

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

**UMA METODOLOGIA PARA AUTOMAÇÃO DO
PROCESSO DE CONFORMAÇÃO POR
CALANDRAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Marcia Trojan Poll

Santa Maria, RS, Brasil

2008

UMA METODOLOGIA PARA AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO POR CALANDRAS

Por

Marcia Trojan Poll

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, área de concentração Tecnologia da Informação, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Eng. Dr. Alexandre Dias da Silva

Santa Maria, RS, Brasil

2008

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

A Comissão Examinadora, abaixo assinada aprova a Dissertação de Mestrado

**UMA METODOLOGIA PARA AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE
CONFORMAÇÃO POR CALANDRAS**

elaborada por
Marcia Trojan Poll

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia de Produção

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Alexandre Dias da Silva, Eng. Dr.
(Presidente/Orientador)

Prof. Inácio da Fontoura Limberger, Eng. Dr. (UFSM)

Prof. Leandro Costa de Oliveira, Eng. Dr. (UFSM)

Santa Maria, 24 de julho de 2008.

À minha mãe pela força e
ao meu pai (*in memoriam*) pelos ensinamentos.

À Deus...

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Alexandre Dias da Silva pelo apoio e ajuda durante todo o período do curso, desde o anteprojeto até a elaboração do projeto e da dissertação. Apoio prestado de forma íntegra e muito respeitosa, sempre muito dedicado, muito obrigada grande mestre, grande exemplo de pessoa!

Aos professores Inácio da Fontoura Limberger e Leandro Costa de Oliveira pela participação na banca examinadora, dois exemplos de professores: obrigada!

Ao Prof. Dr. Flávio Thier pelo acolhimento e grande apoio durante a docência orientada.

A Universidade Federal de Santa Maria pela oportunidade de estudo e crescimento, instituição em que concluí minha graduação em Engenharia Mecânica e agora o mestrado em Engenharia de Produção.

A Universidade de Santa Cruz pela oportunidade de realizar docência orientada.

Aos grandes mestres que me ensinaram coisas muito valiosas. Também àqueles que cruzaram por mim e me mostraram como não ser e a como não agir.

A Metalúrgica MOR, especialmente representada pelo Sr. Álvaro Forsthofer e Sr. Jarbas Schoenherr, pelo grande apoio e oportunidade de cursar o mestrado.

Aos meus grandes amigos do coração pelo incentivo e carinho. Sei que estavam torcendo por mim...

A grande amiga do coração Adriane, que me ajudou muito na graduação e no mestrado, sou muito grata a você!

A minha mãe por proporcionar incentivo e completo apoio nos estudos até hoje.

Ao meu esposo Rui Poll pela grande e valiosa força e ajuda. Valeu!

"First, it was to get to Formula 1. Then to get a pole position, win a race, be the champion.

Little by little, I realised all of these dreams."

Ayrton Senna

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal de Santa Maria

UMA METODOLOGIA PARA AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO POR CALANDRAS

Autora: Marcia Trojan Poll
Orientador: Prof. Dr. Alexandre Dias da Silva
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 24 de julho de 2008.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para transformar calandras de tubos e chapas convencionais em equipamentos com sistema automático programável para execução de peças com raios fixos e/ou variáveis. É apresentado um projeto mecânico conceitual (sem detalhamento) e são implementados recursos computacionais para reconhecimento de desenhos definidos em sistema de projeto auxiliado por computador com o objetivo de gerar automaticamente o programa-tarefa capaz de executar a conformação da peça projetada. Desta maneira, o requisito de operação programável é satisfeito fazendo com que o equipamento trabalhe segundo os princípios de máquinas CNC. A proposta considera ainda o ajuste necessário nos parâmetros de operação da máquina devido a recuperação elástica do material através do processamento de uma imagem extraída de uma foto da peça conformada. Desta forma, o raio executado na peça é reconhecido e torna-se possível compará-lo com o raio projetado. Conforme demonstra o estudo, para análise da viabilidade técnica da proposta, o sistema foi implementado na forma de aplicativo de sistema CAD e conclui-se ser viável, já que a metodologia de programação foi implementada com sucesso e gerou resultados satisfatórios, onde o usuário desenha uma peça em sistema CAD e um programa CNC para a execução da peça é gerado. Outros aspectos relativos e importantes para o desenvolvimento da metodologia são discutidos, tais como: programação CNC, processamento de imagens, programação em sistemas CAD e processo de conformação mecânica para curvar tubos ou chapas.

Palavras-chave: calandra, comando numérico, integração CAD/CAM, processamento de imagem.

ABSTRACT

Master's Degree Dissertation
Production Engineering Post-Graduation Program
Federal University of Santa Maria

A METHODOLOGY FOR AUTOMATION OF THE FORMING PROCESS USING ROLL BENDERS

Author: Marcia Trojan Poll
Advisor: Dr. Alexandre Dias da Silva
Date and presentation place: Santa Maria, July 24th 2008.

The present work presents the development of a methodology for transforming conventional roll benders of industrial tubes and plates into an equipment with a programmable automatic system for bending parts with fixed and/or changeable rays. A conceptual mechanical project (without details) is presented and computational resources were implemented for recognition of drawings defined in a system of computer aided design with the objective of automatically generating the task-program, being capable of making the conformation of the projected part. This way, the requirement of programmable operation is satisfied and the equipment will work according to principles of numerical command machines. Besides that, the proposal considers the necessary adjustment in the machine operational parameters because of the material springback through the image processing extracted from a photo of the conformed part. Thus, the ray executed in the part is recognized and makes it possible to compare it with the projected ray. According to this study, the system was implemented as an applicative of CAD system for the technique viability analysis and was concluded to be viable, since the programming methodology was implemented successfully and the results were satisfactory, the user can draw a part in a CAD system and a program CNC is generated for the execution of the part. Other related and important aspects for the development of the methodology are discussed, such as: CNC programming, image processing, CAD programming systems and the process of mechanical forming to bend tubes or plates.

Keywords: roll bender, numerical command, integration CAD/CAM, image processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Cadeiras tubulares com raios de curvaturas variáveis.....	6
Figura 2.2 – Cadeira tipo lounge chair com tubos de raios variáveis.....	6
Figura 2.3 – Peças tubulares calandradas.	6
Figura 2.4 – Fluxograma de produção de tubos de aço com costura.....	8
Figura 2.5 – Parte mecânica.....	15
Figura 2.6 – Display de uma máquina CNC.....	15
Figura 2.7 – Controlador Lógico Programável.....	16
Figura 2.8 – Servomotor.....	16
Figura 2.9 – Movimento de um atuador em máquinas manuais.....	17
Figura 2.10 – Ajuste de calandra manual.	18
Figura 2.11 – Movimento de uma calandra convencional.	18
Figura 2.12 – Controle de movimento linear.	19
Figura 2.13 – Fuso com esferas recirculantes.....	19
Figura 2.14 – Motor de passo e suas partes.....	20
Figura 2.15 – Pulsos digitais de entrada do motor de passo.....	20
Figura 2.16 – Esquema de funcionamento do motor de passo.	21
Figura 2.17 – Sistema de controle de malha aberta.....	22
Figura 2.18 – Sistema de controle de malha fechada.....	23
Figura 2.19 – Caminho dos dados percorridos numa máquina ferramenta CNC.....	24
Figura 2.20 – Dobramento por tração.....	27
Figura 2.21 – Dobramento por compressão.....	27
Figura 2.22 – Dobramento por estiramento.....	27
Figura 2.23 – Calandragem com três cilindros.....	28
Figura 2.24 – Sistema de conformação de calandras: (a) tipo piramidal e (b) par de eixos tracionadores.....	28
Figura 2.25 – Calandra vertical de tubos motorizada.....	29
Figura 2.26 – Calandra de tubos e perfis hidráulica horizontal.....	30
Figura 2.27 – Calandra de tubos e perfis hidráulica vertical.	30
Figura 2.28 – Calandra de tubos e perfis motorizada e vertical.	31
Figura 2.29 – Diagrama tensão-deformação específica de materiais elastoplásticos.....	31

Figura 2.30 – Diagramas de tensão em materiais elastoplásticos: (a) $M < M_e$; (b) $M = M_e$; (c) $M > M_e$; (d) $M = M_p$	34
Figura 2.31 – Distribuição de tensões e deformações em uma seção típica de elemento de chapa.....	35
Figura 2.32 – Dispositivo de dobra de chapas sobre três cilindros.	36
Figura 2.33 – Geometria do processo de dobramento contínuo por rolos de chapas	37
Figura 2.34 - Efeito de mola no dobramento, $R_o < R_f$	40
Figura 2.35 – Esquema da alteração do raio de curvatura: (a) situação inicial e (b) situação após retorno elástico.....	42
Figura 2.36 – (a) Imagem real; (b) Filtragem Sobel, (c) Roberts e (d) Laplaciano com máscara 3x3.....	45
Figura 2.37 – Filtros de realce Laplace e Sobel.....	46
Figura 2.38 – Diagrama de cálculo do filtro Roberts.	46
Figura 3.1 – Fluxograma de desenvolvimento da metodologia proposta.....	48
Figura 3.2 – Fluxograma do usuário da metodologia.....	49
Figura 3.3 - Projeto conceitual de calandra	51
Figura 3.4 - Desenho peça curvada – caminho de dobra.....	53
Figura 3.5 – Definição do sistema de coordenadas	54
Figura 3.6 - Matrizes da calandra de tubos – posição “zero”	55
Figura 3.7 - Altura mínima da matriz superior.....	55
Figura 3.8 - Matrizes inferiores da calandra de tubos com sua distância fixa entre centros ...	56
Figura 3.9 - Desenho da peça (curva) com as matrizes inferiores e a superior	57
Figura 3.10 – Determinação geométrica da altura da matriz superior.....	58
Figura 3.11 - Diâmetro da matriz de dobra de tubo.....	58
Figura 3.12 - Tubo preso na morsa da dobradeira manual	60
Figura 3.13 - Peça dobrada com 90° e conferência do ângulo.....	60
Figura 3.14 – (a) Peça antes e (b) após liberá-la da morsa	60
Figura 3.15 - Peça comparada a um esquadro com ângulo menor que 90°	61
Figura 3.16 – Identificação de arcos (a) círculo passando por três pontos; (b) distância entre cada ponto e o centro do círculo; (c) arco ajustado identificado nos pontos	63

Figura 4.1 – Exemplo de dados de saída do programa de geração de código CNC (a) reta; (b) semicírculo.....	67
Figura 4.2 - Simulação auxiliar para determinação da posição Y e X da matriz conformadora.....	68
Figura 4.3 – (a) Exemplo de dados de saída do programa de geração de código CNC – retas e arco de raio fixo; (b) Simulação auxiliar para geração do código CNC .	68
Figura 4.4 – Dados de saída do programa de geração de código CNC – exemplo 1. (a) projeto e código CNC (b) simulação do raio 1 = 951,2mm (c) simulação do raio 2 = 2366,3mm	70
Figura 4.5 – Dados de saída do programa de geração de código CNC – exemplo 2.....	71
Figura 4.6 – Código CNC sem considerar recuperação elástica – exemplo 3.....	71
Figura 4.7 – Fotografias digitais para serem processadas.....	72
Figura 4.8 - Imagem de tubo filtrada com filtro Roberts.....	73
Figura 4.9 - Imagem de tubo filtrada com filtro Sobel	73
Figura 4.10 – Exemplo de arquivo texto gerado a partir da filtragem.....	74
Figura 4.11 – Arquivo texto carregado em CAD - Imagem pontilhada	75
Figura 4.12 – Detalhe dos pontos da imagem carregada e seleção do conjunto de pontos de uma curva	75
Figura 4.13 – Desenho do arco ajustado formado pelos pontos selecionados e o raio informado pelo programa	76
Figura 4.14 – Ângulo informado pelo programa e pelo recurso do CAD	76
Figura 4.15 – Peça de raios variáveis carregada em CAD.....	78
Figura 4.16 – Imagem peça com pontos desnecessários apagados.....	78
Figura 4.17 – Seleção de cada uma das quatro curvas da peça.....	79
Figura 4.18 – Raio das curvas da peça	80
Figura 4.19 – Desenho da peça pelo programa.....	80
Figura 4.20 – Código CNC da peça com raios variáveis.....	82
Figura 4.21 – Simulação auxiliar para determinação da posição Y da matriz conformadora .	83
Figura 4.22 – Esquema do programa desenvolvido.....	84

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Resultados recuperação elástica em tubos de aço.....	60
TABELA 3.2 - Resultados recuperação elástica em tubos de alumínio.....	60

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 – Comandos da linguagem de programação.....	24
--	----

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Institute of Steel and Iron
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA	Corrente Alternada
CAD	Computer Aided Design (Projetos Assistidos por Computador)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Manufatura Assistidos por Computador)
CAPP	Computer Aided Planning and Process (Planejamento e Processo Assistidos por Computador)
CC	Corrente Contínua
CIM	Computer Integrated Manufacturing (Manufatura Integrada por computador)
CLP	Computador Lógico Programável
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DIN	Deustaches Institute for Normuns
DNC	Direct Numeric Control (Controle Numérico Direto)
FMS	Flexible Manufacturing System (Sistemas Flexíveis de Produção)
FPA	Filtro Passa-Alta
FPB	Filtro Passa-Baixa
ISO	International Standard Organization
MCU	Multipoint Control Unit (Unidade de Controle Multiponto)
SAE	Society of Automotive Engineers
TI	Tecnologia de Informação

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A - Código G e suas funções.	94
ANEXO B - Nomograma utilização de mandril para tubo de parede fina.	96
ANEXO C - Gráfico de coeficiente de recuperação elástica (k).	97

SUMÁRIO

RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE QUADROS	XII
LISTA DE SIGLAS.....	XIII
LISTA DE ANEXOS	XIV
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Estrutura do trabalho.....	3
2 A PROBLEMÁTICA / FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1 Peças tubulares.....	5
2.2 Processos automatizados e sistemas flexíveis de produção (FMS).....	8
2.3 Máquinas CNC.....	13
2.3.1 Histórico.....	14
2.3.2 Composição das máquinas CNC.....	15
2.3.3 Movimento nas máquinas convencionais e máquinas CNC.....	17
2.3.4 Motores de acionamento.....	19
2.3.5 Sistemas de controle.....	22
2.3.6 Introdução à Programação CNC.....	23
2.4 Princípios de conformação por dobramento.....	26
2.5 Análise do processo de conformação mecânica de dobramento.....	31
2.5.1 Dobramento contínuo por rolos - chapas.....	34
2.5.2 Dobramento contínuo por rolos - tubos.....	38
2.6 Recuperação elástica.....	39
2.7 Processamento de imagem.....	43
2.7.1 Filtros Clássicos.....	44
3 METODOLOGIA.....	47
3.1 Princípio operacional do equipamento.....	49
3.2 Implementação do Programa.....	52

3.3	Reconhecimento dos dados geométricos do desenho CAD.....	53
3.4	Sistema de coordenadas para o programa CNC.....	53
3.5	Funções de posicionamento X e Y.....	55
3.6	Velocidade de avanço.....	58
3.7	Determinação experimental da recuperação elástica.....	59
3.8	Controle de qualidade por processamento de imagens	62
3.9	Dados de configuração	64
4	RESULTADOS	65
4.1	Geometrias simples	66
4.2	Peças com raios variáveis.....	69
4.3	Controle do processo por processamento de imagem	72
4.4	Medida de raios variáveis.....	77
4.5	Estrutura operacional do programa	83
4.6	Estimativa de recuperação elástica teórica.....	86
5	CONCLUSÕES	88
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	89
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
	ANEXOS	94

1 INTRODUÇÃO

O caminho do avanço da tecnologia é longo. Muito já se conquistou até atingir o nível em que se está atualmente. Porém, ainda há muito a ser descoberto em todas as áreas, especialmente a tecnologia de ponta. Os avanços em processos de fabricação têm um papel fundamental para a indústria, representam agilidade, produtividade e capacidade técnica de produção.

A grande concorrência no mercado atual faz com que as empresas sejam cada vez mais competitivas. Ser competitivo significa ter flexibilidade na produção de produtos, ser diferenciado, oferecer algo a mais a seus clientes, oferecer produtos de boa qualidade, custo baixo, prazo de entrega reduzido e prazo de pagamento extenso, ou seja, ter agilidade e eficácia. A automação de processos produtivos é uma realidade e as empresas devem acompanhar esta tendência, já que é possível flexibilizar a produção e oferecer produtos diferenciados, sem considerar aspectos como redução de custos com funcionários, de segurança e padronização. Não raras vezes, as empresas acabam limitando sua capacidade técnica produtiva e também de competitividade em termos de flexibilidade, devido ao não investimento em novas tecnologias.

As empresas devem buscar cada vez mais a flexibilidade, focando as necessidades dos clientes. Conforme Rocha (2001), a tecnologia de automação flexível é representada por máquinas e equipamentos programáveis e que possam ser adaptados à demanda, tanto em termos quantitativos quanto qualitativos. Ainda comenta que este tipo de investimento permite que numa mesma empresa se produza uma certa quantidade de produtos diferenciados (papel da *“lean production”* na indústria automobilística), possibilitando uma maior capacidade de adaptação às variações de demanda e um melhor aproveitamento da capacidade produtiva (redução da ociosidade nos processos). O fator de competitividade empresarial, foco do presente trabalho, é a capacidade das empresas em oferecer produtos diferenciados.

A utilização de máquinas Comando Numérico Computadorizado (CNC) vem desempenhando um papel fundamental neste processo de automação e flexibilização de fabricação e, de maneira geral, representam um avanço nos processos produtivos. Além disto, o uso de Projetos Assistidos por Computador / Manufatura Assistidos por Computador (CAD/CAM) integrados permite elaboração de modelagens e programas para peças de geometria complexas.

Inúmeras empresas, dos mais variados ramos, têm a necessidade de curvar tubos, chapas e perfis. Os tubos industriais metálicos, por exemplo, são largamente utilizados em produtos e os metais mais utilizados para a sua fabricação são o aço e o alumínio. Muitas são as aplicações para os tubos industriais metálicos, pode-se citar vários exemplos:

- móveis tubulares em geral (camas, mesas, cadeiras, banquetas, estantes, etc.);
- corrimãos e guardas;
- peças tubulares automotivas, como escapamentos, estruturas para reforço interno de automóveis e acessórios (para-choques, “Santo Antônio” e bagageiros);
- estruturas metálicas;
- máquinas agrícolas;
- sinalização rodoviária.

Para a fabricação de peças tubulares curvadas, alguns equipamentos podem ser utilizados: calandras, dobradeiras manuais, com acionamento elétrico, pneumático, CNC. Para curvar peças com raios fixos e/ou variáveis, as calandras de tubos são muito utilizadas. Semelhantes às calandras de chapas, no princípio de funcionamento, as calandras de tubos são equipamentos que permitem o curvamento de tubos ou mesmo de perfis.

Atualmente no mercado, são oferecidas desde as máquinas curvadoras totalmente manuais até as mais automatizadas, de grande porte e alta produtividade. Máquinas totalmente programáveis, porém, têm alto custo de investimento. Além disto, muitas vezes, as empresas necessitam de máquinas curvadoras que são capazes de executar várias tarefas em cada operação. Por isto, são oferecidas algumas máquinas que, além de executarem a dobra, furam, cortam, fazem amassamentos, rebaixam e expandem os tubos, ou seja, executam praticamente todas as operações que são necessárias para que o tubo possa ser utilizado diretamente no produto. O fato do equipamento ser automatizado, independente do seu porte e produtividade, eleva muito o seu custo. Acredita-se que o alto investimento em equipamentos é a maior barreira para que empresas de pequeno e médio porte possam automatizar seus processos.

Devido a esses aspectos, a grande motivação para este trabalho é o desafio de propor adaptações para calandras de chapas ou tubos para curvar peças com raios de curvaturas fixos e/ou variáveis, com um sistema automático programável utilizando um sistema CAD. Desta maneira, pretende-se demonstrar que através da possibilidade de transformação de uma máquina convencional em CNC, pode-se obter equipamento com a vantagem de um custo mais baixo, comparando-se com as máquinas CNC oferecidas pelo mercado, além de uma

facilidade maior de execução de peças de raios variáveis, se comparado com calandras manuais.

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia de operação de calandras segundo os princípios de máquinas CNC e que seja possível curvar peças com raios de curvaturas fixas e/ou variáveis. A metodologia apresentada serve para adaptação de calandras em geral de chapas, tubos industriais e perfis metálicos. Porém, o foco central, as discussões e a demonstração de viabilidade da metodologia serão acerca de calandras de tubos.

Para mostrar a viabilidade de transformar uma calandra convencional em uma calandra programável (CNC), é objetivo específico desse trabalho desenvolver um projeto mecânico conceitual de adaptação, sem detalhamento, que possa ser adaptado a diversas calandras já existentes no mercado, resguardadas as características descritas no item 3.1. O sistema computacional implementado está diretamente relacionado com o princípio de operação proposto nesse projeto e tem a finalidade de gerar automaticamente o programa CNC através da interpretação geométrica dos dados do desenho em CAD da peça a ser conformada. A técnica adotada para implementação dessas funções de integração CAD/CAM é a utilização de recursos do CAD para desenvolvimento de aplicativos.

A aplicação, nesse trabalho, de técnicas de processamento de imagens, tem como objetivo desenvolver uma ferramenta para realização do controle de qualidade do sistema produtivo de conformação. O método é utilizado para medição de raios de curvaturas de peças processadas, para ajuste dos parâmetros do processo devido à recuperação elástica do material. A justificativa para a implementação dessa técnica é a possibilidade de eliminar a necessidade de adequação ao processo produtivo, de equipamentos apropriados para a medição desse parâmetro geométrico.

1.1 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, sendo o primeiro uma introdução sobre o trabalho a ser desenvolvido, trazendo a motivação e os objetivos a serem alcançados. O segundo capítulo apresenta uma descrição do problema e a fundamentação teórica do trabalho. O terceiro capítulo destina-se a apresentação das técnicas e da metodologia utilizada no trabalho. Já o quarto capítulo mostra uma descrição detalhada de todos os passos necessários para obter a resolução do problema de pesquisa. O quinto capítulo mostra os

resultados finais obtidos, comparando-os aos objetivos iniciais. Além disto, propõe sugestões para futuros trabalhos a serem pesquisados e desenvolvidos.

2 A PROBLEMÁTICA / FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O foco deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia de operação de calandras segundo os princípios de máquinas CNC. Com este intuito, é demonstrada a viabilidade de adaptação de calandras de tubos ou chapas em equipamentos com sistema automático programável para curvar peças industriais metálicas com raios fixos e/ou variáveis. Esse trabalho apresenta, além de uma proposta de projeto conceitual que define o princípio de operação do equipamento, um programa computacional que reconhece o desenho de uma peça (que se deseje curvar) em um sistema CAD e gera automaticamente o programa CNC para sua execução. Esse programa prevê ajustes nos parâmetros do processo para corrigir erros geométricos de fabricação, através de processamento de fotos tiradas das peças executadas pela máquina. Esses erros são constatados comparando-se os dados de projeto, elaborado em sistema CAD, com a peça pronta (já curvada) e que são decorrentes do efeito de mola ou recuperação elástica do material e possíveis desgaste na própria calandra.

Para o desenvolvimento e resolução do problema, serão explorados alguns assuntos pertinentes ao trabalho, que constituirão a fundamentação teórica:

- processo de curvamento, com ênfase em peças tubulares;
- processos de fabricação direcionados a processos automatizados e sistemas flexíveis de produção;
- máquinas CNC, focando tipos de movimentos das máquinas CNC, linguagem de programação e geração de programa CNC e acionamentos;
- princípio de operação das curvadoras existentes no mercado, com ênfase em operações de calandras de tubos e perfis;
- análise do processo de conformação mecânica de dobramento;
- recuperação elástica ou efeito de mola, que deve ser levada em consideração nos cálculos do programa para executar a dobra o tubo;
- filtros de imagem utilizados no processamento de imagem.

2.1 Peças tubulares

Os tubos metálicos industriais são utilizados na fabricação de muitos produtos. Eles têm uma grande importância, especialmente nas indústrias moveleira, automobilística,

metalúrgica, serralheria e construção civil. Algumas peças produzidas a partir de tubos metálicos são conformadas utilizando dobradeiras e calandras manuais de acionamento elétrico, pneumático ou programáveis. Como exemplo de produtos que utilizam tubos com curvaturas de raios variáveis pode-se citar os móveis tubulares, conforme ilustram as figuras 2.1 e 2.2. A figura 2.3 apresenta peças conformadas.



Figura 2.1 – Cadeiras tubulares com raios de curvaturas variáveis. Fonte: MOR, 2008.



Figura 2.2 – Cadeira tipo lounge chair com tubos de raios variáveis. Fonte: TOKSTOK, 2008.

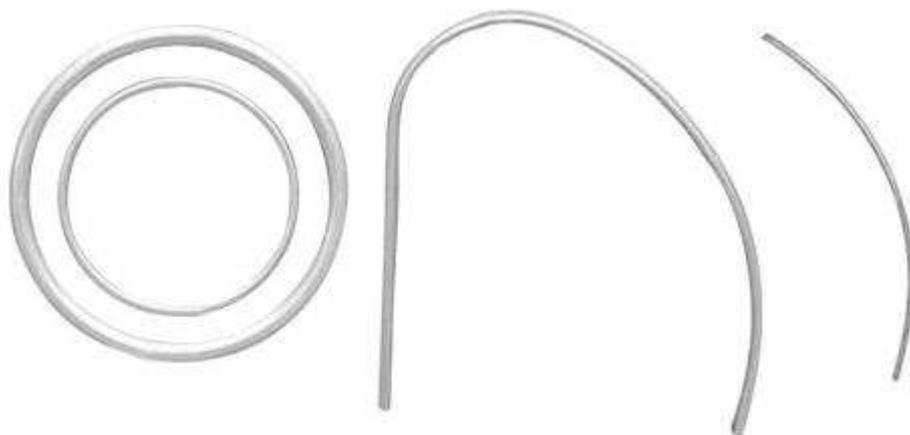


Figura 2.3 – Peças tubulares calandradas. Fonte: ZAPROMAQ, 2008.

Tubos conformados podem ser produzidos em vários metais, principalmente aço e alumínio. Os tubos de aço podem ser fabricados em uma variada gama de ligas e dimensões, que são fornecidos normalmente segundo especificações de normas como American Society for Testing and Materials (ASTM), Deustaches Institute for Normuns (DIN), American Petroleum Institute (API), American Institute of Steel and Iron (AISI), Society of Automotive Engineers (SAE), Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e outras.

A fabricação dos tubos de aço para aplicações industriais no Brasil atende às Normas ABNT NBR 6591, que determina a utilização de aços da série 1006 a 1012, fabricados com ou sem costura. A figura 2.4 mostra um fluxograma de fabricação de tubos de aço com costura. A matéria-prima utilizada é comprada em forma de bobinas, que são classificadas em dois grandes grupos: laminadas a frio e a quente.

Os tubos de alumínio são fabricados em diversas ligas e o processo mais utilizado para sua fabricação é a extrusão. Após a extrusão os tubos são temperados com diversas especificações, dependendo da aplicação a que se destinam. Os fornecedores de tubos oferecem alguns acabamentos especiais, sendo os mais usuais: decapados, oleados, galvanizados, com superfície fosfatizada, com pintura eletrolítica a pó, com superfície brilhante para cromagem para os tubos de aço e com superfície brilhante, escovados, anodizados ou pintados para os tubos de alumínio. Quanto ao formato, os tubos podem ter seção redonda, retangular, quadrada, oblongo, semi oblongo, elíptica, triangular, oitavado. Alguns fabricantes de tubos fornecem tubos com formatos especiais como ovo, gota, I, etc.

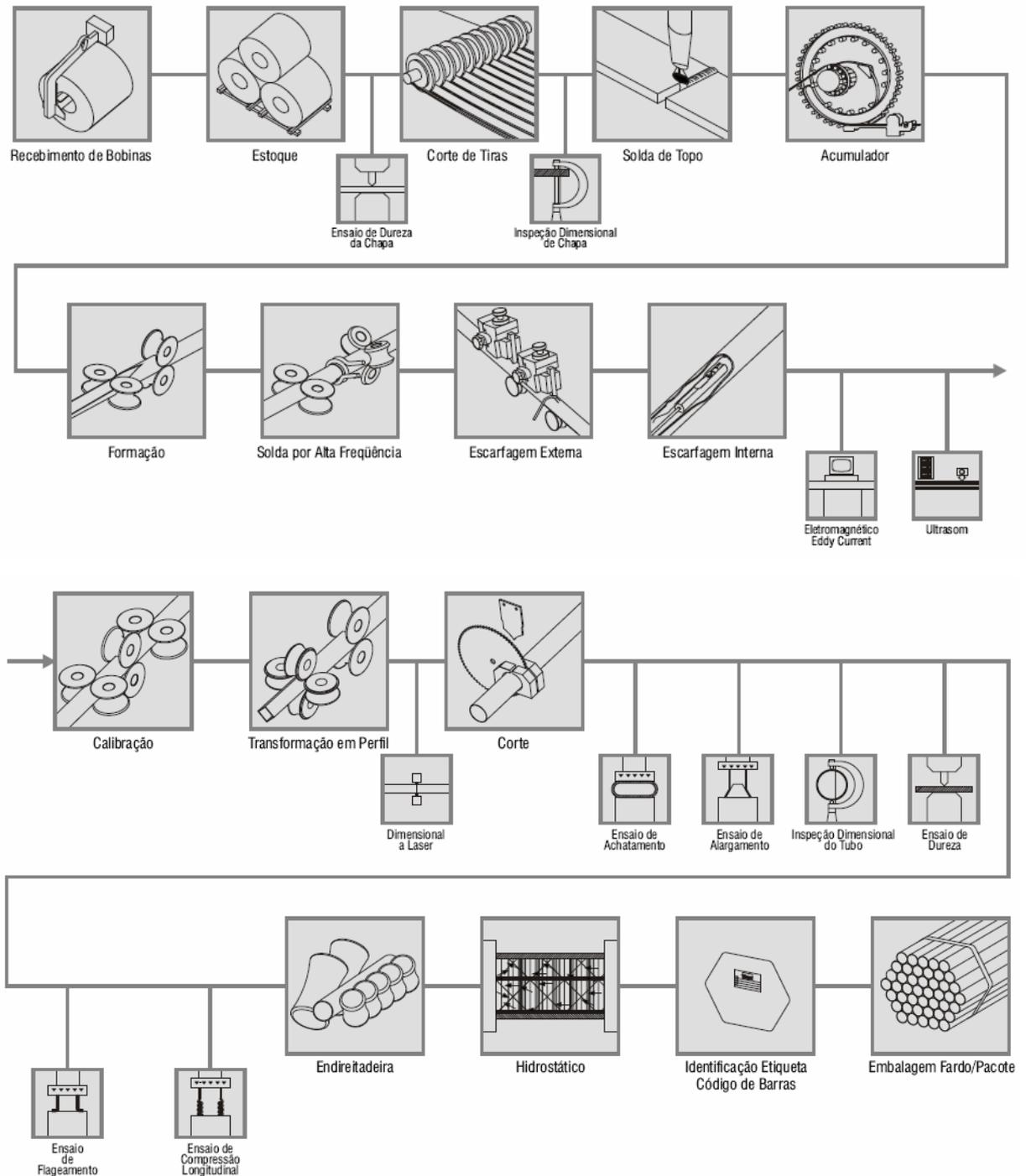


Figura 2.4 – Fluxograma de produção de tubos de aço com costura. Fonte: TUPER, 2008.

2.2 Processos automatizados e sistemas flexíveis de produção (FMS)

Segundo Weck (1984 apud NEVES, 2005), o termo automação é aplicado a tudo que é feito para que parte ou todo um processo seja realizado e acordo com um programa previamente ajustado, sem a intervenção da atividade humana para seu controle. A

mecanização substitui o trabalho dos seres humanos por dispositivos e movimentos motorizados. A tecnologia de controle liberta o homem de monótonas atividades cerebrais fazendo o armazenamento, o processamento e a transmissão lógica da seqüência de informações, tornando fundamental para que a automação seja alcançada. Depois de realizar sua alimentação com a matéria-prima apropriada, os procedimentos de ajuste ou programação sozinha, capacidade de executar repetidamente determinadas tarefas, a máquina é considerada automática. O avanço tecnológico nas últimas décadas teve grande participação para minimizar os custos das indústrias, através da adoção de diversos modelos de produção.

