

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DE PRODUTO PARA FORJAMENTO

por

Fabiano da Silva Brites

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 18 de dezembro de 2009.

DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DE PRODUTO PARA FORJAMENTO

por

Fabiano da Silva Brites
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Joyson Luiz Pacheco

Aprovada por:

Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes – UNISINOS

Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos – PUCRS

Prof. Dr. Rafael Antônio Comparsi Laranja – DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. José Antônio Esmério Mazzaferro – PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Horácio Antônio Vielmo
Coordenador do PROMEC/UFRGS

Porto Alegre, 18 de dezembro de 2009.

DEDICATÓRIA

À minha esposa Itanara da Silva Barbosa pela compreensão, paciência e apoio durante toda a realização deste trabalho.

Ao meu pai Jamil Antônio Brites e ao meu irmão Jamil Silva Brites, que sempre me apoiaram e me incentivaram a buscar meus objetivos.

In memória de Nerci Pinto da Silva, minha mãe, que me deu a vida.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Joyson Luiz Pacheco pela orientação, amizade e confiança durante o desenvolvimento desse trabalho.

Ao professor Dr. Sandro Griza pelo apoio, amizade, e pelas valiosas contribuições a respeito do processo de forjamento.

Aos colegas de mestrado, Eng^a. Rafaela Priscila Fernandes e ao Eng. Sandro Dias Vieira pelo exemplo de caráter e sincera amizade.

Ao Srs. Ivo, Adriano e Joanir, e a Srta. Kaisy, da empresa Forjamix, por toda atenção, confiança e colaboração no desenvolvimento da parte experimental deste trabalho.

Ao acadêmico em engenharia Jean Beppler da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), por toda ajuda e auxílio com as simulações numérico-computacionais.

Aos colegas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pelo apoio, amizade e significativa colaboração na busca de alternativas para as simulações numérico-computacionais.

Ao Eng. Joubert Rosa e ao Eng. Roberto Mentz da empresa GKN Driveline, ao Eng. Jaques Araripe Suris e ao Eng. Diego Brum Gendelsky da empresa Maxiforja, e ao Eng. Cristiano Vargas Macedo, bem como, ao Eng. Sandro Mello da empresa Dana, que oportunizaram visitas técnicas nessas empresas, com o objetivo de ampliar os conhecimentos a respeito do processo de forjamento.

Aos colegas e amigos da empresa Thyssenkrupp Elevadores S/A e da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), bem como, ao professores da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), que com grande entusiasmo torceram pela conclusão desse trabalho.

Ao professor Dr. Mustafa Güden, do *İzmir Institute of Technology* da Turquia, ao Eng. Umut Ince da empresa Norm Civata, também da Turquia, e ao professor Dr. Alan N. Bramley, da *University of Bath*, do Reino Unido, que muito contribuíram para a obtenção do referencial teórico, além de possibilitar a troca de experiências na área de simulação e forjamento.

Aos familiares e amigos que me apoiaram no decorrer desse trabalho.

A todos, meu MUITO OBRIGADO!

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar e aplicar uma metodologia de desenvolvimento integrado de produto para forjamento, baseada na integração efetiva do conhecimento científico e da prática industrial. Esta metodologia foi definida a partir de cinco fases, denominadas: Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar, Projeto Detalhado e o Controle da Qualidade e Produção. Após detalhar cada fase, e visando avaliar a adoção da metodologia apresentada, foram realizadas simulações físicas (em plasticina) e numérico-computacionais (através do Simufact.Forming 8.1) para um produto destinado a elevadores. Este produto, denominado grampo de 3/8", é forjado a quente a partir de uma barra de aço ABNT/SAE/AISI 1020, porém apresenta falta de homogeneidade na largura da rebarba, o que acarreta desperdício de material e comprometimento de sua qualidade. Nesse sentido, foram dimensionadas – através do método de *Drabing*, diferentes geratrizes de seções circular, quadrada e hexagonal, bem como, uma pré-forma de seção circular, para posterior análise da largura da rebarba. Através da análise via software também foi possível estimar a força e energia requeridas ao processo de forjamento em cada geratriz e pré-forma simuladas, sendo os resultados comparados a outros métodos utilizados nesta estimativa. Ao final, pode-se verificar que os valores de força e energia obtidos através das simulações numérico-computacionais não apresentaram uma convergência com os demais métodos utilizados. E, com relação às geratrizes e pré-forma simuladas, não foi possível verificar uma diferença significativa dos valores de força e energia que pudesse inviabilizar a utilização de qualquer um destes sólidos como sendo a matéria-prima ao grampo de 3/8". Nas simulações em plasticina e numérico-computacionais da largura da rebarba, em geral, foi constatado o mesmo comportamento da largura da rebarba para as diferentes geratrizes e pré-forma simuladas, apresentando comprometimento desta grandeza junto aos vértices do grampo de 3/8". Porém, e a partir do custo de fornecimento da matéria-prima de cada geratriz e dos resultados obtidos, pode-se prever que a geratriz de seção circular e a pré-forma são economicamente e tecnicamente mais viáveis do que as geratrizes de seção quadrada ou hexagonal.

Palavras-Chave: forjamento; desenvolvimento de produto; simulação de forjamento; Simufact.Forming 8.1.

ABSTRACT

This paper aims to present and implement a methodology for developing integrated product for forging, based on the effective integration of scientific knowledge and industrial practice. This methodology was defined by five stages, called: Informational Design, Conceptual Design, Preliminary Design, Detailed Design and Quality Control and Production. After detailing each stage, and to evaluate the adoption of the methodology presented, physical simulations were performed (with plasticine) and numeric-computational (by Simufact.Forming 8.1) for a product intended to lifts. This product, called Clamp 3/8", is hot forged from a bar AISI/SAE/AISI 1020, but shows a lack of homogeneity in the width of the fash, resulting in waste of material and commitment to quality. In this sense, were designed - by the method of Drabing, different billets of circular sections, square and hexagonal, as well as a pre-form circular section, for further analysis of the width of the fash. Through the analysis by software was also possible to estimate the strength and energy required to forging process at each billet and pre-form simulated, and the results compared to other methods used in this estimate. In the end, was can verify that the values of strength and energy obtained through numeric-computational simulations did not show a convergence with the other methods used. And, with respect to the billets and pre-form simulated, it was not possible to verify a difference in the values of strength and energy that could prevent the use of any of these solids as the raw material to clamp 3/8". In the physical and numeric-computational simulations about width of the fash, in general, was found the same behavior as the width of the fash for the different billets and pre-form simulated, showing commitment of this magnitude along the vertices of the clamp 3/8". However, and as the cost of providing the raw material of each billet and the results obtained, it is expected that the billet of circular section and pre-form is technically and economically more viable than the billets of a square or hexagonal section.

Keywords: forging; product development; forging simulation; Simufact.Forming 8.1.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivos específicos	3
1.3 JUSTIFICATIVA	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 TEORIA DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DOS METAIS	7
2.1.1 Efeito do material.....	15
2.1.2 Efeito do gradiente térmico	18
2.1.3 Efeito da velocidade.....	22
2.1.4 Efeito do atrito e lubrificação	23
2.1.4.1 Lubrificação.....	28
2.2 PROCESSO DE FORJAMENTO	29
2.3 PROJETO DE UM PRODUTO FORJADO	32
2.3.1 Desenho da peça.....	32
2.3.2 Projeto e fabricação das matrizes.....	35
2.3.3 Escolha das geratrizes e pré-forma	38
2.3.4 Escolha do maquinário	42
2.4 SIMULAÇÕES DO PROCESSO DE FORJAMENTO	44
2.4.1 Simulações físicas ou prototipagem.....	45
2.4.2 Simulações numérico-computacionais	46
3. MÉTODOS E PROCEDIMENTOS	50
3.1 METODOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DE PRODUTO PARA FORJAMENTO	50
3.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	54
3.2.1 Fases 1 e 2 – Projeto Informacional e Conceitual.....	54
3.2.2 Fase 3 – Projeto Preliminar	60
3.2.2.1 Seleção da forma geométrica básica para a geratriz e pré-forma	62
3.2.2.2 Simulações através de plasticina	66
3.2.2.3 Simulações através do Simufact.Forming 8.1	69
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	72
4.1 SIMULAÇÕES COM PLASTICINA	72
4.2 SIMULAÇÕES COM SIMUFACT.FORMING 8.1	77
4.2.1 Quantidade de rebarba.....	77
4.2.2 Força e energia do processo.....	80
4.3 ANÁLISE DA METODOLOGIA APLICADA	85
5. CONCLUSÕES.....	86
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
APÊNDICE A – DESENHO DO GRAMPO DE 3/8”.....	95
APÊNDICE B – ÁREA DE TRABALHO DO SOFTWARE IMAGETOOL 3.0.	96

