

CARLOS OSCAR CORRÊA DE ALMEIDA FILHO

ESTUDO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE TUBOS DE AÇO COM
COSTURA

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

São Paulo
2005

OK

CARLOS OSCAR CORRÊA DE ALMEIDA FILHO

**ESTUDO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE TUBOS DE AÇO COM
COSTURA**

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

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Marco Stipkovic Filho

São Paulo

2005

Aos meus alunos e colegas que têm sido a grande fonte de inspiração para o meu aperfeiçoamento técnico e humano.

À minha mãe, Onides, mestre por excelência.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo, colega e orientador Prof. Dr. Marco Stipkovic Filho pelas diretrizes seguras, incentivo permanente e exemplo de dedicação.

À minha família pelo estímulo, compreensão e apoio.

A Alceu Sakamoto pelo incentivo à pesquisa e desenvolvimento.

À minha irmã Sandra M.C.Almeida pelo apoio e colaboração na revisão gramatical e ortográfica.

RESUMO

Neste trabalho objetiva-se o estudo de uma Linha de Conformação Contínua para fabricação de tubos de aço carbono com costura a partir de chapas de aço bobinadas de espessura na faixa de 0,6 a 7 mm, com diâmetros de 25 a 152 mm e comprimentos até 18 m. Soldagem longitudinal por resistência elétrica e remoção do reforço de solda por usinagem simultânea. Acionamento por motores síncronos de velocidade variável e transmissão por pares de engrenagens.

Uma análise do comportamento do material foi desenvolvida abrangendo processos de conformação dos metais e seu relacionamento com as propriedades dos metais com destaque para deformações acima do limite elástico abrangendo a região elasto-plástica.

Estudos anteriores relativos ao comportamento dos metais foram analisados e as equações propostas foram utilizadas para formar a base científica necessária para a aplicação específica em processo de conformação contínua por rolos com formas especiais.

O processo de união foi avaliado destacando-se a soldagem por resistência aplicada no fechamento de perfis tubulares tanto com relação à resistência mecânica do produto obtido como em relação às precisões dimensionais e geométricas.

O estudo de uma equação para o cálculo da potência necessária para o processo foi desenvolvido com análise comparativa com softwares existentes no mercado, avaliando tanto a potência efetiva de conformação como a potência de acionamento da máquina.

Avaliou-se a condição de maiores níveis de qualidade para o produto e a redução de custo para o usuário final.

ABSTRACT

This work goals to study of a continuous carbon steel welded tube forming line from coiled sheet metal, 0,6 to 7 mm thickness, 25 to 152 mm tube diameter and 18 m maximum length. The profile is closed by Electric Resistance longitudinal welding and simultaneous weld reinforcement machining. The system is powered by synchronous variable speed motor and gear drives.

A material behavior analysis is developed including metal forming process and the relationship with materials properties. Deformations above elastic limit in the elastic-plastic region are studied.

Previous works are analyzed and the proposals equations were used to build the scientific base to specific application on specials shapes profile in roll forming process.

Joining process is discussed with emphasis on continuous resistance welding applied to close tube profile evaluating both mechanical strain and geometric and dimensional accuracy.

An equation for computer the process needed power was developed with comparative analyses with commercially available software with evaluation both effective forming power and effective machine drive power.

A highest quality level for the product was evaluated with cost reduction for the final user.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Processos de Conformação de Metais	4
2.2	Variáveis e Descrição dos Processos de Conformação de Metais	7
2.3	O campo de velocidades	9
2.4	Considerações para uma operação de conformação	12
2.4.1	Matéria prima	15
2.4.1.1	Condições de escoamento na deformação plástica	15
2.4.2	Ferramental	20
2.4.3	Condições de interface ferramenta peça	21
2.4.3.1	Equacionamento do fenômeno de atrito	23
2.4.3.2	Ensaio de caracterização dos materiais	24
2.4.3.2.1	Ensaio de Anel	24
2.4.4	Mecanismo de deformação plástica	25
2.4.4.1	Propriedades do material	25
2.4.4.1.1	Estrutura cristalina	26
2.4.4.1.2	Resistência à mudança de forma	28
2.4.4.1.3	Grau de deformação, Taxa de deformação	28
2.4.4.1.4	Condutividade térmica	29
2.4.5	Equacionamento do problema.	29
2.4.6	Equipamento utilizado	31
2.4.7	Meio ambiente	33
2.4.8	Produto final	34
2.4.9	Classificação dos processos	35
2.4.10	Vantagens do processo de conformação dos metais	36

2.5 Tubos de aço	36
2.5.1 Extrusão	36
2.5.2 Mandrilagem	37
2.5.3 Laminação passo peregrino	39
2.5.4 Conformação por sino	40
2.5.5 Laminação a frio	40
2.5.6 Conformação por rolos	42
2.5.7 Seções geométricas básicas	43
2.5.8 Tipos de perfis.	44
2.5.9 Linhas de conformação por rolos.	44
2.5.9.1 Linha intermitente.	44
2.5.9.2 Linha contínua.	45
2.5.10 Influência do tempo de montagem das ferramentas rotativas	45
2.5.11 Técnicas de substituição de ferramentas em estações de rolos	49
2.5.12 Qualidade do produto final	50
2.5.13 Soldagem do tubo	51
2.5.14 Lubrificação e refrigeração da linha de conformação	60
2.6 Planejamento da linha de conformação	61
2.7 Projeto do equipamento de conformação	62
3 Dimensionamento da linha de conformação	66
3.1 Introdução	66
3.2 Raios de dobramento	66
3.2.1 Raios para conformação por rolos.	70
3.3 Determinação da largura da tira	71
3.4 Força, Trabalho e Potência de deformação durante o dobramento.	72
3.4.1 Dobramento em V	72
3.4.2 Dobramento por rolos	74
3.4.3 Curvamento	75
3.4.3.1 Curvamento por matriz e punção	75
3.4.3.2 Curvamento por três rolos ou Calandragem	76
3.4.3.3 Conformação contínua por rolos	76
3.4.3.4 Tensões de deformação	77

3.4.3.4.1	Curvamento em matriz e punção	77
3.4.3.4.2	Curvamento em calandra	78
3.4.3.4.3	Curvamento por rolos	80
3.4.3.5	Análise de tensões	81
3.4.3.6	Cálculos teóricos	83
3.4.3.6.1	Geometria e cinemática	83
3.4.3.6.2	Distribuição de tensões	84
3.4.3.6.3	Hipóteses simplificadoras	87
3.4.3.6.4	Tensão de deformação	89
3.5	Potência de deformação	91
3.5.1	Composição do material	91
3.6	Cálculo de esforços	92
3.6.1	Potência de trabalho	96
3.6.2	Aplicação da equação para cálculo da potência	97
3.6.3	Variação da equação para cálculo da potência	103
4	Discussão dos resultados	109
5	Conclusão	111
6	Recomendação de continuidade para novos desenvolvimentos	112
7	Referências bibliográfica	113
8	Anexos	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos processos de produção.....	4
Figura 2 – Linhas de corrente na operação de conformação	9
Figura 3 – Deformação de um paralelogramo abc.....	9
Figura 4 – Deslocamento de um retângulo abcd.....	10
Figura 5 – Fluxo do material na operação de extrusão.....	13
Figura 6 – Interligação entre as variáveis significativas no processo de conformação.....	14
Figura 7 – Distribuição de tensões em barra prismática.....	17
Figura 8 – Decomposição da força $F_{X[3]}$, plano PP.....	17
Figura 9 – Decomposição da força F_X : F_Y no plano QQ, F_Y no plano PP.....	18
Figura 10 – Comparação entre os critérios Tresca e von Mises.....	20
Figura 11 – Esquematização do ensaio de anel.....	25
Figura 12 – Formas comuns de estrutura para metais.....	27
Figura 13 – Planos principais de escorregamento.....	27
Figura 14 – Gráficos de Hooke.....	28
Figura 15 – Relacionamento das variáveis de processo e de máquina.....	32
Figura 16– Curva de carga x deslocamento para várias operações de conformação.....	33
Figura 17 – Processo de extrusão de tubos.....	37
Figura 18 – Processo de extrusão inversa de tubos: (a) início do processo, (b) durante a operação.....	37
Figura 19 – Processo Mannesmann para produção de tubos sem costura.....	38
Figura 20 – Laminação de tubos a partir de tubos de maior diâmetro.....	39
Figura 21 – Seqüência de fabricação de tubos pelo processo passo peregrino.....	39
Figura 22 – Método de conformação por sino (trefilação).....	40
Figura 23 – Reforço interno do cordão de solda caldeado.....	40
Figura 24 – Disposição dos rolos em uma estação de conformação a frio.....	41
Figura 25 – Esquema de distribuição de cargas sobre o material a conformar.....	41
Figura 26 – Seqüência de perfis durante a conformação de seções tubulares.....	42
Figura 27 – Seqüência de passagem da chapa pelos rolos de conformação.....	43
Figura 28 – Tipos de perfis fechados conformados por rolos.....	44

Figura 56 – Raios de matriz e de punção.....	67
Figura 57 – Distribuição de tensões no processo de dobramento	69
Figura 58 – Geometria de dobramento.....	71
Figura 59 – Formas de dobramento em V.....	72
Figura 60 – Seqüência do movimento de dobra em V.....	74
Figura 61 – Dobramento de perfis por rolos de conformação.....	75
Figura 62 – Curvamento por matriz e punção.....	76
Figura 63 – Curvamento por três rolos ou Calandragem.....	76
Figura 64 – Conformação de tubos perfilados.....	77
Figura 65 – Representação das tensões no processo de dobramento.....	77
Figura 66 – Distribuição de forças na calandragem.....	78
Figura 67 – Estado de tensões solicitantes no curvamento.....	79
Figura 68 – Composição de forças nos cilindros de conformação.....	80
Figura 69 – Distribuição de tensões ao longo da linha de conformação.....	81
Figura 70 – Seção em conformação do tubo.....	82
Figura 71 – Elemento de volume em um corpo em deformação.....	82
Figura 72 – Distribuição de tensões em uma chapa curvada.....	83
Figura 73 – Chapa deformada entre duas estações de trabalho.....	83
Figura 74 – Distribuição de potência em uma chapa curvada.....	84
Figura 75 – Distribuição de tensões em uma chapa curvada.....	85
Figura 76 – Tensão lateral axial x ângulo de saída para: Largura: $l = 200$ mm e espessura: $t = 6$ mm.....	85
Figura 77 – Distribuição de tensões axiais para ângulo 20°	86
Figura 78 – Distribuição de tensões axiais para ângulo 30°	86
Figura 79 – Distribuição de tensões axiais.. para ângulo 40°	87
Figura 80 – Inter-relacionamento entre os parâmetros de conformação.....	89
Figura 81 – Geometria para cálculo da tensão resultante devido ao deslizamento....	90
Figura 82 – Seqüência de conformação.....	92
Figura 83 – Esquema de deformação em uma linha de conformação por rolos.....	93
Figura 84 – Análise de tensões na flexão.....	94
Figura 85 – Deformação do material entre duas estações de trabalho.....	94
Figura 86 – Partição do círculo para equacionamento.....	95

Figura 87 – Variação da potência em função da espessura com dobramento a 30° e variação do diâmetro do tubo formado.....	98
Figura 88 – Gráfico Potência x Diâmetro x Espessura	99
Figura 89 – Gráfico da Potência x Ângulo de posição x Espessura.....	100
Figura 90 – Gráfico da Potência x Ângulo de posição x Espessura	101
Figura 91 – Gráfico Potência x Diâmetro x Ângulo de posição	102
Figura 92 – Gráfico Potência x Ângulo x Diâmetro.....	102
Figura 93 – Gráfico: Potência x Espessura x Diâmetro.....	105
Figura 94 – Gráfico Potência x Ângulo x Diâmetro.....	106
Figura 95 – Gráfico Potência x Largura ($t = 0,6 \text{ mm}$, $\theta = 30^\circ$)	107
Figura 96 – Gráfico Potência x Largura ($t = 0,6 \text{ mm}$, $\theta = 30^\circ$) Nefussi et al.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis mais significativas no processo de conformação.....	16
Tabela 2 – Influência sobre o produto.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DFA	Projeto para montagem
DFM	Projeto para manufatura
CFC	Estrutura cristalina cúbica de face centrada
CCC	Estrutura cristalina cúbica de corpo centrado
HC	Estrutura cristalina hexagonal compacta
LASER	Amplificação da luz por emissão estimulada de radiação
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DIN	Gás Inerte e Tungstênio
M	Modelo de disposição do sistema de acionamento de rolos baseado na forma assumida pelas barras de sustentação das engrenagens
OVM	Modelo de disposição do sistema de acionamento de rolos baseado na forma de fixação dos eixos cardans
WH	Modelo de disposição do sistema de acionamento de rolos baseado na forma de fixação dos braços telescópicos

LISTA DE SÍMBOLOS

u	Deslocamento do ponto	(mm)
ε	Alongamento relativo	(%)
α	Varição angular	(rad)
γ	Taxa de variação angular	(rad/mm)
x	Eixo coordenado	
y	Eixo coordenado	
z	Eixo coordenado	
σ	Tensão de deformação (MPa)	
f	função	
E	Módulo de elasticidade	(MPa)
T	Torque	(Nm)
θ	Ângulo de posição	(rad)
F	Força normal	(N)
P	Plano de ação da força	
Q	Plano de ação da força	
τ	Tensão de cisalhamento por atrito	(MPa)
μ	Coefficiente de atrito	
m	Fator de cisalhamento de atrito	
δ	Deslocamento / deformação	(mm)
r	Raio de curvamento	(mm)
l	Comprimento	(m)
α	Ângulo de dobra	(rad)
s	Espessura da chapa	(mm)
R	Limite de resistência	(MPa)
C	Fator de correção no dobramento	
a	Dimensão da chapa	(m)
b	Dimensão da chapa	(m)
v	Fator de compensação de ângulo de dobra	
K_r	Fator de correção para a relação raio de dobra / espessura	
h	Altura de penetração do punção de dobra	(mm)

K_d	Pressão específica de dobramento	(MPa)
V_c	Velocidade de deslocamento	(m/s)
T	Tempo de deformação	(s)
P	Carga nos cilindros de dobramento	(N)
Y	Distância da linha neutra ao ponto considerado	(mm)
M	Momento fletor atuante	(Nm)
W	Módulo de resistência à flexão no regime elástico	(MPa)
S	Módulo de resistência à flexão no regime plástico	(MPa)
μ	Coefficiente de proporcionalidade	
Φ	Ângulo entre a normal ao plano de deslizamento com o eixo z	(rad)
X	Complemento do ângulo Φ	(rad)
dz	Distância entre estações de conformação	(m)
y_{\max}	Flecha máxima	
	(mm)	
I_z	Momento de inércia da seção	(m ⁴)
Γ	Trabalho mecânico	(Nm)

1. INTRODUÇÃO

O estudo dos processos de conformação dos metais proporciona o conhecimento e as informações necessárias ao desenvolvimento e evolução das máquinas de conformação utilizadas assim como ao projeto e construção de novos equipamentos. O domínio das características de cada material e de cada processo proporciona ao projetista obter produtos com qualidade, aliada aos parâmetros de mínimo custo e mínimo prazo de fabricação, por meio da determinação do esforço e da velocidade de conformação e por consequência da potência do equipamento.

Segundo Boothroyd et al.⁽¹⁾, modernas técnicas de projeto procuram a otimização do processo reduzindo o número de etapas para a fabricação de um dado componente ou conjunto, destacando-se o sistema DFA- DFM – Design for Manufacturing and Design for Assembly (Projeto para a Manufatura e Projeto para Montagem). Neste sistema a procura de novos materiais e novas matérias primas é constante, visando a redução de operações e o uso de matérias primas, conformadas previamente, é considerado de forma intensiva.

Dentre os itens considerados a matéria prima na forma tubular representa um segmento significativo tanto em redução de peso como em redução das operações de usinagem internas ao mesmo tempo em que oferece uma resistência elevada às solicitações com carga rotatória. Segundo Kim et al.⁽²⁾, a demanda de tubos de alta qualidade, soldados por resistência elétrica é crescente tornando necessária a investigação do efeito das variáveis do processo na qualidade final do produto.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é estabelecer os parâmetros para o projeto de máquinas de conformação de modo a obter produto com qualidade, menor custo de fabricação e menor prazo de execução. Para alcançar este objetivo são aplicados conceitos atuais de projeto como:

DFA – Projeto para montagem, tecnologia que compreende a execução do projeto visando estabelecer formas e dimensões que garantam menor tempo de montagem, uso de dispositivos e necessidade de treinamento especializado

DFM – Projeto para manufatura, tecnologia análoga ao DFA voltada para a fabricação de peças e componentes compatíveis com a disponibilidade do setor

industrial tanto em termos de matérias primas como em função do equipamento e maquinário.

Engenharia de valor, tecnologia voltada para o que realmente é valorizado por um cliente e o que realmente ele paga, relacionando com os aspectos econômicos do negócio, e desenvolvendo um processo de consenso que permite uma rápida implementação do método de abordagem.

Engenharia simultânea, tecnologia que traduz o processo de desenvolvimento de um produto por áreas relacionadas como manufatura, qualidade, vendas, assistência técnica e mercadologia. Essa abordagem incentiva as pessoas envolvidas no desenvolvimento a considerarem, desde o início, todos os elementos do ciclo de vida do produto, da concepção ao descarte, incluindo qualidade, custo, prazos e requisitos dos clientes

Análise de falhas, tecnologia que consiste na aplicação de esforços para identificação das causas e efeitos das falhas e não-conformidades de um produto de modo a evitar sua ocorrência ou repetição por meio de alterações de projetos e métodos de manufatura

Confiabilidade, resultado de um plano de trabalho envolvendo os métodos acima descritos, pela aplicação das tecnologias disponíveis na conceituação, desenvolvimento e aplicação do projeto.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A produção de itens para a construção mecânica, de produtos destinados às demais áreas de produção, traz a necessidade de desenvolvimento tecnológico com o propósito de se obter maior competitividade no mercado globalizado. Sweeney e Grunewald ⁽³⁾ destacam a aplicação de produtos na área automobilística com especial ênfase nos produtos estampados ou hidroformados a partir de perfis tubulares.

Convenientemente segundo Patton ⁽⁴⁾, toda produção industrial é dividida em três ramos industriais: primário, secundário e terciário. O ramo primário compreende as indústrias de extração mineral e vegetal, fornecendo as matérias primas básicas para a produção de metais, cerâmicos e polímeros. O ramo secundário compreende a fabricação de artigos para o comércio tanto industrial como de consumo. O ramo terciário compreende a prestação de serviços, reparos e manutenção.

A Tecnologia Mecânica consiste no conhecimento das técnicas e no desenvolvimento de novas formas operacionais, estabelecendo processos, desenvolvendo maquinário, dispositivos, ferramentas e, até, novos materiais para a produção dos bens de consumo e de produção, com o principal objetivo de reduzir custos com manutenção de qualidade e atingir maior velocidade operacional por meio de um processo de fabricação mais racional.

Os processos utilizados nas três áreas citadas foram divididos em grupos segundo o material, suas propriedades e limitações, a condição da matéria prima, na forma bruta ou já elaborada e sua aplicação de destino, para a indústria ou para o consumo final, esta classificação apresenta diferenças em função do grau de importância dado pelos autores e do entendimento do processo de transformação.

Segundo Patton ⁽⁴⁾ existem três operações básicas no setor secundário: Fabricação, Montagem e Acabamento, que por sua vez se subdividem conforme representado na figura 1.

Segundo Gelleji ⁽⁵⁾ os processos básicos de fabricação na indústria são essencialmente aqueles realizados a volume constante obtidos por meio da conformação plástica isto é, um processo durante o qual um corpo é trazido de uma forma a outra por meio de forças externas sem perda de massa, com o objetivo de reduzir custos e perda de matéria prima. A alteração da estrutura cristalina resultante

desta mudança de forma é acompanhada nos metais e suas ligas por alterações em suas propriedades, dentre estas as propriedades mecânicas podem ser mantidas alteradas desde que a transformação ocorra abaixo da temperatura de recristalização do metal em operação. Esta temperatura corresponde à fronteira entre a operação denominada “a frio” ou “a quente” , abaixo ou acima da temperatura de recristalização do metal, sendo esta a temperatura em que se inicia a mudança de fase do metal.

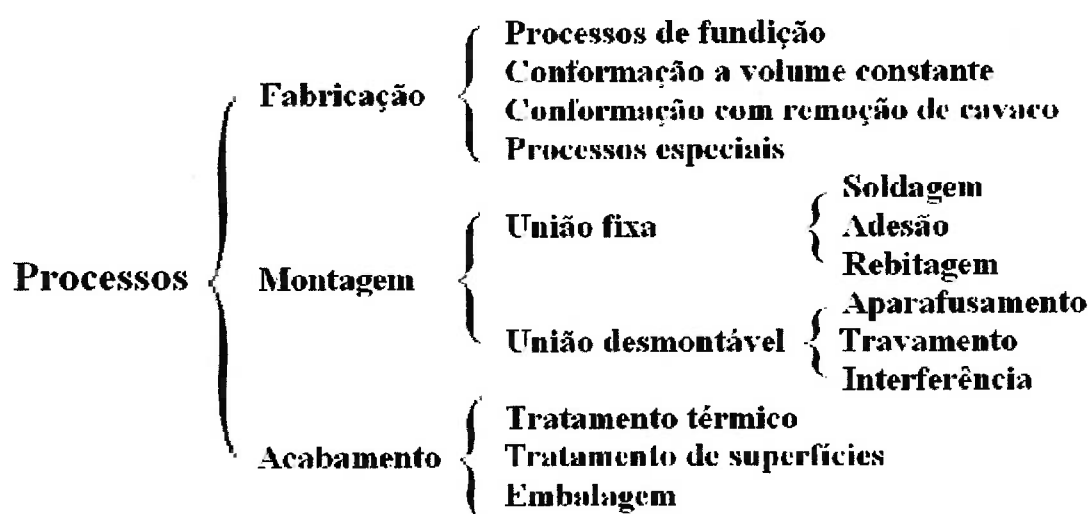


Figura 1 – Classificação dos processos de produção ⁽⁴⁾.

Relacionando com o escopo deste trabalho, a fabricação de tubos de metais como aço, alumínio e cobre entre outros, é caracterizada pela conformação do metal realizada “a frio” ou “a quente”, a partir de um tarugo ou de uma chapa laminada, segundo processos tradicionais desenvolvidos para atendimento de necessidades imediatas ou para consolidação de métodos usuais.

2.1 Processos de Conformação de Metais

A classificação dos processos remonta aos estudos iniciais da conformação dos metais, envolvendo vários pesquisadores e escolas de pensamento. A literatura estabelecida traz métodos diferenciados pelo aspecto de abordagem ou pelo princípio

adotado. Segundo Altan⁽⁶⁾ classificam-se os processos de conformação de metais segundo os tópicos:

- a) Processos primários, como Fundição, Extrusão líquida por fusão, Metalurgia do pó. Nestes caracteriza-se a ausência de uma forma inicial e a obtenção de uma forma final bem definida.
- b) Processos secundários
 - b₁) Laminação, Extrusão, Forjamento a frio e a quente, Dobramento, Estampagem, Embutimento profundo, Trefilação. Nestes a peça é obtida por deformação plástica total do material, regional ou localizada, a partir de uma forma inicial.
 - b₂) Serramento, Plainamento, Torneamento, Fresamento, Furação, Mandrilamento, Brochamento, Retificação, Brunimento, Polimento entre outros, onde a forma é obtida pela remoção controlada de material.
 - b₃) Tratamento do material, Tratamento Térmico, Anodização, Endurecimento superficial. Não há mudança de forma, porém ocorrem mudanças nas propriedades e no aspecto visual.
- c) Processos especiais tais como, União: Metalúrgica (Soldagem, Brasagem, Difusão), Polimérica (Adesão) e Mecânica (Rebitagem, Cravamento, Rosqueamento e Interferência). Ocorre a formação de um corpo a partir de um conjunto de peças.

Segundo Tselikov⁽⁷⁾ a classificação baseia-se no estado físico do produto destacando-se os tópicos a seguir:

- a) Processos primários, como Fundição. Nestes caracteriza-se a presença de metal na forma líquida.
- b) Processos secundários, como Laminação, Extrusão, Forjamento a frio e a quente, Dobramento, Estampagem, Embutimento profundo, Trefilação ou Estiramento. Nestes caracteriza-se a mudança de forma com manutenção do volume inicial.

- c) Processos de usinagem, como Serramento, Aplainamento, Torneamento, Fresamento, Furação, Mandrilamento, Brochamento onde a forma é obtida pela remoção controlada de material.
- d) Processos especiais envolvendo técnicas específicas de transformação tais como:
- Tratamento Térmico, Tratamento superficial, Recobrimento físico e químico. Não há mudança de forma, porém ocorrem mudanças nas propriedades e no aspecto visual.
 - União de componentes: Metalúrgica (Soldagem, Brasagem, Difusão) Polimérica (Adesão) e Mecânica (Rebitagem, Cravamento, Rosqueamento e Interferência). Ocorre a formação de um corpo a partir de um conjunto de peças.
 - Metalurgia do pó com aplicação tanto em materiais metálicos como em cerâmicos. Utiliza-se a propriedade específica do material como elevada resistência e dureza e extrema fragilidade para a transformação do material em um pó de fina granulometria. Posterior compactação segundo a forma desejada seguida de tratamento de sinterização dão à peça condições de trabalho com elevada solicitação térmica e mecânica.
 - Processos especiais de conformação, remoção de cavaco ou adesão tais como: Hidroformação, Usinagem por ultra-som, Corte com jato d'água, Eletro-erosão, Corte a LASER e Prototipagem rápida entre outros.

Esta forma de classificação traz outras interpretações, porém mantendo como parâmetro geral a fabricação de componentes ou conjuntos a partir de técnicas em constante desenvolvimento, tanto em termos de equipamentos como em procedimentos e parametrização.

2.2 Variáveis e Descrição dos Processos de Conformação de Metais

Na conformação dos metais uma forma geométrica simples é transformada em outra de maior complexidade por meio da deformação plástica. A deformação é induzida por uma força externa ou uma tensão cuja intensidade deve exceder a tensão de escoamento do material. As ferramentas guardam as formas geométricas e impõem pressões no material por meio da interface ferramenta / material.

O fenômeno físico que descreve a operação de conformação é influenciado por um grande número de variáveis do processo.

Segundo Altan ⁽⁶⁾ partindo-se da condição de volume constante obtém-se o equacionamento do processo de conformação, considerando-se as simplificações a seguir:

- Desprezam-se as deformações elásticas considerando-se as deformações residuais em peças e no ferramental para efeito de precisão dimensional;

As deformações elásticas por efeito mola (spring back) são desprezadas em função da ordem de grandeza relativamente baixa enquanto que as deformações plásticas são de intensidade significativamente maiores.

- Considera-se o material como um meio contínuo desprezando-se aspectos metalúrgicos como grãos, tamanho dos grãos e discordâncias ;

As características estruturais dos materiais influenciam de forma significativa o comportamento resultando em variações de comportamento aleatórias e reduzindo a precisão dos cálculos.

- Os valores característicos do material, obtidos em ensaios uniaxiais, são correlacionados com tensão de escoamento em condições de tensão multiaxial;

Nos ensaios mecânicos dos materiais a direção de aplicação da força é orientada o que não acontece no processo real de conformação onde as forças são multidirecionais.

- A anisotropia, variação das propriedades físicas em diferentes direções, é negligenciada;

Em função da orientação das forças considera-se o mesmo comportamento em todas as direções.

- O efeito Bauschinger, redução nos limites elásticos devido à solitação acima dos limites elásticos, é desprezado;

A mudança de comportamento em função de solitações anteriores deve ser desprezada em função da multiplicidade de transformações simultâneas ou sucessivas que ocorrem durante a deformação. Esta condição é aplicável a processos como forjamento , laminação , extrusão e trefilação pela passagem única do material pela ferramenta. No processo em análise, perfilamento por rolos, onde estações de trabalho são dispostas de modo a formar uma linha contínua de conformação, é necessário considerar este efeito pois a cada passagem tem-se o material deformado anteriormente.

- O atrito é expresso segundo a Lei de Coulomb ou tensão de cisalhamento constante.

Diferencia-se o atrito estático e o dinâmico, considerando-se a independência da força de atrito relativamente à velocidade de deformação.

Segundo Kobayashi, no processo de deformação o metal assume a condição de um fluido e, portanto apresenta comportamento de deslocamento segundo um campo de velocidades abrangendo a velocidade, a taxa de deformação e a deformação. Este campo é considerado como independente das propriedades do material para facilitar a aplicação deste conceito de fluido. De acordo com o processo analisado, o campo de velocidades pode assumir uma condição constante, como na extrusão ou variável, como no forjamento segundo observado na figura 2 a seguir:

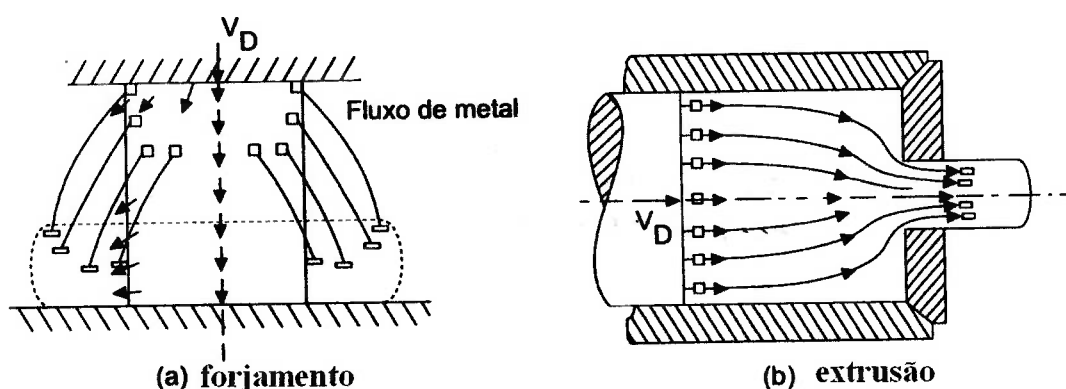


Figura 2 – Linhas de corrente na operação de conformação⁽⁶⁾

2.3 O campo de velocidades

Segundo Altan⁽⁶⁾ a definição da velocidade, da deformação e da taxa de deformação é feita admitindo-se um sistema tridimensional segundo um paralelogramo de arestas a , b e c transformando-se em paralelogramo de arestas a' , b' e c' conforme a figura 3. Timoshenko⁽⁸⁾ estabelece uma correlação entre a condição inicial e a condição após uma deformação controlada.

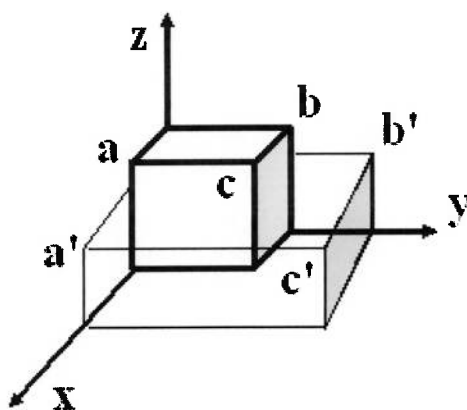


Figura 3 – Deformação de um paralelogramo abc ⁽⁶⁾.

As coordenadas de um vértice, inicialmente (a,b,c) adquirem após a deformação os valores (a',b',c') conforme esquematizado na figura 3. Considerando pequenos deslocamentos no material, o deslocamento do ponto a a partir de suas coordenadas iniciais tem-se no plano XY , representando uma condição que se repete nos planos XZ e YZ , considera-se o deslocamento do ponto $a(x, y)$ para o ponto $a'(x', y')$ como mostrado na figura 4 a seguir:

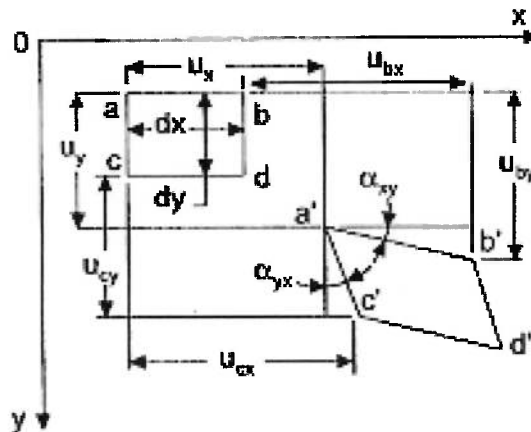


Figura 4 – Deslocamento de um retângulo abcd ⁽⁶⁾.

O valor do deslocamento do ponto a para o ponto a' pode ser expresso pela equação

$$u_{bx} = u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} dx \quad (1)$$

O alongamento relativo na direção x é expresso pela relação

$$\varepsilon_x = (u_{bx} - u_x) / dx \quad (2)$$

considerando a variação nas direções y e z e o mesmo princípio de movimentação, obtém-se as equações presentes na teoria da elasticidade

$$\varepsilon_x = u_x + \frac{\partial u}{\partial x} - u_x / dx = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad (3)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad (4)$$

$$\varepsilon_z = - \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (5)$$

O pequeno deslocamento provoca uma variação angular no plano definido pelos eixos que em função de sua magnitude, admite as relações $\text{tg}\alpha_{xy} = \alpha_{xy}$ e $\text{tg}\alpha_{yx} = \alpha_{yx}$ para os deslocamentos angulares, resultando em :

$$\alpha_{xy} = (u_{by} - u_y) / (u_{bx} + dx - u_x) \quad (6)$$

de forma análoga à equação (1) obtém-se:

$$u_{by} = u_y + \frac{\partial u_y}{\partial y} dy \quad (7)$$

utilizando-se as equações (1) e (7) e considerando a equação (3) obtém-se:

$$\alpha_{xy} = \partial u_y / \partial x \quad (8)$$

$$\alpha_{yx} = \partial u_x / \partial y \quad (9)$$

portanto a deformação angular total no plano x-y, ou plano denominado de cisalhamento γ_{xy} é dada pela expressão:

$$\gamma_{xy} = \alpha_{xy} + \alpha_{yx} = \partial u_y / \partial x + \partial u_x / \partial y \quad (10)$$

similarmente

$$\gamma_{yz} = \partial u_y / \partial z + \partial u_z / \partial y \quad (11)$$

e

$$\gamma_{xz} = \partial u_z / \partial x + \partial u_x / \partial z \quad (12)$$

Como a velocidade é expressa pelo deslocamento em função do tempo, tem-se

$$v_x = \partial u_x / \partial t; \quad v_y = \partial u_y / \partial t; \quad v_z = \partial u_z / \partial t \quad (13)$$

para a taxa de deformação isto é, a variação da deformação no tempo, tem-se

$$\dot{\epsilon}_x = \partial \epsilon_x / \partial t = \partial / \partial t \partial (u_x) / \partial x = \partial / \partial x \partial (u_x) / \partial t = \partial v_x / \partial x$$

portanto de forma similar

$$\dot{\epsilon}_x = \partial v_x / \partial x; \quad \dot{\epsilon}_y = \partial v_y / \partial y; \quad \dot{\epsilon}_{z_x} = \partial v_z / \partial z \quad (14)$$

dessas expressões obtém-se as taxas de variação angular:

$$\gamma_{xy} = \partial v_y / \partial x + \partial v_x / \partial y \quad (15)$$

similarmente

$$\gamma_{yz} = \partial v_y / \partial z + \partial v_z / \partial y \quad (16)$$

e

$$\gamma_{xz} = \partial v_z / \partial x + \partial v_x / \partial z \quad (17)$$

Estes parâmetros descrevem o estado de deformação plástica dos metais num sistema de coordenadas x, y e z e, ao ser modificado o referencial para os eixos x', y, e z' cujo ângulo de rotação seja conhecido, o sistema de coordenadas será orientado de modo a não apresentar tensão de cisalhamento, mas somente tensões de tração e de compressão.

Nesta condição, as deformações angulares serão todas nulas e o elemento se deformará ao longo dos eixos principais de deformação.

Segundo Altan⁽⁶⁾, a condição de volume constante despreza a dilatação térmica nos processos “a quente” em função da reduzida relação entre a deformação térmica e a plástica resultando em :

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad (18)$$

$$\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z = 0 \quad (19)$$

Apesar da simplificação dos cálculos esta condição deve ser revista em função da precisão dimensional exigida no produto.

2.4 Considerações para uma operação de conformação

Em função de admitir-se o comportamento de um corpo sólido como um fluido durante o processo de deformação, as leis conhecidas para a Mecânica dos Fluidos, ou para os Fenômenos de Transporte de massa e energia, são aplicáveis com os seguintes aspectos em uma operação de conformação:

- a) A cinemática: o fluxo de metal, isto é, forma, velocidade, deformação e taxa de deformação.
- b) Os limites de deformação, isto é, sob quais condições ocorrem falhas internas ou na superfície do material.
- c) As forças e tensões necessárias, para determinação da capacidade e o tipo de equipamento requerido.

Segundo Altan⁽⁶⁾ a conformação do metal, considerada como um Sistema, abrange os seguintes tópicos de maior significância :

- a) Matéria prima: {Material, Comportamento elástico, Geometria}.
- b) Ferramental (Matrizes): {Material, Geometria, Condições superficiais,}.
- c) Condições de interface: {Características de atrito entre duas superfícies}
- d) Mecanismo de deformação plástica
- e) Equipamento utilizado
- f) Ambiente de trabalho
- g) Características do produto final (Geometria, Propriedades Mecânicas e Metalúrgicas).

O fluxo de material determina as características do produto final e a formação de defeitos (por exemplo, trincas, dobras, enrugamento). Sofre a influência de um grande número de variáveis caracterizando uma definição dinâmica.

Segundo Altan ⁽⁶⁾, a mesma matriz fechada forjando alumínio ou aço inoxidável conduz a resultados diversos com relação à estrutura do material produzido, conforme a condição de atrito na interface material / ferramenta, a estrutura cristalina do material e da forma da ferramenta, levando a diferentes taxas de variação das propriedades mecânicas ao mesmo tempo em que ocorrem variações dimensionais e superficiais.

No processo de extrusão é possível uma visualização do fluxo do material por meio de dispositivos que permitem simular o processo com paredes transparentes e, com o uso de materiais estratificados. As linhas de corrente são apresentadas de modo a prever o comportamento de um metal com características de escoamento semelhantes.

A figura 5 ⁽⁶⁾ apresenta alguns tipos característicos de escoamento destacando quatro tipos principais.

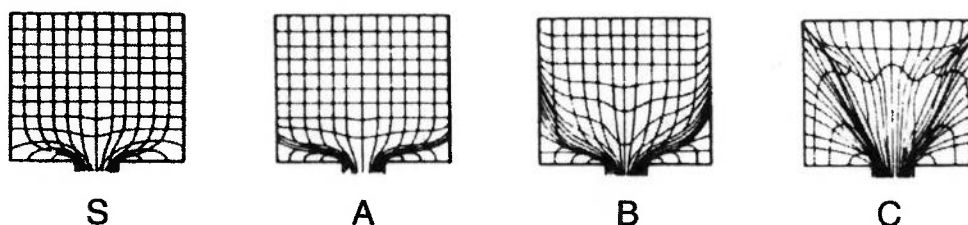


Figura 5 – Fluxo do material na operação de extrusão ⁽⁶⁾.

O Padrão S é encontrado nas operações em materiais homogêneos com atrito nulo entre material e ferramenta. Este comportamento é observado nas operações com lubrificação adequada.

O padrão A é encontrado nas operações em materiais homogêneos onde o atrito existe entre a ferramenta e o material mas não entre o material e a parede da câmara como observado nas extrusões indiretas. Nota-se um escoamento linear até as proximidades da ferramenta de extrusão. O material situado nas paredes transversais ao fluxo se desloca por ação da viscosidade.

O padrão B caracteriza o material homogêneo com a presença de atrito com o material tanto nas superfícies de contato da câmara de compressão como nas da

ferramenta de conformação. Nota-se uma ampliação da zona morta ou zona de estagnação do material em função do atrito elevado, com maior deformação na camada externa do que no núcleo do material resultando em um produto com propriedades heterogêneas no sentido da superfície para o núcleo.

Este padrão de comportamento é observado também nos demais processos de conformação a volume constante e oferece um direcionamento seguro quanto a forma adequada tanto da ferramenta matriz como da ferramenta punção, bem como com relação às características exigidas da matéria prima inicial e com relação à necessidade de aquecimentos intermediários para alívio de tensões.

O padrão C é encontrado em materiais que não apresentam um comportamento homogêneo ao longo da seção transversal ao deslocamento da ferramenta ocasionando uma alteração considerável nas linhas de corrente de fluxo do material e resultando em um produto final com elevada anisotropia.