O uso de máquina CNC não implica em substituir o operador por um computador. As grandes diferenças entre os dois tipos de máquinas, CNC e convencionais, são o tempo de produção e a repetibilidade das peças. O tempo de fabricação de uma peça em máquina CNC pode ser significativamente menor. Além disto, a complexidade geométrica pode exigir um esforço sobre-humano do operador em máquinas convencionais (MUNDO CNC, 2007). Muitas peças com geometrias de extrema complexidade só são possíveis de serem criadas devido ao advento do CNC. Pode-se perceber essa complexidade nas linhas aerodinâmicas dos atuais automóveis, cujos contornos se modificaram com muita rapidez. Máquinas com comando numérico representam a principal ferramenta para se adquirir flexibilidade exigida dos sistemas produtivos atuais. Os modelos T de Henry Ford, quando se deu o início da fabricação em série de automóveis, eram todos iguais e com a mesma cor: preta. Ao consumidor só era ofertado um modelo, diferentemente dos dias atuais, onde a colocação de um novo modelo no mercado é tão rápida e existem tantos modelos, cores e acessórios (MUNDO CNC, 2007).

Segundo Goellner (2006), a utilização de máquinas CNC na produção permite alterar as características de um determinado produto com grande rapidez. A adaptação ao novo produto ocorre basicamente com a troca ou alteração do programa CNC tornando assim, a produção mais flexível.

Para Costa (2004) as principais vantagens na adoção de máquinas CNC são:

- automação flexível, sendo possível adaptação para diversas necessidades;
- fabricação com repetibilidade de tolerâncias em formas e dimensões;
- fabricação mais fácil de ser controlada pela gerência;
- fabricação econômica de pequenos e médios lotes;
- permite rápidas mudanças no projeto;
- uniformidade da produção;

- redução de custos com quantidade de funcionários;
- minimização de tempo de fabricação, refugo e retrabalho.

Porém, Costa (2004) também cita algumas desvantagens das máquinas CNC:

- necessidade de capital inicial alto;
- manutenção mais complexa e às vezes mais demorada;
- qualificação de pessoal e funcionários mais especializados.

Para aquisição de um sistema completo, do projeto à peça fabricada em máquina CNC, é necessário possuir e integrar alguns sistemas (*hardware e software*), de forma a flexibilizar o projeto e a produção:

- sistema de programação CNC – CAD/CAM;
- sistema de simulação;
- manufatura digital;
- pós processador;
- sistema DNC – gerenciar e transferir programas (rede) para a máquina (MUNDO CNC, 2007).

Outro aspecto que deve ser levado em consideração é o *layout* da fábrica. Como a preparação do *layout* é um trabalho importante deve ser bem planejado e implantado. Para a elaboração do *layout* são necessárias algumas informações como: especificações e características do produto, quantidade a ser produzida, matérias-primas, seqüência das operações, espaço para os equipamentos, informações sobre recebimento e estocagem (GAITER & FRAZIER, 2001). Além disto, os operadores das máquinas CNC devem estar preparadas e treinados adequadamente, focados no ramo da empresa.

O foco estratégico das empresas está em perseguir níveis maiores de lucratividade, compreender e atender as exigências e necessidades dos seus clientes. Cabe as empresas distinguirem o que apenas as qualificam junto a seus clientes daquilo que efetivamente cria vantagens competitivas, ou seja, quais são os fatores que realmente são ganhadores de pedidos (SLACK, 2002 apud CARVALHO, 2006). Analisando sob este aspecto, a automação dos processos deve ser realmente investida se o foco da empresa estiver naquele determinado processo.

Tachizawa & Scaico (1997) apresentam um modelo de organização flexível como uma alternativa viável das empresas se manterem competitivas no mercado. É uma forma organizacional de identificação e separação dos processos produtivos, verificando quais são realmente estratégicos para a empresa e quais são processos de apoio. A organização flexível

deve ser focada nos processos que são estratégicos, terceirizando os processos de apoio e buscando estabelecer uma estrutura interna enxuta e ágil. A missão, a visão, a finalidade básica e os elementos estratégicos da empresa devem ser levados em conta para ajudar na identificação dos processos-chave.

Devido a muitos aspectos analisados pelas empresas no momento de decisão pela automação, muitas acabam terceirizando seus processos. Desta maneira, surgem novas oportunidades de negócios para empresas que se especializam em terceirizar serviços a outras, como usinagem de peças, dobra de tubos e corte e solda de peças.

Muitas empresas descobriram uma alternativa possível para a sobrevivência neste concorrido mercado: a concentração de esforços na missão da empresa, ou seja, nas suas principais competências (atividades fins), deixando a cargo de empresas terceirizadas as atividades acessórias (atividades de meio). Isto levou ao enxugamento do quadro de funcionários, redução de custos e melhores resultados para manter-se no mercado (POLL et al, 2006, p. 76).

Segundo Araújo (2001) as atividades de meio podem ser direcionadas a outras empresas sem comprometer sua eficiência, sendo que, em muitos casos, até melhorar o desempenho no que tange a qualidade e competitividade. Ainda complementa, dizendo que a terceirização é buscar, em empresas externas, a solução para problemas de gestão organizacional da própria empresa.

Para Mendes (1995), há uma tendência na indústria atual rumo à produção cada vez mais flexível. As modalidades de organização e o desenvolvimento industrial advindo dos processos de automação vêm alterando os processos organizacionais. Automação flexível, flexibilidade das funções e trabalho flexível marcam o processo produtivo. O panorama brasileiro das empresas se apresenta muito heterogêneo, visto que, setores flexibilizados convivem, lado a lado, com setores *taylorizados*¹ e/ou *fordistas*². Contudo, diante da

¹ *Taylorizados* - Taylorismo ou Administração científica é o modelo de administração desenvolvido pelo engenheiro estadunidense Frederick Winslow Taylor (1856-1915), que é considerado o pai da administração científica. Taylor pretendia definir princípios científicos para a administração das empresas. Tinha por objetivo resolver os problemas que resultam das relações entre os operários, como consequência modificam-se as relações humanas dentro da empresa, o bom operário não discute as ordens, nem as instruções, faz o que lhe mandam fazer. A gerência planeja e o operário apenas executa as ordens e tarefas que lhe são determinadas. (WIKIPÉDIA, 2008)

² *Fordistas* - Idealizado pelo empresário estadunidense Henry Ford (1863-1947), fundador da Ford Motor Company, o **Fordismo** é um modelo de Produção em massa que revolucionou a indústria automobilística na primeira metade do século XX. Uma das principais características do Fordismo foi o aperfeiçoamento da linha de montagem. Ficou famosa a frase de Ford, que dizia que poderiam ser produzidos automóveis de qualquer cor, *desde que fossem pretos*. O motivo disto era que com a cor preta, a tinta secava mais rápido e os carros poderiam ser montados mais rapidamente. (WIKIPÉDIA, 2008)

concorrência do mercado, passam a serem os objetivos das empresas a qualidade dos produtos e a flexibilização da produção. Porém, é necessário considerar que, para se obter a flexibilização funcional nas organizações, um novo perfil de qualificação de mão-de-obra deve emergir.

Para Neves (2005) a utilização de máquinas CNC tem uma papel importante na flexibilização da produção, já que, quando um programa é testado e aprovado, podem ser produzidos dois, dez ou mil produtos idênticos, tendo grande precisão e repetibilidade. Pela flexibilidade das máquinas ferramenta CNC, ele também pode ser substituído facilmente por um próximo tipo de peça a ser produzida, havendo trocas rápidas na preparação da máquina (*set up*), sendo estas máquinas muito fáceis de preparar e produzir um certo produto, sendo que os programas podem ser carregados facilmente.

Um sistema flexível de fabricação é um conjunto de equipamentos composto basicamente por diferentes tipos de máquinas-ferramenta de controle numérico e de robôs (destinados a carga, descarga e movimentação dos materiais em cursos de produção entre equipamentos que fazem a usinagem). Normalmente, os sistemas de automação flexível são usados na produção de pequena escala (como de bens de capital) e, no limite, podem prescindir quase completamente da atividade humana para seu funcionamento regular. Neste caso, trata-se de uma automação quase total da fabricação em pequena escala (TAUILE, 2001 apud GOELLNER, 2005).

Segundo Goellner (2005), o resultado do desenvolvimento da automação flexível é uma nova e crescente importância da noção de economia de escopo: facilidade de reprogramação, fazendo com que o mesmo conjunto ou equipamento possam ser utilizados na produção de diferentes produtos ou similares (com especificações diferentes). Desta forma, isto implica em uma economia de investimentos necessários à fabricação de bens com especificações técnicas razoavelmente similares, mas que não têm individualmente uma demanda, conseqüentemente, um volume grande e estável de produção prevista para que justifique a adoção de uma automação rígida.

Conforme Rocha & Sales (2001) a utilização da microeletrônica criou novas oportunidades para os processos de automação, porém, com conseqüências significativas para o trabalho humano. Desta forma, exige-se que os trabalhadores realizem tarefas variadas e multi-qualificadas estimulando o desenvolvimento do conhecimento e do domínio sobre o conjunto do processo produtivo.

Rocha & Sales (2001) dizem que o novo paradigma tecno-econômico que é definido pelo conjunto de regras de melhor prática que é caracterizado: pela microeletrônica Tecnologia da Informação (TI), pelas tecnologias de automação flexível relacionadas com as técnicas de produção e por novas técnicas de gestão e organização como *just-in-time*, controle da qualidade total, zero defeito, terceirização, etc. Perez (1992 apud ROCHA & SALES, 2001) definem que a microeletrônica é composta pelos seguintes elementos: empresas de computação, empresas de programação e os serviços de dados e informações; a eletrônica industrial, a mecatrônica, a instrumentalização, os robôs, o desenho computadorizado, a manufatura computadorizada e outros novos campos do setor de bens de capital; transformação da tecnologia do setor de telecomunicação com os seus fornecedores de equipamentos de comunicação, satélites, fibras óticas, etc.

Com a automação flexível, segundo Rocha & Sales (2001), a adaptabilidade em termos quantitativos das empresas dos países em desenvolvimento podem conseguir produtividade elevada sem ter que direcionar a produção para um grande mercado. É com base nesse novo paradigma que as empresas brasileiras devem buscar se reestruturar de forma que se tornem mais produtivas, com maior qualidade dos seus produtos (e serviços), competitivas e flexíveis.

2.3 Máquinas CNC

Conforme Neves (2005), quase não existem produtos que não estejam de alguma forma relacionados à tecnologia das máquinas CNC. Elas podem ser encontradas em vários ambientes: desde pequenas oficinas de usinagem a grandes companhias de manufatura. São de grande utilidade, principalmente por sua automação, podendo serem utilizadas sem nenhum acompanhamento humano durante um ciclo de operação completo, liberando o operador para outras tarefas. Outros benefícios incluem fadiga do operador reduzida sendo menos suscetível ao erro humano, operação precisa e tempo previsível para cada produto. Nos processos de fabricação automatizados, as máquinas CNC têm sido amplamente empregadas, tanto para produção de peças complexas como para produção de pequenos lotes, sendo utilizadas em centros de Manufatura Integrada por Computador (CIM), onde a precisão, repetibilidade, flexibilidade e qualidade são os objetivos principais. Várias modificações, dispositivos, circuitos eletrônicos e outros acessórios foram sendo incorporados e aperfeiçoados com o aparecimento das máquinas CNC para torná-las cada vez mais “independentes” do homem.

Alguns equipamentos utilizados em sistemas como CIM e FMS, surgiram para minimizar a necessidade de uma forte automatização e integração entre os recursos disponíveis nas máquinas. Estes são caracterizados por uma grande autonomia em relação ao homem, por ser essencial a utilização de processos automáticos de carga e descarga de peças e ferramentas.

Conforme Amic (1997 apud NEVES, 2005), equipamento CNC é qualquer processo de fabricação no qual a operação é executada automaticamente numa seqüência especificada por um programa que contém informações para os movimentos da ferramenta.

O Controle Numérico nasceu e é mais utilizado em máquinas de usinagem, porém vem sendo ampliado de tal forma que, praticamente todas as áreas fabris, tenham sido atingidas por esta tecnologia. Empresas, principalmente as de transformação de metais, que pensam no futuro não podem deixar de planejar suas atividades sem considerar a tecnologia CNC. Esta questão pode significar a diferença entre a continuidade e a extinção de uma empresa. Como a implantação de qualquer tecnologia exige conhecimento, é importante que os investimentos sejam feitos consultando-se quem já convive com estes meios há tempos.

2.3.1 Histórico

A máquina idealizada por Joseph Jacquard (1801) pode ser considerada uma precursora das máquinas CNC modernas, pois utilizava cartões perfurados como comando para produzir os padrões de tecidos. Porém, provavelmente a primeira aplicação de CN foi elaborada por John C. Parsons e sua equipe, da empresa Parsons Corporation Travers City, fabricantes de rotores de helicópteros, em Michigan. Eles não conseguiam produzir gabaritos para os rotores na velocidade exigida e foi então que Parsons conectou um “computador” (da época) a uma máquina operatriz. Parsons utilizou cartões perfurados para codificar as informações e chamaram esse sistema de Digitron (FIGUEIRA, 2002/2003 apud GOELLNER, 2006).

Em 1949 a Força Aérea Americana contratou a empresa Parsons para estudar uma aplicação dos sistemas de CN e promover uma aceleração na produção de componentes dos aviões e mísseis, que estavam cada vez mais complexos. A empresa subcontratou o laboratório de Servomecanismos do Massachusetts Institute of Technology (MIT), que acabou criando o termo “Numerical Control”, resultado da experiência de adaptação de uma fresadora de três eixos. Este protótipo foi equipado com um complexo sistema eletromecânico, que controlava a movimentação das ferramentas e peças utilizando basicamente um grande número de relés conectados por cabos (KANITAR, 2005 apud GOELLNER, 2006).

Poucos anos após a criação do computador, na década de 50, já se construíram máquinas de CN. Mas foi na década de 70 que houve implantação comercial para os sistemas CN. Em contrapartida a toda essa nova tecnologia que estava iniciando, um problema estava a ser enfrentado: o alto custo dos equipamentos e a baixa flexibilidade. Certamente esses problemas iniciais no processo de fabricação de máquinas CNC já foram consideravelmente reduzidos, porém, a questão do custo dos equipamentos ainda é uma barreira, especialmente para empresas de pequeno e médio porte.

2.3.2 Composição das máquinas CNC

As máquinas que possuem CNC são constituídas basicamente das seguintes partes, cujos componentes funcionam sincronizados (MUNDO CNC, 2008).

- parte mecânica, ou seja, a máquina convencional em si (figura 2.5);

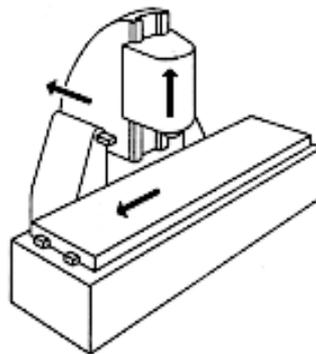


Figura 2.5 – Parte mecânica. Fonte: MUNDO CNC, 2008.

- o comando ou controle numérico (figura 2.6);

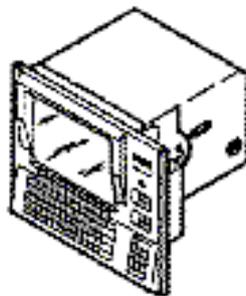


Figura 2.6 – Display de uma máquina CNC. Fonte: MUNDO CNC, 2008.

- o Controlador Lógico Programável (CLP) (figura 2.7);



Figura 2.7 – Controlador Lógico Programável. Fonte: MUNDO CNC, 2008.

- motores de acionamento, especialmente os servomotores e motores de passo (figura 2.8);



Figura 2.8 – Servomotor. Fonte: FESTO, 2008.

O comando (ou controle) numérico é o equipamento que interpreta o programa CNC e traduz em comandos que são enviados ao CLP e às chaves ou válvulas eletromecânicas acionadas por pulsos eletrônicos (*Microwitches*) para que os eixos sejam acionados. O comando CNC ainda gerencia a interface da máquina com o operador (*display*, botões, acionadores, etc.).

Os CLPs auxiliam os controles nos cálculos matemáticos. É um dispositivo de computador que controla, além de máquinas CNC, diferentes tipos de equipamentos na produção industrial tais como sistemas de transporte, linhas de máquinas de processamento de alimentos.

2.3.3 Movimento nas máquinas convencionais e máquinas CNC

Numa máquina convencional manual, um operador movimenta o atuador girando uma manivela (manípulo), como se pode verificar na figura 2.9. O acionamento é alcançado como função do número de voltas a serem dadas na manivela com anel graduado, e a precisão depende da perícia do operador.

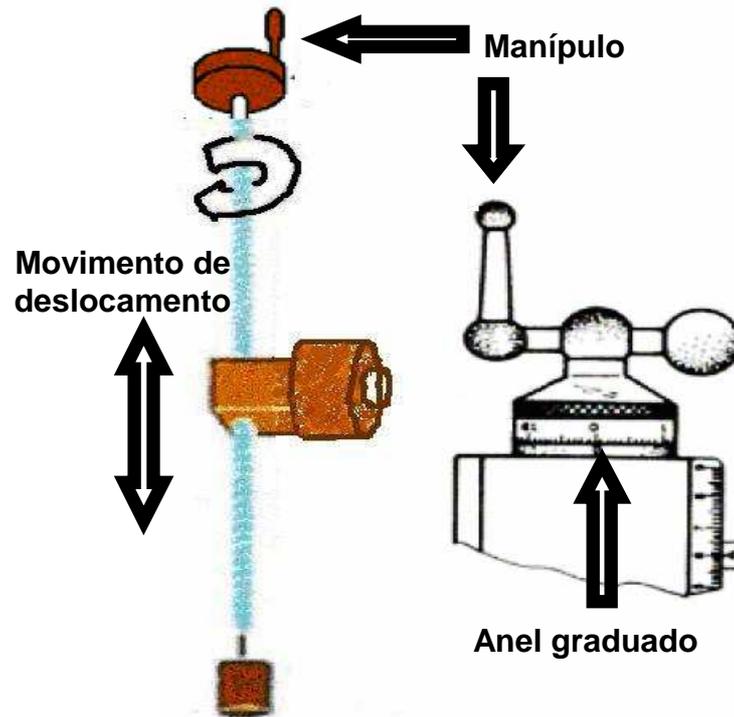


Figura 2.9 – Movimento de um atuador em máquinas manuais. Fonte: Adaptado COSTA, 2007.

Nas calandras de tubos, chapas e perfis o movimento das matrizes ou roldanas é através de um manípulo e um fuso principal (figura 2.10). No caso da calandra da figura 2.11, há o recurso de movimento das duas matrizes inferiores, feito através dos manípulos superiores.

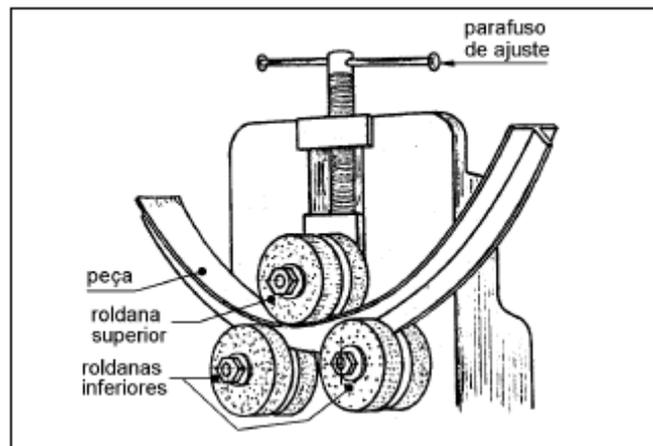


Figura 2.10 – Ajuste de calandra manual. Fonte: TELECURSO 2000, 2008.

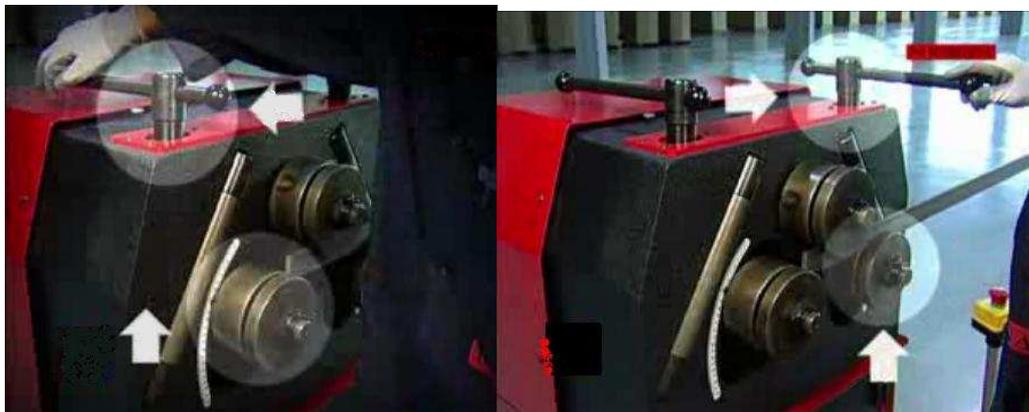


Figura 2.11 – Movimento de uma calandra convencional. Fonte: YOUTUBE, 2008.

A função básica de acionadores em máquinas CNC, é o controle de movimentos precisos de seus eixos automaticamente onde os movimentos mais comuns são lineares (dirigido ao longo de um caminho reto) e rotativos (dirigido ao longo de um caminho circular). As máquinas CNC têm seus eixos movimentados sob controle de motores e guiados por um programa, diferenciando-se assim das máquinas convencionais que movimentam-se por controles manuais, como por exemplo manivelas. Em todas as máquinas CNC a quantidade de movimentos e a taxa de avanço (*feedrate*) são programáveis para o tipo de movimento (linear, rápido ou circular) do eixo. A figura 2.12 mostra o controle de movimento de eixo linear de uma máquina CNC.

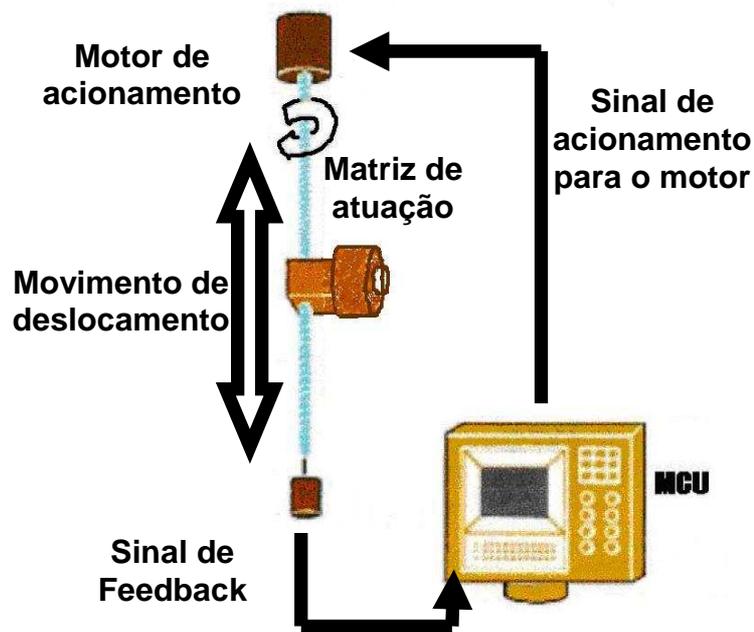


Figura 2.12 – Controle de movimento linear. Fonte: Adaptado COSTA, 2007.

Para se garantir uma grande precisão no posicionamento das máquinas em todos os pontos de deslocamento, segundo Neves (2005), é montado um fuso que movimenta a parte móvel usando uma porca especial com esferas recirculantes em canais retificados (figura 2.13). Os fusos de esferas são elementos que possuem uma movimentação mais suave e precisa que cremalheiras-pinhão.

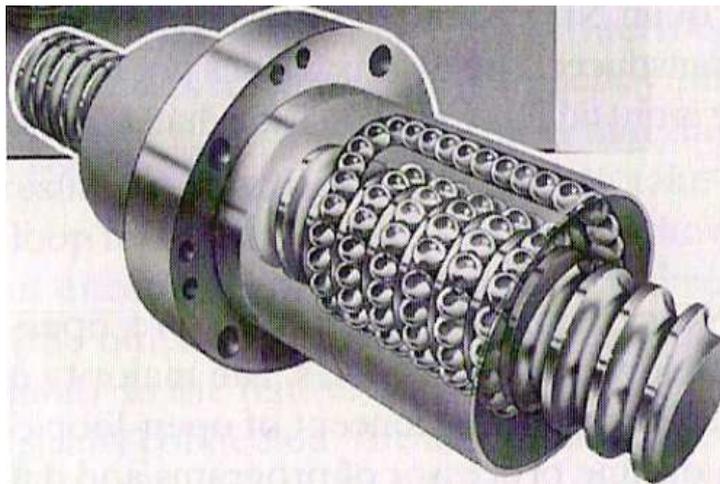


Figura 2.13 – Fuso com esferas recirculantes. Fonte: Neves, J. A. p.55, 2005.

2.3.4 Motores de acionamento

De acordo com Amic (1997 apud NEVES, 2005), os motores de acionamento controlam o movimento de deslocamento dos carros das máquinas CNC. Utilizando-se

basicamente quatro tipos de motores: motores de passo, servo motores de corrente contínua, servo motores de corrente alternada e servo motores hidráulicos.

Os motores de passo convertem pulsos digitais, num pequeno ângulo de rotação, gerado pela unidade de controle multiponto (MCU), controlando sua rotação pelo número de pulsos que o MCU emite ao motor. São dispositivos (*drivers*, CD-ROM, etc.) especiais que controlam os ângulos de giro de seus rotores, girando em etapas discretas e podem ser observados na figura 2.14. O motor de passo, comparado com outros motores, apresenta maior estabilidade podendo obter uma rotação específica de um certo grau, calculando-se o número de rotação de pulsos, o que possibilita uma boa precisão no movimento. O motor de passo converge energia elétrica em movimento controlado através de pulsos, ocasionando o deslocamento por passo, onde passo é o menor deslocamento angular conforme figura 2.15. Convergem pulsos digitais de entrada em movimentos angulares do seu eixo, e ainda, não usam escovas ou comutadores.

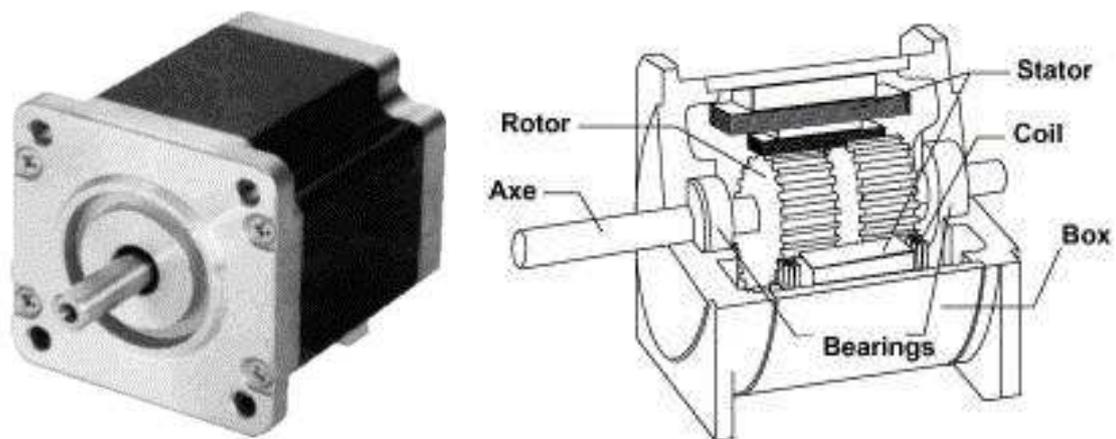


Figura 2.14 – Motor de passo e suas partes. Fonte: SCIENCE DIRECT, 2007.

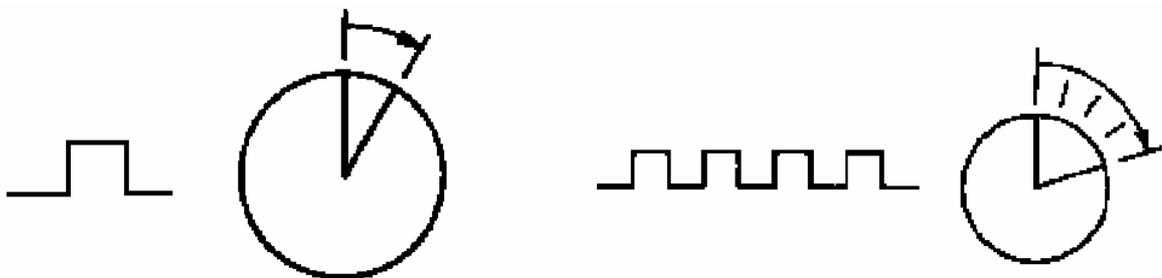


Figura 2.15 – Pulsos digitais de entrada do motor de passo. Fonte: GEOCITIES, 2007.

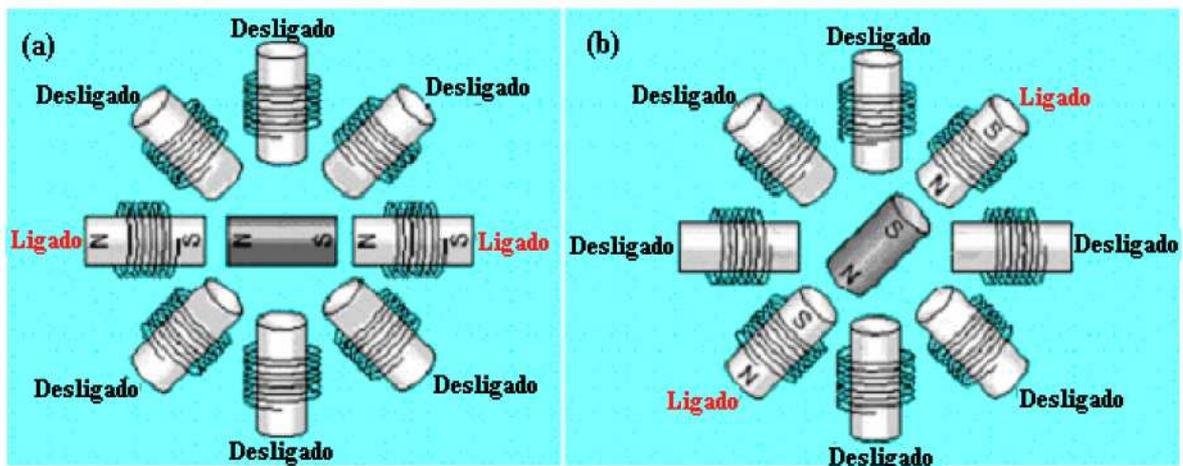


Figura 2.16 – Esquema de funcionamento do motor de passo. Fonte: Neves, J. A. p.48, 2005.

O rotor de um motor de passo é simplesmente um ímã permanente que é atraído sequencialmente, pelos pólos de diversos eletroímãs estacionários, como visto na figura 2.16. Para que os pólos magnéticos do rotor se movam de um eletroímã para outro devidamente habilitado, os eletroímãs são ligados e desligados seguindo impulsos cuidadosamente controlados.

Os motores de passo apresentam grande versatilidade, uma gama de rotação muito ampla que pode variar de zero até sete mil rotações por minuto, permite a inversão de rotação durante o seu funcionamento, alguns motores possuem precisão de 97%, ótima frenagem do rotor e podem mover-se passo a passo.

Geralmente os motores de passo são operados sem realimentação e às vezes assemelham-se ao desempenho de Servo Sistemas DC, mais caros. A única inexatidão associada com um motor de passo é um posicionamento de erro medido em porcentagem de ângulo de passo. A precisão de um motor de passo é principalmente determinada pelo número de passos por rotação (quanto maior for a quantidade de passos, maior será a precisão). Para uma precisão mais alta, alguns controladores de motor de passo dividem passos completos em meio-passos ou micro passos (GEOCITIES, 2007).

Os servo motores são usados para movimentar fusos e mecanismos de engrenagens e fornecem torques maiores que os motores de passo, devido à tensão aplicada nos motores. Os servo motores de Corrente Alternada (CA), fornecem mais força que um motor de um servo de Corrente Contínua (CC), controlando a velocidade pela variação de frequência da tensão. São úteis também para movimentar fusos e mecanismos de engrenagens. Já os motores hidráulicos produzem mais força do que os servo motores elétricos e também possuem velocidade variável.

2.3.5 Sistemas de controle

Segundo Amic (1997 apud NEVES, 2005), existem dois tipos de sistemas de controle em máquinas CNC: controle de malha aberta e controle de malha fechada. O sistema de controle de malha aberta, como esquematizado na figura 2.17, não fornece à unidade de controle nenhuma informação de retorno (chamada de “*feedback*”) da real posição dos componentes da máquina.