APÊNDICE C – CÁLCULO DA FORÇA E ENERGIA DE FORJAMENTO PELO MÉTODO DAS GRANDEZAS EQUIVALENTES.....	97
APÊNDICE D – CÁLCULO DA FORÇA E ENERGIA DE FORJAMENTO PELO MÉTODO DE LANGE.	100
APÊNDICE E – CÁLCULO DA FORÇA E ENERGIA DE FORJAMENTO PELO MÉTODO DE MAKELT.....	102
ANEXO A – VALORES TÍPICOS DE ATRITO CONFORME O PROCESSO.....	104
ANEXO B – CATÁLOGO COMERCIAL DE BARRAS TREFILADAS.....	105
ANEXO C – DADOS DA PRENSA DE FRICÇÃO USADA NO FORJAMENTO.....	106
ANEXO D – CUSTO DAS BARRAS TREFILADAS PREVISTAS COMO MATÉRIA-PRIMA DO GRAMPO DE 3/8”	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Gráfico custo <i>versus</i> número de peças considerando usinagem e forjamento.	4
Figura 2.2 – Exemplos de peças forjadas.	5
Figura 2.3 – Comparação dos processos de fabricação de engrenagens para automóveis.	6
Figura 2.4 – Esquema básico de forjamento em matriz aberta.	6
Figura 2.5 – Mecanismo de deformação plástica: escorregamento e maclação.	7
Figura 2.6 – Discordâncias de cunha e espiral com a representação do vetor de <i>Burgers</i> (V_B)...9	9
Figura 2.7 – Principais planos e direções de escorregamento das estruturas cristalinas.	10
Figura 2.8 – Recozimento: modificações estruturais e das propriedades mecânicas.	11
Figura 2.9 – Representação da Lei da Constância de Volume para um paralelepípedo.	12
Figura 2.10 – Curva de escoamento para diferentes materiais.	16
Figura 2.11 – Curvas de escoamento.	17
Figura 2.12 – Curvas de escoamentos da liga VAT [®] 718 em diferentes temperaturas.	17
Figura 2.13 – Efeito da temperatura, da deformação e da taxa de deformação na tensão de escoamento do aço ABNT/SAE/AISI 1045.	18
Figura 2.14 – Variação típica do limite de escoamento de um metal com aumento da “ T_h ”.	20
Figura 2.15 – Efeito da temperatura na forjabilidade do aço ABNT/SAE/AISI 1015.	20
Figura 2.16 – Representação das curvas de encruamento na conformação a frio e a quente.	22
Figura 2.17 – Forças presentes no atrito de um corpo.	24
Figura 2.18 – a) Representação à nível microscópico de duas superfícies em contato. b) Relação qualitativa da variação da área de cisalhamento e da força de atrito com a força normal.	25
Figura 2.19 – Relação entre os coeficiente de atrito “ μ ” e “ m ”.	27
Figura 2.20 – Percentual de custos num processo de forjamento.	29
Figura 2.21 – Classificação do forjamento em matriz conforme o fluxo de material.	31
Figura 2.22 – Desalinhamentos em peças forjadas. a) Peça axissimétrica. b) Peça com simetria longitudinal.	33
Figura 2.23 – Classificação quanto a complexidade de forma para o forjamento.	34
Figura 2.24 – Ilustração de uma matriz inferior progressiva.	35
Figura 2.25 – a) Tipos de calhas de rebarba. b) Força típica de forjamento em matriz.	37
Figura 2.26 – Otimização de pré-forma no forjamento.	40
Figura 2.27 – Ilustração do Método de <i>Drabing</i>	41
Figura 2.28 – Economia de material que pode ser obtida com o uso de pré-formas.	42

Figura 2.29 – Exemplos de maquinários utilizados no forjamento. a) Martelo de queda. b) Prensa excêntrica. c) Prensa de parafuso tipo fricção com disco duplo.	43
Figura 2.30 – Moldes em resina e protótipos em cera, cerâmica e metálicos.....	46
Figura 2.31 – Simulação de forjamento via software. a) Análise da deformação efetiva. b) Análise do fluxo de material.	47
Figura 2.32 – Diagrama dos parâmetros utilizados nas simulações.....	48
Figura 2.33 – Processo de remalhamento utilizado no MEF.	49
Figura 3.1 – Metodologia para o desenvolvimento integrado de produto para forjamento.	51
Figura 3.2 – Grampo de 3/8” acabado e com rebarba. a) Vista superior. b) Vista inferior.....	55
Figura 3.3 – Aplicações do grampo de 3/8”.	55
Figura 3.4 – Etapas envolvidas na fabricação do grampo de 3/8”.....	57
Figura 3.5 – Ferramental utilizado na fabricação do grampo de 3/8”. a) Disposição do maquinário. b) Matrizes superior e inferior.	58
Figura 3.6 – Grampo de 3/8” modelado em 3D.	60
Figura 3.7 – Grampo de 3/8” modelado em 3D com rebarba.	61
Figura 3.8 – Matrizes modeladas em 3D considerando o ferramental original.	62
Figura 3.9 – Aplicação do Método de <i>Drabing</i> otimizado para o grampo de 3/8”.....	63
Figura 3.10 – Geratrizes e pré-forma obtidas para o grampo de 3/8”.....	66
Figura 3.11 – Dispositivos (itens) utilizados nas simulações em plasticina.....	67
Figura 3.12 – Pontos de verificação da largura da rebarba.....	68
Figura 3.13 – Demonstração simplificada do MEF e MVF existente no Simufact.Forming 8.1.	69
Figura 3.14 – Área de trabalho do software Simufact.Forming 8.1.....	71
Figura 4.1 – Procedimento utilizado nas simulações com plasticina.	72
Figura 4.2 – Gráfico dos valores obtidos de \bar{b}_p em cada ponto de verificação e conforme as geratrizes analisadas nas simulações com plasticina.....	76
Figura 4.3 – Gráfico dos valores obtidos de \bar{b}_p em cada ponto de verificação e conforme as geratrizes analisadas nas simulações numérico-computacionais.	80
Figura 4.4 – Gráficos da força obtida nas simulações via software.....	81
Figura 4.5 – Gráficos da energia obtida nas simulações via software.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Representação e características das células unitárias básicas.	8
Tabela 2.2 – Classificação e características do processo a partir de sua “ T_h ”.	19
Tabela 2.3 – Faixas de temperatura para conformação a quente de alguns materiais.	21
Tabela 2.4 – Valores típicos do tempo de pressão conforme o equipamento utilizado.	23
Tabela 2.5 – Valores do coeficiente de atrito “ m ” para diferentes processos.	27
Tabela 2.6 – Dimensões mínimas das matrizes de forjamento.	36
Tabela 2.7 – Valores orientativos para o dimensionamento da rebarba.	38
Tabela 2.8 – Grandezas de referência conforme a geometria básica.	41
Tabela 3.1 – Atividades principais do desenvolvimento integrado de produto para forjamento.	52
Tabela 3.2 – Composição química do aço ABNT/SAE/AISI 1020 em % de massa.	56
Tabela 3.3 – Propriedades mecânicas aço ABNT/SAE/AISI 1020 em condições de temperatura ambiente.	56
Tabela 3.4 – Etapas de fabricação do grampo de 3/8” na forjaria.	57
Tabela 3.5 – Valores de massa para cinco amostras do grampo de 3/8”	61
Tabela 3.6 – Grandezas de referência das formas geométricas básicas para as possíveis geratrizes ou pré-formas do grampo de 3/8”	63
Tabela 3.7 – Grandezas de referência escolhidas conforme disponibilidade comercial.	64
Tabela 3.8 – Deformações verdadeiras da geometria de envoltura com relação às formas geométricas comerciais escolhidas.	65
Tabela 3.9 – Comprimento das geratrizes escolhidas visando atingir o valor do “ V_G ”.	66
Tabela 3.10 – Parâmetros utilizados nas simulações com Simufact.Forming 8.1.	70
Tabela 4.1 – Largura da rebarba das simulações em plasticina – geratriz com seção circular.	73
Tabela 4.2 – Largura da rebarba das simulações em plasticina – geratriz com seção hexagonal.	74
Tabela 4.3 – Largura da rebarba das simulações em plasticina – geratriz com seção quadrada.	75
Tabela 4.4 – Largura da rebarba das simulações via software – geratriz com seção circular.	77
Tabela 4.5 – Largura da rebarba das simulações via software – geratriz com seção hexagonal.	78
Tabela 4.6 – Largura da rebarba das simulações via software – geratriz com seção quadrada.	78
Tabela 4.7 – Largura da rebarba das simulações via software – pré-forma com seção circular.	79
Tabela 4.8 – Valores de força e energia considerando os diferentes métodos, e o custo das geratrizes simuladas.	84