As variáveis significativas no processo de conformação, que devem nortear o estudo de cada processo, são destacadas por Gelegi ⁽⁵⁾, como mostrado a seguir: na tabela 1 adiante.

Segundo Sung ⁽⁹⁾ os tópicos vistos na tabela 1 podem ser esquematizados de acordo com as condições do processo de conformação conforme a figura 6.



Figura 6 – Interligação entre as variáveis significativas no processo de conformação⁽⁹⁾.

2.4.1 Matéria prima

Altan ⁽⁶⁾ destaca que o comportamento do material durante e após o processo de conformação deve ser conhecido, fornecendo informações tais como:

- a) Dados do material: condições iniciais, composição; o histórico de conformações e de tratamentos e a microestrutura a ser obtida no produto final.
- b) Características do material identificadas por:
 - b₁) Tensão de deformação, em várias direções (devido à anisotropia), expressa por:

$$\sigma = f(\varepsilon, E, T) \quad (20)$$

b₂) Formabilidade (trabalhabilidade) do material dependendo de:

- (1) Variáveis do processo (temperatura, tensão, deformação e taxa de deformação),
- (2) Modificações metalúrgicas durante a deformação, (formação de vazios, composição, lacunas, inclusões, precipitações).

2.4.1.1 Condições de escoamento na deformação plástica

Segundo Popov ⁽¹⁰⁾ algumas teorias são aplicadas para explicar o comportamento do material quando submetido a forças externas. A Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Critério de Tresca (1868) ou Critério de Guest desenvolvido a partir dos estudos de Coulomb em 1773) é aplicada para materiais dúcteis, cuja deformação tem origem no deslizamento de planos cristalinos submetidos à máxima tensão de cisalhamento.

Tabela 1 – Variáveis mais significativas no processo de conformação⁽⁵⁾

Variável	Característica
Composição da matéria prima	Tensão de escoamento como função da deformação, temperatura e microestrutura (equações constitutivas).
	Conformabilidade em função da deformação, taxa de deformação, temperatura e microestrutura (curvas limite de conformação).
	Condições superficiais e propriedades termo-físicas.
	Condições iniciais (composição química, temperatura, estados anteriores da microestrutura).
	Efeitos da mudança de microestrutura e composição química na tensão de escoamento e conformabilidade.
Ferramental	Geometria das ferramentas e condições superficiais.
	Material, dureza e tratamento térmico.
Condições na interface ferramenta-peça	Temperatura.
	Rigidez e posição.
	Tipo de lubrificação e temperatura de trabalho.
	Relação e características de resfriamento na camada de interface.
	Lubrificação e tensão de cisalhamento ao atrito.
	Características relacionadas à aplicação remoção de lubrificante.
Zona de deformação	Mecanismo de deformação e modelo usado para análise.
	Fluxo de metal, velocidade, taxa de deformação e deformação.
	Tensões (variações durante a deformação).
	Temperatura (geração e transferência de calor).
Equipamento usado	Velocidade/ razão de produção.
	Força/ capacidade de conversão de energia.
	Rigidez e posição.
Produto	Geometria.
	Precisão dimensional/ tolerâncias/ Acabamento superficial.
	Microestrutura, propriedades mecânicas e metalúrgicas.
Ambiente	Capacidade da mão de obra disponível.
	Poluição do ar e resíduos líquidos.
	Controle da poluição e disponibilidade de equipamentos na fábrica.

Segundo Timoshenko⁽⁸⁾, a análise simplificada em escoamento bidirecional é ilustrada, conforme a figura 7, admitindo-se uma barra prismática submetida a uma força de tração axial F , e considerando a seção transversal PP , perpendicular ao plano da figura e inclinada de um ângulo θ em relação ao eixo da barra.

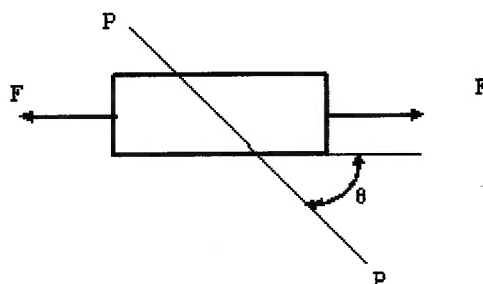


Figura 7 –Distribuição de tensões em barra prismática⁽⁸⁾

No plano PP tem-se a decomposição da força F em duas componentes, figura 8, uma perpendicular F_{θ} e outra paralela $F_{\theta'}$.

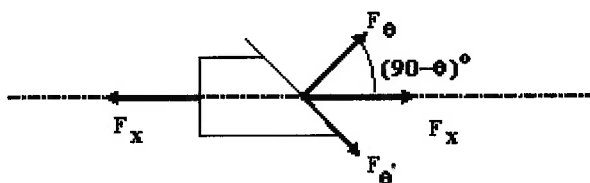


Figura 8 –Decomposição da força $F_{X[3]}$, plano PP ⁽⁸⁾.

Da figura 7 tem-se :

$$F_{\theta} = F_X \operatorname{sen} \theta \quad (21)$$

$$F_{\theta'} = F_X \operatorname{cos} \theta \quad (22)$$

Considerando-se a área da seção transversal ao eixo principal X , A e a equação:

$$A_{\theta} = A / \operatorname{cos} \theta \quad (23)$$

Para a área da seção inclinada tem-se:

$$\sigma_x = F_X / A \quad (24)$$

$$\sigma_{\theta} = F_{\theta} / A_{\theta} \quad (25)$$

Substituindo-se os valores tem-se:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_x \operatorname{cos}^2 \theta \quad (26)$$

Considerando o plano QQ perpendicular a PP vê-se na figura 9

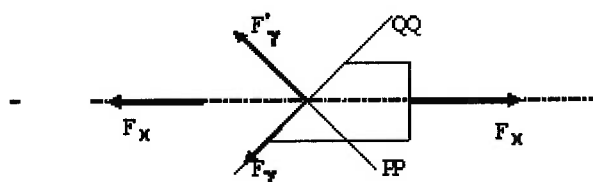


Figura 9 –Decomposição da força F_x : F_y no plano QQ, F_y no plano PP⁽⁸⁾.

Analogamente ao desenvolvimento anterior tem-se:

$$F_y = F_x \cos \theta \quad (27)$$

$$F_{y'} = F_x \sin \theta \quad (28)$$

Considerando as tensões atuantes:

$$\sigma_y = \sigma_x \sin^2 \theta \quad (29)$$

Somando-se as duas componentes:

$$\sigma_y + \sigma_\theta = \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_x \cos^2 \theta \quad (30)$$

$$\sigma_y + \sigma_\theta = \sigma_x (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta)$$

(31)

$$\sigma_y + \sigma_\theta = \sigma_x \quad (32)$$

Observa-se que ao aplicarmos uma força em um corpo, este irá ser solicitado em planos perpendiculares com tensões proporcionais à tensão solicitante resultando em deslizamento e conseqüente deformação segundo a direção da força aplicada e, por Poisson nas demais direções.

Uma segunda teoria desenvolvida é a da Máxima Energia de Deformação (Critério de Von Mises (1913) ou Critério de Beltrami (1885)-Maxwell-Huber (1904)-Hencky (1925)) segundo a qual o escoamento ocorre quando a energia de distorção alcança o valor da energia de distorção obtida no ensaio de tração uniaxial no escoamento.

Estas teorias foram aplicadas por Han et al.^{(11) (12) (13)}, utilizando a Teoria de von Mises, na análise da tensão resultante no processo de conformação por rolos tais como laminação, calandragem e perfilamento de seções abertas ou fechadas.

Segundo Popov ⁽¹⁰⁾, comparando este critério com o de Tresca observa-se uma ampliação no valor da tensão conforme visto na figura 10, onde a linha de von Mises circunscreve a linha de Tresca.

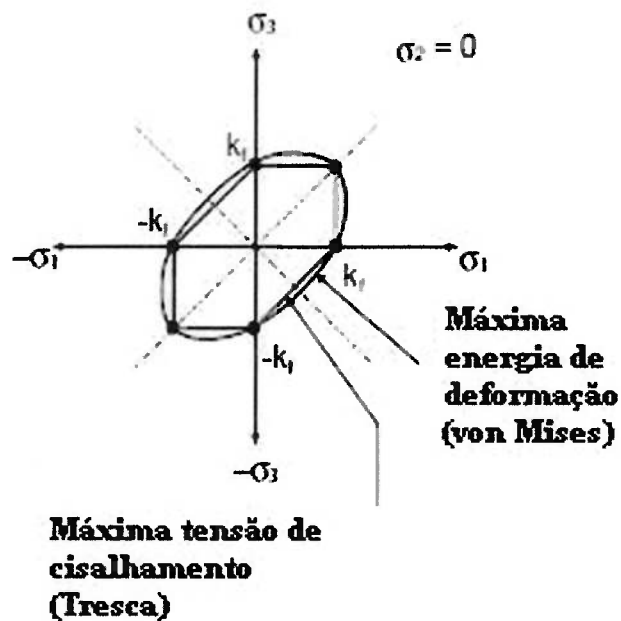


Figura 10 –Comparação entre os critérios Tresca e von Mises⁽¹⁴⁾

Para o estudo da energia de deformação de um corpo, o critério de Tresca oferece uma condição conservativa a favor da segurança, garantindo a ocorrência de deformação com os valores de potência obtidos nos cálculos.

Popov ⁽¹⁰⁾, comparando os resultados experimentais clássicos com as teorias de escoamento observou uma concordância entre a teoria da máxima energia de distorção (v. Mises) e o comportamento de materiais dúteis enquanto que para materiais frágeis observa-se uma melhor concordância destes com a teoria da máxima tensão de cisalhamento (Tresca).

Para as duas teorias admite-se que as propriedades do material na tração ou na compressão sejam semelhantes embora alguns materiais apresentem uma significativa diferença nestas propriedades.

Segundo Daddi ⁽¹⁵⁾ os materiais destinados aos processos de conformação se caracterizam pela ductilidade, desta forma é esperada uma maior resistência quando submetidos à compressão pelo aumento da área transversal ao esforço aplicado. Entretanto deve ser analisada a mudança da direção de sollicitação dentro da ferramenta durante o processo de conformação, transformando a sollicitação à compressão em tração e levando à ruptura do material.

2.4.2 Ferramental

O ferramental apresenta considerável influência no produto final em função do processo de transferência de energia para a matéria prima.

Gan e Wagoner ⁽¹⁶⁾, destacam a importância do projeto da ferramenta no estabelecimento da intensidade de retorno elástico (springback) como forma de controlar as dimensões finais da peça e a versatilidade fornecida pelo uso da Simulação por Elementos Finitos na predição do efeito mola.

As variáveis consideradas relativas ao ferramental são:

- a) Projeto e geometria
- b) Acabamento superficial
- c) Propriedades mecânicas (dureza, rigidez, resistência à compressão)
- d) Propriedades térmicas (transferência de calor)

A conformação do material é produzida pela aplicação controlada de esforços de compressão ou de tração que, ao agirem na rede cristalina, introduzem deslocamentos potencializados pela presença de discordâncias. O projeto da ferramenta deve resultar em um direcionamento das forças aplicadas de modo a reduzir a resistência do material e promover um deslocamento suave. Nesta condição a geometria da ferramenta torna-se um instrumento valioso para alterar as linhas de corrente de escoamento, de modo a preencher toda a cavidade da ferramenta sem introduzir pontos de descontinuidade, superposição ou fratura no material .

Ao se considerar o material como um fluido em movimento, é necessário dar especial atenção ao acabamento superficial da ferramenta por sua interação direta com a viscosidade relativa e, portanto, com as condições tribológicas de escoamento do material. Fatores como perda de carga nas singularidades da ferramenta influenciam a velocidade e a taxa de variação da conformação, com sensíveis efeitos no esforço de conformação.

A solicitação da ferramenta durante o esforço de conformação deve permanecer dentro da região elástica garantindo, desta forma, as dimensões do produto e obedecendo às tolerâncias dimensionais e geométricas. Propriedades tais como durezas da superfície e do núcleo garantem o acabamento superficial enquanto a rigidez do conjunto garante a manutenção das dimensões previstas em projeto considerando o efeito mola (springback).

Considerando a possibilidade de operação “a quente”, torna-se importante tanto a capacidade térmica do ferramental como a condutividade térmica no sentido de não permitirem uma redução da temperatura do material, evitando a necessidade de aquecimentos intermediários e reduzindo os custos operacionais. Levando-se em conta a transformação de energia mecânica em térmica é preciso analisar a troca de calor entre o material e a ferramenta para manter a temperatura controlada nas operações “a frio”, de modo a reduzir as distorções térmicas do produto final.

2.4.3 Condições de interface ferramenta peça

Segundo Batalha⁽¹⁷⁾, o atrito está presente em todos os processos de conformação por força da aplicação de esforços externos pela ferramenta sobre o material, com o deslocamento deste em relação à superfície de contato. A medição da força de atrito desenvolvida no processo de conformação é de difícil realização exigindo a formulação de teorias que expliquem o comportamento dos materiais em contato.

Lee e Chen⁽¹⁸⁾ desenvolveram um estudo para o processo de rolamento e propuseram uma lei geral de atrito ao mesmo tempo em que realizaram uma análise por elementos finitos abrangendo um largo espectro de variáveis relacionadas com o processo de conformação por rolos, destacando os seguintes aspectos:

- O processo determina um problema de atrito por contato tridimensional, inelástico, quase estático ou mesmo dinâmico, entre dois corpos deformáveis em movimento.
- A peça durante o processo é submetida a elevadas deformações com sofisticado relacionamento constitutivo.
- O processo desenvolve uma transferência de calor entre a peça e a ferramenta, especialmente quando desenvolvido “a quente”.

Segundo Avitzur ⁽¹⁹⁾, em função das imperfeições geométricas superficiais, tem-se a rugosidade que mantém o contato entre as superfícies submetidas à compressão sobre áreas limitadas da interface aparente. Definindo-se a pressão como a relação entre o esforço externo aplicado e a área de contato superficial real, resulta uma pressão efetiva bastante superior à pressão calculada.

Com o material em constante transformação e movimento, a mensuração da rugosidade é prejudicada e a medição do valor da força de atrito real torna-se impraticável. Mesmo sob deformação elástica do bloco ocorre a deformação plástica dos pontos em contato (picos opostos), resultando em acomodação das superfícies da ferramenta e do material em processo, alterando continuamente a força de atrito.

A presença de lubrificantes altera significativamente o comportamento dos materiais da ferramenta e da peça em processo, tanto em função da redução do coeficiente de atrito como da alteração da rugosidade superficial aparente e do efeito de refrigeração introduzido pelo fluxo do lubrificante. Segundo Gruning ⁽²⁰⁾, como resultado deste procedimento tem-se uma redução do desgaste e da corrosão da ferramenta bem como dos defeitos introduzidos na peça.

Tratamentos térmicos para alívio de tensões e para aumento de dureza, com ou sem deposição de materiais, tais como cementação, carbonitreção e nitreção, surgem como uma etapa essencial na fabricação de ferramentas na medida que alteram as propriedades do material na superfície mantendo as características básicas do núcleo. A introdução de recobrimentos metálicos na superfície de contato da ferramenta, tais como cromo duro, níquel duro ou nitreto de titânio, altera significativamente o comportamento tribológico em função da interação entre diferentes materiais com comportamentos relativos mais favoráveis.

2.4.3.1 Equacionamento do fenômeno de atrito

Coulomb, segundo Hutchings ⁽²¹⁾, ao estudar o fenômeno tribológico da interação entre a ferramenta e a matéria prima, por meio do contato metal/metal, reuniu os conceitos analisados por Amontons e equacionou o processo propondo a chamada 3ª lei do atrito, em complementação às duas enunciadas por Amontons:

1ª Lei do Atrito	A força de atrito é proporcional à força normal à superfície de contato;
2ª Lei do Atrito	A força de atrito independe da área aparente de contato;
3ª Lei do Atrito	A força de atrito independe da velocidade relativa entre os corpos

Alguns parâmetros são analisados segundo os resultados dos ensaios de caracterização relacionados a seguir::

Lei de Coulomb

$$\tau = \text{tensão de cisalhamento por atrito} \quad \tau = \sigma \times \mu \quad (33)$$

ou

$$\tau = \text{tensão de cisalhamento interfacial} \quad \tau = \frac{m \cdot \sigma}{\sqrt{3} \cdot \sigma_n} \quad (34)$$

Onde:

σ = tensão de escoamento

σ_n = tensão normal

μ = coeficiente de atrito

m = fator de cisalhamento de atrito ou parcela da tensão de escoamento do material sob cisalhamento puro, $0 \leq m \leq 1$.

2.4.3.2- Ensaios de caracterização dos materiais

Para aplicação nestas equações propostas torna-se necessária a determinação das propriedades do material referentes ao atrito superficial por meio de ensaios de caracterização da interface, destacando-se o teste de anel.

2.4.3.2.1 Ensaio de Anel

Segundo Grady e Benson apud Pandolfi et al.⁽²²⁾, o ensaio do anel consiste em comprimir um corpo de provas no formato de um anel com faces planas para uma redução conhecida. O coeficiente de atrito está relacionado com a deformação do anel. Para coeficiente de atrito nulo a deformação se dá com fluxo radial crescente logo, os diâmetros interno e externo aumentam. À medida que o atrito aumenta, decresce a deformação para maior do diâmetro interno e a partir de um dado valor ocorre a diminuição do diâmetro interno.

Testes realizados segundo a norma ASTM D 6773-02 - Shear Test Method for Bulk Solids Using the Schulze Ring Shear Tester⁽²³⁾, apresentam a vantagem de serem aplicáveis independentemente do conhecimento da força necessária para a deformação e da tensão de escoamento do material, possibilitando o uso de programas de computação matemática por meio do Método de Elementos Finitos para simulação do fluxo de material durante o ensaio permitindo a determinação do fator de cisalhamento de atrito “m” e o seu tabelamento para diversos materiais de uso comum.

Avitzur⁽¹⁹⁾ considera a deformação causada pela aplicação de força de compressão em dois cilindros de idênticas dimensões e características com (a) lubrificante e (b) sem lubrificação, vistos na figura 11. O comportamento característico é bastante diferenciado entre os dois corpos. Enquanto que, no ensaio com lubrificação, o anel apresenta um aumento tanto do raio externo como o do raio interno, no ensaio sem lubrificante o raio interno do anel diminui enquanto que o externo aumenta. A figura 11 esquematiza as deformações ocorridas a partir do corpo de prova indicado.

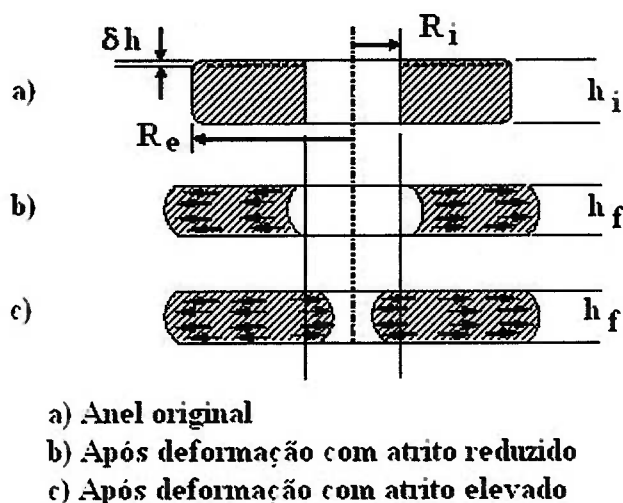


Figura 11 – Esquematização do ensaio de anel ⁽¹⁹⁾

2.4.4 Mecanismo de deformação plástica

Sob a ação de forças externas o material adquire propriedades de um fluido de alta viscosidade em escoamento. O fluxo de metal ocorre na zona de deformação e é influenciado pelas variáveis:

- Propriedades do material,
- Interface (Atrito: Força normal, ϵ , condições da superfície),
- Geometria da ferramenta (forma da zona de deformação),
- Condições térmicas existentes na zona de deformação.

2.4.4.1 Propriedades do material

Segundo Gruning ⁽²⁰⁾ as propriedades do material metálico, por sua formação cristalina, são estudadas pela técnica da conformação. Materiais poliméricos por serem transformados fluidos pela mudança de estado durante a fase inicial do processo, não apresentam o mesmo grau de dificuldade enquanto que os cerâmicos não admitem conformação por compressão ou tração.

As propriedades que apresentam uma influência direta no processo são: estrutura cristalina, resistência à mudança de forma, grau de deformação e condutividade térmica, conforme descrito a seguir::

2.4.4.1.1 Estrutura cristalina

Segundo Callister⁽²⁴⁾, as ligações metálicas, encontradas nos metais e suas ligas, são caracterizadas como ligações primárias, sendo responsáveis pela estrutura cristalina apresentada pelos metais, isto é, o arranjo repetitivo ou periódico dos átomos espaçados de grandes distâncias atômicas com repetição em um padrão tridimensional com a ligação de cada átomo com seus vizinhos mais próximos.

Estas estruturas também presentes em alguns materiais cerâmicos e em alguns polímeros em condições normais de solidificação, são encontradas em 32 formas diferentes de estrutura cristalina. Nas ligações metálicas ocorre a concentração comumente em três tipos apresentados na figura 12: Estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), Estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) e Estrutura cristalina hexagonal compacta (HC).

Nas ligas metálicas os átomos se posicionam no núcleo ou nas faces das figuras geométricas e, em função da sua dimensão, exercem uma influência marcante no deslizamento das camadas como ocorre nos processos de deformação. A variação no espaçamento entre camadas ou a ocorrência de não conformidades tais como deslocamento de linha, deslocamento helicoidal ou combinação destes, tem um efeito significativo na conformabilidade do material.

Segundo Gruning⁽²⁶⁾ a capacidade de deformação está intimamente ligada à possibilidade de escorregamento ou deslocamento das camadas formadas segundo uma determinada estrutura. Um cristal, com uma forma definida, apresenta planos denominados de “escorregamento”, com deslocamento extremamente facilitado nas direções definidas pelo plano. A figura 13 mostra as três direções preferenciais que definem os planos de escorregamento.

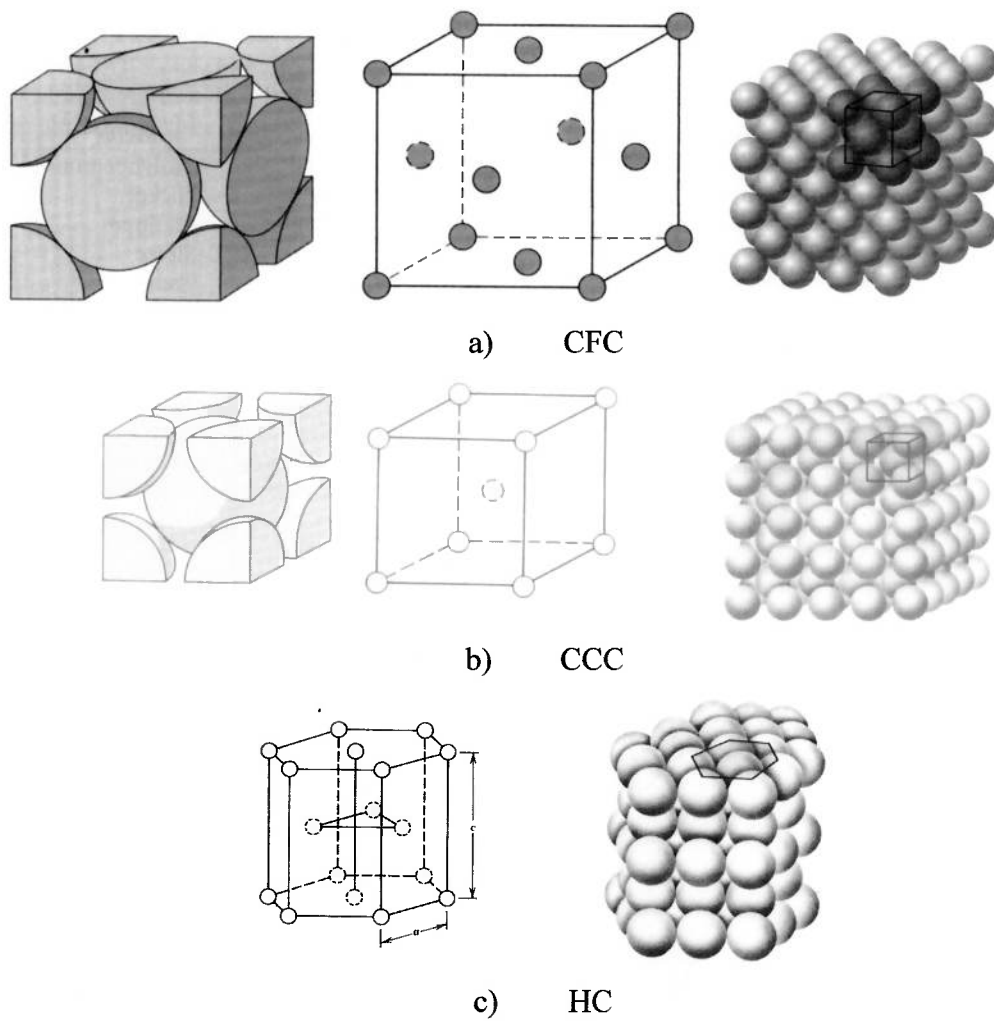


Figura 12 - Formas comuns de estrutura para metais⁽²⁴⁾

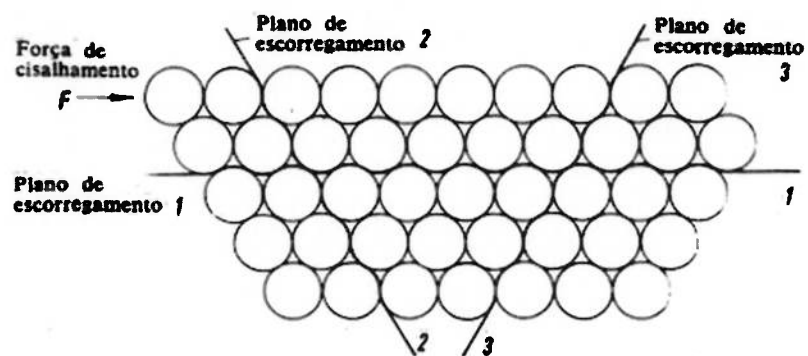
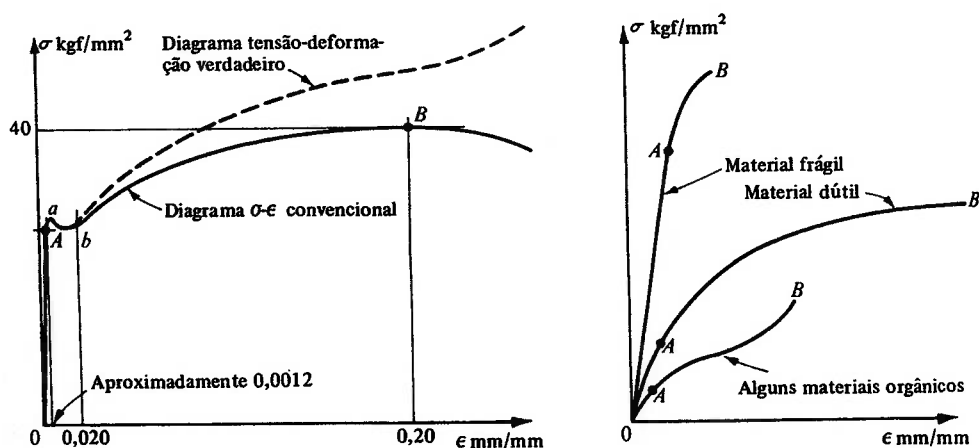


Figura 13 - Planos principais de escorregamento⁽²⁰⁾

2.4.4.1.2 Resistência à mudança de forma

A Resistência à Deformação está ligada à Resistência à Tração e ao Escoamento caracterizadas em ensaio normalizado e específico. Segundo Popov ⁽¹⁰⁾ a figura 14 ilustra este processo apresentando o gráfico de Hooke ou tensão-deformação, que mostra a relação entre a força aplicada e a deformação resultante em um corpo de prova específico. Na figura 14 são apresentados os gráficos para dois tipos de comportamento. O primeiro identificado para aço doce e também relacionado a outros materiais apresenta uma taxa de deformação relativamente elevada sem uma elevação substancial de tensão permitindo uma deformação acentuada no material. O segundo tipo identificado para materiais típicos, apresenta uma elevada variação da tensão para uma pequena deformação, dificultando o processo de conformação do material



a) Aço baixo carbono

b) materiais específicos

Figura 14– Gráficos de Hooke ⁽¹⁰⁾

2.4.4.1.3 Grau de deformação, taxa de deformação

A mudança de forma segundo os planos citados no item anterior não é infinita. Segundo Sachs ⁽²⁵⁾ um fator essencial no cálculo de forças na conformação é expresso por grandezas denominadas graus de deformação e designadas pela relação entre a dimensão inicial e a dimensão final de um produto em um processo de conformação.

Estas estabelecem a intensidade de modificação imposta em uma operação de conformação a frio, isto é, a relação entre a dimensão inicial e a dimensão final em um corpo submetido a uma força de deformação, a qual, se ultrapassada, resultará em fratura parcial ou total do corpo em operação. Desta forma é possível estabelecer, para um dado material, a intensidade de deformação admissível sem que seja realizado um alívio de tensões para eliminar os efeitos do encruamento resultante, ou estabelecer as velocidades limites para que o processo apresente um número reduzido de falhas devido à redução da resistência promovida pelo aquecimento resultante da deformação aplicada segundo as expressões:

$$\varepsilon_1 = \ln(h/h_0) \quad (35)$$

$$\varepsilon_2 = \ln(b/b_0) \quad (35)$$

$$\varepsilon_3 = \ln(l/l_0) \quad (36)$$

Onde h_0, b_0 e l_0 são as dimensões iniciais de um paralelogramo e h, b e l são as dimensões de um paralelogramo após deformação.

2.4.4.1.4 Condutividade térmica.

Segundo Kreith⁽²⁶⁾, nas operações realizadas a frio ou naquelas realizadas a quente, a condutibilidade térmica, tanto do material da peça como o material da matriz e punção de forjamento ou outro processo que resulte em geração de calor, assume enorme importância por determinar o fluxo de calor e, por conseqüência, a variação da temperatura do conjunto e por extensão de suas propriedades mecânicas. Neste aspecto o lubrificante apresenta considerável influência por alterar as condições da interface peça-matriz tanto com respeito à resistência térmica como pela alteração do coeficiente de atrito e, portanto, pela modificação na quantidade de energia transformada de mecânica para térmica.

2.4.5 Equacionamento do problema.

Segundo Altan⁽⁶⁾ métodos analíticos e numéricos são aplicáveis na análise dos problemas de conformação do metais. A formulação das hipóteses para a modelação matemática traz diferenças entre os resultados obtidos por um ou outro modelo.

Liu et al.⁽²⁷⁾ ao identificarem no processo a complexidade do fenômeno de conformação da chapa, bem como a dificuldade de uma análise teórica, propuseram

um método para simulação do processo resultando em valores para a deformação alcançada pelo elemento em conformação. Como complemento existe a necessidade de entrada de dados relativos ao comportamento do material, dados estes obtidos em ensaios muitas vezes inexatos.

Na maioria dos processos de conformação, dois valores relativos às propriedades do material são considerados: a tensão de escoamento e o coeficiente de atrito. Este último obtido de forma aproximada porém, permitindo obter-se valores de ordem de grandeza razoável como o esforço e a energia necessários para uma determinada aplicação.

A execução de outras avaliações como análise de camadas (superficial), análise de estrutura (núcleo), método de lâminas, método das diferenças finitas e método de elementos finitos por meio dos modelos físicos e matemáticos também é possível.

A criação de programas de cálculo proporciona um método rápido de obtenção de dados para o projeto de ferramentas, máquinas e produto final. Estudos desenvolvidos por Thiruvardchelvan⁽²⁸⁾ mostram a aplicabilidade deste método no processo de fabricação de produtos envolvendo o uso de chapas finas conformadas.

O efeito mola tem importância destacada na fabricação de tubos soldados em função da tensão introduzida no cordão soldado quando o tubo é aliviado das cargas impostas pelos rolos de calibração. Estudos desenvolvidos por Geng e Wagoner⁽²⁹⁾ mostram o comportamento do material sob efeito mola e sua relação com as tensões resultantes. Yoon et al.⁽³⁰⁾ mostram a condição de predição do retorno elástico por meio de um modelagem em 3 D.

A medição do retorno elástico foi efetuada por Carden et al.⁽³¹⁾ com verificação da tensão resultante no material da peça. Ona⁽³²⁾ relaciona o efeito mola com os defeitos gerados, tanto dimensionais como geométricos, no tubos de pequeno diâmetro e reduzidas espessuras de parede.

Em contraposição aos preceitos estabelecidos no item 2.2, o efeito Bauschinger foi considerado por Gan e Kinzel⁽³³⁾ para determinação precisa da distribuição interna de forças no tubo formado, levando-se em conta a deformação introduzida em cada estação de conformação anterior.

2.4.6 Equipamento utilizado

O equipamento para um determinado processo depende da precisão (dimensional, geométrica), rigidez da ferramenta e do equipamento, tamanho do lote de fabricação, demanda total esperada e efeitos do meio ambiente, tais como temperatura e umidade. A forma desejada, a extensão da conformação, a dimensão da peça, as características do material em conformação direcionam para a seleção da máquina e acessórios.

Os processos de conformação (forjamento, laminação, trefilação e extrusão e outros) exigem a identificação de variáveis e de seus relacionamentos com a máquina

Segundo Altan⁽⁶⁾ as variáveis a serem consideradas podem ser relacionadas como:

σ : Tensão de ruptura do material da peça;

$\dot{\epsilon}$: Taxa de deformação do produto;

V_o : Velocidade de conformação;

t_o : Tempo de contato material / matriz;

θ : Temperatura;

μ : Coeficiente de atrito;

Geometria da peça;

Tolerâncias geométricas e dimensionais da peça;

Em função do processo a máquina terá suas características definidas por:

Rigidez;

Capacidade de carga;

Energia e Potência disponível;

Velocidade e frequência de operações em vazio e em carga

Considerando uma operação de forjamento pode-se esquematizar este relacionamento entre as variáveis e entre estas e a máquina conforme a figura 15 a seguir. As variáveis estão posicionadas de acordo com sua influência. Um parâmetro importante no processo de fabricação é a velocidade de trabalho o que é destacado na interação entre o material, a taxa de deformação que este admite, o tempo de contato entre o material e a matriz e o número de golpes por minuto que a máquina oferece. Outro parâmetro fundamental, relacionado com a quantidade de energia consumida

no processo e com a segurança operacional, é a temperatura de trabalho que é afetada por variáveis como temperatura da matriz, atrito entre a superfície do material e da matriz ou punção, a área de contato caracterizada pela geometria da peça, o tempo de contato influenciando no fluxo de calor, além de, estar ligada ao material e suas propriedades. Como elemento de igual importância destaca-se a precisão dimensional com relação às dimensões especificadas para a peça relacionada com a rigidez e precisão geométrica da ferramenta e com as variações devido à dilatação térmica.

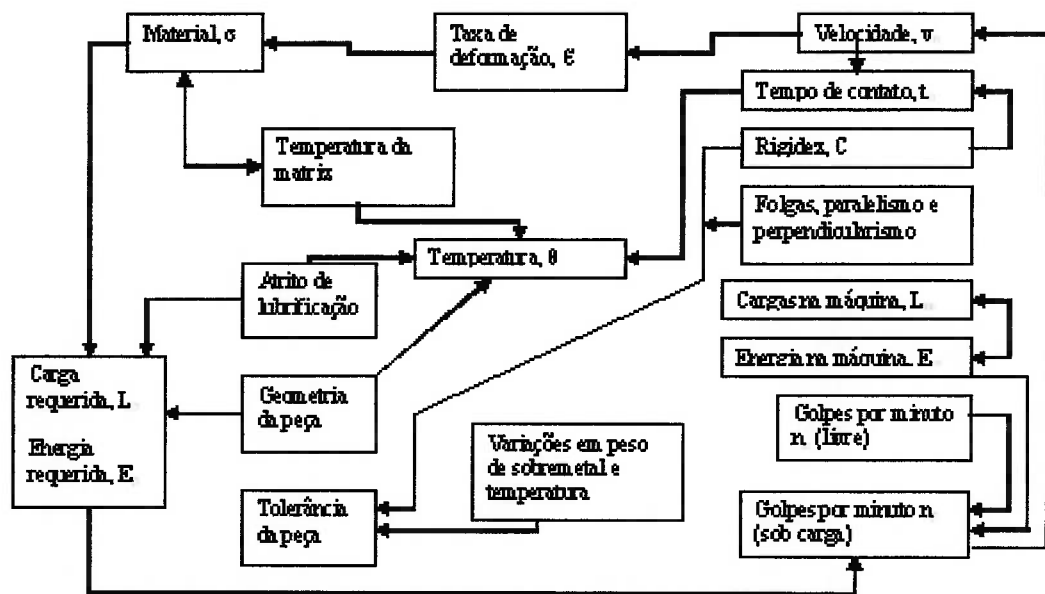


Figura 15 - Relacionamento das variáveis de processo e de máquina ⁽³⁴⁾

Para atender a uma dada seqüência de variáveis são utilizadas máquinas tradicionais com adaptações que contornam um dado problema ou então são projetadas novas máquinas que atendam especificamente a uma solicitação.

Segundo Altan ⁽⁶⁾ seleção do tipo de máquina está relacionada com a forma de demanda da energia na ferramenta, sendo assim é necessário o conhecimento da curva de energia (Energia = Carga x Deformação x M) sendo M o fator característico da operação, obtido no gráfico de carga-deslocamento mostrado na figura 16 a seguir:

Este gráfico denota o processo em execução destacando a influência da deformação na curva. Nas operações de maior deslocamento do material observa-se a variação da carga em função da deformação introduzida salientando na operação de corte a fase de deformação, elevação da carga e a fase de ruptura, redução da carga.

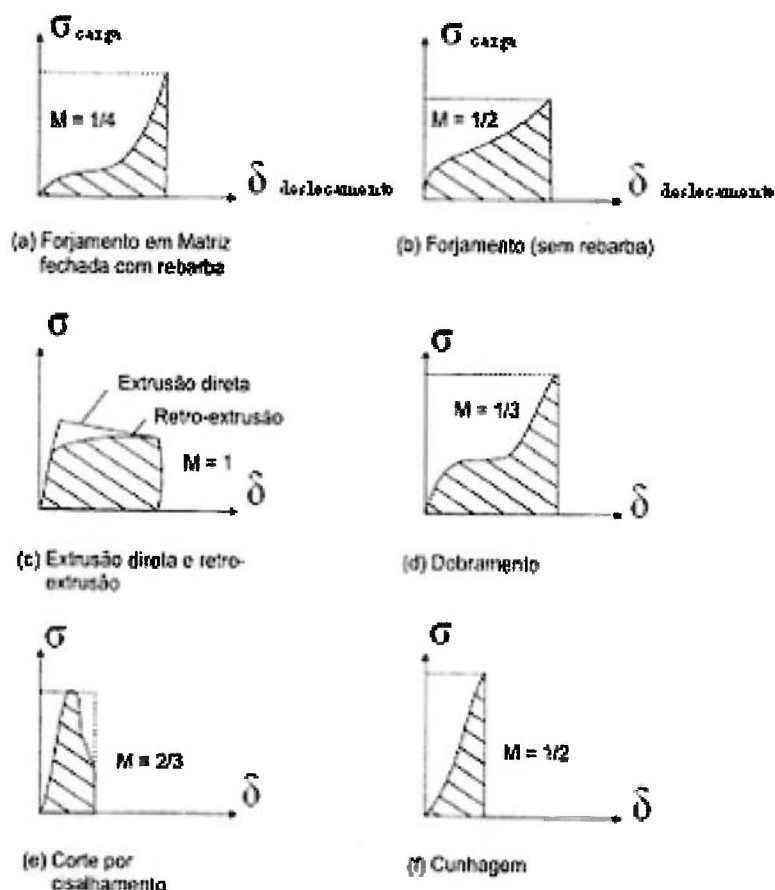


Figura 16 – Curva de carga x deslocamento para várias operações de conformação, destacando a variação da força em função da etapa do processo ⁽⁶⁾

O gráfico específico para a conformação por rolos ou cilindros deve apresentar uma curva constante durante a fase de início até o término da deformação, caracterizando uma distribuição homogênea de carga nas estações de trabalho.

2.4.7 Meio ambiente

A influência do meio ambiente é notada em função das condições do ar (temperatura, velocidade, umidade), instalações e equipamento de produção e controle.