Este sistema de controle somente conta pulsos que são emitidos pelo controle e recebidos por um motor de passo, controlando sua rotação, não podendo identificar discrepâncias de posicionamento, impossibilitando a compensação de eventuais erros de localização da ferramenta. Sua utilização é recomendada para aplicações em que não há nenhuma mudança de condições de carga, como furadeiras CNC. Seu baixo custo é uma vantagem, pois não requer equipamentos especiais para informações de “*feedback*”.

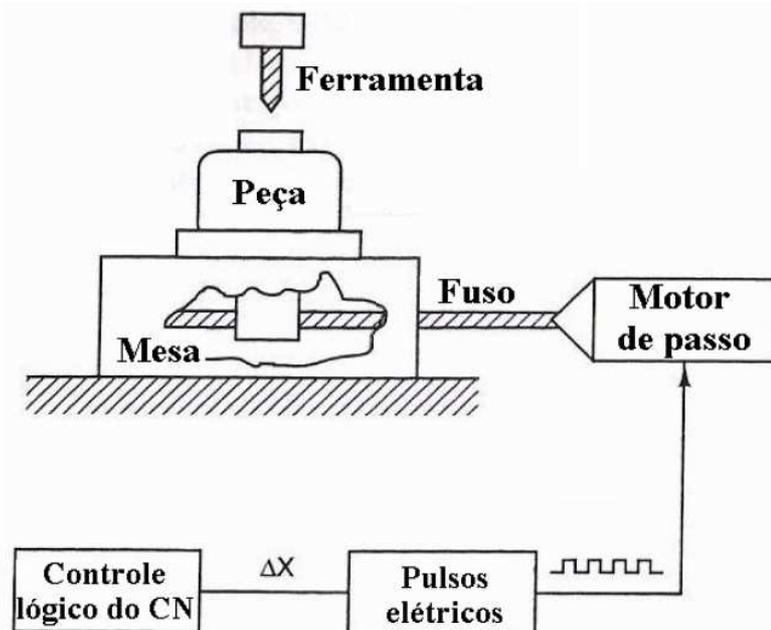


Figura 2.17 – Sistema de controle de malha aberta. Fonte: Neves, 2005.

No sistema de controle de malha fechada (figura 2.18), pulsos eletrônicos de movimento são emitidos do controle ao motor, permitindo que este gire a cada pulso. Um dispositivo de *feedback* chamado transdutor, detecta e conta os movimentos, emitindo um sinal de volta ao controle, comparando a posição atual do fuso da máquina com a posição programada. O controle começa a emitir pulsos para o movimento seguinte quando os pulsos emitidos e recebidos coincidirem. Por ser muito preciso, esse sistema tem uma compensação

automática de erro, corrigindo-o através do transdutor. Sistemas de malha fechada são utilizados em controladores de motores de corrente contínua, alternada e servo motores hidráulicos.

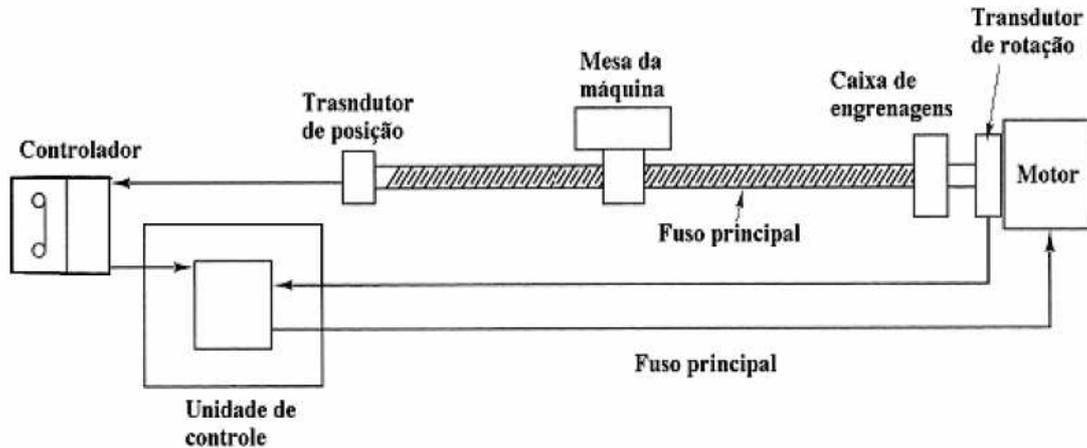


Figura 2.18 – Sistema de controle de malha fechada. Fonte: Neves, 2005.

2.3.6 Introdução à Programação CNC

Segundo Neves (2005), o programa CNC é uma forma que o homem inventou para comunicar-se com a máquina através de códigos. É a transformação de um desenho em números e letras que, ordenadas adequadamente com o processo, irão compor o programa para a fabricação da peça que se deseja na máquina CNC. O procedimento inclui o planejamento de como será a fabricação da peça, ou seja, qual será a seqüência das operações. Para determinar essa seqüência, algumas empresas utilizam uma folha de processo para registrar e auxiliar neste processo, onde se especificam as ferramentas a serem utilizadas, rotações, avanços, entre outras informações. Com a introdução de alguns conceitos como Tecnologia de Grupo, Células de Manufatura e Planejamento e Processo Assistidos por Computador (CAPP), em algumas empresas, as folhas de processo já são geradas no projeto do produto, em função da sua geometria, das máquinas necessárias e as ferramentas a serem utilizadas na fabricação.

Abu Qudeiri et al. (2007) comentam que, para executar qualquer operação em uma máquina ferramenta CNC, um programa CNC é necessário. O programa CNC é uma série de instruções codificadas que são requeridas para a fabricação de uma parte da peça. Controla-se a movimentação da ferramenta, o liga/desliga de funções auxiliares como rotação e quantidade de líquido refrigerante/lubrificante. As instruções codificadas são compostas de letras, números e símbolos que são arranjadas em forma de blocos e memorizadas pelo

comando. Segundo Rebeyka & Santos (2007), a programação CNC para a fabricação de peças simples pode ser elaborada diretamente na linguagem de máquina, utilizando a linguagem G adotada pela International Standard Organization (ISO) . Os fabricantes de máquinas CNC desenvolvem ciclos de usinagem para simplificar o trabalho de programação em peças com perfis comuns na indústria mecânica, como ciclos de furação, ciclos de desbaste, rosqueamento. Mas para a programação de peças com geometria complexas, o trabalho é maior, em função dos cálculos necessários para definir as trajetórias de ferramentas que irão usinar a peça. Para isto é recomendável a utilização de programas que facilitem essa tarefa. Para realizar o trabalho graficamente são usados os programas de CAM. A peça é desenhada no CAD e com os programas de CAM é possível abrir o modelo gráfico. Atualmente os programas CAD/CAM são um misto de programas para desenho e manufatura que executam as duas funções.

Segundo Santos (2007), para a execução manual de um programa CNC normalmente são utilizados os comandos dos fabricantes, tais como MACH, FANUC, MITSUBISHI, SIEMENS e MCS. A entrada de dados em um programa CNC pode ser alimentada utilizando algumas formas: disquete, cartão de memória, diretamente no teclado da máquina, memória *flash*, comando numérico distribuído, CAM, internet. Ainda para Santos (2007), a comunicação nas máquinas ferramentas CNC ocorre conforme a figura 2.19.

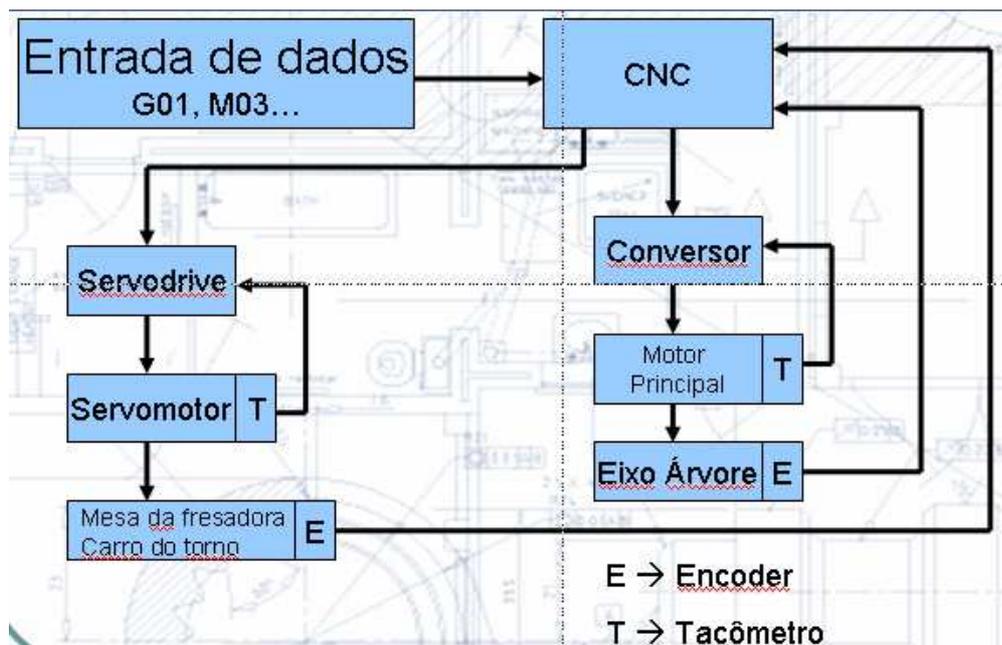


Figura 2.19 – Caminho dos dados percorridos numa máquina ferramenta CNC. Fonte: Santos, 2007.

Segundo Domingues (2005 apud NEVES, 2005) todas as máquinas ferramenta CNC, na elaboração de qualquer perfil geométrico, são comandadas por um sistema de coordenadas cartesianas. Esse sistema é composto de duas retas que se cruzam em ponto qualquer do espaço, onde o cruzamento delas indica o início, ou seja, a origem. É através dessa origem do sistema de coordenadas que o programador se orienta e elabora o programa conforme a geometria do desenho da peça. Além das coordenadas geométricas, o programador necessitará de outras informações complementares para usinagem, a saber: rotação, velocidade de avanço e corte, dados de ferramentas, etc.

A linguagem de programação é feita através de linhas de comandos. Um programa CNC é escrito em linguagem própria dos fabricantes de comando ou de forma padronizada, como mostra o quadro 2.1.

Letra	Significado
O	Número do programa
N	Número da linha do programa
G	Comandos de deslocamento e cálculo
M	Funções auxiliares
F	Velocidade de avanço
T	Chamada de ferramenta
S	Rotação do fuso
X / Z	Coordenadas em valores absolutos
U / W	Coordenadas em valores incrementais
I / J / K	Parâmetros para interpolação de centro de círculo

Quadro 2.1 – Comandos da linguagem de programação. Fonte: Norma ISO 1056.

As linhas de comandos com as palavras de programação podem ser instruções ou condições complementares, dependendo da letra utilizada. A letra mais comum de endereço de instruções é a letra G, chamada de “função preparatória”. Através das instruções G (G00 a G99) são dados os comandos principalmente de deslocamento de ferramenta, motivo pelo qual são conhecidas como “condições de trajetória”. O Anexo A apresenta o quadro dessas funções, segundo norma ISO 1056.

2.4 Princípios de conformação por dobramento

Os princípios de conformação para dobramento de tubos, chapas e perfis são os mesmos, sendo os métodos básicos mais comuns:

- dobramento por tração (*draw bending*);
- dobramento por compressão (*compression bending*);
- dobramento por estiramento (*stretch bending*);
- calandragem (*roll bending*).

De acordo com González (2000), no processo de dobramento por tração uma das extremidades da barra é presa a uma matriz, de formato circunferencial e raio especificado, que possui movimento em torno do seu eixo. A outra extremidade da barra é presa a uma matriz de carga, que pode ser fixa ou móvel, onde o movimento da matriz de formato circunferencial é dada a forma desejada.

O processo de dobramento por compressão é feito prendendo-se a barra a uma matriz fixa que possui um determinado raio. Uma sapata móvel envolve a barra e nela é aplicada a força contra a matriz que dará a forma final. Este método não controla o fluxo de material tão bem quanto o dobramento por tração, mas é largamente usado em prensas de dobramento e em máquinas de dobramento por rotação.

No dobramento por estiramento as extremidades da barra são presas e estiradas em torno de uma matriz fixa com a forma desejada. Neste processo ocorre uma menor recuperação elástica e resulta em economia de tempo porque pode ser feito em apenas uma operação. As ferramentas e matrizes utilizadas são simples e baratas em termos de projetos.

Na calandragem são utilizados um arranjo de três ou mais cilindros. Todos os cilindros ou matrizes possuem movimento giratório. Numa calandra com três cilindros, o superior (e central) deles é direcionado de maneira perpendicular ao tubo e os eixos dos inferiores são fixados em um plano horizontal. Já numa calandra com quatro cilindros, a barra é posicionada entre dois cilindros em movimento à esquerda e o cilindro inferior da outra extremidade é ajustado nas duas direções, de acordo com a espessura da barra e o ângulo de dobramento projetado. Usualmente o raio de dobramento deve ser pelo menos seis vezes o diâmetro da barra ou espessura de seção na direção do dobramento.

As figuras 2.20 a 2.23 mostram os componentes e mecanismos essenciais destes tipos de conformação (GONZÁLEZ, 2000).

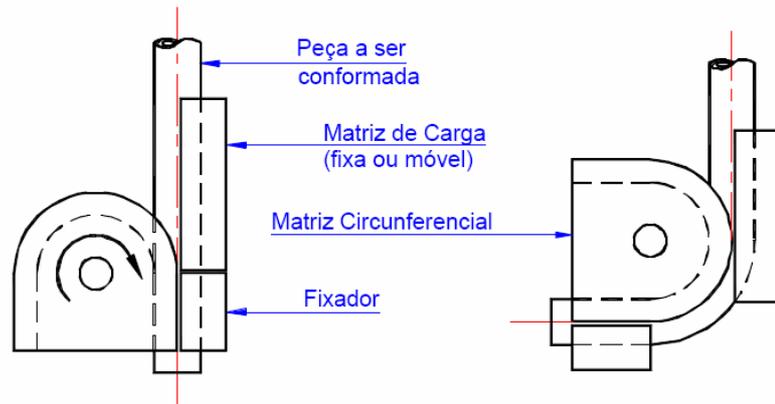


Figura 2.20 – Dobramento por tração. Fonte: González, P. C. S., p.2, 2000.

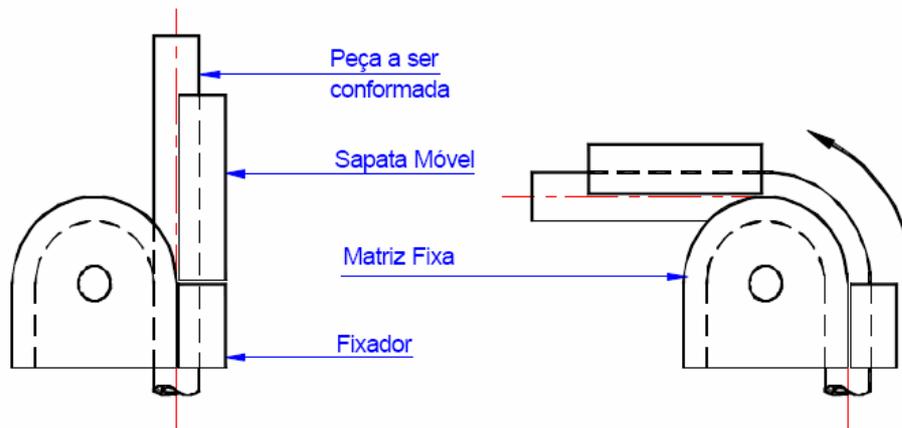


Figura 2.21 – Dobramento por compressão. Fonte: González, P. C. S., p.3, 2000.

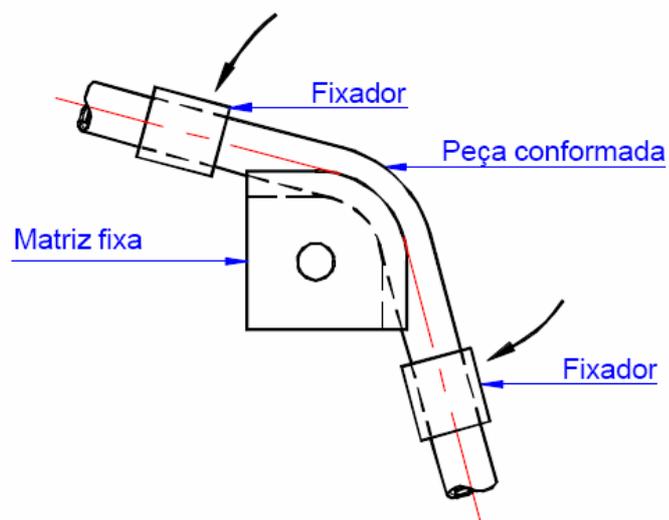


Figura 2.22 – Dobramento por estiramento. Fonte: González, P. C. S., p.4, 2000.

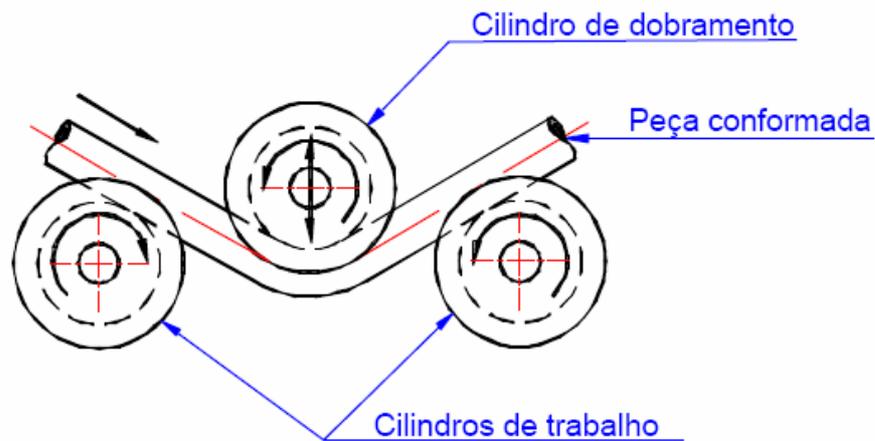


Figura 2.23 – Calandragem com três cilindros. Fonte: González, P. C. S., p.5, 2000.

Existem vários tipos diferentes de calandras de tubos e perfis oferecidas por empresas fabricantes de máquinas. O sistema de conformação normalmente é feito através da disposição piramidal de três eixos com matrizes fixadas nas suas extremidades. Essas matrizes possuem o formato (bitola ou perfil) do tubo a ser calandrada.

A figura 2.24 mostra a conformação de chapas, sistema semelhante ao processo de calandragem de tubos. A figura 2.24.a é o tipo piramidal, onde os eixos estão dispostos piramidalmente, sendo os dois eixos inferiores de tração e o eixo superior com altura ajustável conforme raio que se deseja curvar. Já a figura 2.24.b mostra o par de eixos tracionadores alinhados de forma que a peça a ser calandrada passa por ele sendo conformada pelo eixo que fica posicionado a sua frente tendo sua altura ajustável conforme o raio desejado (CAMPBELL, 1961). As calandras ainda podem ter quatro ou mais eixos dispostos de diferentes maneiras.

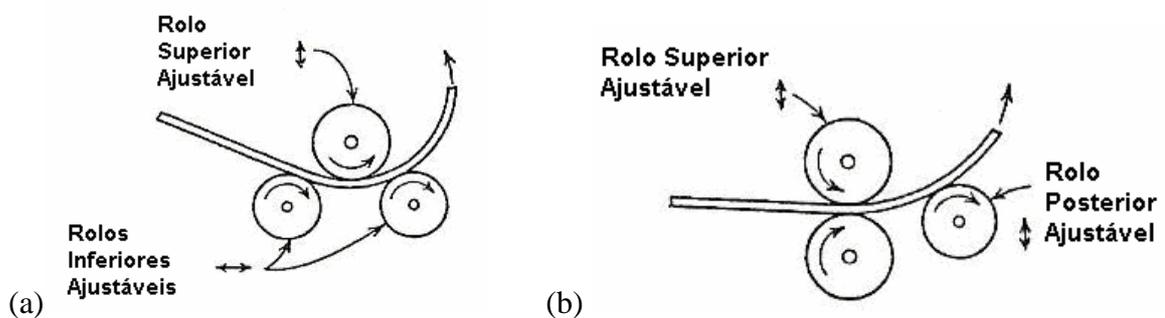


Figura 2.24 – Sistema de conformação de calandras: (a) tipo piramidal e (b) par de eixos tracionadores Fonte: Adaptado Campbell, J. S., p.363, 1961.

As calandras podem ter seus sistemas de acionamento manuais, elétricos, hidráulicos ou automático programáveis. Elas ainda podem ser horizontais, onde o plano de trabalho é

paralelo ao chão, ou verticais, sendo perpendiculares ao piso. Os modelos ofertados são variados e geralmente atendem as necessidades de utilização.

As calandras CNC, normalmente, possuem acionamento hidráulico ou elétrico. As calandras automáticas são programáveis, sendo o movimento do(s) cilindro(s) de acionamento são controláveis de acordo com a programação realizada. As figuras 2.25 a 2.28 mostram algumas calandras de tubos de mercado, elas possuem características distintas.



Figura 2.25 – Calandra vertical de tubos motorizada. Fonte: ZAPROMAQ, 2008.



Figura 2.26 – Calandra de tubos e perfis hidráulica horizontal. Fonte: AGAMAQ, 2008.



Figura 2.27 – Calandra de tubos e perfis hidráulica vertical. Fonte: AGAMAQ, 2008.



Figura 2.28 – Calandra de tubos e perfis motorizada e vertical. Fonte: SHUZ TUNG, 2008.

2.5 Análise do processo de conformação mecânica de dobramento

O estudo e trabalho de Beer & Johnston Jr. (1995) mostra o comportamento dos materiais, considerando a deformação plástica de uma barra em flexão. Para o caso de uma barra feita de material elastoplástico, o diagrama tensão-deformação ideal é mostrado na figura 2.29.

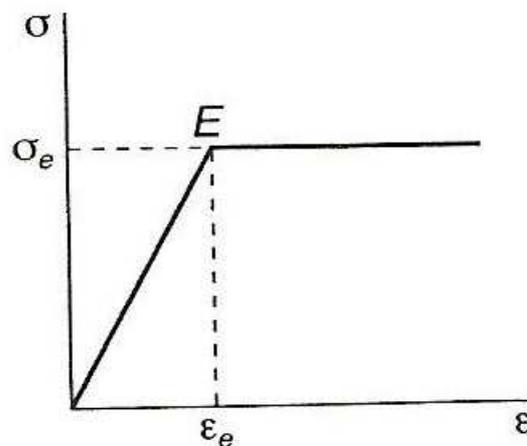


Figura 2.29 – Diagrama tensão-deformação específica de materiais elastoplásticos. Fonte: Beer & Johnston Jr., p. 373, 1995.

Enquanto a tensão normal σ_x não ultrapassar o valor da tensão de escoamento, a lei de Hooke pode ser aplicada sendo a distribuição de tensões linear ao longo da seção. A tensão normal para flexão é determinada por (figura 2.30-a):

$$\sigma_m = \frac{M \cdot c}{I} \quad (2.1)$$

Aumentando-se o valor do momento fletor de forma a σ_m atingir a tensão de escoamento σ_e (figura 2.30-b), tem-se o máximo momento elástico, ou seja, o maior valor de momento para o qual as deformações se mantêm totalmente elásticas:

$$M_e = \frac{I}{c} \cdot \sigma_e \quad (2.2)$$

Para uma barra com seção transversal retangular de largura b e altura $2c$, tem-se:

$$M_e = \frac{b \cdot (2c)^3}{12 \cdot c} \cdot \sigma_e = \frac{2}{3} \cdot b \cdot c^2 \cdot \sigma_e \quad (2.3)$$

Aumentando ainda mais o valor do momento fletor, aparecem zonas plastificadas na barra, que apresentam tensões uniformes e iguais a $-\sigma_e$ na parte superior e $+\sigma_e$ na parte inferior da barra (figura 2.30-c). Entre as duas regiões plásticas, permanece um núcleo de material em estado ainda elástico, onde a tensão varia linearmente com a distância y à linha neutra (centro). Desta forma, pode-se dizer que:

$$\sigma_x = -\frac{\sigma_e}{y_e} \cdot y \quad (2.4)$$

Se o momento aumentar mais, a região plastificada se expande, até que, no limite, as deformações são totalmente plastificadas (figura 2.30-d). Pode-se afirmar também que, o momento fletor correspondente a uma seção totalmente plástica é chamado de momento plástico da barra estudada:

$$M_p = \frac{3}{2} M_e \quad (2.5)$$

Das cinco últimas equações tem-se,

σ_m = tensão normal máxima

σ_e = tensão de escoamento

σ_x = tensão em determinada região da barra (y)

M = momento fletor

M_e = momento fletor máximo, antes do escoamento

M_p = momento plástico

c = metade da altura da seção transversal da barra retangular

I = momento de inércia

y = distância de uma determinada região da barra à linha neutra

y_e = metade da espessura do núcleo elástico

b = largura da barra retangular

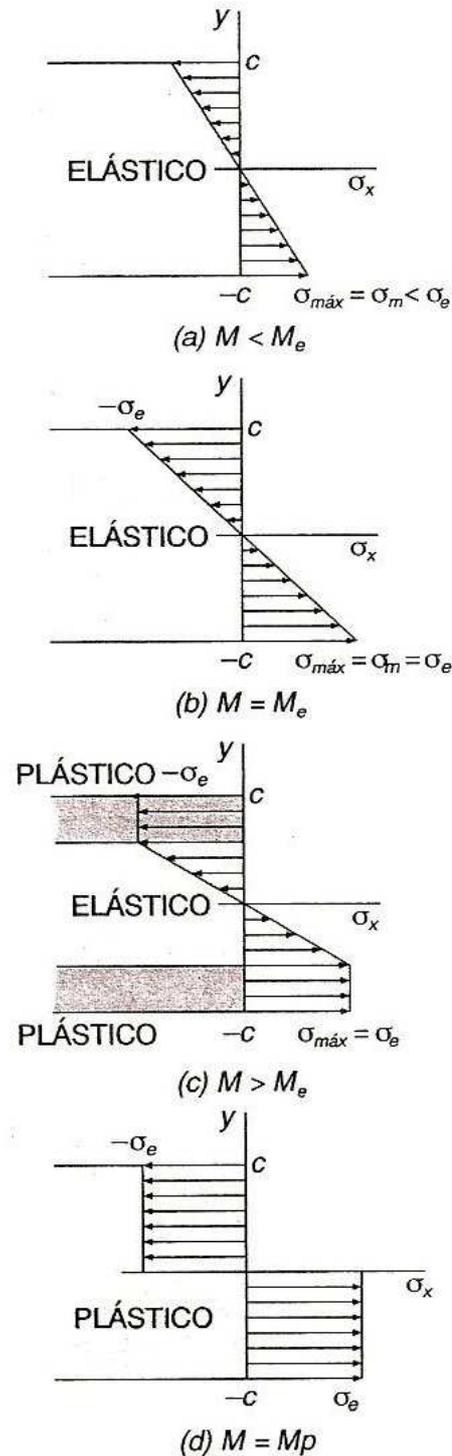


Figura 2.30 – Diagramas de tensão em materiais elastoplásticos: (a) $M < M_e$; (b) $M = M_e$; (c) $M > M_e$; (d) $M = M_p$.
 Fonte: Beer & Johnston Jr, p.375, 1995.

2.5.1 Dobramento contínuo por rolos - chapas

Na indústria mecânica de fabricação de componentes de peças pesadas, o processo de dobramento contínuo por rolos de chapas metálicas tem grande importância. Desde o surgimento das máquinas para a conformação de chapas por dobramento contínuo de rolos,

através de máquinas chamadas de calandras mecânicas, já se pensava em escala industrial (ILKIU, 2003).

Essas máquinas são fabricadas com três ou quatro rolos, sendo que os mesmos são dispostos na horizontal, facilitando o processo de dobramento em chapas metálicas. Para operações especiais existem máquinas com rolos dispostos na vertical, casos de dobramento contínuo de barras de grandes dimensões para fabricação de anéis, o dobramento contínuo de perfis laminados, na formação de arcos, utilizados na construção civil e mecânica e grandes cremalheiras de fornos rotativos (ILKIU, 2003).

O processo de dobramento contínuo geralmente é executado a frio. Já o processo a quente, parâmetros como tolerâncias dimensionais e controle do processo são difíceis de serem controlados. Apesar disto, as peças devem ser conformadas a quente, principalmente quando há limitações do equipamento, sendo necessário um estudo detalhado da temperatura do processo relacionada com o material a ser conformado. Desta maneira evita-se na operação, uma má formação da peça, que poderá afetar as propriedades finais do material.

No processo de conformação de dobra, algumas forças são aplicadas no material. Além disto, conforme será mencionado no próximo item deste capítulo, acontece a recuperação elástica. Esta recuperação deve ser prevista quando se deseja uma certa precisão dimensional. O trabalho de Aguiar et al. (2002) analisa a recuperação elástica e as tensões residuais no processo de dobra de chapas conformadas em calandras de três cilindros, semelhantes às calandras de tubos e perfis. O trabalho dos autores apresenta uma solução analítica desenvolvida para o cálculo aproximado do momento de dobra. Eles definem o modelo, sendo que os planos normais podem ser considerados como permanecendo planos durante a dobra e convergindo até o centro de curvatura em uma dobra contínua de chapas finas (figura 2.31).

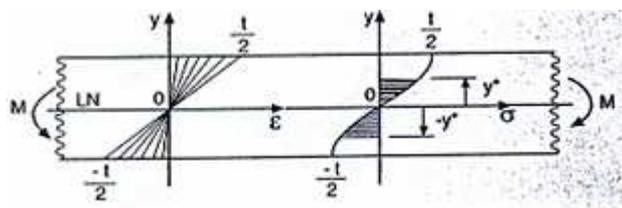


Figura 2.31 – Distribuição de tensões e deformações em uma seção típica de elemento de chapa. Fonte: Aguiar et al., p. 86, 2002.

Quando as direções normais, radiais e tangenciais coincidem respectivamente com as direções principais de tensão e deformação, é possível lidar com apenas três variáveis em cada

caso. Os esforços internos para dobras em cilindros incluem componente de tração e cisalhamento, mas comparando com o momento de dobra os efeitos são mínimos. Considerando que as curvaturas são conhecidas, o problema significa a determinação dos valores do momento de flexão, nos diferentes estágios de dobra.

Ainda segundo Aguiar et al. (2002), cada seção da chapa está submetida a diferentes condições de deformação, em um dado momento. Isto é mostrado na figura 2.32 para o caso específico do processo de dobra de três cilindros. Observa-se que as tensões são pequenas dentro da faixa elástica, acompanhando uma seção específica, enquanto vai-se do ponto A até o ponto E. Variando a partir de zero no ponto A, até o momento máximo de dobra elástica m_y , no ponto E, a dobra predomina com valores do momento de dobra. O momento de dobra decresce gradualmente até zero no ponto C, após passagem pela posição de máxima flexão, no ponto B. Neste momento, através da deformação da placa dobrada, as tensões tentam se aliviar por si mesmas. Com isto a chapa sofre um retorno elástico (recuperação elástica) ficando com tensões residuais.

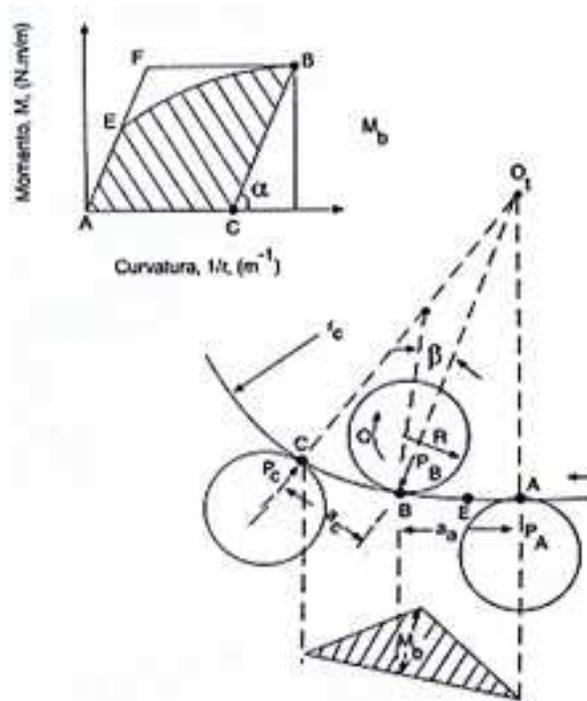


Figura 2.32 – Dispositivo de dobra de chapas sobre três cilindros. Fonte: Aguiar et al., p. 92, 2002.