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society of Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CATE	Conformação a altas taxas de energias
CCC	Estrutura cúbica de corpo centrado
CEP	Controle Estatístico do Processo
CEQ	Controle Estatístico da Qualidade
CFC	Estrutura cúbica de faces centradas
CVD	Deposição Química de Vapor
F1.1,...,F5.1	Atividades principais do desenvolvimento integrado de produto
FMEA	Análise do Tipo e Efeito de Falha
FTA	Análise da Árvore de Falhas
HC	Estrutura hexagonal compacta
ISO	International Standartization Organization
IT	Tolerância ISO
LDTM	Laboratório de Transformação Mecânica
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
PROMECC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PL	Plano que contém a área da seção
PVD	Deposição Física de Vapor
SAE	Society of Automotive Engineers
Sindiforja	Sindicato Nacional da Indústria de Forjaria
SME	Society of Manufactores Engineers
V_B	Vetor de <i>Burgers</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

a	espessura mínima de parede entre cavidade e a aresta exterior	[mm]
a_1	espessura mínima entre duas cavidades da matriz	[mm]
A_c	área de contato efetiva	[mm ²]
A_n	área de contato nominal	[mm ²]
A_o	área inicial	[mm ²]
A_p	área projetada no plano da rebarba sem a rebarba	[mm ²]
A_p^*	área projetada no plano da rebarba com a rebarba	[mm ²]
A_s	área de cisalhamento	[mm ²]
$A_{seção}$	área da seção	[mm ²]
$A_{seção-com}$	área da seção encontrada comercialmente	[mm ²]
A_v	área verdadeira	[mm ²]
b	largura da rebarba	[mm]
b_o	profundidade inicial	[mm]
b_1	profundidade final	[mm]
B_m	largura média da cavidade ou da peça	[mm]
\bar{b}_p	largura média da rebarba nos pontos de verificação	[mm]
$b_{p1, \dots, p5}$	largura da rebarba nos pontos de verificação	[mm]
E_i	espessura da seção	[mm]
F_a	força de atrito	[N]
F_m	força que realiza o movimento	[N]
F_n	força normal	[N]
F_r	força de reação	[N]
F_v	força verdadeira	[N]
h	altura qualquer	[mm]
H	altura mínima do bloco da matriz	[mm]
h_c	profundidade da cavidade na matriz	[mm]
H_i	altura da seção	[mm]
H_{i-com}	altura da seção encontrada comercialmente	[mm]
h_o	altura inicial	[mm]
h_1	altura final	[mm]
K_{fd}	tensão ideal dinâmica	[N/mm ²]
K_{fs}	tensão ideal estática à deformação	[N/mm ²]

K_r	tensão real à deformação	[N/mm ²]
l_0	largura inicial	[mm]
l_1	largura final	[mm]
L_{Hex}	lado do hexágono	[mm]
$L_{Hex-com}$	lado do hexágono encontrado comercialmente	[mm]
L_i	largura da seção	[mm]
L_{i-com}	largura da seção encontrada comercialmente	[mm]
L_s	comprimento da cavidade ou da peça	[mm]
m	atrito interfacial	
M_{mat}	microestrutura do material	
M_{Pmcr}	massa da peça modelada com rebarba	[g]
M_{Pmsr}	massa da peça modelada sem rebarba	[g]
p	perímetro qualquer	[mm]
$p_{médio}$	perímetro médio entre a peça e a borda da rebarba	[mm]
r	raio qualquer	[mm]
R_{cir}	raio da circunferência circunscrita no hexágono	[mm]
R_i	raio da seção	[mm]
R_{i-com}	raio da seção encontrado comercialmente	[mm]
$R_{i-máx}$	raio máximo da seção	[mm]
s	espessura da rebarba	[mm]
S_{bP}	desvio padrão da largura da rebarba obtida nas simulações	[mm]
S_E	tensão convencional ou de engenharia	[N/mm ²]
T	temperatura	[°C]
T_h	temperatura homóloga	
$T_{fusão}$	temperatura absoluta de fusão do material	[K]
T_{mat}	temperatura absoluta inicial do material	[K]
V	volume	[mm ³]
V_G	volume da geratriz	[mm ³]
V_P	volume da peça	[mm ³]
V_{Pmcr}	volume da peça modelada com rebarba	[mm ³]
V_{Pmsr}	volume da peça modelada sem rebarba	[mm ³]
V_R	volume da rebarba	[mm ³]
V_{Per}	volume decorrente das perdas por oxidação	[mm ³]
V_{prensa}	velocidade da prensa	[mm/s]

σ	tensão	[N/mm ²]
σ_B	tensão limite de resistência à tração	[N/mm ²]
σ_e	tensão de escoamento	[N/mm ²]
σ_{ef}	tensão de escoamento em forjamento a quente	[N/mm ²]
σ_v	tensão verdadeira	[N/mm ²]
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	tensões principais nas direções cartesianas	[N/mm ²]
μ	atrito Coulombiano	
$\mu_{m\acute{a}x}$	atrito Coulombiano máximo	
τ	tensão de cisalhamento	[N/mm ²]
τ_e	tensão de escoamento por cisalhamento	[N/mm ²]
$\tau_{m\acute{a}x}$	tensão máxima de cisalhamento	[N/mm ²]
φ	deformação verdadeira	
φ_b	deformação verdadeira em profundidade	
φ_{de}	deformação verdadeira no diâmetro da geometria de envoltura	
φ_h	deformação verdadeira em altura	
φ_{he}	deformação verdadeira em altura da geometria de envoltura	
φ_l	deformação verdadeira em largura	
φ_{le}	deformação verdadeira em largura da geometria de envoltura	
$\varphi_{m\acute{a}x}$	deformação verdadeira máxima	
φ_p	deformação circunferencial verdadeira	
φ_r	deformação radial verdadeira	
$\dot{\varphi}$	velocidade ou taxa de deformação	[s ⁻¹]
Δb	variação na profundidade	[mm]
Δh	variação na altura	[mm]
Δl	variação na largura	[mm]
ε	deformação linear convencional	
ε_b	deformação linear convencional em profundidade	
ε_h	deformação linear convencional em altura	
ε_l	deformação linear convencional em largura	

1. INTRODUÇÃO

Para Helman e Cetlin, 1983, o forjamento é possivelmente a mais antiga operação de conformação mecânica, na qual também estão inseridos os processos de laminação, trefilação, extrusão, conformação de chapas, etc. Nesse processo, basicamente, o material é conformado entre duas matrizes, sob a ação de um maquinário específico (martelos de queda ou prensas), visando adquirir a forma final desejada.

A produção industrial de forjados, conforme dados de 2006 do Sindicato Nacional da Indústria de Forjaria [Sindiforja, 2009], possui um faturamento anual aproximado de R\$ 3,2 bilhões, obtidos a partir de uma produção anual de 574.858 toneladas de produtos forjados, das quais 103.950 toneladas são destinadas à exportação. Essa cadeia produtiva é composta por diversos grupos de forjarias (pequenas, médias ou de grande porte), algumas mais especializadas do que outras, e que juntas empregam aproximadamente 24.000 pessoas no Brasil [Sindiforja, 2009]. Logo, a partir desses indicadores, é possível destacar a importância da indústria de forjados para a economia e, porque não dizer, para a sociedade brasileira.

Para viabilizar o forjamento é necessário investimento tanto em maquinário – que na grande maioria das vezes é de grande porte, quanto na adequação do projeto de fabricação das matrizes e da matéria-prima utilizada (geratrizes e pré-formas) aos parâmetros e peculiaridades deste processo. Nesse contexto, e visando garantir a qualidade de um produto forjado e/ou do próprio ferramental utilizado, faz-se necessário estudos para o desenvolvimento integrado do processo de forjamento, objetivando melhorias em: produtividade, qualidade, custo, redução de desperdícios e satisfação do cliente.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Para Pahl et al., 2005, a metodologia de projeto para um determinado produto deve possuir algumas etapas típicas, que resumidas são: Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar, Projeto Detalhado e a Validação do Projeto. Porém, essa metodologia básica deve ser adequada e modificada conforme a realidade do produto, processo e/ou serviço que está sendo desenvolvido, considerando para isso a integração otimizada e coerente de todos os recursos e parâmetros envolvidos.

