relacionados a análise do projeto. Propriedades dos materiais e malha de elementos finitos constituem dados deste tipo.

Dados de fabricação incluem informações sobre ferramentas, caminhos de ferramentas comandadas numericamente, tolerâncias, planejamento de processo de fabricação e formato da matéria-prima.

O padrão IGES foi desenvolvido com foco na transferência de dados em sistemas CAD onde os dados do tipo formato e complementar do formato são utilizados.

O IGES define um banco de dados do tipo neutro, ou seja, cada sistema de CAD/CAM não similar necessita de um pré e de um pós processador específico para interpretar ou gerar um arquivo no padrão IGES. O padrão IGES descreve as entidades que podem ser utilizadas na construção de um modelo do produto, os parâmetros necessários para a definição destas entidades e as possíveis interações e associações entre as entidades.

O modelo IGES, como muitos sistemas CAD/CAM, se baseia no conceito de entidades. A entidade é a unidade básica de informação e o modelo do produto corresponde a uma lista de entidades pré-definidas. O IGES é um documento que descreve a forma de representar os dados do produto num arquivo de dados de computador. Os desenvolvedores de aplicativos CAD/CAM devem escrever o programa para traduzir os dados do produto de seus sistemas para o modelo de representação gráfica IGES. O programa que traduz os dados do sistema representados segundo uma forma específica do fabricante para o padrão IGES é chamado pré-processador e o programa que trabalha em sentido inverso é designado pós-processador.

Um arquivo IGES contém seis seções que obrigatoriamente são escritas e lidas na seguinte ordem: seção indicadora (opcional), seção inicial, seção global, entrada de diretório, parâmetros dos dados e seção terminadora. Estas seções são identificadas no arquivo através de uma letra colocada na coluna 73 de cada registro. Sequencialmente as letras correspondentes as seções seriam: S, G, D, P e T.

A seção indicadora é usada no formato ASCII comprimido e no formato binário, esta seção é constituída por um único registro que precede a seção inicial. No formato ASCII comprimido, o registro corresponde a uma linha que possui a letra C na coluna 73 e no formato binário esta seção é iniciada pelo byte correspondente a letra "B" no código ASCII.

A seção inicial possui formato livre e normalmente é utilizada para inclusão de informações na forma de texto com a finalidade de documentar o arquivo.

A seção global descreve o pré-processador e contém as informações necessárias para pós-processador interpretar corretamente o conteúdo do arquivo. Alguns dos parâmetros especificados nesta seção são: caracteres usados como limitadores de entradas e registros, o nome do arquivo IGES, nome e versão do programa gerador do arquivo, número de algarismos significativos do sistema de origem, data e hora de geração do arquivo, escala de desenho utilizada, unidade de medida utilizada, resolução mínima e maior valor de coordenada, nome do autor e da empresa.

A seção entrada de diretório contém uma lista de todas entidades utilizadas no modelo, cada entidade ocupa dois registros de 80 colunas, cada um destes registros são divididos em 10 campos. O primeiro campo e o décimo primeiro contém o número de codificação da entidade. O segundo campo contém um ponteiro para a seção de parâmetros e os demais são utilizados para marcação de atributos da entidade tais como: número da camada, matriz de transformação, largura da linha e cor.

A seção de parâmetros contém a definição dos dados listados na seção diretório, a cada entrada de diretório tem-se pelo menos um registro na seção de parâmetros, neste registro os valores numéricos necessários para a definição da entidade são separados pelo separador definido na seção global. A lista de parâmetros pode se estender por vários registros dependendo do tipo de entidade e o final da definição é marcada pelo separador de registros, também definido na seção global.

A seção terminadora contém um único registro que especifica o número de registros em cada uma das quatro seções antecedentes e serve para verificação da integridade do arquivo.

### **Referência Bibliográfica**

[ZEID, 1991]: ZEID, I. **CAD/CAM THEORY AND PRACTICE**. Singapore, McGraw-Hill, 1991. p. 446-471.

## ANEXO 2

### Método da Divisão em Elementos

#### 2.1 Introdução

O Método da Divisão em Elementos também conhecido como método de Sachs é um dos métodos analíticos utilizado para modelagem matemática dos processos de conformação, os modelos de análise são utilizados nas operações de conformação com os seguintes objetivos:

- Calcular as tensões, deformações, taxas de deformação e velocidades durante o escoamento plástico do metal.
- Estabelecer os limites de conformabilidade e verificar a possibilidade de ocorrência de defeitos superficiais ou internos no metal deformado.
- Calcular os esforços e a energia de deformação, úteis na seleção do equipamento de conformação e no projeto da ferramenta.

Na análise do processo de forjamento de metais, o método adota as seguintes hipóteses:

- Material isotrópico e incompressível.
- Deformações elásticas são desprezadas.
- Forças de inércia são desprezadas.
- A tensão de cisalhamento na interface é constante e vale  $m\bar{\sigma} / \sqrt{3}$ .
- O material inicia o escoamento e escoar de acordo com as regras de von Mises.
- A tensão de escoamento e a temperatura são constantes na seção analisada.



No caso do forjamento em matriz fechada com canal de rebarba adota-se o seguinte procedimento para cálculo da força máxima de forjamento: (SUBRAMANIAN; ALTAN, 1980)

- 1º) Classificar as seções do forjado de acordo com o tipo de escoamento, pode-se ter escoamento plano ou escoamento axissimétrico.
- 2º) Para cada uma das seções calcular as dimensões características médias, altura e largura para seções de escoamento plano e altura e diâmetro para seções de escoamento axissimétrico.
- 3º) Para cada uma das seções, calcular: tensão de escoamento na cavidade, tensão de escoamento na rebarba, tensão na entrada da cavidade, força na rebarba, força na cavidade e força na seção.
- 4º) Somando-se as forças obtidas em cada seção, obtém-se a força máxima de forjamento.

## **2.2 Teoria da Plasticidade aplicada a Conformação dos Metais (ALTAN, 1983)**

### **Deformação**

Os deslocamentos locais de elementos de volume podem ser descritos por um campo de velocidade.

Para estudar a deformação tomemos o elemento retangular infinitesimal da Figura A2.1. O elemento de lados  $abcd$  é deformado e assume a configuração  $a'b'c'd'$ .

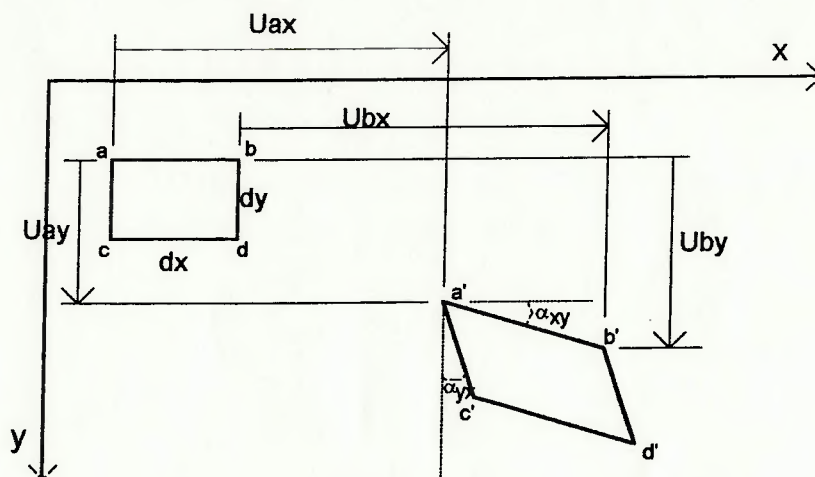


Figura A2.1 - Elemento sob deformação

Desprezando componentes de ordem superior, podemos determinar o deslocamento do ponto  $b$ ,  $U_{bx}$ , como função do deslocamento do ponto  $a$ .

$$U_{bx} = U_{ax} + \frac{\partial U_x}{\partial x} dx \quad (2.1)$$

A elongação relativa do lado  $ab$  (inicialmente igual a  $dx$ ), ou deformação na direção  $x$ ,  $\epsilon_x$ , é:

$$\epsilon_x = \frac{(U_{bx} + dx - U_{ax}) - dx}{dx} = \frac{U_{bx} - U_{ax}}{dx} \quad (2.2)$$

Substituindo 2.1 em 2.2 temos:

$$\epsilon_x = \frac{\partial U_x}{\partial x} \quad (2.3)$$

analogamente nas outras direções:

$$\varepsilon_y = \frac{\partial U_y}{\partial y} \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial U_z}{\partial z} \quad (2.5)$$

As variações angulares devido a pequena deformação considerada são infinitesimais, então pode-se assumir que  $\tan \alpha_{xy} = \alpha_{xy}$  e  $\tan \alpha_{yx} = \alpha_{yx}$ .

$$\alpha_{xy} = \frac{(U_{by} - U_{ay})}{(U_{bx} + dx - U_{ax})} \quad (2.6)$$

$U_{bx}$  já foi obtido em 2.1 e  $U_{by}$  vale:

$$U_{by} = U_{ay} + \frac{\partial U_y}{\partial y} dy \quad (2.7)$$

Substituindo 2.1 e 2.7 em 2.6 temos:

$$\alpha_{xy} = \frac{\frac{\partial U_y}{\partial y} dy}{\frac{\partial U_x}{\partial x} dx + dx} = \frac{\frac{\partial U_y}{\partial y} dy}{dx \left( \frac{\partial U_x}{\partial x} + 1 \right)} \quad (2.8)$$

Como  $\frac{\partial U_x}{\partial x} = \varepsilon_x$  é muito menor que 1 então:

$$\alpha_{xy} = \frac{\partial U_y}{\partial x} \quad (2.9)$$

e de modo análogo:

$$\alpha_{yx} = \frac{\partial U_x}{\partial y} \quad (2.10)$$

A deformação angular total de cisalhamento  $\gamma_{xy}$  vale:

$$\gamma_{xy} = \alpha_{xy} + \alpha_{yx} = \frac{\partial U_y}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial y} \quad (2.11)$$

e similarmente:

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial y} \quad (2.12)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial U_z}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial z} \quad (2.13)$$

### Velocidade e Taxa de Deformação

O campo de velocidade  $V=(V_x, V_y, V_z)$  descreve o escoamento do material. A velocidade é a variação do deslocamento no tempo. Desta forma temos:

$$V_x = \frac{\partial U_x}{\partial t} \quad (2.14)$$

$$V_y = \frac{\partial U_y}{\partial t} \quad (2.15)$$

$$V_z = \frac{\partial U_z}{\partial t} \quad (2.16)$$

As taxas de deformação são a variação da deformação em relação ao tempo.

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{\partial \epsilon_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial U_x}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial U_x}{\partial t} \right) = \frac{\partial V_x}{\partial x} \quad (2.17)$$

De modo análogo temos:

$$\dot{\epsilon}_y = \frac{\partial V_y}{\partial y} \quad (2.18)$$

$$\dot{\epsilon}_z = \frac{\partial V_z}{\partial z} \quad (2.19)$$

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \quad (2.20)$$

$$\dot{\gamma}_{yz} = \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \quad (2.21)$$

$$\dot{\gamma}_{xz} = \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \quad (2.22)$$

O estado de deformação num material deformado plasticamente é completamente descrito pelos deslocamentos  $U$ , velocidades  $V$ , deformações  $\epsilon$ , taxas de deformação  $\dot{\epsilon}$ .

### Deformação Homogênea

A deformação homogênea é um caso particular de deformação caracterizada pela manutenção da forma do produto sob deformação, isto ocorre no caso de ausência de atrito nas interfaces da ferramenta. A seguir apresenta-se um caso de deformação homogênea que servirá para obtenção de expressões de deformação e taxa de deformação em função de parâmetros de deformação.

Considere o recalque de um bloco retangular na ausência de atrito na interface. O bloco é comprimido entre duas faces planas da matriz de recalque. A face superior se move para baixo com velocidade  $V_D$ , o sistema de coordenadas ortogonal é tomado com origem no centro da face inferior.

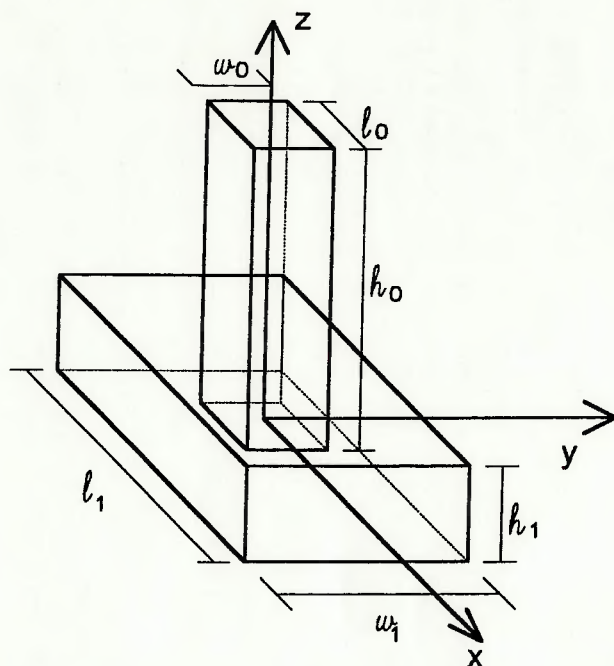


Figura A2.2 - Bloco sob deformação homogênea.

As dimensões originais do bloco são  $l_0, w_0, h_0$ ; e as finais  $l_1, w_1, h_1$ . A altura instantânea do bloco durante a deformação é  $h$ .

Os componentes de velocidade podem ser expressos por:

$$V_x = \frac{V_D x}{2h}$$

$$V_y = \frac{V_D y}{2h}$$

$$V_z = -\frac{V_D z}{h}$$

Taxas de deformação

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{\partial V_x}{\partial x} = \frac{V_D}{2h}$$

$$\dot{\epsilon}_y = \frac{V_D}{2h}$$

$$\dot{\epsilon}_z = -\frac{V_D}{h}$$

$$\dot{\gamma}_{xy} = \dot{\gamma}_{yz} = \dot{\gamma}_{xz} = 0$$

Deformação:

$$\varepsilon_z = \int_{t_0}^{t_1} \dot{\varepsilon}_z dt = \int_{t_0}^{t_1} -\frac{V_D}{h} dt$$

Sabendo que:

$$\frac{dh}{dt} = -V_D$$

temos:

$$\varepsilon_z = \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad (2.23)$$

## Tensão de escoamento de metais

A tensão de escoamento de um metal submetido a um estado de tensão uniaxial é função da deformação, taxa de deformação e temperatura. O metal inicia o escoamento ou deforma plasticamente quando a tensão aplicada (tensão uniaxial trativa sem empescoamento ou tensão uniaxial compressiva sem embarrilamento) atinge o valor da tensão de escoamento.

O estudo da tensão de escoamento na conformação de metais é importante porque os esforços de conformação dependem: da geometria, atrito e da tensão de escoamento do metal deformado.

Na conformação de metais a quente (acima da temperatura de recristalização), a deformação exerce pouca influência na tensão de escoamento, por outro lado, na conformação a frio, a tensão de escoamento é fortemente influenciada pela deformação e muito pouco influenciada pela taxa de deformação.

O aumento do valor da tensão de escoamento com o aumento da deformação é conhecido como encruamento.

O valor da tensão de escoamento para análise dos processos de conformação é obtida através de ensaios mecânicos. Os ensaios utilizados para este fim são: ensaio de

tração, de compressão e de torsão. Nestes ensaios são aplicados esforços uniaxiais e são medidos a força e o deslocamento que podem ser convertidos em tensão e deformação verdadeiras. Estes valores são submetidos a análise por regressão e coeficientes são obtidos. Tradicionalmente, a tensão de escoamento em função da deformação para metais deformados a frio é representada pela equação  $\sigma = K\varepsilon^n$ , enquanto que para deformação a quente a equação do tipo  $\sigma = C\varepsilon^m$  é utilizada, note-se que neste último caso, os coeficientes C e m variam com a deformação e temperatura.

No caso de tensões uniaxiais, trativas ou compressivas, o metal escoá plasticamente quando a tensão  $\sigma$  aplicada atinge o valor da tensão de escoamento. A condição de escoamento para o estado uniaxial de tensão pode ser escrito como:

$$|\sigma| = \frac{F}{A} = \bar{\sigma} \quad (2.24)$$

onde:

$\sigma$ : tensão aplicada;

F: valor instantâneo da força;

A: valor instantâneo da área resistente;

$\bar{\sigma}$ : tensão de escoamento.