Segundo Kreith ⁽²⁶⁾, em paralelo com as características dos materiais em contato superficial como resistência de contato, condutividade térmica e calor específico, parâmetros como a umidade e velocidade do ar exercem considerável influência sobre o coeficiente de troca de calor por convecção. Portanto, um coeficiente de troca de calor por convecção alto promove uma elevada troca de calor entre a matriz e o ambiente, resultando em rápido resfriamento e alterando as propriedades tanto do material como da matriz ao mesmo tempo em que eleva a temperatura da máquina, alterando sua geometria e desempenho.

A disposição física dos equipamentos tem atuação sobre o tempo de movimentação e de abertura da matriz resultando em maior ou menor troca de calor com o ambiente.

A capacidade e dimensão da máquina determinam a frequência de operação e o tempo de recuperação da temperatura por meio de aquecedores instalados no corpo da ferramenta.

O uso de instrumento de medição adequado no controle de temperatura do interior da matriz reduz o tempo de exposição ao ambiente e, portanto, diminui a perda de calor e a redução da temperatura. No processo de perfilamento com rolos, a lubrificação exerce uma decisiva influência no meio ambiente considerado

2.4.8 Produto final

Segundo Altan ⁽⁶⁾, as características do produto final estão relacionadas com fatores que influenciam sua concepção conforme mostrado na tabela 2 :

Tabela 2 – Fatores de influência sobre o produto ⁽⁶⁾

Características do produto final	Fator de influência
dimensões	rigidez do ferramental
acabamento superficial	condições de interface
propriedades metalúrgicas	microestrutura

Os fatores principais em termos de projeto específico são aqueles relacionados com a microestrutura, que depende do tipo de material , com a velocidade de deformação e com a temperatura da matéria prima.

A geometria da peça exige um dimensionamento do ferramental e o estabelecimento de uma forma geométrica que, em paralelo ao módulo de elasticidade do material, resulta em um conjunto de rigidez adequada à solicitação. Contudo, conflitos com a disposição adequada na máquina impõem adaptações que podem afetar a rigidez.

O acabamento superficial, tanto em termos de rugosidade como na dureza e recobrimento da superfície, altera o coeficiente de atrito e os esforços de conformação.

As propriedades metalúrgicas estabelecem as condições para ter-se o atrito entre as superfícies, o nível de desgaste do ferramental e ditam as velocidades favoráveis de deformação.

2.4.9 Classificação dos processos

Para possibilitar um estudo dirigido do processo de conformação Altan⁽⁶⁾ estabelece a seguinte classificação:

a) Segundo a temperatura de trabalho:

A quente (quando realizado acima da temperatura de recristalização)

A frio (quando realizado à temperatura ambiente)

b) Segundo a forma:

Maciço (volume)

Chapas (laminas ou folhas)

c) Segundo a solicitação:

Compressão: Forjamento em matrizes abertas ou fechadas, extrusão, laminação;

Tração: Trefilação, embutimento, conformação por rolos;

Flexão: Dobramento, flangeamento;

Cisalhamento: Corte longitudinal, estampagem, puncionamento.

2.4.10 Vantagens do processo de conformação dos metais

Comparando com os demais processos de fabricação, o processo de conformação apresenta as seguintes vantagens:

- a) Pouco ou nenhum desperdício de material;
- b) Redução de tempo para obtenção da forma final;
- c) Melhores propriedades mecânicas e metalúrgicas tais como resistência, ductilidade e tamanho de grão.

2.5 Tubos de aço

Tubos de aço são produzidos a partir de diversos processos de fabricação. A extrusão, a mandrilagem e laminação passo peregrino, caracterizam a fabricação de tubos sem solda ou sem costura, enquanto que a conformação por rolos que apresenta duas formas básicas, caracteriza os tubos soldados: com costura helicoidal e com costura longitudinal, esta obtida pelo uso de rolos em estações contínuas e pela conformação por sino.

2.5.1 Extrusão

A extrusão que consiste na passagem forçada do material por meio de uma matriz apresenta como fator de limitação mecânica a tensão de deformação do material, exigindo o aquecimento para redução dos esforços, e como limitação econômica o comprimento da peça extrudada.

No equipamento destacam-se: a câmara de contenção da matéria prima, o embolo de compressão, o mandril para obtenção do diâmetro interno e a matriz de conformação para o diâmetro externo do tubo. A figura 17 apresenta o esquema básico do processo de extrusão.

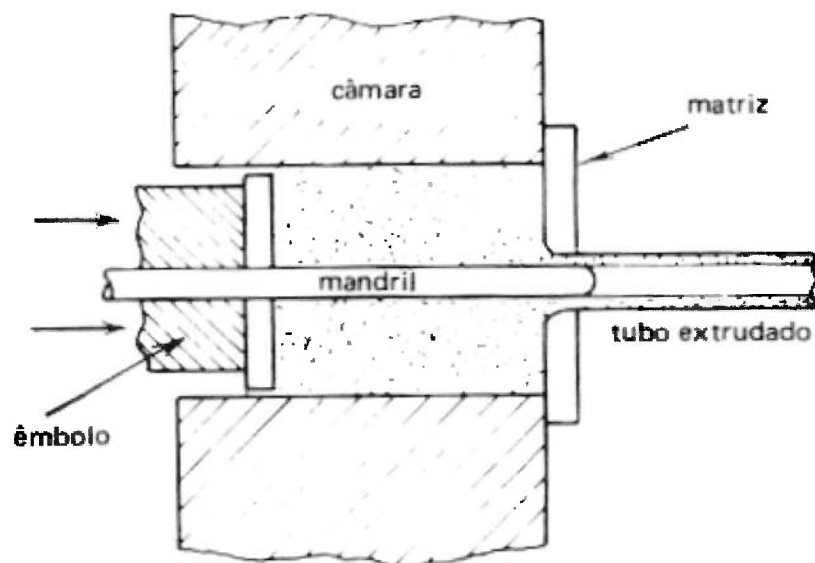


Figura 17 - Processo de extrusão de tubos⁽³⁵⁾

A produção de tubos pode ser feita por meio da extrusão inversa obtendo-se um corpo cilíndrico com uma das extremidades fechada, com posterior corte por usinagem conforme esquematizado na figura 18.

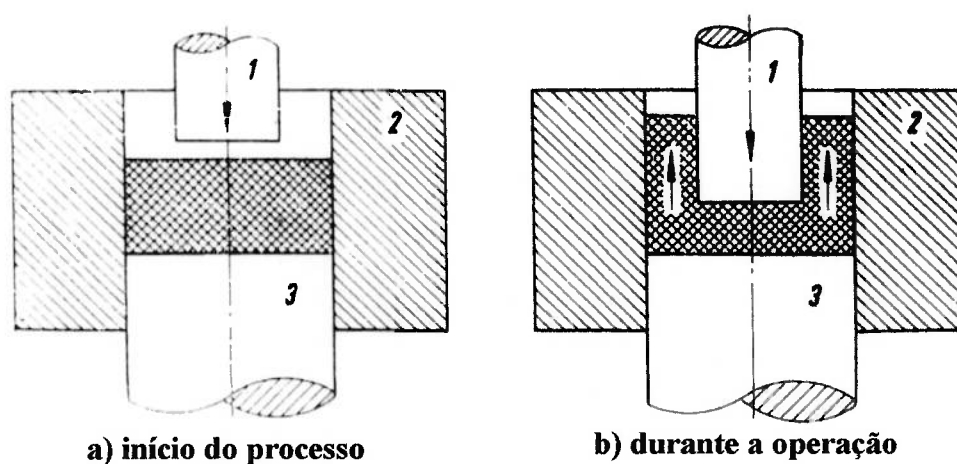


Figura 18 - Processo de extrusão inversa de tubos⁽²⁰⁾

2.5.2 Mandrilagem

Segundo Gruning⁽²⁰⁾, o processo de mandrilagem, também denominado Mannesmann, caracteriza-se pela conformação de um tarugo aquecido colocado entre cilindros, inclinados entre si no plano horizontal (laminação oblíqua) e com

movimento de rotação de mesmo sentido. Esta configuração introduz um movimento helicoidal ao tarugo maciço, movimentando-o para frente de encontro a um mandril, conformando o diâmetro interno. Este sistema é mais econômico do que o de extrusão e permite a obtenção de tubos sem costura (não soldados). A figura 19 ilustra a seqüência do processo Mannesmann.

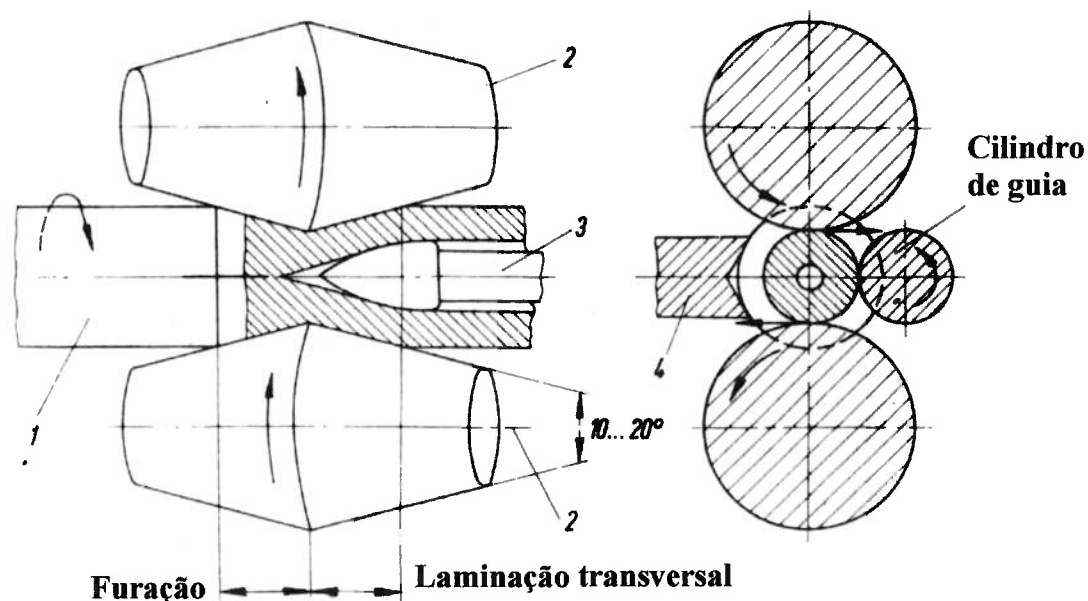


Figura 19- Processo Mannesmann para produção de tubos sem costura⁽²⁰⁾

Como variação do processo são aplicados outros métodos para conformação de tubos a partir de tubos de maior diâmetro, utilizando cilindros com eixos perpendiculares à linha axial do tubo, permitindo diâmetros maiores, visto na figura 20 (a) e utilizando cilindros inclinados em relação à linha axial do tubo, visto na figura 20 (b), propiciando um acabamento polido nas superfícies interna e externa ao mesmo tempo em que elimina a ovalização presente no processo anterior de fabricação do tubo utilizado como matéria prima.

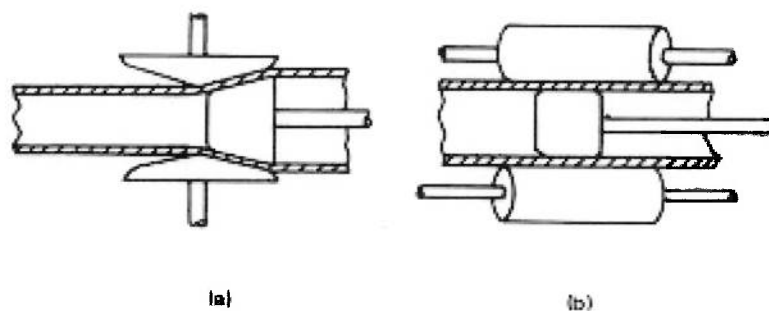


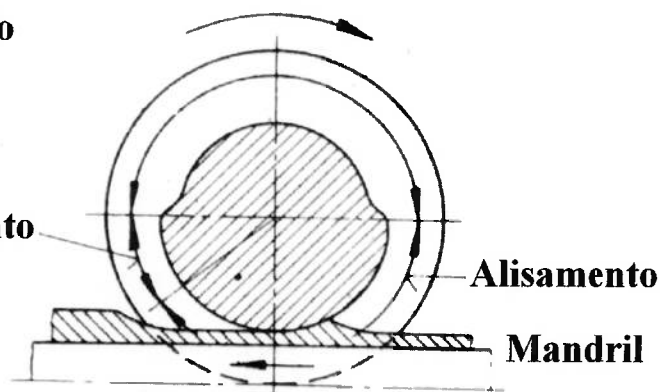
Figura 20- Laminação de tubos a partir de tubos de maior diâmetro ⁽³⁵⁾

2.5.3 Laminação passo peregrino

Utilizada na fabricação de tubos com parede fina e que, conforme Gruning ⁽²⁰⁾, consiste no estiramento e alisamento sobre um mandril, durante meia rotação dos rolos, com perfil de um camo especial, com retorno rápido do tubo na meia rotação restante seguida de uma rotação axial do tubo colocando uma nova geratriz alinhada com os rolos laminadores. Na figura 21 esta representa a seqüência de operação.

a) Laminação

b) Estiramento



b) Avanço e rotação

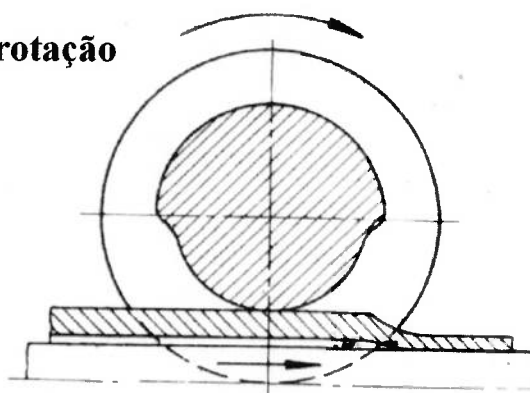


Figura 21 - Fabricação de tubos pelo processo passo peregrino ⁽²⁰⁾

2.5.4 Conformação por sino

Historicamente encontramos menção à conformação em sino desde o início do século XX. O método utiliza a elevação da temperatura do material até a temperatura de soldagem e aproveita a redução da resistência à deformação proporcionada pela temperatura acima da temperatura crítica para permitir a passagem por estiramento por meio de uma matriz em forma de sino. A figura 22 esquematiza o processo de conformação por sino.

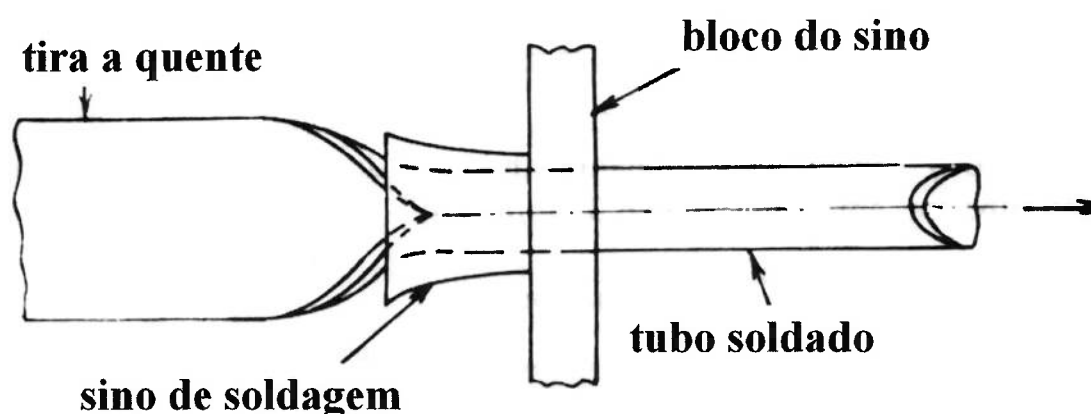


Figura 22 - Método de conformação por sino (trefilação)⁽¹⁹⁾

A união das bordas é obtida por caldeamento, permanecendo o reforço do cordão na parte interna do tubo conforme mostra a figura 23.



Figura 23 – Reforço interno do cordão de solda caldeado

2.5.5 Laminação a frio

Utilizado na fabricação de tubos com parede fina como processo alternativo ao processo de laminação por passo peregrino, apresenta como vantagens maior precisão dimensional, simetria rotacional. Estas características são provenientes da utilização de equipamentos CNC no controle de posicionamento e aplicação de força em rolos posicionados em espaçamentos de 120° conforme figura 24.

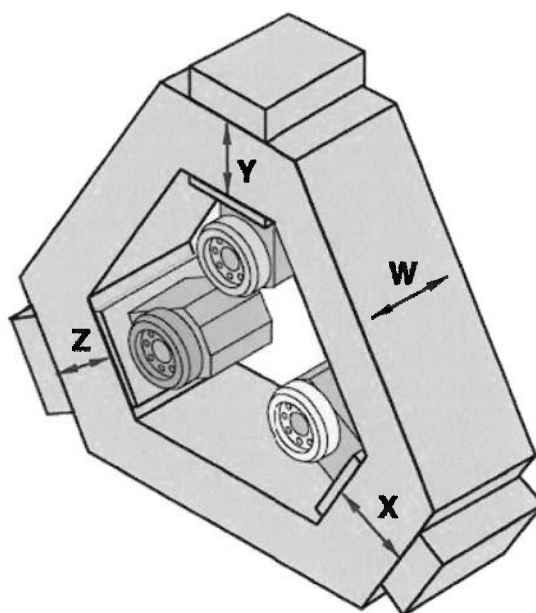


Figura 24 – Disposição dos rolos em uma estação de conformação a frio⁽³⁶⁾

A ação dos rolos pode ser esquematizada com a apresentação simultânea sobre o material dos três rolos dispostos nas direções X, Y e Z, conforme a figura 25.

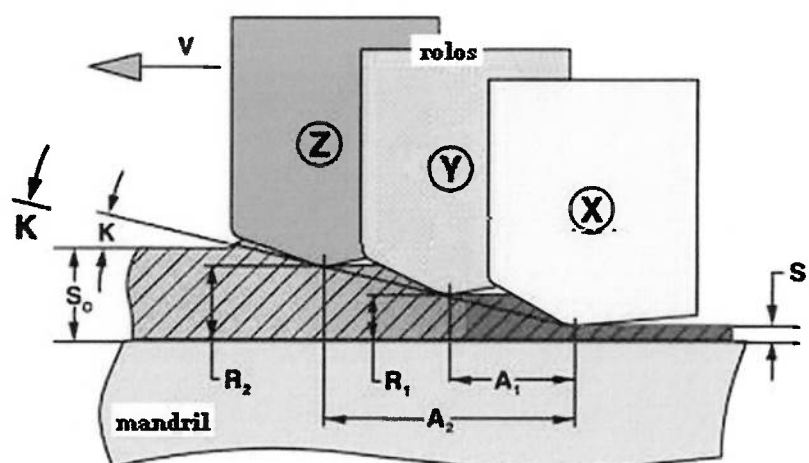


Figura 25 – Esquema de distribuição de cargas sobre o material a conformar⁽³⁶⁾

A defasagem entre os planos de rotação dos rolos induz um movimento axial comprimindo o material de encontro ao mandril e reduzindo a espessura aos valores desejados.

2.5.6 Conformação por rolos

A formação de perfis ou contornos por rolagem é um processo para transformação de chapas metálicas ou lâminas em formas desejadas com seção transversal constante e uniforme, por meio da passagem da chapa por uma seqüência de estações de trabalho equipadas com discos ou rolos perfilados, dispostos aos pares ou com mais elementos (Han et al.⁽³⁷⁾).

A norma DIN 8583 Pressure forming⁽³⁸⁾ categoriza o processo de conformação por rolos como aquele que utiliza ferramentas com movimento rotatório para dobramento longitudinal. Durante este processo uma fita de bobina ou uma chapa é conformada em um processo contínuo ininterrupto para produzir perfis com a ajuda de rolos de compressão. Com esta finalidade a chapa a conformar passa sucessivamente por uma série de rolos perfilados de acordo com uma determinada seção transversal. Uma estação é composta da chapa entre dois ou mais pares de rolos de compressão.

A deformação da tira de metal ocorre de forma contínua segundo etapas demonstradas na figura 26, a seguir::

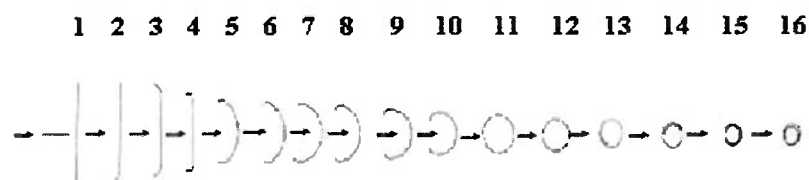


Figura 26 – Seqüência de passes de conformação de perfis tubulares⁽³⁹⁾

A vantagem deste processo de conformação em relação a outros métodos, é a de permitir que lâminas de qualquer comprimento possam ser conformadas em velocidades relativamente elevadas. O cálculo e o dimensionamento de um processo de conformação podem ser obtidos por meio de programas específicos, COPRA⁽⁴⁰⁾. O estabelecimento de uma seqüência de deformações permite a distribuição de tensões ao longo da linha de conformação, evitando heterogeneidade nas tensões resultantes e garantindo melhor aproveitamento da potência motora do equipamento. A figura 27 ilustra a seqüência de passagem do material por meio das ferramentas na forma de rolos, formando pares de conformação.

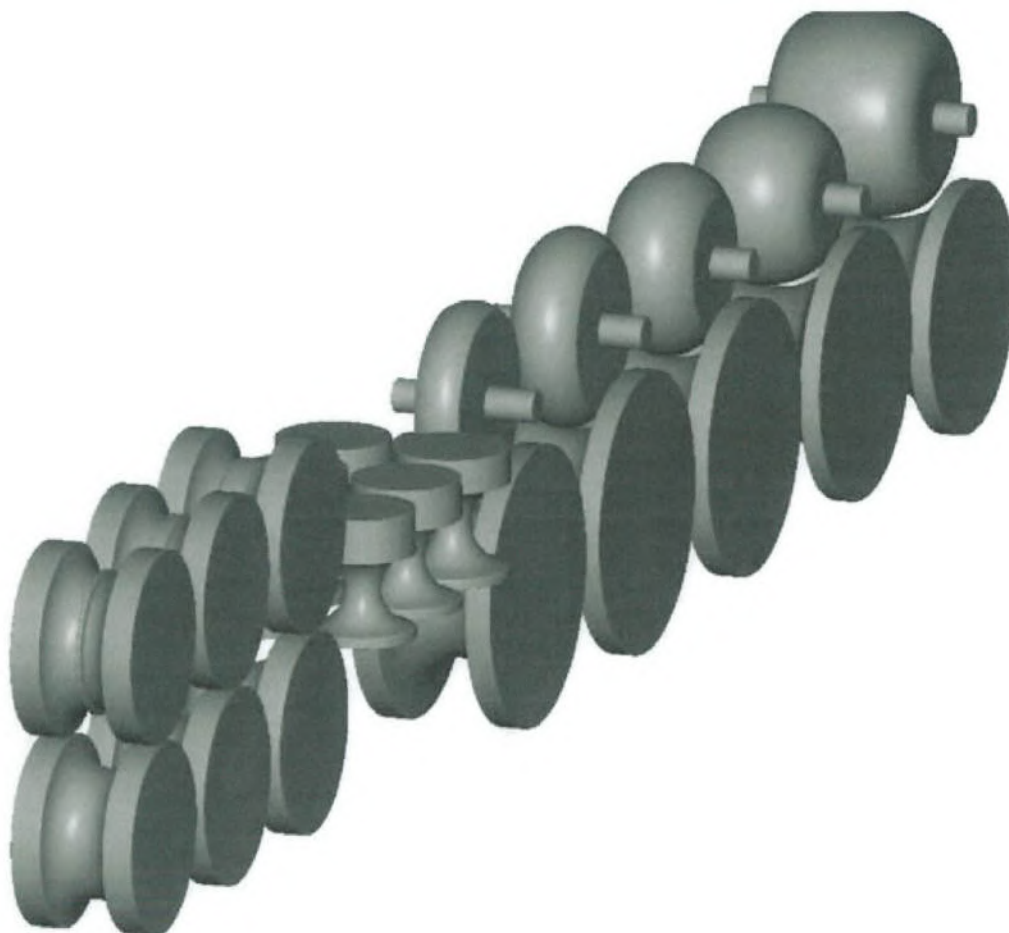


Figura 27 - Seqüência de passagem da chapa pelos rolos de conformação⁽⁴¹⁾

2.5.7 Seções geométricas básicas

A seção do perfil desejado é produzida passo a passo utilizando uma combinação de formas básicas simples dos rolos.

- a) Rolagem: a lateral de um perfil é formada por mais de 180° com redução da seção;
- b) Envelopamento: as laterais retas são dobradas passo a passo em torno de um ponto comum;
- c) Nervuramento: são criadas protuberâncias contínuas ou nervuras para reforço estrutural da chapa;
- d) Dobramento: o material é dobrado a 180° sobre si mesmo.

2.5.8 Tipos de perfis

Pela combinação de formas básicas podem ser manufaturadas quaisquer seções, abertas ou fechadas por processos de soldagem ou cravação conforme exemplos mostrados na figura 28 a seguir:

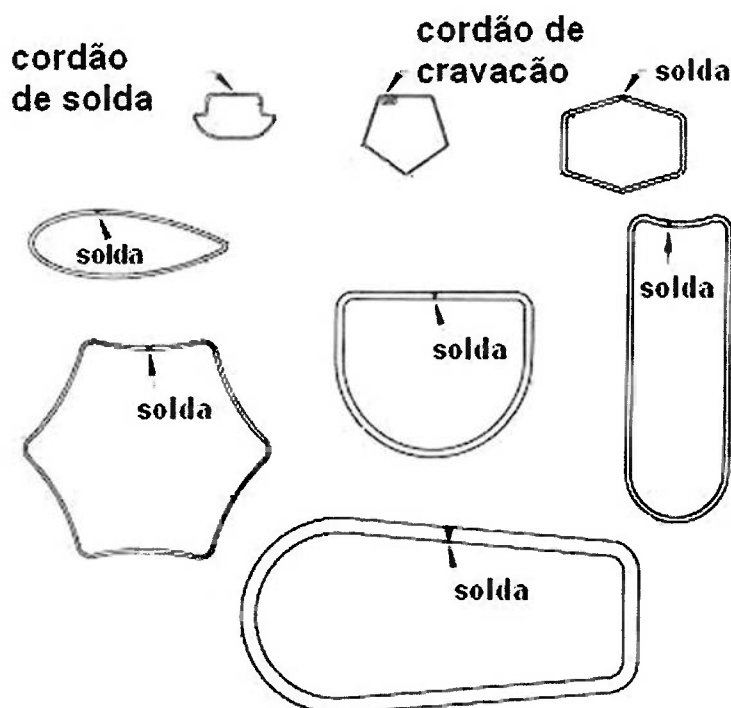


Figura 28 - Tipos de perfis fechados conformados por rolos ⁽⁴⁰⁾

2.5.9 Linhas de conformação por rolos

As linhas são classificadas de acordo com dois diferentes modos operacionais com elevada influência sobre a produtividade.

2.5.9.1 Linha intermitente

O equipamento de conformação para uma linha intermitente por rolos é formado por um desbobinador, um pulmão de compensação, estações de conformação e uma ferramenta de separação. Caracteriza-se pelo funcionamento interrompido da linha sendo o comprimento determinado pelo número de estações de conformação.

2.5.9.2 Linha contínua

O sistema para linha contínua opera à velocidade constante sendo este tipo de linha utilizado para processar chapas de metal ou laminas para produzir perfis de longo comprimento com seção transversal constante. Utilizando tiras de metal já cortadas no comprimento ou utilizando corte automático após a conformação este processo permite obter-se tubos de comprimentos controlados.

A vantagem do corte prévio da tira no comprimento desejado e a de ser utilizada uma tesoura guilhotina simples, enquanto que no processo de corte posterior à conformação o dispositivo de corte torna-se dispendioso à medida que diferentes perfis com formas e dimensões variadas são fabricados.

Como desvantagem deste procedimento tem-se a necessidade de alimentação da chapa a cada ciclo da máquina, reduzindo a produtividade.

Para que o processo seja contínuo é necessário que a matéria prima tenha o comprimento adequado tendo-se como vantagens a redução dos esforços de conformação em função da deformação inicial e a elevada produtividade com perfis de grande comprimento unitário.

Este processo se torna essencial quando são incorporadas operações como soldagem, união por adesivos ou aplicação de espumas ou ainda quando as massas dos componentes a serem acelerados são elevadas.

Para possibilitar a mudança do perfil em fabricação são adicionados à linha sistemas de compensação, permitindo o corte e a substituição rápida de rolos para novos perfis, e de soldagem, permitindo a união de bobinas para alimentação seqüencial.

2.5.10 Influência do tempo de montagem das ferramentas rotativas

Os tempos de manutenção ou os tempos de preparação da máquina para operações de conformação devem ser reduzidos ao máximo para garantir a produtibilidade do processo. No caso de linhas de produção, quer seja em máquinas individuais ou em máquinas seqüenciais, o planejamento e o gerenciamento do tempo são etapas de extrema importância para o sucesso do empreendimento. O projeto do equipamento deve ser de tal ordem que as manobras a serem realizadas o sejam dentro de uma

seqüência e simplicidade que garantam a precisão de preparação e o máximo rendimento operacional.

No sistema, assim considerado por apresentar diversos equipamentos combinados para realização de um determinado trabalho, o processo de conformação por rolos apresenta versatilidade na linha com a montagem das ferramentas rotativas em blocos rígidos, em fixações telescópicas ou diretamente acopladas aos redutores de velocidade por juntas universais ou cruzetas interligadas a eixos cardã.

O sistema de rolos de largura ajustável, obtida pela introdução de buchas espaçadoras, permite a manufatura de produtos com dimensões variadas a partir do mesmo jogo de ferramentas, enquanto que o sistema de substituição dos rolos de perfil permite a obtenção de seções compactas com dimensões fixas, porém, com a introdução de espaçadores, é possível obter-se seções com dimensões diferentes.

A figura 29 mostra uma estação típica de rolos, destacando a condição de ajuste na largura ou distância entre os suportes dos mancais. Um fuso de rosca micrométrica, colocado em cada suporte permite o ajuste da distância entre rolos e portanto da espessura da chapa a ser conformada. Para garantir a precisão de ajuste o comando dos fusos pode ser simultâneo com o uso de um mecanismo de interligação ou de motores de passo controlados por CNC.

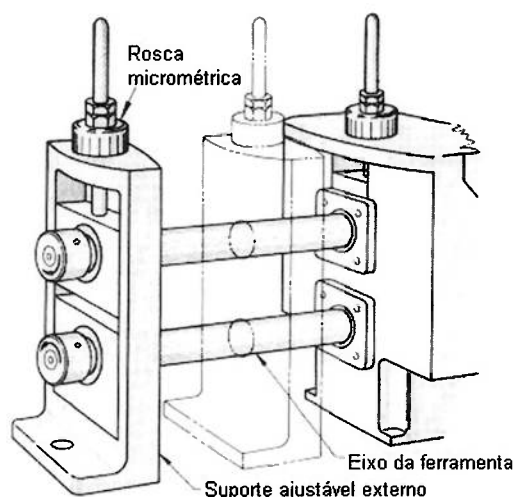
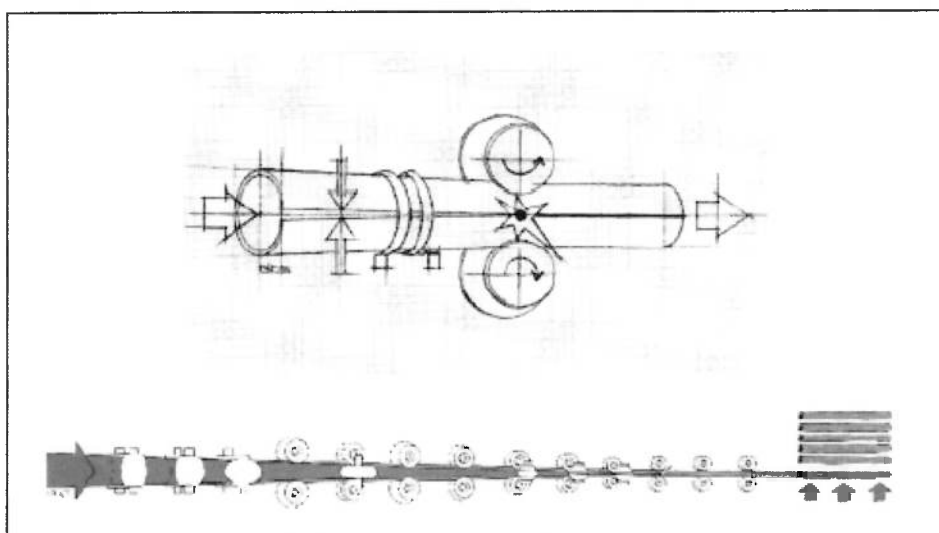


Figura 29 - Estação de rolos de conformação ajustável⁽⁴²⁾

A deformação ocorre progressivamente da chapa plana até o perfil desejado como visto esquematizado na figura 30, em um número de estações adequado para o grau de deformação a ser atingido conforme apresentado na figura 31.



Source: V.W. Werke Vincencz Widerholt GmbH

Figura 30 – Esboço da conformação de tubos⁽⁴³⁾

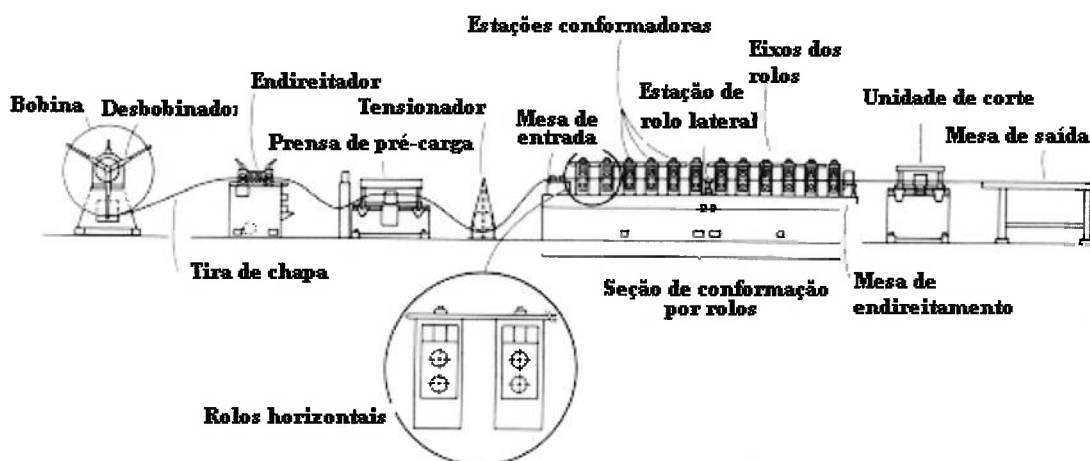


Figura 31 – Instalação para conformação por rolos com alimentação por bobinas, método de corte posterior⁽⁴²⁾.

O método de rolagem permite o trabalho a frio e a forma é obtida pela conformação imposta pelos cilindros que, por meio do atrito, movimentam a tira de material dando-

lhe a forma de um perfil fechado de seção circular. Neste caso a soldagem é obtida por resistência ou por abertura de arco (TIG ou Plasma).

A figura 32 apresenta a linha de conformação de tubos com costura longitudinal com a presença de uma mesa de soldagem da chapa plana (item 2), um corpo de armazenagem ou pulmão (item 3) e de uma estação de soldagem (item 6) em adição aos demais conjuntos, permitindo o trabalho contínuo por meio da alimentação da chapa proveniente de diferentes bobinas, interligadas por soldagem de topo.

O refugo do produto, originado pela soldagem transversal da tira, é compensado pela redução do tempo de alimentação e pela redução do comprimento comprometido na passagem inicial sobre os rolos de conformação.

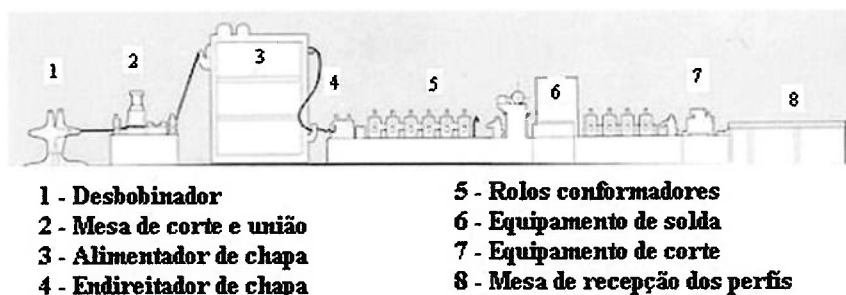


Figura 32 - Identificação dos componentes de uma linha de conformação⁽⁴²⁾

O processo de deformação por rolagem, para a fabricação de perfis formados a frio, tem sua importância relacionada com a alta produtividade e boa precisão dimensional aliadas às propriedades obtidas nos produtos finais. Com marcante implementação no início de 1900, este processo apresentou evolução no sistema de acionamento das ferramentas e no sistema de motorização com vista à crescente necessidade de aumento da produtividade e da qualidade do produto final⁽⁴³⁾.

Apesar da simplicidade e da fácil visualização o procedimento conta com a influência decisiva da experiência do funcionário na condução do processo de desenvolvimento do ferramental e da operação do sistema. O uso dos recursos da informática possibilita o desenvolvimento de máquinas e equipamentos de conformação por rolos, evidenciado pelos tipos construtivos comercializados atualmente.

O tipo clássico denominado Estilo M é o de maior difusão, tendo sido o padrão industrial por anos e ainda utilizado atualmente. Apresenta como vantagem o uso da

transmissão por engrenagens mas, traz também as limitações deste método como precisão de usinagem, rigidez da estrutura de suporte e a reduzida distância entre centros. A figura 33 mostra uma seção transversal da estação destacando o trem de engrenagens de acionamento dos eixos das ferramentas e sua mobilidade em função da necessidade de modificação da distância entre centros dos diversos conjuntos de rolos.

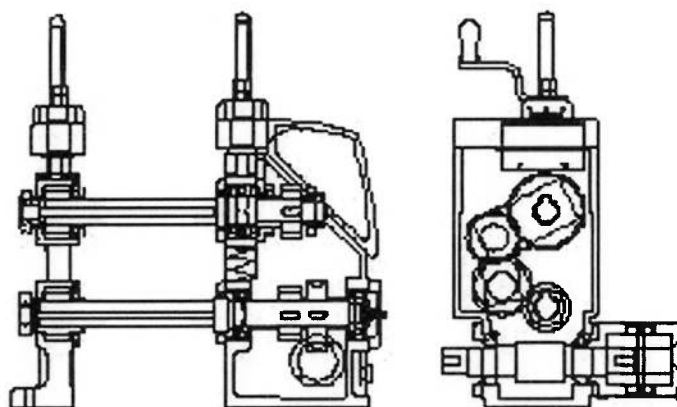


Figura 33 - Estação de conformação com transmissão Estilo M⁽⁴⁴⁾

2.5.11 Técnicas substituição de ferramentas em estações de rolos

A substituição das ferramentas geralmente é feita pelo deslocamento da coluna de sustentação frontal, porém com elevado tempo de manobra. Procura-se reduzir o tempo de manobra com a troca do conjunto completo de rolos superior e inferior, garantindo maior precisão dimensional.

A evolução do processo relacionou-se com a necessidade de redução do tempo de troca das ferramentas, o qual é majorado pelo ajuste das engrenagens de acionamento. O estudo dos elementos de transmissão permitiu a adaptação de elementos tradicionais como as transmissões por cruzetas roletadas como mostrado esquematicamente no acionamento por junta universal OVM na figura 34.

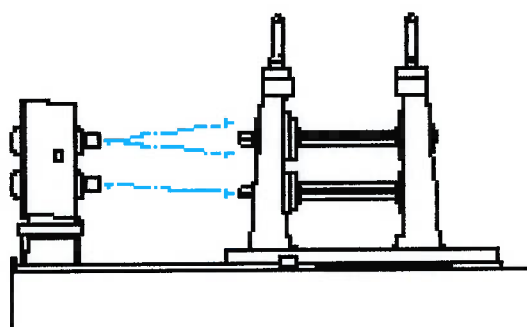


Figura 34 - Estação de conformação com transmissão Estilo OVM⁽⁴⁴⁾

A substituição de trens de engrenagens por juntas universais tipo Cardan permite a redução de partes móveis, evitando a desmontagem do trem de engrenagens e reduzindo os erros advindos da sequência de operações. Entretanto esta concepção OVM apresenta um fator de limitação na dimensão do tubo ou na faixa de trabalho da máquina por reduzir o levantamento do eixo superior e o abaixamento do eixo inferior.