Somente a partir da prática de desenvolvimento integrado para um produto é que as indústrias e outros setores da economia podem almejar lucratividade, qualidade e eficiência de seus produtos e serviços. Nesse sentido, a indústria de forjamento ainda deixa a desejar, já que

falta uma integração mais significativa entre as diversas ferramentas e recursos utilizados neste processo, tanto em nível de pessoal (pesquisadores, engenheiros, projetistas e operadores) e equipamentos (hardwares, softwares e maquinários) quanto em nível de conhecimento científico do processo.

As indústrias de componentes forjados já utilizam, para o desenvolvimento de produtos, simulações físicas ou softwares específicos para modelamento em duas ou três dimensões (2D ou 3D, respectivamente). Essas simulações visam prever o comportamento e as condições do material durante o processo, como: variação de temperatura, força, energia, velocidade de forjamento, escoamento do material, etc [Kobayashi et al., 1989; Ribeiro, 1993; Geier, 2007; Lenhard Júnior, 2007]. Porém, devem retratar as condições reais do processo e/ou o mais próximo possível destas, do contrário os resultados obtidos se tornam imprecisos ou equivocados.

Mesmo com todo o esforço para o desenvolvimento das técnicas de simulação de forjamento é comum, ainda, encontrar em forjarias de pequeno a médio porte, ou até mesmo aquelas de grande porte, a adoção das técnicas de “tentativa e erro” ou “empirismo” visando o projeto e fabricação de componentes forjados, conforme destaca Peres, 2002. A adoção dessas técnicas torna o processo de forjamento num sistema fragmentado, com reduzida confiabilidade, sem uma efetiva integração entre a prática industrial e o conhecimento teórico e científico, comprometendo a melhoria e a otimização desse sistema.

Logo, a aplicação das técnicas de “tentativa e erro” e “empirismo”, torna-se uma situação problemática para a indústria de forjados, pois:

- a) Diminui a confiabilidade e a qualidade do processo e do produto final;
- b) Diminui a vida útil do ferramental utilizado (matrizes e maquinário);
- c) Eleva o consumo de matéria-prima, devido ao desperdício de material;
- d) Diminui a produtividade, pois em muitos casos é necessário um tempo maior de projeto, fabricação e/ou para o lançamento de um novo produto;
- e) Eleva o custo de produção, tanto no que diz respeito ao produto quanto ao ferramental;
- f) Eleva o nível de insatisfação do cliente, afetando e/ou comprometendo a lucratividade das empresas que utilizam essas técnicas.

Nesse sentido, a pesquisa acerca do desenvolvimento integrado de produto para forjamento torna-se necessária à melhoria desse processo, principalmente, com relação à otimização dos parâmetros envolvidos.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma metodologia de desenvolvimento integrado de produto para forjamento, utilizando ferramentas de simulação físicas e numérico-computacionais, a partir dos principais parâmetros envolvidos nesse processo, visando sua otimização ou melhoramentos.

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- i) Contextualizar os principais parâmetros envolvidos na deformação plástica, no processo de forjamento e no projeto de um produto forjado;
- ii) Aplicar a metodologia para o desenvolvimento integrado de produto para forjamento, visando à fabricação otimizada de um produto destinado a elevadores;
- iii) Analisar e comparar, através de simulações físicas e numérico-computacionais a otimização proposta, objetivando redução na quantidade de rebarba (desperdício), mensuração da força e energia necessária ao forjamento;
- iv) Consolidar e/ou propor modificações para a metodologia proposta.

1.3 JUSTIFICATIVA

A partir deste trabalho espera-se reduzir aquelas conseqüências apresentadas no tópico 1.1, com relação à aplicação dos métodos de “tentativa e erro” e “empirismo” no desenvolvimento de forjados, contribuindo para a redução de custos, tempo de projeto e processo, retrabalho, bem como, agilizando e qualificando o serviço prestado pelas forjarias.

Também, espera-se elevar a confiabilidade e a qualidade do processo de forjamento, servindo de acervo técnico para posterior consulta de outros profissionais interessados na melhoria desse processo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O projeto de fabricação de um produto mecânico envolve basicamente o desenho da peça (dimensões e tolerâncias), a escolha do processo a ser utilizado, e as variáveis atuantes nesse sistema, como: seleção de materiais e suas propriedades. Os produtos metálicos podem ser fabricados através de diferentes tecnologias, que resumidamente podem ser classificadas como: tecnologia do corte (ex.: usinagem), tecnologia de fusão (ex.: fundição), tecnologia de sinterização ou metalurgia do pó, ou ainda a tecnologia da deformação plástica (ex.: forjamento) [Pacheco, 2007].

Cada tecnologia possui características distintas visando à obtenção de um mesmo produto, principalmente se este apresentar produção seriada, ou seja, em larga escala. Nesse contexto, é esquematizada na figura 2.1 uma relação hipotética de custo *versus* produtividade entre os processos de forjamento e usinagem. Onde, a partir de um certo número crítico de peças um processo poderá ser mais economicamente viável do que outro. Logicamente, que essa relação não segue uma linearidade perfeita, mas a partir dessa hipótese é possível prever que o forjamento é um processo indicado quando se deseja elevada produtividade aliada a baixo custo.

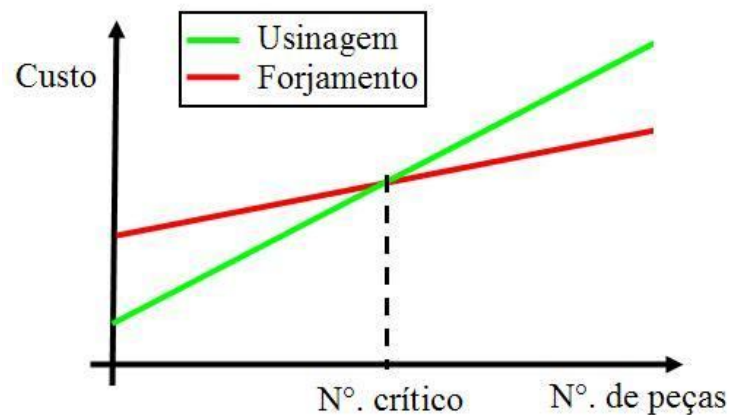


Figura 2.1 – Gráfico custo *versus* número de peças considerando usinagem e forjamento.
Fonte: [Pacheco, 2007].

A partir dos trabalhos de Dieter, 1981, Bresciani Filho et al., 1997 e Rodrigues e Martins, 2005, é possível definir o termo “forjamento” como sendo: uma família de processos para deformação plástica generalizada de uma massa metálica com fluxo intermitente através da aplicação de forças compressivas, visando à modificação das propriedades mecânicas e da geometria dessa massa metálica para a obtenção de uma forma útil. Para Lange, 1994, o forjamento pertence ao grupo de processos de manufatura compreendidos pelos processos de conformação, sendo classificado em dois grupos: forjamento em matriz aberta ou em matriz

fechada, podendo ser realizado a quente, a morno ou a frio, conforme será detalhado em tópicos específicos neste trabalho.

Através do forjamento é possível obter as mais variadas formas e dimensões de peças a partir de materiais metálicos diversos, como: aços ao carbono, aços-liga, aços inoxidáveis, ligas de alumínio, cobre, titânio, etc. De modo geral, todos os materiais metálicos podem ser deformados e, inclusive, forjados, sendo necessário para tanto um desenvolvimento integrado de produto com relação às suas condições de projeto e manufatura. Na figura 2.2 são apresentadas algumas peças obtidas pelo processo de forjamento, onde se verifica a diversidade de formas e dimensões dos produtos forjados.



Figura 2.2 – Exemplos de peças forjadas.
Fonte: [Maxiforja, 2009].

Porém, em diversas forjarias é comum encontrar peças com elevado desperdício de material (ex.: excesso de rebarba), consumo de energia exagerado, peças defeituosas com trincas, falha de preenchimento, etc. Problemas estes que na grande maioria das vezes resultam de um projeto de produto ou processo deficientes, sem uma análise criteriosa de seus parâmetros e/ou sem qualquer embasamento teórico e científico.

Garcia et al., 2000, destaca que o comportamento mecânico de qualquer material utilizado na engenharia é função de sua estrutura interna e de sua aplicação no projeto. Logo, o comportamento de um material durante o forjamento também é resultado da maneira como esse é aplicado ao projeto. Além, é claro, das características metalúrgicas e das propriedades mecânicas do próprio material durante o processo. Ferreira, 2002, exemplifica, como desperdício de material, que no forjamento de engrenagens apenas 75 a 80% da matéria-prima é aproveitada, exigindo ainda uma quantidade considerável de energia se comparado a outros processos, conforme indicado na figura 2.3.