Num estado multiaxial de tensões, o escoamento plástico depende da combinação de todas as tensões. Os critérios mais utilizados para prever o escoamento plástico são dois:

- o critério de Tresca ou da máxima tensão de cisalhamento; e o
- critério de von Mises ou da energia de distorção.

O critério de Tresca estabelece que o escoamento plástico inicia quando a máxima tensão de cisalhamento atinge um certo valor crítico  $\tau_{max}$ , que é característica



do material e de sua microestrutura e depende da deformação, taxa de deformação e temperatura.

A tensão de cisalhamento máxima pode ser escrita em termos das tensões principais como:

$$\tau_{\max} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \quad (2.25)$$

A tensão de cisalhamento crítica pode ser obtida num ensaio de tração uniaxial:

$$\sigma_1 = \bar{\sigma}$$

$$\sigma_2 = 0$$

$$\sigma_3 = 0$$

$$\tau_{\max} = \frac{\bar{\sigma}}{2}$$

Para um estado de tensões qualquer representado pelas tensões principais:  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , o critério de Tresca pode ser escrito como:

$$|\sigma_1 - \sigma_3| = \bar{\sigma} \quad (2.26)$$

O critério de escoamento de von Mises considera todas as tensões que agem no corpo deformado e pode ser expresso como segue.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} \quad (2.27)$$

### Relação tensão-deformação durante o escoamento plástico

A análise da deformação plástica, após o início do escoamento, requer o conhecimento da relação entre tensões aplicadas e os campos de deslocamentos e velocidades.

Equações de escoamento plástico em termos dos componentes principais dos tensores de tensão e deformação podem ser expressas por:

$$d\varepsilon_i = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} (\sigma_i - \sigma_m)$$

ou

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{3}{2} \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\bar{\sigma}} (\sigma_i - \sigma_m) \quad (2.28)$$

onde  $\bar{\sigma}$ ,  $\bar{\varepsilon}$ , e  $\dot{\bar{\varepsilon}}$  são respectivamente tensão, deformação e taxa de deformação efetivas.

### Atrito na Conformação de Metais

Na conformação de metais, o escoamento do metal é causado pelas forças de contato aplicadas pelas matrizes na superfície do material deformado. As condições de atrito na interface material-ferramenta influenciam o escoamento do metal (formação de defeitos superficiais e internos, tensões na ferramenta, força e energia de conformação). Os modelos de atrito normalmente utilizados são dois, o modelo de Coulomb e o modelo do fator de atrito, experimentalmente verificou-se que para operações de conformação do tipo massivo, forjamento por exemplo, o modelo do fator de atrito é superior ao de Coulomb.

As expressões dos dois modelos são apresentadas a seguir.

Modelo de Coulomb:

$$\tau = \sigma_n \mu \quad (2.29)$$

Modelo do Fator de Atrito:

$$\tau = f\bar{\sigma} = \frac{m}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} \quad (2.30)$$

onde  $0 \leq m \leq 1$

No modelo do fator de atrito, valor do fator  $m$  é obtido experimentalmente através do ensaio do anel. Este ensaio consiste em comprimir entre matrizes planas um corpo de prova em forma de anel, e medir as variações no diâmetro interno em função da redução na altura. Comparando a curva obtida no ensaio com curvas de calibração obtém-se o valor do fator  $m$ .

### Temperatura na Conformação de Metais

Nos processos de conformação de metais, a deformação plástica e o atrito na interface contribuem na geração de calor. Aproximadamente 90 a 95% da energia mecânica envolvida no processo é transformada em calor.

Em alguns processos contínuos de conformação como trefilação e extrusão, conduzidos a alta velocidade, a temperatura aumenta em várias centenas de graus.

O calor gerado no processo influencia as condições de lubrificação, vida da ferramenta e propriedades do produto final.

A magnitude e a distribuição de temperatura depende principalmente de:

- temperatura inicial da matéria-prima e da ferramenta;
- aumento de temperatura devido a deformação plástica e atrito na interface;
- transferência de calor entre a matéria-prima, ferramenta e ambiente.

Aumento de temperatura devido à deformação plástica.

$$\Delta\theta_D = \beta \frac{\overline{\sigma\dot{\epsilon}}}{c_p} = \beta \frac{\overline{\sigma\dot{\epsilon}}}{c_p} \Delta t \quad (2.31)$$

onde  $0 \leq \beta \leq 1$  normalmente  $\beta \approx 0.95$

Aumento de temperatura devido ao atrito na interface

$$\Delta\theta_F = \frac{\tau F v \Delta t}{c \rho V_s} \quad (2.32)$$

onde:

$\tau$ : tensão de cisalhamento na interface;

F: área;

v: velocidade relativa;

$\Delta t$ : intervalo de tempo;

c: calor específico;

$\rho$ : densidade;

$V_s$ : volume afetado.

Varição de temperatura devido à transferência de calor

$$\theta(t) = \theta_\infty + (\theta_0 - \theta_\infty) e^{\frac{-\alpha A t}{c \rho V}} \quad (2.33)$$

onde:

$\theta(t)$ : temperatura instantânea;

$\theta_\infty$ : temperatura do meio circundante;

$\theta_0$ : temperatura inicial do material;

$\alpha$ : coeficiente de transferência de calor;

A: área de troca de calor;

t: tempo;

c: calor específico;

$\rho$ : densidade;

V: volume de material.

A temperatura final é dada por:

$$\theta_s = \theta(t) + \Delta\theta_D + \Delta\theta_F \quad (2.34)$$

## 2.3 Modelagem de Casos de Forjamento pelo Método Slab (ALTAN,1983b)

### Matriz Aberta, escoamento plano

Campo de velocidades estimado (assumindo deformação homogênea):

$$V_z = -\frac{V_D z}{h} \quad V_x = \frac{V_D x}{h} \quad V_y = 0$$

onde:  $V_d$  : velocidade da matriz superior;

$h$  : altura instantânea.

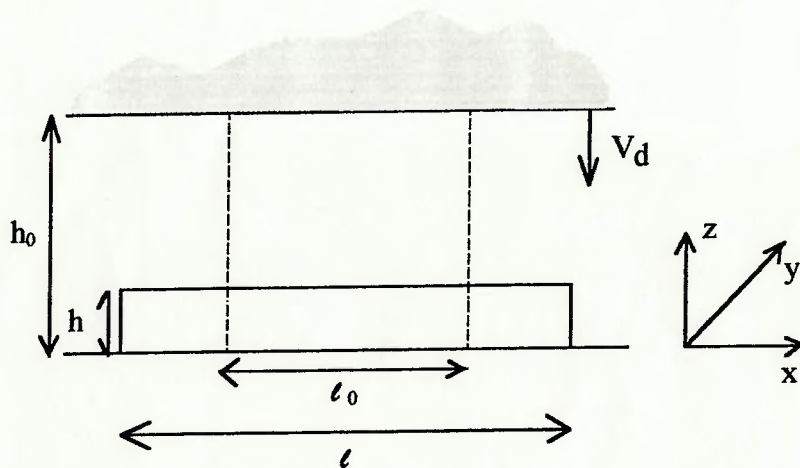


Figura A2.3 - Representação esquemática da seção sob recalque para o caso de forjamento em matriz aberta sem canal de rebarba com escoamento plano.

Taxas de deformação:

$$\dot{\epsilon}_z = \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{V_D}{h}$$

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{\partial V_x}{\partial x} = \frac{V_D}{h}$$

$$\dot{\epsilon}_y = 0$$

$$\dot{\gamma}_{xz} = \dot{\gamma}_{xy} = \dot{\gamma}_{yz} = 0$$

Deformações

$$\epsilon_z = \ln \frac{h}{h_0}$$

$$\epsilon_x = -\epsilon_z$$

$$\epsilon_y = 0$$

Utilizando o conjunto de equações 2.28 obtém-se a relação entre  $\sigma_z$  e  $\sigma_x$ .

$$\sigma_z - \sigma_x = \frac{2\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad (2.35)$$

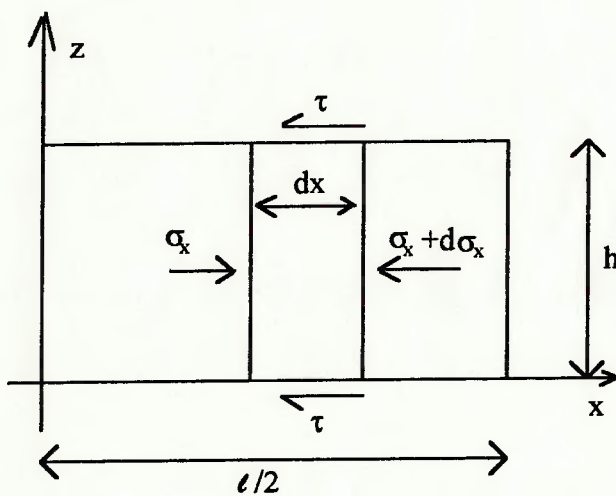


Figura A2.4 - Elemento utilizado na equação de equilíbrio para o caso de forjamento em matriz aberta sem canal de rebarba para escoamento plano.

Através da condição de equilíbrio da seção mostrada na Figura A2.4 obtém-se a expressão de  $\sigma_x$ :

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \\ \sigma_x h - (\sigma_x + d\sigma_x)h - 2\tau dx &= 0 \\ \frac{d\sigma_x}{dx} &= -\frac{2\tau}{h} & (2.36) \\ \sigma_x &= -\frac{2\tau}{h}x + C \\ \sigma_x = 0 \text{ para } x = l/2 \therefore C &= \tau l / h\end{aligned}$$

Substituindo 2.35 em 2.36 obtém-se a expressão de  $\sigma_z$ .

$$\sigma_z = -\frac{2\tau}{h}x + \frac{\tau l}{h} + \left| \frac{2\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \right| \quad (2.37)$$

Integrando-se 2.37 em  $x$  de  $-l/2$  até  $l/2$  e substituindo o valor de  $\tau$  dado por 2.30, obtém-se a força de forjamento por unidade de comprimento:

$$L = 2\ell \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{m\ell}{4h} \right) \quad (2.38)$$

### Matriz Aberta, escoamento axissimétrico

Considerando que a barra durante o processo de deformação manterá a sua forma cilíndrica, ou seja, assumindo-se deformação homogênea, um possível campo de velocidades seria:

$$V_r = \frac{V_D r}{2h}$$

$$V_z = -\frac{V_D z}{h}$$

$$V_\theta = 0$$

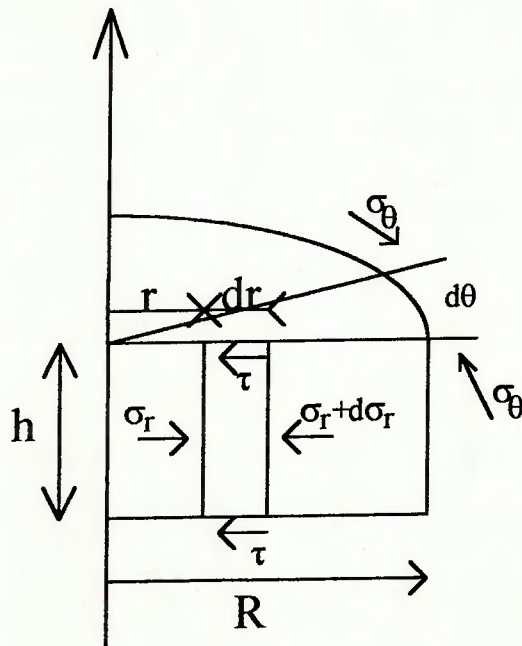


Figura A2.5 - Elemento utilizado na equação de equilíbrio para o caso de forjamento em matriz aberta sem canal de rebarba para escoamento axissimétrico.

Impondo o equilíbrio do elemento da Figura A2.5 na direção de  $r$  temos:

$$\sigma_r \cdot d\theta \cdot r \cdot h - (\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)h \cdot d\theta +$$

$$+ 2\sigma_\theta \cdot \sin \frac{d\theta}{2} \cdot h \cdot dr - 2\tau \cdot r \cdot d\theta \cdot dr = 0$$

como  $d\theta$  é muito pequeno pode-se considerar que  $\sin d\theta/2 = d\theta/2$ , substituindo e simplificando a equação temos:

$$-\sigma_r - \frac{d\sigma_r}{dr} r + \sigma_\theta - \frac{2\tau}{h} r = 0 \quad (2.38)$$



calculando-se as taxas de deformação do campo de velocidades temos:

$$\dot{\epsilon}_z = \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{V_D}{h}$$

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial V_r}{\partial r} = \frac{V_D}{2h}$$

$$\dot{\epsilon}_\theta = \frac{V_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} = \frac{V_D}{2h}$$

aplicando-se a regra de escoamento de Von Mises dada pelo conjunto de equações 2.28 obtemos a relação entre  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$

$$\sigma_r = \sigma_\theta \quad (2.39)$$

substituindo na equação 2.38, integrando e aplicando a condição de contorno  $\sigma_r=0$  para  $r=R$  temos:

$$\sigma_r = \frac{2\tau}{h}(r-R) \quad (2.40)$$

$\sigma_z$  pode ser obtido em função de  $\sigma_r$  utilizando o critério de escoamento de Von Mises dado em 2.28.

$$\sigma_z = \frac{2\tau}{h}(r-R) - \bar{\sigma} \quad (2.41)$$

integrando  $\sigma_z$  na face superior e substituindo  $\tau$ , obtém-se a força aplicada na direção de  $z$ .

$$L = \bar{\sigma} \cdot \pi \cdot R^2 \left( 1 + \frac{2mR}{3h\sqrt{3}} \right) \quad (2.42)$$

### Matriz Fechada com Canal de Rebarba, escoamento axissimétrico

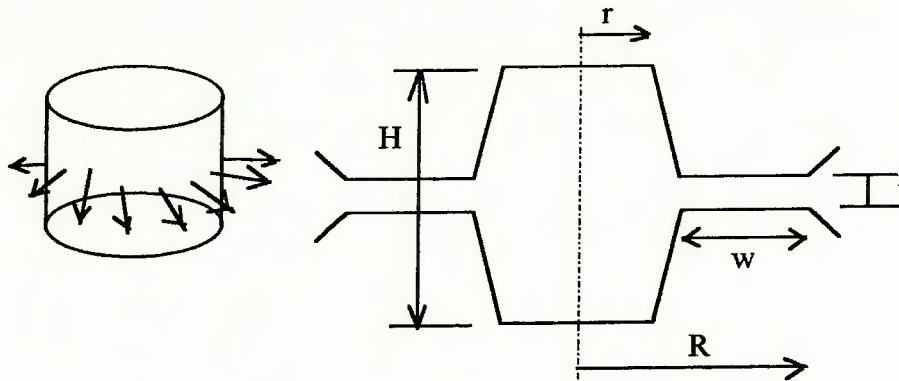


Figura A2.6 - Configuração geométrica e simbologia utilizada na formulação do caso de forjamento em matriz fechada com canal de rebarba para escoamento axissimétrico.

A tensão em  $z$  na entrada da cavidade pode ser obtida na equação 2.41 para  $R-r = w$

$$\sigma_{ca} = \left( \frac{2}{\sqrt{3}} m \frac{w}{t} + 1 \right) \sigma_f$$

onde:

$\sigma_{ca}$ : tensão na entrada da cavidade;

$m$ : fator de atrito;

$w$ : largura do canal de rebarba;

$t$ : espessura do canal de rebarba;

$\sigma_f$ : tensão de escoamento na região do canal de rebarba.

(2.43)

A força de forjamento na região de rebarba pode ser obtida através da integração da equação 2.41 para  $r$  variando de  $r$  até  $R$ .

$$P_{fa} = 2\pi\sigma_f \left[ -\frac{2}{3} \frac{m}{\sqrt{3}} \frac{l}{t} (R^3 - r^3) + \left( 1 + \frac{2}{\sqrt{3}} m \frac{R}{t} \right) \left( \frac{R^2 - r^2}{2} \right) \right]$$

onde:

$P_{fa}$  : força na região de rebarba;

(2.44)

$r$  : raio da cavidade;

$R = r + w$ ;

A força na região da cavidade pode ser obtida através da integração da equação 2.41 para  $r$  variando de 0 a  $r$ .

$$P_{ca} = 2\pi r^2 \left( \frac{m}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_c}{3} \frac{r}{H} + \frac{\sigma_{ca}}{2} \right)$$

onde:

$P_{ca}$  : força na região da cavidade;

(2.45)

$\sigma_c$  : tensão de escoamento na região da cavidade;

$H$  : altura da cavidade.