No estudo de Ilkiu (2003), a geometria do processo de dobramento contínuo por rolos de chapas metálicas grossas está definida na figura 2.33. Verifica-se que o raio de dobramento no início do processo tende a um valor infinito ($R \rightarrow \infty$). Sendo assim, antes do início do processo a chapa é considerada plana. Em função da recuperação elástica do material, o raio

de dobramento efetivo (R) tende para o valor final (R_f) e a distância (c_i) do eixo neutro ao contorno elastoplástico, tende para a distância (c) que passa a ser constante até o final do processo, condições básicas consideradas para a análise do processo de dobramento contínuo para chapas metálicas grossas. Já a recuperação elástica do processo de dobramento contínuo é obtida através das teorias elásticas, considerando-se os deslocamentos verticais no extremo de uma viga engastada sujeita a cargas transversais, resultando na equação:

$$R_f = \frac{R.E.I_y}{E.I_y - M_i.R} \quad (2.6)$$

sendo, R = raio de dobramento nominal;

R_f = raio final de dobramento após a recuperação elástica;

E = módulo de elasticidade do material;

I_y = momento de inércia da seção transversal da chapa e

M_i = momento total que atua na seção transversal.

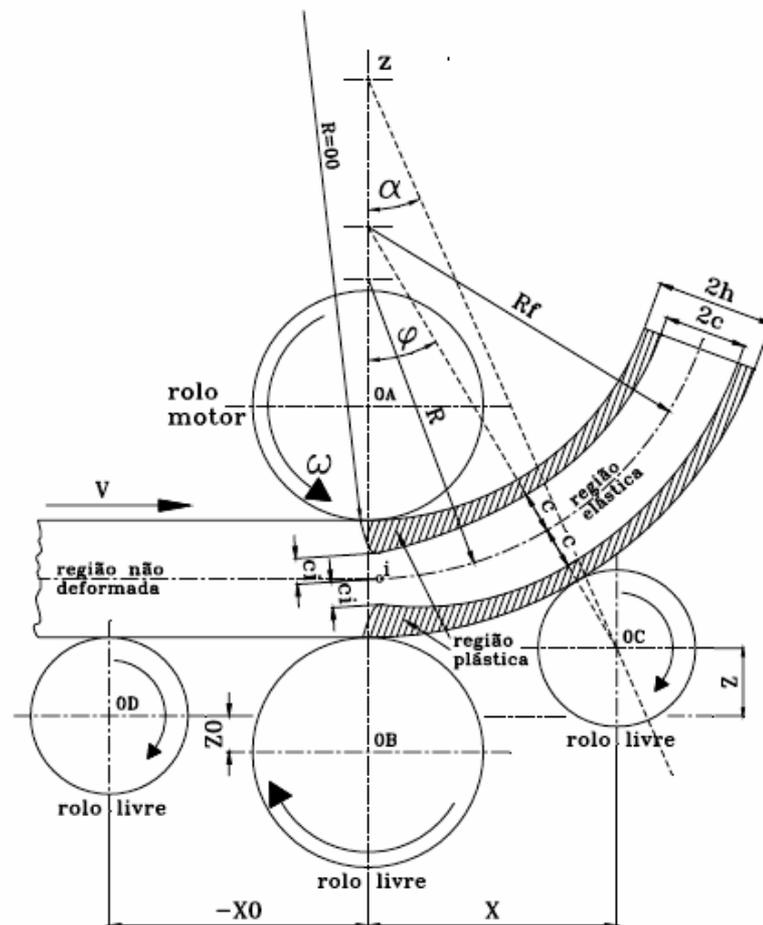


Figura 2.33 – Geometria do processo de dobramento contínuo por rolos de chapas. Fonte: Ilkiu, A. M., p. 2, 2003.

2.5.2 Dobramento contínuo por rolos - tubos

Segundo estudo de Russo Junior (1997), o processo de dobramento de tubos é aplicado em indústrias aeronáutica, eletrodomésticos, automotiva, componentes para sistemas como de vácuo, hidráulicos, pneumáticos, de distribuição de energia elétrica e de iluminação, além das aplicações na fabricação de elementos estruturais para a construção civil. Também utilizada no setor aeroespacial devido a certas características próprias da área, sendo que a redução de peso e alta qualidade dos componentes são de grande importância, pelo fato de exigir um alto desempenho dos equipamentos envolvidos na fabricação.

Para se determinar o melhor método de execução de um curvamento de um tubo, devem ser levados em consideração a geometria da peça (diâmetro, espessura de parede e comprimento), o material do tubo, o raio de dobramento, precisão requerida e número de dobras projetadas. No mercado encontram-se equipamentos devidamente construídos para tais finalidades, mais sofisticados, dependendo do produto final. A utilização de um suporte interno (mandril) ao tubo no processo de dobramento de tubo torna-se muito importante, pois a espessura de suas paredes afeta as distribuições das tensões de tração e compressão (RUSSO JUNIOR, 1997).

O critério que diferencia um tubo de parede fina de um tubo de parede grossa é seu diâmetro externo e sua espessura de parede. Os tubos são considerados de paredes finas quando a relação entre seu diâmetro e espessura for maior que 30 ($\frac{2r}{t} > 30$) (American Society for Metals apud GONZÁLEZ, 2000). As técnicas de dobramento para ambos tipos de paredes são semelhantes. Apesar disto, os tubos de paredes finas devem, muitas vezes, utilizar mandris internos para evitar a flambagem especialmente em conformação categorizada como dobradeiras de rotação e prensas hidráulicas. A necessidade ou não de utilização de mandril interno para dobramento de tubo é analisada pela razão de dobramento, sendo a razão entre o raio de dobramento, medido a partir da linha neutra, e o diâmetro externo ($\frac{R_n}{2r}$). O Anexo B mostra um nomograma de determinação do tipo de mandril a ser utilizado. A velocidade de dobramento e a força exercida devem ser menores quando ocorre o curvamento de um tubo de parede fina (GONZÁLEZ, 2000).

Durante o processo de dobramento manual ou automático, os métodos utilizados serão os mesmos, sendo que, no método manual, a repetibilidade se torna questionável. Isto ocorre porque algumas dobradeiras possuem dispositivos de atrito para evitar o deslizamento do tubo

na matriz durante o dobramento e também evitar rugas nas paredes do tubo. As ferramentas utilizadas pelo método de dobramento de barras se diferenciam do método de dobramento de tubos pelo fato de necessitarem de uma guia de encaixe bem preciso para a parede externa do tubo, preservando a seção transversal circular durante o processo.

Conforme Russo Junior (1997), em tubos galvanizados ocorrem o dobramento dos mesmos em raios de dobra tão pequenos quanto quatro vezes o diâmetro externo do tubo. Se for necessário raio de dobramento menor, é feito o dobramento e depois a galvanização do tubo, podendo perder o galvanizado, retirado através de lascas e esfarelamento.

Os tubos sem costura deverão estar livres de escamas e ferrugens, além de possuírem baixa variação de concentricidade, na espessura de parede e dureza, caso contrário poderão apresentar, no momento do seu dobramento, rugas, efeito mola e achatamento. Para evitar problemas em tubos comuns de qualquer diâmetro e espessura, no seu dobramento eles não devem possuir ferrugens tanto interna quanto externamente. Tubos que podem ser dobrados em um ângulo maior são os de aço inoxidável, para um determinado raio de dobramento, quando comparados com tubos de aço de baixo carbono, como exemplo, os austeníticos da série 300, dúcteis e resistentes (RUSSO JUNIOR, 1997).

2.6 Recuperação elástica

Uma das dificuldades na conformação de materiais metálicos, em termos gerais, é o efeito de mola ou recuperação elástica. Dieter (1981, p. 581) diz que “O efeito de mola é a variação dimensional sofrida pela peça conformada depois que a ferramenta de conformação é liberada. Isto ocorre devido às variações da deformação produzidas pela recuperação elástica.” A recuperação elástica dos materiais submetidos à conformação é uma dificuldade a ser considerada. Conforme Dieter (1981), este efeito de mola ocorre em todos os processos de conformação, porém, no dobramento ele é percebido mais facilmente e também mais estudado.

De acordo com Ilkiu (2000), no processo de dobramento ocorre a recuperação elástica porque o material deformado na região elastoplástica recupera parte da sua deformação elástica induzido pelo dobramento. O restante da deformação elástica permanece armazenado no material, e, como a região elástica está entre duas regiões plásticas, estas impedem a recuperação das deformações elásticas totais do material.

A recuperação elástica é proporcional ao limite de escoamento, ao módulo elástico e a deformação plástica e será tanto maior quanto:

- maior limite de escoamento;
- menor o módulo elástico;
- maior a deformação plástica.

Assim, a definição do efeito de mola por Dieter (1981) pode ser descrita pela razão:

$$K = \frac{\alpha_f}{\alpha_o} \quad (2.7)$$

onde,

K = coeficiente de resistência do material;

α_o = ângulo de curvatura antes da liberação da carga;

α_f = ângulo de curvatura após liberação da carga.

Podemos utilizar a mesma fórmula para a definição do efeito de mola em chapas:

$$K = \frac{\alpha_f}{\alpha_o} = \frac{R_o + h/2}{R_f + h/2} \quad (2.8)$$

onde,

R_o = raio de curvatura antes da liberação da carga;

R_f = raio de curvatura após liberação da carga;

h = espessura da chapa.

As equações 2.7 e 2.8 explicam o efeito de mola que as peças conformadas sofrem, sendo o raio de curvatura antes da liberação da carga R_o menor que o raio de curvatura após a liberação da carga R_f (figura 2.34).

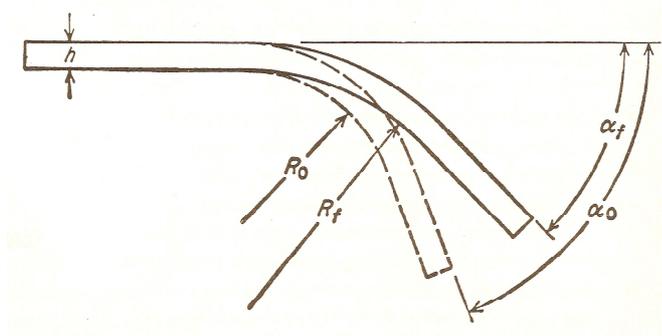


Figura 2.34 - Efeito de mola no dobramento, $R_o < R_f$. Fonte: Dieter, G.E., p. 582, 1981.

O trabalho de Sachs (apud DIETER, 1981) indica que o efeito de mola pode ser expresso pela equação:

$$\frac{R_o}{R_f} = 4 \cdot \left(\frac{R_o \cdot \sigma}{E \cdot h} \right)^3 - 3 \cdot \frac{R_o \cdot \sigma}{E \cdot h} + 1 \quad (2.9)$$

onde,

R_o = raio de curvatura antes da liberação da carga;

R_f = raio de curvatura após liberação da carga;

h = espessura da chapa;

E = módulo de elasticidade;

σ = tensão normal.

Conforme a teoria de Johnson & Mellor (1978 apud ILKIU, 2000), a definição do efeito de recuperação elástica para chapas segue a equação:

$$\frac{R}{R_f} = 1 - \left[3 \cdot \left(\frac{\sigma_e \cdot R}{E \cdot h} \right) \cdot (1 - \nu^2) \right] + 4 \cdot \left[\frac{\sigma_e \cdot R}{E \cdot h} \cdot (1 - \nu^2) \right]^3 \quad (2.10)$$

onde,

R = raio de dobramento efetivo (mm);

R_f = raio final de dobramento, após recuperação elástica (mm);

σ_e = tensão de escoamento (N/mm²);

E = módulo de elasticidade longitudinal (N/mm²);

h = metade da espessura da chapa (mm);

ν = coeficiente de Poisson do material.

Já a teoria de Chakrabarty (1987 apud ILKIU, 2000) leva em consideração os parâmetros geométricos adotados e determina o raio final de dobramento através da equação:

$$\frac{1}{R_f} = \frac{2 \cdot \sigma_e \cdot (1 - \nu^2)}{\sqrt{3} \cdot E} \cdot \left(-\frac{1}{h} + \frac{1}{c} - \frac{3}{2 \cdot h} + \frac{c^2}{2 \cdot h^3} \right) \quad (2.11)$$

onde,

$$c = \frac{R \cdot \sigma_e \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot \sqrt{1 - \nu + \nu^2}} \quad (2.12)$$

- c = distância do eixo neutro ao contorno elasto-plástico (mm);
 R = raio de dobramento efetivo (mm);
 R_f = raio final de dobramento, após recuperação elástica (mm);
 σ_e = tensão de escoamento (N/mm²);
 E = módulo de elasticidade longitudinal (N/mm²);
 h = metade da espessura da chapa (mm);
 ν = coeficiente de Poisson do material.

Segundo Limberger (2002), alternativamente pode-se estimar o coeficiente de recuperação elástica (k), conhecendo-se o material utilizado, com o auxílio do gráfico do Anexo C. A partir de um dado material, k depende da relação $\frac{R_f}{s}$ ou $\frac{r_{L2}}{s}$, sendo R_f o raio final de dobramento e s a espessura da chapa.

De acordo com o estudo de Malavolta (2007), a previsão do raio de curvatura final é realizada assumindo a hipótese de que o comprimento do arco AB na figura 2.35, quando submetido ao momento fletor M , permanece inalterado após o retorno elástico. Desta forma, a seguinte relação é válida:

$$R_i \phi = R_f \beta \quad (2.13)$$

Como o raio de curvatura inicial R_i é assumido como sendo o raio do punção e os ângulos ϕ e β são calculados, a partir dos resultados numéricos, tem-se uma estimativa para o raio de curvatura final.

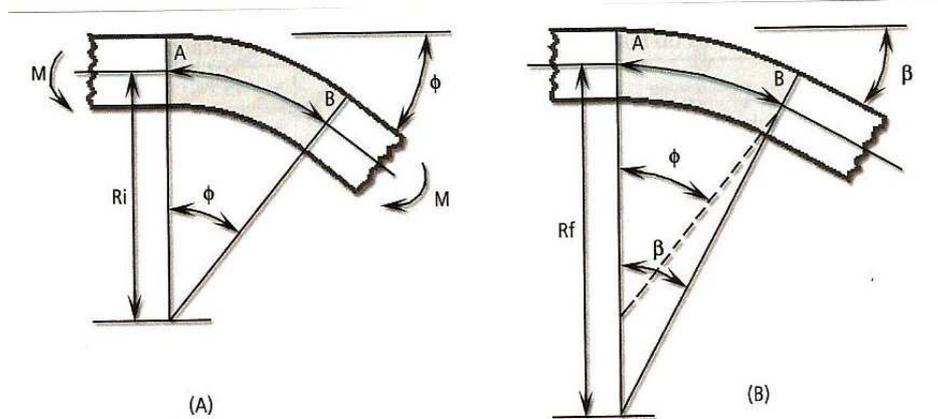


Figura 2.35 – Esquema da alteração do raio de curvatura: (a) situação inicial e (b) situação após retorno elástico.

Fonte: Malavolta, A. T. et al., p. 82, 2007.

Segundo Dieter (1981), a maneira mais empregada para se compensar o efeito de mola é conformar a peça até um raio de curvatura menor do que o que se deseja. Assim, quando a carga for liberada e o efeito mola ocorrer, a peça terá o raio de curvatura adequado. Apesar de não levar a um resultado preciso, o emprego das equações 2.9 e 2.10 podem auxiliar a encontrar o perfil da matriz adequado para corrigir o efeito de mola.

2.7 Processamento de imagem

Para completar a fundamentação teórica deste trabalho, técnicas de processamento de dados digitais referentes a imagens serão aplicadas com o objetivo de propor uma metodologia de controle de qualidade do processo produtivo. Imagens obtidas de fotografias digitais de peças conformadas são processadas para ajustes do sistema produtivo devido a recuperação elástica do material.

Dominar as tecnologias de análise de processamento de imagens é considerado estratégico, pois desta forma pode-se transformar dados em informações. A gama de aplicação destas tecnologia é vasta, incluindo desde meteorologia até medicina nuclear. As técnicas de filtragem de imagens têm como objetivo principal processar os dados de maneira que a imagem resultante seja mais adequada que a imagem original para uma dada aplicação específica (GOUVEIA, 2004).

O controle da qualidade e a obtenção de dados confiáveis nos processos de produção são uma necessidade cada vez maior das empresas em diversos ramos. O processamento de uma imagem tem um objetivo específico. A ocorrência de erros nos processos de produção pode gerar pequenos prejuízos (custo de retrabalho, matéria-prima descartada) até prejuízos maiores como ações judiciais decorrentes destas falhas. Deve-se levar em conta que, os custos de retrabalho aumentam exponencialmente de acordo com o ponto de produção em que são identificados. Os sistemas industriais de visão tem como objetivo a análise dos dados de produção de forma que garanta que produtos com defeitos não prossigam na linha de produção ou nos processos.

Inúmeras são as aplicações de um processamento, onde, no âmbito industrial, utiliza-se muito desde recurso. Pode-se citar alguns exemplos:

- separação de um produto em uma linha de produção devido a detecção de falta de qualidade através de uma imagem;
- ajuste de parâmetros de uma máquina através do processamento de uma foto;

- detecção de falhas em impressões gráficas.

Uma imagem é formada através do conjunto de pontos. Cada ponto possui uma intensidade de cor, da qual, forma a imagem e é definido como *pixel* (picture element). A quantidade de *pixels* compõe a definição da imagem, quanto maior a quantidade de *pixels* por unidade de área, melhor é sua qualidade.

2.7.1 Filtros Clássicos

Existem basicamente dois tipos clássicos de filtros: passa-alta (FPA) e passa-baixa (FPB), onde esta denominação decorre do uso da representação em frequência espectral dos filtros dependendo da transformada de Fourier. No processamento de imagens deve-se estar focado na região de interesse, ou seja, naquilo que se quer gerar após o seu processamento. Para o processamento de imagens, os filtros são ferramentas importantes. Eles podem ser de realce ou de suavização. Os filtros de suavização reduzem o ruído de alta frequência, mas borram as bordas da imagem. Já os filtros de realce, importantes para definição dos traços da imagem, aumentam o contraste nas bordas da imagem, mas podem amplificar o ruído.

Segundo Gouveia (2004), o FPA elimina na imagem baixas frequências espaciais, deixando somente as altas frequências, geralmente expressas por bordas ou limites entre áreas. Eles utilizam máscaras com alguns pesos negativos, aumentam o contraste da imagem e, muitas vezes, introduzem bordas artificiais que podem confundir o observador. Os filtros Roberts, Sobel e Laplaciano são exemplos de FPA.

Já o FPB, conforme Gouveia (2004) enfatiza as baixas frequências da imagem, resultando numa suavização. Estes filtros utilizam máscaras com todos os pesos positivos, eliminam ruídos, informações indesejáveis que corrompem a qualidade da imagem. Em algumas aplicações estes ruídos podem inibir a habilidade do interprete humano de retirar informações úteis. Os filtros Média e o Gaussiano são exemplos de FPB.

Para se ter uma comparação nos resultados de operações de filtragem de FPA, a figura 2.36 mostra uma imagem real (em níveis de cinza) e os filtros Sobel, Roberts e Laplaciano aplicados.

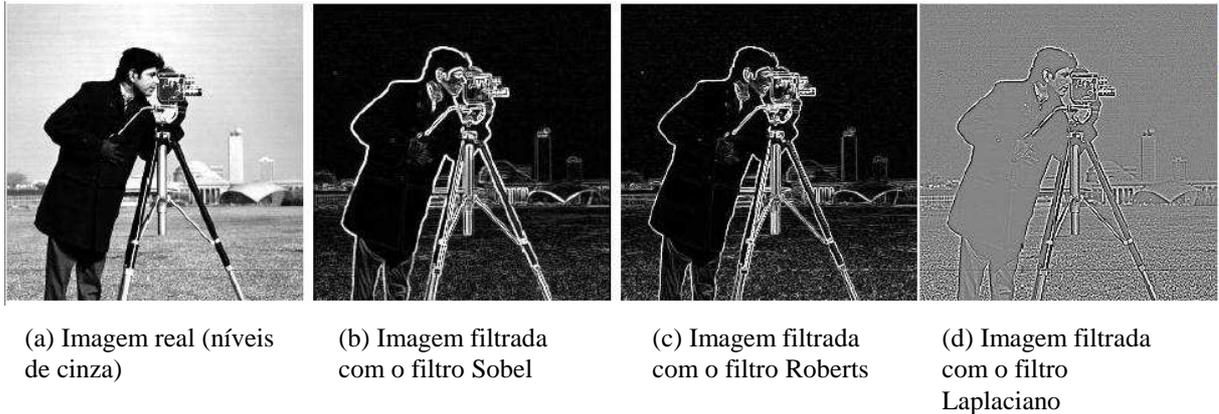


Figura 2.36 – (a) Imagem real; (b) Filtragem Sobel, (c) Roberts e (d) Laplaciano com máscara 3x3. Fonte: Gouveia, E. L. P., p. 20, 2004.

Conforme Pratt (1991), são utilizados alguns filtros para realce de borda: Sobel, Prewitt, Frei-Chen, Laplaciano e Roberts. A razão de se utilizar o filtro Sobel é para melhorar e realçar a delimitação ou borda de um objeto. Ele define a operação de filtragem Sobel como sendo realizado pelas matrizes, onde S_x e S_y realçam bordas nas direções x e y respectivamente:

$$S_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad S_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Baumann et al. (1996) apresentam a figura 2.37, como forma de se calcular e processar cada *pixel*, modificando o valor de cada um de forma a realçar as bordas da imagem, neste caso, uma chave de boca. Na figura pode-se observar a diferença do resultado utilizando os filtros Sobel e Laplace, definido por matrizes 3x3. Observa-se, logo abaixo do título “Laplace-Filter” na figura 2.37, o quadro onde são empregadas letras para cada vizinho do *pixel* central, definindo assim, os vizinhos de borda e os diagonais do um *pixel* em questão. Esses filtros caracterizam-se pelo cálculo de um novo valor (intensidade do *pixel*) para o *pixel* central conforme sua vizinhança. Este cálculo é feito através de matrizes. Observa-se o exemplo do filtro Sobel, onde um *pixel* central de intensidade 8 passa, após sua filtragem, para intensidade 16.

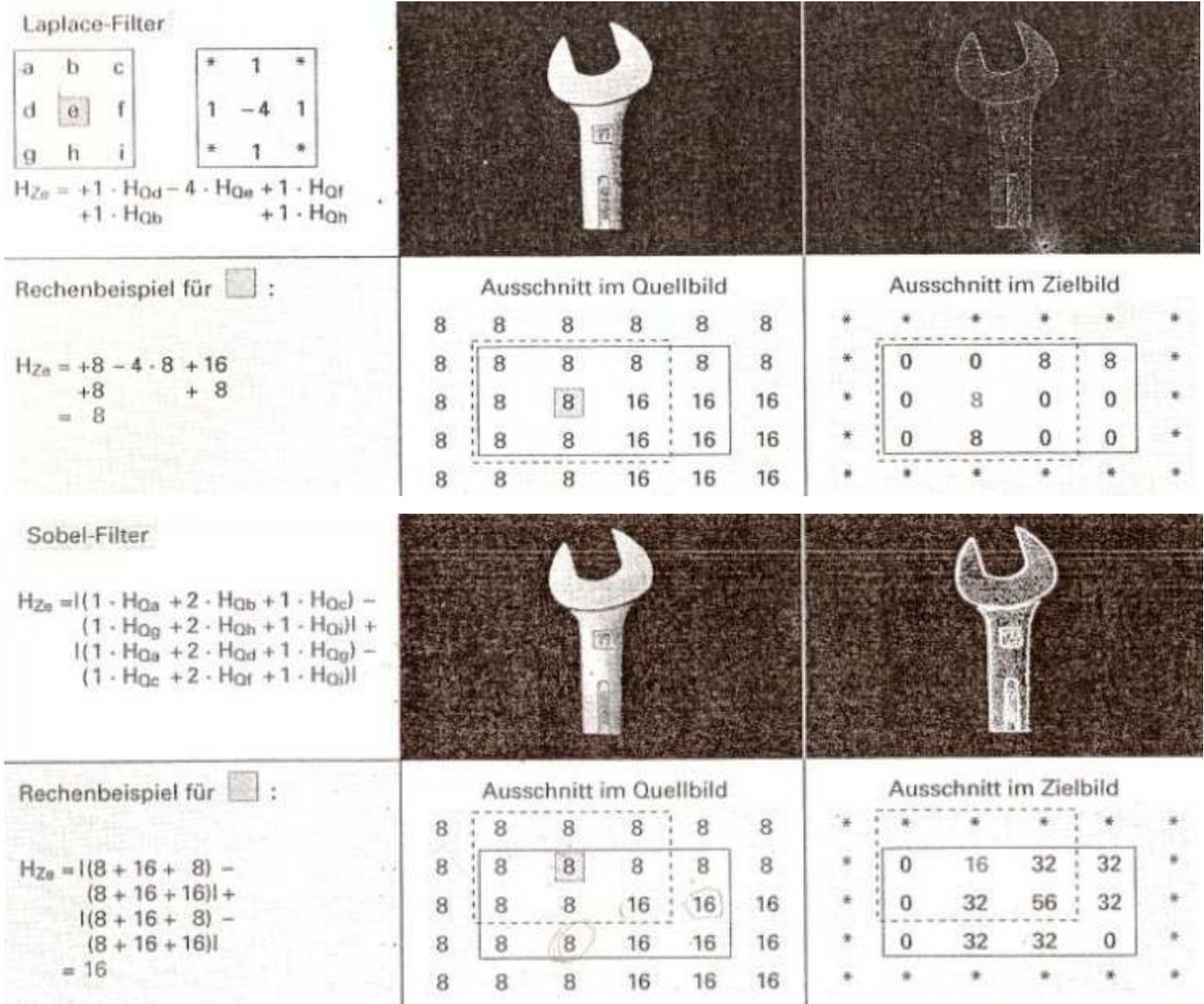


Figura 2.37 – Filtros de realce Laplace e Sobel. Fonte: Baumann, A. et al., p. 389, 1996.

Para Russ (1995), o filtro Roberts é definido por matrizes 2 x 2, onde sua operação de filtragem é realizada pelo cálculo conforme mostra a figura 2.38.

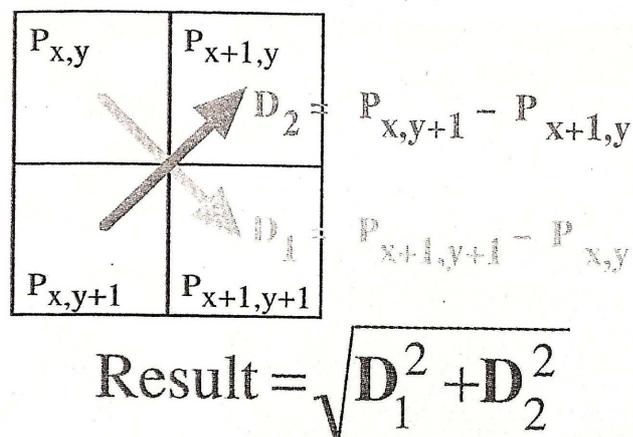


Figura 2.38 – Diagrama de cálculo do filtro Roberts. Fonte: Russ, J. C., p. 237, 1995.

3 METODOLOGIA

O fluxograma da figura 3.1 apresenta o princípio operacional do sistema proposto. Sugere-se a adaptação de calandras manuais com motor de passo e fuso de esferas, porque entende-se ser a melhor opção para movimentar a matriz superior da calandra para realizar operações automáticas. Também são necessários programas computacionais para que a calandra torne-se programável. Esses programas incluem as funções a seguir e são propostos como aplicativos de sistemas CAD.

- Reconhecimento de linhas e curvas do desenho em CAD da peça;
- Geração automática de código CNC, ou seja, após o reconhecimento da forma que a peça deve ter, gerar um programa CNC onde a calandra seja capaz de executar a dobra adequada a peça;
- Reconhecimento da geometria da peça dobrada para comparação com o projeto. Após a execução da peça, o usuário tira uma foto e processa esta imagem de maneira a realçar as bordas da peça dobrada. A partir do processamento da imagem, pode-se “medir” (pelo programa) os raios dobrados e compará-los com os raios projetados para a peça. Desta maneira, é possível ajustar a calandra devido a recuperação elástica.

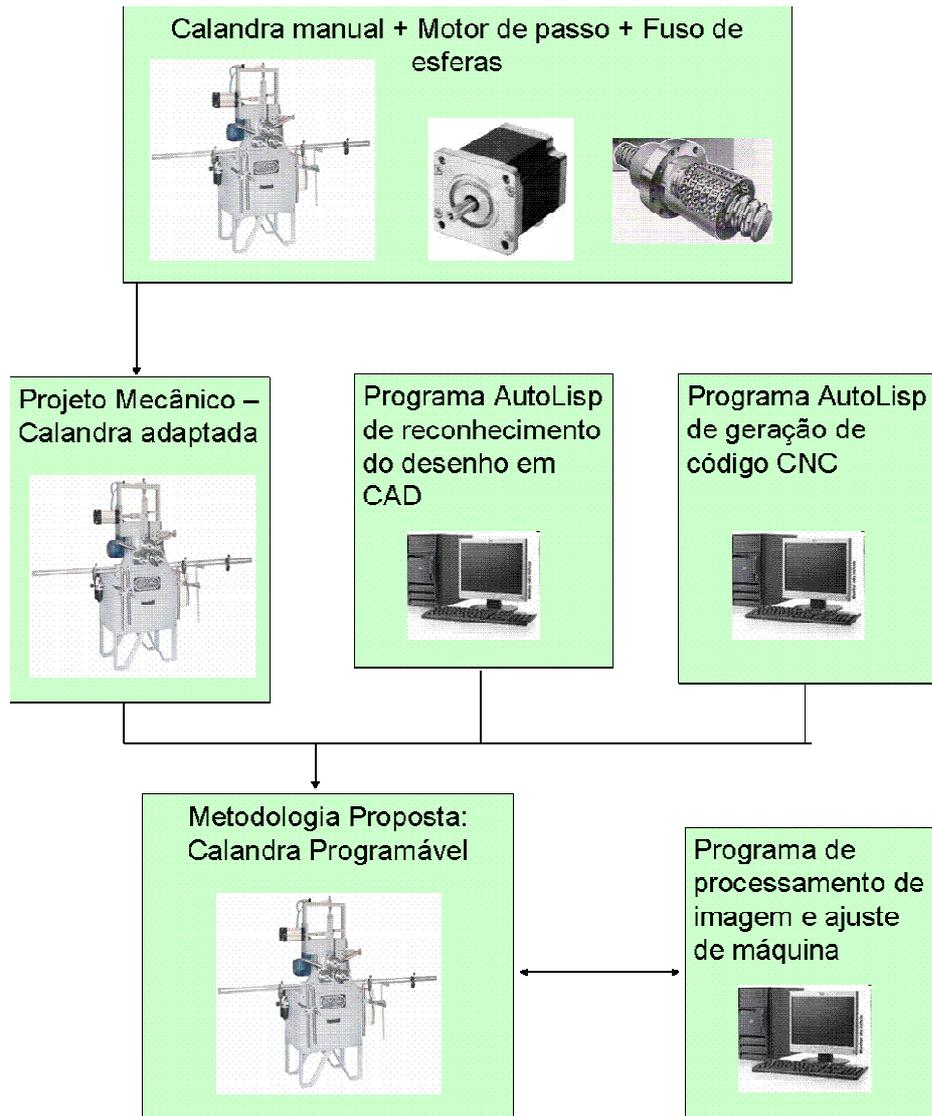


Figura 3.1 – Fluxograma de desenvolvimento da metodologia proposta

O fluxograma da figura 3.2 refere-se aos passos em que o usuário deve seguir para que possa utilizar a metodologia proposta. Com o desenho da peça em sistema CAD, carrega-se o aplicativo para reconhecimento da geometria desenhada e gera-se o código CNC correspondente. Esse programa-tarefa é utilizado pela calandra proposta, que executa as operações de conformação na peça. Através de uma foto digital e processamento da imagem, de forma a realçar as bordas da peça, os dados da imagem são inseridos na forma de pontos no sistema CAD. Utilizando o programa elaborado para reconhecer os raios de curvatura da imagem, calcula-se o índice de recuperação elástica “K” para ser informado ao programa. O programa corrigirá o código CNC e a peça terá seus raios dobrados mais próximos dos valores de projeto.