Material bruto	Processo de fabricação	Energia por kg
90	Fundição	30-38
95	P/M - sinterização	29
85	Extrusão	41
75-80	Forjamento	46-49
40-50	Usinagem	66-82
% 75 50 25 0		0 25 50 75 MJ

Figura 2.3 – Comparação dos processos de fabricação de engrenagens para automóveis.
Fonte: [Ferreira, 2002, p. 33].

Nesse sentido, estudos sobre o comportamento do material e sua condição físico-mecânica antes, durante e pós-forjamento servem para minimizar o desperdício de material e o consumo exagerado de energia. Essa premissa pode ser ilustrada através da figura 2.4, onde é apresentado um esquema básico de forjamento em matriz aberta, identificando o sentido de aplicação da força e o tipo de deformação (forma de barril) que sofre o material. Esse tipo de deformação se dá devido à restrição causada pelo atrito entre a peça e matriz e o gradiente térmico envolvido no processo [Garcia et al., 2000; Rodrigues e Martins, 2005; Pacheco, 2007]. Logo, é possível afirmar que muitos fatores, dentre os quais o atrito e a temperatura, influenciam no processo de forjamento.

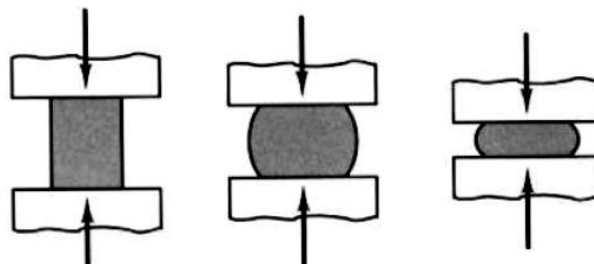


Figura 2.4 – Esquema básico de forjamento em matriz aberta.
Fonte: [Pacheco, 2007, p. 21].

Souza et al., 2008, apud Kobayashi et al., 1989, compartilham dessa afirmação ao destacarem que durante o forjamento em matriz aberta diversas são as variáveis atuantes no processo, como: tipo de material a ser deformado, dimensões das matrizes, condições e interação entre metal e matriz, mecanismo de deformação plástica, projeto do produto final e suas características, além do gradiente térmico e do tipo de equipamento utilizado. Sendo que todas estas variáveis interagem durante o processo, dificultando a análise quantitativa de cada

parâmetro isoladamente. Portanto, e visando o desenvolvimento integrado de produto com relação às condições de forjamento, faz-se necessário conhecer os princípios que regem a deformação plástica e seus parâmetros de influência.

2.1 TEORIA DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DOS METAIS

A deformação de um material metálico pode ser definida de duas formas: de maneira elástica – reversível ao cessar a sollicitação mecânica, ou de maneira plástica – irreversível mesmo cessada a sollicitação [Dieter, 1981; Helman e Cetlin, 1983].

A deformação plástica de um corpo metálico se dá quando a sollicitação mecânica atinge uma tensão limite para este corpo, a partir da qual não se verifica mais a proporcionalidade entre a tensão imposta e sua deformação. Essa deformação é obtida através de dois mecanismos: o escorregamento (ou deslizamento) dos planos cristalográficos preferenciais (ou planos de escorregamento), e a maclação, onde há inclinação dos planos cristalográficos em relação ao reticulado cristalino, conforme ilustrado na figura 2.5 [Bresciani Filho et al., 1986].

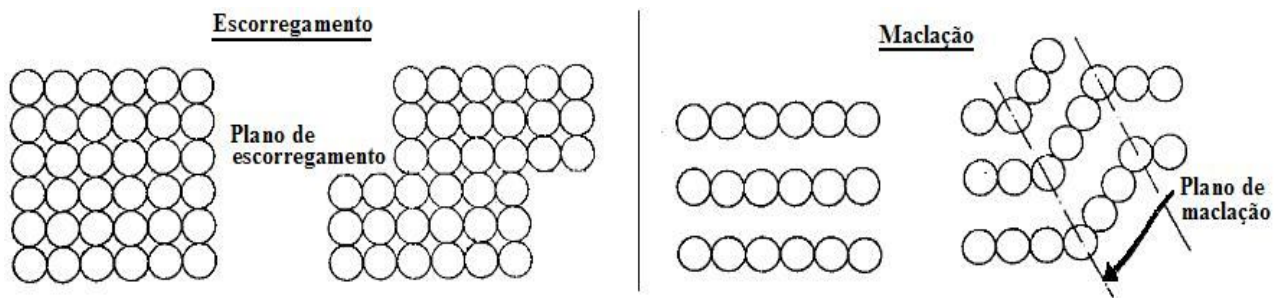


Figura 2.5 – Mecanismo de deformação plástica: escorregamento e maclação.

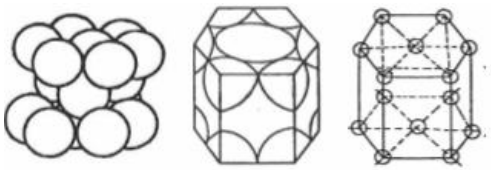


Fonte: [Bresciani Filho et al., 1986, p. 23].

Para o entendimento desses mecanismos é necessário compreender a formação dos sólidos metálicos, principalmente, com relação a sua estrutura cristalina fundamental, já que essa é decisiva para a movimentação dos planos cristalográficos e, conseqüentemente, para a deformação do material.

Os metais são compostos por agrupamentos de átomos segundo uma ordem que se repete nas três dimensões, denominados “cristais”. A disposição e a forma geométrica que se encontram essas partículas constituem a chamada “estrutura cristalina”. O menor agrupamento de átomos que caracterizam um cristal é denominado “célula unitária”. Essas células, por apresentarem orientações e posições bem definidas (simétricas) e periódicas, formam uma malha de átomos denominada “reticulado cristalino” [Dieter, 1981; Bresciani Filho, et al., 1986].

A estrutura cristalina é mantida em equilíbrio pela ação de forças de atração e repulsão dos íons positivos e negativos que compõem os átomos. Nos metais, essa estrutura pode apresentar três formas básicas, e distintas conforme a disposição atômica, que são: a estrutura hexagonal compacta (HC), estrutura cúbica de faces centradas (CFC) e a estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). Devido à diferença na disposição dos átomos, cada estrutura básica apresentará características e propriedades distintas, principalmente com relação a sua deformação. Na tabela 2.1 são ilustradas as posições dos átomos pertencentes a cada estrutura elementar, bem como, é apresentado um levantamento sobre as principais características dessas estruturas.

Tabela 2.1 – Representação e características das células unitárias básicas.

Representação da célula unitária (esferas tangentes, cortadas e separadas)	Nome e características
	<p><u>HC</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Prisma hexagonal com átomos nos vértices e no centro das bases; - Planos compactos, justapostos e tangenciando os planos dos átomos do plano inferior (6 átomos por célula); - Possui baixa deformabilidade se comparada as demais; - Fator de empacotamento: 0,74; - Sistemas de escorregamento: 3 (1 plano e 3 direções); - Exemplo de materiais: Be, Cd, Co, Mg, Ti, Zn.
	<p><u>CFC</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Cubo com vértices e centro das bases ocupadas por átomos; - Planos compactos, com átomos do terceiro plano apresentando a mesma direção dos átomos do primeiro plano (4 átomos por célula); - Possui elevada deformabilidade se comparada as demais; - Fator de empacotamento: 0,74; - Sistemas de escorregamento: 12 (4 planos e 3 direções); - Exemplo de materiais: Fe-γ, Al, Cu, Au, Pb, Ni, Ag.
	<p><u>CCC</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Cubo com átomos nos vértices e um átomo no seu centro (2 átomos por célula); - Apresenta média deformabilidade se comparada as demais; - Fator de empacotamento: 0,68; - Sistemas de escorregamento: 48 (16 planos e 3 direções); - Exemplo de materiais: Fe-α, Cr, Mo, Nb, W, V.

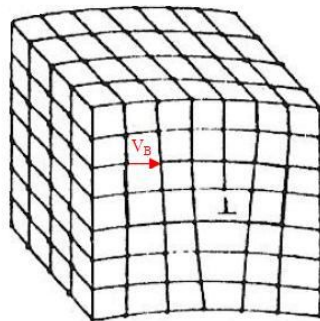
Fonte: [adaptado de Dieter, 1981; Bresciani Filho et al., 1986; Pacheco, 2007].