A força de forjamento na seção é obtida somando-se a força na região da rebarba com a força na região da cavidade.

### Matriz Fechada com Canal de Rebarba, escoamento plano

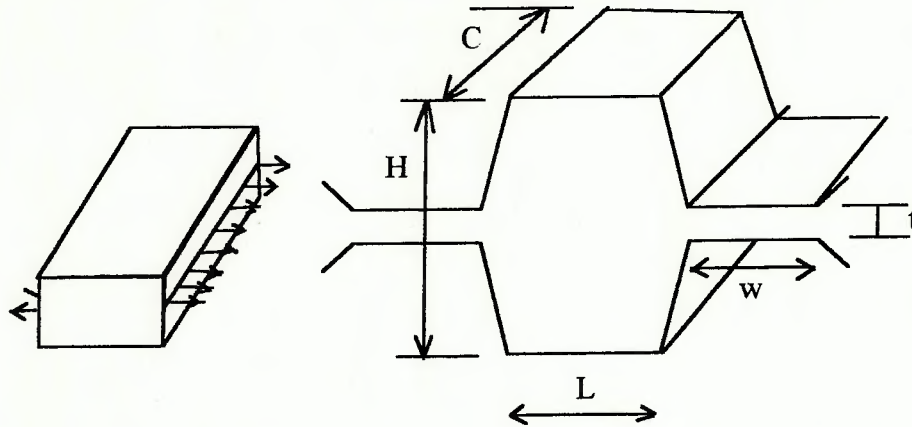


Figura A2.7 - Configuração geométrica e simbologia utilizada na formulação do caso de forjamento em matriz fechada com canal de rebarba para escoamento plano.

A tensão na entrada da cavidade pode ser obtida através da equação 2.37 para  $L=L+2w$  e  $x=L/2$  e vale:

$$\sigma_{cp} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_f \left( 1 + m \frac{w}{t} \right) \quad (2.46)$$

A força na região de rebarba pode ser obtida através da integração da equação 2.37 para  $x$  variando de  $L/2$  até  $L/2+w$

$$P_{fp} = \frac{2}{\sqrt{3}} w C \sigma_f \left( 2 + m \frac{w}{t} \right) \quad (2.47)$$

onde:

w: largura do canal de rebarba;

$\sigma_f$ : tensão de escoamento do material para as condições de deformação no canal de rebarba;

m: fator de atrito;

t: espessura do canal de rebarba;

C : comprimento da seção.

A força na região da cavidade pode ser obtida através da integração da equação 2.37 para x variando de 0 até L/2

$$P_{cp} = \left( \sigma_{cp} + \frac{L}{2H} \frac{m}{\sqrt{3}} \sigma_c \right) LC \quad (2.48)$$

onde:

$\sigma_c$ : tensão de escoamento na região da cavidade;

L: largura da seção;

H: altura da seção;

C: comprimento da seção.

A força de forjamento na seção é obtida somando-se a força na região da rebarba com a força na região da cavidade.

### **Referências Bibliográficas**

[ALTAN, 1983a]: ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H.L. **Metal Forming: Fundamentals and Applications**. USA, ASM, 1983. p. 37-99.

[ALTAN, 1983b]: ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H.L. **Metal Forming: Fundamentals and Applications**. USA, ASM, 1983. p. 131-138.

[SUBRAMANIAN; ALTAN, 1980]: SUBRAMANIAN, T.L.; ALTAN, T. A Practical Method for Estimating Forging Loads with the use of a Programmable Calculator. **Journal Applied Metal Working**, v.1, n.2, p.60-68, 1980.

## ANEXO 3

### Projeto de Forjados (THOMAS, 1985)

A geometria do forjado é obtida alterando-se a geometria do produto, estas alterações compatibilizam o formato geométrico da peça com o processo. Nesta transformação são considerados: sobremetal de usinagem, ângulos de saída, raios de arredondamento e canal de rebarba, representados na Figura A3.1.

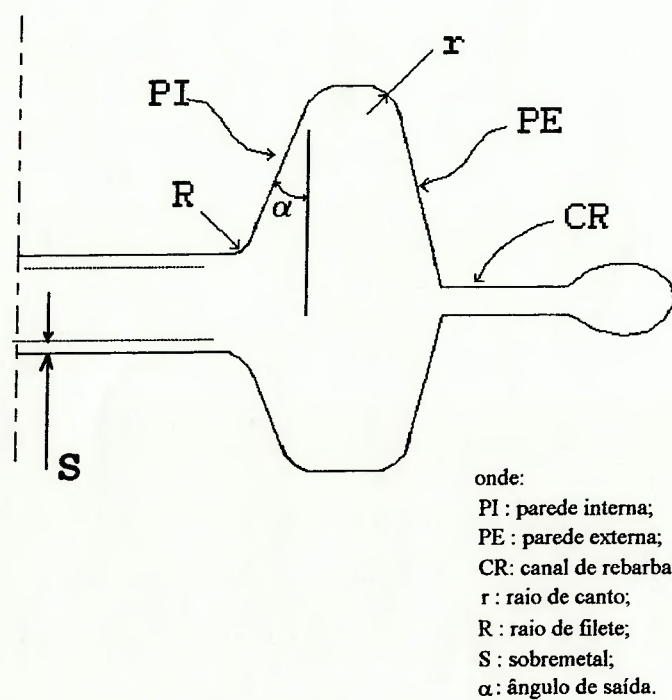


Figura A3.1 - Características geométricas do forjado.

A aplicação das recomendações de projeto é feita sequencialmente pelo projetista e esta sequência e o tipo de transformação geométrica são representadas na Figura A3.2.

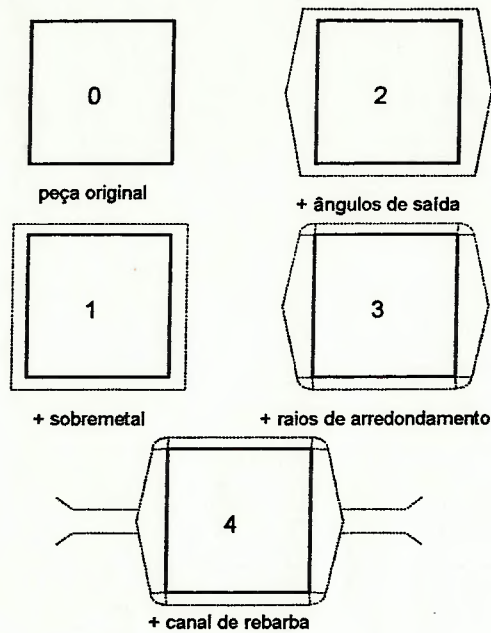


Figura A3.2 - Seqüência de projeto do forjado

O sobremetal de usinagem é acrescentado para compensar a contração térmica, no caso de forjamento a quente, e para suprimento de material necessário para uma usinagem posterior. O valor do sobremetal de usinagem depende da maior dimensão "D" da peça analisada. Na Tabela A3.1 apresentamos os valores adotados neste trabalho.

Tabela A3.1 - Valor de sobremetal

Maior Dimensão (D) [mm]	Sobremetal [mm]
até 20	1.0
de 20 a 80	1.5
de 80 a 150	2.0
de 150 a 250	3.0

Os ângulos de saída são acrescentados a geometria da peça para facilitar a sua extração da matriz. O valor do ângulo de saída depende do tipo de parede analisada,



interna ou externa, e do tipo de equipamento utilizado, prensa ou martelo. Os valores de ângulo de saída adotados neste trabalho são apresentados na Tabela A3.2.

Tabela A3.2 - Valores de ângulo de saída

Material	Matrizes de martelo		Matrizes de prensa	
	externo	interno	externo	interno
aços	50 - 70	70 - 100	30 - 50	50 - 70
ligas de alumínio				
ligas de titânio				
ligas à base de níquel				

Os raios de arredondamento de canto e de filete são ajustados para diminuir a concentração de tensões na matriz e para facilitar o escoamento do metal no interior da cavidade. O valor do raio depende do tipo de vértice, canto ou filete, e da profundidade associada a este vértice. O valor do raio de arredondamento depende da altura da nervura "H" que contém o raio. As expressões utilizados para calcular os raios são apresentadas na Tabela A3.3.

Tabela A3.3 - Expressões para cálculo de raio de canto e de filete

	Raio de Canto	Raio de Filete
Valor Recomendado [mm]	0.07 H	0.25 H
Valor Mínimo [mm]	0.04 H	0.17 H

Obs: o menor valor de raio utilizável é 1.5 mm.

O canal de rebarba tem como função restringir o fluxo de metal para fora da cavidade, com esta restrição ocorre um aumento das tensões no interior da cavidade facilitando o seu preenchimento. As dimensões características do canal de rebarba, largura, "w", e a espessura "t" são obtidas através de expressões empíricas. Existem diversas relações empíricas para a determinação das dimensões da passagem de rebarba, no caso de forjados axissimétricos a mais indicada é a expressão sugerida por Teterin & Tarnovski.(SLEECKX, 1992)

$$t = 2\sqrt[3]{W} - 0.01W - 0.09 \quad (3.1)$$

$$\frac{w}{t} = 0.0038 \frac{ZD}{t} + \frac{4.93}{W^{0.2}} - 0.2 \quad (3.2)$$

$$Z = \frac{\frac{P_f^2}{A_c} \cdot \frac{2r}{R}}{\frac{P_c^2}{A_c}} \quad (3.3)$$

onde:

t : espessura do canal de rebarba [mm];

W : massa do forjado [Kg];

w : largura do canal de rebarba [mm];

D : maior diâmetro do forjado [mm];

Z : fator de complexidade da seção;

$P_f$  : perímetro da seção longitudinal do forjado;

$P_c$  : perímetro da seção longitudinal do cilindro envolvente;

$A_f$  : área da seção longitudinal do forjado;

$A_c$  : área da seção longitudinal do cilindro envolvente;

r : posição do centro de gravidade da metade da seção longitudinal do forjado;

R : raio do cilindro envolvente.

## **Referências Bibliográficas**

[THOMAS, 1985]: THOMAS, G.B. **Forging Handbook**. USA, ASM, 1985.

[SLEECKX, 1992]: SLEECKX, E.; KRUTH, J.P. Review of flash design rules for closed-die forgings. **Journal of Materials Processing Technology**, v.31, n 1-2, p.119-134, 1992.

## APÊNDICE 1

### Expressões Utilizadas para o Cálculo do Valor da Força de Forjamento e sua respectiva Incerteza no Ensaio de Forjamento

```

program slaberro;

function pow(x,e:real):real;
begin
  pow:=exp(e*ln(x));
end;

function DesvioTensEsc(K,dk,h0,dh0,t,dt,n,dn:real):real;
var dsf_h0,dsf_t,dsf_n,dsf_k,dsf:real;
begin
  dsf_h0:= k*n*POW(LN(h0/t),n-1)/h0;

  dsf_t:= -k*n*POW(LN(h0/t),n-1)/t;

  dsf_n:= k*LN(LN(h0/t))*POW(LN(h0/t),n);

  dsf_k:= POW(LN(h0/t),n);

  dsf:=sqrt( sqr(dsf_h0*dh0)+sqr(dsf_t*dt)+sqr(dsf_n*dn)+sqr(dsf_k*dk));
  desvioTensEsc:=dsf;
end;

function DesvioL(sc,dsc,r,dr,m,dm,h,dh:real):real;
var dl_sc,dl_r,dl_m,dl_h,dl:real;
begin
  dl_sc:= SQR(3)*pi*SQR(r)*(3*SQR(3)*h+2*m*r)/(9*h);

  dl_r:= 2*SQR(3)*pi*r*sc*(SQR(3)*h+m*r)/(3*h);

  dl_m:= 2*SQR(3)*pi*POW(r,3)*sc/(9*h);

  dl_h:= -2*SQR(3)*m*pi*POW(r,3)*sc/(9*SQR(h));

  dl:=sqrt( sqr(dl_sc*dsc) + sqr(dl_r*dr) + sqr(dl_m*dm) + sqr(dl_h*dh) );
  desvioL:=dl;
end;

function DesvioSea(m,dm,w,dw,t,dt,sf,dsf:real):real;
var dsea_m,dsea_w,dsea_t,dsea_sf,dsea:real;
begin

  dsea_m:= 2*SQR(3)*sf*w/(3*t);

  dsea_w:= 2*SQR(3)*m*sf/(3*t);

  dsea_t:= -2*SQR(3)*m*sf*w/(3*SQR(t));

  dsea_sf:= SQR(3)*(2*m*w+SQR(3)*t)/(3*t);

  dsea:=sqrt( sqr(dsea_m*dm) + sqr(dsea_w*dw) + sqr(dsea_t*dt) + sqr(dsea_sf*dsf) );
  desvioSea:=dsea;
end;

function DesvioPfa(sf,dsf,m,dm,z,dz,r,dr,t,dt:real):real;
var d_sf,d_m,d_z,d_r,d_t:real;
begin

  d_sf:= SQR(3)*pi*(2*m*POW(z,3)+3*SQR(3)*t*SQR(z)-6*m*SQR(r)*z+4*m*POW(r,3)-
  3*SQR(3)*SQR(r)*t)/(9*t);

```

```

d_m:= 2*SQRT(3)*pi*sf*(POW(z,3)-3*SQR(r)*z+2*POW(r,3))/(9*t);
d_z:= 2*SQRT(3)*pi*sf*(m*SQR(z)+SQRT(3)*t*z-m*SQR(r))/(3*t);
d_r:= -2*SQRT(3)*pi*r*sf*(2*m*z-2*m*r+SQRT(3)*t)/(3*t);
d_t:= -2*SQRT(3)*m*pi*sf*(POW(z,3)-3*SQR(r)*z+2*POW(r,3))/(9*SQR(t));
desvioPfa:=sqrt( sqr(d_sf*dsf) + sqr(d_m*dm) + sqr(d_z*dz) + sqr(d_r*dr) + sqr(d_t*dt)
);
end;

function DesvioPca(r,dr,m,dm,sc,dsc,h,dh,sea,dsea:real):real;
var d_r,d_m,d_sc,d_h,d_sea:real;
begin

d_r:= 2*SQRT(3)*pi*r*(SQRT(3)*h*sea+m*r*sc)/(3*h);

d_m:= 2*SQRT(3)*pi*POW(r,3)*sc/(9*h);

d_sc:= 2*SQRT(3)*m*pi*POW(r,3)/(9*h);

d_h:= -2*SQRT(3)*m*pi*POW(r,3)*sc/(9*SQR(h));

d_sea:= pi*SQR(r);

desvioPca:=sqrt( sqr(d_r*dr) + sqr(d_m*dm) + sqr(d_sc*dsc) + sqr(d_h*dh) +
sqr(d_sea*dsea) );
end;

var
  arq,arqout:text;
  nomearq:string;
  h0,dh0,r0,dr0,m,dm,k,dk,n,dn,h,dh,sc,dsc,dlim,r,dr,l,dl,t,dt,w,dw,z,dz,sf,dsf,
  sea,dsea,pfa,dpfa,pca,dpca,a0,dmatriz,d,fexp:real;

begin
  h0:=16.90;
  dh0:=0.05/2;
  r0:=9.00/2;
  dr0:=0.05/4;
  a0:=pi*sqr(r0);
  m:=0.43;
  dm:=0.08;
  dmatriz:=10.00;
  dlim:=h0*(1-sqr(2*r0/dmatriz));
  K:=9.1;
  dk:=0.7;
  n:=0.30;
  dn:=0.05;

  write('nome arquivo entrada: ');readln(nomearq);
  assign(arq,nomearq);
  write('nome arquivo saida: ');readln(nomearq);
  assign(arqout,nomearq);
  rewrite(arqout);
  reset(arq);
  while not eof(arq) do
  begin
    readln(arq,d,fexp);
    h:=h0-d;
    dh:=0.08;
    sc:=K*pow(ln(h0/h),n);
    dsc:=DesvioTensEsc(K,dk,h0,dh0,h,dh,n,dn);

    if d<=dlim then

      begin
        r:=r0*sqr(h0/h);
        dr:=sqrt(h0*sqr(dr0)/h +sqr(r0*dh0)/(4*h*h0)+sqr(r0*dh)*h0/(4*pow(h,3)));
        L:=sc*pi*SQR(r)*(1+2*m*r/(3*h*SQR(3)));
        dl:=DesvioL(sc,dsc,r,dr,m,dm,h,dh);
      end

    else
      begin
        t:=h-8.8;
        dt:=dh;
      end
    end;
  end;
end;

```

```

w:=737+pi*t*27.826;
w:=sqrt( (a0*h0-w)/(pi*t) + 27.826 ) -5.275;
dw:=dh;

r:=dmatrix/2;
dr:=0.05/4;

z:=r+w;
dz:=sqrt( sqr(dr)+sqr(dw) );

sf:=k*pow(ln(h0/t),n);
dsf:=DesvioTensEsc(K,dk,h0,dh0,t,dt,n,dn);

sea:=(2*m*w/(SQRT(3)*t)+1)*sf;
dsea:=DesvioSea(m,dm,w,dw,t,dt,sf,dsf);

pfa:=2*pi*sf*(-2*m*(POW(z,3)-
POW(r,3))/(3*SQRT(3)*t)+(1+2*m*z/(t*SQRT(3)))*(SQR(z)-SQR(r))/2);
dpfa:=DesvioPfa(sf,dsf,m,dm,z,dz,r,dr,t,dt);

pca:=2*pi*SQR(r)*(m*sc*r/(3*SQRT(3)*h)+sea/2);
dpca:=DesvioPca(r,dr,m,dm,sc,dsc,h,dh,sea,dsea);

L:=pfa+pca;
dl:=sqrt( sqr(dpfa)+sqr(dpca) );

      end;
      writeln(arqout,d,' ',fexp*10,' ',L/100,' ',dl/100);
end;
close(arq);
close(arqout);
end.