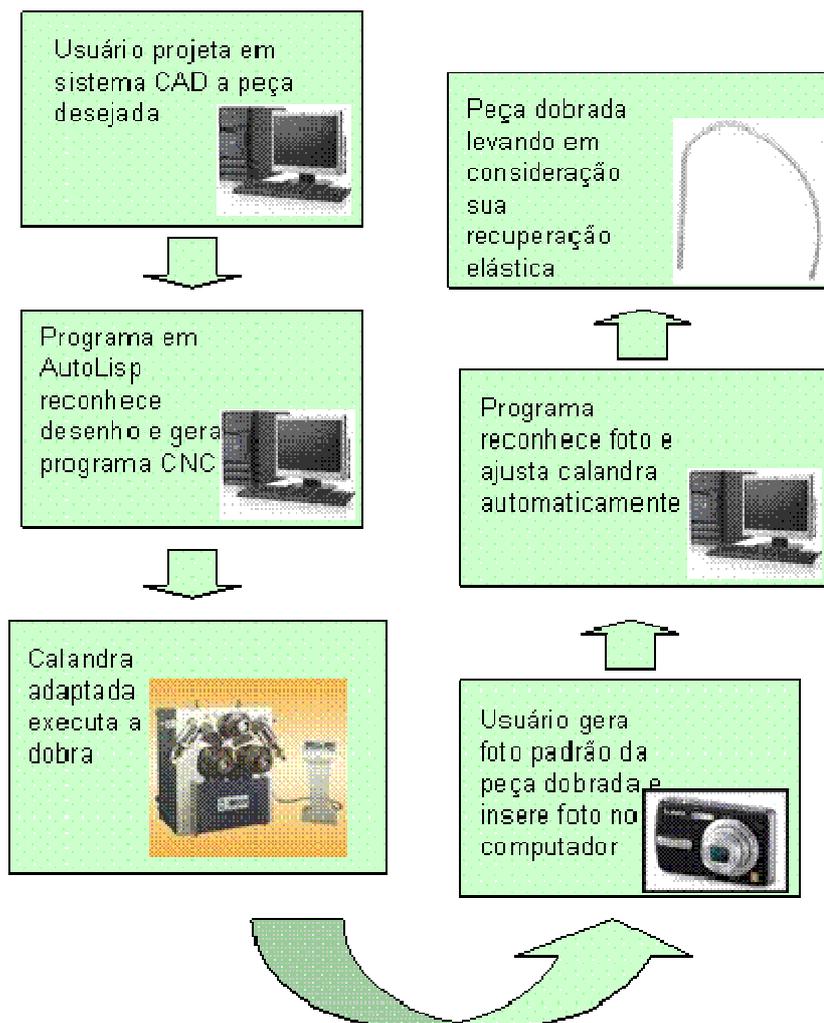


Figura 3.2 – Fluxograma do usuário da metodologia

3.1 Princípio operacional do equipamento

Calandras de tubos metálicos ou chapas têm o mesmo princípio de conformação. As características construtivas para o equipamento, consideradas nesse trabalho, são baseadas em calandras comuns existentes no mercado. Assim, o projeto conceitual apresentado na figura 3.3 poderá servir como referência, tanto para a elaboração de um produto novo, como também para direcionar a metodologia para ser aplicada na conversão de calandras convencionais em equipamentos CNC. Os principais requisitos para o sistema de acionamento para esta proposta são:

- fuso de esferas, para movimentação da polia de conformação de forma suave e precisa;
- motor com variação contínua de velocidade e possibilidade de inversão do sentido de rotação para controle da movimentação deste fuso;

- possibilidade de comunicação dos motores de acionamento com microcomputadores.

A figura 3.3 apresenta um esboço do projeto mecânico. Esta é uma idéia conceitual e não um projeto detalhado. Como o projeto pode ser adaptado a calandras comerciais, não há como elaborar um detalhamento. Certamente deve-se deixar claro que, para cada equipamento em que for aplicada a adaptação mecânica, devem ser calculadas e corretamente especificadas a potência do motor de passo e a dimensão e capacidade de carga do fuso.

A idéia do projeto mecânico é baseada em calandras de tubos já existentes no mercado levando-se em consideração as características comuns a calandras simples, que não tenham CNC. O projeto não está vinculado a nenhum equipamento específico, ou seja, salvo algumas limitações que alguns equipamentos possam ter, a adaptação poderá ser feita em qualquer calandra de tubos vertical que tenha as seguintes características:

- velocidade (rotação) de trabalho constante;
- distância fixa entre os dois eixos inferiores;
- eixo central com matriz de conformação, com movimento linear de subida e descida.

Como todo o equipamento possui limitações, é importante destacar que, a proposta de adaptação a ser projetada destinar-se-á para curvamento de tubos industriais metálicos de diversos diâmetros, incluindo perfis metálicos. A especificação de limitações de máquina deve ser calculada e dada conforme potência da máquina original e dos elementos integrados à ela (motores fuso).

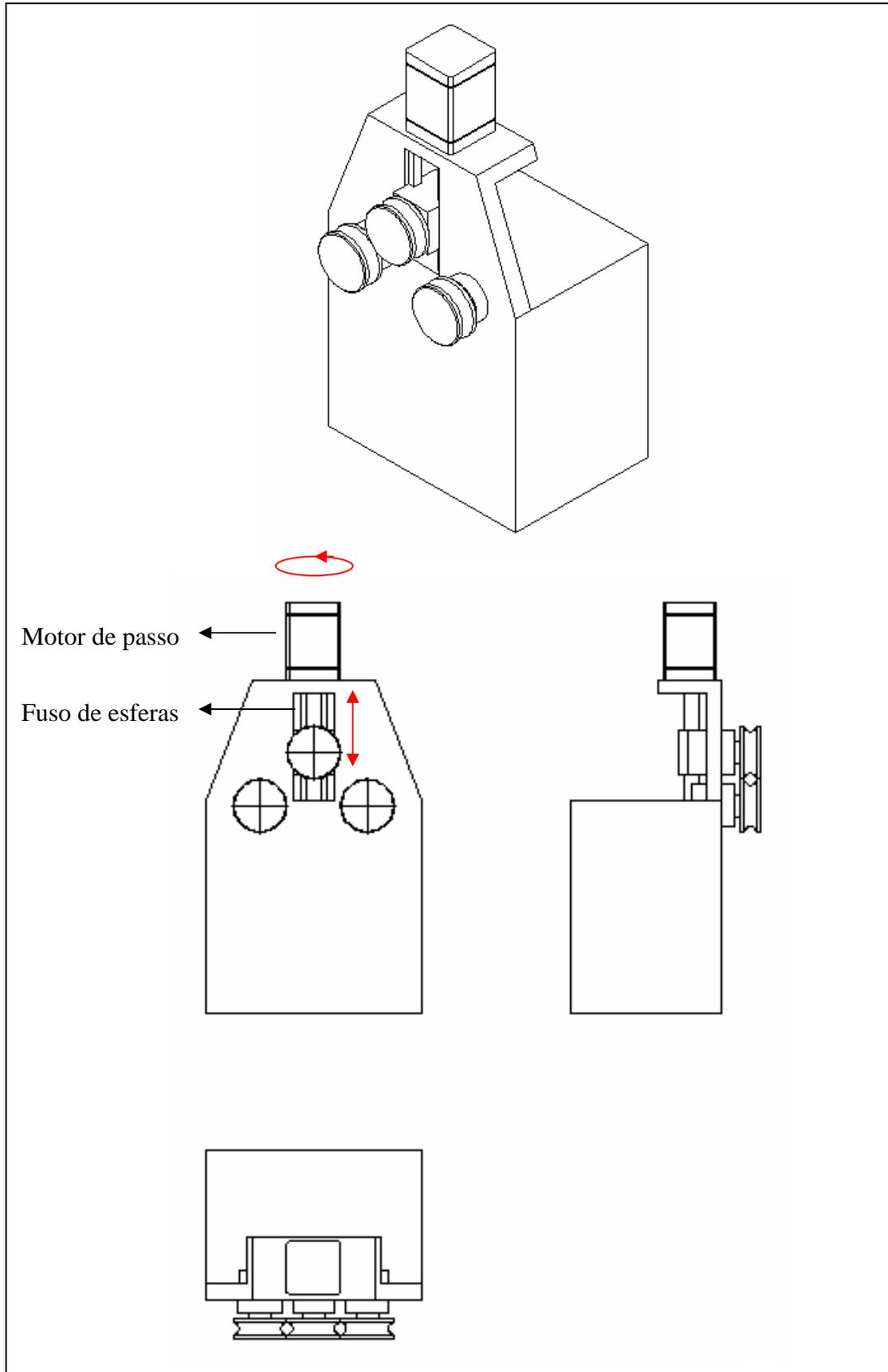


Figura 3.3 - Projeto conceitual de calandra

3.2 Implementação do Programa

O sistema proposto foi implementado na forma de aplicativo do sistema AutoCAD, cuja linguagem de programação é o AutoLISP. Segundo Kramer (1995), o AutoLISP deriva-se do LISP, abreviatura para *LISt Processing*. Conhecendo a história da linguagem LISP, que é a segunda mais antiga linguagem de programação de alto nível ainda usado por computadores modernos (a mais antiga é FORTRAN), adquire-se uma compreensão do dialeto AutoLISP. Conforme Leite (1989) AutoLISP é uma implementação da linguagem de programação LISP, sendo uma das primeiras linguagens de alto nível inventadas. Foi desenvolvida para que houvesse a possibilidade de se desenvolver programas usando expressões comuns em inglês. Para Kramer (1995), apesar do sistema LISP ser diferente das outras linguagens de programação, ele possui elementos que são encontrados na maioria das linguagens modernas, permitindo uma programação concisa em problemas complexos. Através do AutoLISP podem ser criados novos comandos, programas e funções que além de personalizar o AutoCAD, aumenta a produtividade do trabalho (LEITE, 1989). O AutoCAD pode ser considerado o sistema operacional do AutoLISP, onde os programas em AutoLISP rodam apenas dentro do AutoCAD.

A linguagem AutoLISP evoluiu de forma a conter a maioria dos comandos básicos, capacidade de linguagem de programação LISP, tipos de dados, assim como funções especiais adicionais para operações dentro do sistema gráfico do AutoCAD. A LISP se encaixa quase naturalmente dentro de um sistema CAD, já que ele é um processador de listas. Os sistemas gráficos, principalmente o sistema CAD, são baseados em pontos e vetores. Esses pontos podem ser considerados listas e, para formar um ponto de referência, são combinados dois ou três números reais. Para definir uma posição no espaço, um ponto é designado usando uma coordenada (x, y, z), representando uma lista de três números. Listas de números são usadas para um nível básico de Sistema CAD. Uma linha é definida por dois pontos extremos, podendo ser considerada uma lista contendo duas listas de pontos, descrevendo os valores de coordenada de cada ponto. O ponto é a parte mais elementar de um sistema CAD, sendo uma lista de dois ou três números. O primeiro número é a coordenada x, o segundo a coordenada y e o terceiro a coordenada z. Para o CAD a manipulação de pontos é essencial, já a LISP, vem equipado para lidar com pontos e grupo de pontos com facilidade.

3.3 Reconhecimento dos dados geométricos do desenho CAD

Partindo-se de um desenho de uma peça a ser curvada, elaborado em sistema CAD, um programa para reconhecimento das diversas partes que compõem esse desenho foi desenvolvido. Este programa deve ser capaz de reconhecer basicamente retas e curvas. Essa identificação é feita através do acesso ao banco de dados do arquivo CAD.

O ponto inicial, ou seja, qual o ponto de partida do “caminho” a ser percorrido para curvar a peça, é um dado de entrada do processamento (figura 3.4). A partir desse ponto, o programa passa a fazer uma varredura seqüencial dos elementos (retas e curvas) interligados. Desta forma, o programa gera a seqüência de elementos, partindo do ponto inicial até o último elemento reconhecido. Por este motivo, é fundamental que todos os elementos estejam ligados, sem descontinuidades, formando uma seqüência conectada de elementos. A partir desta seqüência, é que serão gerados os comandos CNC para execução da peça.

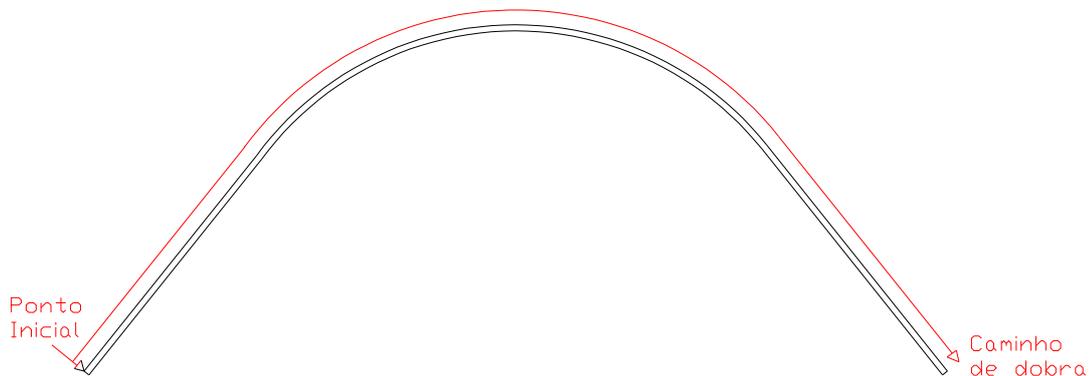


Figura 3.4 - Desenho peça curvada – caminho de dobra

3.4 Sistema de coordenadas para o programa CNC

Para o modelo de calandra considerado, o avanço da peça é dado pelas polias inferiores. No programa CNC, esse deslocamento é especificado pela função de programação do eixo X.

A função de posicionamento do eixo Y no programa CNC é reservada para especificar a altura da matriz superior de conformação. Para se conformar uma curva numa peça, com um

raio qualquer, a matriz (eixo) superior deve estar a uma determinada distância ou altura a partir do centro das matrizes inferiores. Para isto, devem ser considerados os seguintes aspectos:

- distância entre os centros das matrizes inferiores, que deve ser fixo;
- diâmetro das matrizes (considerar diâmetro interno, onde o tubo assentará);
- diâmetro externo do tubo metálico a ser curvado.

A figura 3.5 mostra o sistema de coordenadas de referências da calandra adaptada para a geração do programa CNC.. A figura 3.6 mostra a posição de origem ou posição “zero” da matriz superior, onde a face inferior da matriz conformadora (superior) está alinhada com uma reta imaginária ligada aos dois quadrantes superiores das matrizes inferiores. A função de posicionamento Y é o eixo de referência para a definição dessa altura. Valores positivos nesse eixo de coordenadas significam posições de conformação. A figura 3.7 mostra a altura mínima que a matriz superior deve estar para posicionar a peça na calandra no início da conformação. O eixo X é adotado no programa CNC para especificar o avanço da peça na máquina.

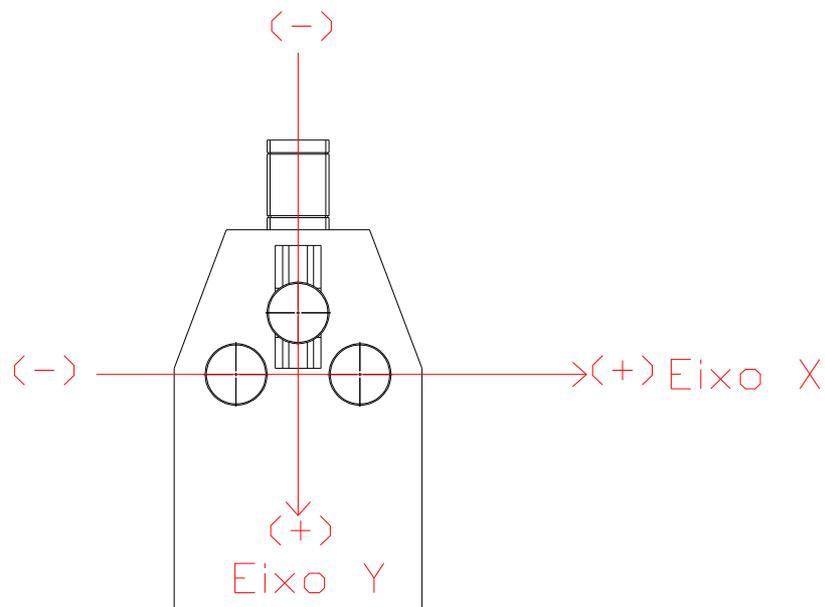


Figura 3.5 – Definição do sistema de coordenadas

$$l = \alpha \cdot r \quad (3.1)$$

onde,

l = comprimento do arco de circunferência (mm)

r = raio do arco (mm)

α = ângulo formado pelo arco (rad).

Considerando que $\pi \text{ rad} = 180^\circ$ e substituindo na equação (3.1), obtém-se:

$$l = \alpha \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot r \quad (3.2)$$

Conforme definição do sistema de coordenadas, o comprimento calculado deve ser inserido na função de posicionamento X do programa CNC.

Após o reconhecimento do desenho, o programa determina a altura em que a matriz superior deve estar a partir do centro dos eixos (matrizes) inferiores. Essa altura é especificada pela coordenada Y do programa CNC e é calculada geometricamente por recursos de desenho do sistema CAD para cada curva que o programa identificar no desenho da peça a ser conformada.

Conforme já mencionado, os diâmetros das matrizes, a distância entre os centros das matrizes inferiores e diâmetro externo do tubo metálico a ser curvado são dados de entrada. Partindo-se desses dados, as duas matrizes inferiores são desenhadas no CAD (figura 3.8).

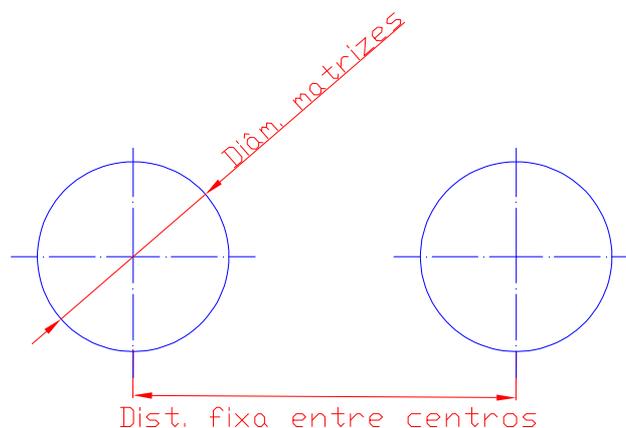


Figura 3.8 - Matrizes inferiores da calandra de tubos com sua distância fixa entre centros

Após esta etapa, o sistema desenha um círculo utilizando o comando disponível no AutoCAD® como “Circle - Tan Tan Radius” (Ttr), ou seja, um círculo tangente a dois outros círculos (representados pelas matrizes inferiores) e com o raio da peça em que deseja curvar. Na seqüência, desenha-se outro círculo dentro do círculo obtido, utilizando o comando “Offset” com a distância sendo o diâmetro externo do tubo metálico (figura 3.9).

A próxima etapa é desenhar o círculo que representará a matriz superior. Utilizando o diâmetro informado pelo usuário deve ser desenhado um círculo no qual o quadrante do círculo interno da peça seja coincidente com o quadrante do novo círculo. Para executar essa tarefa deve ser utilizado o comando “Circle - 2P”, selecionando o quadrante do círculo interno da peça e depois o raio da matriz.

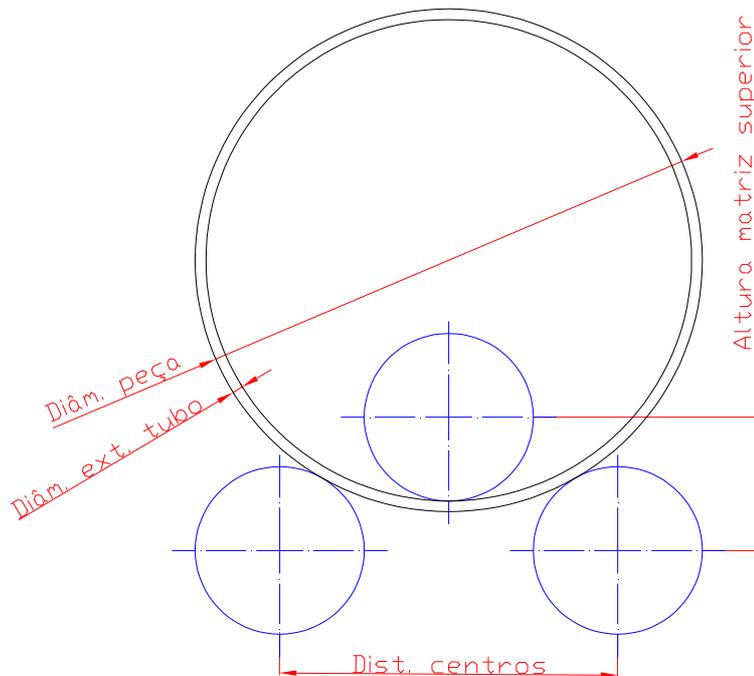


Figura 3.9 - Desenho da peça (curva) com as matrizes inferiores e a superior

Desta forma, a altura que a matriz superior deve estar posicionada para conformar a peça, será a medida alinhada entre o centro dos círculos inferiores até o centro da matriz superior, conforme mostrado na figura anterior (figura 3.10).

A altura da matriz superior, em relação à posição zero das matrizes determina a coordenada Y do programa CNC.

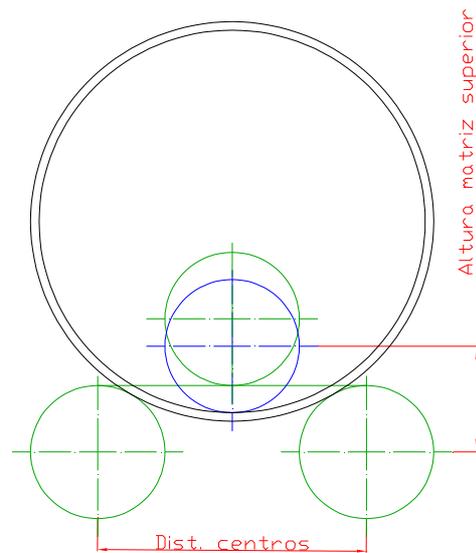


Figura 3.10 – Determinação geométrica da altura da matriz superior

3.6 Velocidade de avanço

As matrizes para dobra de tubos são fabricadas com um diâmetro (maior) externo, um furo central e uma concavidade para assentar o tubo. O diâmetro da matriz, a ser informado como dado de entrada do sistema, deve ser o medido internamente, como mostrado na figura 3.11. O cálculo do avanço é baseado nesse diâmetro.

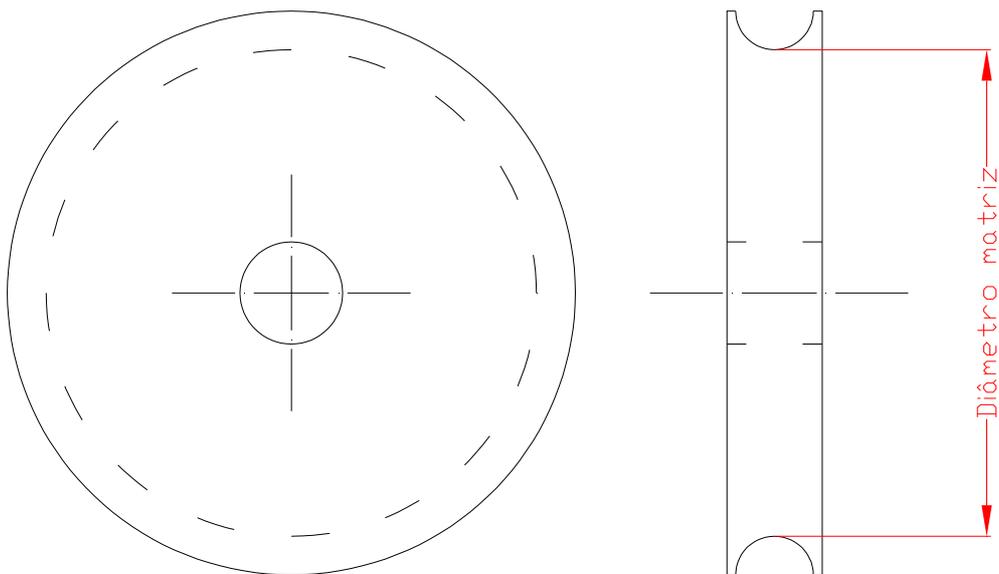


Figura 3.11 - Diâmetro da matriz de dobra de tubo

Conhecida a velocidade (rpm) em que as matrizes tracionadoras inferiores rotacionarão e o diâmetro das matrizes (mm), é necessário calcular a velocidade linear. O comprimento do círculo da matriz é dado por:

$$C = 2\pi.r = \pi.d \quad (3.3)$$

Utilizando esta equação, pode-se calcular a velocidade linear para as matrizes inferiores:

$$v = C.n = \pi.d.n \quad (3.4)$$

sendo,

v = velocidade linear nas matrizes (mm/min);

d = diâmetro interno da matriz (mm);

n = rotação das matrizes – (rpm).

A velocidade de avanço assim calculada deve aparecer no programa CNC pela função de programação F do código ISO. Porém, a inserção desse valor no programa pode ser dispensada se, no sistema de controle de acionamento dos motores de passo, a resolução (mm/pulsos) e o avanço padrão forem especificados corretamente.

3.7 Determinação experimental da recuperação elástica

Para se ter uma noção, na prática, de valores da recuperação elástica, foram feitos testes com tubos metálicos industriais de aço com diâmetro de $\frac{3}{4}$ " e 0,75mm de espessura de parede e tubos de alumínio com diâmetro de $\frac{3}{4}$ " e 1 mm de espessura de parede. Os tubos de aço são fabricados segundo norma NBR 6591 e os tubos de alumínio são da liga 6063-T6F, especificados pelo fabricante.

Constatou-se que a recuperação elástica é um fator muito perceptível na conformação de tubos. Para a realização dos testes, cortou-se amostras dos tubos em 1m e a dobra de 90° foi realizada numa dobradeira manual. O tubo foi preso na morsa (figura 3.12), foi realizada a dobra (figura 3.14.a) e com equipamento próprio para medição, conferiu-se o ângulo inicial (90°) (figura 3.13). Após soltar a dobradeira, o efeito mola se completou (figura 3.14.b), a figura 3.15 mostra a peça dobrada comparada a um esquadro.



Figura 3.12 - Tubo preso na morsa da dobradeira manual



Figura 3.13 - Peça dobrada com 90° e conferência do ângulo

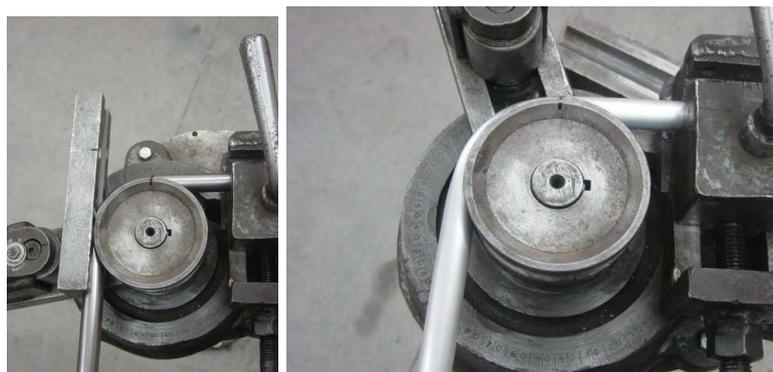


Figura 3.14 – (a) Peça antes e (b) após liberá-la da morsa



Figura 3.15 - Peça comparada a um esquadro com ângulo menor que 90°

Através das medidas dos ângulos (tabela 3.1), obtidas com transferidor de ângulo móvel (figura 3.13), e utilizando-se a equação (2.8), calcula-se o valor de K:

Tabela 3.1 - Resultados recuperação elástica em tubos de aço

Tubos de AÇO			
Ângulo inicial $\alpha_o = 90^\circ$			
Ensaio	Ângulo final ($^\circ$) α_f	Diferença angular ($^\circ$) $= \alpha_o - \alpha_f$	$K = \frac{\alpha_f}{\alpha_o}$
1	86	4	0,96
2	87	3	0,97
3	88	2	0,98
4	88	2	0,98
5	86	4	0,96
Média		3,00	0,97

Tabela 3.2 - Resultados recuperação elástica em tubos de alumínio

Tubos de ALUMÍNIO			
Ângulo inicial $\alpha_o = 90^\circ$			
Ensaio	Ângulo final ($^\circ$) α_f	Diferença angular ($^\circ$) $= \alpha_o - \alpha_f$	$K = \frac{\alpha_f}{\alpha_o}$
1	85	5	0,94
2	85	5	0,94
3	86	4	0,96
4	86	4	0,96
5	86	4	0,96
Média		4,40	0,95

O procedimento apresentado exemplifica uma técnica de relativa facilidade para determinação inicial do coeficiente de recuperação elástica. A metodologia proposta permitir otimizar esse parâmetro através da aplicação da técnica de processamento de imagens no controle de qualidade do processo.

3.8 Controle de qualidade por processamento de imagens

Conforme já discutido anteriormente, a recuperação elástica do material a ser curvado deve ser estimada e considerada. O controle de qualidade do processo é feito no sistema através da medição do raio de curvatura obtido na conformação. O programa desenvolvido para essa função utiliza dados processados de imagens provenientes de um sistema computacional desenvolvido por Silva et al. (2006). Esse *software* aplica métodos de identificação de contornos ou bordas de elementos de uma imagem e fornece como resultado um arquivo texto contendo as coordenadas do conjunto de *pixels* do contorno selecionado. A concepção deste programa é processar a imagem utilizando os filtros de realce Sobel ou Roberts. O arquivo texto gerado é inicialmente interpretado pelo sistema para converter os dados de coordenadas em entidades “ponto” do CAD. Dessa forma, o formato do contorno é reproduzido no CAD através de pontos.

O programa desenvolvido no sistema CAD tem como objetivo identificar raios das curvas executadas através de uma fotografia digital da peça, para determinação em processo do fator de recuperação elástica, conforme equação (2.10). A identificação de raios de curvatura é realizada através da aplicação, no programa, de recursos de desenho do CAD.