Os materiais metálicos, principalmente as ligas, apresentam constituintes diversos junto à matriz metálica (ex.: micro-constituintes, impurezas e outros agregados). A distribuição homogênea desses elementos é praticamente impossível de ser atingida, resultando em segregações e/ou descontinuidades dispersas na solução sólida. Logo, existem “soluções intersticiais”, quando os agregados situam-se entre os átomos da rede cristalina, ou “soluções

substitucional”, quando átomos secundários assumem o lugar dos átomos do reticulado cristalino, sendo essas soluções dependentes da interação e do raio atômico de suas partículas [Bresciani Filho et al., 1986].

As heterogeneidades influenciam na deformação do material, principalmente, devido à formação de defeitos na rede, os quais podem ser classificados como; defeitos de ponto, defeitos de plano ou tridimensionais e defeitos de linha. Os defeitos de ponto são defeitos restritos a uma região do reticulado cristalino, e que envolvem um número reduzido de átomos. A vacância – que consiste na ausência de um ou mais átomos da rede cristalina, a existência de átomo intersticial ou do deslocamento de um átomo da rede cristalina são exemplos desse tipo de defeito. A presença de vazios, fissuras, poros, falhas de empilhamento e de contorno dos grãos são exemplos de defeitos planos ou tridimensionais. Os defeitos de linha, conhecidos como discordâncias de linha (ou de cunha) e espiral (ou de hélice) são discontinuidades nas arestas dos planos existentes ao longo do cristal. As discordâncias são responsáveis pelo movimento relativo dos planos, ou seja, pelo escorregamento de planos do cristal, apresentando direções cristalográficas características [Bresciani Filho et al., 1986]. A magnitude e a direção de deslocamento das discordâncias podem ser analisadas através do vetor de *Burgers* (V_B), que é ilustrado na figura 2.6, sendo perpendicular à linha de discordância de cunha, e paralelo à linha de discordância em espiral.

Discordância de linha (ou de cunha)



Discordância em espiral (ou de hélice)

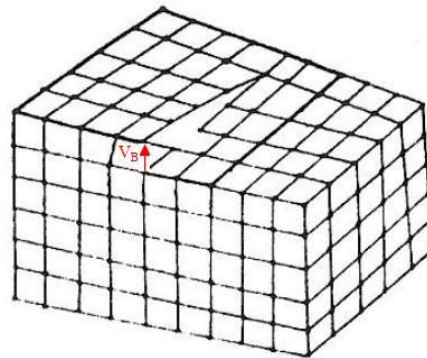


Figura 2.6 – Discordâncias de cunha e espiral com a representação do vetor de *Burgers* (V_B).

Fonte: [Bresciani Filho et al., 1986, p. 41].

Bresciani Filho et al., 1986, salientam que o principal mecanismo de deformação plástica é o escorregamento provocado pelo movimento das discordâncias, que se dá através de planos e direções de escorregamento, e que coincidem preferencialmente com as direções de maior densidade atômica, ou seja, onde os átomos estão mais próximos. Porém, esse comportamento muitas vezes é impedido e, devido ao estado de tensões atuantes ou da ação de outros fenômenos (ex.: encruamento, impurezas, etc.), outros planos e direções podem se tornar

ativos. Na figura 2.7 são apresentados os planos e direções principais do escorregamento das três estruturas cristalinas básicas.

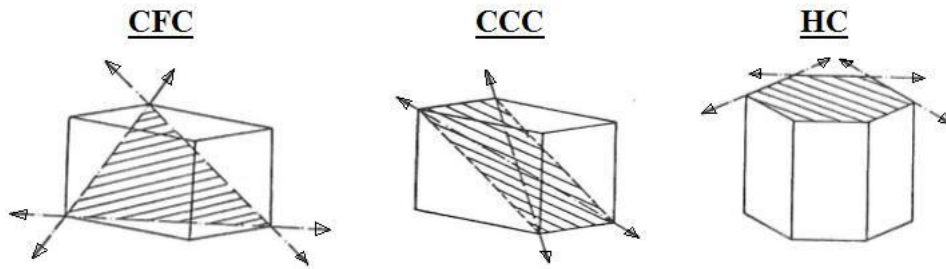


Figura 2.7 – Principais planos e direções de escorregamento das estruturas cristalinas.

Fonte: [Bresciani Filho et al., 1986, p. 29].

Durante a maclação uma parte do cristal apresenta inclinação em relação à outra parte, sendo delimitada pelo plano de maclação. A parte defasada do cristal (aquela que sofreu deformação) mantém o mesmo reticulado da parte original e, ao contrário do escorregamento, muitos planos se movimentam de maneira regular mantendo a mesma distância atômica entre os planos [Bresciani Filho et al., 1986].

Materiais com maior área de contorno de grão (ou seja, com granulação menor) possuem maior resistência mecânica e menor deformabilidade do que aqueles materiais com grãos mais grosseiros. Logo, a movimentação das discordâncias é dificultada pela quantidade excessiva de contornos de grãos, e pelo surgimento de sub-grãos orientados de maneira diferente da rede cristalina original, que vem a ser o processo de “poligonização” [Bresciani Filho, 1986; Pacheco, 2007].

A existência de um número excessivo de planos de deformação, principalmente devido à movimentação, multiplicação e intercruzamento das discordâncias, eleva o número de intersecções entre os planos, exigindo maior tensão necessária à deformação. Esse fenômeno, que causa o endurecimento do cristal metálico, é denominado de “encruamento”.

Todo o material já encruado e submetido a novo processo de deformação apresenta maior resistência a essa nova deformação em virtude do grau de encruamento pré-existente. Para ciclos de deformação é possível descrever esse comportamento através do fenômeno de histerese entre a tensão aplicada e a deformação a que um material é submetido. Sendo possível afirmar que quanto maior o nível de encruamento maior será a tensão necessária para uma nova deformação.

O processo de encruamento pode ser revertido através do amolecimento por recozimento do material. Neste processo o material é aquecido até uma determinada temperatura por um certo período de tempo, que dependerá do tipo de material e do grau de encruamento existente no mesmo.

O processo de amolecimento por recozimento apresenta três etapas principais, descritas a seguir e ilustradas na figura 2.8:

a) Recuperação: onde há aumento gradativo da temperatura, ocorrendo um rearranjo das discordâncias, visando a redução e/ou eliminação destas, além de favorecer a redução das tensões internas presentes no material;

b) Recristalização: nessa etapa as propriedades físicas e mecânicas do material retornam ao seu valor original (antes da deformação), além de ocorrer o início da nucleação de novos cristais em substituição àqueles deformados;

c) Crescimento dos grãos: os grãos originados durante a recristalização aumentam de tamanho à medida que a energia interna original é restaurada.

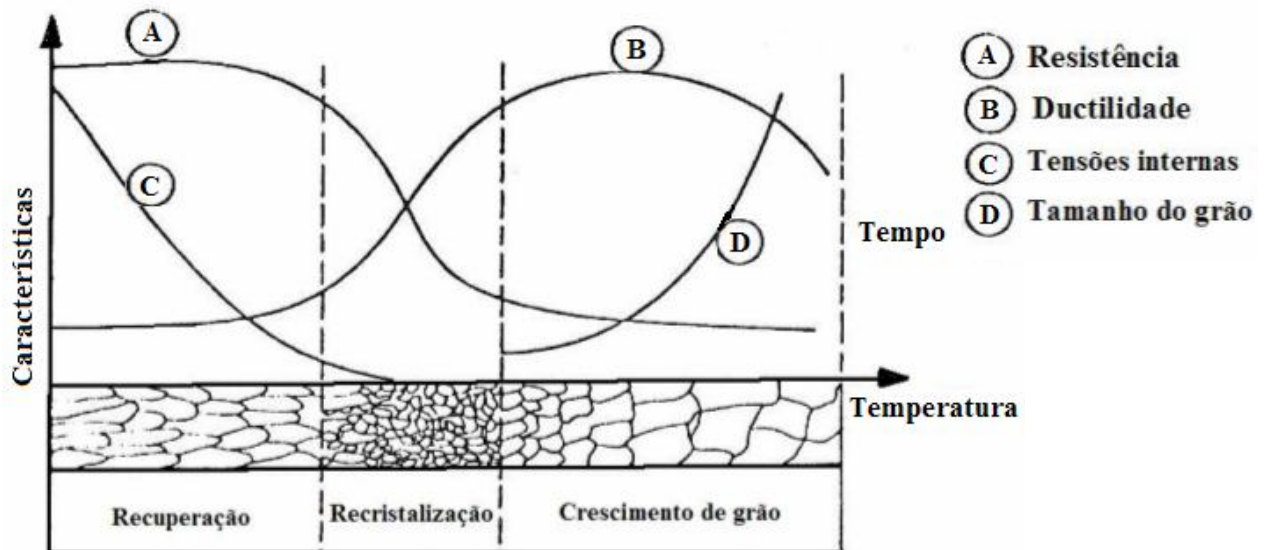


Figura 2.8 – Recozimento: modificações estruturais e das propriedades mecânicas.