```

## APÊNDICE 2

### Listagem do Programa Fonte do Forjaxis

#### Program ForjAxis:

```

uses UnDefTyp, UnDados, Graph, UnGraf;

Var GlbNomeArq:string;
    GlbGeomPeca, GlbGeomNor:TipoGeomForj;
    GlbDadosEntr:TipoDadosEntr;
    GlbDadosCalc:TipoDadosCalc;
    GlbOpc:integer;
    Gd, Gm:integer;

begin
  Gd:=VGA;
  gm:=vgalo;
  InitGraph(gd, gm, 'c:\tp\bgi');
  IniModGrafNor;
  NovoArquivo(GlbNomeArq, GlbGeomPeca, GlbGeomNor, GlbDadosEntr, GlbDadosCalc);
  Repeat
    MenuPrincipal(GlbOpc, GlbNomeArq);
    Case GlbOpc of
      1:CarregaArq(GlbNomeArq, GlbGeomPeca, GlbGeomNor, GlbDadosEntr, GlbDadosCalc);
      2:NovoArquivo(GlbNomeArq, GlbGeomPeca, GlbGeomNor, GlbDadosEntr, GlbDadosCalc);
      3:SalvaArq(GlbNomeArq, GlbGeomPeca, GlbGeomNor, GlbDadosEntr, GlbDadosCalc);
      4:EditaForjDados(GlbGeomPeca, GlbNomeArq);
      5:EditaDadosEntr(GlbDadosEntr, GlbNomeArq);
      6:CalculaDados(GlbNomeArq, GlbGeomPeca, GlbGeomNor, GlbDadosEntr, GlbDadosCalc);
      7:MostraResultados(GlbDadosCalc, GlbNomeArq);
      8:MostraForjDados(GlbGeomNor, GlbGeomPeca, GlbNomeArq);
      9:Imprime;
      10:ImportaArq(GlbNomeArq, GlbGeomPeca, GlbGeomNor, GlbDadosEntr, GlbDadosCalc);
      11:ExportaArq(GlbNomeArq, GlbGeomNor);
    end;
  Until GlbOpc=12;
  CloseGraph;
end.

```

#### Unit UnCalc:

```

interface
uses UnDefTyp;
function Distancia(x0,y0,x1,y1:real):real;
procedure PInters(x0,y0,vx,vy,x01,y01,vx1,vy1:real;Var x,y:real);
procedure Calcula(var de:TipoDadosEntr;var dc:TipoDadosCalc;
    var g:TipoGeomForj;var flgerro:boolean;var sterro:string);
Function Existe(narq:string):boolean;

implementation

Function Existe(narq:string):boolean;
Var
fil:file;
begin
  Assign(fil, narq);
  {$I-}
  reset(fil);
  {$I+}
  Existe:=(IOresult=0);
end;

function potint(x:real;n:integer):real;
var aux:real;

```

```

begin
  aux:=1;
  while n>0 do begin
    aux:=aux*x;
    n:=n-1;
  end;
  potint:=aux;
end;

function Distancia(x0,y0,x1,y1:real):real;
begin
  distancia:=sqrt(sqrt(x0-x1)+sqrt(y0-y1));
end;

function Quadrante(x,y:real):integer;
begin
  if x*y>0 then begin
    if x>0 then quadrante:=1
    else quadrante:=3;
  end
  else begin
    if x>0 then quadrante:=4
    else quadrante:=2;
  end;
end;

function InclI(xp,yp,x1,y1:real):real;
var aux:real;
begin
  if yp=y1 then begin
    if xp>x1 then aux:=180
    else aux:=0;
  end
  else begin
    if xp=x1 then begin
      if yp<y1 then aux:=90
      else aux:=270;
    end
    else begin
      xp:=x1-xp;
      yp:=y1-yp;
      aux:=arctan(yp/xp)*180/PI;
      Case quadrante(xp,yp) of
        2:aux:=aux+180;
        3:aux:=aux+180;
        4:aux:=aux+360;
      end; {case}
    end;
  end;
  incli:=aux;
end;

function AngInt(t2,t1:real):char;
Var aux:real;
begin
  aux:=180-t2+t1;
  if aux>360 then aux:=aux-360;
  if aux<0 then aux:=aux+360;
  if aux<180 then angint:='s'
  else angint:='r';
end;

procedure IdentificaCorner(var x,y:vetcor;var ident:vetident;np:integer);
Var
  ia,ip:real;
  i:integer;
begin
  (* marca o primeiro e ultimo pto como ptos de contorno *)
  ident[1]:='b';
  ident[np]:='b';
  ia:=inclI(x[1],y[1],x[2],y[2]);
  for i:=2 to np-1 do
    begin
      ip:=inclI(x[i],y[i],x[i+1],y[i+1]);
      ident[i]:=AngInt(ip,ia);
    end;
end;

```



```

    ia:=ip;
    end;
    end;

Procedure PVersor(x,y:real;Var xv,yv:real);
var aux:real;
begin
    aux:=sqrt(sqr(x)+sqr(y));
    xv:=x/aux;
    yv:=y/aux;
end;

Procedure PInters(x0,y0,vx,vy,x01,y01,vx1,vy1:real;Var x,y:real);
var L:real;
begin
    L:=(vx*(y01-y0)-vy*(x01-x0))/(vx1*vy-vx*vy1);
    x:=x01+L*vxl;
    y:=y01+L*vyl;
end;

Procedure PRoda(x,y,a:real;Var xr,yr:real);
begin
    a:=a*pi/180;
    xr:=x*cos(a)-y*sin(a);
    yr:=x*sin(a)+y*cos(a);
end;

Procedure PADicToler(var x,y:vetcor;np:integer;xsim,toler:real);
var x0,y0,vx,vy,xa,ya,inx,iny:real;
    i:integer;
begin
    inx:=x[2]-x[1];
    iny:=y[2]-y[1];
    PRoda(inx,iny,-90,vx,vy);
    PVersor(vx,vy,vx,vy);
    x0:=x[1]+toler*vxl;
    y0:=y[1]+toler*vyl;
    xa:=x[1];
    ya:=y[1];
    PInters(x0,y0,inx,iny,xsim,0,0,1,x[1],y[1]);
    for i:=2 to np-1 do
        begin
            PRoda(x[i+1]-x[i],y[i+1]-y[i],-90,vx,vy);
            PVersor(vx,vy,vx,vy);
            x0:=x[i]+toler*vxl;
            y0:=y[i]+toler*vyl;
            xa:=x[i];
            ya:=y[i];
            PInters(x0,y0,x[i+1]-xa,y[i+1]-ya,x[i-1],y[i-1],inx,iny,x[i],y[i]);
            inx:=x[i+1]-xa;
            iny:=y[i+1]-ya;
        end;
    PInters(x[np-1],y[np-1],inx,iny,xsim,0,0,1,x[np],y[np]);
end;

Procedure PInserePtoReb(Var x,y,r:vetcor;var ident:vetident;var np:integer;
    xsim,yreb:real);
const nmaxptosreb=5;
var i,p,pmax:integer;
    flgins:array[1..nmaxptosreb] of integer;
    xreb:array[1..nmaxptosreb] of real;
    aux,dist:real;

begin
    p:=0;
    for i:=1 to np-1 do
        begin
            if (y[i]-yreb)*(y[i+1]-yreb)<0
                then begin
                    p:=p+1;
                    PInters(0,yreb,1,0,x[i],y[i],x[i+1]-x[i],y[i+1]-y[i],xreb[p],aux);
                    flgins[p]:=i;
                end
        end
    end;
end;

```

```

else begin
  if y[i]=yreb then begin
    p:=p+1;
    xreb[p]:=x[i];
    flgins[p]:=-i;
  end;
end;
end;
dist:=-1;
for i:=1 to p do
  if abs(xsim-xreb[i])>dist then begin
    dist:=abs(xsim-xreb[i]);
    pmax:=i;
  end;
if p>0 then begin
  if flgins[pmax]>0
  then begin
    for i:=np downto flgins[pmax]+1 do
      begin
        x[i+1]:=x[i];
        y[i+1]:=y[i];
        r[i+1]:=r[i];
        ident[i+1]:=ident[i];
      end;
    x[flgins[pmax]+1]:=xreb[pmax];
    y[flgins[pmax]+1]:=yreb;
    r[flgins[pmax]+1]:=0;
    ident[flgins[pmax]+1]='f';
    np:=np+1;
  end
  else ident[-flgins[pmax]]='f';
end;
end;

Function FTipoPareda(x0,y0,x1,y1,xs:real):char;
var vx,vy:real;
begin
  PVersor(x1-x0,y1-y0,vx,vy);
  PRoda(vx,vy,-90,x1,y1);
  if (xs-x0)*x1>0 then FTipoPareda:='I'
  else FTipoPareda:='E';
end;

Procedure PAngSaida(var x,y:vetcor;var ident:vetident;np:integer;
  xsim,yreb:real;AngInt,AngExt:real);
var pincli,giro,vx,vy,Amin,xl,y1:real;
  c1,c2:boolean;
  i:integer;
begin
  (* Angulo Minimo *)
  for i:=2 to np-2 do
    begin
      if FTipoPareda(x[i],y[i],x[i+1],y[i+1],xsim)='I'
      then Amin:=AngInt
      else Amin:=AngExt;
      pincli:=Incli(x[i],y[i],x[i+1],y[i+1]);
      c1:=(pincli>90-Amin)and(pincli<90+Amin);
      c2:=(pincli>270-Amin)and(pincli<270+Amin);
      if c1 or c2 then
        begin
          if c1 then giro:=Amin-abs(90-pincli)
          else giro:=Amin-abs(270-pincli);

          if (ident[i]='s')and(ident[i+1]='r')
          then begin
            Proda(x[i+1]-x[i],y[i+1]-y[i],-giro,vx,vy);
            PInters(x[i],y[i],vx,vy,x[i+1],y[i+1],x[i+2]-x[i+1],
              y[i+2]-y[i+1],xl,y1);
            x[i+1]:=xl;
            y[i+1]:=yl;
          end;
          if (ident[i]='s')and(ident[i+1]='f')
          then begin
            Proda(x[i+1]-x[i],y[i+1]-y[i],-giro,vx,vy);

```

```

        PInters(x[i],y[i],vx,vy,0,yreb,1,0,xl,yl);
        x[i+1]:=xl;
        y[i+1]:=yl;
    end;
    if (ident[i]='r')and(ident[i+1]='s')
    then begin
        Proda(x[i+1]-x[i],y[i+1]-y[i],giro,vx,vy);
        PInters(x[i+1],y[i+1],vx,vy,x[i],y[i],x[i-1]-x[i],
            y[i-1]-y[i],xl,yl);
        x[i]:=xl;
        y[i]:=yl;
    end;
    if (ident[i]='f')and(ident[i+1]='s')
    then begin
        Proda(x[i+1]-x[i],y[i+1]-y[i],giro,vx,vy);
        PInters(x[i+1],y[i+1],vx,vy,0,yreb,1,0,xl,yl);
        x[i]:=xl;
        y[i]:=yl;
    end;
end;
end;
end;

Procedure PVerificaRaios(var g:TipoGeomForj);
var i:integer;
    h,Rrec,Rmin:real;
begin
    for i:=1 to g.np do
        if (g.vi[i]='s') or (g.vi[i]='r') then
            begin
                (* Calculo da Altura Associada *)
                if abs(g.vy[i]-g.vy[i+1]) > abs(g.vy[i]-g.vy[i-1])
                then h:=abs(g.vy[i]-g.vy[i+1])
                else h:=abs(g.vy[i]-g.vy[i-1]);
                if g.vi[i]='s' then begin
                    Rrec:=0.07*h;
                    Rmin:=0.04*h;
                end
                else begin
                    Rrec:=0.25*h;
                    Rmin:=h/6;
                end;
                if Rrec<1.5 then Rrec:=1.5;
                if Rmin<1.5 then Rmin:=1.5;
                if g.vr[i]=0 then g.vr[i]:=Rrec
                else if g.vr[i]<Rmin then g.vr[i]:=Rmin;
            end;
        end;
    end;

Procedure PCGArea(var xcg,at:real;Var x,y:vetcor;np:integer);
var i:integer;
    prod,ai,xcgi:real;
begin
    at:=0;
    prod:=0;
    for i:=1 to np-1 do
        if (y[i]+y[i+1])<> 0 then
            begin
                xcgi:=(x[i]*(2*y[i]+y[i+1])+x[i+1]*(y[i]+2*y[i+1]))/(3*(y[i]+y[i+1]));
                ai:=(y[i]+y[i+1])*(x[i+1]-x[i])/2;
                at:=at+ai;
                prod:=prod+xcgi*ai;
            end;
        if at<>0 then xcg:=prod/at;
    end;

Procedure PCanalReb(var w,t:real;peso,Z,D:real);
begin
    t:=2*exp(1/3*ln(peso))-0.01*peso-0.09;
    w:=t*( 0.0038*Z*D/t + 4.93/exp(0.2*ln(peso)) -0.2 );
end;

Procedure PMayorMenorVet(var v:vetcor;np:integer;var Max,Min:real);
var i:integer;

```

```

begin
  max:=v[1];
  min:=max;
  for i:=2 to np do
    if v[i]>max then max:=v[i]
      else if v[i]<min then min:=v[i];
  end;

procedure PValToler(var g:TipoGeomForj;var toler:real);
var DMax,DMin:real;
    vetd,vets:array[1..5] of real;
    i,iult:integer;
begin
  (* Tabela de Tolerancia *)
  Iult:=4;
  vetd[1]:=20;vets[1]:=1;
  vetd[2]:=80;vets[2]:=1.5;
  vetd[3]:=150;vets[3]:=2.0;
  vetd[4]:=250;vets[4]:=3.0;

  (* Diametro Maximo da Peca *)
  PMaiorMenorVet(g.vx,g.np,DMax,DMin);
  DMax:=2*(Dmax-DMin);
  i:=1;
  while (i<=iult) and (DMax>vetd[i]) do i:=i+1;
  if i<=iult then toler:=vets[i] else toler:=vets[iult];
end;

Procedure FatorComplexidade(Pf,Af,Xcg,H,D:real;var Z:real);
var Pc,Ac,R:real;
begin
  R:=D/2;
  Pc:=2*R*H;
  Ac:=R*H;
  Z:=sqr(Pf/Pc)*Ac*2*Xcg/(R*Af);
end;

Procedure PDimMax(var D,H:real;var x,y:vetcor;np:integer;xsim:real);
var max,min:real;
begin
  PMaiorMenorVet(x,np,max,min);
  D:=2*(max-min);
  PMaiorMenorVet(y,np,max,min);
  H:=max-min;
end;

Procedure Perimetro(var x,y:vetcor;np:integer;var per:real);
var i:integer;
begin
  per:=0;
  for i:=1 to np-1 do
    per:=per+sqr(sqr(y[i+1]-y[i])+sqr(x[i+1]-x[i]));
  end;

Procedure PTemperatura(t0,tm,t,c,p,h:real;var tf:real);
const a=1;
begin
  tf:=tm+(t0-tm)*exp(-2*a*t/(c*p*h));
end;

Procedure PVMtCtd(tipoequi:char;par1,par2,hi,hf:real;var vm,tc,td:real);
var aux:real;
begin
  case tipoequi of
    'M':begin
      vm:=1000*sqr(20*par2)/2; (* mm/s *)
      tc:=(hi-hf)/vm;
      td:=2*vm/(hi+hf);
    end;
    'E':begin
      aux:=(hi-hf)/2;
      vm:=aux*pi*par2*sqr(par1/aux-1)/30;
      tc:=(hi-hf)/vm;
    end;
  end;
end;