O Estilo OVW representa o estado da arte no sistema de transmissão, incorporando o conceito de rigidez do conjunto possibilitando maior durabilidade e flexibilidade. A figura 34 esquematiza a montagem e os acessórios que garantem maior velocidade operacional. Destaca-se a transmissão por eixos telescópicos WH que proporciona maior faixa de diâmetros disponíveis para fabricação dos tubos.

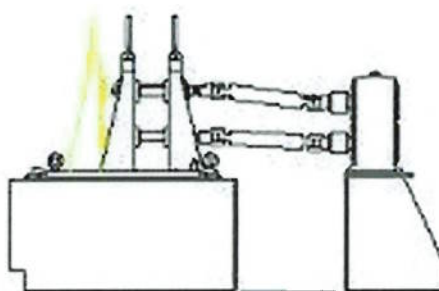


Figura 35- Estação de conformação com transmissão Estilo WH⁽⁴⁴⁾

2.5.12 Qualidade do produto final

O suprimento de matéria prima comercial não garante a espessura dentro dos padrões exigidos para tubos que serão posteriormente usinados para a forma e

dimensão final. Dentro do objetivo de obter-se um tubo com maior qualidade incorporou-se ao sistema uma mesa de laminação com a função de garantir a uniformidade da espessura do tubo fabricado por meio de sensores incorporados à linha, que atuam no sentido de afastar ou aproximar os cilindros de laminação mantendo a espessura da parede do tubo dentro dos limites aceitos pelo usuário intermediário ou final . A figura 36 esquematiza a linha modificada.

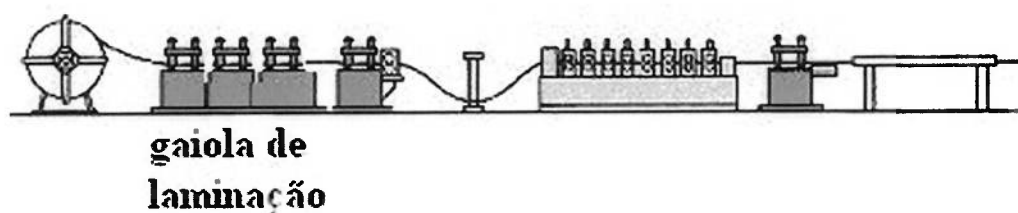


Figura 36 – Linha de conformação com laminador

Como elemento de controle são incorporados sensores de espessura que garantem, por meio da movimentação dos rolos, a uniformidade de espessura do tubo ou perfil conformado.

2.5.13 Soldagem do tubo

O sistema de soldagem atua como parte integrante da linha de conformação e como limitador de velocidade de deslocamento da tiras metálicas, sendo crítica a qualidade do cordão de solda obtido. A figura 37 exemplifica o processo básico de união por resistência destacando os componentes principais, ou seja, os rolos de compressão, a bobina de aquecimento por indução e a ferramenta de acabamento externo por remoção do reforço de solda. A união se dá por caldeamento em função da pressão exercida pelos rolos de compressão

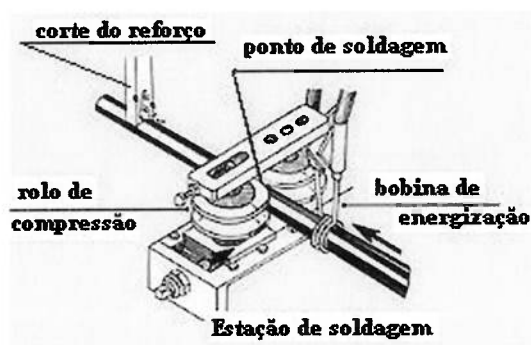


Figura 37- Estação de soldagem por resistência ⁽⁴⁴⁾.

Uma variação para o processo de soldagem é a soldagem por resistência com o aquecimento provocado pela passagem da corrente por meio do material, como no aquecimento indutivo porém, com limitação das linhas de corrente ao trecho requerido para a soldagem com a aplicação de conjuntos de imas cilíndricos (impeder) que impedem, por meio de campo magnético, a distribuição da corrente por toda a seção do tubo em formação, concentrando o calor gerado pela passagem da corrente na borda a ser unida, como visto na figura 38 a seguir:

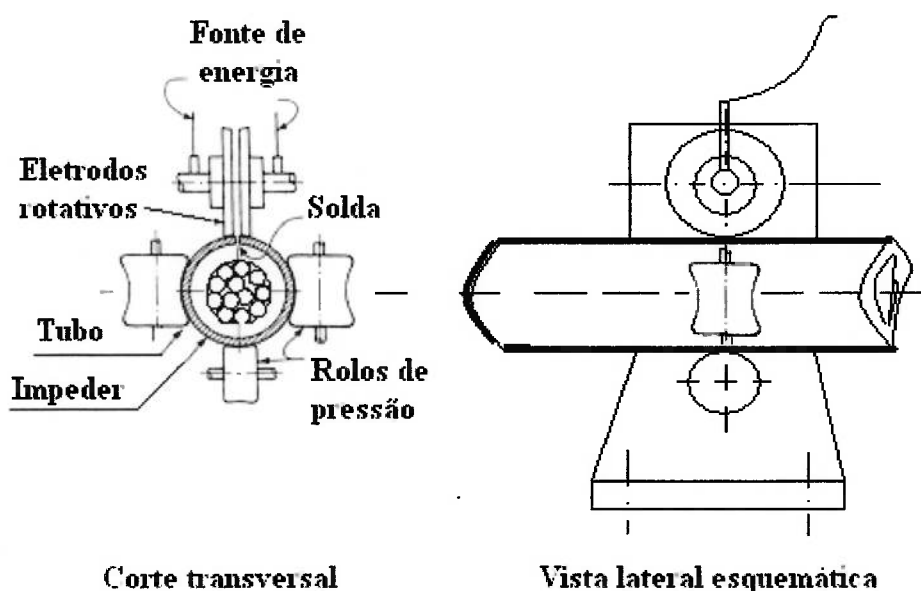


Figura 38 – Vista em corte da estação de soldagem ⁽⁴⁴⁾

Tendo em vista o desenvolvimento dos métodos matemáticos de análise por elementos finitos, o dimensionamento de uniões soldadas apresenta significativa

evolução tecnológica permitindo obter-se dados sobre o comportamento previsível do material base e do cordão de solda formado sem a adição de outro material. Programas que trazem informações úteis para o estudo de casos estão disponíveis como por exemplo o desenvolvido pela COPRA ⁽⁴⁰⁾, destacado na figura 39, com modelagem sólida da forma do tubo e das ferramentas de conformação, destacando a região termicamente afetada pela corrente elétrica.

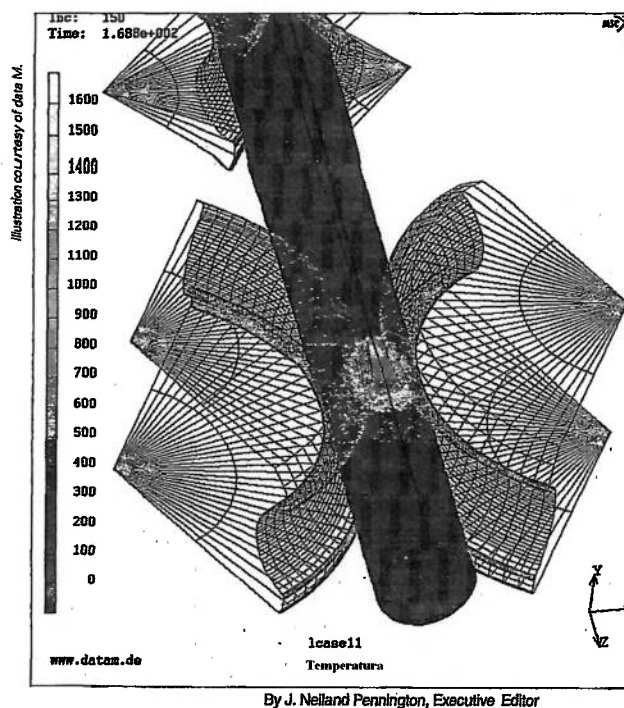


Figura 39 - Modelagem por elementos finitos do processo de soldagem longitudinal de tubos ⁽⁴⁰⁾.

A soldagem a LASER, utilizada para tubos de aço inoxidável resulta em uniões mais dúcteis do que as obtidas em outros processos, de forma adequada à aplicação deste produto porém, com um custo mais elevado e controle mais rígido de processo.

A soldagem TIG é utilizada para aumento da velocidade de operação juntamente com o aumento da resistência da união em função do menor efeito térmico no material base ⁽⁴⁶⁾ devido ao direcionamento do arco voltaico formado. O aumento da velocidade é esquematizado na figura 40, destacando-se a curva teórica inscrita na faixa determinada para os valores máximos e mínimos admissíveis. A área de uso é

delimitada em função do processo de soldagem utilizado com destaque para o uso normal e as extrapolações possíveis

Velocidade de soldagem

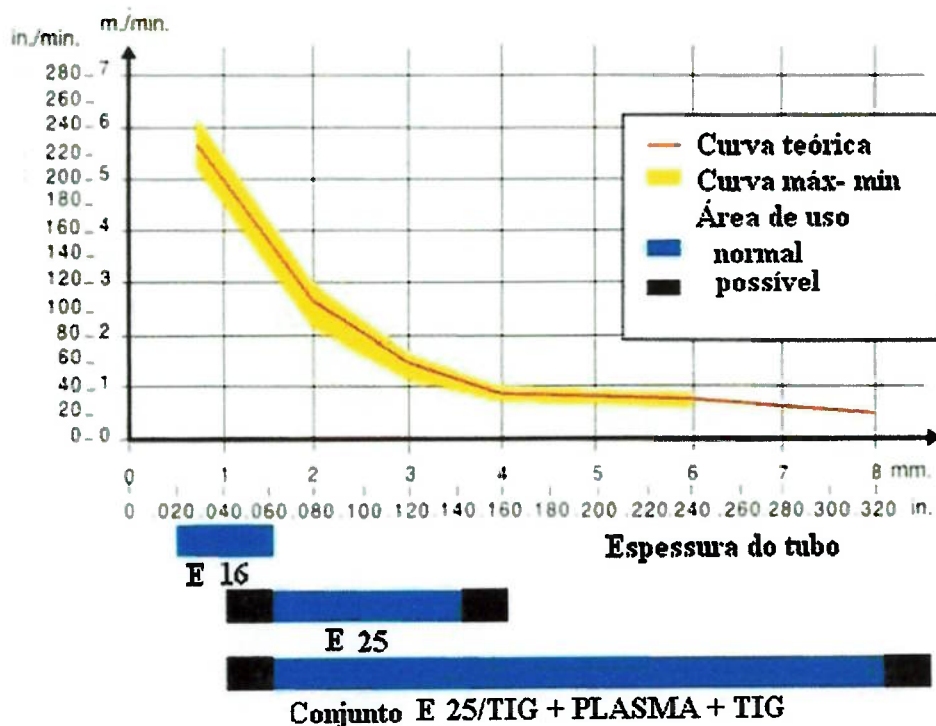


Figura 40- Velocidade de soldagem do tubo ⁽⁴⁶⁾.

Segundo Prasek ⁽⁴⁷⁾ a soldagem pode ser efetuada tanto por eletrodos rotativos de baixa frequência como por alta frequência.

A soldagem por resistência por alta frequência e a por indução por alta frequência conforme figura 41, para tubos de diâmetro até 25 mm tem aplicação mais recente permitindo obter-se resultados satisfatórios tanto para espessuras de 0,13 mm como para espessuras até 19 mm enquanto que para a soldagem por eletrodos rotativos de baixa frequência a espessura máxima economicamente viável é de até 4,5 mm.

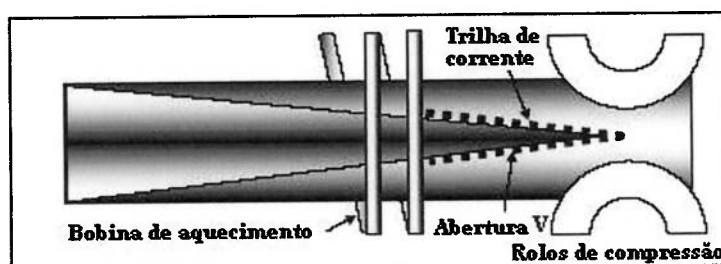


Figura 41 – Soldagem por indução ⁽⁴³⁾

A resistência do conjunto soldado é avaliada segundo a norma ABNT que verifica o valor da tensão de ruptura e de deformação da junta soldada bem como a influência da zona termicamente afetada.

A corrente elétrica gerada tanto pelo contato com os eletrodos como pela indução eletromagnética, flui por meio do condutor conforme a figura 42, no caso a tira de metal em processamento, elevando sua temperatura até o ponto de fusão em um espaço de tempo suficiente para que o deslocamento longitudinal do tubo permita que a zona de pressão gerada pelos rolos de compressão seja alcançada como visto na figura 41.

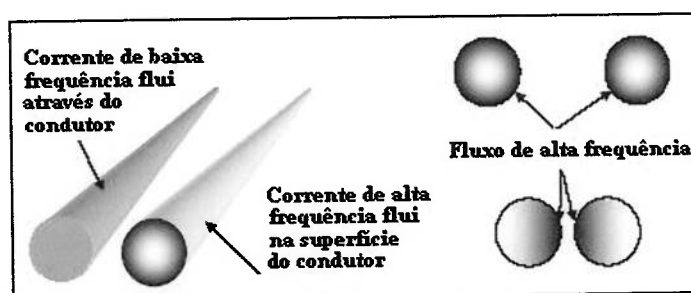


Figura 42 – Corrente de aquecimento no metal ⁽⁴³⁾

A circulação da corrente em toda a superfície da tira resulta em dispersão do calor exigindo elevada potência para o aquecimento até o ponto de fusão e alterando as características do metal impedindo sua correta conformação. Um limitador da corrente induzida é colocado no interior do tubo em formação concentrando-a nas bordas a serem unidas conforme visto na figura 43.

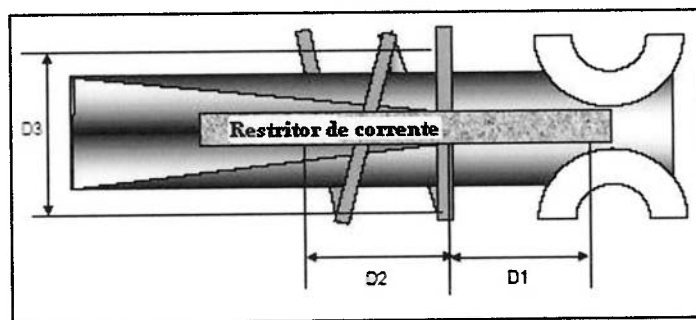


Figura 43 – Controle de distribuição de corrente por meio da tira de metal ⁽⁴³⁾

O dimensionamento adequado possibilita um controle mais eficaz da qualidade do cordão de solda e da resistência do tubo formado. A utilização de conjuntos indutivos montados de modo a preencher a cavidade do tubo em formação ao mesmo tempo em que se obtém um fluxo de líquido refrigerante suficiente para a manutenção da temperatura do restante do tubo durante a soldagem resulta em melhor qualidade.

A qualidade do cordão de solda obtido está relacionada com a união correta das bordas e é altamente sensível a variações nos parâmetros do processo de soldagem. Valores como intensidade de corrente, voltagem, tempo de compressão, velocidade da tira, temperatura do sistema devem ser estabelecidos por meio de folhas de operação com descrição precisa do procedimento operacional.

A seleção das ferramentas apresenta enorme influência como pode ser observado na figura 44, destacando o comportamento do chanfro V em função das dimensões dos rolos de compressão.

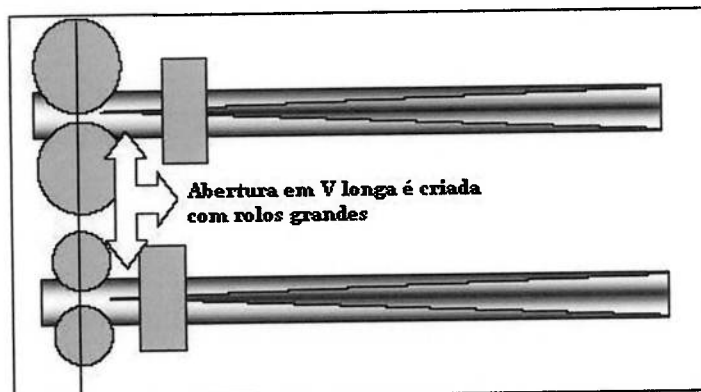


Figura 44 – Influência da dimensão do rolo na abertura entre bordas ⁽⁴³⁾

O posicionamento do vértice da abertura V na linha de centro dos rolos de compressão deve ser mantido durante a realização do processo. A figura 45 ilustra este posicionamento.

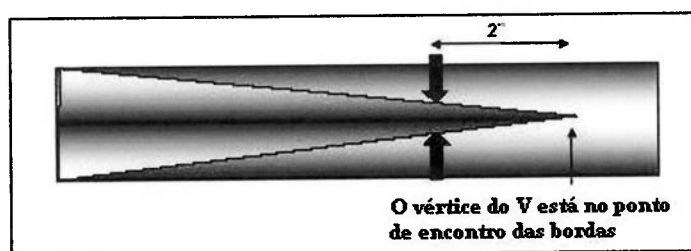


Figura 45– Distância de manutenção do vértice da abertura⁽⁴³⁾

A seqüência de passos para a ocorrência da soldagem é esquematizada na figura 46

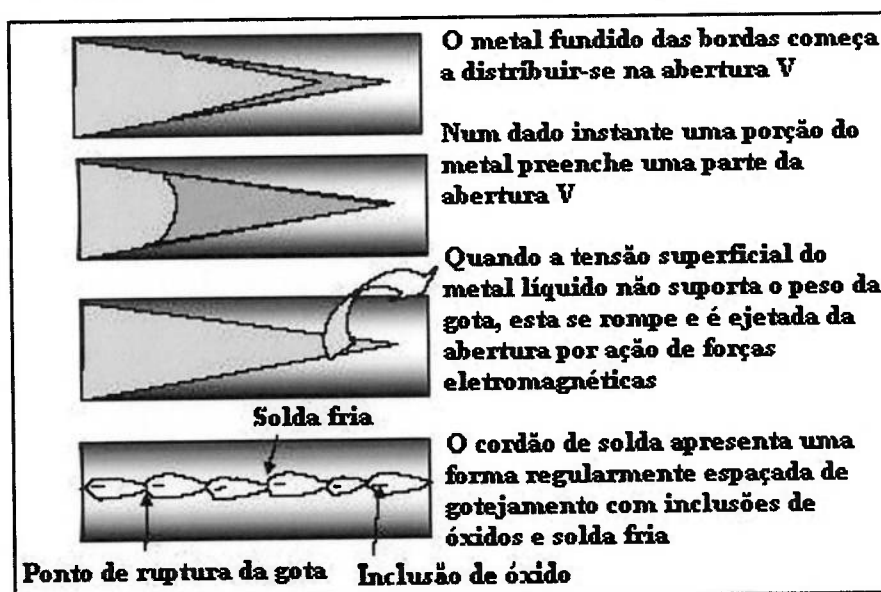


Figura 46 – Esquematização do processo de fusão e soldagem das bordas e dos possíveis defeitos encontrados⁽⁴³⁾

Para ser obtido um cordão de solda em condições de atendimento dos requisitos do projeto do produto, deve ser observada a condição ideal de aquecimento das bordas no ponto de compressão. A figura 47 esquematiza os efeito de posição das bordas.

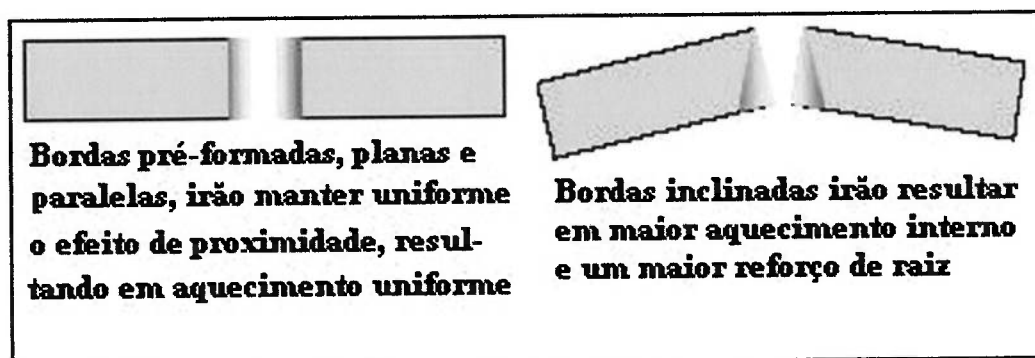


Figura 47 – Efeito de variações do posicionamento das bordas na qualidade do processo ⁽⁴³⁾

A tira de metal inicialmente apresenta as bordas perpendiculares à largura da tira mas, durante o curvamento este perpendicularismo é substituído por um posicionamento radial. A condição adequada de soldagem exige o paralelismo das bordas durante a curvatura da tira. Este posicionamento é alcançado pela introdução de ferramentas cilíndricas de corte por retificação entre as últimas estações de conformação, removendo o excesso de material e permitindo o assentamento correto das superfícies para soldagem do tipo topo.

O posicionamento desta ferramenta deve compensar a deformação final até o ponto de compressão entre as bordas. A figura 48 esquematiza a ação desta ferramenta.

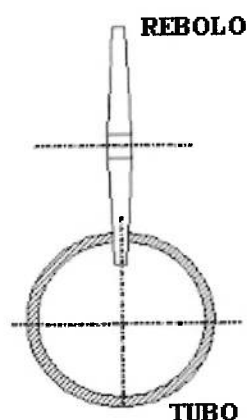


Figura 48 – Operação de retificação da borda do tubo pré-formado
Estudos desenvolvidos por KIM et al.⁽²⁾ demonstram que é possível prever a forma adequada da borda com aumento das propriedades da zona de soldagem. Esta

previsão leva à otimização da superfície de contato reduzindo as forças de compressão nos passes de acabamento e resultando em espessura uniforme e circularidade no tubo produzido.

O corte inicial da borda, visando reduzir as variações na soldagem, induz deformações que devem ser controladas conforme visto na figura 49. O esforço de corte gerado tende a defletir a chapa alterando a geometria de corte.

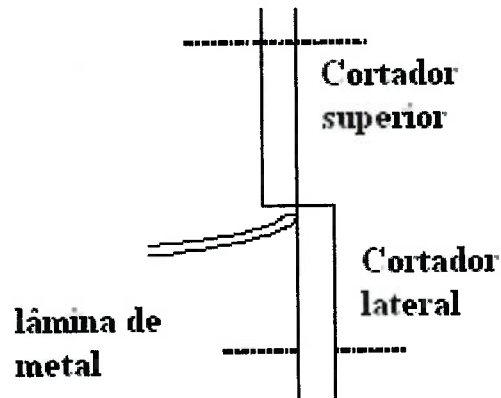


Figura 49 – Esquema de corte da borda de lâminas para conformação⁽²⁾.

Segundo Kim et al..⁽²⁾ a previsão da forma da borda resulta em melhor ligação entre as partes soldadas e reduz as deformações devido à compressão das superfícies proporcionando maior qualidade no processo de soldagem, como visto na figura 50.

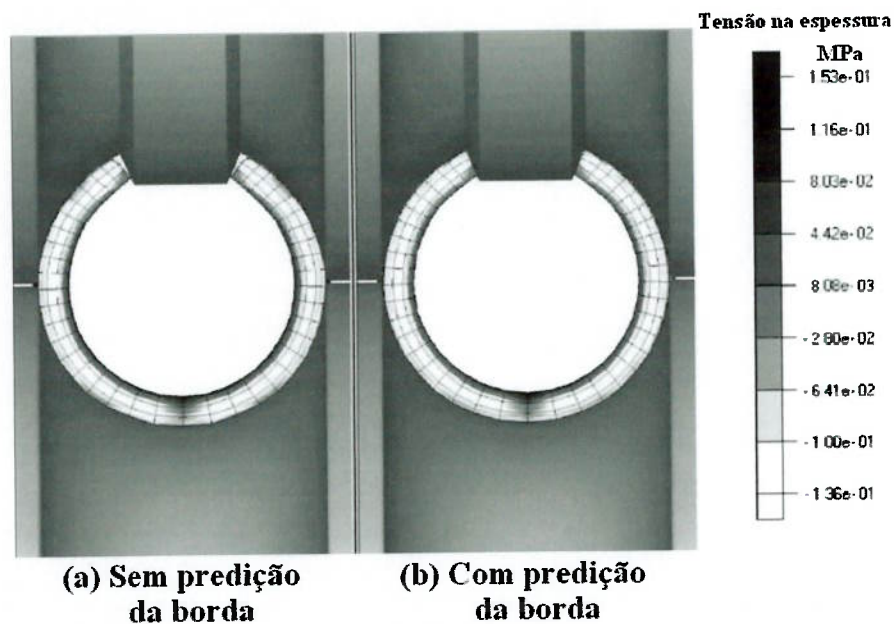


Figura 50 – Efeito da forma da ferramenta na circularidade do tubo⁽²⁾.

O projeto da ferramenta de rolo tendo como objetivo a forma da borda aumenta a circularidade do tubo formado, conforme visto na figura 51.

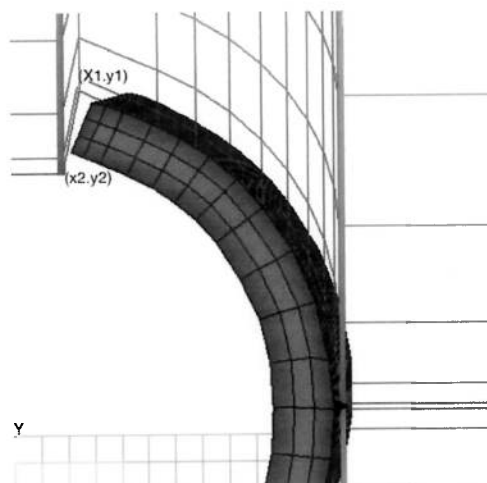


Figura 51 – Previsão da forma da ferramenta em função da borda usinada ⁽²⁾.

A construção da ferramenta segundo as formas previstas constitui um desafio para o fabricante e para o usuário tendo em vista a possibilidade de uso do mesmo ferramental para vários materiais e dimensões de espessura porém, caracteriza uma forma segura de alcançar-se à qualidade necessária conforme visto na figura 52.

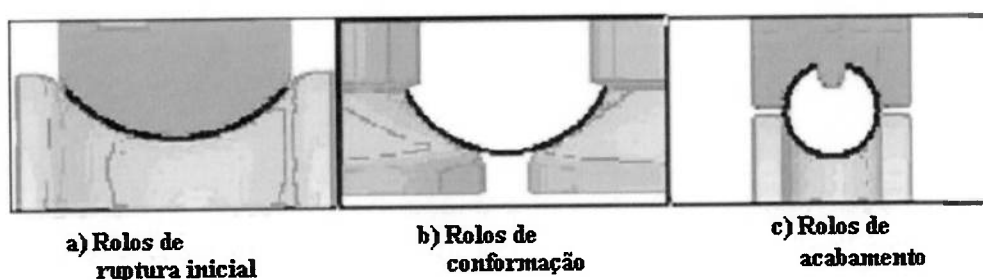


Figura 52 – Formas das ferramentas de conformação por rolos ⁽²⁾.

2.5.14 Lubrificação e refrigeração da linha de conformação

Como elemento auxiliar do processo a lubrificação aliada à refrigeração proporciona a manutenção das características superficiais do material, reduzindo o atrito durante o escorregamento do material sobre a superfície de contato com a ferramenta, bem

como sua precisão dimensional tendo em vista a dilatação térmica devido à alta temperatura de soldagem. Como fator complementar o lubrificante deve promover uma proteção contra a corrosão da região termicamente afetada pela soldagem.

O sistema de refrigeração de uma máquina de conformação contínua de tubos requer condições especiais de recirculação do fluido garantindo o retorno de fluido limpo e com baixa temperatura à região de soldagem ao mesmo tempo em que mantém limpo o local de trabalho.

Como regra geral se estabelece como reservatório do fluido o próprio corpo da base da máquina com pontos de captação situados ao longo da linha de conformação, dotado de um conjunto de filtragem e bombeamento por meio de tubulações formando uma rede de bicos aspersores em torno dos rolos de conformação e da bobina de soldagem conforme esquematizado na figura 53 a seguir:

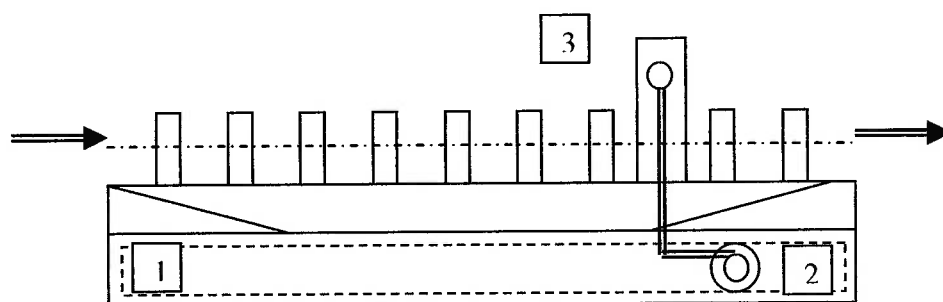


Figura 53 – Conjunto de reservatório (1), bomba de circulação e filtragem (2) e torre de soldagem (3)

2.6 Planejamento da linha de conformação

Juntamente com as inovações tecnológicas no equipamento, o planejamento do processo baseia-se, principalmente em conhecimentos adquiridos empiricamente e em experiências práticas de operadores. Segundo Nefussi et al.⁽⁴⁸⁾, a complexidade do processo, o número elevado de variáveis, o elevado custo e altos investimentos reduzem as pesquisas sistemáticas experimentais, reduzindo o processo a uma repetição de operações anteriores baseadas na experiência prática.

Programas denominados “processadores tecnológicos”, com simulação por meio de computadores, utilizando as ferramentas de projeto, dimensionamento e análise de desempenho, são desenvolvidos, destacam-se os estudos de aplicação do MEF desenvolvidos por Alsamhan et al.⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁰⁾, por Fromentin et al.⁽⁵¹⁾, por Heislitz et al.⁽⁵²⁾, por Brunet et al.⁽⁵³⁾, Utsunomiya et al.⁽⁵⁴⁾, por Sokolowski et al.⁽⁵⁵⁾, por Forouzan et al.⁽⁵⁶⁾, Richelsen e Tvergaard⁽⁵⁷⁾, permitindo a geração automática da simulação do processo de deformação por rolagem pelo uso do Método de Elementos Finitos e análise das propriedades geométricas do perfil ao lado das solicitações mecânicas impostas ao material, tais como as tensões longitudinais e transversais de tração e de cisalhamento.

Programas de cálculo⁽⁴⁰⁾⁽⁴⁸⁾ para perfis conformados por rolos permitem a fabricação econômica de perfis complexos por meio de plataformas adequadas.

Estes estudos fornecem a base teórica para o desenvolvimento tanto da máquina como do produto e suas aplicações posteriores.

2.7 Projeto do equipamento de conformação

O fator determinante para o projeto da linha de conformação de tubos por rolagem é o valor da tensão atuante na chapa, obtida pelo grau de deformação imposto pelas estações de rolos. Esta característica é utilizada para estabelecer a distância entre as estações, a potência de acionamento dos rolos e as características geométricas e físicas dos rolos.

Estudos realizados por Panton et al.⁽⁵⁸⁾, permitem determinar a intensidade destas tensões concluindo sobre a possibilidade de deformação sem introdução de tensões longitudinais na conformação por rolos, fato este que é favorável à aplicação posterior do tubo formado na fabricação de peças curvadas como aquelas necessárias à indústria automobilística. Em contrapartida concluíram sobre a impossibilidade de previsão das tensões resultantes do processo simplesmente pela análise da deformação superficial do material.

O estabelecimento de parâmetros tais como, a velocidade ótima de operação das ferramentas rotativas foi estudado por Mori et al.⁽⁵⁹⁾, estabelecendo um método de determinação de movimento das ferramentas com o uso do MEF com ampliação do

campo de aplicação para o estabelecimento de outras variáveis ou condições de conformação.

Em função da extrema importância do efeito mola (springback) no estabelecimento das distâncias entre as estações de conformação, algumas pesquisas foram desenvolvidas por Xue et al.⁽⁶⁰⁾⁽⁶¹⁾, concluindo pela capacidade de prever eficientemente, o efeito mola em materiais conformados com a aplicação do MEF.

Em função da dependência da potência do equipamento em relação ao atrito entre as superfícies da ferramenta e da peça o comportamento tribológico foi estudado por Vergne et al.⁽⁶²⁾ tendo como escopo a determinação do efeito da temperatura no atrito e no desgaste gerado entre a ferramenta e a matéria prima com visíveis efeitos sobre a qualidade superficial do produto final.

Com o propósito de verificar a condição superficial Livatyali et al.⁽⁶³⁾, desenvolveram uma investigação experimental nos defeitos presentes na operação de cravamento cujos resultados, em função do elevado deslizamento entre a ferramenta e a peça, são levados em conta no estabelecimento do ângulo de curvatura e conseqüentemente na quantidade de estações de trabalho necessárias para o funcionamento adequado do conjunto.

Como conseqüência da fabricação de tubos para posterior reprocessamento em formas específicas, foram desenvolvidos estudos por Kiuchi et al.⁽⁶⁴⁾, relacionados com a transformação da seção circular em uma seção de perfil especial como as solicitações impostas pela indústria automobilística para fabricação de chassis e longarinas bem como quadros de portas e aberturas diversas, utilizando o MEF como base de cálculo.

Dentro do mesmo espírito Watari e Ona⁽⁶⁵⁾ desenvolveram estudos sobre a conformação do tubo com a existência de rasgos ou aberturas previamente estampados na matéria prima prevista para a conformação por rolos. Este estudo permite estabelecer a condição mais adequada para o padrão de ferramentas a serem utilizadas na conformação de tubos com rasgos como mostrado na figura 54 a seguir:

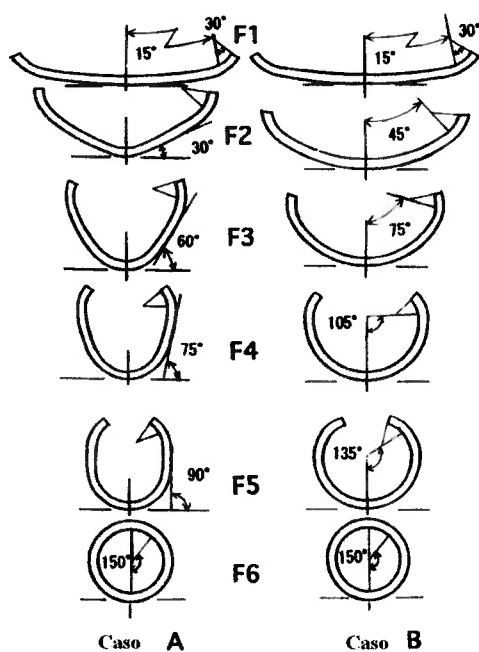


Figura 54 – Formatos das ferramentas de conformação para tubos com entalhes ⁽⁶⁵⁾

O formato específico das ferramentas está relacionado com a singularidade existente na matéria prima como pode ser observado na figura 55.

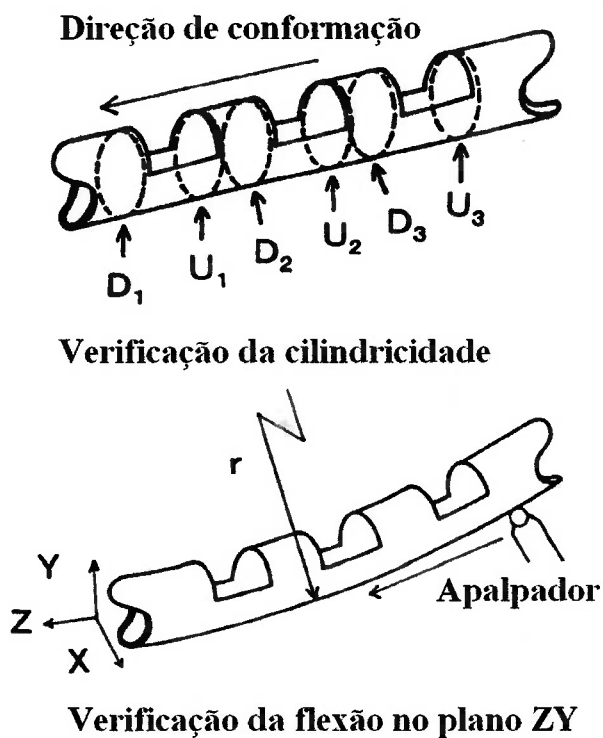


Figura 55 – Controle de tubos fabricados com matéria prima com singularidades ⁽⁶⁵⁾

O estudo destas variáveis, no processo de conformação proporciona os fundamentos necessários para estabelecer os parâmetros de projeto, constituindo a base de cálculo para o dimensionamento e a geometria do conjunto, propiciando o desenvolvimento do estudo do projeto de uma linha de conformação.

3. Dimensionamento da linha de conformação

3.1. Introdução

A conformação por dobramento como um processo de produção é classificado segundo a DIN 8583⁽⁶⁶⁾ em dois grupos:

- a. Conformação por movimento linear da ferramenta caracterizado pelas prensas dobradeiras;
- b. Conformação por movimento rotacional da ferramenta caracterizado pelas calandras e por estações de rolos seqüenciais.

Para a produção de perfis contínuos ou de comprimento definido por qualquer método são encontradas restrições relacionadas com os fatores relacionados na norma DIN 6935 - *Cold bending of flat rolled steel products*⁽⁶⁷⁾:

Raios

Ângulos de dobramento

Sentido de laminação

Retorno por ação de mola

Estricção e alongamento na região de dobramento

Comprimento da linha neutra

Alterações das propriedades mecânicas pela aplicação da energia de deformação

3.2. Raios de dobramento

Rossi⁽⁶⁸⁾ demonstra a necessidade de chanfro nas bordas de matrizes e punções para auxiliar a chapa a resvalar pela parede de apoio facilitando a operação de conformação. Indica valores práticos dos raios adotados para metais, como aço e alumínio, os seguintes raios para a espessura s considerada, destacados na figura 56:

$$\text{Aço :} \quad r = (8 \cdots a \cdots 10) \cdot s \quad (37)$$

$$\text{Alumínio :} \quad r = (4 \cdots a \cdots 5) \cdot s$$

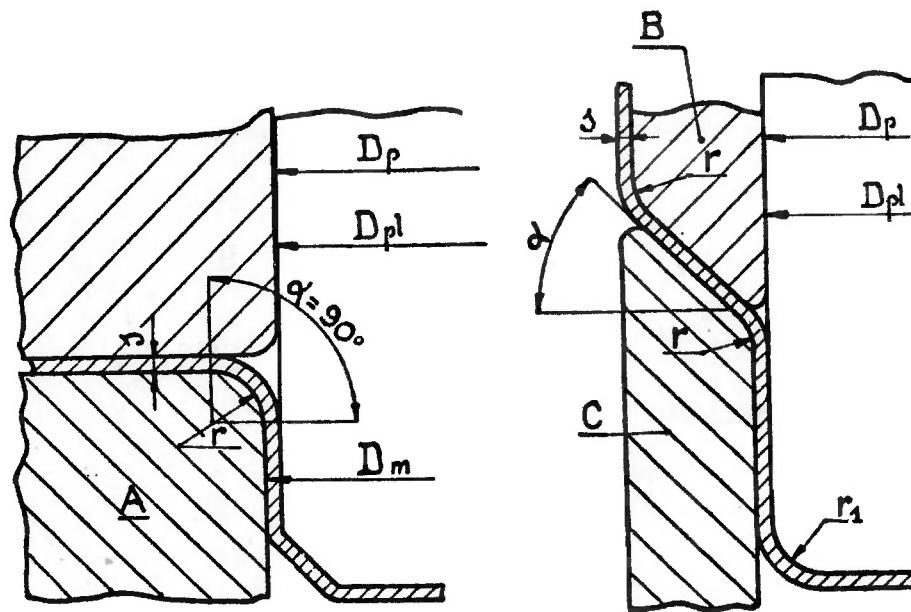


Figura 56 – Raios de matriz e de punção ⁽⁶⁸⁾

Outros procedimentos são obtidos em função de resultados práticos tais como:

- Especificação do raio interno mínimo para dobramento com ângulo menor que 120° para aços com faixas de tensão de ruptura especificadas;
- Sentido de dobra em relação à direção de laminação da chapa e
- Faixas de espessuras adequadas para um dado ferramental.