O início do processo é através da seleção das entidades “ponto” que estão na região do arco que definem o raio de curvatura e que se deseja identificar o arco (ver polígono verde na figura 3.16.a). Após serem ordenados em seqüência, por proximidade em uma lista de dados (ver pontos marcados na figura 3.16.a), traça-se um arco de aproximação no CAD, passando por três pontos: os pontos extremos dessa seqüência e o ponto intermediário médio (figura 3.16.a). Essa entidade geométrica serve para uma determinação do centro do arco a ser identificado (figura 3.16.a). O raio de curvatura é calculado com maior precisão, fazendo-se a média das distâncias deste centro em relação a cada ponto da lista de dados (figura 3.16.b). O arco identificado terá o raio médio calculado entre essas distâncias e seu centro será o centro do arco desenhado passando pelos três pontos (figura 3.16.c)

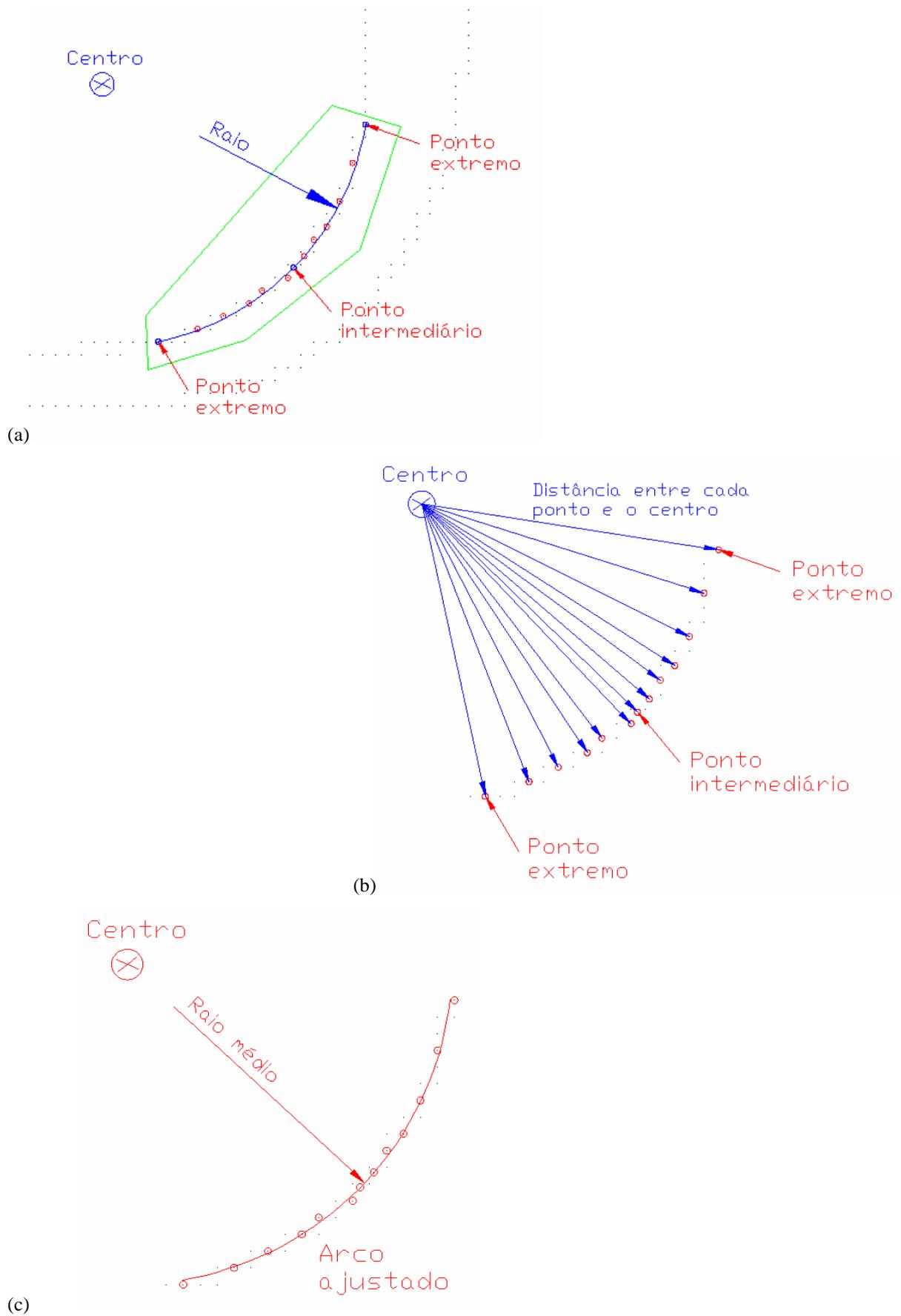


Figura 3.16 – Identificação de arcos (a) círculo passando por três pontos; (b) distância entre cada ponto e o centro do círculo; (c) arco ajustado identificado nos pontos

3.9 Dados de configuração

Quando o programa para gerar código CNC for carregado no CAD pela primeira vez, o usuário deverá informar os seguintes parâmetros do processo:

- diâmetro das polias motoras (inferiores);
- diâmetro da polia de conformação (superior);
- distância entre as duas polias inferiores;
- diâmetro externo do tubo a ser conformado;
- tensão de escoamento do material;
- módulo de elasticidade longitudinal;
- coeficiente de Poisson;
- diâmetro do tubo ou espessura da chapa;
- valor medido para o coeficiente de recuperação elástica do material K .

Após a primeira vez carregado, esses parâmetros não são mais solicitados, mas o programa permite que sejam alterados através da opção “Configurações” no menu principal. O coeficiente de recuperação elástica do material K pode ser estimado teoricamente (item 2.6) e será sempre menor que 1, sendo uma constante sem unidade de medida. Inserido este dado, o programa fará uma compensação no raio a ser dobrado. Isto significa que, no momento da dobra, o raio efetivamente dobrado será menor que o projetado e quando a ferramenta soltar a peça, acontecerá a recuperação elástica e a peça terá o raio real próximo ao projetado. Ele pode também ser determinado experimentalmente através da divisão entre os raios projetado e medido por processamento da imagem da peça dobrada.

4 RESULTADOS

Conforme descrito nos capítulos anteriores, o objetivo do presente trabalho é uma proposta de metodologia para adaptação de curvadoras (calandras) de tubos de modo a tornar programável o processo de dobra. Como o trabalho é uma proposta de metodologia, de forma genérica, ela pode ser adaptada em diversas situações e modelos de calandras. Para demonstrar a metodologia, este capítulo apresenta resultados de exemplos de aplicações do sistema implementado.

Para gerar o programa CNC, o sistema solicita ao usuário informar (clicar) o ponto inicial para uma seqüência de arcos e retas desenhados. Como dado de saída o programa gera uma janela com o código CNC para conformação da peça desenhada. Algumas considerações devem ser feitas em relação a estes dados de saída.

- o eixo X representa o movimento das polias tracionadoras, que deslocam o tubo;
- o eixo Y representa o movimento da polia superior ou conformadora;
- o primeiro movimento que aparece no programa CNC é um deslocamento do eixo Y de um valor igual ao diâmetro do tubo;
- o bloco “M00;posicionar o tubo” significa que o programa pára o processamento com a finalidade de que o operador posicione o tubo na calandra;
- seguem os movimentos do eixo Y para conformação dos arcos e das retas;
- em caso de curvas na mesma peça com sentidos contrários (inversão de sentido), o sistema insere o código de parada no programa CNC para que a inversão da posição da peça na máquina seja executada manualmente.

4.1 Geometrias simples

A geração do código CNC dos exemplos das seguintes peças com geometrias simples e com raios variáveis é baseada nos dados de entrada, sendo o ponto selecionado para início de conformação sempre o ponto mais a esquerda de cada figura:

- Diâmetro das polias motoras e de conformação = 150mm;
- Distância entre centros das polias motoras = 200mm;
- Diâmetro do tubo = 25,4mm;
- Coeficiente de recuperação elástica = 0,98.

O programa desenvolvido gerará um código CNC para que a calandra execute a peça, onde a lógica adotada será a seguinte (todos os exemplos seguirão esta lógica).

- “G90” – início do programa.
- “G00 Y????” - matriz conformadora subirá a dimensão do diâmetro externo do tubo ou espessura da chapa a ser calandrada, partindo do ponto zero para que o usuário possa posicionar o tubo ou a chapa na calandra.
- “M00;posicionar tubo” – pára o programa e solicita ao usuário que posicione o tubo ou a chapa na calandra.
- “G01 Y????” - a matriz conformadora posicionar-se-á em uma altura Y em relação ao ponto zero, tal que seja possível formar o arco com o raio projetado. Devido a recuperação elástica, o programa calculará a sua compensação utilizando a fórmula (2.10) com os valores informados (tensão de escoamento, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) ou, se o usuário já informar o valor de K (coeficiente de recuperação elástica), o programa calculará o raio compensado:

$$(1 - K) + 1 = b \quad (4.1)$$

$$r_{\text{raio.da.peça}} \cdot b = r_{\text{compensado}} \quad (4.2)$$

- “G01 X????” – a calandra avançará no eixo X até o próximo ponto, ou seja, o programa calculará o comprimento do arco ou mesmo utilizará o comprimento de uma reta, dependendo do projeto e da seqüência de conformação. A partir deste ponto, a seqüência de avanço da conformação será determinada pela seqüência de elementos do desenho, solicitando uma posição Y e outra X conforme o projeto. Se o elemento for uma reta a posição X será seu

comprimento total. Se o elemento for um arco, o programa calculará seu comprimento através da fórmula

$$b = \frac{\pi}{180^\circ} \cdot r \cdot \alpha \quad (4.3)$$

onde, b = comprimento do arco em mm;

r = raio do arco em mm;

α = ângulo do arco em graus.

- “M02” - finalização do programa.

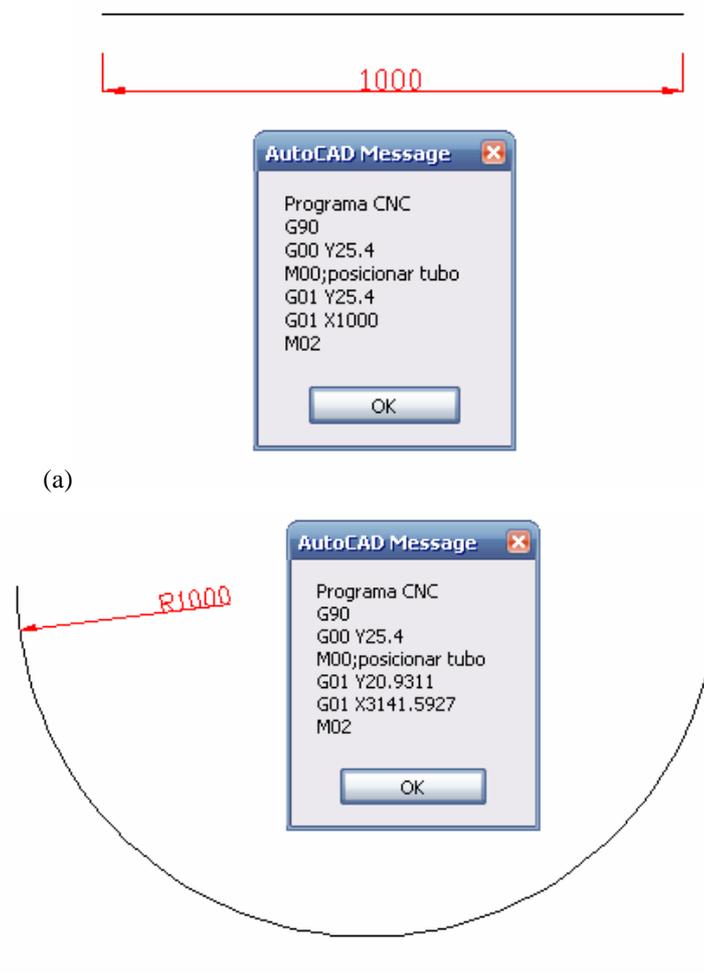


Figura 4.1 – Exemplo de dados de saída do programa de geração de código CNC (a) reta; (b) semicírculo

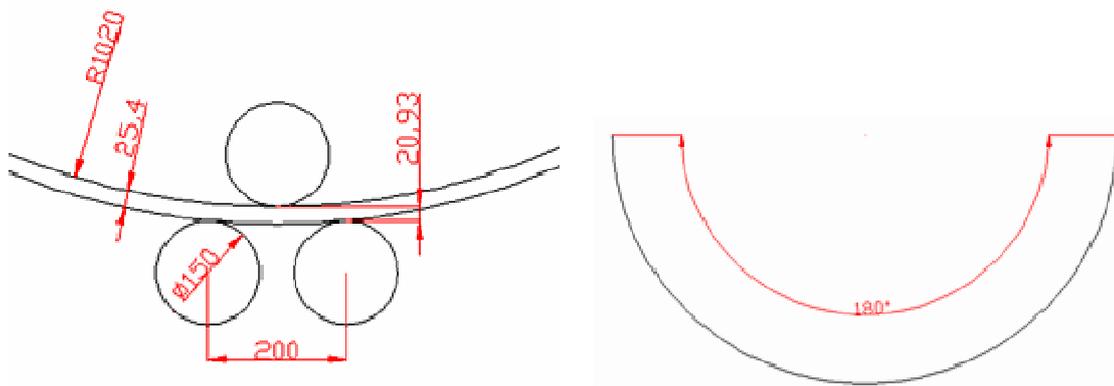


Figura 4.2 - Simulação auxiliar para determinação da posição Y e X da matriz conformadora

Na figura 4.1.a o código CNC determinará somente o posicionamento do tubo com diâmetro de 25,4mm na calandra e o avanço com o valor do comprimento total, neste caso com 1000mm. Na figura 4.1.b temos um exemplo de um semicírculo com raio de 1000mm. A figura 4.2 mostra uma simulação auxiliar para determinar a posição $Y=20,93\text{mm}$ da matriz conformadora, o raio conformado deve ser 1020mm $[(1-0,98)+1]=1,02*1000=1020$] devido a recuperação elástica. Utilizando a equação 4.3 podemos determinar o comprimento do arco e, conseqüentemente, o avanço $X=3141,59\text{mm}$, sendo:

$$b = \frac{\pi}{180^\circ} \cdot r \cdot \alpha = \frac{\pi}{180^\circ} \cdot 1000 \cdot 180^\circ = 3141,59\text{mm}$$

A figura 4.3.a mostra outro exemplo onde o ângulo do arco com raio de 200mm é de 270° , sendo assim, o comprimento do arco $b=942,47\text{mm}$. A figura 4.3.b mostra o raio a ser conformado de 204mm e a posição $Y=8,52\text{mm}$ da matriz conformadora.

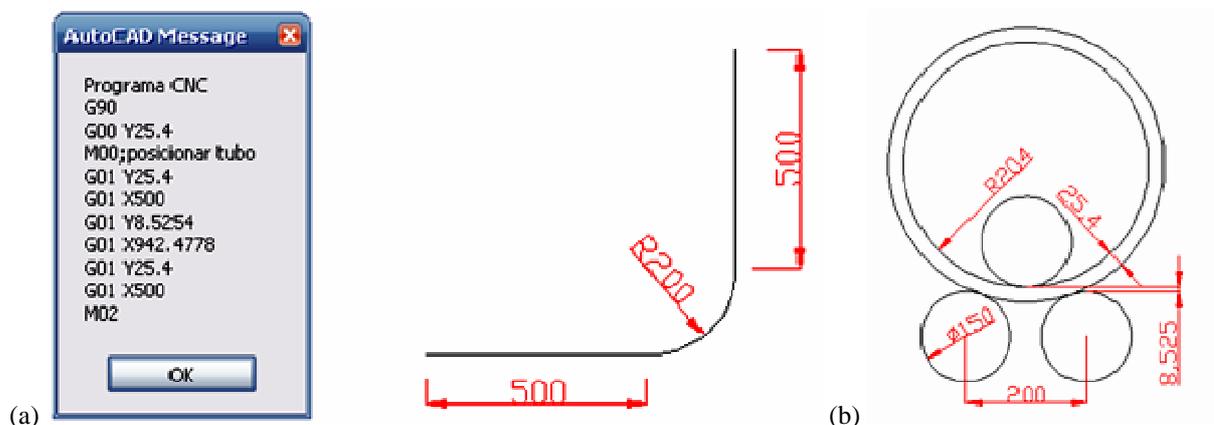


Figura 4.3 – (a) Exemplo de dados de saída do programa de geração de código CNC – retas e arco de raio fixo; (b) Simulação auxiliar para geração do código CNC

4.2 Peças com raios variáveis

As figuras que seguem são exemplos de peças desenhadas com vários raios em seqüência, ou seja, com raios variáveis. A figura 4.4.a contém duas curvas com raios variáveis mostrando seus dois raios, os ângulos formados e o código CNC gerado para fabricação desta peça. A geração do código CNC foi baseado nos mesmos dados do item anterior 4.1. Na figura 4.4.b está representada a simulação auxiliar para o primeiro raio (951,2mm). Como o coeficiente de recuperação elástica informado é de 0,98, então o raio compensado calculado será de 970,224mm $[(1-0,98)+1=1,02 \times 951,2=970,224]$ e a posição da matriz conformadora será $Y=20,72\text{mm}$. O ângulo abrangido pelo arco é de $84,11^\circ$, por isto o comprimento do arco será: $b = \frac{\pi}{180^\circ} \cdot r \cdot \alpha = \frac{\pi}{180^\circ} \cdot 951,2 \cdot 84,11^\circ = 1396,41\text{mm}$. Para a geração do código CNC o programa utiliza ferramentas do próprio CAD para determinar o ângulo abrangido pelo arco.

A figura 4.4.c mostra o desenho auxiliar de simulação onde percebe-se o segundo raio da peça compensado de 2413,626mm $[(1-0,98)+1=1,02 \times 2366,3=2413,626]$, devido a recuperação elástica, e a posição da matriz conformadora $Y=23,41\text{mm}$. Com ângulo de $48,07^\circ$ obtêm-se o comprimento do arco de 1985,17mm.

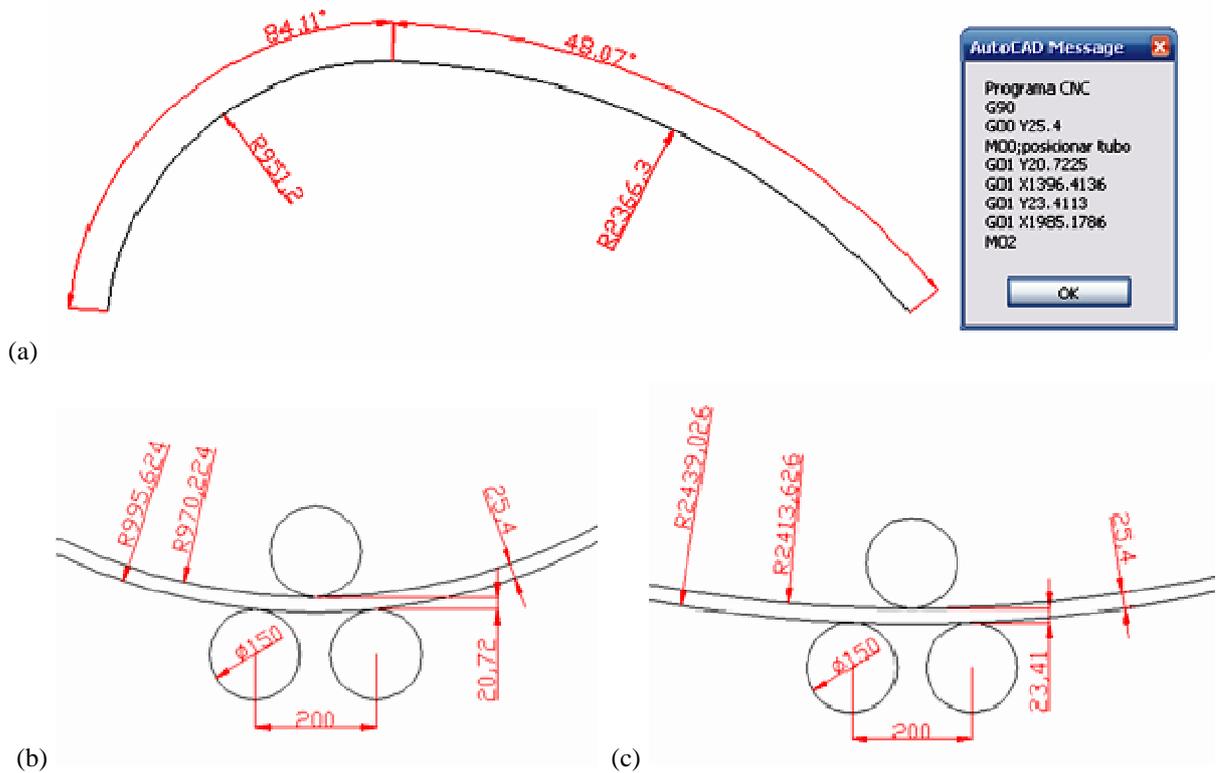


Figura 4.4 – Dados de saída do programa de geração de código CNC – exemplo 1. (a) projeto e código CNC (b) simulação do raio 1 = 951,2mm (c) simulação do raio 2 = 2366,3mm

A figura 4.5 possui uma reta e três curvas com raios distintos. As figuras 4.4.a e 4.6 mostram os dados de saída do programa de geração de código CNC, sendo o mesmo desenho. A diferença está na consideração da recuperação elástica. Na figura 4.6 a recuperação elástica não é levada em conta, já a 4.4.a leva em consideração, ou seja, haverá uma “compensação” devido a recuperação elástica.

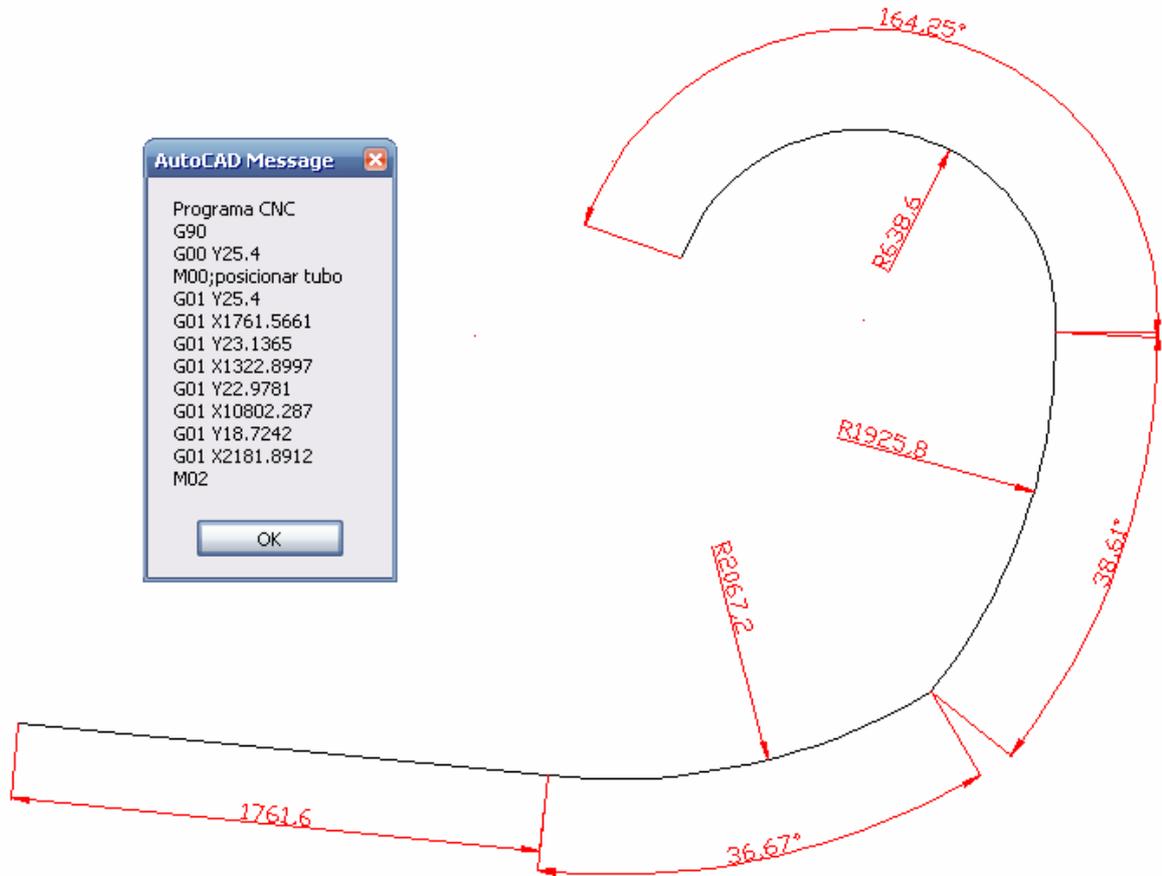


Figura 4.5 – Dados de saída do programa de geração de código CNC – exemplo 2

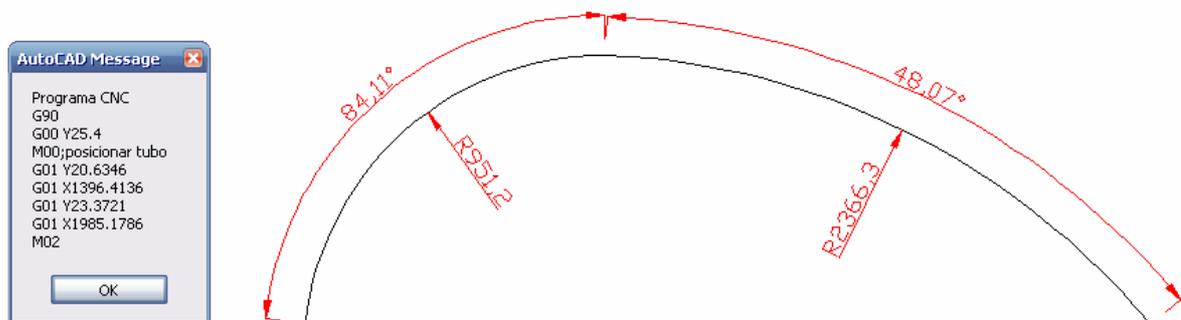


Figura 4.6 – Código CNC sem considerar recuperação elástica – exemplo 3

4.3 Controle do processo por processamento de imagem

A figura 4.7 apresenta fotografias digitais tiradas de um tubo curvado para medição do raio de curvatura. A câmera digital foi fixada a uma certa altura e a peça tubular posicionada em uma base montada para este fim, onde linhas de referência foram registradas. Esse procedimento é recomendado para a câmera digital tenha sempre a mesma distância da base. É importante que se mantenha um padrão de fundo contrastante com a cor da peça.

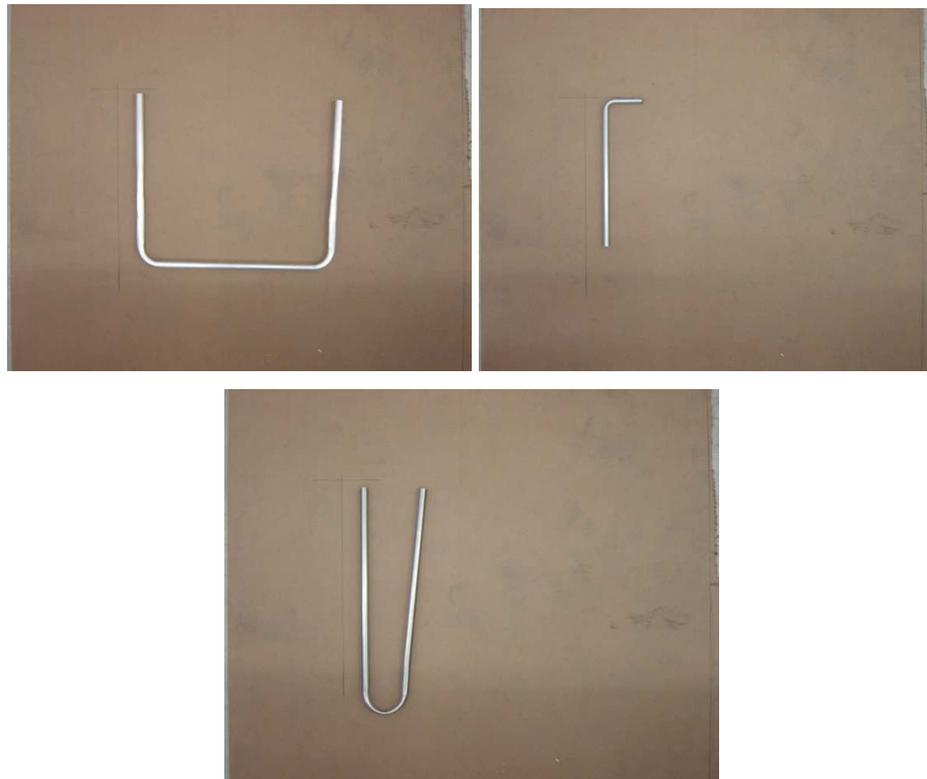


Figura 4.7 – Fotografias digitais para serem processadas

Como primeira etapa do procedimento, uma filtragem da imagem deve ocorrer. O processamento da imagem é realizado utilizando os filtros Roberts ou Sobel. Silva et al. (2006), em seu trabalho, elaborou um programa de processamento de imagens, utilizando filtros Roberts e Sobel. O trabalho de filtragem e geração de arquivo texto para leitura em CAD foi desenvolvido através do programa comercialmente conhecido como *IDL Virtual Machine*®. Através das figuras 4.8 e 4.9 percebe-se que o filtro Roberts realça as bordas com pontos contidos em uma faixa de menor espessura que para o caso do filtro Sobel.

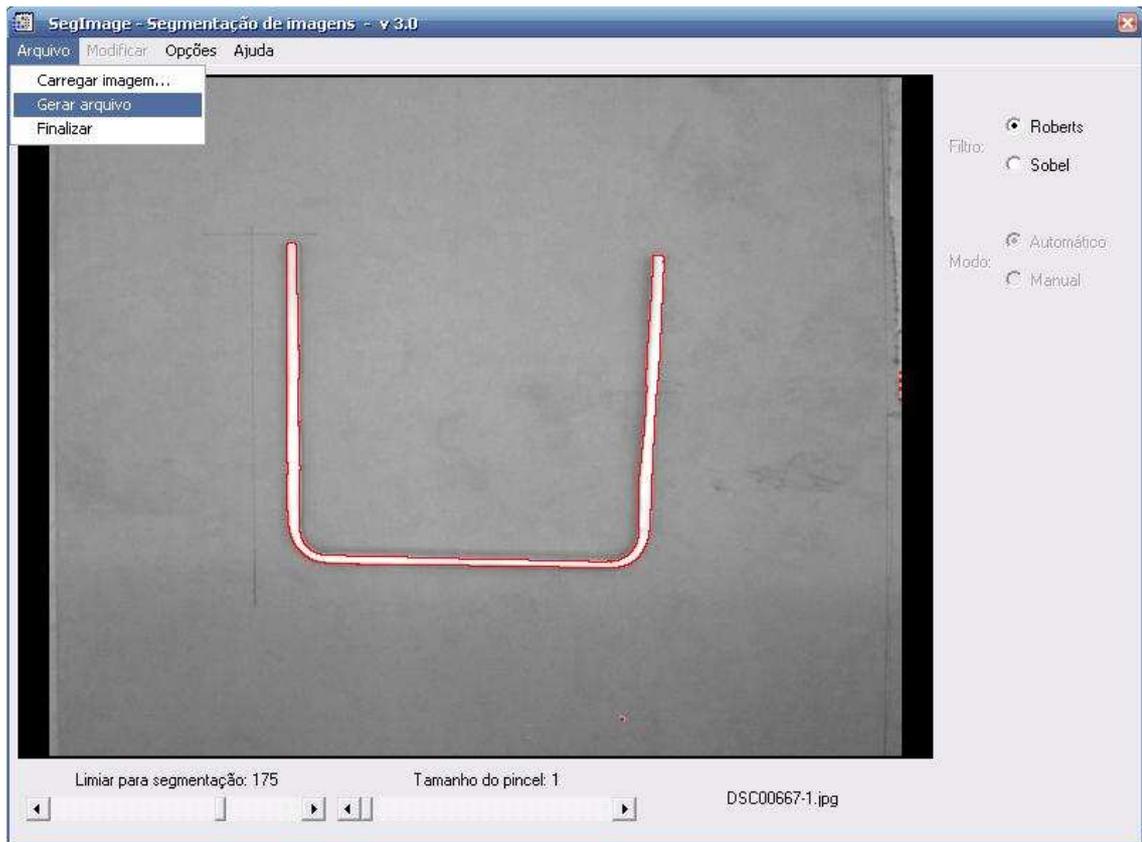


Figura 4.8 - Imagem de tubo filtrada com filtro Roberts

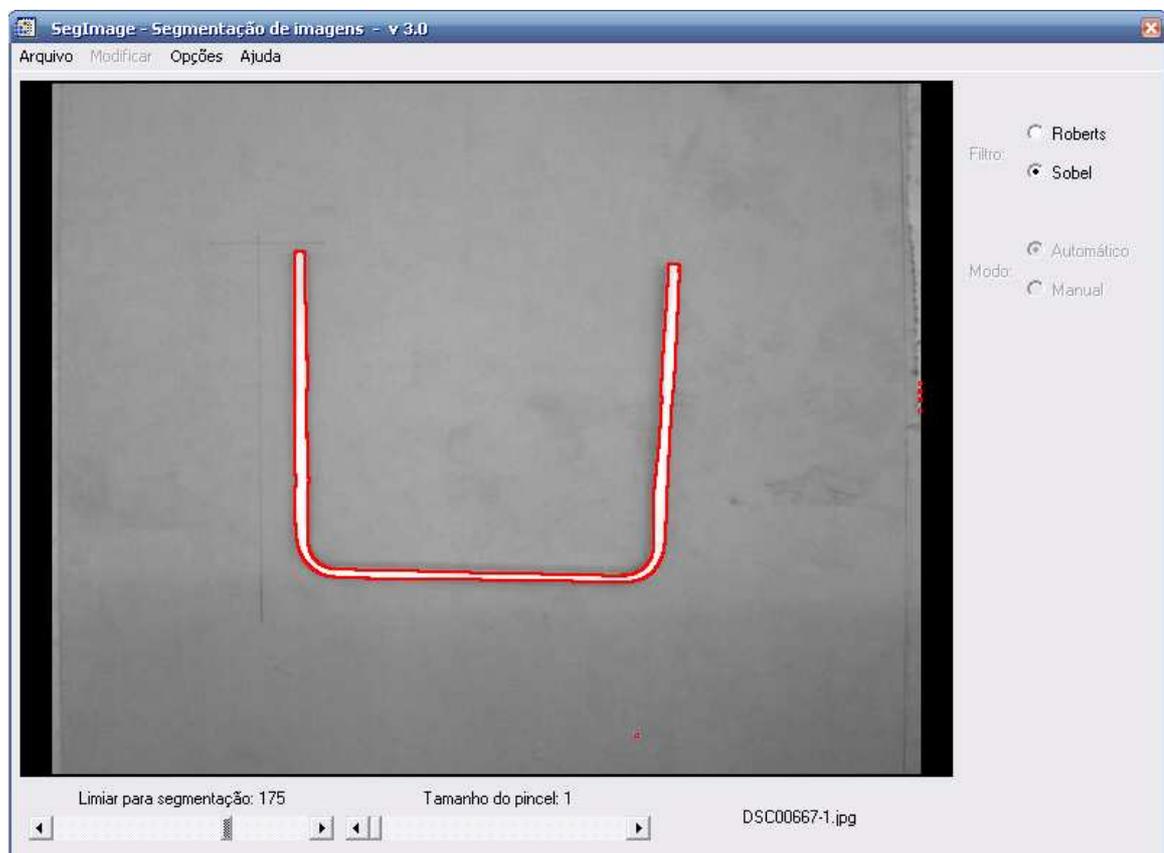
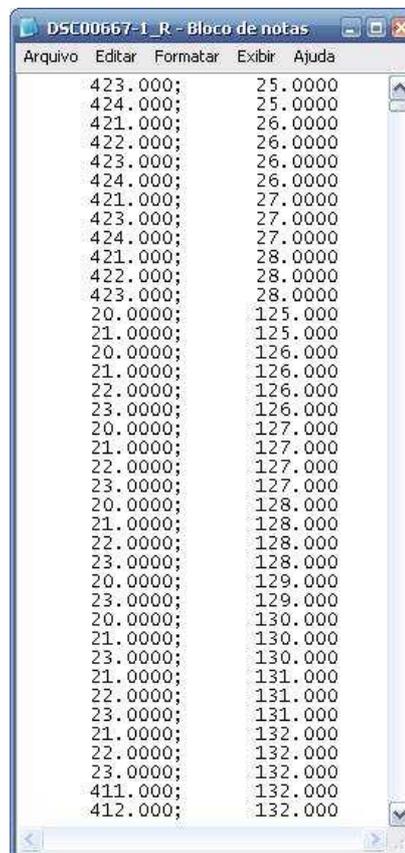


Figura 4.9 - Imagem de tubo filtrada com filtro Sobel

O sistema de filtragem gera o arquivo texto da figura 4.10 contendo as coordenadas dos pontos que definem as bordas. Esse arquivo é carregado no aplicativo CAD, que transforma as coordenadas em entidades “ponto” do CAD (figura 4.11 e 4.12). Na sequência, os pontos na região do arco devem ser selecionados para identificação do respectivo raio. A medida determinada pelo sistema deve ser corrigida através de uma calibração, que é feita pela informação da distância real entre dois pontos da imagem da peça. Dessa forma determina-se o fator que relaciona a distância em milímetros com a dimensão da imagem (*mm/pixel*).



Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
423.000;	25.0000			
424.000;	25.0000			
421.000;	26.0000			
422.000;	26.0000			
423.000;	26.0000			
424.000;	26.0000			
421.000;	27.0000			
423.000;	27.0000			
424.000;	27.0000			
421.000;	28.0000			
422.000;	28.0000			
423.000;	28.0000			
20.0000;	125.000			
21.0000;	125.000			
20.0000;	126.000			
21.0000;	126.000			
22.0000;	126.000			
23.0000;	126.000			
20.0000;	127.000			
21.0000;	127.000			
22.0000;	127.000			
23.0000;	127.000			
20.0000;	128.000			
21.0000;	128.000			
22.0000;	128.000			
23.0000;	128.000			
20.0000;	129.000			
23.0000;	129.000			
20.0000;	130.000			
21.0000;	130.000			
23.0000;	130.000			
21.0000;	131.000			
22.0000;	131.000			
23.0000;	131.000			
21.0000;	132.000			
22.0000;	132.000			
23.0000;	132.000			
411.000;	132.000			
412.000;	132.000			

Figura 4.10 – Exemplo de arquivo texto gerado a partir da filtragem

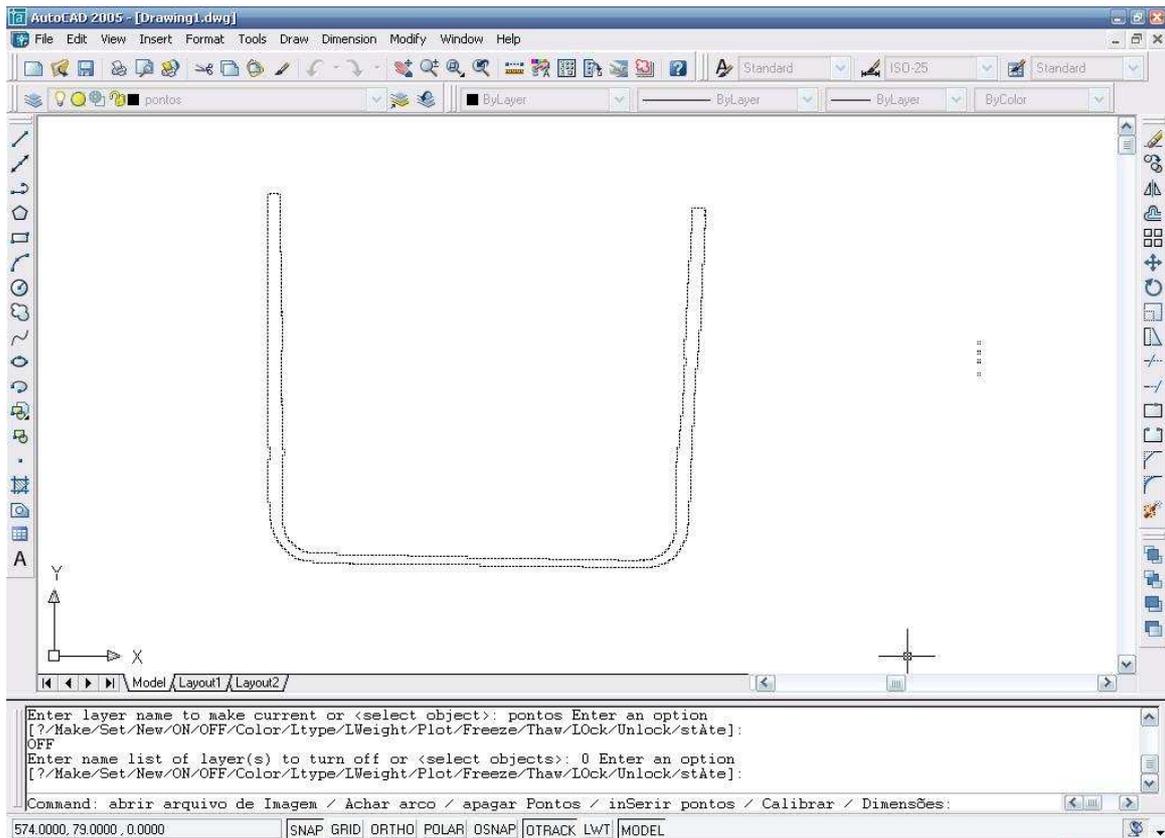


Figura 4.11 – Arquivo texto carregado em CAD - Imagem pontilhada

Esta parte de reconhecimento ou aproximação de curvas de uma imagem fornecerá como dado de saída um arco ajustado pelos pontos da imagem. No programa desenvolvido, a obtenção desta curva de aproximação é feita selecionando-se, com um polígono, o conjunto de pontos que compõem a imagem da peça na região conformada. A figura 4.12 mostra os pontos selecionados e a figura 4.13 o arco ajustado.

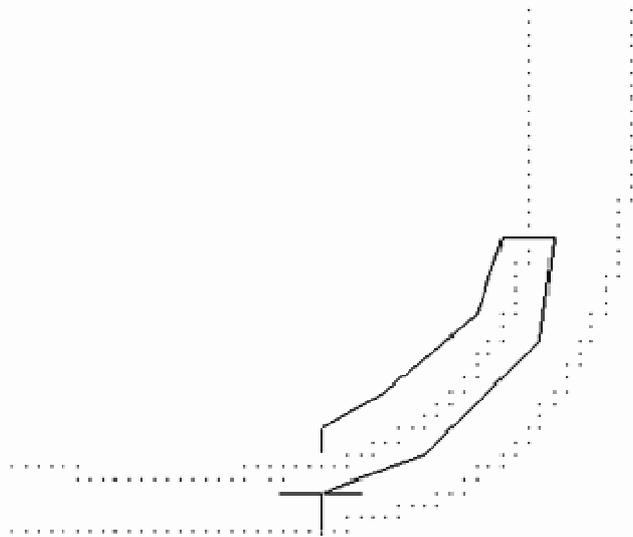


Figura 4.12 – Detalhe dos pontos da imagem carregada e seleção do conjunto de pontos de uma curva



Figura 4.13 – Desenho do arco ajustado formado pelos pontos selecionados e o raio informado pelo programa

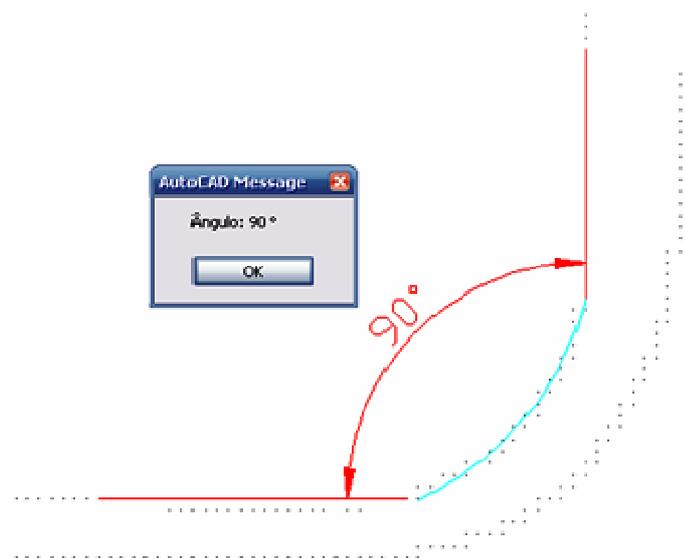


Figura 4.14 – Ângulo informado pelo programa e pelo recurso do CAD

Para a obtenção da medida do raio do arco, primeiramente é feita uma calibração. Para isso, são informados dos dois pontos da imagem com afastamento conhecido (em milímetros). O usuário deve selecionar dois pontos de referência com distância conhecida e o programa calculará um fator de escala dado pela distância em milímetros entre cada *pixel* da imagem. Este fator de escala será utilizado pelo programa para calcular a dimensão o raio do arco. As figuras 4.13 e 4.14 apresentam os dados de saída do programa: a medida em milímetros do raio da curva da imagem e o ângulo formado pela duas linhas selecionadas e marcadas na figura.

Após a geração do desenho em CAD do arco desta curva, pode-se também obter o ângulo de dobra, utilizando a opção “Dimensões/Ângulo” do programa, devendo o usuário selecionar os pontos extremos de duas retas que formam o ângulo na peça. A figura 4.14 ilustra a situação, comprovando-se através da medida do ângulo pelo próprio recurso do CAD. Porém, a precisão desse ângulo depende das retas de referência selecionadas pelo usuário. Por essa razão, o fator de recuperação elástica deve ser determinado pela razão entre os raios do arcos projetado e obtido como resultado da conformação.

4.4 Medida de raios variáveis

Para peças com curvas de raios variáveis o programa está preparado para reconhecer cada curva de uma vez. É necessário que seja selecionado o conjunto de pontos que formam uma curva, da mesma maneira como um raio fixo. Analisando o exemplo de uma peça formada de quatro raios variáveis e uma reta (figura 4.15), pode-se perceber que, primeiramente, é necessário apagar alguns pontos para tornar mais fácil a seleção dos pontos de interesse. Para executar essa operação, o sistema dispõe de recursos de edição da imagem. As duas figuras 4.15 e 4.16 mostram os pontos da imagem original da peça no CAD e após apagar os pontos que são desnecessários para a análise da imagem, respectivamente.

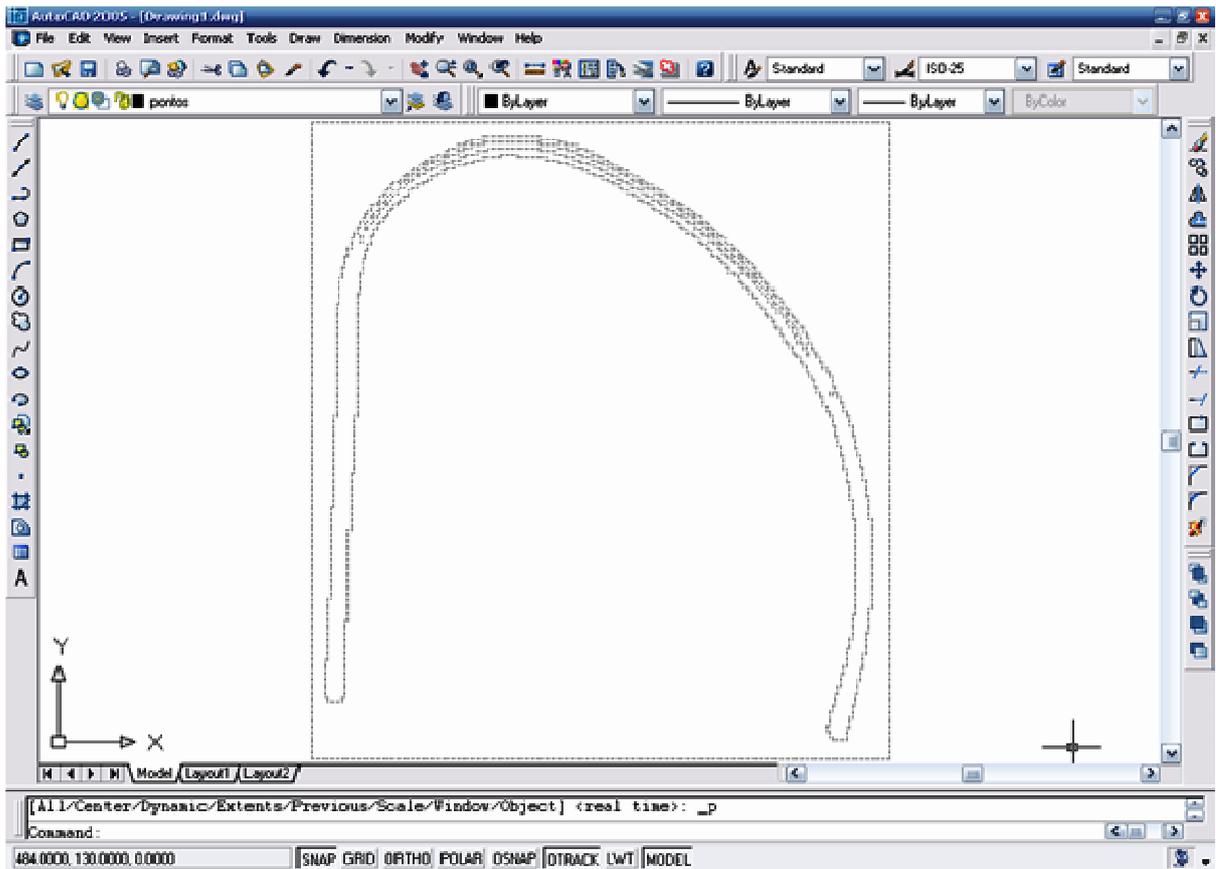


Figura 4.15 – Peça de raios variáveis carregada em CAD

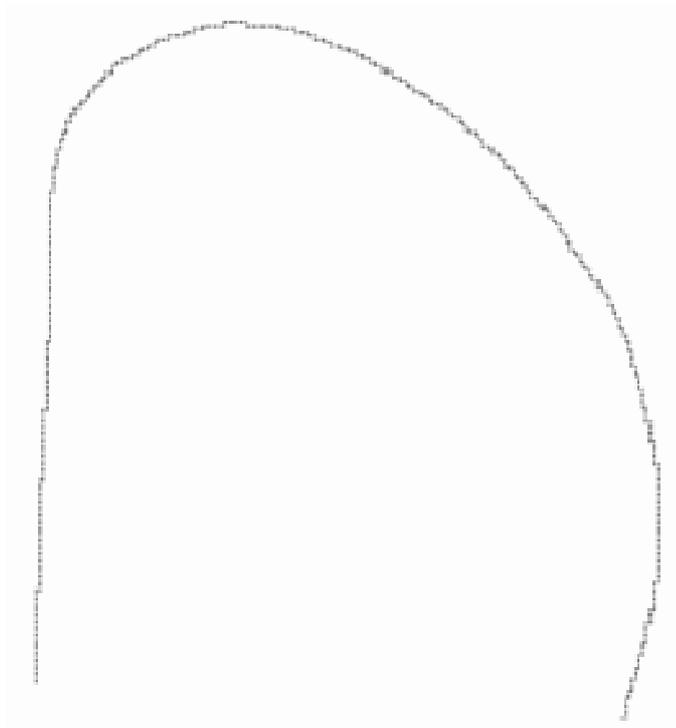


Figura 4.16 – Imagem peça com pontos desnecessários apagados

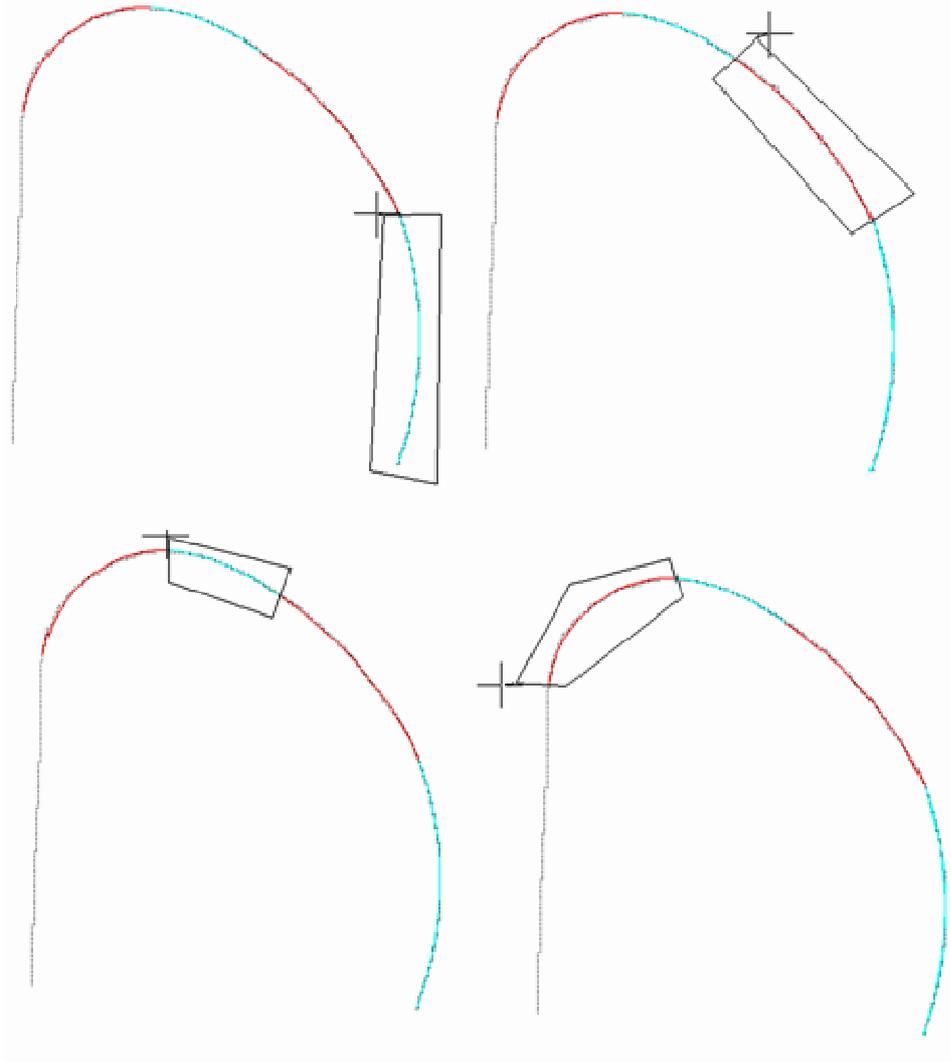


Figura 4.17 – Seleção de cada uma das quatro curvas da peça

A figura 4.17 mostra uma seqüência de seleção de conjuntos de pontos e o reconhecimento de cada uma das quatro curvas que formam a peça.

Semelhante ao caso de uma peça com uma curva de único raio, deve-se calibrar a imagem e pode-se obter o raio de cada uma das curvas. Obtidos os raios medidos através da imagem da peça curvada, pode-se compará-los com os raios projetados para a peça e calcular o coeficiente de recuperação elástica. Este coeficiente servirá para compensar as diferenças entre raios projetados e executados.

No exemplo da figura 4.18, o fator de calibração utilizado é 1 e verifica-se a dimensão de cada raio no desenho, com os recursos do CAD e, próximo a cada curva, a caixa com o dado de saída do programa desenvolvido.

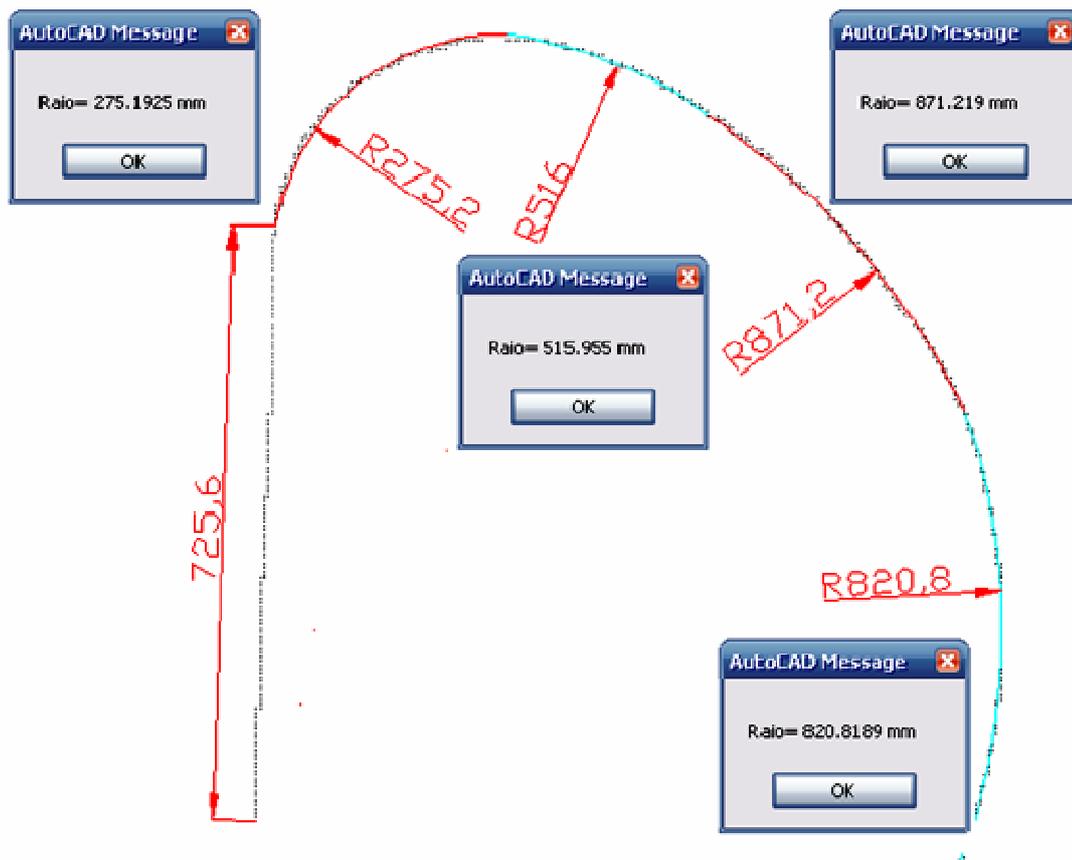


Figura 4.18 – Raio das curvas da peça

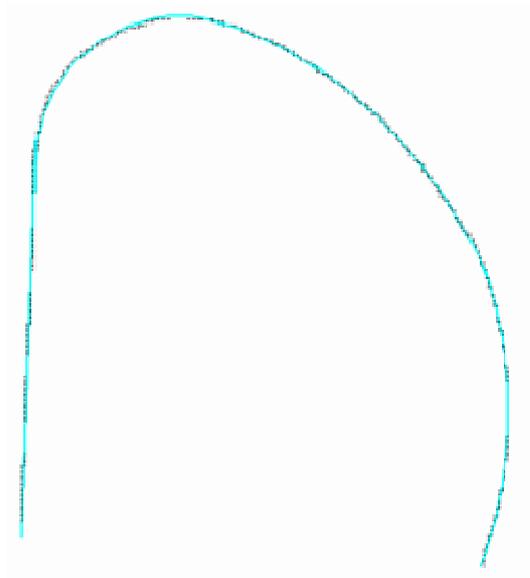


Figura 4.19 – Desenho da peça pelo programa

O sistema desenvolvido também pode ser interpretado como uma ferramenta de engenharia reversa, ou seja, o desenho de projeto pode ser construído através de uma imagem digital da peça modelo a ser reproduzida. No caso da peça do exemplo da figura 4.19, o programa foi aplicado para desenhar cada curva formada pelo conjunto de pontos processados da imagem e a reta desenhada pelo usuário, ainda com os pontos na imagem. Porém, ajustes são necessários no desenho para que o final de uma entidade coincida com o início da próxima. Embora o desenho de retas deva ser efetuado manualmente, esta operação é de simples execução. Os pontos da imagem podem ser apagados e o desenho estará completo.

A figura 4.20 mostra a figura pronta e o código CNC para sua fabricação. Neste exemplo, os seguintes dados foram informados pelo usuário:

- Diâmetro das polias motoras e de conformação = 150mm;
- Distância entre centros das polias motoras = 200mm;
- Diâmetro do tubo = 25,4mm;
- Coeficiente de recuperação elástica = 0,98.

Analisando os dados de saída, cada linha do código CNC gerado significam:

“G90” - início do programa.

“G00 Y25.4” - matriz conformadora subirá 25,4mm, a partir do ponto zero (ver figura 4.21.a) para que possa ser posicionado o tubo na calandra.

“M00;posicionar tubo” – pára o programa e solicita ao usuário que posicione o tubo na calandra.

“G01 Y25.4” - matriz conformadora permanecerá no ponto $y=25,4\text{mm}$, ou seja, o diâmetro externo do tubo (ver figura 4.21.b).

“G01 X725.5741” – o tubo avançará pela calandra até o ponto $x=725,5741\text{mm}$, formará a reta que possui comprimento de 725,5741mm.

“G01 Y12.0595” – para conformar a primeira curva com raio 274,9mm a matriz conformadora posicionará em $y=12,0595\text{mm}$ e devido a recuperação elástica o raio será 280,398mm.

“G01 X397.0218” – o tubo avançará pela calandra até o ponto $x=397,0218\text{mm}$ pois este é o comprimento do primeiro arco.

“G01 Y17.376” - para conformar a segunda curva com raio 516mm a matriz conformadora posicionará em $y=17,376\text{mm}$ e devido a recuperação elástica o raio será 526,32mm.

“G01 X263.4527” - o tubo avançará pela calandra até o ponto $x=397,0218\text{mm}$ pois este é o comprimento do segundo arco.

“G01 Y20.3348” - para conformar a terceira curva com raio 871,2mm a matriz conformadora posicionará em y=20,3348mm e devido a recuperação elástica o raio será 888,624mm.

“G01 X478.4093” - o tubo avançará pela calandra até o ponto x=478,4093mm pois este é o comprimento do terceiro arco.

“G01 Y20.0556” - a matriz conformadora posicionará-se-á no ponto y=20,0556mm acima do ponto zero (ver figura 4.21.c), a fim de conformar o quarto raio 820,8mm. Neste caso o raio deve ser multiplicado por 1,02 devido a recuperação elástica $[(1-0,98)+1=1,02]$, ou seja, $820,8\text{mm} \times 1,02=837,22\text{mm}$.

“G01 X4595.8311” - o tubo avançará pela calandra até o ponto x=4595,8311mm pois este é o comprimento do quarto arco.

“M02” - finalização do programa.

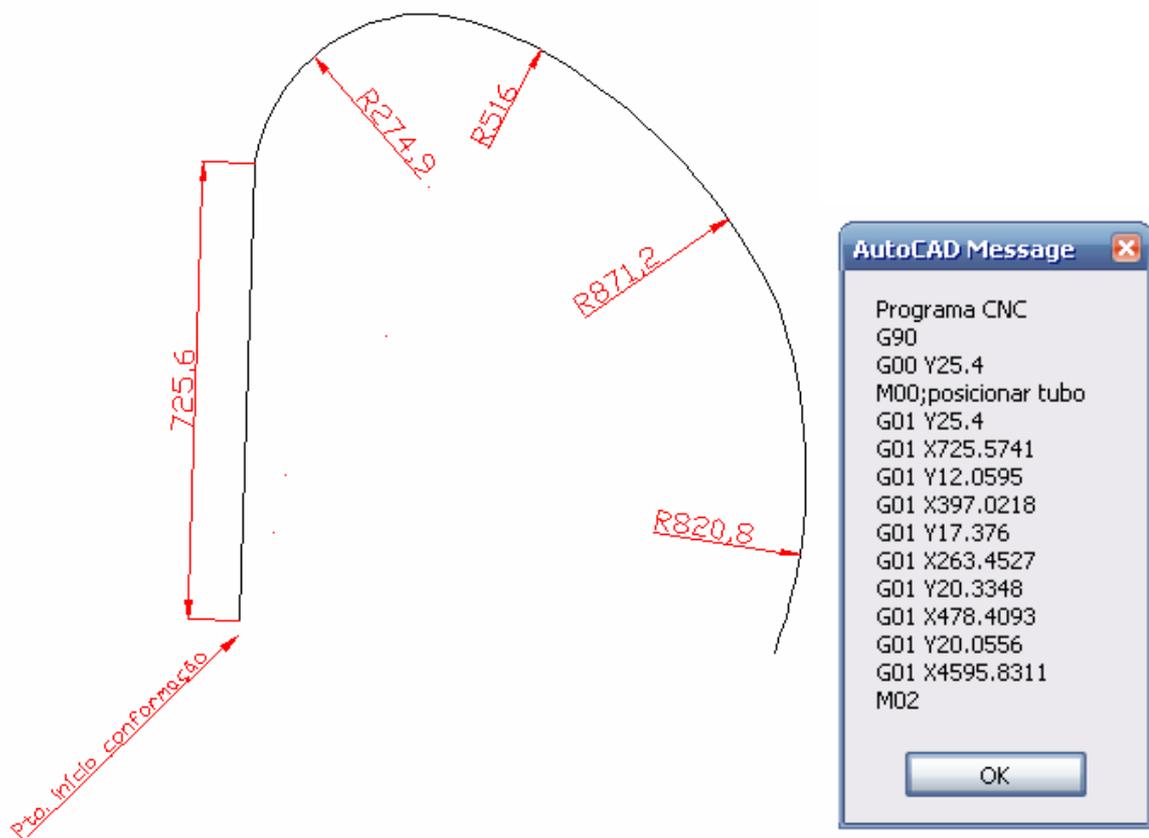


Figura 4.20 – Código CNC da peça com raios variáveis

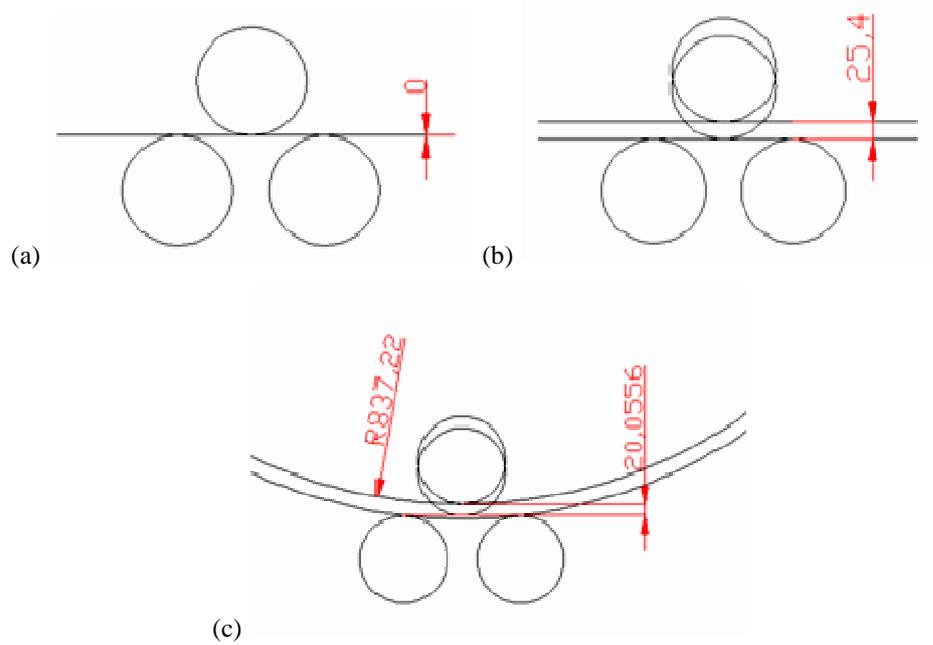


Figura 4.21 – Simulação auxiliar para determinação da posição Y da matriz conformadora

4.5 Estrutura operacional do programa

A figura 4.22 apresenta a estrutura de interface do programa com o usuário. Os dados inseridos são informados em milímetros, exceto o coeficiente de recuperação elástica e de Poisson que são constantes e a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade inseridos em N/mm^2 . O programa desenvolvido é composto, basicamente de duas grandes partes: geração de código CNC e processamento de imagem. As opções disponíveis são:

```

Configuração / Programa CN / processamento de Imagem: c
Diâmetro das polias motoras (mm) <150>:
Diâmetro da polia de conformação (mm) <150>:
Distância entre polias motoras (mm) <200>:
Diâmetro do tubo ou espessura da chapa (mm) <25.4>:
Coeficiente de recuperação elástica experimental - K <0.98>:
Tensão de escoamento (N/mm2) <400>:
Módulo de elasticidade (N/mm2) <210000>:
Coeficiente de Poisson <0.3>:

Configuração / Programa CN / processamento de Imagem: p
Selecionar o ponto de início da conformação:

Configuração / Programa CN / processamento de Imagem: i
IMAGEM> abrir arquivo de Imagem/Editar/Achar arco/Calibrar/Dimensões: i
IMAGEM> abrir arquivo de Imagem/Editar/Achar arco/Calibrar/Dimensões: e
EDITAR IMAGEM> apaga Ponto/apaga pontos em Janela/apaga pontos em poligonos/apaga Arco/Insere pontos:
IMAGEM> abrir arquivo de Imagem/Editar/Achar arco/Calibrar/Dimensões: a
Primeiro ponto do poligono:
Próximo ponto:
IMAGEM> abrir arquivo de Imagem/Editar/Achar arco/Calibrar/Dimensões: c
Primeiro ponto de referência para dimensionar imagem:
Segundo ponto de referência:
Distância entre os pontos:
IMAGEM> abrir arquivo de Imagem/Editar/Achar arco/Calibrar/Dimensões: d
Raio/Ângulo/Sair <R>:r
Entidade para identificar dimensão:
Raio/Ângulo/Sair <R>:a
Primeiro ponto da primeira reta (mais próximo ao vértice): Segundo ponto da
primeira reta (mais afastado do vértice): Primeiro ponto da segunda reta (mais
próximo ao vértice): Segundo ponto da segunda reta (mais afastado do vértice):

```

Figura 4.22 – Esquema do programa desenvolvido

➤ “Configuração” – Dados da máquina da curvadora que servem para a geração do código CNC:

- “Diâmetro das polias motoras” – diâmetro das polias inferiores ou motoras.
- “Diâmetro da polia de conformação” – diâmetro da polia de conformação (superior).
- “Distância entre polias motoras” – distância linear entre as polias motoras.
- “Diâmetro do tubo ou espessura da chapa” – diâmetro externo do tubo a ser conformado ou espessura da chapa.
- “Coeficiente de recuperação elástica (K)” – valor medido experimentalmente. Quando não informado, o sistema calcula e aplica o teórico. Será sempre um valor menor que 1, sem unidade de medida.
- “Tensão de escoamento” – especificação do material (N/mm²).
- “Módulo de elasticidade” – especificação do material (N/mm²).
- “Coeficiente de Poisson” – especificação do material.