```

```

        td:=2*vm/(hi+hf);
    end;
'H':begin
    vm:=par1;
    tc:=(hi-hf)/vm;
    td:=vm/hf;
end;
else begin
    vm:=0;
    tc:=0;
    td:=0;
end;
end;
end;
end;

Procedure PTensaoEscFrio(k,n,e:real;var sy:real);
begin
    sy:=k*exp(n*ln(e));
end;

Procedure PLimitel2(x:real;var v:vettabcm;n:integer;var lc1,lc2:integer);
var i:integer;
begin
    if x<=v[1]
    then begin
        lc1:=1;
        lc2:=1;
    end
    else begin
        if x>=v[n]
        then begin
            lc1:=n;
            lc2:=n;
        end
        else begin
            i:=2;
            while x>v[i] do i:=i+1;
            lc1:=i-1;
            lc2:=i;
        end;
    end;
end;

end;

Procedure PCalcCm(var vtemp,vdef:vettabcm;l1,l2,c1,c2:integer;t,d:real;
var m:mattabcm;var x:real);
var v1,v2:real;
begin
    if vtemp[c1]=vtemp[c2]
    then begin
        v1:=m[l1,c1];
        v2:=m[l2,c1];
    end
    else begin
        v1:=(m[l1,c2]-m[l1,c1])/(vtemp[c2]-vtemp[c1])*
            (t-vtemp[c1])+m[l1,c1];
        v2:=(m[l2,c2]-m[l2,c1])/(vtemp[c2]-vtemp[c1])*
            (t-vtemp[c1])+m[l2,c1];
    end;
    if vdef[l1]=vdef[l2]
    then x:=v1
    else x:=(v2-v1)/(vdef[l2]-vdef[l1])*(d-vdef[l1])+v1;
end;

Procedure PInterpolaCm(var vtemp,vdef:vettabcm;n1,nc:integer;
var mc,mm:mattabcm;t,d:real;
var C,m:real);
var l1,l2,c1,c2,i:integer;
begin
    if (n1=0)or(nc=0)
    then begin
        C:=0;
        m:=0;
    end
    else begin
        PLimitel2(t,vtemp,nc,c1,c2);
    end;
end;

```

```

        PLimitel2(d,vdef,nl,l1,l2);
        PCalcCm(vtemp,vdef,l1,l2,c1,c2,t,d,mc,C);
        PCalcCm(vtemp,vdef,l1,l2,c1,c2,t,d,mm,m);
    end;
end;

Procedure PTensaoEscQuente(c,m,td:real;var sy:real);
begin
    sy:=C*exp(m*ln(td));
end;

Procedure PTensEntCav(m,w,t,syf:real;var syea:real);
begin
    syea:=syf*(2*m*w/(sqrt(3)*t)+1);
end;

Procedure PForcaRebarba(syf,m,t,w,r:real;var Fr:real);
var rl:real;
begin
    rl:=r+w;
    Fr:=(rl+r)*(rl-r)/2;
    Fr:=Fr*(1+2*m*rl/(sqrt(3)*t));
    Fr:=Fr-2*m*(potint(rl,3)-potint(r,3))/(3*sqrt(3)*t);
    Fr:=Fr*2*pi*syf;
end;

Procedure PForcaCavidade(r,m,syc,h,syea:real;var Fc:real);
begin
    Fc:=2*pi*sqr(r)*(m*syc*r/(3*sqrt(3)*h)+syea/2);
end;

Procedure LePropMat(nomearq:string;var p:TipoPropMat);
var arq:text;
    i,j:integer;

begin
    assign(arq,nomearq);
    reset(arq);
    readln(arq,p.K);
    readln(arq,p.n);
    readln(arq,p.c);
    readln(arq,p.p);
    readln(arq,p.temptran);
    readln(arq,p.tabcm.nl);
    readln(arq,p.tabcm.nc);
    for i:=1 to p.tabcm.nc do
        read(arq,p.tabcm.vtemp[i]);
    readln(arq);
    for i:=1 to p.tabcm.nl do
        begin
            read(arq,p.tabcm.vdef[i]);
            for j:=1 to p.tabcm.nc do
                read(arq,p.tabcm.mc[i,j],p.tabcm.mm[i,j]);
            readln(arq);
        end;
    close(arq);
end;

procedure Calcula(var de:TipoDadosEntr;var dc:TipoDadosCalc;
    var g:TipoGeomForj;var flgerro:boolean;var sterro:string);
var pm:TipoPropMat;
    glbtol,glbxcg,glbat,glbd,glbh,glbper,glbhmed,glbc,glbm:real;
    deb:text;

begin
    assign(de,'saida.pas');
    rewrite(de);

    flgerro:=false;
    (* leitura das propriedades do material *)
    if not existe(de.nomearqmat) then
        begin
            flgerro:=true;
            sterro:='arquivo de propriedades do material nao encontrado';
            exit;
        end;
end;

```

```

LePropMat (de.nomearqmat,pm);
PValToler (g,glbtol);
PADicToler (g.vx,g.vy,g.np,g.xs,glbtol);
IdentificaCorner (g.vx,g.vy,g.vi,g.np);
PInserePtoReb (g.vx,g.vy,g.vr,g.vi,g.np,g.xs,g.yr);
if de.TipoEquip='M'
    then PAngSaida (g.vx,g.vy,g.vi,g.np,g.xs,g.yr,9,6)
    else PAngSaida (g.vx,g.vy,g.vi,g.np,g.xs,g.yr,6,4);
PVerificaRaios (g);

(*exit;*)

PCGArea (glbxcg,glbat,g.vx,g.vy,g.np);
glbxcg:=abs (glbxcg-g.xs);
glbat:=abs (glbat);
writeln (deb,glbxcg,glbat);

dc.massa:=(pm.p*1.0e-9)*2*pi*glbxcg*glbat;
PDimMax (glbD,glbH,g.vx,g.vy,g.np,g.xs);
Perimetro (g.vx,g.vy,g.np,glbper);
FatorComplexidade (glbper,glbat,glbXcg,glbH,glbD,dc.fatorcompl);
PCanalReb (dc.w,dc.t,dc.massa,dc.fatorcompl,glbD);
glbHmed:=2*glbat/glbD;

(* Rebarba *)
PvmTcTd (de.TipoEquip,de.par1,de.par2,de.HEtapaAntReb,dc.t,dc.VelMediaReb,
dc.TempoContato,dc.TaxaDefReb);
dc.defreb:=abs (ln (abs (de.HInicMatPrima/dc.t)));

(* Cavidade *)
PvmTcTd (de.TipoEquip,de.par1,de.par2,de.HEtapaAntCav,glbHMed,dc.VelMediaCav,
dc.TempoContato,dc.TaxaDefCav);
dc.defcav:=abs (ln (de.HInicMatPrima/GlbHMed));
PTemperatura (de.tempmatprima,de.tempmatriz,dc.TempoContato,pm.c,pm.p,
glbHMed,dc.TempMedia);
if dc.TempMedia<pm.TempTran
    then begin
        PTensaoEscFrio (pm.K,pm.n,dc.defreb,dc.syreb);
        PTensaoEscFrio (pm.K,pm.n,dc.defcav,dc.sycav);
    end
    else begin
        PInterpolaCm (pm.tabcm.vtemp,pm.tabcm.vdef,pm.tabcm.nl,
            pm.tabcm.nc,pm.tabcm.mc,pm.tabcm.mm,dc.TempMedia,
            dc.defreb,glbC,glbm);
        PTensaoEscQuente (glbC,glbm,dc.TaxaDefReb,dc.syreb);
        PInterpolaCm (pm.tabcm.vtemp,pm.tabcm.vdef,pm.tabcm.nl,
            pm.tabcm.nc,pm.tabcm.mc,pm.tabcm.mm,dc.TempMedia,
            dc.defcav,glbC,glbm);
        PTensaoEscQuente (glbC,glbm,dc.TaxaDefCav,dc.SyCav);
    end;
PTensEntCav (de.fatoratrito,dc.w,dc.t,dc.syreb,dc.syea);
PForcaRebarba (dc.syreb,de.fatoratrito,dc.t,dc.w,glbD/2,dc.Fr);
PForcaCavidade (glbD/2,de.fatoratrito,dc.sycav,glbHmed,dc.syea,dc.Fc);
dc.ft:=dc.Fc+dc.Fr;
close (deb);
end;

end.

```

## Unit UnDados;

```

interface
    uses ungraf,uneditor,crt,graph,undeftyp,uncalc,uniges;

    procedure MenuPrincipal (var opc:integer;arq:string);
    procedure EditaDadosEntr (var DE:TipoDadosEntr;arq:string);
    procedure MostraResultados (var dc:TipoDadosCalc;arq:string);
    procedure NovoArquivo (var nomarq:string;var dg,dgn:TipoGeomForj;
        var de:TipoDadosEntr;var dc:TipoDadosCalc);
    procedure SalvaArq (var nomarq:string;var dg,dgn:TipoGeomForj;
        var de:TipoDadosEntr;var dc:TipoDadosCalc);
    procedure CarregaArq (var nomarq:string;var dg,dgn:TipoGeomForj;
        var de:TipoDadosEntr;var dc:TipoDadosCalc);

```

```

procedure Imprime;
procedure CalculaDados(arq:string;var dg,dgn:TipoGeomForj;
    var de:TipoDadosEntr;var dc:TipoDadosCalc);
procedure EditaForjDados(var g:TipoGeomForj;arq:string);
procedure MostraForjDados(var gn,gp:TipoGeomForj;arq:string);
procedure ImportaArq(var nomarq:string;var dg,dgn:TipoGeomForj;
    var de:TipoDadosEntr;var dc:TipoDadosCalc);

procedure ExportaArq(var nomarq:string;var dgn:TipoGeomForj);

implementation

procedure Imprime;
begin
end;

procedure Moldura(titulo,nomearq:string);
var c0,l0,c1,l1:integer;
begin
    DefJanela(1,0,1,1,0);
    AtivaJanela(1);
    LimpaJanAtiva;
    PosCentrLinCol(1,1,l0,c0);
    PosCentrLinCol(24,80,l1,c1);
    rectangle(c0,l0,c1,l1);
    PosCentrLinCol(3,1,l0,c0);
    PosCentrLinCol(5,80,l1,c1);
    rectangle(c0,l0,c1,l1);
    titulo:='F O R J A X I S - '+titulo;
    Escreve(titulo,2,(80-length(titulo)) div 2);
    nomearq:='ARQUIVO : '+nomearq;
    Escreve(nomearq,4,(80-length(nomearq)) div 2);
end;

procedure MenuPrincipal(var opc:integer;arq:string);
var stleit:string;
    termina:boolean;
begin
    Moldura('MENU PRINCIPAL',arq);
    Escreve('1 - Carrega Arquivo do Disco',7,5);
    Escreve('2 - Novo Arquivo',9,5);
    Escreve('3 - Salva Arquivo',11,5);
    Escreve('4 - Edita Geometria',13,5);
    Escreve('5 - Edita Dados De Calculo',15,5);
    Escreve('6 - Calculo',17,5);
    Escreve('7 - Acessa Resultados Analiticos',19,5);
    Escreve('8 - Acessa Resultados Geometricos',21,5);
    Escreve('9 - Imprime Resultados',7,45);
    Escreve('10- Importa IGES',9,45);
    Escreve('11- Exporta IGES',11,45);
    Escreve('12- Fim',13,45);
    Escreve('Mensagem : Digite sua opcao :',25,1);
    opc:=0;
    termina:=false;
    repeat
        stleit:='';
        ApagaTexto(25,31,25,32);
        GetStr(25,31,2,stleit);
        le;
        termina:=ConvNumInt(stleit,opc);
        if termina then termina:=(opc>=1) and (opc<=12);
    until termina;
end;

procedure CalculaDados(arq:string;var dg,dgn:TipoGeomForj;
    var de:TipoDadosEntr;var dc:TipoDadosCalc);

var flg:boolean;
    st:string;
begin
    Moldura('Calculo da Geometria e Esforços',arq);
    Escreve('Aguarde o processamento',10,5);

```



```

dgn:=dg;
Calcula(de,dc,dgn,flg,st);
if flg then Escreve(st,15,5);
delay(2000);
end;

procedure EditaForjDados(var g:TipoGeomForj;arq:string);
begin
Moldura('Edicao da Geometria da Peca',arq);
EditaForj(g);
end;

procedure MostraForjDados(var gn,gp:TipoGeomForj;arq:string);
begin
Moldura('Resultados Geometricos',arq);
MostraForj(gn,gp);
end;

procedure EditaDadosEntr(var DE:TipoDadosEntr;arq:string);
var sttempmatriz,sttempmatPrima,stHInicMatPrima,stHEtapaAntCav,
stHEtapaAntreb,stpar1,stpar2,stFatorAtrito,sttipoequip : string;
flg:boolean;
begin
Moldura('Edita Dados de Calculo',arq);

Escreve('Temperatura da Matriz ("C):',6,3);
Str(de.TempMatriz:10:2,sttempmatriz);
GetStr(6,52,10,sttempmatriz);

Escreve('Temperatura da Materia-Prima ("C):',7,3);
Str(de.TempMatPrima:10:2,sttempmatPrima);
GetStr(7,52,10,sttempmatPrima);

Escreve('Altura Inicial da Materia-Prima (mm):',8,3);
Str(de.HInicMatPrima:10:2,stHInicMatPrima);
GetStr(8,52,10,stHInicMatPrima);

Escreve('Altura na Etapa Anterior da Cavidade (mm):',9,3);
Str(de.HEtapaAntCav:10:2,stHEtapaAntCav);
GetStr(9,52,10,stHEtapaAntCav);

Escreve('Altura na Etapa Anterior do Canal de Rebarba(mm):',10,3);
Str(de.HEtapaAntreb:10:2,stHEtapaAntreb);
GetStr(10,52,10,stHEtapaAntreb);

Escreve('Tipo de Equipamento(E-excentr.;M-martelo;H-hidraul.;P-parafuso):',12,3);
Escreve('Parametro 1 (rot (rpm);massa(Kg);Vel(mm/s) ; ):',13,3);
Escreve(' " 2 (curso(mm);altura(m); - ; ):',14,3);
sttipoequip:=de.TipoEquip;
GetStr(12,68,1,sttipoequip);
Str(de.par1:10:2,stpar1);
GetStr(13,68,10,stpar1);
Str(de.par2:10:2,stpar2);
GetStr(14,68,10,stpar2);

Escreve('Nome do Arquivo de Dados do Material :',16,3);
GetStr(16,41,12,de.nomearqmat);

Escreve('Fator de Atrito m :',17,3);
Str(de.FatorAtrito:10:2,stFatorAtrito);
GetStr(17,41,10,stFatorAtrito);

Le;
de.TipoEquip:=sttipoequip[1];
flg:=ConvNum(sttempmatriz,de.tempmatriz);
flg:=ConvNum(sttempmatPrima,de.tempmatPrima);
flg:=ConvNum(stHInicMatPrima,de.HInicMatPrima);
flg:=ConvNum(stHEtapaAntCav,de.HEtapaAntCav);
flg:=ConvNum(stHEtapaAntreb,de.HEtapaAntreb);
flg:=ConvNum(stpar1,de.par1);
flg:=ConvNum(stpar2,de.par2);
flg:=ConvNum(stFatorAtrito,de.FatorAtrito);
end;

procedure MostraResultados(var dc:TipoDadosCalc;arq:string);