Fonte: [Bresciani Filho et al., 1986, p. 60].

Além do estudo teórico sobre os aspectos cristalográficos da deformação é necessário definir parâmetros quantitativos, visando mensurar os níveis de tensões e deformações admissíveis ao processo de conformação de um material. A obtenção desses parâmetros analiticamente envolve fenômenos físicos complexos, tornando difícil descrever plenamente o comportamento dos metais, principalmente, sob grandes deformações plásticas.

Nesse sentido, são assumidas algumas hipóteses simplificadoras desse fenômeno [Dieter, 1981]. Uma delas, diz respeito ao volume do material que, conforme Grüning, 1973, o volume de um corpo conformado permanece constante durante seu processo, pois o processo de conformação se dá por escorregamento em diferentes direções. Isto, representa a Lei da Constância do Volume ou também denominada propriedade de “incompressibilidade” do material.

Existem duas linhas de estudos para a análise dos processos de conformação: a Física dos Sólidos e Metalurgia Física – que avalia a estrutura cristalina do material durante a deformação de maneira qualitativa, e a Mecânica dos Meios Contínuos – que mede as propriedades supondo que o material seja isotrópico, homogêneo, contínuo e incompressível [Helman e Cetlin, 1983].

A isotropia se refere à conservação das mesmas propriedades mecânicas em qualquer direção de solitação. A homogeneidade de um material se baseia na mesma composição química, morfologia e distribuição de grãos ao longo de seu comprimento. A continuidade se refere à isenção de porosidades ou vazios, e a incompressibilidade é a manutenção do volume “V”, como já citado anteriormente.

A relação de deformação para um corpo, neste caso citando um paralelepípedo conforme representado na figura 2.9, é obtida através do cociente das dimensões geométricas, antes e após a conformação [Grüning, 1973].

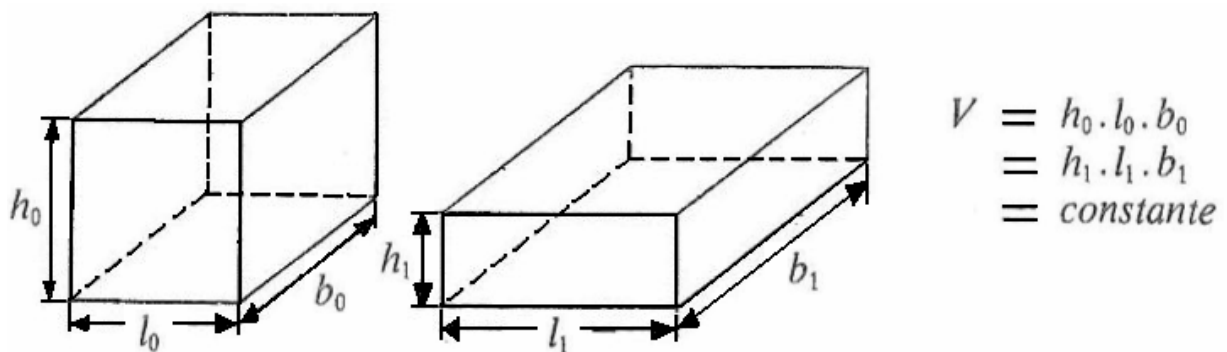


Figura 2.9 – Representação da Lei da Constância de Volume para um paralelepípedo.

Fonte: [Grüning, 1973, p. 16].

A partir da figura 2.9, e sendo “ h_0 ” a altura inicial, “ b_0 ” a profundidade inicial e “ l_0 ” a largura inicial, e “ h_1 ”, “ b_1 ” e “ l_1 ” as mesmas grandezas considerando o estado final de deformação do paralelepípedo, tem-se a deformação linear convencional (de engenharia ou relativa) “ ϵ_h ”, “ ϵ_b ”, “ ϵ_l ”, dessas grandezas, sendo representadas pela equação (2.1) [Grüning, 1973; Helman e Cetlin, 1983]:

$$\epsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_1 - h_0}{h_0} \therefore \epsilon_b = \frac{\Delta b}{b_0} = \frac{b_1 - b_0}{b_0} \therefore \epsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (2.1)$$

Para Grüning, 1973, e Helman e Cetlin, 1983, a partir da teoria da deformação plástica deve-se utilizar nos processos que resultam num elevado grau de deformação (além do limite elástico, como no caso do forjamento) a chamada deformação verdadeira (natural ou

logarítmica) “ φ ”, que consiste na deformação logarítmica das dimensões do corpo deformado, e que por sua vez será menor que os respectivos valores de deformação linear.

Assim, e considerando infinitos alongamentos do paralelepípedo de simetria cartesiana da figura 2.9, tem-se as deformações verdadeiras: em altura “ φ_h ”, em profundidade “ φ_b ” e em largura “ φ_l ”, conforme expresso na equação (2.2). Caso a peça apresente simetria cilíndrica (= axissimétrica) é possível obter as deformações verdadeiras: em altura “ φ_h ”, radial “ φ_r ” e circunferencial “ φ_p ”, conforme representado na equação (2.3), sendo “ h ” a altura, “ r ” o raio e “ p ” o perímetro [Grüning, 1973].

$$\varphi_h = \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln(1 + \varepsilon_h) \quad \therefore \quad \varphi_b = \int_{b_0}^{b_1} \frac{db}{b} = \ln \frac{b_1}{b_0} = \ln(1 + \varepsilon_b) \quad \therefore \quad \varphi_l = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_l) \quad (2.2)$$

$$\varphi_h = \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln(1 + \varepsilon_h) \quad \therefore \quad \varphi_r = \int_{r_0}^{r_1} \frac{dr}{r} = \ln \frac{r_1}{r_0} = \ln(1 + \varepsilon_r) \quad \therefore \quad \varphi_p = \int_{2\pi r_0}^{2\pi r_1} \frac{dp}{p} = \ln \frac{2\pi r_1}{2\pi r_0} = \ln(1 + \varepsilon_p) \quad (2.3)$$

Nas equações (2.2) e (2.3) é possível destacar que a última igualdade faz uma relação entre a deformação verdadeira e a convencional, onde, deve-se utilizar para o cálculo da força máxima necessária aquela deformação verdadeira que apresentar o maior valor, ou seja, “ $\varphi_{\text{máx}}$ ” [Grüning, 1973]. O uso da deformação verdadeira, e não da deformação convencional, só vem a confirmar a aplicação da Lei da Constância de Volume para processos com grandes deformações, já que as igualdades descritas nas equações (2.4) e (2.5) são possíveis.

$$\varphi_h + \varphi_b + \varphi_l = 0 \Rightarrow \text{para simetria cartesiana} \quad (2.4)$$

$$\varphi_h + \varphi_r + \varphi_p = 0 \Rightarrow \text{para simetria cilíndrica} \quad (2.5)$$

Da mesma forma que se fez com a deformação, a tensão utilizada para fins de deformação plástica também deve ser a tensão verdadeira “ σ_v ” dada pela equação (2.6). Esta tensão considera a força verdadeira “ F_v ” e a área verdadeira da seção “ A_v ” a cada instante da deformação. Por outro lado, a tensão convencional ou de engenharia “ S_E ” somente considera a área inicial “ A_0 ” do processo, tendo sua relação com a tensão verdadeira explicitada na última igualdade da equação (2.6) [Grüning, 1973].

$$\sigma_v = \frac{F_v}{A_v} = S_E (\varepsilon + 1) \quad (2.6)$$

No estudo da deformação mecânica são adotados critérios de escoamento visando prever a tensão de início de escoamento sob condições diversas de carregamento. Existem dois critérios plenamente difundidos na literatura científica: o critério de von Mises e o critério de Guest-Tresca. No critério de von Mises a tensão de escoamento “ σ_e ” é obtida quando a energia de distorção atinge seu valor máximo (crítico) para um ensaio uniaxial de tração, sendo expressa pela equação (2.7), onde “ σ_1 ”, “ σ_2 ” e “ σ_3 ” são as tensões principais nas três direções cartesianas [Dieter, 1981; Breschiani Filho et al., 1986].