O efeito elástico no dobramento deve determinar uma relação entre o raio de dobramento e o ângulo de dobramento desejado com o raio da ferramenta e o ângulo da ferramenta segundo o fator elástico K_I .

$$K_I = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{r_{i1} + 0,5 \cdot s}{r_{i2} + 0,5 \cdot s} \quad (38)$$

α_1 = ângulo na ferramenta (ângulo de dobramento requerido) [°]

α_2 = ângulo desejado na peça (após o retorno elástico) [°]

s = espessura do metal [mm]

r_{i1} = raio interno na ferramenta [mm]

r_{i2} = raio interno na peça [mm]

O fator elástico K_I calculado para várias situações de uso, é tabelado em função do material e da relação entre o raio e a espessura do material. O raio interno da ferramenta r_{i1} é determinado a partir do raio interno da peça r_{i2} e da tensão de ruptura S_{rup} e do módulo de elasticidade do material E .

As alterações nas propriedades devido à presença de tensões residuais em função do dobramento podem ser reduzidas por tratamentos térmicos posteriores os quais podem alterar também os raios e ângulos da mesma forma que podem provocar a nucleação e a propagação de trincas.

Podem ocorrer outras deformações, além das desejadas na peça, na presença de raios de curvatura pequenos. Se muitas operações são realizadas em uma peça única, os passos devem ser dimensionados para garantir a disponibilidade de fluxo de material suficiente para repor o material deslocado durante o processo de deformação como visto na figura 57.

Por outro lado, sob certas circunstâncias, é possível que ocorra um enfraquecimento ou que ocorra fratura nos cantos da peça. Adicionalmente a força de conformação aumenta significativamente com a redução do raio de dobramento.

O cálculo dos esforços gerados num processo de dobra, considerando-se todas as interações geométricas e mecânicas, é extremamente difícil de ser executado, portanto, conforme cita a Schüler ⁽²⁷⁾, são feitas algumas simplificações conforme apresentado por meio dos cálculos a seguir:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (39)$$

sendo l_1 = comprimento inicial e l_0 = comprimento final

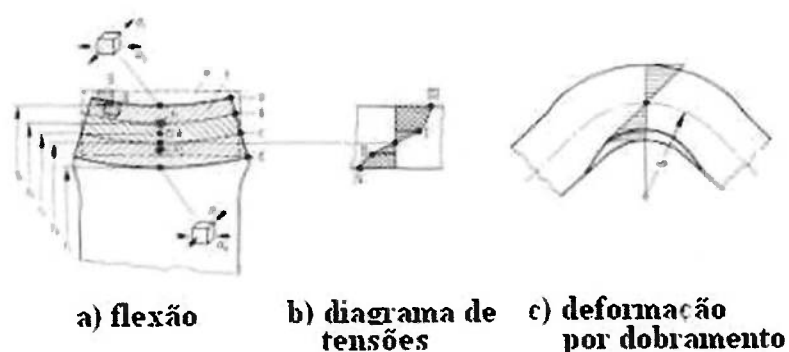


Figura 57 – Distribuição de tensões no processo de dobramento ⁽⁶⁹⁾

Conforme apresentado pela figura anterior os comprimentos podem ser obtidos pelas equações:

$$l_0 = r \cdot \alpha \quad (40)$$

$$l_1 = (r + y) \cdot \alpha \quad (41)$$

sendo r = raio de dobra e α = ângulo de dobra

A deformação pode ser escrita em função de y como sendo:

$$\varepsilon = \frac{y}{r} \quad (42)$$

A partir da equação 37 pode-se escrever, conforme apresentada abaixo a deformação na forma logarítmica.

$$\varphi_a = \ln\left(1 + \frac{y}{r}\right) \text{ alongação} \quad (43)$$

$$\varphi_i = \ln\left(1 - \frac{y}{r}\right) \text{ contração} \quad (44)$$

Nas fibras na extremidade da chapa (com $y = s/2$) a deformação será:

$$\varepsilon = \varepsilon_a = \frac{s}{2 \cdot r} \quad (45)$$

sendo s = espessura da chapa e ε_a = deformação nas fibras externas.

A deformação permanente do material ocorrerá quando a deformação nas fibras externas ultrapassar o limite elástico, definido como sendo $R_{p0,02}$, portanto:

$$\varepsilon_E = \frac{R_{p0,02}}{E} \quad (46)$$

Das equações 7 e 8 pode-se então determinar o mínimo raio de dobra, a partir do qual começa a ocorrer deformação plástica.

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{\min} = \frac{2 \cdot R_{p0,02}}{E \cdot s} \quad (47)$$

3.2.1 Raios para conformação por rolos.

Os perfis conformados por rolos apresentam uma profusão de raios com dimensões e ângulos de dobramento diversos, conforme observado anteriormente na figura 57.

Em função das tensões que se originam nas superfícies externas e internas, de tração, e de compressão, nas seções dobradas ou curvadas, são estabelecidos os raios máximo e mínimo admissíveis para o processo de rolagem, segundo as expressões a seguir:

$$\text{máximo: } r_{\max} = \frac{s \cdot E}{2 \cdot R_{el}} \quad (48)$$

$$\text{mínimo: } r_{\min} = s \cdot C \quad (49)$$

onde:

E = módulo de elasticidade [N/mm²]

R_{el} = limite de proporcionalidade [N/mm²]

C = coeficiente para o material em função do tipo, da direção de dobramento em relação à direção de laminação da chapa e do tratamento térmico. Obtido por meio de ensaios de caracterização de materiais.

3.3. Determinação da largura da tira

Devido às deformações que ocorrem na região da dobra o comprimento da chapa (na seção de dobramento) a ser dobrada não é igual ao comprimento da fibra localizada no centro da seção transversal após o dobramento. O método para cálculo do comprimento plano de componentes dobrados, proposto pela DIN 6935⁽²⁶⁾, estabelece:

para aberturas angulares de 0° a 165° .

$$L = a + b + v \cdot 2 \quad [mm] \quad (50)$$

e para aberturas angulares de > 165° a 180°

$$L = a + b \cdot 3 \quad [mm] \quad (51)$$

Esta geometria é esquematizada na figura 58.

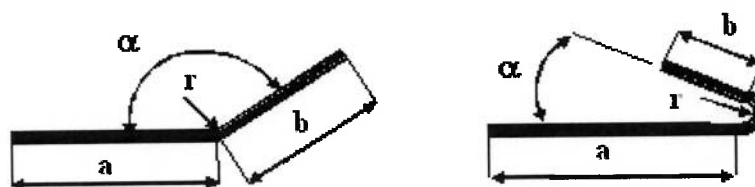


Figura 58 - Geometria de dobramento

Sendo a e b comprimentos de duas pernas dobradas e v o fator de compensação, negativo ou positivo obtido segundo a DIN 6935⁽²⁶⁾, ou calculado para o ângulo necessário, conforme as equações 47 e 48, segundo a geometria mostrada na figura 58.

para $\alpha = 0^\circ$ a 90° .

$$v = \pi \cdot [(180 - \alpha)/180] \cdot (r + s \cdot K_r/2) - 2 \cdot (r + s) \quad (52)$$

Para $\alpha > 90^\circ$ a 165°

$$v = \pi \cdot [(180 - \alpha)/180] \cdot (r + s \cdot K_r/2) - 2 \cdot (r + s) \cdot \text{tg}(180 - \alpha)/2 \quad (53)$$

s = espessura da chapa

O fator de correção K_r é dado por:

para $r/s > 5$

$$K_r = 1 \quad (54)$$

para $r/s < 5$

$$K_r = 0,65 + \frac{1}{2} \log(r/s) \quad (55)$$

O arredondamento do valor calculado deve ser feito para a unidade em milímetros imediatamente superior.

Na conformação por rolos o estiramento do material durante o curvamento é fator importante na precisão dimensional do tubo produzido, exigindo um cálculo preciso para determinação do diâmetro do tubo e no posicionamento das ferramentas.

3.4. Força, Trabalho e Potência de deformação durante o dobramento.

A determinação da potência da máquina baseia-se no conhecimento do processo e nas características dos materiais e das ferramentas utilizadas. Segundo a forma de dobramento tem-se uma disposição de forças e dimensões a serem consideradas conforme explicitado a seguir:

3.4.1 Dobramento em V

O processo mais difundido de dobramento é aquele realizado com uma matriz V e um punção em V com a flexão ocorrendo pelo deslocamento do punção estando a peça apoiada sobre a matriz. Este processo é seguido pela aplicação de um esforço

de compressão com a finalidade de aliviar tensões residuais reduzindo o retorno elástico (efeito mola). A figura 59 mostra alguns esquemas de posicionamento para o dobramento em V.

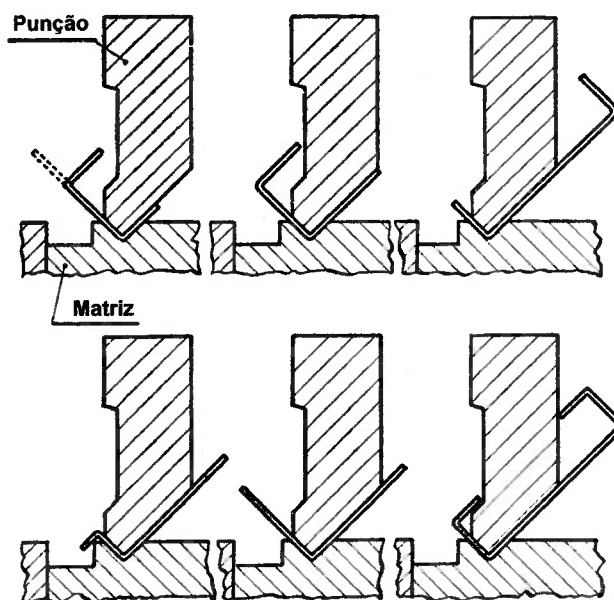


Figura 59 - Formas de dobramento em V⁽⁶⁸⁾

No dobramento em matriz V, a força de dobra F_d (N) necessária para conformação e função da abertura da matriz (L) que determina a intensidade do momento fletor. Contrastando com este fato, o raio de dobramento apresenta menor influência em função de um correto selecionamento da abertura L da matriz. Segundo Rossi⁽⁶⁸⁾ o valor da largura está relacionado com a espessura da chapa a ser dobrada segundo a relação:

$$L = 6 \cdot s \quad (mm) \quad (56)$$

Para ferramenta convencional, mostrada na figura 60 na qual o metal é posicionado na distância L em ambos os lados da matriz e o punção pressiona na posição média da chapa de largura b , a força de dobra é obtida pelas expressões 57 e 58:

$$\text{para } l/s \geq 10, \quad F_d = \left(b \cdot s^2 / l\right) \cdot R_m \quad (57)$$

$$\text{ou para } l/s < 10 \quad F_d = \left(1 + 4 \cdot s / l\right) \cdot \left(b \cdot s^2 / l\right) \cdot R_m \quad (58)$$

Apesar de serem fórmulas simples, são suficientes para cálculos práticos aproximados.

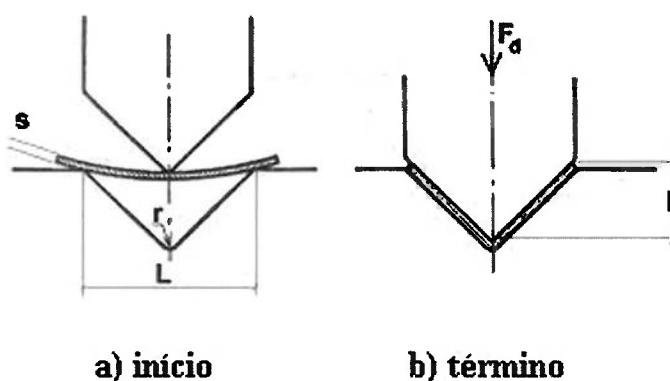


Figura 60 – Seqüência do movimento de dobra em V⁽⁹⁾

O valor do trabalho realizado pela punção é obtido pela equação:

$$\Gamma = x \cdot F_d \cdot h \quad (59)$$

A distância percorrida pelo punção desde o contato inicial até o término da operação de dobramento é dada por **h**. A constante **x** leva em consideração a progressão desigual da força ao longo da distância percorrida. Segundo Rossi o valor de **x** situa-se na faixa de 0,3 a 0,6 dependendo dos requisitos de dobramento e do ajuste da máquina.

A potência de deformação está relacionada com os parâmetros operacionais da máquina como número de golpes por unidade de tempo, curso estabelecido e capacidade do equipamento.

3.4.2 Dobramento por rolos

O dobramento contínuo por rolos caracteriza-se pela deformação parcial da chapa em cada seção de trabalho. As condições geométricas de aplicação de forças são distintas daquelas observadas no dobramento V como pode ser visto na figura 61.

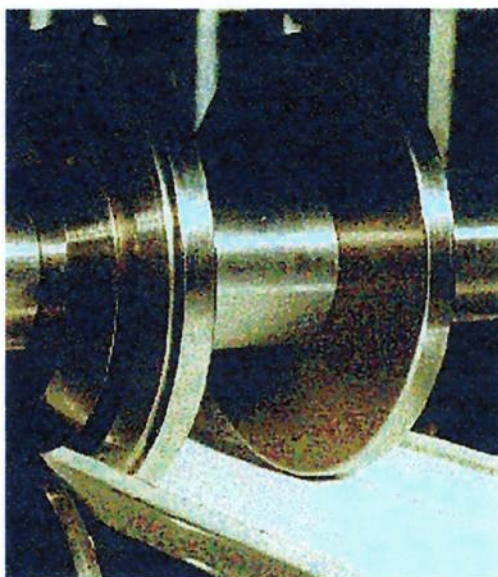


Figura 61 - Dobramento de perfis por rolos de conformação⁽¹⁹⁾

A conformação contínua do perfil leva ao desenvolvimento de um estudo que considera, entre outros parâmetros, a velocidade de deslocamento do perfil, o espaçamento entre as estações de conformação, o grau de deformação obtido em cada estação e o retorno por efeito mola que altera as características do perfil entre as estações.

Devido ao espaço de tempo decorrido entre uma passagem e outra, o efeito Bauschinger passa a ter influência no processo e deve ser considerado no dimensionamento.

3.4.3 Curvamento

Um processo de conformação para peças com raios elevados em relação às demais dimensões é particularmente denominado de curvamento, destacando-se três procedimentos básicos.

3.4.3.1 Curvamento por matriz e punção

Para peças com extensão reduzida este processo se revela como o mais simples uma vez que a qualidade do produto final é garantida por uma ferramenta fixa formada por punção e matriz como mostrado na figura 62.

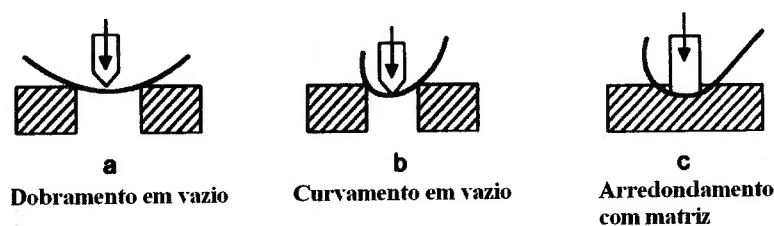


Figura 62 - Curvamento por matriz e punção⁽³⁾

3.4.3.2 Curvamento por três rolos ou Calandragem

Com o aumento do raio de conformação para fabricação de peças tubulares, torna-se necessária a utilização de um conjunto de rolos de eixos paralelos ou concorrentes com enorme influência da experiência do operador para a obtenção de uma peça com qualidade adequada. A figura 63 esquematiza este procedimento.

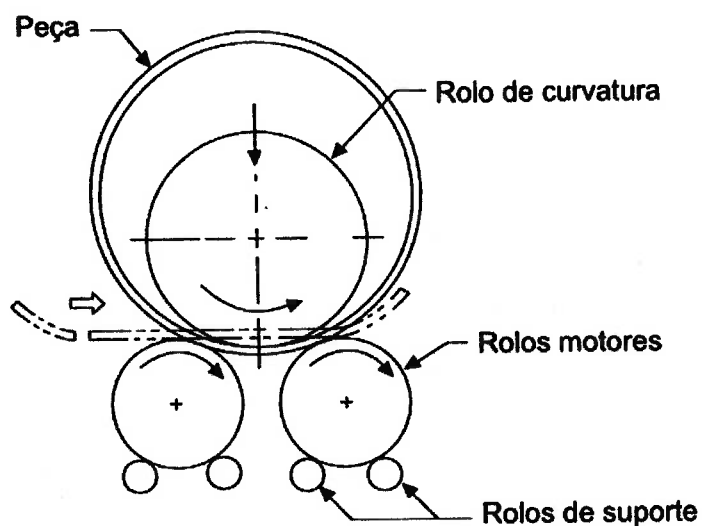


Figura 63 – Curvamento por três rolos ou Calandragem⁽³⁾

3.4.3.3 Conformação contínua por rolos

Este procedimento garante a fabricação de peças tubulares de grande extensão em função da continuidade da linha e da alimentação por meio de desbobinamento do material, este de largura e espessura adequadas e comprimento elevado. A figura 64 exemplifica o procedimento.

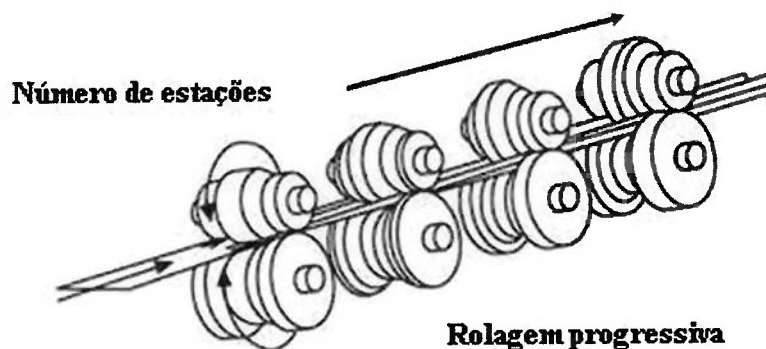


Figura 64 – Conformação de tubos perfilados⁽²⁸⁾

3.4.3.4 Tensões de deformação

Como pode ser deduzido o esforço de dobramento para cada procedimento citado é bastante distinto, sendo representado conforme a figura 57 e desenvolvido nos itens seguintes

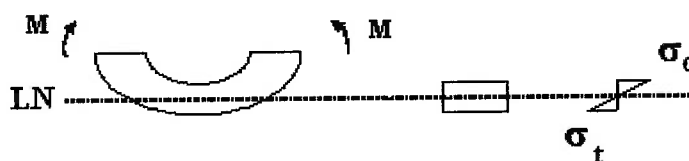


Figura 65 – Representação da distribuição de tensões no processo de dobramento⁽²⁹⁾

3.4.3.4.1 Curvamento em matriz e punção

Segundo Stipkovic⁽⁷⁰⁾, no curvamento com punção e matriz o esforço de dobra F_D é calculado, segundo uma analogia com dobramento em V, como visto na figura 59, utilizando-se a expressão :

$$F_D = 2 \cdot K_d \cdot L \cdot t^2 / 3 \cdot l \quad (N) \quad (60)$$

onde:

$$K_d \approx 3 \cdot \sigma_{rup}$$

σ_{rup} = Tensão de ruptura do material (MPa)

K_d = Pressão específica de dobramento (MPa)

L = comprimento (mm)

l = distancia entre apoios (mm)

t = espessura (mm)

3.4.3.4 .2 Curvamento em calandra

No curvamento em três rolos paralelos ou concorrentes, a solicitação no material é reduzida em função da relação entre o raio e a distância da linha neutra até a superfície da peça.

O cálculo é efetuado considerando-se a geometria e as dimensões do conjunto de rolos e espessura e largura da matéria prima para a peça a ser formada. A figura 66 esquematiza o sistema de forças P e a geometria do conjunto.

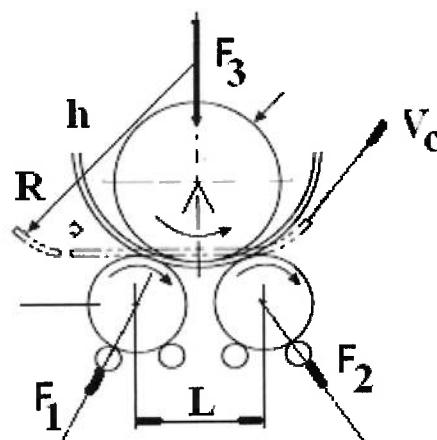


Figura 66 – Distribuição de forças na calandragem⁽⁷⁰⁾

São consideradas as equações:

$$V_c = L/t \quad (61)$$

onde

V_c = velocidade de deslocamento (m/s)

L = percurso durante a deformação (m)

t = tempo decorrido durante a deformação (s)

Segundo Stipkovic⁽⁷⁰⁾ a energia de deformação é considerada para o dimensionamento do procedimento conforme apresentado a seguir:

A força F_3 , aplicada no rolo movido superior, é resistida considerando-se a peça como uma viga bi-apoiada em dois rolos motores inferiores. As reações dos apoios são identificadas por F_1 e F_2 e, dada as dimensões do raio de curvatura, pode-se considerar o paralelismo entre as forças, resultando na expressão para o momento fletor M_f atuante na viga:

$$M_f = F_1 \cdot L/2 \quad (62)$$

onde $F_1 = F_2$ por simplificação de cálculos.

A distribuição de tensões é exemplificada na figura 67 considerando a deformação sucessiva do regime elástico ao regime plástico.

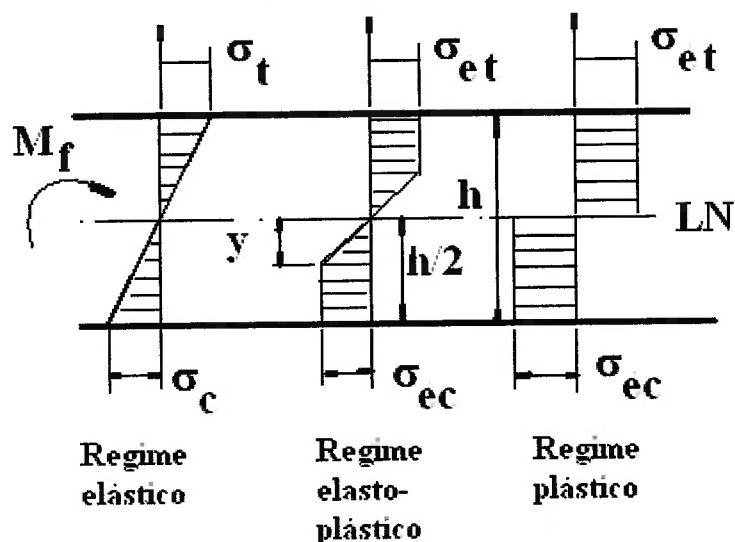


Figura 67– Estado de tensões solicitantes no curvamento⁽⁷⁰⁾

O gráfico de tensão em função do momento aplicado fornece a expressão:

$$M = 2 \cdot \int_0^y \sigma \cdot y \cdot dy + 2 \cdot \int_y^{h/2} \sigma_e \cdot y \cdot dy \quad (63)$$

onde:

σ = tensão atuante no ponto considerado

σ_e = tensão de escoamento do material

y = distância da linha neutra ao ponto considerado

Na região elástica tem-se :

$$\sigma = M/W$$

onde M = momento fletor atuante

W = módulo de resistência à flexão no regime elástico

para uma seção retangular de largura b e altura h o valor de W é dado pela expressão

$$W = b \cdot h^2/6 \quad (64)$$

no regime de deformação ou semiplástico o valor do módulo é dado pela expressão:

$$S \cong 3 \cdot W / 2 \cong b \cdot h^2 / 4 \quad (65)$$

compondo as equações (55) a (58) tem-se

$$\frac{Fl/2}{L \cdot t^2 / 4} = \sigma \leq \sigma_{adm} \quad (66)$$

$$F_1 = L \cdot t^2 \cdot \sigma / 2 \cdot l \quad (67)$$

Levando-se em consideração a inclinação das normais à superfície da peça tem-se, de acordo com a figura 68, o valor da carga F_3 aplicada no rolo superior em função da carga F_1 aplicada no rolo inferior.

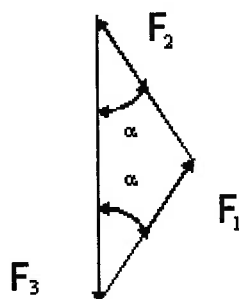


Figura 68 – Composição de forças nos cilindros de conformação

Da figura 68 obtém-se

$$F_3 = 2 \cdot F_1 \cdot \cos \alpha \quad (68)$$

e, por conseqüência, a expressão para a potência de conformação N_{def}

$$N_{def} = F_3 \cdot \mu \cdot V / L \quad (69)$$

onde μ = coeficiente de atrito dinâmico.

3.4.3.4 .3 Curvamento por rolos

As equações de dimensionamento da operação de curvamento por rolos ou conformação por rolos não estão publicadas e constituem atualmente uma fonte de recursos por meio da comercialização de programas (softwares) como observado nos arquivos disponibilizados pela Internet ^(18 e 19) e destacados nas referências bibliográficas.

O estudo pode ser comparado ao desenvolvido para a operação de calandragem, considerando-se as duas formas principais, isto é, a conformação por rolos com

pequeno raio de dobramento, orientada para a fabricação de perfis metálicos e a conformação por rolos com grande raio de dobramento, destinada à produção de perfis cilíndricos tubulares.

3.4.3.5 Análise de tensões

O estudo do processo torna necessário o desenvolvimento de um sistema de equações que forneça os valores de força, trabalho e potência para a conformação contínua de tubos.

A figura 69 representando a tela do Autocad como vista no Programa Profil, exemplifica a distribuição de tensões ao longo da linha de conformação como considerado em um programa de cálculo destacadas no gráfico no canto superior direito da tela.

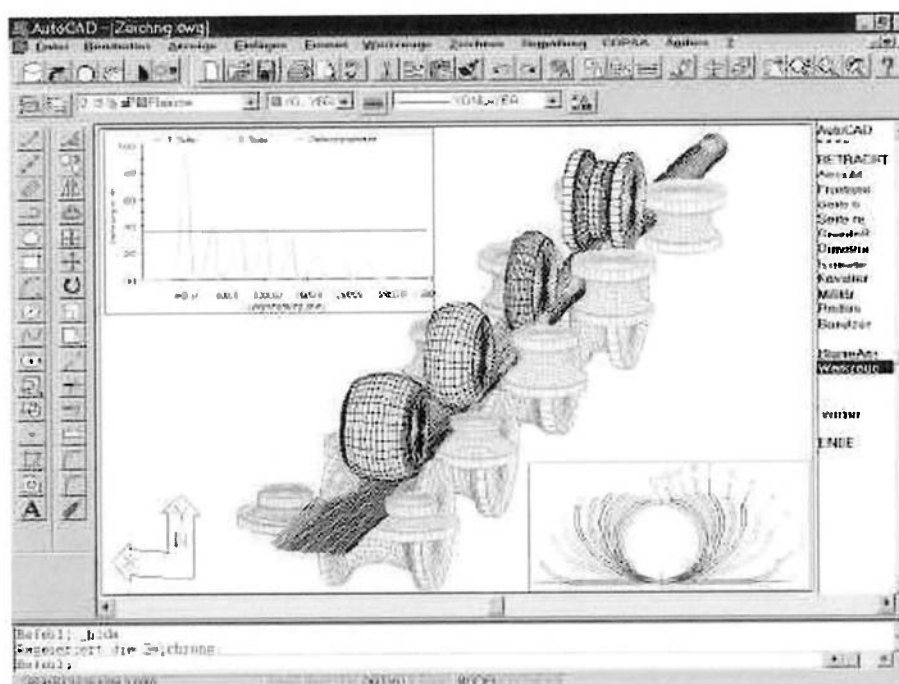


Figura 69 – Distribuição de tensões ao longo da linha de conformação ⁽¹⁸⁾

O tubo pode ser considerado em parte como uma chapa curva com a forma indicada na figura 70.

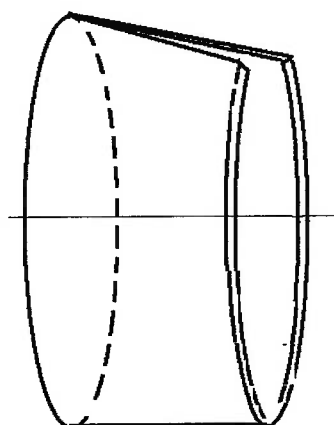


Figura 70 – Seção em conformação do tubo

Considerando um elemento da seção transversal tem-se conforme a figura 71:

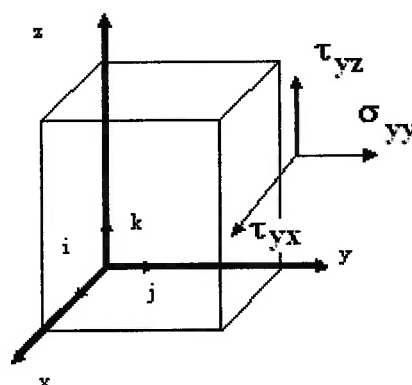


Figura 71 – Elemento de volume em um corpo em deformação

A determinação das tensões atuantes no material é feita utilizando-se dos conceitos da Mecânica dos Sólidos⁽¹⁰⁾, tendo por objetivos:

Prevenir a ocorrência de falhas que possam alterar as características do produto.

Definir a capacidade do sistema de acionamento dos rolos.

Definir a quantidade de estações de trabalho necessárias.

A análise deste sistema envolve o conhecimento dos parâmetros do material na forma de tiras laminadas, do processo de conformação por rolos, das características do equipamento utilizado, abrangendo desde a forma dos rolos até o seu acionamento, e do perfil produzido⁽³⁴⁾.

A seqüência de análise é apresentada a seguir::

3.4.3.6 Cálculos Teóricos

3.4.3.6.1 Geometria e cinemática

Segundo Nefussi et al.⁽⁴⁸⁾ a descrição da forma da superfície intermediária depende unicamente de um parâmetro geométrico: o comprimento deformado entre duas estações de trabalho de diâmetros de rolos definidos. A figura 72 mostra esta deformação considerada.

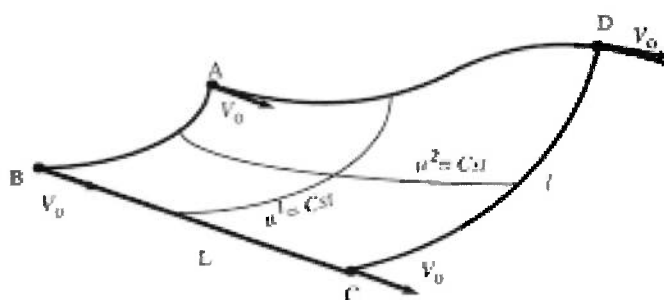


Figura 72 – Chapa deformada entre duas estações de trabalho⁽⁴⁸⁾

A linha do perfil é definida pelo ângulo de rotação θ , variando de zero, na chapa sendo alimentada, até π para o produto tubular pronto, conforme esquematizado na figura 73.

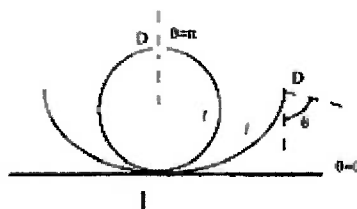


Figura 73 – Chapa deformada entre duas estações de trabalho⁽⁴⁸⁾

Considera-se a disposição inicial da chapa de largura l e a seqüência de deformações relacionadas por meio de um ângulo θ tomado entre a normal à chapa inicial e a linha normal à chapa curvada no ponto em análise, conforme visto na figura.

Analisando o comportamento elasto-plástico com grande deformação, segundo uma formulação que satisfaça o critério de “objetividade incremental”, conforme efetuado por Hughes e Winget apud Nefussi et al.⁽⁴⁸⁾, a Potência média plástica ω é expressa por:

$$\omega = \int_{\Omega_0} [t \cdot r \cdot (S \cdot D^p)] d\Omega_0 \quad (70)$$

onde Ω_0 refere-se ao corpo total deformado, t é a espessura da chapa, r é o raio de curvatura, S é a parcela derivativa de σ e D^p é a parte plástica da deformação. A figura 74 apresenta o gráfico de potência média plástica para diferentes durezas de um material com espessura de 0,6 mm na posição angular de 30°.

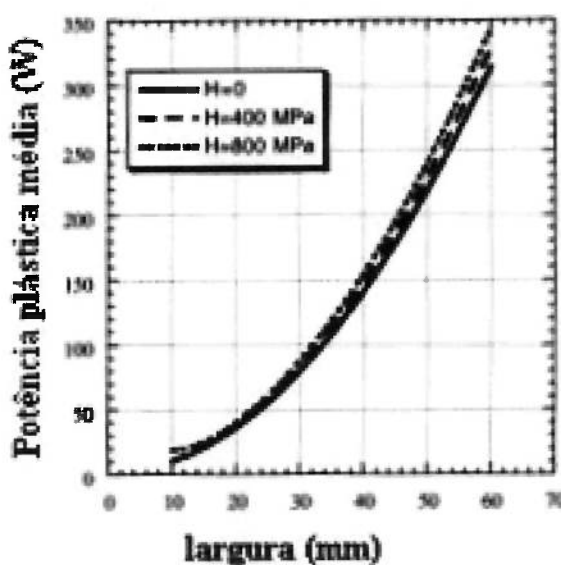


Figura 74 – Distribuição de potência em uma chapa curvada⁽⁴⁸⁾

Como observado na figura, a variação da dureza não introduz uma alteração sensível na potência de deformação, porém deve ser considerada a espessura relativamente fina do material testado.

3.4.3.6.2 Distribuição de tensões

A figura 75, a seguir, esquematiza a distribuição de tensões em uma secção da chapa entre duas estações de trabalho da máquina, durante o processo de fabricação de tubos com costura.

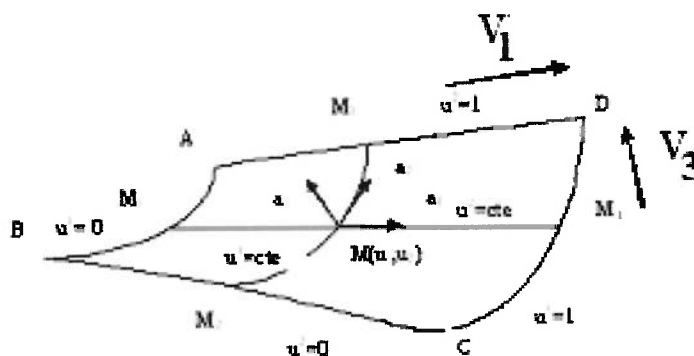


Figura 75 – Distribuição de tensões em uma chapa curvada

A deformação imposta pela passagem por cada estação leva à formação de um trecho curvo com variação de seção constante. A determinação das tensões deve, então, ser feita pela integração segundo as direções a_2 e a_3 conforme indicado.

A verificação destas tensões segundo os estudos feitos por Walker e Pick apud Nefussi⁽⁴⁸⁾, comparando com os resultados previstos por Nefussi⁽⁴⁸⁾ leva ao desenvolvimento do gráfico apresentado na figura 76, destacando a variação da tensão axial lateral presente na chapa em conformação com a variação do ângulo de posição da lateral da chapa na saída da ferramenta.

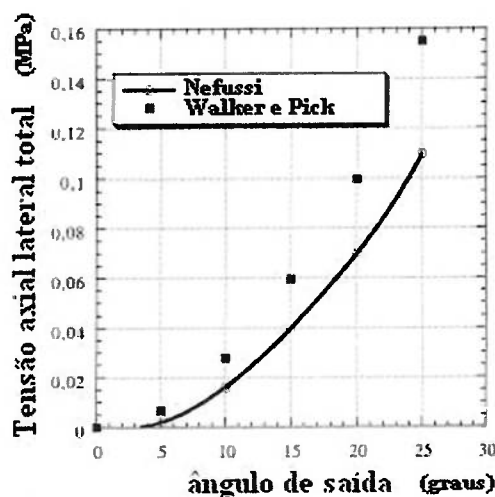


Figura 76 – Tensão lateral axial x ângulo de saída para:

Largura: $l = 200$ mm e espessura: $t = 6$ mm⁽⁴⁸⁾

Em função da ação do atrito nas superfícies do material em contato com as ferramentas, surge uma diferença entre as tensões superficiais demonstrada nas figuras 77, 78 e 79 a seguir:

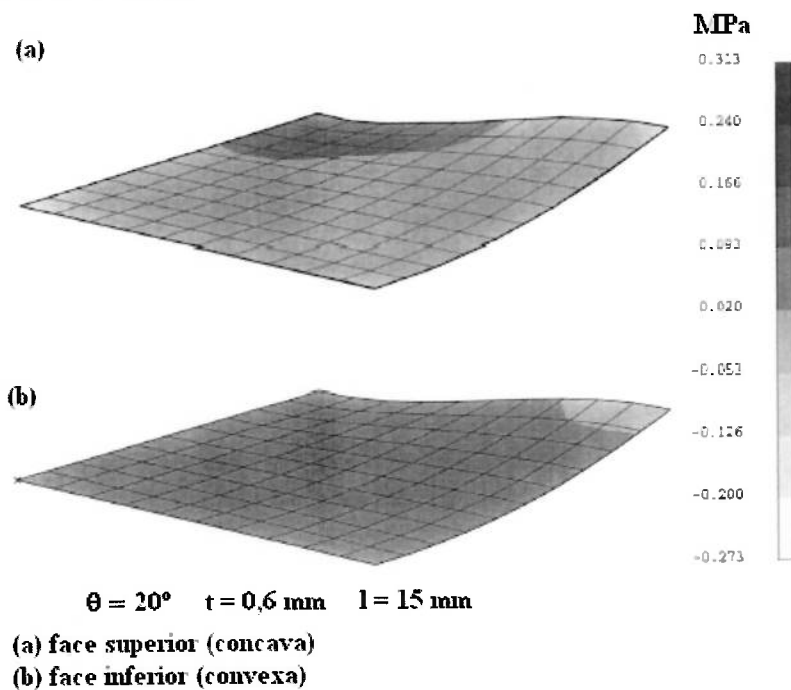


Figura 77 – Distribuição de tensões axiais para ângulo 20° ⁽⁴⁸⁾

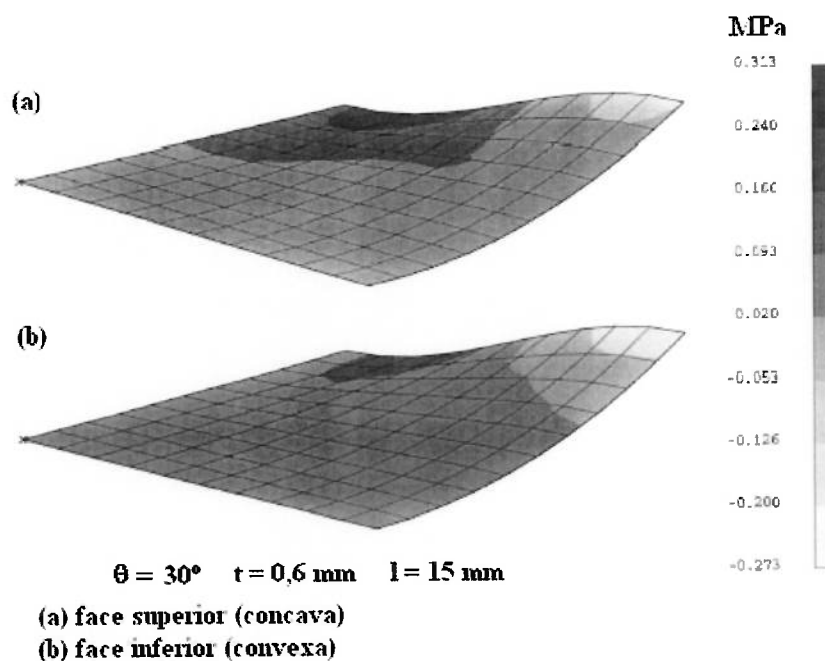


Figura 78 – Distribuição de tensões axiais para ângulo 30° ⁽⁴⁸⁾

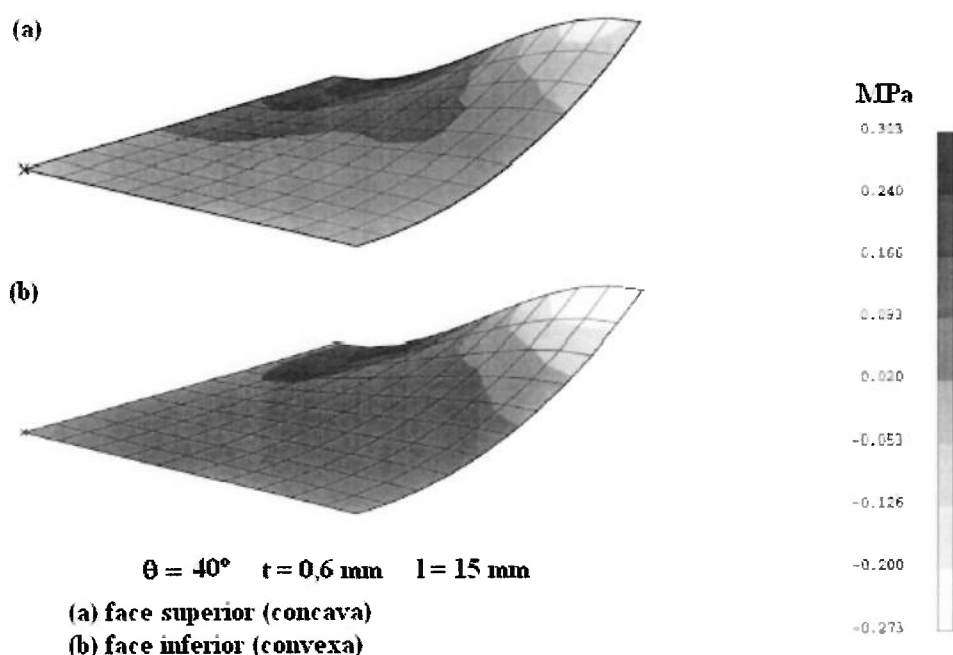


Figura 79– Distribuição de tensões axiais para ângulo 40° ⁽⁴⁸⁾

Com o aumento do ângulo de curvamento observou-se uma considerável mudança no valor das tensões superficiais, como apresentado por meio de tons de cinza nas figuras acima, tanto em termos de tensões de compressão (áreas mais claras) como de tensões de tração (áreas mais escuras).