```

```

var tecla:char;
    flg:boolean;
begin
    Moldura('Resultados do Calculo',arq);

    Escreve('Temperatura Media ("C)  :',6,3);
    EscreveReal(dc.TempMedia,12,2,6,28);

    Escreve('Tempo de Contato ( s)  :',7,3);
    EscreveReal(dc.TempoContato,12,2,7,28);

    Escreve('Massa do Forjado (Kg)  :',8,3);
    EscreveReal(dc.Massa,12,3,8,28);

    Escreve('Canal de Rebarba w (mm)  :',9,3);
    EscreveReal(dc.w,12,2,9,28);

    Escreve('          t (mm)  :',10,3);
    EscreveReal(dc.t,12,2,10,28);

    Escreve('Fator de Complexidade Z  :',11,3);
    EscreveReal(dc.FatorComp1,12,2,11,28);

    Escreve('Vel.Media Cavidade(mm/s):',12,3);
    EscreveReal(dc.VelMediaCav,12,2,12,28);

    Escreve('          Rebarba (mm/s):',13,3);
    EscreveReal(dc.VelMediaReb,12,2,13,28);

    Escreve('Taxa Def. Cavidade (1/s):',14,3);
    EscreveReal(dc.TaxaDefCav,12,3,14,28);

    Escreve('          Rebarba (1/s):',15,3);
    EscreveReal(dc.TaxaDefReb,12,3,15,28);

    Escreve('Deformacao Cavidade      :',16,3);
    EscreveReal(dc.defcav,12,3,16,28);

    Escreve('          Rebarba          :',17,3);
    EscreveReal(dc.defreb,12,3,17,28);

    Escreve('Sy Cavidade      (Kp/mm2):',18,3);
    EscreveReal(dc.SyCav,12,3,18,28);

    Escreve('Sy Rebarba      (Kp/mm2):',19,3);
    EscreveReal(dc.SyReb,12,3,19,28);

    Escreve('Sy Entr.Cavidade(Kp/mm2):',20,3);
    EscreveReal(dc.SyEA,12,3,20,28);

    Escreve('Forca Cavidade (Kp)  :',21,3);
    EscreveReal(dc.Fc,12,2,21,28);

    Escreve('Forca Rebarba (Kp)  :',22,3);
    EscreveReal(dc.Fr,12,2,22,28);

    Escreve('Forca Total (Kp)  :',23,3);
    EscreveReal(dc.Ft,12,2,23,28);

    Escreve('Mensagem : Tecla Algo para Continuar',25,2);
    LeTecla(tecla,flg);
end;

procedure InicializaDadosEntr(var de:TipoDadosEntr);
begin
    de.TempMatriz := 0;
    de.TempMatPrima :=0;
    de.TipoEquip :=' ';
    de.par1 :=0;
    de.par2 :=0;
    de.HInicMatPrima :=0;
    de.HEtapaAntCav :=0;
    de.HEtapaAntReb :=0;
    de.FatorAtrito :=0;
    de.NomeArqMat:='';

```

```

end;

procedure InicializaDadosCalc(var dc:TipoDadosCalc);
begin
  dc.TempMedia :=0;
  dc.Massa :=0;
  dc.w :=0;
  dc.t :=0;
  dc.FatorCompl :=0;
  dc.TempoContato :=0;
  dc.VelMediaCav :=0;
  dc.VelMediaReb :=0;
  dc.TaxaDefCav :=0;
  dc.TaxaDefReb :=0;
  dc.SyCav :=0;
  dc.SyReb :=0;
  dc.SyEA :=0;
  dc.Fc :=0;
  dc.Fr :=0;
  dc.Ft:=0;
  dc.defcav:=0;
  dc.defreb:=0;
end;

procedure InicializaDadosGeom(var dg:TipoGeomForj);
begin
  dg.np:=0;
  dg.xs:=0;
  dg.yr:=0;
end;

procedure NovoArquivo(var nomarq:string;var dg,dgn:TipoGeomForj;
  var de:TipoDadosEntr;var dc:TipoDadosCalc);
begin
  (* Inicializa toda estrutura de dados *)
  nomarq:='SEMNOME';
  InicializaDadosGeom(dg);
  InicializaDadosGeom(dgn);
  InicializaDadosEntr(de);
  InicializaDadosCalc(dc);
end;

procedure LeDados(var dg,dgn:TipoGeomForj;var de:TipoDadosEntr;
  var dc:TipoDadosCalc;arq:string);
var i:integer;
  f:text;

begin
  assign(f,arq);
  reset(f);

  (* Geometria da Peca *)
  readln(f,dg.np,dg.xs,dg.yr);
  for i:=1 to dg.np do
    readln(f,dg.vx[i],dg.vy[i],dg.vr[i],dg.vi[i]);

  (* Geometria normalizada do forjado *)
  readln(f,dgn.np,dgn.xs,dgn.yr);
  for i:=1 to dgn.np do
    readln(f,dgn.vx[i],dgn.vy[i],dgn.vr[i],dgn.vi[i]);

  (* Dados de Entrada *)
  readln(f,de.TempMatriz);
  readln(f,de.TempMatPrima);
  readln(f,de.TipoEquip);
  readln(f,de.par1);
  readln(f,de.par2);
  readln(f,de.HInicMatPrima);
  readln(f,de.HEtapaAntCav);
  readln(f,de.HEtapaAntReb);
  readln(f,de.FatorAtrito);
  readln(f,de.NomeArqMat);

  (* Dados Calculados *)
  readln(f,dc.tempmedia);

```

```

    readln(f,dc.massa);
    readln(f,dc.w);
    readln(f,dc.t);
    readln(f,dc.fatorcompl);
    readln(f,dc.tempocontato);
    readln(f,dc.velmediacav);
    readln(f,dc.velmediareb);
    readln(f,dc.taxadefcav);
    readln(f,dc.taxadefreb);
    readln(f,dc.sycav);
    readln(f,dc.syreb);
    readln(f,dc.syea);
    readln(f,dc.fc);
    readln(f,dc.fr);
    readln(f,dc.ft);
    readln(f,dc.defcav);
    readln(f,dc.defreb);

    close(f);
end;

procedure GravaDados(var dg,dgn:TipoGeomForj;var de:TipoDadosEntr;
                    var dc:TipoDadosCalc;arq:string);
    var i:integer;
        f:text;

    begin
        assign(f,arq);
        rewrite(f);

        writeln(f,dg.np,' ',dg.xs,' ',dg.yr);
        for i:=1 to dg.np do
            writeln(f,dg.vx[i],' ',dg.vy[i],' ',dg.vr[i],' ',dg.vi[i]);

        writeln(f,dgn.np,' ',dgn.xs,' ',dgn.yr);
        for i:=1 to dgn.np do
            writeln(f,dgn.vx[i],' ',dgn.vy[i],' ',dgn.vr[i],' ',dgn.vi[i]);

        writeln(f,de.TempMatriz);
        writeln(f,de.TempMatPrima);
        writeln(f,de.TipoEquip);
        writeln(f,de.par1);
        writeln(f,de.par2);
        writeln(f,de.HInicMatPrima);
        writeln(f,de.HETapaAntCav);
        writeln(f,de.HETapaAntReb);
        writeln(f,de.FatorAtrito);
        writeln(f,de.NomeArqMat);

        writeln(f,dc.tempmedia);
        writeln(f,dc.massa);
        writeln(f,dc.w);
        writeln(f,dc.t);
        writeln(f,dc.fatorcompl);
        writeln(f,dc.tempocontato);
        writeln(f,dc.velmediacav);
        writeln(f,dc.velmediareb);
        writeln(f,dc.taxadefcav);
        writeln(f,dc.taxadefreb);
        writeln(f,dc.sycav);
        writeln(f,dc.syreb);
        writeln(f,dc.syea);
        writeln(f,dc.fc);
        writeln(f,dc.fr);
        writeln(f,dc.ft);
        writeln(f,dc.defcav);
        writeln(f,dc.defreb);

        close(f);
    end;

procedure SalvaArq(var nomarq:string;var dg,dgn:TipoGeomForj;
                  var de:TipoDadosEntr;var dc:TipoDadosCalc);
    var arqaux:string;
        tecla:char;

```

```

begin
  Moldura('Salva Arquivo',nomarq);
  arqaux:=nomarq;
  Escreve('Nome do Arquivo',11,10);
  GetStr(11,28,30,arqaux);
  Le;
  if Existe(arqaux) then begin
    Escreve('Sobre escreve S/N ?',13,10);
    tecla:=upcase(readkey);
    if tecla='S' then begin
      nomarq:=arqaux;
      GravaDados(dg,dgn,de,dc,nomarq);
    end;
  end
  else begin
    nomarq:=arqaux;
    GravaDados(dg,dgn,de,dc,nomarq);
  end;
end;

procedure CarregaArq(var nomarq:string;var dg,dgn:TipoGeomForj;
  var de:TipoDadosEntr;var dc:TipoDadosCalc);
var arqaux:string;
begin
  Moldura('Carrega Arquivo',nomarq);
  Escreve('Nome do Arquivo :',11,10);
  arqaux:='';
  GetStr(11,28,30,arqaux);
  Le;
  if Existe(arqaux) then begin
    nomarq:=arqaux;
    Escreve('Lendo Arquivo',13,15);
    LeDados(dg,dgn,de,dc,nomarq);
  end
  else begin
    Escreve('Erro, arquivo nao encontrado',13,15);
    delay(3000);
  end;
end;

procedure ImportaArq(var nomarq:string;var dg,dgn:TipoGeomForj;
  var de:TipoDadosEntr;var dc:TipoDadosCalc);
var arqaux,sterro:string;
  flgerro:boolean;
begin
  Moldura('Importa IGES',nomarq);
  Escreve('Nome do Arquivo :',11,10);
  arqaux:='';
  GetStr(11,28,30,arqaux);
  Le;
  if Existe(arqaux) then begin
    LeArqIges(arqaux,dg,flgerro,sterro);
  end
  else begin
    Escreve('Erro, arquivo nao encontrado',13,15);
    delay(3000);
  end;
end;

procedure ExportaArq(var nomarq:string;var dgn:TipoGeomForj);
var arqaux,sterro:string;
  flgerro:boolean;
begin
  Moldura('Exporta IGES',nomarq);
  Escreve('Nome do Arquivo :',11,10);
  arqaux:='';
  GetStr(11,28,30,arqaux);
  Le;
  GeraArqIges(arqaux,dgn,flgerro,sterro);
end;

end.
□

```

## Unit UnDefTyp;

interface

Const

```
NMaxPontos=100;
NMaxLinColTabCm=10;
```

Type

```
VetCor=array[1..NMaxPontos] of real;
VetIdent=array[1..NMaxPontos] of char;
TipoGeomForj = record
```

```
  np:integer;
  vx:VetCor;
  vy:VetCor;
  xs:real;
  yr:real;
  vr:VetCor;
  vi:VetIdent;
end;
```

```
VetTabCm=array[1..NMaxLinColTabCm] of real;
MatTabCm=array[1..NMaxLinColTabCm,1..NMaxLinColTabCm] of real;
TipoTabCm = record
```

```
  nl:integer;
  nc:integer;
  vtemp:VetTabCm;
  vdef :VetTabCm;
  mC : MatTabCm;
  mm : MatTabCm;
end;
```

TipoPropMat = record

```
  K : real;
  n : real;
  c : real;
  p : real;
  TempTran : real;
  TabCm : TipoTabCm;
end;
```

TipoDadosEntr = record

```
  TempMatriz : real;
  TempMatPrima : real;
  TipoEquip : char;
  par1 : real;
  par2 : real;
  HInicMatPrima : real;
  HEtapaAntCav : real;
  HEtapaAntReb : real;
  FatorAtrito :real;
  NomeArqMat : string;
end;
```

TipoDadosCalc = record

```
  TempMedia : real;
  Massa : real;
  w : real;
  t : real;
  FatorCompl : real;
  TempoContato : real;
  VelMediaCav : real;
  VelMediaReb : real;
  TaxaDefCav : real;
  TaxaDefReb : real;
  SyCav : real;
  SyReb : real;
  SyEA : real;
  Fc : real;
  Fr : real;
  Ft : real;
  DefCav:real;
```

```

    DefReb:real;
end;

```

```

implementation
end.

```

### Unit UnEditor;

```

(*****)
interface
  uses crt,graph;

  var arq:text;

  procedure GetStr(L,C,Larg:integer;var St:string);
  procedure Le;
  procedure SetaModoTexto;
  procedure SetaModoGrafico;
  procedure LeTecla(var tecla:char;var teclafun:boolean);
  procedure Escreve(st:string;L,C:integer);
  procedure EscreveReal(num:real;larg,deci,l,c:integer);
  procedure EscrApg(st:string;L,C:integer);
  function ConvNum(st:string;var num:real):boolean;
  function ConvNumInt(st:string;var num:integer):boolean;
  procedure ApagaTexto(L0,C0,L1,C1:integer);
  procedure SetaTamLetra(H,L:integer);
  procedure PosCentrLinCol(L,C:integer;var lc,cc:integer);
(*****)
implementation
  const
    NumMaxCampos=30;
  type
    TipoCampoLeit=record
      L:integer;
      C:integer;
      Larg:integer;
      pontstr:^string;
    end;
  Var
    VetCampo:array[1..NumMaxCampos] of TipoCampoLeit;
    ContCampo:integer;
    ModoTexto:boolean;
    H1etra,L1etra:integer;

  procedure GetStr(L,C,Larg:integer;var St:string);
  begin
    if ContCampo<NumMaxCampos then
      begin
        ContCampo:=ContCampo+1;
        VetCampo[ContCampo].L:=L;
        VetCampo[ContCampo].C:=C;
        VetCampo[ContCampo].PontStr:=@St;
        VetCampo[ContCampo].Larg:=Larg;
        if length(St)>Larg then St[0]:=chr(LArg);
      end;
    end;

  procedure SetaModoTexto;
  begin
    modotexto:=true;
  end;

  procedure SetaModoGrafico;
  begin
    modotexto:=false;
  end;

  procedure SetaTamLetra(H,L:integer);
  begin

```

```

    Hletra:=H;
    Lletra:=L;
end;

procedure PosCentrLinCol(L,C:integer;var lc,cc:integer);
begin
    cc:=Lletra*(C-1)+Lletra div 2;
    lc:=(L-1)*Hletra+Hletra div 2;
end;

procedure LeTecla(var tecla:char;var teclafun:boolean);
begin
    tecla:=readkey;
    teclafun:=(tecla=#0);
    if teclafun then tecla:=readkey;
end;

function ConvNumInt(st:string;var num:integer):boolean;
var i,cod:integer;
    staux:string;
    numaux:integer;
begin
    staux:='';
    for i:=1 to length(st) do
        if st[i]<>' ' then staux:=staux+st[i];
    Val(staux,numaux,cod);
    if cod=0 then begin
        num:=numaux;
        ConvNumInt:=true;
    end
    else ConvNumInt:=false;
end;

function ConvNum(st:string;var num:real):boolean;
var i,cod:integer;
    staux:string;
    numaux:real;
begin
    staux:='';
    for i:=1 to length(st) do
        if st[i]<>' ' then begin
            if st[i]='D' then staux:=staux+'E'
            else staux:=staux+st[i];
        end;
    Val(staux,numaux,cod);
    if cod=0 then begin
        num:=numaux;
        ConvNum:=true;
    end
    else ConvNum:=false;
end;

procedure EscreveReal(num:real;larg,deci,l,c:integer);
var st:string;
begin
    Str(num:larg:deci,st);
    Escreve(st,l,c);
end;

procedure ColLin(l,c:integer;var lg,cg:integer);
begin
    cg:=Lletra*(c-1);
    lg:=Hletra*(l-1);
end;

procedure ApagaTexto(L0,C0,L1,C1:integer);
var L,H:integer;
begin
    L:=Lletra;
    H:=Hletra;
    SetFillStyle(emptyfill,white);
    Bar((C0-1)*L,(L0-1)*H,C1*L-1,L1*H-1);
end;

procedure Escreve(st:string;L,C:integer);