➤ “Programa CN” – o usuário solicita a geração do código CNC entrando nesta opção.

- “Selecionar o ponto de início de conformação” – clicar sobre o ponto inicial de conformação. Assim que o usuário clicar sobre o ponto inicial, o programa gerará o código CNC.

- “Processamento de Imagem” – programa para o reconhecimento de curvas nos *pixels* gerados pelo programa específico de filtragem de imagens.
 - “abrir arquivo de Imagem” – carrega um arquivo de texto gerado pelo programa específico de filtragem da imagem. Após carregar a imagem da foto, aparecerá toda em pontos, que são os *pixels* da imagem, formando a borda da peça.
 - “Editar” – o usuário tem os seguintes recursos de edição da imagem:
 - ◆ “apaga Ponto” – É possível eliminar pontos da imagem que não pertençam a arcos. Esta opção facilita a identificação dos arcos e o processamento é mais rápido. Com esta opção apaga-se ponto a ponto da imagem.
 - ◆ “apaga pontos em Janela” – apaga pontos selecionados através de uma janela retangular.
 - ◆ “apaga pontos em poLígonos” – apaga os pontos que estiverem dentro de um polígono desenhado pelo usuário.
 - ◆ “apaga Arco” – o usuário pode apagar arcos (desenhados pelo programa) que não deseja em seu desenho.
 - ◆ “Insere pontos” – permite inserir pontos, se necessário.
 - “Achar arco” – opção para processamento de identificação de arcos na imagem.
 - ◆ “Primeiro ponto do polígono” – selecionar o primeiro ponto que formará o polígono onde está localizado os pontos que formam o arco que deseja analisar.
 - ◆ “Próximo ponto” – especificação dos demais pontos do polígono.
 - “Calibrar” – esta opção serve para definir a dimensão real do arco. O usuário deve definir dois pontos conhecidos na imagem e informar a dimensão real entre eles.
 - ◆ “Primeiro ponto de referência para dimensionar imagem” – primeiro ponto conhecido para servir de referência de dimensionamento na imagem.
 - ◆ “Segundo ponto de referência”
 - ◆ “Distância entre os pontos” – informar a distância (em milímetros) entre os pontos conhecidos e selecionados.
 - “Dimensões” – mostra em uma janela o raio do arco selecionado.
 - ◆ “Raio” - o programa informará o Raio do arco que for selecionado.
 - ◆ “Entidade para identificar dimensão” – selecionar o arco que se deseja saber o raio.
 - ◆ “Angulo” - o programa informará o ângulo (em graus) formado entre duas retas na continuação da tangente de cada lado do vértice do arco.

4.6 Estimativa de recuperação elástica teórica

Com o intuito de demonstrar um cálculo de estimativa de recuperação elástica, inclui-se este subitem levando-se em consideração os materiais utilizados e comentados no item 3.7. Pode-se estimar a recuperação elástica dos tubos metálicos utilizando-se a equação (2.10 - teoria de Johnson & Mellor (1978 apud ILKIU, 2000)), onde deve-se conhecer as características do material, ou seja, valor da tensão de escoamento, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Considerando-se essa equação, pode-se estimar a recuperação elástica utilizando os valores a seguir, considerando-se os metais (aço e alumínio) especificados no item 3.7. Para demonstrar que, na prática, um fabricante de peças dobradas/curvadas pode estimar a recuperação elástica dos tubos, que servem como matéria-prima, segue cálculo para tubos de 3/4" (diâmetro externo) de aço e alumínio.

AÇO

Considerando-se os valores

R = raio de dobramento efetivo (mm) = 35mm

R_f = raio final de dobramento, após recuperação elástica (mm) = ?? (calcular)

σ_e = tensão de escoamento (N/mm²) = 210 N/mm²

E = módulo de elasticidade longitudinal (N/mm²) = 210.000 N/mm²

h = metade do diâmetro do tubo (mm) = 3/4" / 2 = 9,525mm

ν = coeficiente de Poisson = 0,3

Substituindo na equação $\frac{R}{R_f} = 1 - \left[3 \cdot \left(\frac{\sigma_e \cdot R}{E \cdot h} \right) \cdot (1 - \nu^2) \right] + 4 \cdot \left[\frac{\sigma_e \cdot R}{E \cdot h} \cdot (1 - \nu^2) \right]^3$

$$\frac{35}{R_f} = 1 - \left[3 \cdot \left(\frac{210 \cdot 35}{210000 \cdot 9,525} \right) \cdot (1 - 0,3^2) \right] + 4 \cdot \left[\frac{210 \cdot 35}{210000 \cdot 9,525} \cdot (1 - 0,3^2) \right]^3$$

Resultando $R_f \cong 35,36$ mm e

$$K_{teórico} = \frac{R}{R_f} = \frac{35}{35,36} \cong 0,98$$

Comparando-se com o resultado obtido teoricamente com o resultado obtido na prática

$K_{prática} \cong 0,97$, pode-se perceber que a discrepância é baixa (aproximadamente 1%).

ALUMÍNIO

Considerando-se os valores

R = raio de dobramento efetivo (mm) = 35mm

R_f = raio final de dobramento, após recuperação elástica (mm) = ?? (calcular)

σ_e = tensão de escoamento (N/mm²) = 255 N/mm²

E = módulo de elasticidade longitudinal (N/mm²) = 70.000 N/mm²

h = metade do diâmetro do tubo (mm) = 3/4" = 9,525mm

ν = coeficiente de Poisson = 0,35

Substituindo na equação $\frac{R}{R_f} = 1 - \left[3 \cdot \left(\frac{\sigma_e \cdot R}{E \cdot h} \right) \cdot (1 - \nu^2) \right] + 4 \cdot \left[\frac{\sigma_e \cdot R}{E \cdot h} \cdot (1 - \nu^2) \right]^3$

$$\frac{35}{R_f} = 1 - \left[3 \cdot \left(\frac{255 \cdot 35}{70000 \cdot 9,525} \right) \cdot (1 - 0,35^2) \right] + 4 \cdot \left[\frac{255 \cdot 35}{70000 \cdot 9,525} \cdot (1 - 0,35^2) \right]^3$$

Resultando $R_f = 36,28\text{mm}$

$$K_{teórico} = \frac{R}{R_f} = \frac{35}{36,28} \cong 0,96$$

Comparando-se com o resultado obtido teoricamente $K_{teórico} \cong 0,96$ com o resultado obtido na prática $K_{prática} \cong 0,95$, pode-se perceber resultados semelhantes aos do aço.

5 CONCLUSÕES

Considerando-se todo o estudo e a metodologia proposta neste trabalho, pode-se comparar os resultados obtidos com os objetivos propostos no início da pesquisa. Analisando o propósito geral, como sendo o desenvolvimento de uma metodologia de operação de calandras de tubos segundo o princípio de máquinas CNC, conclui-se que foi alcançado. Pode-se demonstrar que, a metodologia proposta é capaz de reconhecer um desenho elaborado em sistema CAD e gerar um código CNC de execução de curvatura da peça. Desta maneira, uma calandra adaptada pode ser programada e operar segundo os princípios de máquinas CNC. Além disto, as peças a serem curvadas podem conter raios de curvaturas fixos e/ou variáveis, conforme objetivo.

O projeto mecânico genérico de adaptação, sem detalhamento, pode ser adaptado a diversas calandras de tubos motorizadas existentes no mercado, resguardando as características técnicas de cada tipo de calandra. Visto que, com a adaptação programável sugerida no trabalho, pode-se transformar uma calandra convencional em uma calandra programável (CNC). Desta forma, o usuário pode projetar uma peça em sistema CAD e curvÁ-la na calandra utilizando o código CNC gerado. Deve-se considerar que, para cada marca e/ou modelo de calandra que se queira adaptar, um projeto mecânico diferente deve ser elaborado, visto que, os elementos mecânicos sugeridos nesta metodologia não são aplicáveis ou mesmo a solução mais viável em alguns casos.

Para que se possa ajustar a calandra devido à recuperação elástica do material curvado e à possíveis desgastes de máquina, foi elaborado uma metodologia de processamento de imagem para realização do controle de qualidade do sistema de conformação. Com esta metodologia aplicada, o usuário pode curvar a peça, tirar uma foto e, a partir do processamento dessa imagem, verificar (conferir) o raio final da peça curvada e ajustar a máquina de acordo com o raio projetado.

Um ponto da metodologia em que pode ser melhorada é o reconhecimento do desenho em sistema CAD. Na proposta apresentada, o usuário deve elaborar o desenho de uma peça com apenas um traço contínuo simples. No entanto, normalmente os projetos mecânicos ou de peças, são desenhados com traços paralelos, representando o diâmetro externo do tubo. Isto obriga o usuário a elaborar um desenho específico ou alterar um desenho para curvar a peça, visto que, empresas prestadoras de serviços geralmente recebem projetos prontos das empresas que os contratam.

Conclui-se ainda que, de maneira geral, a proposta de adaptação de calandra de tubos, contribui para o desenvolvimento da tecnologia da informação porque aplica conhecimento de programação com equipamentos de processos de fabricação. Essa integração entre programação e máquinas faz com que as empresas possam, cada vez mais, evoluir na automação de seus processos. Para que isto se realize, a programação CNC (código CNC) têm um papel essencial neste tipo de projeto.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Tendo em vista as conclusões desta metodologia proposta, podemos sugerir como trabalhos a serem desenvolvidos futuramente:

a) desenvolver semelhante proposta de adaptação programável para outro tipo de equipamento, como furadeiras, corte de chapas, usinagem, calandra de chapas, ou seja, automação de algum processo produtivo;

b) executar protótipo desta metodologia, adaptando uma calandra de tubos e fazendo uma análise de viabilidade técnica e financeira do projeto;

c) desenvolver adaptação mais complexa de forma a curvar tubos em três dimensões considerando o seu comprimento e possibilidade de rotação do tubo para curvar peças como escapamentos;

d) utilizar-se da filtragem e do reconhecimento de imagens para controlar a qualidade de produtos em outros processos produtivos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU QUDEIRI, J.; YAMAMOTO, H.; RAMLI, R. Optimization of operation sequence in CNC machine tools using genetic algorithm. **Journal of Advanced Mechanical Design Systems, and Manufacturing**. v.1, n.2, p. 272-281, 2007.

AGAMAQ. **Aga Máquinas indústria e comércio de máquinas**. Disponível em: <<http://www.agamaq.com.br/>>. Acesso em: 02 jan. 2008.

AGUIAR, J. B. de; BARBOSA, G. M.; BATALHA, G. F. Dobra de chapas aplicada ao processo com três cilindros. **Revista Ensaio**. v.?, n.?, p. 86-99, fev. 2002.

ARAUJO, L. C. G. **Tecnologias de gestão organizacional**. São Paulo: Atlas, 2001.

BAUMANN, A. et al. **Automatisierungs – technik in der fertigung grundlagen, komponenten und systeme**. Nourney: Verlag Europa – Lehrmittel, 1996.

BEER, F. P.; JOHNSTON JUNIOR, E. R. **Resistência dos materiais**. 3 ed. São Paulo: Makron Books, 1995.

CAMPBELL, J. S. **Principles of manufacturing materials & processes**. Tokyo: International Student Edition, 1961.

CARVALHO, K. L. de; BARBOZA, M. de F. P. B.; GONÇALVES, M. A. Terceirização e estratégia competitiva: perspectivas para a logística no Brasil.. In: ENEGEP, 26., 2006, Fortaleza. **Anais do XXVI ENEGEP**. Fortaleza, p. 1-11, 2006. 1 CD-ROM.

CORTESA. **Curvadoras de tubos**. Disponível em: <http://www.cortesa.com.br/cur_pne.htm> e <http://www.cortesa.com.br/cur_man.htm>. Acesso em: 07 jan. 2008.

COSTA, C. A. **Notas de aula: Disciplina Automatização Industrial V** - Universidade de Caxias do Sul – 2004. Disponível em: <http://hermes.ucs.br/ccet/demc/cacosta/Disciplina_Automatizacao_V.html>. Acesso em: 15 dez. 2007.

DIETER, G.E. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981.

EMT. **Engeneering Máquinas e Tecnologia**. Disponível em: <<http://www.emt.ind.br/maquinas>>. Acesso em: 13 jan. 2008.

FESTO. **Automação Industrial**. <<http://www.festo.com>>. Acesso em: 15 jan. 2008.

FEVA. **Máquinas Ferdinand Vaders S.A**. Disponível em: <<http://www.feva.com.br/>>. Acesso em: 13 jan. 2008.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da produção e operações**. São Paulo: Pioneira, 2001.

GEOCITIES. **Geocities – Motores de passo**. Disponível em: <<http://www.geocities.com/CollegePark/Dorm/8863/motordepasso.htm>>. Acesso em: 18 nov. de 2007.

GOELLNER, E. **Ferramenta computacional para acionamento de motores de passo aplicados ao projeto de equipamentos CNC**. 2006. 130p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

GONZÁLEZ, P. C. S. **Técnica não convencional para dobramento de tubos de parede fina usando elastômero**. 2000. 150p. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica e Aeronáutica – Tecnologia de Fabricação), Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2000. Disponível em: <<http://161.24.11.4/tesesdigitais/000444759.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2007

GOUVEIA, E. L. P. **Proposta, desenvolvimento e validação de um sistema de produção para filtragens interagente de imagens**. 2004. 157p. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004. Disponível em: <http://www.bdtd.ufpe.br/tedeSimplificado//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=416>. Acesso em: 20 abr. 2008.

IEZZI, G., et al. **Matemática: ciência e aplicações**. 2. série. 2. ed. São Paulo: Atual. 2004.

ILKIU, A. M. Dobramento contínuo por rolos de chapas metálicas grossas. In: Seminário de Laminação – Processos e Produtos – Laminados e Revestidos, 40., 2003, Vitória. **Anais do 40º Seminário de Laminação – Processos e Produtos – Laminados e Revestidos**. Vitória, p. 1-10, 2003.

ILKIU, A. M. **Mecanismos do processo de dobramento contínuo por rolos**. 2000. 86p. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica – Tecnologia de Fabricação), Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2000. Disponível em: <<http://161.24.11.4/tesesdigitais/000445270.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2007.

KRAMER, W. **Programando em AutoLISP**. São Paulo: Makron Books, 1995.

LEITE, W. J. da S. **AutoLISP: guia da linguagem de programação do AutoCAD**. São Paulo: Érica, 1989.

LIMBERGER, I. da F. **Caderno Didático Disciplina Conformação Mecânica dos Metais 1**. Universidade Federal de Santa Maria. Curso de Engenharia Mecânica. 2002.

MALAVOLTA, A. T.; LIRANI, J.; MASSAROPPI Jr., E.; AL-QURESHI, H. A. Método de elementos finitos ajuda a prever o retorno elástico no dobramento de chapas anisotrópicas. **Corte & Conformação de Metais**. Ano II, n. 23, p.76-84, mar. 2007.

MENDES, S. R. Mudança tecnológica, formação para o trabalho e o planejamento de educação. **Boletim Técnico do Senac**, v.21, n.2, mai./ago. 2005. Disponível em: <<http://www.senac.br/informativo/bts/212/2102027035.pdf>>. Acesso em: 08 jan. 2008.

MOLTÉCNI. **Indústria e comércio de equipamentos**. Disponível em: <<http://www.moltecni.com>>. Acesso em: 13 jan. 2008.

MOR. **Indústria e comércio de produtos para Casa e Lazer**. Disponível em: <www.mor.com.br>. Acesso em: 08 jan. 2008.

MUNDO CNC - **Máquinas CNC ou Máquinas Convencionais?**. Disponível em: <<http://www.mundocnc.com.br/avan4.htm>>. Acesso em: 06 jan. 2008.

NEVES, J. A. **Desenvolvimento de um dispositivo eletromecânico para a troca automática de ferramentas em centros de torneamento CNC**. 2005. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Automação Industrial e Robótica), Universidade de Taubaté, Taubaté, 2005. Disponível em: <www.cipedya.com/web/FileDownload.aspx?IDFile=159783>. Acesso em: 10 dez. 2007.

POLL, M. T.; GUARIENTI, A.; ROSA, L. C. da. Terceirização – aspectos sobre custos, qualidade e produtividade: uma abordagem teórica. **Revista Tecno Lógica**, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, v.10, n.2, p.75-89, 2006.

PRATT, W. K. **Digital image processing**. 2 ed. Mountain View, USA: Wiley-Interscience Publication, 1991.

REBEYKA, C. J.; SANTOS, R. A. dos. **Apostila Introdução ao Edgcam 7.0 – Programação CNC**. Disponível em: <www.portalmecanica.com/Apostila_Edge.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2007.

ROCHA, F. J. S.; SALES, E.C.M. Gestão da qualidade total e organização do trabalho no paradigma de produção pós-fordista. In: ENEGEP, 21., 2001, Salvador. **Anais do XXI ENEGEP**. Salvador, p. 1-8, 2001. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2001_TR15_0006.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2008.

ROMAQ. **Indústria e comércio de máquinas industriais**. Disponível em: <<http://www.romaqmaquinas.com.br/calandras.htm>>. Acesso em: 02 jan. 2008.

RUSS, J. C. **The image processing handbook**. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 1995.

RUSSO JUNIOR, A. **Análise do dobramento de tubos com comportamento elástico – perfeito plástico**. 1997. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica – Área de Materiais e Processos de Fabricação), Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1997. Disponível em: <<http://161.24.11.4/tesesdigitais/000381431.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2007.

SANTOS, R. A. dos. **Curso de CNC**. Disponível em: <[www.portalmecanica.com/Curso %20de%20CNC.ppt](http://www.portalmecanica.com/Curso%20de%20CNC.ppt)>. Acesso em: 16 dez. 2007.

SILVA, A. D. da; CARPES, F. P.; BITTENCOURT, W. S.; MOTA, C. B. **Processamento de Imagens aplicado a Programação CNC**. Revista Máquinas e Metais, São Paulo - SP, v. 482, n. Março, p. 170-177, 2006.

SCIENCE DIRECT. **Science Direct Articles**. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 18 de nov. de 2007.

SHUZ TUNG. **Máquinas Industriais**. Disponível em: <<http://www.pipe-bender-1.com/Tube-Bender/verticalrollingbender.htm>>. Acesso em: 13 jan. 2008.

TACHIZAWA, T; SCAICO, O. **Organização flexível: qualidade na gestão por processos**. São Paulo: Atlas, 1997.

TELECURSO 2000. **Dobramento e Curvamento**. Aula 75. Disponível em: <http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/didaticos_e_tematicos/telecurso_2000_cursos_profissionais/telecurso_2000_processos_de_fabricacao>. Acesso em: 23 mai. 2008.

TOK & STOK. **Vitrine on-line de produtos**. Disponível em: <<http://www.tokstok.com.br>>. Acesso em: 08 jan. 2008.

TUPER – **Tubos e componentes especiais**. Disponível em: <www.tuper.com.br/tubos/pdf/catalogo_tuper.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2008.

WEG. **As melhores soluções para sua automação**. Disponível em: <<http://catalogo.weg.com.br/FILES/Artigos/4-469.pdf>>. Acesso em: 07 jan. 2008.

WIKIPÉDIA – **A enciclopédia livre**. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Pagina_principal>. Acesso em: 10 out 2008.

YOUTUBE. **Curvadora de perfis y tubos - profile former – Nargesa**. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=067u69Q2quc&feature=related>>. Acesso em: 22 mai. 2008.

ZAPROMAQ. **Indústria de máquinas especiais, moveleira e tubulares**. Disponível em: <<http://www.zapromaq.com.br/>>. Acesso em: 08 jan. 2008.

ANEXOS

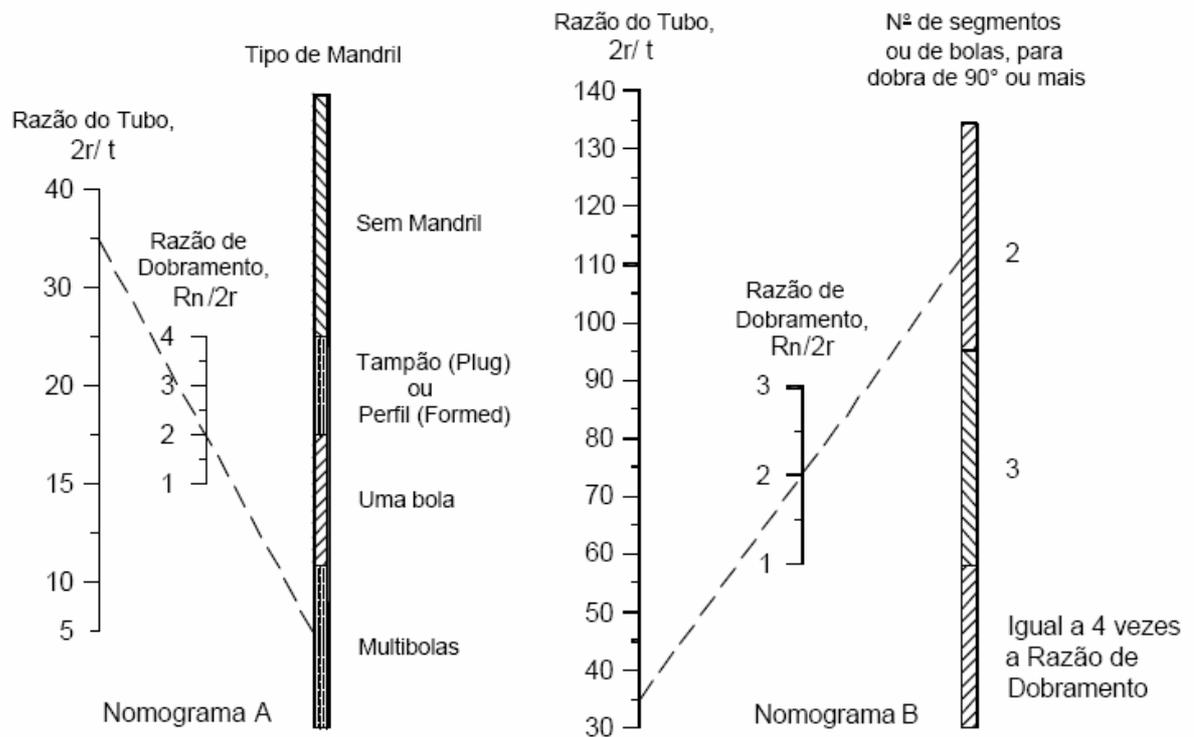
ANEXO A - Código G e suas funções.

Código G	Função
G00	Posicionamento rápido
G01	Interpolação linear
G02	Interpolação circular no sentido horário (CW)
G03	Interpolação circular no sentido anti-horário (CCW)
G04	Temporização (Dwell)
G05	Não registrado
G06	Interpolação parabólica
G07	Não registrado
G08	Aceleração
G09	Desaceleração
G10 a G16	Não registrado
G17	Seleção do plano XY
G18	Seleção do plano ZX
G19	Seleção do plano YZ
G20	Programação em sistema Inglês (Polegadas)
G21	Programação em sistema Internacional (Métrico)
G12 a G24	Não registrado
G25 a G27	Permanente não registrado
G28	Retorna a posição do Zero máquina
G29 a G32	Não registrados
G33	Corte em linha, com avanço constante
G34	Corte em linha, com avanço acelerando
G35	Corte em linha, com avanço desacelerando
G36 a G39	Permanente não registrado
G40	Cancelamento da compensação do diâmetro da ferramenta
G41	Compensação do diâmetro da ferramenta (Esquerda)
G42	Compensação do diâmetro da ferramenta (Direita)
G43	Compensação do comprimento da ferramenta (Positivo)
G44	Compensação do comprimento da ferramenta (Negativo)
G45 a G52	Compensações de comprimentos das ferramentas
G53	Cancelamento das configurações de posicionamento fora do zero fixo
G54	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (01)
G55	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (02)
G56	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (03)
G57	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (04)
G58	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (05)
G59	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (06)
G60	Posicionamento exato (Fino)
G61	Posicionamento exato (Médio)

G62	Posicionamento (Groceiro)
Código G	Função
G63	Habilitar óleo refrigerante por dentro da ferramenta
G64 a G67	Não registrados
G68	Compensação da ferramenta por dentro do raio de canto
G69	Compensação da ferramenta por fora do raio de canto
G70	Programa em Polegadas
G71	Programa em metros
G72 a G79	Não registrados
G80	Cancelamento dos ciclos fixos
G81 a G89	Ciclos fixos
G90	Posicionamento absoluto
G91	Posicionamento incremental
G92	Zeragem de eixos (mandatório sobre os G54...)
G93	Avanço dado em tempo inverso (Inverse Time)
G94	Avanço dado em minutos
G95	Avanço por revolução
G96	Avanço constante sobre superfícies
G97	Rotação do fuso dado em RPM
G98 e G99	Não registrados

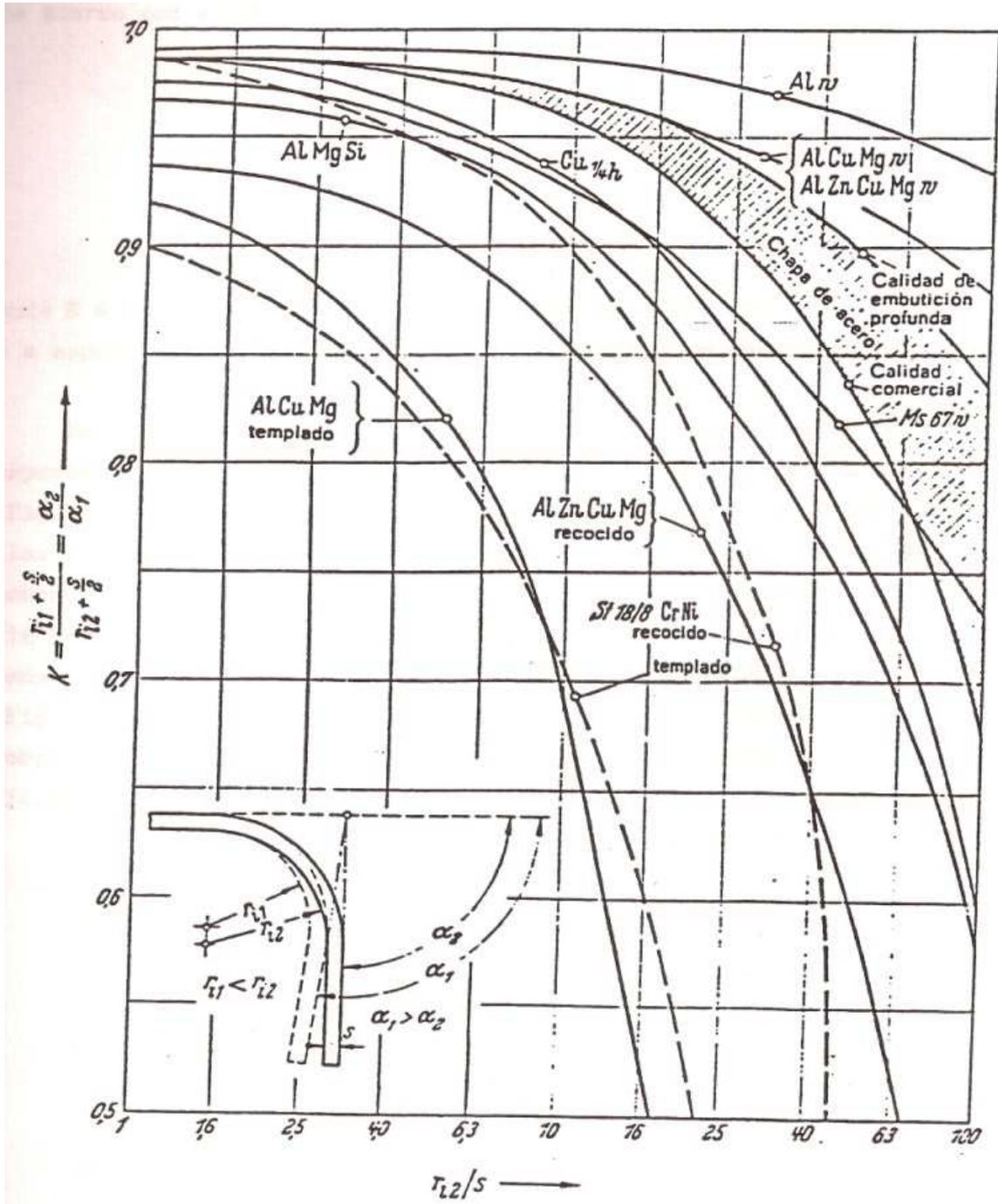
Fonte: Norma ISO 1056.

ANEXO B - Nomograma utilização de mandril para tubo de parede fina.



Fonte: González, P. C. S., p.15, 2000.

ANEXO C - Gráfico de coeficiente de recuperação elástica (k)



Fonte: Limberger, I. da F., p.4-5, 2002.