3.4.3.6.3 Hipóteses simplificadoras

Como consenso entre os pesquisadores, são adotadas hipóteses com a função de simplificar os cálculos realizados ou propostos com a adoção de fatores de correção que tornem os resultados mais próximos aos observados na realidade. Durante a análise de corpos submetidos a campos de força observa-se que o material sólido apresenta comportamento ligeiramente diferente ao ideal estabelecido para um fluido em movimento. Com a finalidade de simplificação dos métodos de cálculo, são admitidas algumas hipóteses com respeito ao material, às ferramentas utilizadas e às variáveis do processo em função do desconhecimento do comportamento do material devido a variações na estrutura cristalina, tamanho de grãos e presença de elementos de liga ou de discontinuidades.

Como regra geral são admitidas as seguintes hipóteses:

O material é considerado isotrópico, incompressível, contínuo, homogêneo e uniforme.

Estas características estão presentes na maioria dos materiais fluidos e são aplicáveis para metais em escoamento.

O material deve apresentar comportamento elasto-plástico com encruamento devido à aplicação de esforços mecânicos.

Estas características são observadas nos metais submetidos à conformação mecânica com sensível alteração nas propriedades mecânicas.

As ferramentas são consideradas rígidas sob a ação dos esforços de conformação.

Obtém-se esta condição em função da geometria e dos tratamentos aos quais elas são submetidas, bem como em função da diferença substancial entre a massa e o volume da ferramenta em relação ao material de trabalho.

A velocidade é admitida constante durante todo o processo.

São desprezados os efeitos de deformação helicoidal das bordas em movimento devido à ação da componente tangencial V_3 de deslocamento da posição plana para a posição curva, entretanto estes valores são considerados na formulação de equações que representem o processo.

Como fator de extrema importância no processo deve ser considerado o coeficiente de atrito que, de acordo com as condições de pressão e de lubrificação, segue o modelo de Coulomb ou Amontons.

A tensão cisalhante necessária para provocar o movimento relativo entre as partes em contato é diretamente proporcional à pressão aplicada segundo a equação:

$$\tau = \mu \cdot \rho \quad (71)$$

onde:

τ = Tensão de cisalhamento

μ = coeficiente de proporcionalidade

ρ = pressão de contato

Desta forma o coeficiente de proporcionalidade μ é considerado constante ao longo do processo, dependendo apenas das propriedades dos materiais em contato e do

lubrificante, sendo independente da geometria e da velocidade com que se efetua o movimento relativo entre as superfícies em contato⁽³¹⁾.

Segundo Altan⁽⁶⁾ o inter-relacionamento destes parâmetros pode ser identificado por meio de um diagrama, como o apresentado na figura 80, tornando-se útil para orientação de cálculo.

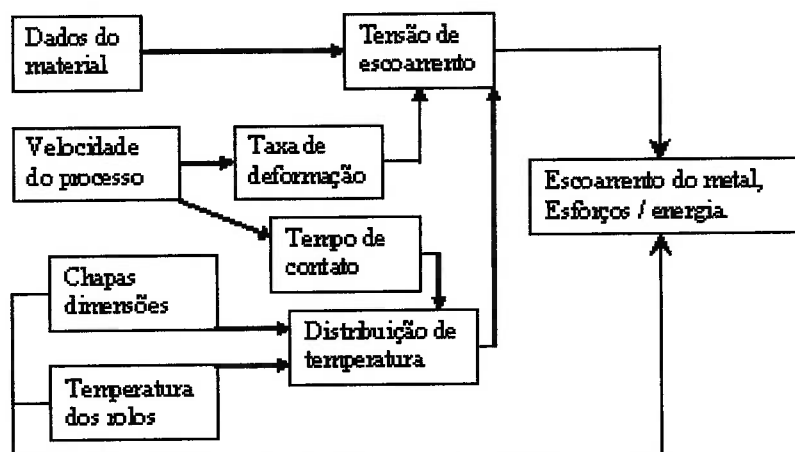


Figura 80 -Inter-relacionamento entre os parâmetros de conformação⁽³⁴⁾.

Segundo Gau e Kinzel⁽³³⁾ dentre as hipóteses simplificadoras devem ser considerados, simultaneamente, os efeitos mola e Bauschinger como atuantes visto que, entre as estações de trabalho, ocorre o retorno elástico do material, alterando as condições previstas de conformação anterior e aquela introduzida pela ferramenta atual e o material apresenta um comportamento diferenciado pela modificação de suas propriedades devido ao encruamento resultante da deformação plástica proveniente de uma estação de trabalho de deformação anterior.

3.4.3.6.4 Tensão de deformação

O estado de deformação de um elemento de máquina permite avaliar o início do escoamento em um processo de deformação. Para a conformação de tubos por meio de ferramentas rotativas considera-se o estado de tensão plana, compreendendo o deslocamento no plano de um plano cristalino em relação a outro por meio de um processo de cisalhamento com o escoamento correspondente.

Segundo Daddi⁽¹⁵⁾, ao se considerar um cristal monocristalino submetido à tração como visto na figura 81, tem-se Φ como o ângulo formado entre a normal ao plano de deslizamento com o eixo z de direção da força de tração F e χ como seu complemento. Em função da direção do deslizamento tem-se outro ângulo λ formado por esta direção e o eixo z.

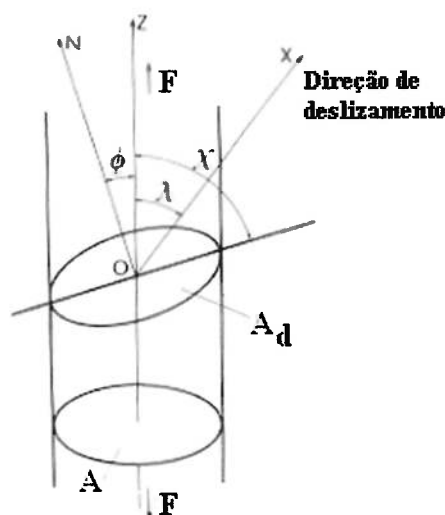


Figura 81 – Geometria para cálculo da tensão resultante devido ao deslizamento⁽¹⁵⁾.

A componente da tensão na direção x em função da solicitação σ aplicada é expressa por:

$$\tau = \sigma \cdot \text{sen} \chi \cdot \cos \chi = \sigma \cdot \cos \phi \cdot \cos \lambda \quad (72)$$

esta relação é obtida dividindo a componente da força F aplicada segundo a linha de deslizamento pela área de deslizamento

$$F \cdot \cos \lambda = \sigma \cdot A \cdot \cos \lambda \quad (73)$$

$$A_d = A / \cos \Phi \quad (74)$$

e corresponde à tensão de cisalhamento da seção A_d .

Schmid et al. apud Daddi⁽¹⁵⁾ demonstraram que, raciocinando em termos de tensão resultante, a força necessária para se obter uma deformação de caráter irreversível por se ter ultrapassado o limite de escoamento, é uma característica constante do metal (τ_0) a uma dada temperatura. Logo é possível identificar a tensão de deformação pela expressão:

$$\sigma_s = \frac{\tau_0}{\cos \Phi \cdot \cos \lambda} \quad (75)$$

No caso de ligas de aço esta expressão não apresenta resultados precisos devido à presença de diversos sistemas de escorregamento ativos em um único cristal ou grão.

3.5. Potência de deformação.

As variáveis no processo de conformação por rolos incluem a potência necessária, a velocidade de conformação e o tipo de lubrificante. Estes parâmetros são determinados pela largura, espessura e tipo do material; complexidade do perfil a ser formado; cobertura superficial quando houver, e a precisão necessária.⁽⁴⁾

A potência necessária depende das perdas no sistema de transmissão e do atrito entre o material e os rolos durante a formação, comercialmente são disponibilizadas potências entre 7,5 e 40 kW para máquinas pequenas e até 95 kW para as máquinas maiores.

A velocidade de conformação dos equipamentos comercializados varia de 0,5 a 245 m/min sendo usuais valores entre 25 e 30 m/min. As características do material de trabalho que influenciam o estabelecimento da velocidade ótima de conformação são:

- Composição
- Tensão de escoamento ou dureza
- Espessura
- Severidade da operação de conformação
- O processo de corte
- Número de estações de rolos
- Operações auxiliares necessárias
- Uso de lubrificante ou refrigerante

3.5.1 Composição do material

Como visto anteriormente, os materiais metálicos apresentam uma rede cristalina de forma simples, como nos monocristais, até formas complexas como nas ligas metálicas resultando em padrões de comportamento bastante distintos. Nos aços além do encruamento provocado pela ação mecânica, também deve ser considerado o

efeito da temperatura como fator de alteração, tanto da composição como da dureza a par da variação volumétrica proporcionada pela variação de temperatura.

3.6 Cálculo de esforços

O cálculo de esforços resultantes no equipamento solicitado para uma dada conformação, deve apresentar uma forma simplificada que permita seu uso pelo chão de fábrica, proporcionando maior velocidade no atendimento das solicitações do setor comercial da empresa quanto à capacidade de atendimento de uma requisição do cliente.

A disponibilidade de uma equação simples torna-se essencial para o propósito de oferecer uma resposta confiável quanto a exequibilidade de um dado produto, por meio das dimensões do produto, das ferramentas, da máquina e da chapa a ser conformada.

A figura 82 mostra uma seqüência de conformação até a estação de soldagem com 8 estações intermediárias, sendo as três primeiras ferramentas acionadoras e as cinco posteriores as ferramentas guias.

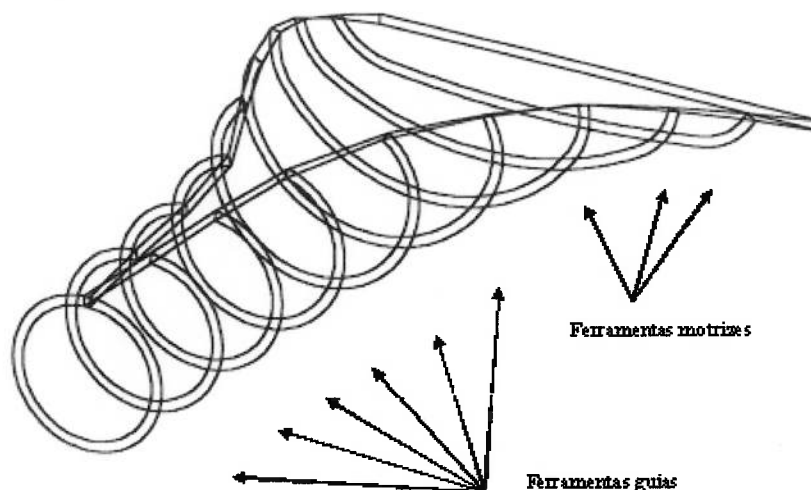


Figura 82 – Seqüência de conformação⁽⁷¹⁾

Como observado o grau de deformação imposto a cada estação varia, de forma a manter aproximadamente constante o ângulo de deformação e por conseqüência a tensão de escoamento a qual o material está submetido.

Segundo Timoshenko ⁽⁸⁾ o momento fletor requerido para flexão além do limite elástico é expresso pela equação:

$$M_{\text{lim}} = \sigma_e * L * t^2 / 4 \quad (76)$$

onde:

σ_e = tensão de escoamento do material

L = distância entre estações de conformação (considerando uma barra de largura L)

t = espessura do tubo (equivalente à espessura da chapa)

Esta expressão aplicada a uma chapa que se desloca a uma velocidade v, permite estimar a potência necessária para a deformação. Uma forma alternativa de cálculo pode ser estabelecida a partir da deformação introduzida no material.

O modelo matemático para cálculo dos esforços de conformação contínua por rolos em chapas metálicas para fabricação de tubos é obtido considerando um elemento de comprimento δz , a viga de largura **b** e a seção transversal ($t \cdot \delta z$) de uma chapa de espessura **t**, conforme visto na figura 83.

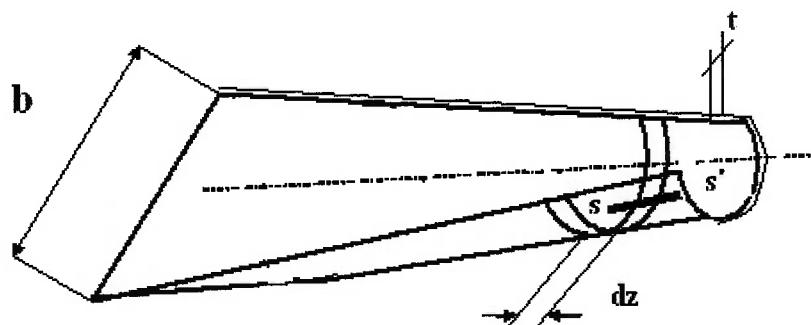


Figura 83 – Esquema de deformação em uma linha de conformação por rolos
Considerando uma fibra transversal s-s' como visto na figura 84, têm-se tensões de tração transversal Σ_x e longitudinal Σ_z devido ao esforço F longitudinal, responsável pelo momento de flexão M_f

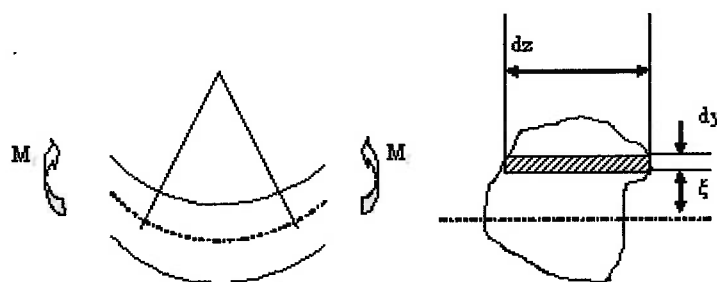


Figura 84 - Análise de tensões na flexão

O momento fletor M_f é expresso pela equação:

$$M_f = \frac{E}{R_c} \int \xi^2 dA \quad (77)$$

sendo

E = módulo de Young

R_c = raio de curvamento

$dA = dy.dz$ = elemento de área

ξ = distância do elemento de área à superfície neutra

Analisando a seqüência de conformação por estação, considera-se a deformação obtida entre duas estações consecutivas que resulta em uma flecha y correspondendo a um carregamento distribuído de intensidade q segundo a figura 85.

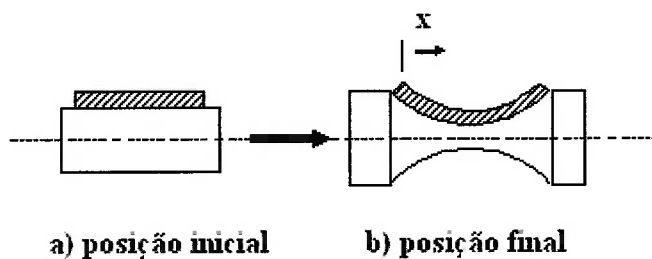


Figura 85 – Deformação do material entre duas estações de trabalho

Para carregamento uniformemente distribuído sobre a chapa de largura b tem-se:

$$M_f = \frac{qbx}{2} - \frac{qx^2}{2} \quad (78)$$

Onde

q = carga distribuída sobre a largura da tira

b = largura da tira

x = distância do ponto à extremidade da tira

A partir deste valor pode ser calculada a flecha máxima no meio do vão segundo a expressão para deformação elástica:

$$y_{\max} = \frac{q \cdot b^4}{120 \cdot EI_z} \quad (79)$$

onde:

y_{\max} = flecha máxima

I_z = momento de inércia da seção

Dividindo-se o círculo em 4 partes pode-se obter uma expressão mais aproximada para a conformação segundo a figura 86:

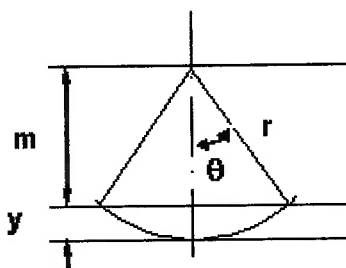


Figura 86 – Partição do círculo para equacionamento

Das relações geométricas da figura 81 obtém-se:

$$y = r \cdot (1 - \cos \theta) \quad (80)$$

Considerando D o diâmetro do tubo, e i o número de estações tem-se a flecha por estação para cada quarto de comprimento da tira, admitindo dz como a distância correspondente ao passo entre estações.

Conhecida a deformação imposta pelos rolos de conformação é possível estabelecer a intensidade da carga distribuída sobre a peça de trabalho segundo a expressão originada da equação 79.

$$q = \frac{76,8 \cdot E \cdot I_z \cdot y_{\max}}{b^4} \quad (81)$$

compondo com a equação 80 tem-se:

$$q = \frac{76,8 \cdot E \cdot I_z \cdot [r \cdot (1 - \cos \theta)]}{b^4} \quad (82)$$

O momento de inércia da seção retangular longitudinal da chapa, admitido entre duas estações de trabalho distanciadas da dimensão L, é dado pela expressão:

$$I_z = \frac{L \cdot t^3}{12} \quad (83)$$

Logo a carga distribuída necessária é igual a:

$$q = \frac{6,4 \cdot E \cdot L \cdot t^3 \cdot [r \cdot (1 - \cos \theta)]}{b^4} \quad (84)$$

Considerando a carga distribuída q aplicada entre a ferramenta e a chapa tem-se a força de atrito resultante segundo a equação 85, onde μ é o coeficiente de atrito entre as superfícies em contato e b a largura da chapa.

$$F_N = q \cdot b \cdot \mu \quad (85)$$

3.6.1 Potência de trabalho

O momento da força de atrito relativo à força normal à superfície da chapa é expresso pelo produto desta pelo raio da ferramenta de conformação R, segundo a equação 86 a seguir:

$$M_t = F_{atr} \cdot R \quad (86)$$

Para uma velocidade de deslocamento da chapa v tem-se a intensidade da potência de deslocamento da chapa entre cada estação de trabalho segundo a expressão:

$$P_d = F_{atr} \cdot v \quad (87)$$

Para a seqüência de estações de trabalho obtém-se a potência total pela somatória dos valores individuais segundo o grau de deformação imposto ao material em cada estação.

Considerando que a deformação y (equação 80) ocorre no tempo de deslocamento da chapa a uma velocidade v entre estações tem-se a velocidade de deformação v_d expressa pela equação:

$$v_d = \frac{r \cdot (1 - \cos \theta) \cdot v}{L} \quad (88)$$

A deformação inicial da chapa foi mostrada na figura 61, considerando-se a simetria de deformação. A potência de deformação é expressa combinando-se as equações 87 e 88, com as respectivas alterações de identificação.

$$P_d = \frac{F_N \cdot r \cdot (1 - \cos \theta) \cdot v}{L} \quad (89)$$

Logo, a potência total por estação é obtida pela composição das equações 87 e 89 resultando em:

$$P = \frac{F_N \cdot r \cdot (1 - \cos \theta) \cdot v}{L} + \mu \cdot F_N \cdot v \quad (90)$$

simplificando os termos da equação tem-se:

$$P = F_N \cdot v \cdot \left[\mu + \frac{r \cdot (1 - \cos \theta)}{L} \right] \quad (91)$$

Substituindo os termos por aqueles presentes nas equações 84 e 85 tem-se a equação geral:

$$P = \frac{3,2 \cdot E \cdot L \cdot t^3 \cdot [r \cdot (1 - \cos \theta)]}{b^3} \cdot v \cdot \left[\mu + \frac{r \cdot (1 - \cos \theta)}{L} \right] \quad (92)$$

A complementação deste equacionamento é feita considerando-se a eficiência do sistema de transmissão adotado, do rendimento dos motores de acionamento e a necessidade de movimentação da bobina de matéria prima com equilíbrio do esforço de frenagem necessário para manter constante a velocidade de alimentação da tira de material a ser conformado.

3.6.2 Aplicação da equação para cálculo da Potência

Utilizando a equação 92 e considerando os parâmetros de conformação tais como: espessura, diâmetro do tubo e ângulo de posição da extremidade em conformação, foram obtidos os gráficos a seguir:

Para o ângulo de posição constante e igual a 30°, obtém-se, para as espessuras variando de 0,9 a 7 mm e diâmetros variando entre 25 e 152 mm, o gráfico PED (Potência x Espessura x Diâmetro) tendo como abscissa o valor da espessura do

material e cada curva correspondendo a um valor de diâmetro conforme exposto na figura 87.

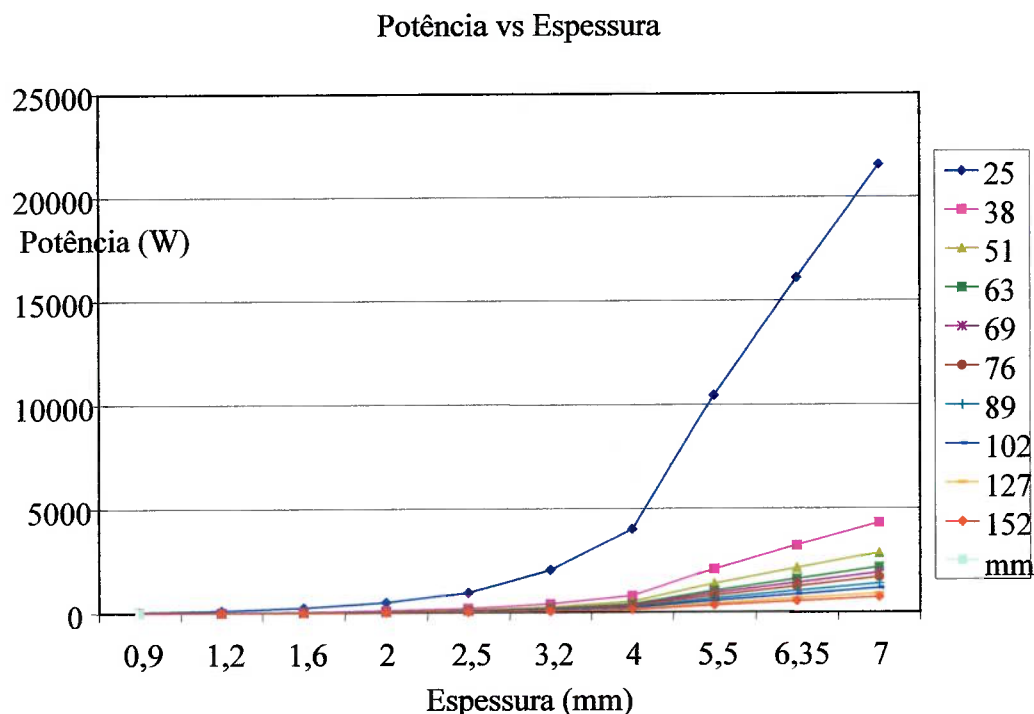


Figura 87 – Variação da potência em função da espessura com dobramento a 30° e variação do diâmetro do tubo formado

No gráfico PED observa-se um aumento da potência de conformação em função do aumento da espessura da chapa, conforme esperado em vista dos resultados reais encontrados nesta operação de conformação e pelo aumento de energia necessário para o dobramento de uma chapa com maior espessura. Nota-se que o valor absoluto da potência diminui em função do aumento do diâmetro.

Uma aparente mudança de inflexão em torno da espessura 4 mm é explicada pela variação do espaçamento entre os valores da espessura.

Tornando esta variação contínua tem-se os gráfico mostrados no anexo B :

(B-5 a B-9)

Invertendo-se os parâmetros, obtém-se o gráfico PDE (Potência x Diâmetro x Espessura) tendo como abscissa o valor do diâmetro e cada curva correspondendo a um valor de espessura, conforme visto na figura 88 a seguir

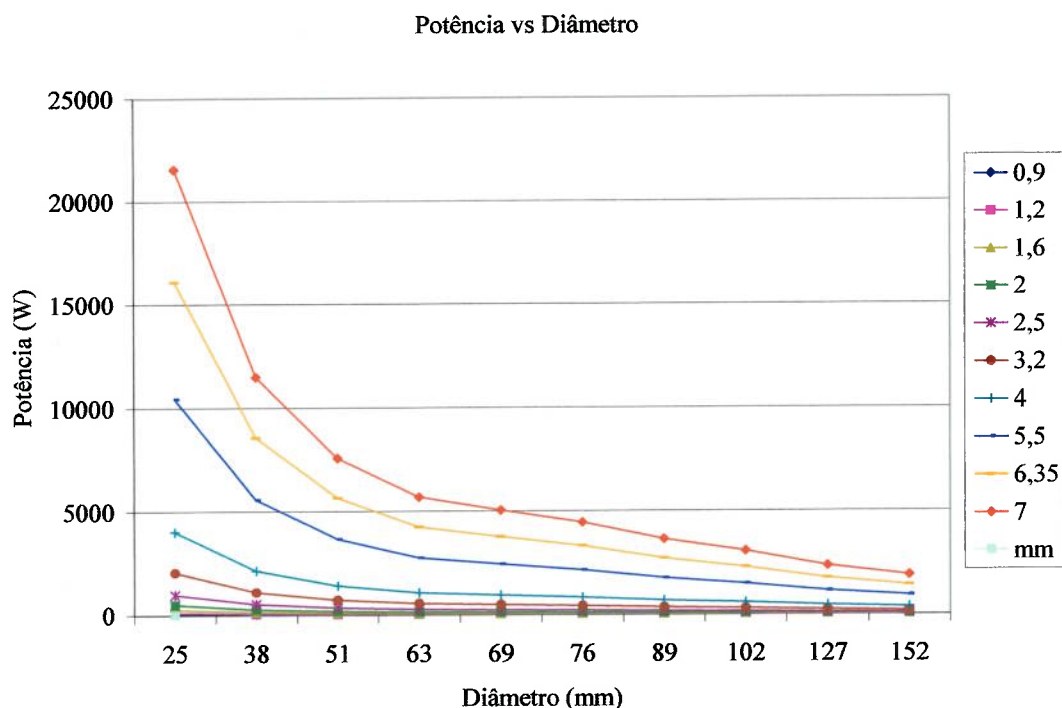


Figura 88 – Gráfico Potência x Diâmetro x Espessura

Nesta apresentação torna-se clara a redução da potência de conformação com o aumento do diâmetro do tubo em função do menor esforço de deformação necessário, uma vez que a distância entre os supostos pontos de apoio está aumentando e o valor do momento fletor está reduzindo para uma dada deformação e para uma mesma distribuição de cargas como estabelecido na equação 84 anterior.

Considerando o comportamento em função dos parâmetros adotados como variáveis independentes tem-se o gráfico PAE (Potência x Ângulo x Espessura) de variação da potência em função da variação do ângulo de posição da extremidade da chapa e em função da variação da espessura da chapa conforme mostrado na figura 89.

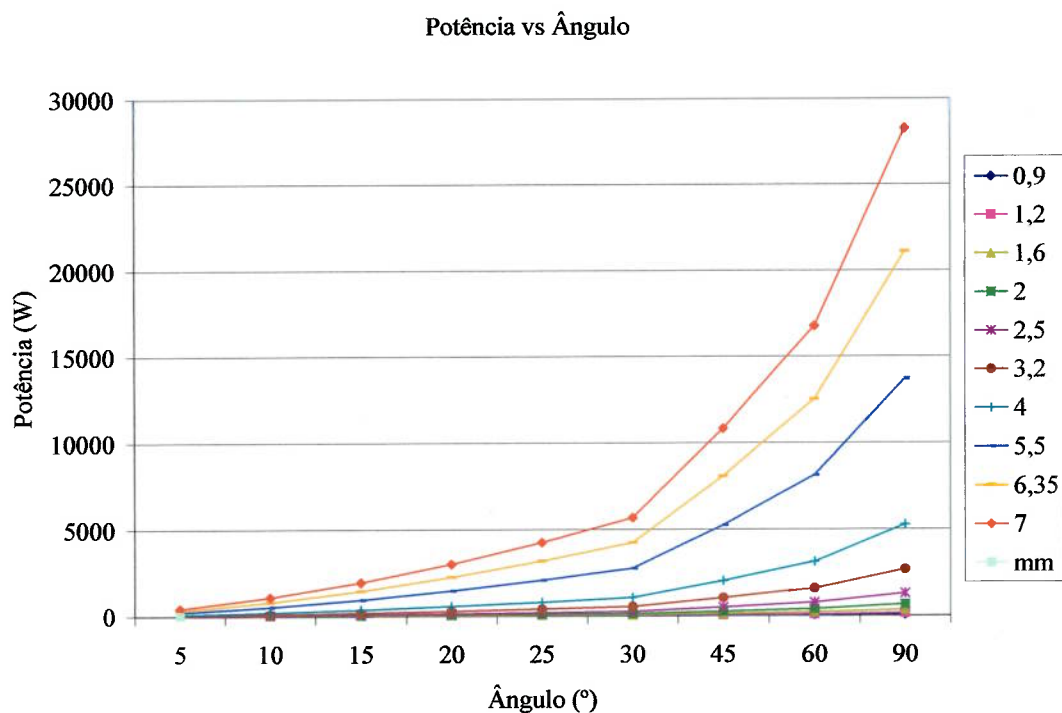


Figura 89 – Gráfico da Potência x Ângulo de posição x Espessura

Uma vez que o ângulo de posição está relacionado com a intensidade de deformação imposta ao material, o resultado mostrado no gráfico é coerente ao apresentar o aumento da potência com o aumento do ângulo de posição. Novamente observa-se o aumento do valor da potência, agora, com o aumento da espessura, fato esperado em função da tensão de flexão do material ser inversamente proporcional ao cubo da espessura da chapa e portanto, necessitando maior energia para se alcançar o mesmo nível de tensionamento. Comparando-se estes resultados com aqueles obtidos por Nefussi et al.⁽⁴⁸⁾, tem-se uma concordância entre o aumento da tensão e o correspondente aumento da potência de deformação.

A observação do gráfico PEA (Potência x Espessura x Ângulo) apresentado na figura 90 a seguir, permite comprovar este resultado.

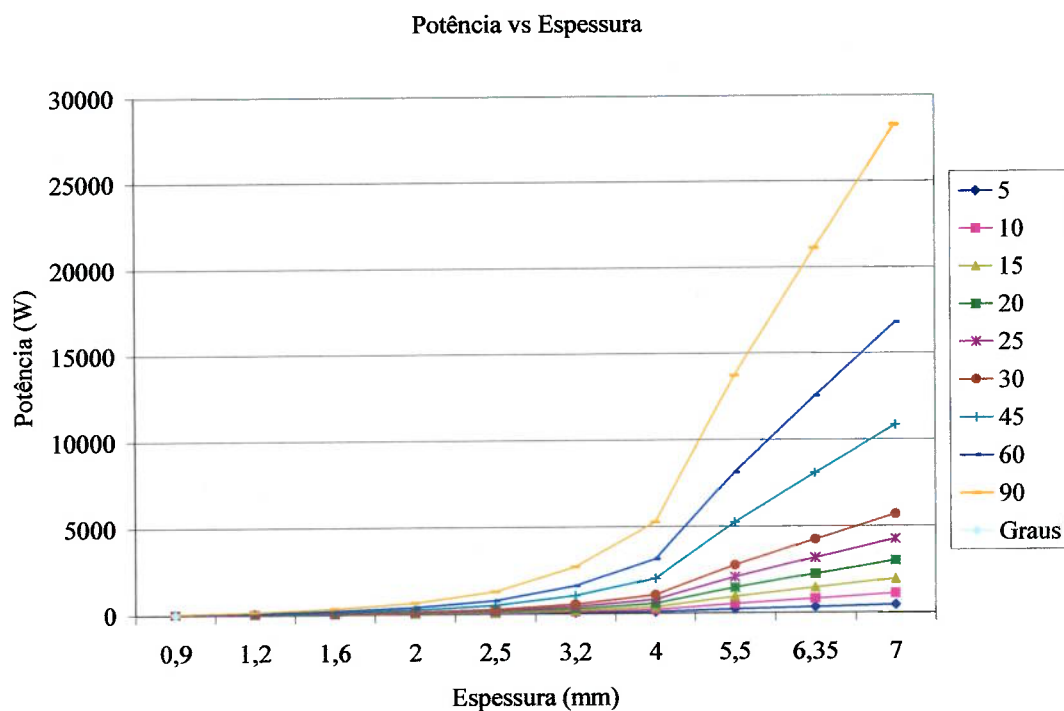


Figura 90 – Gráfico da Potência x Ângulo de posição x Espessura

Observando o gráfico PDA (Potência x Diâmetro x Ângulo de posição) de variação da potência em função da variação do diâmetro com a variação do ângulo como é apresentado na figura 91 e, como elemento auxiliar para análise de comportamento, o gráfico PAD (Potência x Ângulo x Diâmetro) na figura 92, com a mudança dos parâmetros de conformação no eixo das abscissas.

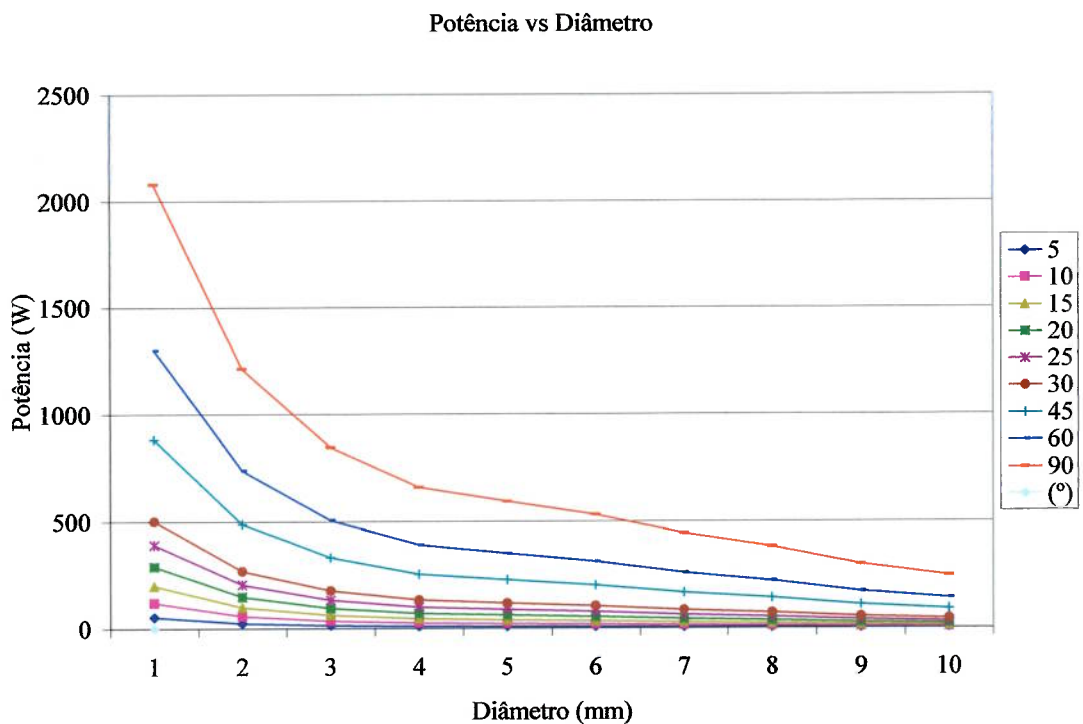


Figura 91 – Gráfico Potência x Diâmetro x Ângulo de posição

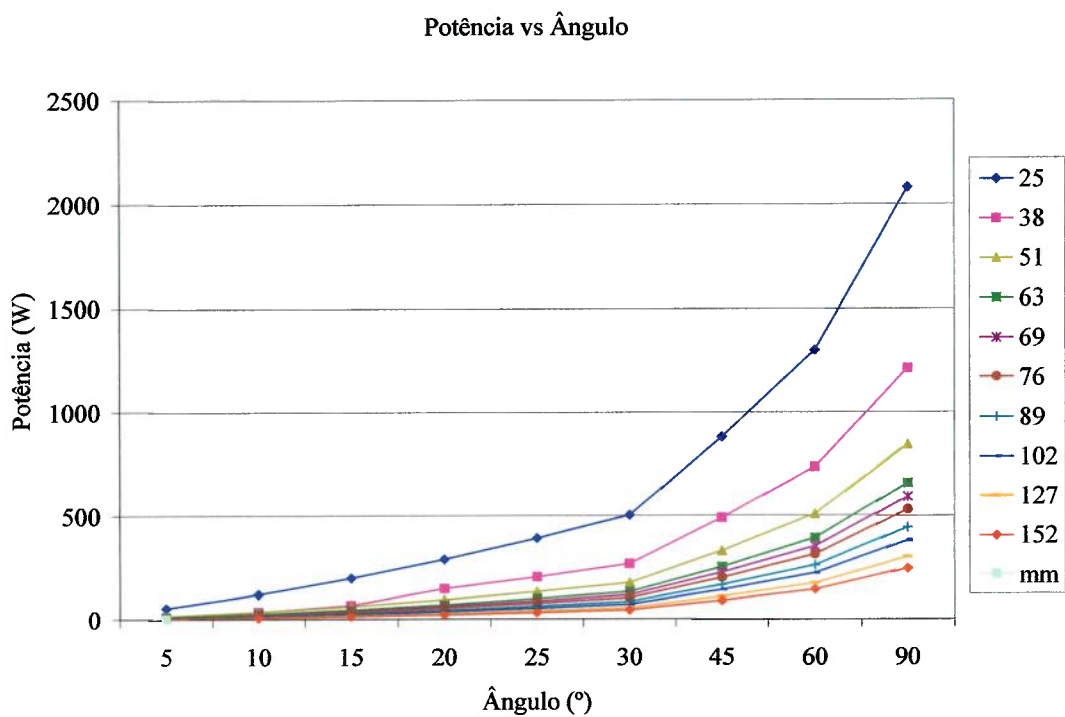


Figura 92 – Gráfico Potência x Ângulo x Diâmetro

Torna-se claro o efeito da redução de diâmetro e do aumento do ângulo de posição sobre o valor da potência de conformação

3.6.3 Variação da equação para cálculo da Potência

Uma segunda abordagem do processo de conformação é feita considerando que tenha sido alcançada a tensão de escoamento do material por meio de um momento fletor de magnitude dada pela equação 93⁽⁸⁾

$$M = \frac{F \cdot b}{4} \quad (93)$$

Igualando as equações 76 e 93 tem-se, para largura b da chapa obtida segundo o diâmetro do tubo a ser produzido, a equação:

$$F = \sigma_e \cdot \frac{L \cdot t^2}{b} \quad (94)$$

Em função da movimentação da chapa ao longo da máquina devido ao atrito existente entre as ferramentas e as superfícies inferior e superior da chapa e a relação entre a força F aplicada normalmente à chapa e o coeficiente de atrito entre as superfícies tem-se a força de atrito:

$$F_{atr} = F \cdot \mu \quad (95)$$

utilizando-se das equações 94 e 95 tem-se

$$F_{atr} = \mu \cdot \sigma_e \cdot L \cdot t^2 / b \quad (96)$$

Para o deslocamento a uma velocidade v tem-se o valor da potência de movimentação expresso por:

$$P = \frac{\mu \cdot \sigma_e \cdot L \cdot t^2 \cdot v}{b} \quad (97)$$

Esta expressão considera a deformação total para obtenção do perfil tubular ao longo das três estações conformadoras conforme visto na figura 77.