```



```

var i,lt,ct,compr:integer;
begin
  compr:=length(st);
  if compr<>0
  then begin
    if ModoTexto then begin
      gotoxy(c,l);
      write(st);
    end
    else begin
      ApagaTexto(L,C,L,C+compr-1);
      for i:=1 to compr do
        begin
          ColLin(L,C+i-1,lt,ct);
          moveto(ct,lt);
          outtext(st[i]);
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

procedure EscriApg(st:string;L,C:integer);
var i,lt,ct,larg,cor:integer;
begin
  if ModoTexto then begin
    gotoxy(c,l);
    for i:=1 to length(st) do
      write(' ');
    end
  else begin
    larg:=textwidth('M');
    ct:=larg*(C-1);
    lt:=(L-1)*TextHeight('I');
    cor:=getcolor;
    setcolor(getbkcolor);
    for i:=1 to length(st) do
      begin
        moveto(ct,lt);
        outtext(st[i]);
        ct:=ct+larg;
      end;
    setcolor(cor);
  end;
end;

procedure EditaCampo(var vared:string;larg,col,lin:integer;var tecla:char;
var teclafun:boolean;HCar,LCar,CorFrente,CorFundo:
integer);

var vetedit:array[1..255] of char;
i,pont:integer;
flgcontinua:boolean;

procedure PosicionaCar(p:integer);
begin
  if modotexto then gotoxy(col+p-1,lin)
  else MoveTo(LCar*(col+p-2),(lin-1)*Hcar);
end;

procedure Escreve(c:char);
begin
  if modotexto then write(c)
  else outtext(c);
end;

procedure AtivaCursor;
begin
  PosicionaCar(pont);
  if not modotexto then Escreve('_');
end;

```

```

procedure DesativaCursor;
begin
  if not modotexto then
    begin
      PosicionaCar(pont);
      SetColor(CorFundo);
      Escreve('_');
      SetColor(CorFrente);
    end;
end;

procedure ApagaCar(p:integer);
begin
  PosicionaCar(p);
  if modotexto then escreve(' ')
  else begin
    SetColor(CorFundo);
    Escreve(vetedit[p]);
    SetColor(CorFrente);
  end;
end;

procedure EntraCar;
begin
  DesativaCursor;
  vetedit[pont]:=tecla;
  PosicionaCar(pont);
  Escreve(vetedit[pont]);
  if pont<larg then pont:=pont+1
  else flgcontinua:=false;

  AtivaCursor;
end;

begin
  pont:=1;
  AtivaCursor;
  LeTecla(tecla,teclafun);
  if (not teclafun) and (tecla>#32) then
    begin
      for i:=1 to larg do
        vetedit[i]:=' ';
        flgcontinua:=true;
        ApagaTexto(lin,col,lin,col+larg-1);
        EntraCar;

      while flgcontinua do
        begin
          LeTecla(tecla,teclafun);
          if teclafun then
            begin
              case tecla of
                #15:flgcontinua:=false; { Shift-Tab}
              end;
            end
          else begin
              case tecla of
                #32..#255:EntraCar;
                #9:flgcontinua:=false; {TAB}
                #27:flgcontinua:=false; {ESC}
                #13:flgcontinua:=false; {Enter}
                #8: if pont>1 then
                  begin
                    DesativaCursor;
                    ApagaCar(pont-1);
                    vetedit[pont-1]:=' ';
                    pont:=pont-1;
                    AtivaCursor;
                  end;
                end;
            end;
          end;

        end;

      if not((not teclafun)and(tecla=#27))

```

```

        then begin
            vared:='';
            for i:=1 to larg do
                vared:=vared+vedit[i];
            end;
        end;
    DesativaCursor;
end;

procedure Le;
var pc,i,CorFrente,CorFundo:integer;
    tecla:char;
    teclafun,termina:boolean;
    stbuf:string;

begin
    if ContCampo>0 then
        begin
            if not modotexto then begin
                CorFrente:=GetColor;
                CorFundo:=GetBkColor;
            end;
            { apresenta os campos na tela }
            for i:=1 to ContCampo do
                Escreve(vetcampo[i].pontstr^,vetcampo[i].L,vetcampo[i].C);
            pc:=1;
            termina:=false;
            repeat
                stbuf:=vetcampo[pc].pontstr^;
                EditaCampo(stbuf,vetcampo[pc].larg,
                    vetcampo[pc].C,vetcampo[pc].L,tecla,teclafun,Hletra,Lletra,
                    corfrente,corfundo);
                vetcampo[pc].pontstr^:=stbuf;
                ApagaTexto(vetcampo[pc].L,vetcampo[pc].C,vetcampo[pc].L,
                    vetcampo[pc].C+vetcampo[pc].larg-1);
                Escreve(vetcampo[pc].pontstr^,vetcampo[pc].L,vetcampo[pc].C);
                if teclafun then begin
                    if tecla=#15 then begin {Shift-Tab}
                        if pc>1 then pc:=pc-1
                            else pc:=contcampo;
                    end;
                end
            else begin
                case tecla of
                    #13:if pc<contcampo then pc:=pc+1 {Enter}
                        else termina:=true;
                    else if pc<contcampo then pc:=pc+1
                        else pc:=1;
                end;
            end;
            until termina;
        end;
        ContCampo:=0;
    end;

    (*****)
    { inicializacao }
    begin
        modotexto:=false;
        ContCampo:=0;
        Hletra:=8;
        Lletra:=8;
    end.

```

### Unit UnGraf;

```

    (*****)
    interface
    uses graph,crt,uneditor,undeftyp;

    procedure EditaForj(var GeomForj:TipoGeomForj);
    procedure MostraForj(var GN,GP:TipoGeomForj);
    procedure IniModGrafNor;

```

```

Procedure DefJanela(indice:integer;ccse,lcse,ccid,lcid:real);
Procedure AtivaJanela(indice:integer);
Procedure LimpaJanAtiva;

(*****
implementation

Const
  GGnmaxjan=10;

Var
  GGejan:array[1..GGnmaxjan,1..4] of integer;
  GGJanATV, GGXMax, GGYMax: integer;
  GGRxMenor, GGRxMaior, GGRyMenor, GGRyMaior: real;
  CorFrente, CorFundo: integer;

Procedure DefJanela(indice:integer;ccse,lcse,ccid,lcid:real);
begin
  GGejan[indice,1]:=round(GGxmax*ccse);
  GGejan[indice,2]:=round(GGymax*(1-lcse));
  GGejan[indice,3]:=round(GGxmax*ccid);
  GGejan[indice,4]:=round(ggymax*(1-lcid));
end;

Procedure AtivaJanela(indice:integer);
begin
  GGjanatv:=indice;
  setviewport(ggejan[indice,1],ggejan[indice,2],ggejan[indice,3],
             ggejan[indice,4],true);
end;

Procedure LimpaJanAtiva;
begin
  ClearViewport;
end;

Function ColTel(colnor:real):integer;
begin
  coltel:=round(colnor*(ggejan[ggjanatv,3]-ggejan[ggjanatv,1]));
end;

Function LinTel(linnor:real):integer;
begin
  lintel:=round((linnor-1)*(ggejan[ggjanatv,2]-ggejan[ggjanatv,4]));
end;

Procedure MolduraJanAtv;
begin
  rectangle(ColTel(0),LinTel(1),ColTel(1),LinTel(0));
end;

Procedure IniModGrafNor;
begin
  GGXmax:=GetMaxX;
  GGYmax:=GetMaxY;
  DefJanela(1,0,1,1,0);
  AtivaJanela(1);
  CorFrente:=GetColor;
  CorFundo:=GetBkColor;
end;

Procedure CoordNorm(x,y:real;var xn,yn:real);
begin
  xn:=(x-ggrxmenor)/(ggrxmaior-ggrxmenor);
  yn:=(y-ggrymenor)/(ggrymaior-ggrymenor);
end;

Procedure GeraDesenhoForj(var GeomForj:TipoGeomForj;ren:boolean);
var i:integer;
    x0,y0,x1,y1:real;
begin
  AtivaJanela(1);

```

```

if ren then
begin
  LimpJanAtiva;
  MolduraJanAtv;
end;
CoordNorm(geomforj.vx[1],geomforj.vy[1],x0,y0);
for i:=2 to geomforj.np do
begin
  CoordNorm(GeomForj.vx[i],GeomForj.vy[i],x1,y1);
  Line(ColTel(x0),LinTel(y0),ColTel(x1),LinTel(y1));
  x0:=x1;
  y0:=y1;
end;
CoordNorm(GeomForj.xs,GeomForj.yr,x0,y0);
Line(ColTel(x0),LinTel(0),ColTel(x0),LinTel(1));
Line(ColTel(0),LinTel(y0),ColTel(1),LinTel(y0));
AtivaJanela(2);
end;

Procedure MontaTela;
begin
  { Janela Desenho }
  DefJanela(1,0.0125,0.8,0.8,0.08);

  { Janela Texto }
  DefJanela(2,0.80625,0.8,1,0.08);

  AtivaJanela(2);
  Escreve('COMANDOS',1,4);
  Escreve('X - FAIXA X',2,1);
  Escreve('Y - FAIXA Y',3,1);
  Escreve('S - SIMETRIA',4,1);
  Escreve('R - REBARBA',5,1);
  Escreve('P - POLILINHA',6,1);
  Escreve('D - APAGA',7,1);
  Escreve('U - UNDO',8,1);
  Escreve('F - FIM',9,1);
end;

Procedure MudaFaixaX;
var sted1,sted2:string;
    flg:boolean;
begin
  AtivaJanela(2);
  Str(ggrxmenor:8:2,sted1);
  Str(ggrxmaior:8:2,sted2);
  Escreve('Muda Faixa X',11,1);
  Escreve('Ini:',13,1);
  Escreve('Fim:',14,1);
  GetStr(13,5,8,sted1);
  GetStr(14,5,8,sted2);
  Le;
  flg:=ConvNum(sted1,ggrxmenor);
  flg:=ConvNum(sted2,ggrxmaior);
  ApagaTexto(11,1,14,15);
end;

Procedure MudaFaixaY;
var sted1,sted2:string;
    flg:boolean;
begin
  AtivaJanela(2);
  Str(ggrymenor:8:2,sted1);
  Str(ggrymaior:8:2,sted2);
  Escreve('Muda Faixa Y',11,1);
  Escreve('Ini:',13,1);
  Escreve('Fim:',14,1);
  GetStr(13,5,8,sted1);
  GetStr(14,5,8,sted2);
  Le;
  flg:=ConvNum(sted1,ggrymenor);
  flg:=ConvNum(sted2,ggrymaior);
  ApagaTexto(11,1,14,15);
end;

```

```

Procedure XSimetria(var G:TipoGeomForj);
var sted1:string;
    flg:boolean;
begin
    AtivaJanela(2);
    Str(g.xs:8:2,sted1);
    Escreve('Muda X Simetria',11,1);
    Escreve('Xs :',13,1);
    GetStr(13,5,8,sted1);
    Le;
    flg:=ConvNum(sted1,G.xs);
    ApagaTexto(11,1,13,15);
end;

Procedure YRebarba(var G:TipoGeomForj);
var sted1:string;
    flg:boolean;
begin
    AtivaJanela(2);
    Str(g.yr:8:2,sted1);
    Escreve('Muda Y Rebarba',11,1);
    Escreve('Yr :',13,1);
    GetStr(13,5,8,sted1);
    Le;
    flg:=ConvNum(sted1,g.yr);
    ApagaTexto(11,1,13,15);
end;

Procedure LePolilinha(var G:TipoGeomForj);
var continua,tcfun,flgx,flgy,flgr:boolean;
    staux,sted1,sted2,sted3:string;
    opc:char;
    xi,yi,x0,y0,x1,y1,ri:real;
begin
    AtivaJanela(2);
    Escreve('Polilinha',11,1);
    Escreve('ponto:',12,2);
    Escreve('opcao:',13,2);
    Escreve('X :',14,5);
    Escreve('Y :',15,5);
    Escreve('R :',16,5);
    Escreve('Opcao: Abs/Rel',17,1);
    Escreve('          Pol/Fim',18,1);
    continua:=true;
    while continua do
        begin
            Str((G.np+1):2,staux);
            Escreve(staux,12,8);
            LeTecla(opc,tcfun);
            if not tcfun then
                begin
                    opc:=upcase(opc);
                    Escreve(opc,13,8);
                    if (opc='A') or (opc='R') or (opc='P') then
                        begin
                            sted1:='';
                            sted2:='';
                            sted3:='';
                            getstr(14,8,8,sted1);
                            getstr(15,8,8,sted2);
                            getstr(16,8,8,sted3);
                            Le;
                            flgx:=ConvNum(sted1,xi);
                            flgy:=ConvNum(sted2,yi);
                            ri:=0;
                            flgr:=ConvNum(sted3,ri);
                            if flgx and flgy then
                                begin
                                    if G.np>0 then
                                        begin
                                            case opc of
                                                'R':begin
                                                    xi:=G.vx[G.np]+xi;
                                                    yi:=G.vy[G.np]+yi;
                                                end;
                                            end;
                                        end;
                                end;
                            else
                                continua:=false;
                            end;
                        end;
                end;
        end;
end;

```

```

        'P':begin
            xi:=G.vx[G.np]+xi*cos(pi*yi/180);
            yi:=G.vy[G.np]+xi*sin(pi*yi/180);
        end;
    end;
    end;
    G.np:=G.np+1;
    G.vx[G.np]:=xi;
    G.vy[G.np]:=yi;
    G.vr[G.np]:=ri;
    if G.np>1 then begin
        CoordNorm(g.vx[g.np],g.vy[g.np],x0,y0);
        CoordNorm(g.vx[g.np-1],g.vy[g.np-1],x1,y1);
        AtivaJanela(1);
        Line(coltel(x0),lintel(y0),coltel(x1),lintel(y1));
        AtivaJanela(2);
    end;
    end;
    else begin
        Escreve('Coord. Invalida',10,1);
        delay(4000);
        ApagaTexto(10,1,10,15);
    end;
    end;
    else begin
        if opc='F' then continua:=false;
    end;
    end;
    else begin
        if opc=#27 then continua:=false;
    end;
    ApagaTexto(12,8,16,15);
    end;
    ApagaTexto(11,1,18,15);
    end;
end;

Procedure ApagaPolilinha(var G:TipoGeomForj);
var tecla:char;
    tcfun:boolean;

begin
    AtivaJanela(2);
    Escreve('Apaga Polilinha',11,1);
    Escreve('Confirma S/N',13,1);
    LeTecla(tecla,tcfun);
    if (upcase(tecla)='S') and (not tcfun)
    then begin
        G.np:=0;
        GeraDesenhoForj(G,true);
        AtivaJanela(2);
    end;
    ApagaTexto(11,1,13,15);
end;

Procedure ApagaUltPonto(var G:TipoGeomForj);
var cor:integer;
    x0,y0,x1,y1:real;
begin
    if g.np>0 then
        begin
            if g.np>1 then begin
                CoordNorm(G.Vx[g.np],G.Vy[g.np],x0,y0);
                CoordNorm(G.vx[g.np-1],g.vy[g.np-1],x1,y1);
                cor:=getcolor;
                setcolor(getbkcolor);
                AtivaJanela(1);
                Line(coltel(x0),lintel(y0),coltel(x1),lintel(y1));
                setcolor(cor);
            end;
            g.np:=g.np-1;
        end;
    end;
end;

Procedure EditaForj(var GeomForj:TipoGeomForj);

```

```

var tecla:char;
    teclafun,termina:boolean;
begin
    MontaTela;
    GeraDesenhoForj(GeomForj,true);
    termina:=false;
    Repeat
        LeTecla(tecla,teclafun);
        if not teclafun then
            begin
                tecla:=UpCase(tecla);
                case tecla of
                    'X':begin
                        MudaFaixaX;
                        GeraDesenhoForj(GeomForj,true);
                    end;
                    'Y':begin
                        MudaFaixaY;
                        GeraDesenhoForj(GeomForj,true);
                    end;
                    'S':begin
                        XSimetria(GeomForj);
                        GeraDesenhoForj(GeomForj,true);
                    end;
                    'R':begin
                        YRebarba(GeomForj);
                        GeraDesenhoForj(GeomForj,true);
                    end;
                    'P':LePolilinha(GeomForj);
                    'D':ApagaPolilinha(GeomForj);
                    'U':ApagaUltPonto(GeomForj);
                    'F':termina:=true;
                end;
            end;
        until termina;
    end;

Procedure MostraForj(var GN,GP:TipoGeomForj);
var tecla:char;
    teclafun:boolean;
begin
    DefJanela(1,0.0125,0.8,0.987,0.08);
    GeraDesenhoForj(GN,true);
    SetLineStyle(Dashedln,0,Normwidth);
    GeraDesenhoForj(GP,false);
    SetLineStyle(Solidln,0,Normwidth);
    LeTecla(tecla,teclafun);
end;

begin
    GGRxMenor:=-100;
    GGRxMaior:=100;
    GGryMenor:=-100;
    GGryMaior:=100;
end.

Unit UnIGES;
interface
    uses UnDefTyp,UnEditor,UnCalc;
    procedure LeArqIGES(nomarq:string;var g:TipoGeomForj;var flgerro:boolean;
        var sterro:string);
    procedure GeraArqIGES(nomarq:string;var g:TipoGeomForj;var flgerro:boolean;
        var sterro:string);

implementation
Const
    NMaxCamporLinha=30;
    ErroAprox=0.001;
Type
    TipoLinha=string[81];
    TipoVetCam=array[1..NMaxCamporLinha] of TipoLinha;
function CodigoSecao(var linha:TipoLinha):char;

```



```

begin
 CodigoSecao:=Linha[73];
end;

function NumSeq(var linha:TipoLinha):integer;
var cod,aux:integer;
begin
  Val(Copy(Linha,74,7),aux,cod);
  NumSeq:=aux;
end;

procedure GeraCampos(sta:TipoLinha;delpar,delreg:char;var numcam:integer;
var vetcam:TipoVetCam);
var pontcar:integer;
begin
  pontcar:=1;
  while (sta[pontcar]<>delreg) and (pontcar<=length(sta)) do
    if (sta[pontcar]<>delpar) and (sta[pontcar]<>' ') then
      begin
        numcam:=numcam+1;
        vetcam[numcam]:='';
        while (sta[pontcar]<>delreg) and (pontcar<=length(sta)) and
(sta[pontcar]<>delpar) do
          begin
            vetcam[numcam]:=vetcam[numcam]+sta[pontcar];
            pontcar:=pontcar+1;
          end;
        if pontcar>length(sta) then numcam:=numcam-1;
      end
    else pontcar:=pontcar+1;
  end;

function LimpaBranco(sta:TipoLinha):TipoLinha;
var aux:TipoLinha;
p:integer;
begin
  p:=1;
  while sta[p]=' ' do p:=p+1;
  aux:='';
  while (sta[p]<>' ') and (p<=length(sta)) do
    begin
      aux:=aux+sta[p];
      p:=p+1;
    end;
  LimpaBranco:=aux;
end;

function Coinc(x0,y0,x1,y1:real):boolean;
begin
  coinc:=(abs(x0-x1)<erroaprox) and (abs(y0-y1)<erroaprox);
end;

procedure LeArqIGES(nomarq:string;var g:TipoGeomFor;var filgerro:boolean;
var sterro:string);
type
  tipoelementoincidencia = record
    nlig:integer;
    elem:array[1..2] of char;
    ind:array[1..2] of integer;
    p:array[1..2] of char;
  end;
  TipoElementoVetLinhas = record
    par:integer;
    tipo:integer;
    x0:real;
    y0:real;
    x1:real;
    y1:real;
  end;
  TipoElementoVetArcos = record
    par:integer;
    tipo:integer;
    xi:real;
    yi:real;

```

```

                                xf:real;
                                yf:real;
                                xc:real;
                                yc:real;
                                end;

var LArq:TipoLinha;
    f,a : text;
    delp,delr:char;
    pin,nc,i,j,NumLinhas,NumArcos,lseq:integer;
    vetc:TipoVetCam;
    flg,flg00,flg01,flg10,flg11,flg1,flg2:boolean;
    vetorinc:array[1..NMaxPontos] of TipoElementoIncidencia;
    vl:array[1..NMaxPontos] of TipoElementoVetLinhas;
    va:array[1..NMaxPontos] of TipoElementoVetArcos;
    escala,fatconv:real;
    unidade,entidade,LAnt,LigAnt:integer;

begin
    assign(a,'erro.pas');
    rewrite(a);

    flgerro:=false;
    assign(f,nomarq);
    reset(f);
    (* pula Start Secao *)
    repeat
        readln(f,LArq);
    until CodigoSecao(LArq)='G';
    (* delimitadores de parametros e registros *)
    if LArq[1] = ',' then
        begin
            delp:=',';
            if LArq[2] = ',' then begin
                delr:=';';
                pin:=3;
            end
            else begin
                delr:=LArq[4];
                pin:=6;
            end;
        end
    else begin
        delp:=LArq[3];
        if LArq[5]=delp then begin
            delr:=';';
            pin:=6;
        end
        else begin
            delr:=LArq[7];
            pin:=9;
        end;
    end;
    end;
    (* Trata as linhas da secão global *)
    nc:=0;
    GeraCampos(copy(LArq,pin,73-pin),delp,delr,nc,vetc);
    while (CodigoSecao(LArq)='G') and not eof(f) do
        begin
            readln(f,LArq);
            if CodigoSecao(LArq)='G' then
                GeraCampos(copy(LArq,1,72),delp,delr,nc,vetc);
            end;
        for i:=1 to nc do
            writeln(a,'campo ',i,' : ',vetc[i]);
        end;
    if nc>12 then
        begin
            flg:=ConvNum(vetc[11],escala);
            flg:=ConvNumInt(vetc[12],unidade);
            case unidade of
                1:fatconv:=25.4;
                2:fatconv:=1;
                3:fatconv:=1;
                6:fatconv:=1000;
            end;
        end;
end;

```

```

    else fatconv:=1;
    end;
    fatconv:=fatconv/escala;
end
else
begin
    fatconv:=1;
    unidade:=2;
    escala:=1;
end;
NumLinhas:=0;
NumArcos:=0;
(* Leitura da secao de diretorio *)
while CodigoSecao(LArq)='D' do
begin
    flg:=ConvNumInt(copy(LArq,1,8),entidade);
    case entidade of
    110:begin
        NumLinhas:=NumLinhas+1;
        flg:=ConvNumInt(copy(LArq,9,8),VL[NumLinhas].par);
        flg:=ConvNumInt(copy(LArq,25,8),VL[NumLinhas].tipo);
        end;
    100:begin
        NumArcos:=NumArcos+1;
        flg:=ConvNumInt(copy(LArq,9,8),VA[NumArcos].par);
        flg:=ConvNumInt(copy(LArq,25,8),VA[NumArcos].tipo);
        end;
    end;
    readln(f,LArq);
    readln(f,LArq);
end;

for i:=1 to NumLinhas do
    writeln(a,'linha ',i,' : ',vl[i].par);

(* Leitura da secao de parametros *)
while CodigoSecao(LArq)='P' do
begin
    nc:=0;
    GeraCampos(copy(LArq,1,72),delp,delr,nc,vetc);
    flg:=ConvNumInt(vetc[1],entidade);
    case entidade of
    110:begin
        Lseq:=NumSeq(LARQ);
        if nc<7 then
            begin
                readln(f,LArq);
                GeraCampos(copy(LArq,1,72),delp,delr,nc,vetc);
            end;
        for i:=1 to NumLinhas do
            if vl[i].par=LSeq
            then begin
                flg:=ConvNum(vetc[2],vl[i].x0);
                flg:=ConvNum(vetc[3],vl[i].y0);
                flg:=ConvNum(vetc[5],vl[i].x1);
                flg:=ConvNum(vetc[6],vl[i].y1);
            end;

            writeln(a,'parametros linha ',Lseq);
            for i:=1 to nc do
                writeln(a,vetc[i]);

        end;
    100:begin
        for i:=1 to NumArcos do
            if va[i].par=NumSeq(LARq)
            then begin
                flg:=ConvNum(vetc[3],va[i].xc);
                flg:=ConvNum(vetc[4],va[i].yc);
                flg:=ConvNum(vetc[5],va[i].xi);
                flg:=ConvNum(vetc[6],va[i].yi);
                flg:=ConvNum(vetc[7],va[i].xf);
                flg:=ConvNum(vetc[8],va[i].yf);
            end;

```

```

        end;
    end;
    readln(f, LArq);
end;
close(f);
close(a);

(* monta vetor de incidencia *)
for i:=1 to NumLinhas do
    vetorinc[i].nlig:=0;
for i:=1 to NumLinhas do
    begin
        for j:=i+1 to NumLinhas do
            begin
                flg00:=Coinc(vl[i].x0,vl[i].y0,vl[j].x0,vl[j].y0);
                flg01:=Coinc(vl[i].x0,vl[i].y0,vl[j].x1,vl[j].y1);
                flg10:=Coinc(vl[i].x1,vl[i].y1,vl[j].x0,vl[j].y0);
                flg11:=Coinc(vl[i].x1,vl[i].y1,vl[j].x1,vl[j].y1);
                if flg00 or flg01 or flg10 or flg11
                then begin
                    vetorinc[i].nlig:=vetorinc[i].nlig+1;
                    if vetorinc[i].nlig<=2 then
                        begin
                            vetorinc[i].elem[vetorinc[i].nlig]:='L';
                            vetorinc[i].ind[vetorinc[i].nlig]:=j;
                            if flg00 or flg01
                                then vetorinc[i].p[vetorinc[i].nlig]:='0'
                                else vetorinc[i].p[vetorinc[i].nlig]:='1';
                            end;
                            vetorinc[j].nlig:=vetorinc[j].nlig+1;
                            if vetorinc[j].nlig<=2 then
                                begin
                                    vetorinc[j].elem[vetorinc[j].nlig]:='L';
                                    vetorinc[j].ind[vetorinc[j].nlig]:=i;
                                    if flg00 or flg10
                                        then vetorinc[j].p[vetorinc[j].nlig]:='0'
                                        else vetorinc[j].p[vetorinc[j].nlig]:='1';
                                    end;
                                end;
                            end;
                        end;
                    end;
                end;

for j:=1 to NumArcos do
    begin
        flg00:=Coinc(vl[i].x0,vl[i].y0,va[j].xi,va[j].yi);
        flg01:=Coinc(vl[i].x0,vl[i].y0,va[j].xf,va[j].yf);
        flg10:=Coinc(vl[i].x1,vl[i].y1,va[j].xi,va[j].yi);
        flg11:=Coinc(vl[i].x1,vl[i].y1,va[j].xf,va[j].yf);
        if flg00 or flg01 or flg10 or flg11
        then begin
            vetorinc[i].nlig:=vetorinc[i].nlig+1;
            if vetorinc[i].nlig<2 then
                begin
                    vetorinc[i].elem[vetorinc[i].nlig]:='A';
                    vetorinc[i].ind[vetorinc[i].nlig]:=j;
                    if flg00 or flg01
                        then vetorinc[i].p[vetorinc[i].nlig]:='0'
                        else vetorinc[i].p[vetorinc[i].nlig]:='1'
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;
end;

(* busca reta com um unico vizinho *)
i:=1;
while (i<=NumLinhas) and (VetorInc[i].nlig <> 1) do i:=i+1;
if i>NumLinhas then begin
    flgerro:=true;
    sterro:='Nao encontrado o inicio da secao do forj.';
    exit;
end;

G.np:=1;
g.vr[g.np]:=0;
if vetorinc[i].p[1]='1' then begin
    g.vx[g.np]:=vl[i].x0;
    g.vy[g.np]:=vl[i].y0;
end

```

```

else begin
    g.vx[g.np]:=vl[i].x1;
    g.vy[g.np]:=vl[i].y1;
end;

Lant:=i;
LigAnt:=1;
repeat
    if vetorinc[LAnt].elem[LigAnt]='A'
    then begin
        flg1:=false;
        flg2:=false;
        j:=0;
        while not (flg1 or flg2) and (j<NumLinhas) do
            begin
                j:=j+1;
                if (j<>LAnt) and (vetorinc[j].nlig>0) then
                    begin
                        flg1:=(vetorinc[j].elem[1]='A') and
                            (vetorinc[j].ind[1]=vetorinc[LAnt].ind[LigAnt]);
                        if vetorinc[j].nlig>1 then
                            flg2:=(vetorinc[j].elem[2]='A') and
                                (vetorinc[j].ind[2]=vetorinc[LAnt].ind[LigAnt])
                                else flg2:=false;
                    end;
            end;
        g.np:=g.np+1;
        PInter(vl[lant].x0,vl[lant].y0,vl[lant].x1-vl[lant].x0,
            vl[lant].y1-vl[lant].y0,vl[j].x0,vl[j].y0,vl[j].x1-vl[j].x0,
            vl[j].y1-vl[j].y0,g.vx[g.np],g.vy[g.np]);
        g.vr[g.np]:=distancia(va[vetorinc[LAnt].ind[LigAnt]].xc,
            va[vetorinc[LAnt].ind[LigAnt]].yc,
            va[vetorinc[LAnt].ind[LigAnt]].xi,
            va[vetorinc[LAnt].ind[LigAnt]].yi);

        Lant:=j;
        if flg1 then LigAnt:=2
            else LigAnt:=1;
    end
else begin
    g.np:=g.np+1;
    g.vr[g.np]:=0;
    if vetorinc[LAnt].p[LigAnt]='0'
    then begin
        g.vx[g.np]:=vl[lant].x0;
        g.vy[g.np]:=vl[lant].y0;
    end
    else begin
        g.vx[g.np]:=vl[lant].x1;
        g.vy[g.np]:=vl[lant].y1;
    end;
    j:=vetorinc[LAnt].ind[LigAnt];
    if (vetorinc[j].elem[1]='L')and(vetorinc[j].ind[1]=Lant)
    then LigAnt:=2 else LigAnt:=1;
    LAnt:=j;
end;
until vetorinc[LAnt].nlig<2;
g.np:=g.np+1;
g.vr[g.np]:=0;
if vetorinc[LAnt].p[1]='1' then begin
    g.vx[g.np]:=vl[LAnt].x0;
    g.vy[g.np]:=vl[LAnt].y0;
end
else begin
    g.vx[g.np]:=vl[LAnt].x1;
    g.vy[g.np]:=vl[LAnt].y1;
end;

(* Xs e Yr *)
g.xs:=0;
g.yr:=0;
for i:=1 to NumLinhas do
    if vetorinc[i].nlig=0 then
        begin
            if abs(vl[i].x0-vl[i].x1)<ErroAprox then g.xs:=vl[i].x0;
            if abs(vl[i].y0-vl[i].y1)<ErroAprox then g.yr:=vl[i].y0;
        end;
end;

```

```

(* acerta escala e unidade mm *)
g.xs:=fatconv*g.xs;
g.yr:=fatconv*g.yr;
for i:=1 to g.np do
begin
  g.vx[i]:=fatconv*g.vx[i];
  g.vy[i]:=fatconv*g.vy[i];
  g.vr[i]:=fatconv*g.vr[i];
end;
end;

procedure GeraArqIGES(nomarq:string;var g:TipoGeomForj;var flgerro:boolean;
var sterro:string);

var i:integer;
f:text;

begin
  assign(f,nomarq);
  rewrite(f);

  (* escreve a secao inicial start section *)
  (*
    1          2          3          4          5          6          7
8*)
  (*
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890*)

  writeln(f,'Arquivo IGES gerado forjaxis
S0000001');

  (* escreve a secao global global section *)
  writeln(f,',,1Hx,1Hx,1Hx,1Hx,32,38,6,99,15,1Hx,1.0,2,2HMM,32767,3.2767D1,
G0000001');
  writeln(f,'13H941107.094928,3.1D-8,31.0,1HX,1HX,6,0;
G0000002');

  (* escreve a secao diretorio directory section *)
  for i:=1 to g.np-1 do
  begin
    writeln(f,110:8,i:8,1:8,1:8,          '
D',(2*i-1):7);
    writeln(f,110:8,' ':8,' ':8,1:8,          '
D',(2*i):7);
  end;

  (* escreve a secao parametros parameter data section *)
  for i:=1 to g.np-1 do
  begin
    writeln(f,110:3,' ',g.vx[i]:8:3,' ',g.vy[i]:8:3,' ',0:1,' ',g.vx[i+1]:8:3,
',',g.vy[i+1]:8:3,' ',0:1,' ');
    P',i:7);
  end;

  (* escreve a secao final terminal section *)
  writeln(f,'S0000001G0000002D',(2*i):7,'P',i:7,' ':40,'T0000001');
  close(f);
end;

end.

```