Para a deformação imposta ao longo destas estações a potência necessária é calculada considerando a velocidade de deformação, estabelecida segundo a equação 88, e a força F aplicada na chapa, resultando na expressão:

$$P = F \cdot v_d \quad (98)$$

compondo as equações 88 e 96 tem-se:

$$P = \sigma_e \cdot \frac{L \cdot t^2}{b} \cdot \frac{r \cdot (1 - \cos \theta) \cdot v}{L} \quad (99)$$

para o valor do raio de curvamento em função da largura da chapa fornecido pela equação e do ângulo correspondente a este curvamento tem-se a equação:

$$r = b/\theta \quad (100)$$

substituindo a equação 94 na equação 93 resulta em:

$$P = \sigma_e \cdot t^2 \cdot (1 - \cos \theta) \cdot v/\theta \quad (101)$$

A potência total de conformação é obtida somando-se as equações 91 e 95, resultando em:

$$P = \sigma_e \cdot t^2 \cdot v \cdot \left[\frac{\mu \cdot L}{b} + \frac{(1 - \cos \theta)}{\theta} \right] \quad (102)$$

Esta equação leva em conta a tensão de escoamento do material para estabelecimento do valor da potência de conformação do perfil em função do ângulo estabelecido pela ferramenta de rolos. Aplicando esta equação no cálculo da potência são obtidos os gráficos a seguir, possibilitando uma comparação entre os resultados de cada uma delas.

Esta comparação é observada na figura 93 considerando a variação da potência em função da variação da espessura e do diâmetro do tubo para um ângulo de curvamento de 30°

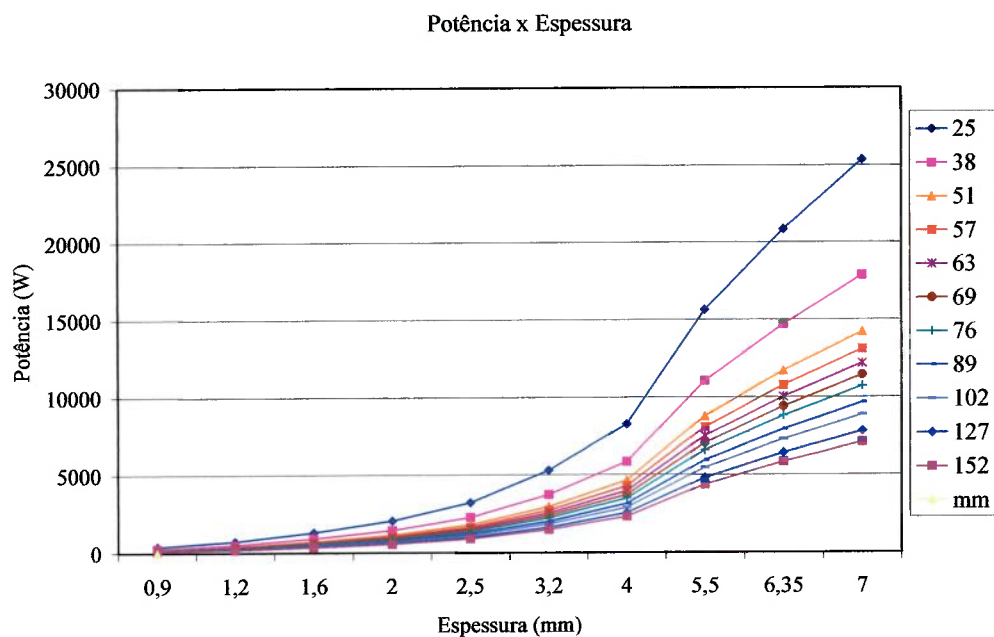


Figura 93 - Gráfico: Potência x Espessura x Diâmetro

É observado um comportamento distinto a partir da espessura de 4 mm com mudança na taxa de variação da potência, crescente até 4 mm e decrescente após 4 mm de espessura do material, simultaneamente com o aumento da potência para curvamento da chapa para diâmetros menores do perfil tubular fabricado.

Com a mudança da variável no eixo das abscissas para o ângulo de curvamento e com as curvas representando cada diâmetro do perfil tubular, é observada na figura 94 uma variação linear da potência em função do ângulo de curvamento do perfil.

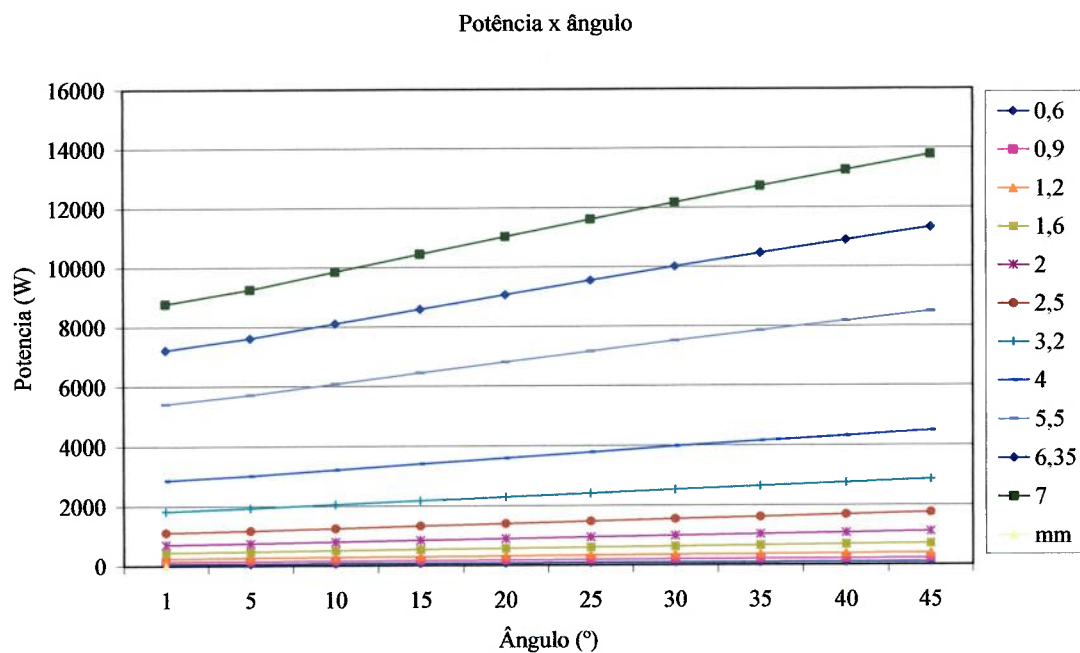


Figura 94 – Gráfico Potência x Ângulo x Diâmetro

Utilizando-se da mesma base de dados é traçado o gráfico apresentado na figura 95, com o eixo das abscissas referente à variação do diâmetro do tubo e portanto relacionado com a largura da chapa. O ângulo de curvamento é mantido em 30° e o comprimento deformado varia de 5 a 50 mm. Neste caso é utilizada a observação de Nefussi et al⁽⁴⁸⁾, correspondente à relação entre o comprimento deformado e a largura da tira em operação.

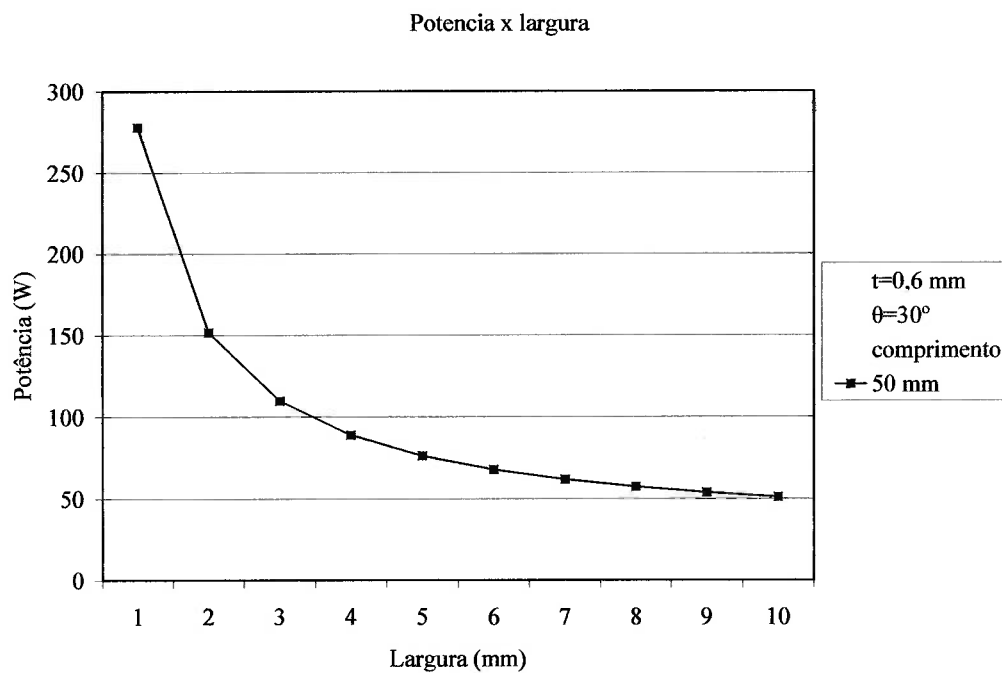


Figura 95 – Gráfico Potência x Largura ($t = 0,6 \text{ mm}$, $\theta = 30^\circ$) para material com dureza 180 MPa

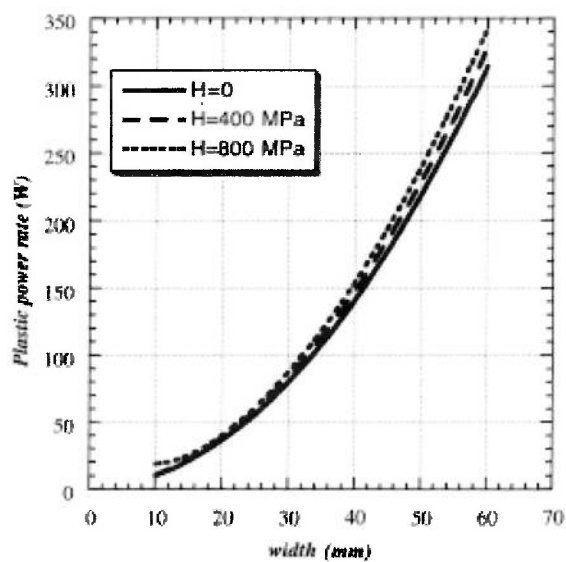


Fig. 7. Plastic power rate vs. width ($t = 0,6 \text{ mm}$; $\theta = 30 \text{ degrees}$) for different hardening slopes.

Nefussi et al.⁽⁴⁸⁾

Figura 96 – Gráfico Potência x Largura ($t = 0,6 \text{ mm}$, $\theta = 30^\circ$) com diferentes durezas do material

Comparando o gráfico mostrado na figura 95 com o gráfico apresentado por Nefussi et al. temos uma inversão, uma vez que a potência apresenta uma redução no valor conforme mostrado na figura 95 enquanto que, segundo Nefussi et al.⁽⁴⁸⁾ deveria apresentar uma elevação da potência consumida como mostrado na figura 96⁽⁴⁸⁾.

Para Nefussi et al. o valor do comprimento deformado varia linearmente com a largura da chapa e, nesta condição o resultado obtido pela equação 102 mostra uma potência constante para a deformação.

O resultado obtido traduz o fato de ser necessário menor esforço de conformação uma vez que a força de deflexão para uma mesma espessura de chapa é menor quando as distâncias entre apoios é maior, considerando uma viga bi-apoiada, fato característico na conformação de chapas com larguras maiores.

4. Discussão dos resultados

Em função da aplicação de esforços solicitantes devidos a aplicação de forças externas tais como: tração; compressão; pressão superficial; cisalhamento; tração e compressão por meio da aplicação de momentos fletores; e cisalhamento devido a momentos torçores, o estudo da deformação dos materiais leva ao estabelecimento destas grandezas por meio da simulação matemática e física das operações de conformação dos materiais.

O meio pelo qual estas conformações são alcançadas exige a determinação da potência necessária e este fato é pouco estudado no meio acadêmico. Por outro lado, a indústria exige este conhecimento para orientar a seleção de máquinas, processos e materiais adequados à produção.

A comparação pura e simples dos resultados obtidos por uma ou outra linha de pesquisa traz na maioria das vezes, conflitos em função dos parâmetros adotados.

Analisando os resultados apresentados e as observações resultantes da comparação entre os valores obtidos por Nefussi et al⁽⁴⁸⁾., salientamos os seguintes tópicos:

- Aumento da tensão resultante no material com o aumento do ângulo de curvamento da chapa, destacado na figura 3 da referência.

Este comportamento é verificado por meio da análise das equações 92 e 102, onde está presente a expressão $(1-\cos\theta)$ que é crescente com o valor do ângulo de curvamento θ . Outro ponto de apoio está no fato de ao aumentar o ângulo de curvamento a superfície externa sofre um alongamento maior resultando em maior tensão solicitante. Este comportamento é explicado pelo aumento do grau de deformação imposto ao material conforme visto anteriormente na figura 81.

- Aumento da tensão resultante no material com o aumento da espessura da chapa, destacado na figura 5 da referência.

Configura-se este comportamento em função do aumento do alongamento nas fibras externa da chapa e do aumento do módulo de resistência da chapa.

- Aumento da potência de deformação plástica com o aumento da largura da chapa conforme visto na figura 7 da referência.

Este comportamento não foi coerente com aquele obtido com aplicação das equações 92 e 102 para cálculo da potência. O resultado obtido na referencia 48 torna-se

coerente em função do comportamento observado na figura 6 da referência, onde é relacionado o comprimento deformado com a largura da chapa de força proporcional com razão unitária. Na aplicação das equações desenvolvidas neste trabalho normalmente são considerados comprimentos de deformação fixos conforme estabelecido pelo posicionamento das estações de trabalho que, por ordem operacional, apresentam espaçamento fixo. Este fato leva a uma modificação do comportamento quando analisados os gráficos apresentados nas figuras 88 e 95, resultando em redução da potência com o aumento da largura. Isto é explicável pela redução da força necessária para se obter o mesmo momento fletor, considerando o maior espaçamento entre os apoios.

Considerando que, mesmo nos programas comerciais disponíveis não existe a referência ao valor da potência desenvolvida pela máquina conforme mostrado no anexo A, a aplicação da equação proposta é viável e permite uma previsão razoável do esforço a ser realizado pela máquina, reduzindo tempo de avaliação e direcionando a resultados mais favoráveis tanto em termos de custo como tempo de operação.

5. Conclusão

Com base na literatura existente foi desenvolvido um sistema de equações para determinação da potência desenvolvida pelo equipamento de conformação para fabricação de perfis tubulares de diâmetros comerciais.

O método aplicado foi comparado com as informações disponíveis através de trabalhos publicados em periódicos e livros relacionados com o assunto, permitindo uma avaliação de pertinência e adequação ao uso.

As diferenças encontradas foram analisadas estabelecendo uma correlação entre os valores obtidos, possibilitando o uso das equações tanto para o estabelecimento das tensões resultantes da deformação do material, como aquelas disponíveis nas referências, e da potência necessária para se obter o produto no tempo economicamente viável, como desenvolvido neste trabalho.

Os valores de potência de conformação foram estabelecidos permitindo uma avaliação da potência de acionamento da máquina com reflexos positivos tanto no projeto de novos equipamentos como na utilização racional das instalações existentes.

6. - Recomendação de continuidade para novos desenvolvimentos

O estudo para desenvolvimento de novos equipamentos direciona o trabalho de pesquisa para o estabelecimento de uma fonte confiável de dados e proposições. Com relação à linha de pesquisa estabelecida são sugeridos trabalhos de complementação em:

- Simulação de conformação em equipamentos utilizando o Método de elementos finitos;
- Modificação do sistema de acionamento com introdução de conjuntos individuais com controle de rotação e torque de acionamento
- Introdução de sistemas de soldagem com maior eficiência e menor alteração da forma geométrica do tubo, reduzindo a usinagem do reforço de solda externo e interno

7. - Referências Bibliográficas

- 1- BOOTHROYD, G., DEWHURST, P., KNIGHT, W., *Product design for manufacture and assembly*, M. Dekker, N.Y., 1994
- 2- - KIM, N., KANG, B., LEE, S., *Prediction and design of edge shape of initial strip for thick tube roll forming using finite element method*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 142, pág 479-486, 2003.
- 3- SWEENEY,K., GRUNEWALD, U., *The application of roll forming for automotive structural parts*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 132, pág 9-15, 2003.
- 4- PATTON, W.J., *Fundamentals of modern manufacturing*, Prentice Hall, N.J., 1970.
- 5- GELLEJI, A., *Forging and rolling mill equipment and accessories*, Akademiai, 1976
- 6- ALTAN, T., OH, S., GEGEL, H., *Conformação dos metais*, EESC-USP, 1ª ed., São Carlos, 1999
- 7- TSELIKOV, A., *Stress and strain in metal rolling*, MIR Publishers, Moscow, 1967
- 8- TIMOSHENKO, S, *Resistência dos materiais*, LTC,RJ, 1976
- 9 - <http://me21.knu.ac.kr/note/sosung.htm>
- 10- POPOV,E.P., *Introdução à mecânica dos sólidos*, Edgard Blucher, S.P. , 1978
- 11-HAN, Z., LIU, C., LU, W., REN, L., *The effects of forming parameters in the roll-forming of a channel section with an outer edge*, International Journal of Materials Processing Technology, vol. 116, pág. 205-210 2001.
- 12 - 11-HAN, Z., LIU, C., LU, W., REN, L., *Simulation of a multi-stand roll-forming process for thick channel section*, International Journal of Materials Processing Technology, vol. 127, pág. 382-387, 2002.
- 13 - 11-HAN, Z., LIU, C., LU, W., REN, L., TONG, J., *Spline finite strip analysis of forming parameters in roll-forming a channel section*, International Journal of Materials Processing Technology, no prelo, 2004.
- 14 - SIEGERT, K., DANNENMANN, E., *Fundamentals of metalforming*, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, EAA - European Aluminium Association, Stuttgart , 1996

- 15 - DADDI, I., *Materiali metallici, meccanismi di deformazione e di frattura*, Tamburini Editore, Milano, 1972.
- 16 - GAN, W., WAGONER, R.H., *Die design method for sheet springback*, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 46, pág. 1097-1113, 2004
- 17 - BATALHA, G.F., *Tribologia aplicada aos processos de fabricação mecânica por usinagem e conformação*, Apostila, EPUSP, S.P. , 2003
- 18 - LEE, J.D., CHEN, Y.P., *Non-steady-state elastic-plastic behavior of metal forming (rolling) with a generalized friction law*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 33, pág. 93-99, 2000.
- 19 - AVITZUR, B. *Handbook of metalforming process*, John Wiley, N.Y., 1983
- 20 - GRUNING, K., *Técnica da conformação*, Editora Polígono, S.P. , 1973.
- 21- HUTCHINGS, I.M., *Tribology friction and wear of engineering materials*, Edward Arnold, Londres, 1992.
- 22- PANDOLFI, A., KRYSL, P., ORTIZ, M., *Finite element simulation of ring expansion and fragmentation: The capturing of length and time scales through cohesive models of fracture*, International Journal of Fracture, vol. 94(1-4), pág. 279-297, 1999.
- 23- ASTM D6773-02 Shear Test Method for Bulk Solids Using the Schulze Ring Shear Tester, American Society for Testing Materials, 2002
- 24 - CALLISTER, W. D., *Materials science and engineering*, 4a ed., John Wiley & Sons, Inc., NY, 1997.
- 25- SACHS, G., *Principles and methods of sheet-metal fabricating*, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1951
- 26- KREITH, F., BOHN, M.S., *Princípios de transferência de calor*, 6ª edição, Editora Thomson, S.P., 2003.
- 27- LIU, C. ZHOU, Y., LU, W., *Numerical simulation of roll-forming by B-spline finite strip method*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 60, pág 215-218, 1996
- 28- THIRUVARUDCHELVAN, S., *A software on sheet metal forming processes(A) with the aid of flexible tools,(B) using hydraulic pressure*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 48, pág 699-705, 1995.

- 29- GENG, L., WAGONER, R.H., *Role of plastic anisotropy and its evolution on springback*, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 44, pág. 123-148, 2002.
- 30- YOON, J.W., POURBOGHRAAT, F., CHUNG, K., YANG, D.Y., *Springback prediction for sheet metal forming process using a 3D hybrid membrane/shell method*, International Journal of Mechanical Sciences, vol.44, pág. 2133-2153, 2002.
- 31- CARDEN, W.D., GENG, L.M., MATLOCK, D.K., WAGONER, R.H., *Measurement of springback*, International Journal of mechanical Sciences, vol 44, pag 79-101, 2002.
- 32- ONA, H., *Cold roll forming for high tensile strength steel sheet proposition on forming of thin spring steel sheet pipe*, International Journal of Materials Processing Technology, no prelo, 2004
- 33- GAU, J.T., KINZEL, G.L., *A new model for springback prediction in which the Bauschinger effect is considered*, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 43, pág. 1813-1832, 2001.
- 34- BUTTON, S. T. , *IM465- CONFORMAÇÃO PLÁSTICA DOS METAIS*
Disponível em : <<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/posgraduacao/im465/8.pdf>>
Acesso em 02 fevereiro 2004
- 35- CHIAVERINI, V., *Tecnologia mecânica, processos de fabricação e tratamento*, vol 2, 2ª edição, Makron Books, S.P. , 1986
- 36- DYNAMICS MACHINE WORKS, *Flowforming process, flowforming performance*. Disponível em: <http://www.flowform.com/index.html>
- 37- HAN, Z-W., LIU, C. , LU, W-P., REN, L-Q., TONG, J., *Experimental investigation and theoretical analysis of roll forming of electrical resistance welded pipes*, International Journal of Materials Processing Technology, vol. 145, pág. 311-316, 2004
- 38- DIN- Deutches Institut fur Normunge DIN 8586 – *Fertigungsverfahren Biegeumformen.*, V. Berlin; Koln; Beuth, 1996
- 39- ONA, H. WATARI, H., NAKAKO, T., *Production method on pipe of thin-spring steel sheet*, International Journal of Materials Processing Technology, vol. 115, pág. 92-96, 2001
- 40- COPRA roll forming software, 2004

- 41- NICHOLS, R.K., *High frequency welding of Aluminum*, Disponível em <<http://www.thermattol.com/files/hfwelding.pdf>>, 1999.
- 42- METALS HANDBOOK, ASM, *Forming and forging*, Vol 14, 9ª edição, 1998
- 43- RIPODAS AGUDO, F. J. , *Manufacturing tubes for hydroforming applications*, Tube & Pipe Technology, May/June 2003.
Disponível em: <<http://www.thermatool.com/files/Manufacturing%tubes.pdf>>. .
Acesso em 20 de julho 2004.
- 44- ROLL FORMING, Yoder Manufacturing Equipment. Disponível em: <http://www.yodermfg.com/home_IE.htm> . Acesso em 21 de janeiro 2004.
- 45- OSTWALD, P.F., Munoz, J., *Manufacturing processes and systems*, John Wiley & Sons, N.Y., 1997
- 46- *Yoder technical paper, Tricathode yoder High speed TIG Welding System*. Disponível em <<http://www.yodermfg.com>>, 2004
- 47- PRASEK, M.D., *Square wave electrode welders*, Yoder Technical Papers, 2004
- 48- NEFUSSI, G., PROSLIER, L., GILORMINI, P., *Simulation of the cold-roll forming of circular tubes*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 95, pág 216-221, 1999.
- 49- ALSAMHAN, A., HARTELY, P., PILLINGER, I., *The computer simulation of cold-roll-forming using FE methods and applied real time re-meshing techniques*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 142, pág 102-111, 2003.
- 50- ALSAMHAN, A., HARTELY, P., PILLINGER, I., *The development of real time re-meshing techniques for simulating cold-roll-forming using FE methods*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 147, pág 1-9, 2004.
- 51- FROMENTIN, S., MARTINY, M., FERRON, G., TOURKI, Z., MOREIRA, L.P., FERRAN, G., *Finite element simulations of sheet-metal forming processes for planar-anisotropic materials*, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 43, pág. 1833-1852, 2001
- 52- HEISLITZ, F., LIVATYALI, H., AHMETOGLU, M. A., KINZEL, G.L., ALTAN, T., *Simulation of roll forming process with 3-D FEM code PAM-STAMP*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 59, pág. 59-67, 1996.

- 53- BRUNET, M., MGUIL, S., POL, P., Modelling of a roll-forming process with a combined 2D and 3D FEM code, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 80-81, pág. 213-219, 1998.
- 54- UTSUNOMIYA, H., SUTCLIFFE, M.P.F., SHERCLIFF, H.R., BATE, P.S., MILLER, D.B., Three-dimensional topography of the matt surface in aluminium pack rolling, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 46, pág. 1083-1096, 2004.
- 55- SOKOLOWSKI, T., GERKE, K., AHMETOGLU, M., ALTAN, T., Evaluation of tube formability and material characteristics: hydraulic bulge testing of tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 98, pág. 34-40, 2000.
- 56- FOROUZAN, M.R., SALIMI, M., GADALA, M.S., Three-dimensional FE analysis of ring rolling by employing thermal spokes method, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 45, pág. 1975-1998, 2003.
- 57- RICHELSEN, A.B., TVERGAARD, V., 3D analysis of cold rolling using a constitutive model for interface friction, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 46, pág. 653-671, 2004.
- 58- PANTON, S.M., DUNCAN, J.L., ZHU, S.D., Longitudinal and shear strain development in cold roll forming, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 60, pág. 219-224, 1996.
- 59- MORI, K., YANG, G., OSAKADA, K., Determination of optimal motion of tools in metal forming processes by controlled FEM simulation, *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, vol. 35, pág. 851-859, 1994.
- 60- XUE, P., YU, T.X., CHU, E., An energy approach for predicting springback of metal sheets after double-curvature forming, Part I: axisymmetric stamping, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 43, pág. 1893-1914, 2001.
- 61- XUE, P., YU, T.X., CHU, E., An energy approach for predicting springback of metal sheets after double-curvature forming, Part II: Unequal double-curvature forming stamping, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 43, pág. 1893-1914, 2001.
- 62- VERGNE, C., BOHER, C., LEVAILLANT, C., GRAS, R., Application of the friction and wear behavior of hot work tool scale: application to the hot rolling process, *Wear*, vol. 230, pág. 322-333, 2001.

- 63- LIVATYALI, H., LAXHUBER, T., ALTAN, T., Experimental investigation of forming defects in flat surface-convex edge hemming, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 146, pág. 20-27, 2004.
- 64- KIUCHI, M., MOSLEMI NAEINI, H., SHINTANI, K., Computer aided design of rolls for reshaping processes from round pipes to “channel-type” pipes, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 111, pág. 193-197, 2001.
- 65- WATARI, H., ONA, H., Cold-roll forming of small diameter pipes with pre-notches, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 119, pág. 122-126, 2001.
- 66- DIN 8583 P3- Manufacturing processes, forming under compressive conditions, classification, subdivision, definition, Deutsches Institut für Normung E.V., 1970.
- 67- DIN 6935 - *Cold bending of flat rolled steel products*, Deutsches Institut für Normung E.V., 1983.
- 68- ROSSI, M., *Estampado en frio de la chapa*, Hoepli, S.L. Barcelona, 1957
- 69- AVITZUR, B. , Metalforming Inc, Disponível em: <<http://www.metalforming-inc.com>> Acesso em 15 julho 2004
- 70- STIPKOVIC, M. F. , *Conformação dos metais*, Notas de aula, Escola Politécnica, S.P., 2003
- 71- ROLL DESIGN SOFTWARE ,UBECO-PROFIL,
Disponível em <<http://www.ubeco.com/>> Acesso em 20 outubro 2002.

Anexo A

Relação de valores obtidos a partir do Software Profil⁽⁷¹⁾ para projeto de fabricação de perfis e tubos.

Este programa permite a obtenção de: dados relativos ao produto a ser fabricado, a dimensão e forma das ferramentas de conformação, as propriedades do perfil a cada estação de conformação, as tensões solicitantes na chapa relacionadas com a tensão limite de ruptura do material. Os dados são apresentados em forma de desenhos da ferramentas e tabelas relativas aos demais itens.

Considerando a fabricação de um tubo de aço com diâmetro externo de 30 mm e espessura de parede, utilizando chapa na forma de bobina com largura de 88,964 mm, são mostradas a seguir as planilhas fornecidas pelo programa.

A1 – Conjunto de ferramentas

A seguir são apresentados os desenhos parciais das ferramentas necessárias para a conformação, destacando as dimensões relativas ao produto após cada passe de conformação sem considerar o efeito mola (springback), segundo cada etapa prevista no esquema abaixo:

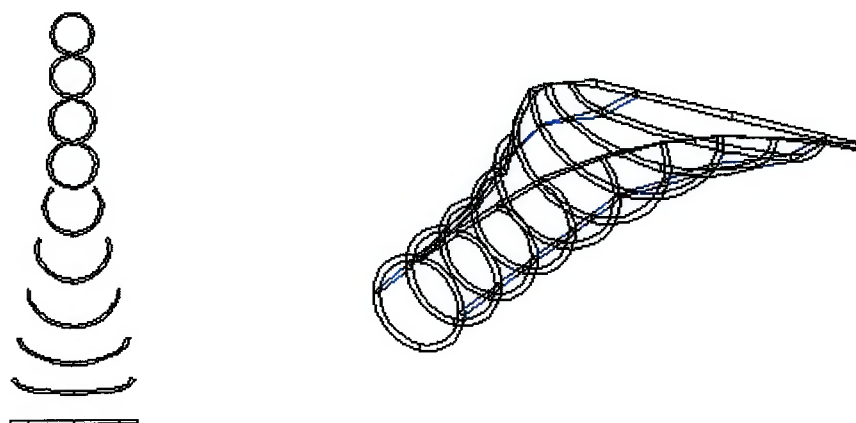
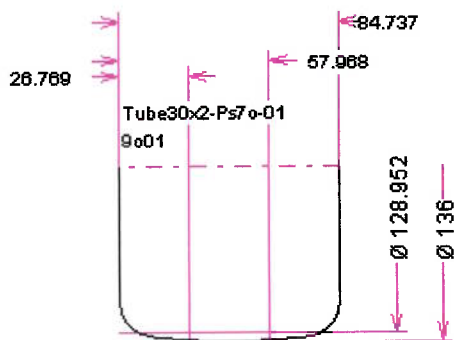
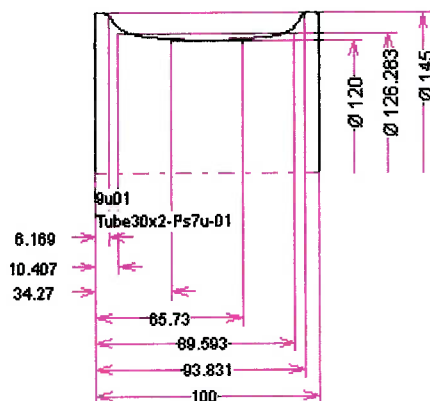


Figura A-1 – Sequência de passes para fabricação do perfil tubular⁽⁷¹⁾

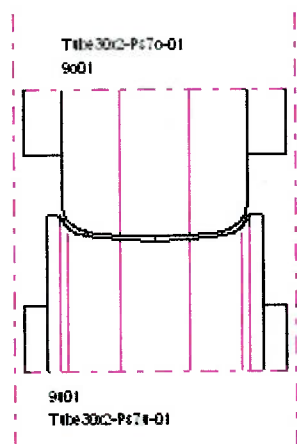
As dimensões das peças foram geradas de forma automática pelo programa a partir das dimensões exigidas para o produto.



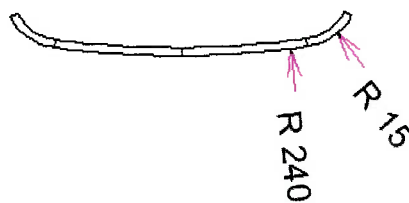
Ferramenta 9 superior



Ferramenta 9 inferior

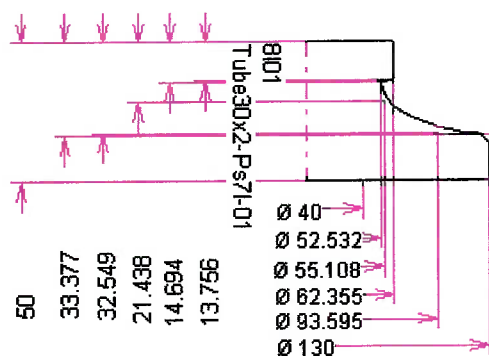


Ferramentas posicionadas

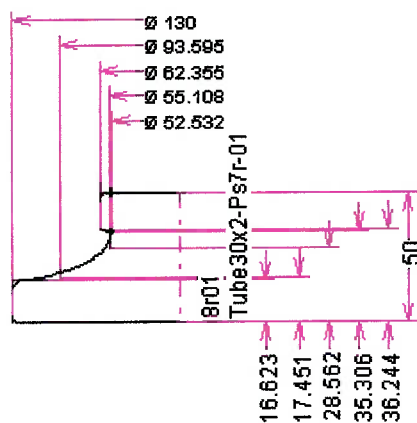


Produto conformado

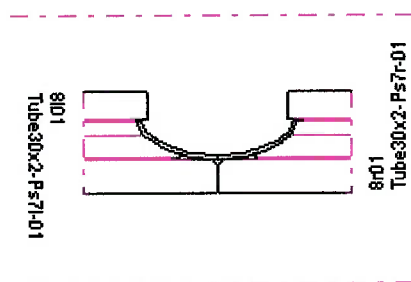
Figura A-2 Estação 9 montada



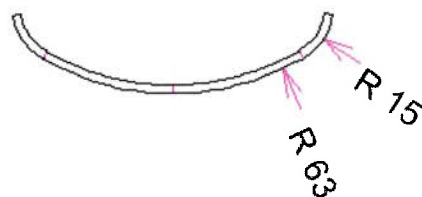
Ferramenta esquerda



Ferramenta 8 direita



Ferramentas posicionadas



Produto conformado

Figura A-3 Estação 8 montada

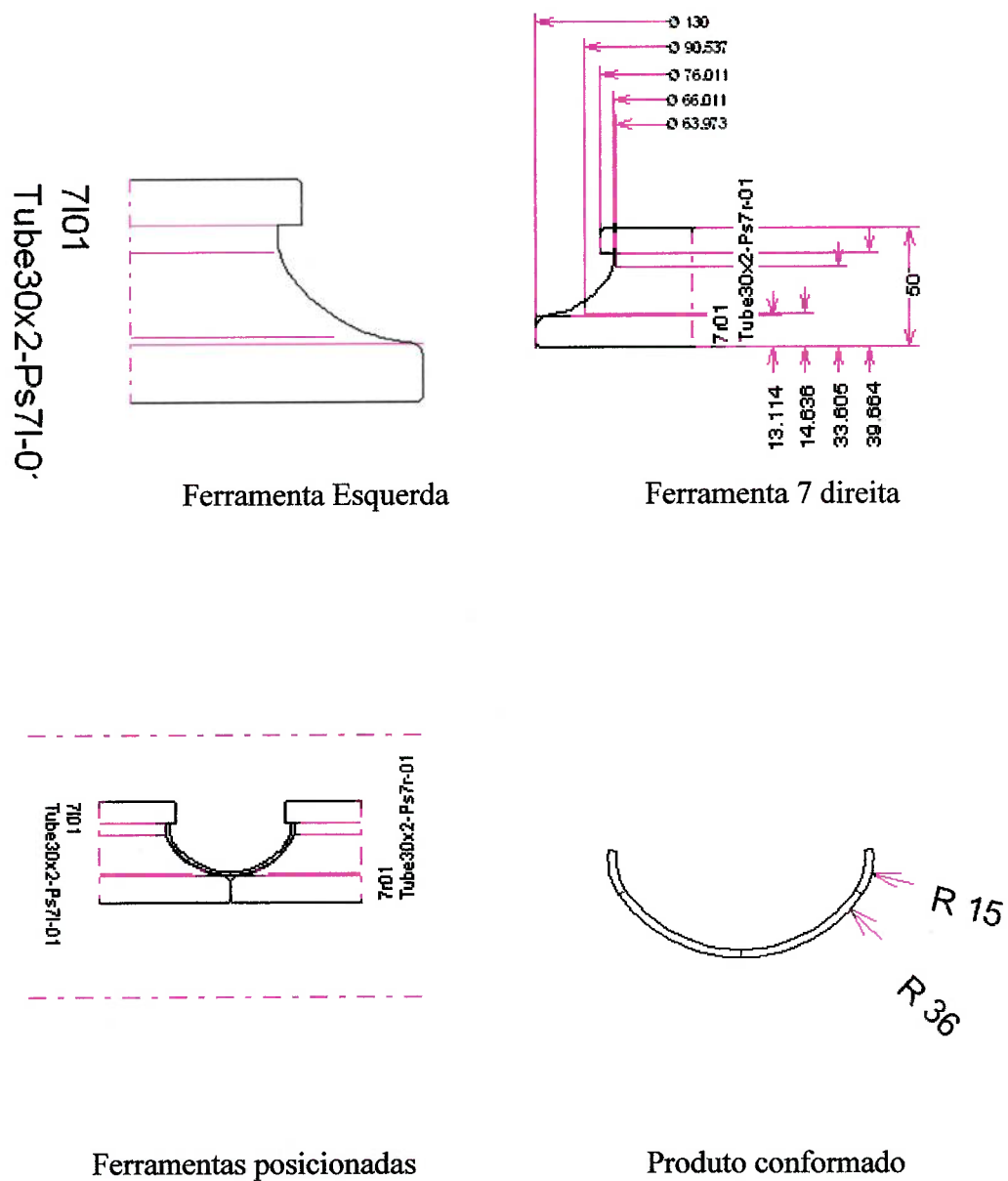
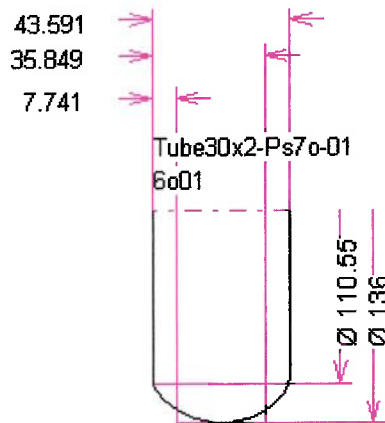
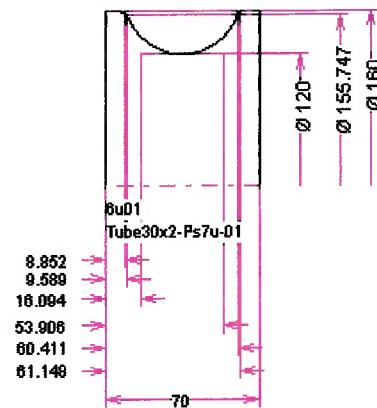


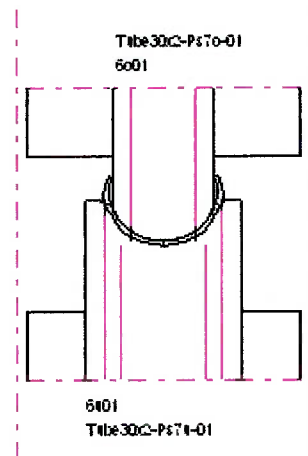
Figura A-4 Estação 7 montada



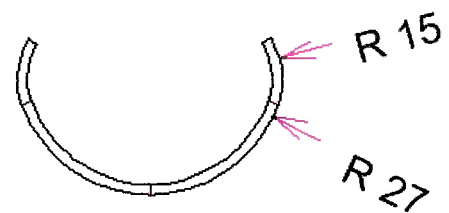
Ferramenta 6 superior



Ferramenta 6 inferior

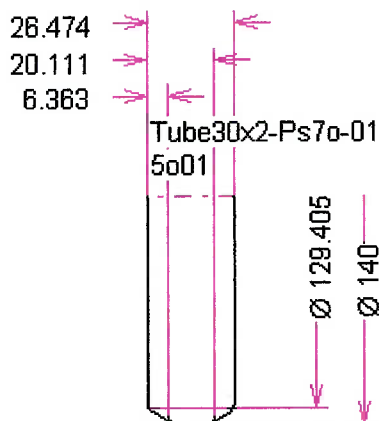


Ferramentas posicionadas

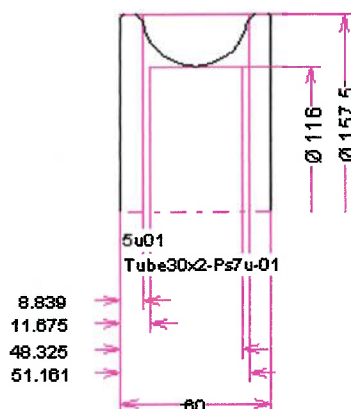


Produto conformado

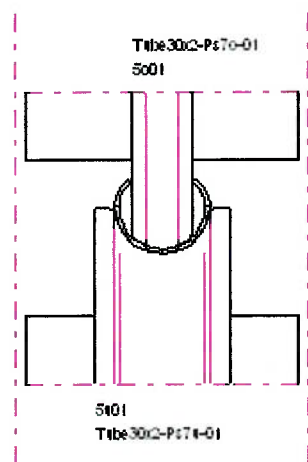
Figura A-5 Estação 6 montada



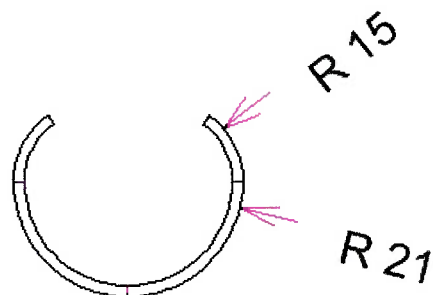
Ferramenta 5 superior



Ferramenta 5 inferior

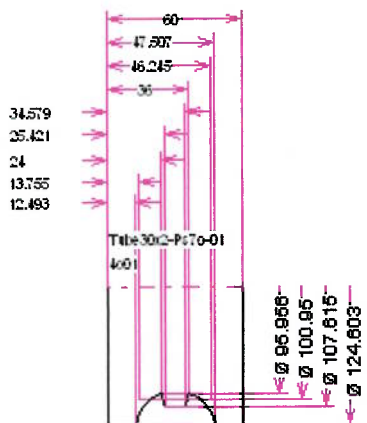


Ferramentas posicionadas

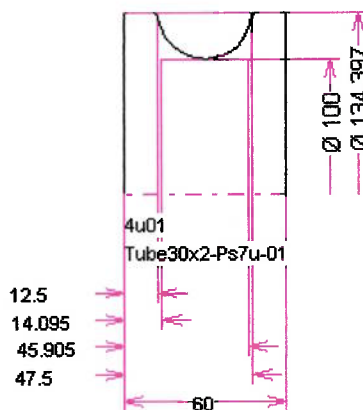


Produto conformado

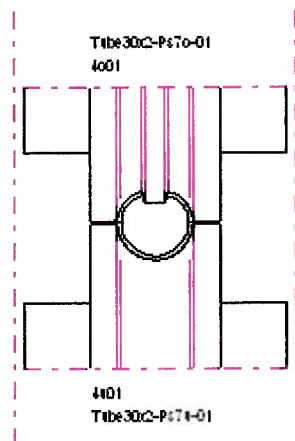
Figura A-6 Estação 5 montada



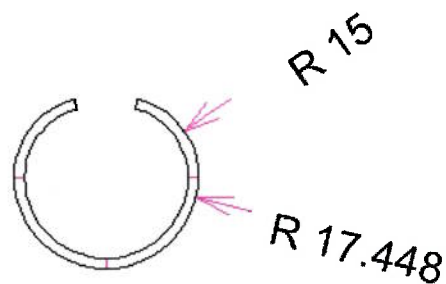
Ferramenta 4 superior



Ferramenta 4 inferior

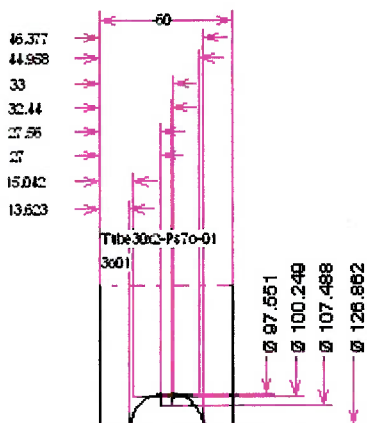


Ferramentas posicionadas

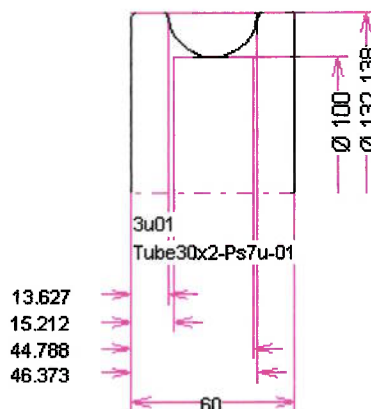


Produto conformado

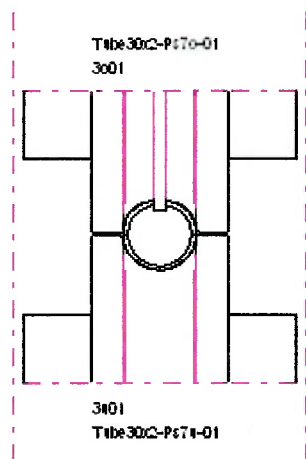
Figura A-7 Estação 4 montada



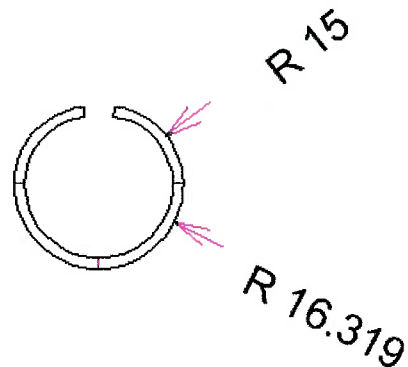
Ferramenta 3 superior



Ferramenta 3 inferior

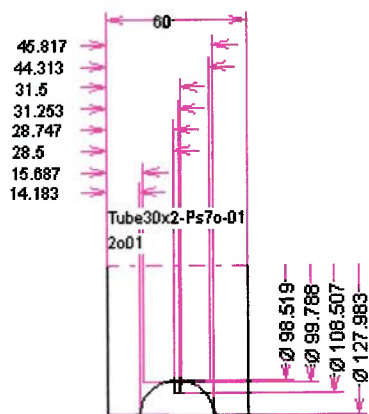


Ferramentas posicionadas

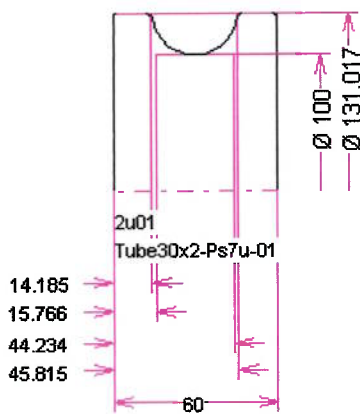


Produto conformado

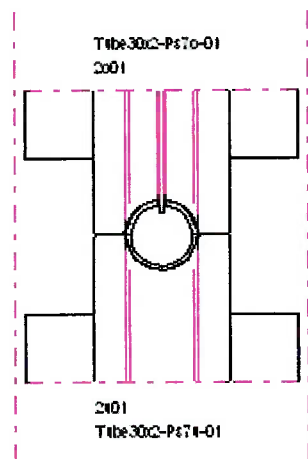
Figura A-8 Estação 3 montada



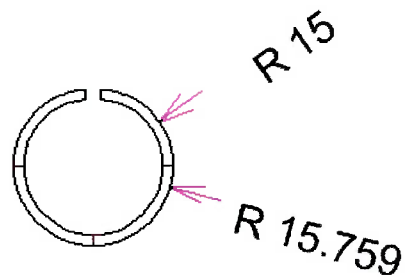
Ferramenta 2 superior



Ferramenta 2 inferior



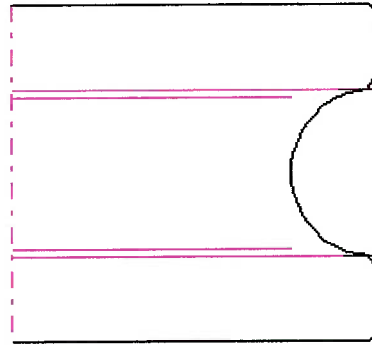
Ferramentas posicionadas



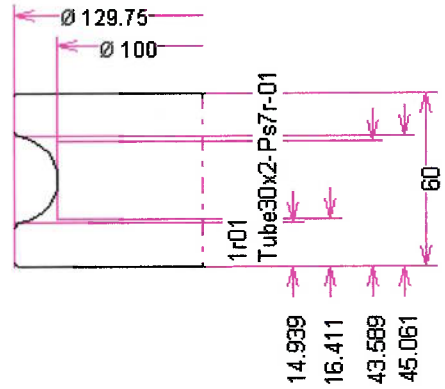
Produto conformado

Figura A-9 Estação 2 montada

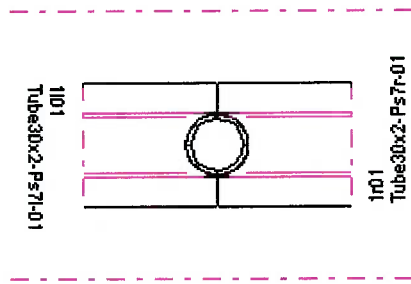
1101
Tubex30x2-Pr71-01



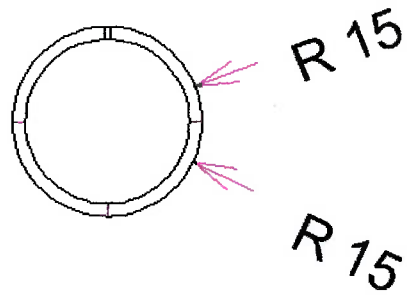
Ferramenta 1 esquerda



Ferramenta 1 direita



Ferramentas posicionadas



Produto conformado

Figura A-9 Estação 2 montada

A2 – Tensões geradas na chapa conformada

Com as ferramentas descritas será obtido um perfil tubular com a seqüência de conformação mostrada na figura A-26.

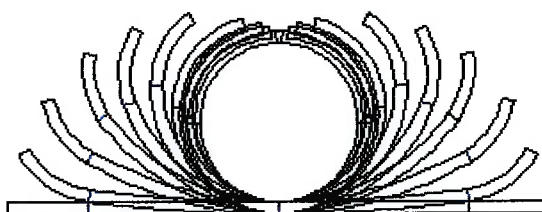


Figura A-26 – Seqüência de conformação da chapa para o perfil tubular

A chapa conformada é solicitada por tensões de tração que são relacionadas com a tensão limite de ruptura do material segundo as figuras a seguir

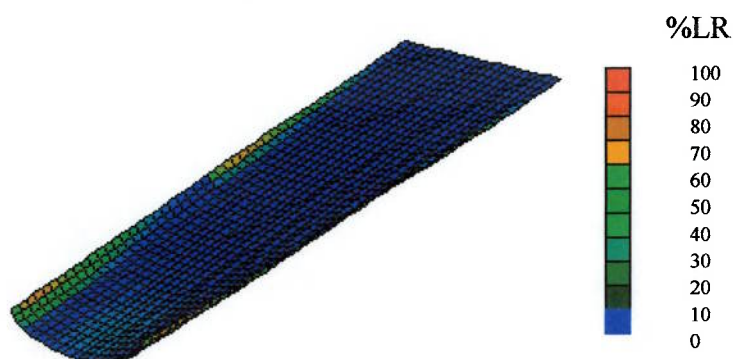


Figura A-27 – Distribuição de tensões na 1ª estação de conformação
Ferramenta 9

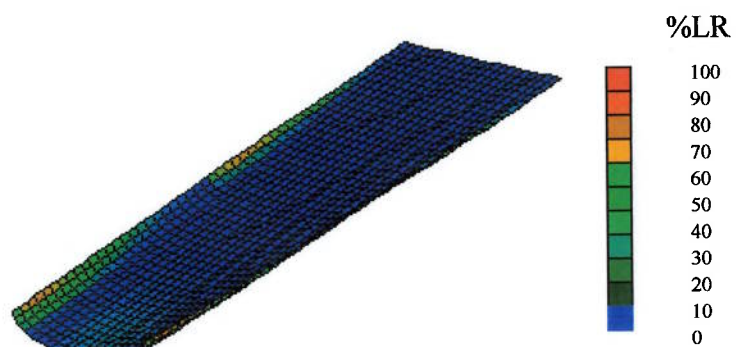


Figura A-28 – Distribuição de tensões na 2ª estação de conformação
Ferramenta 8

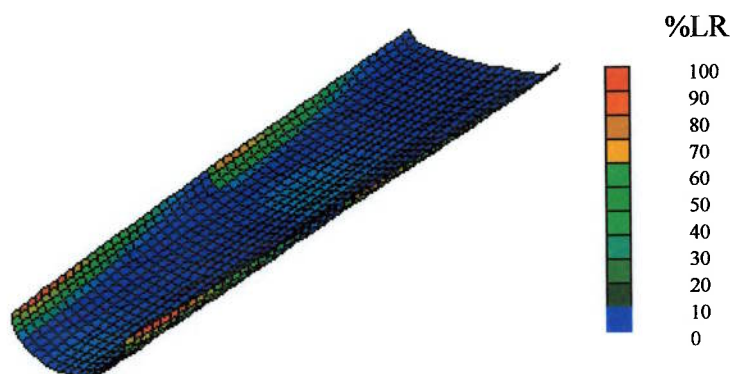


Figura A-29 – Distribuição de tensões na 3ª estação de conformação
Ferramenta 7

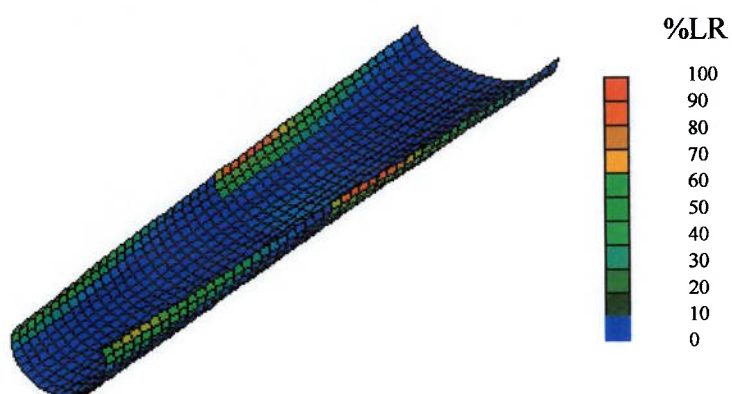


Figura A-30 – Distribuição de tensões na 4ª estação de conformação
Ferramenta 6

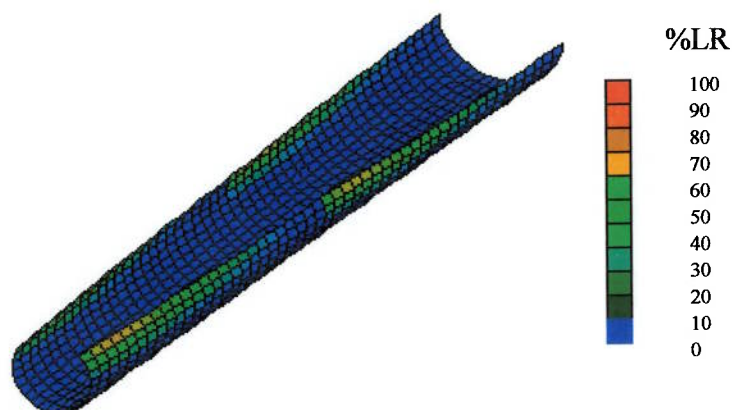


Figura A-31 – Distribuição de tensões na 5ª estação de conformação
Ferramenta 5

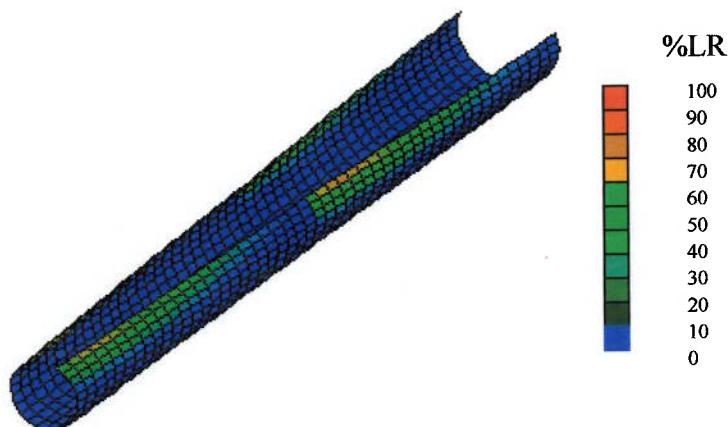


Figura A-32 – Distribuição de tensões na 6ª estação de conformação
Ferramenta 4

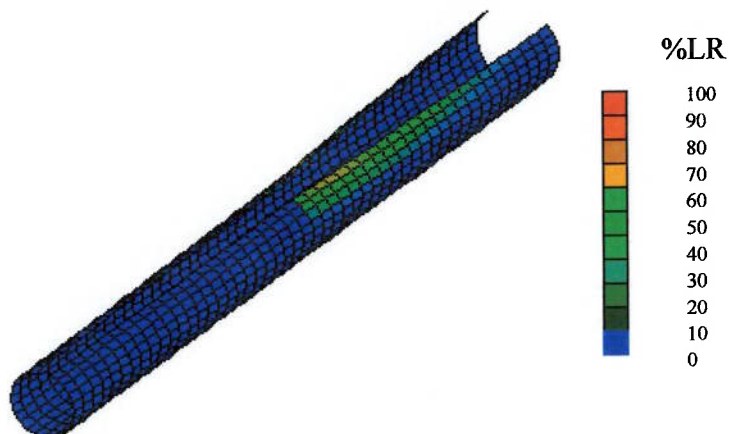


Figura A-33 – Distribuição de tensões na 7ª estação de conformação
Ferramenta 3

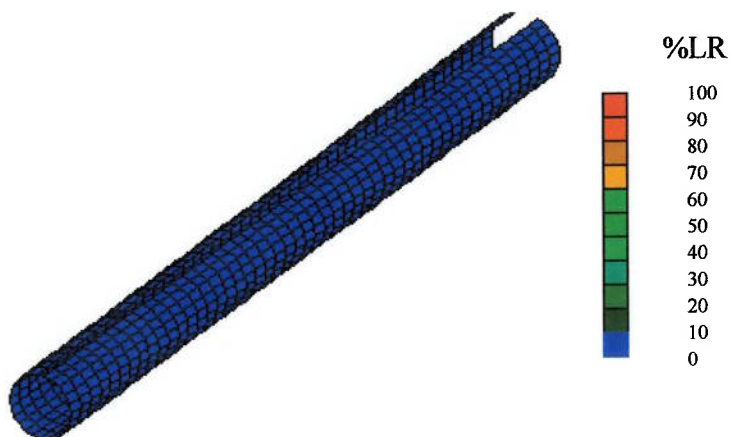


Figura A-34 – Distribuição de tensões na 8ª estação de conformação Ferramenta 2



Figura A-35 – Distribuição de tensões na 9ª estação de conformação Ferramenta 1

A tensões são representadas por meio de um gráfico de barras como mostrado na figura A-36

Tensão na borda Re	Material: St 2-24			Re = 380 N/mm2 Re
	%	Ps	%	
	4	1	4	
	2	2	2	
	9	3	9	
	72	4	72	
	78	5	78	
	75	6	75	
	95	7	95	
	83	8	83	
	89	9	89	
	0	10	0	

Figura A-36 – Distribuição de tensões na borda da tira nas estações de conformação de 1 a 10

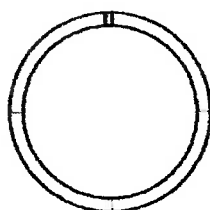
A3 – Propriedades do produto

O produto é identificado no programa por meio de valores tabelados segundo as características de cada perfil. A figura A-37 exemplifica esta identificação.

Profile Project	C:\Documents and Settings\All Users\Dados de aplicativos\UBECO\PROFIL\Tubc30x2.pro		
Customer:	Tube Inc.	Date:	04.11.99
Descript.:	Tube 30x2	Name:	Smith
Drawing No.:		Rev.:	04.11.99
Material:	St 2-24	Thickness:	2,000
Machine:	T130	Calc. M.:	Oehler
Pass	7. Pass	x0:	200,000
Dist. Stand:	200,000	y0:	150,000
Strp. Width:	88,952	Dirac. (°):	

No.	Type	Dir	Radius	disch. Angle	St. Length	Str.
1	A1	L	238,000	7,500	31,285	1
2	A1	L	13,000	54,010	13,191	8
3	PS				0,000	

Figura A-37 – Características do perfil a ser fabricado segundo o programa Profil
Para que as tensões sejam obtidas é necessário que as propriedades sejam conhecidas e o programa identifica as propriedades estáticas a cada estação de conformação. As figuras A-38 e A-39 mostram estas tabelas destacando a primeira e a última estação de conformação.



Scale: 1 : 1

Scale: 1 : 1

Statics:	Related to:	x	y	
Centroid of an Area	Ref. Point x0/y0	0,000	15,158	mm
Shear Center Point	Ref. Point x0/y0	0,000	15,158	mm
Moment of Inertia	x/y in Centroid	1,772	1,733	cm4
Moment of Inertia	in Principal Axes	1,772	1,733	cm4
Moment of Resistan.	x/y in Centroid	1,169	1,155	cm3
Moment of Resistan.	In Principal Axes	1,169	1,155	cm3
Max. Distance	In Principal Axes	1,500	1,516	cm
Inertial Radius	In Principal Axes	0,998	0,987	cm
Area of Cross Sec.		1,779		cm2
Weight		1,397		kg/m
Princip. Axes Angle	x-Axis in Centroid	0,000		deg
Vault Resistance	Shear Center Point	0,000		cm6
Torsion Moment	Centroid	0,024		cm4

Figura A-38 – Propriedades estáticas do perfil na estação de conformação nº 10



Scale: 1 : 1

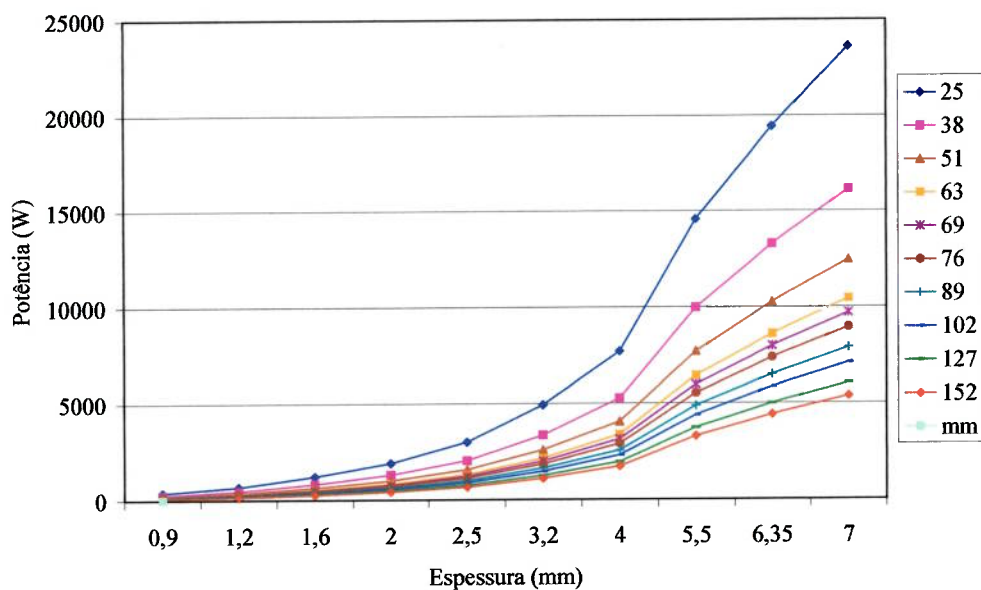
Statics:	Related to:	x	y	
Centroid of an Area	Ref. Point x0/y0	0,000	2,900	mm
Shear Center Point	Ref. Point x0/y0	0,000	2,900	mm
Moment of Inertia	x/y in Centroid	0,097	11,352	cm ⁴
Moment of Inertia	in Principal Axes	11,352	0,097	cm ⁴
Moment of Resistan.	x/y in Centroid	0,124	2,668	cm ³
Moment of Resistan.	In Principal Axes	2,668	0,124	cm ³
Max. Distance	In Principal Axes	0,782	4,255	cm
Inertial Radius	In Principal Axes	2,526	0,234	cm
Area of Cross Sec.		1,779		cm ²
Weight		1,397		kg/m
Princip. Axes Angle	x-Axis in Centroid	90,000		deg
Vault Resistance	Shear Center Point	0,000		cm ⁶
Torsion Moment	Centroid	0,024		cm ⁴

Figura A-39 – Propriedades estáticas do perfil na estação de conformação nº 1

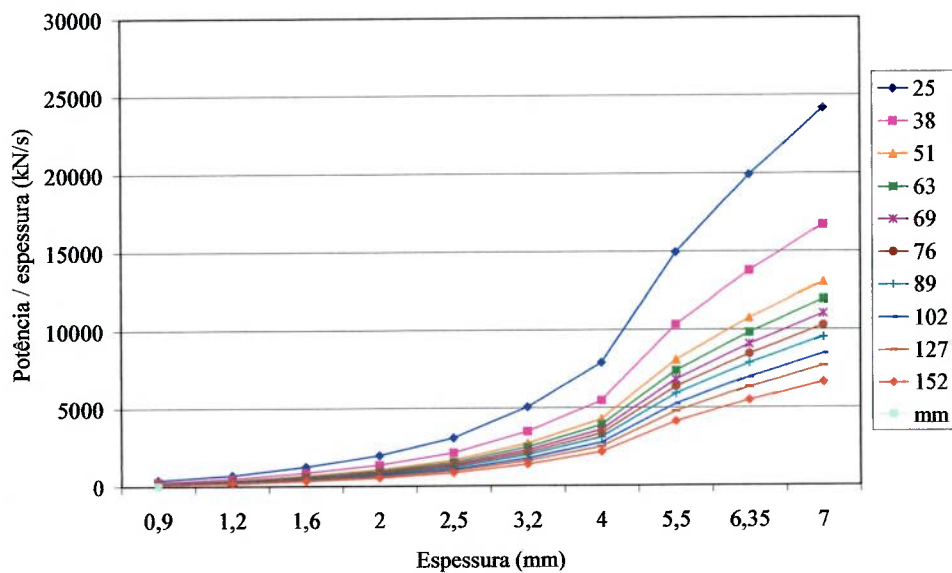
Anexo B - Resultados da aplicação da equação 102

Com a aplicação da equação 102, variando-se os parâmetros de conformação tais como espessura, diâmetro e ângulo de curvatura são obtidos os gráficos mostrados nas figuras a seguir:

POTENCIA X ESPESSURA X DIAMETRO

Figura B-1 –Potência de conformação vs espessura para um ângulo $\theta = 15^\circ$.

Potência x espessura x ângulo 20°

Figura B-2 – Potência de conformação vs espessura para um ângulo $\theta = 20^\circ$.

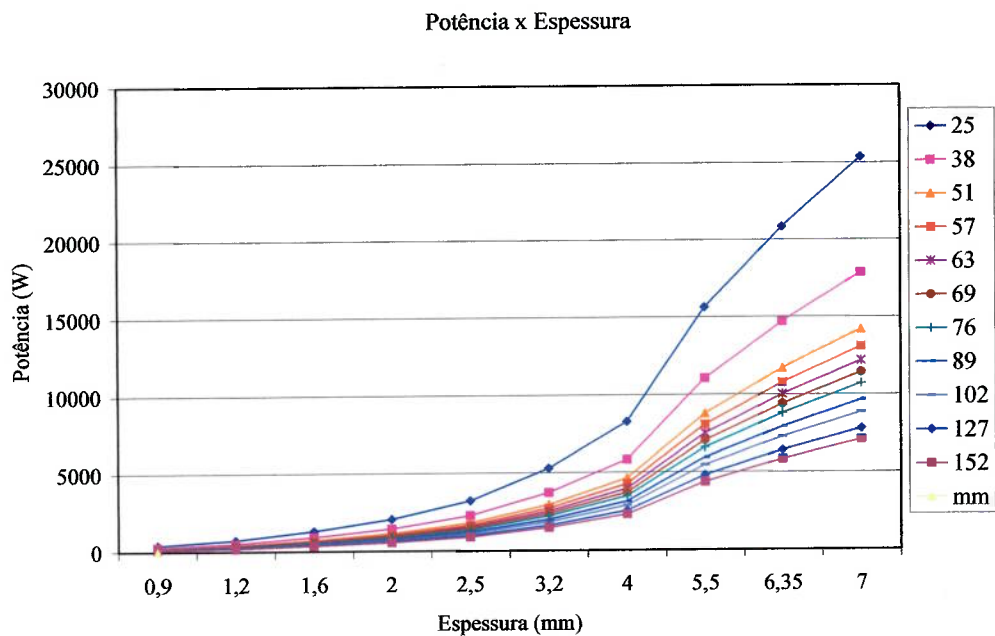


Figura B-3 – Potência de conformação vs espessura para um ângulo $\theta = 30^\circ$.

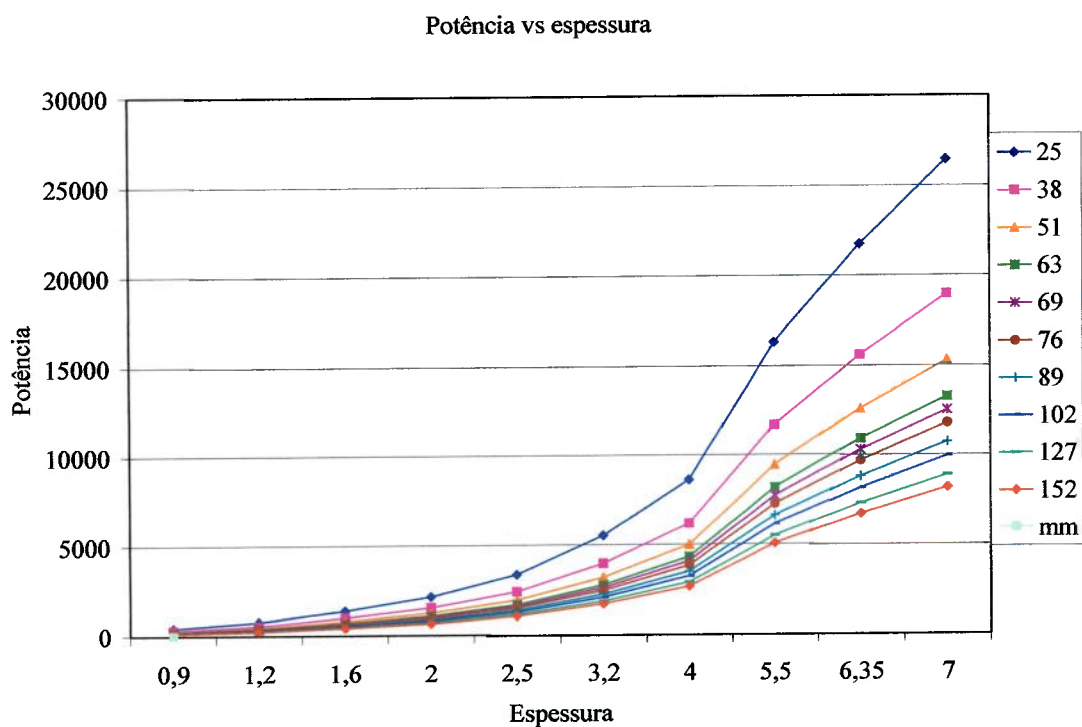


Figura B-4 – Potência de conformação vs espessura para um ângulo $\theta = 40^\circ$.

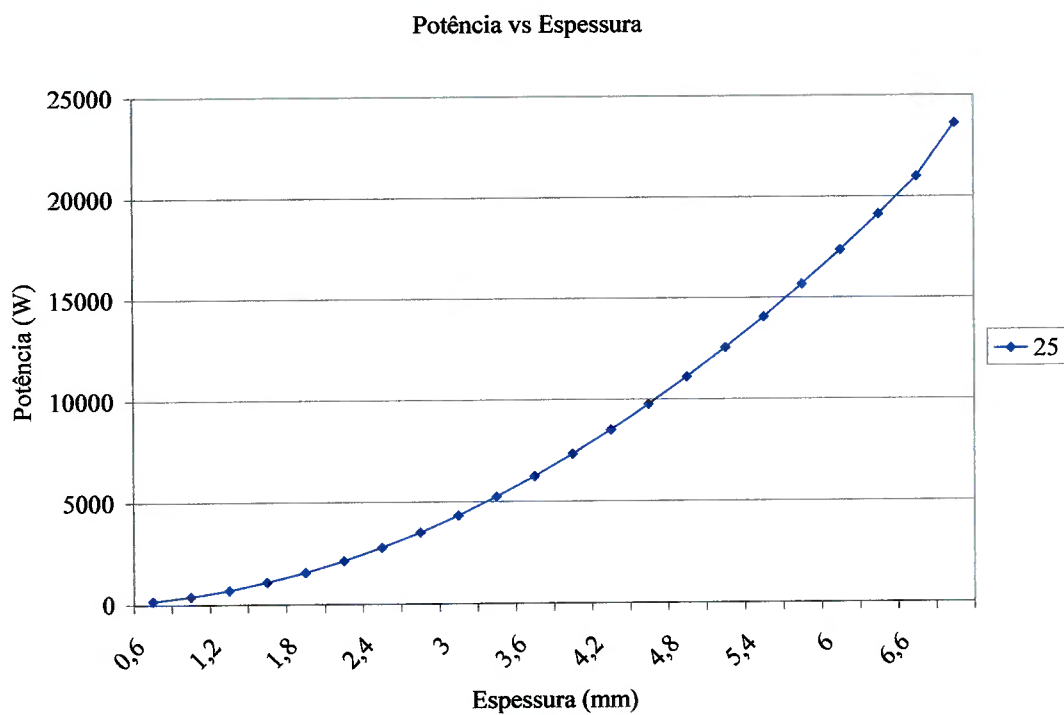


Figura B-5 –Potência de conformação vs espessura para um ângulo $\theta = 15^\circ$.

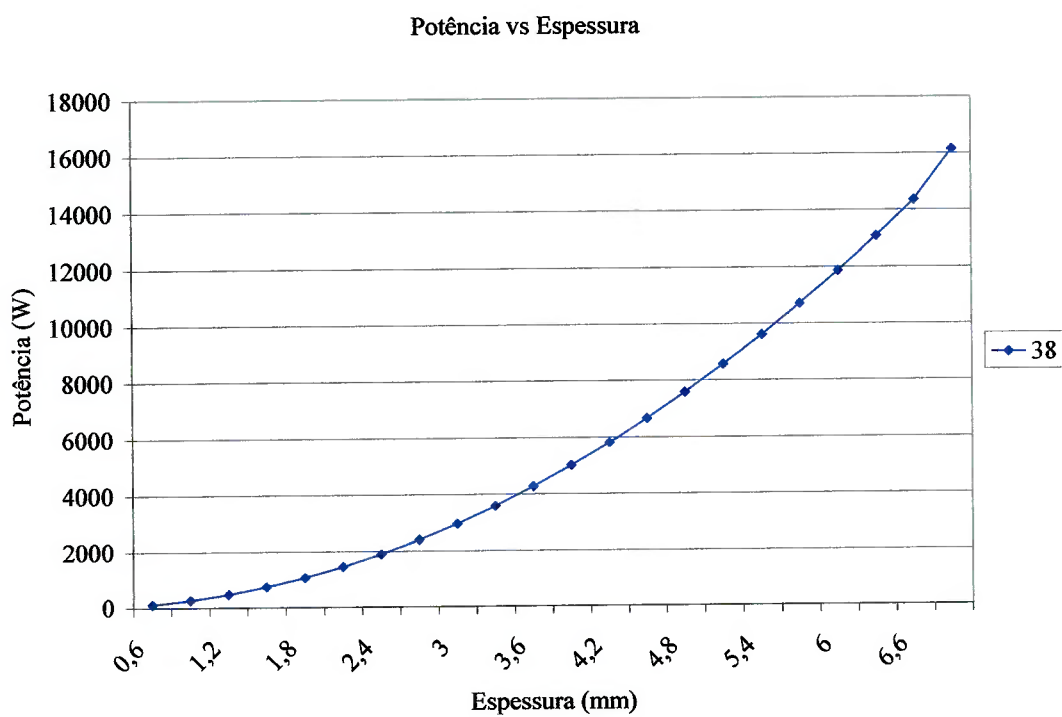


Figura B-6 –Potência de conformação vs espessura para um ângulo $\theta = 15^\circ$.



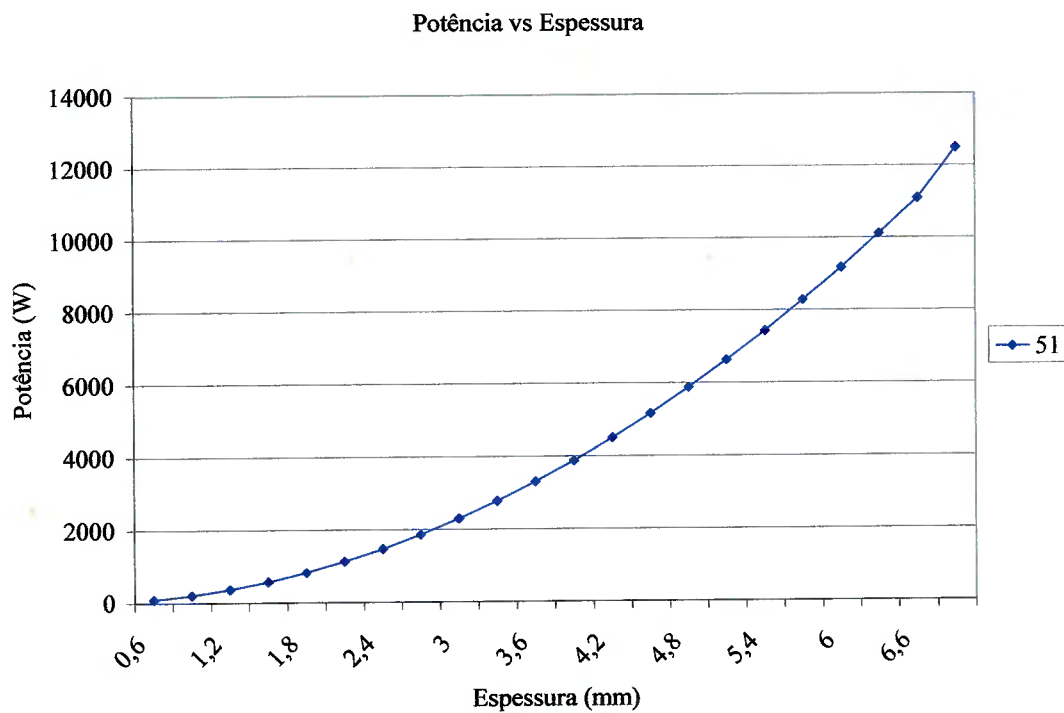


Figura B-7 –Potência de conformação vs espessura para um ângulo $\theta = 15^\circ$.

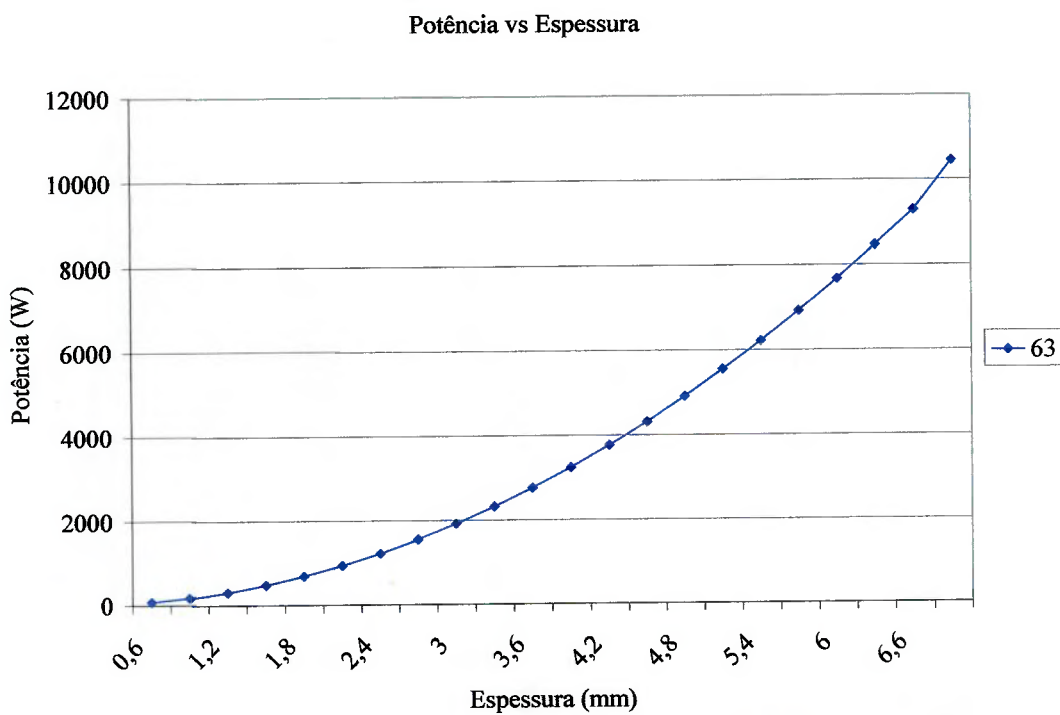


Figura B-8 –Potência de conformação vs espessura para um ângulo $\theta = 15^\circ$.