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

O critério de von Mises define ainda que o limite de escoamento por cisalhamento “ τ_e ”, será menor do que a tensão de escoamento para um ensaio de tração uniaxial, conforme descrito na equação (2.8).

$$\tau_e = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} = 0,577(\sigma_e) \quad (2.8)$$

No critério de Guest-Tresca, ou da máxima tensão cisalhante, admite-se que o escoamento ocorre quando a tensão de cisalhamento máxima “ $\tau_{m\acute{a}x}$ ” atinge o valor da tensão de cisalhamento do ensaio uniaxial de tração “ τ_e ”, sendo definida pela equação (2.9).

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_e = \frac{\sigma_e}{2} = 0,5(\sigma_e) \quad (2.9)$$

Ao adotar algum dos critérios de escoamento para um determinado material, somente se está definindo uma tensão crítica ao escoamento que, no caso da deformação plástica, o material terá que ultrapassar para satisfazer sua deformação. Porém, na grande maioria das vezes, faz-se necessário obter os valores de tensão durante o processo, bem como, a descrição completa desse fenômeno e sua interação às condições físicas e mecânicas. Para isso, são utilizadas técnicas como as descritas nos trabalhos de Dieter, 1981, Helman e Cetlin, 1983, e Breschiani Filho et al., 1986, com destaque para os métodos dos blocos (*slab method*), do campo das linhas de deslizamento (*slip lines field*), elementos finitos e simulações físicas ou numéricas. Estes métodos, em geral, estabelecem soluções analíticas e experimentais para os modelos físicos que descrevem os processos de deformação, os quais consideram condições peculiares

aos diferentes processos, como: tensões, deformações, velocidades, energia, potência, etc. Há ainda métodos gráficos, que permitem rapidez na obtenção dos resultados mas que, porém, apresentam baixa confiabilidade devido às simplificações adotadas.

Dieter, 1981, p. 62, já afirmava que “a deformação plástica depende da maneira segundo a qual é exercida a solitação mecânica até se atingir o estado final da peça”. Logo, torna-se evidente que para a análise e desenvolvimento integrado de qualquer processo de deformação é fundamental envolver parâmetros do material a conformar, bem como, das características do projeto e do processo a ser utilizado. Sendo assim, a seguir serão abordados os principais parâmetros de influência sob a deformação plástica do material, entre eles: o tipo de material, o gradiente térmico, a velocidade do processo, as condições de atrito e lubrificação e, posteriormente, com destaque ao processo de forjamento, temas relacionados ao projeto do produto forjado e ao ferramental utilizado.

2.1.1 Efeito do material

Nos processos de deformação mecânica, inclusive no forjamento, é possível trabalhar com diferentes materiais, que por sua vez apresentam propriedades físicas e mecânicas distintas. Estas características são decorrentes da diversidade de ligas e composições químicas existentes para os materiais mecânicos, bem como, do nível de heterogeneidades presentes na matriz metálica, como: vazios, inclusões, elementos de liga, etc.

Chiaverini, 1986, destaca que a adição de elementos de liga em materiais metálicos afeta sua isotropia, influenciando suas propriedades mecânicas, como: usinabilidade, temperabilidade, dureza a quente, capacidade de corte, resistência ao desgaste e a oxidação, entre outros. Nesse sentido, e reportando-se ao processo de forjamento, também é possível afirmar que parâmetros como: formabilidade e forjabilidade, também são influenciados. A forjabilidade pode ser definida como a capacidade de um sólido metálico poder ser conformado por forjamento sem apresentar fissuras e/ou outros defeitos que comprometam sua integridade.

Helman e Cetlin, 1983, destacam que, em geral, os metais apresentam significativa capacidade de sofrer mudança de forma (formabilidade), característica que varia conforme o tipo de material, sendo influenciada por três aspectos: a formação de estricções – quando o material é tracionado e apresenta redução localizada de seção, a flambagem – quando a peça é delgada podendo dobrar-se sob ação de forças compressivas, e a fratura do material – quando surgem rupturas do material em sua superfície ocasionando comprometimento da peça. Esses três aspectos são desfavoráveis ao processo de forjamento, devendo ser evitados.

Na previsão do comportamento dos materiais durante o processo de deformação plástica são utilizadas representações gráficas denominadas “curvas de escoamento” ou “curvas tensão *versus* deformação”. Estas curvas descrevem a relação entre as tensões e deformações atuantes no material sob condições específicas e para diversos materiais, conforme ilustrado na figura 2.10.

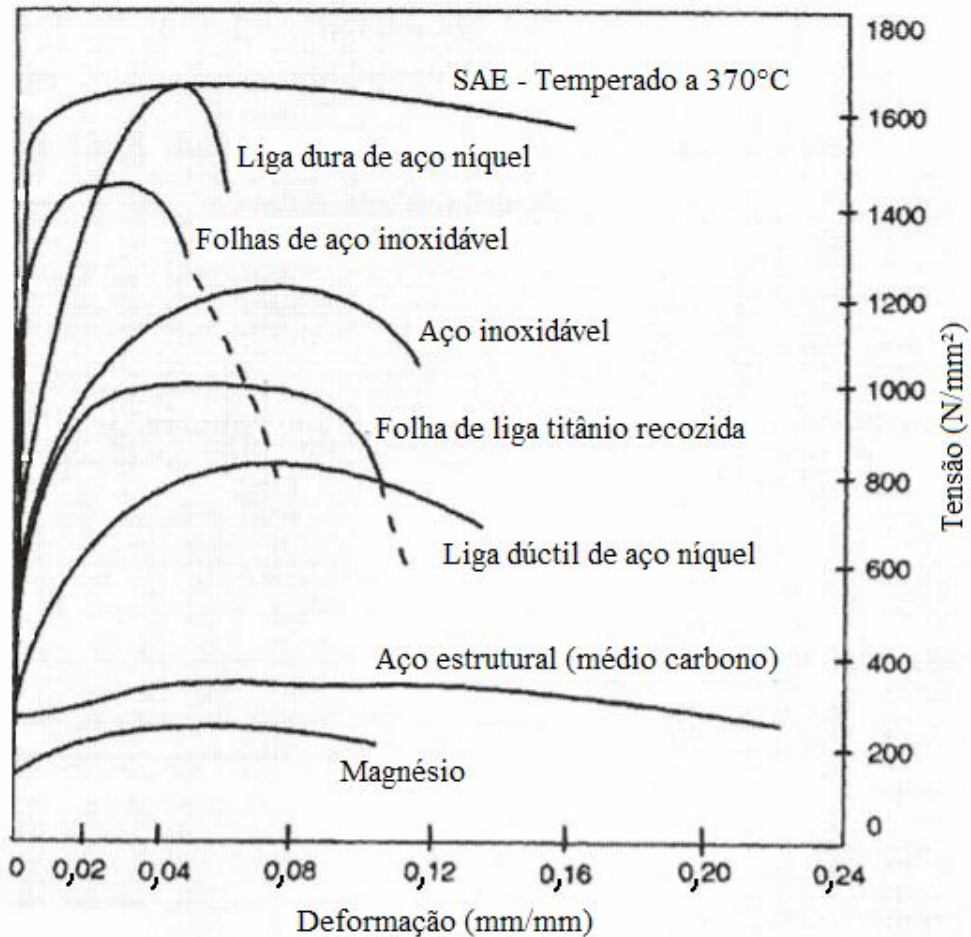


Figura 2.10 – Curva de escoamento para diferentes materiais.
Fonte: [Garcia et al., 2000, p. 10].

Jarreta et al., 2008, salientam que a curva de escoamento além de orientar o comportamento mecânico durante o processo, define o pico de tensão e de deformação críticos para o início da recristalização, fenômeno já contextualizado neste trabalho. Da mesma maneira, Grüning, 1973, relata que a região de interesse da conformação é aquela entre o limite de escoamento do material e o limite de resistência à tração, ou seja, na região de plasticidade estável. Vale ressaltar que as curvas de escoamento devem retratar a tensão e a deformação verdadeiras, já que para Dieter, 1981, p. 63, “a curva tensão *versus* deformação é de interesse fundamental na teoria da plasticidade quando este gráfico representa a tensão e a deformação verdadeira do material”. Na figura 2.11 são exemplificadas diferentes curvas de escoamento, que

podem retratar o comportamento de um mesmo material, porém submetido a condições diversas de processamento.

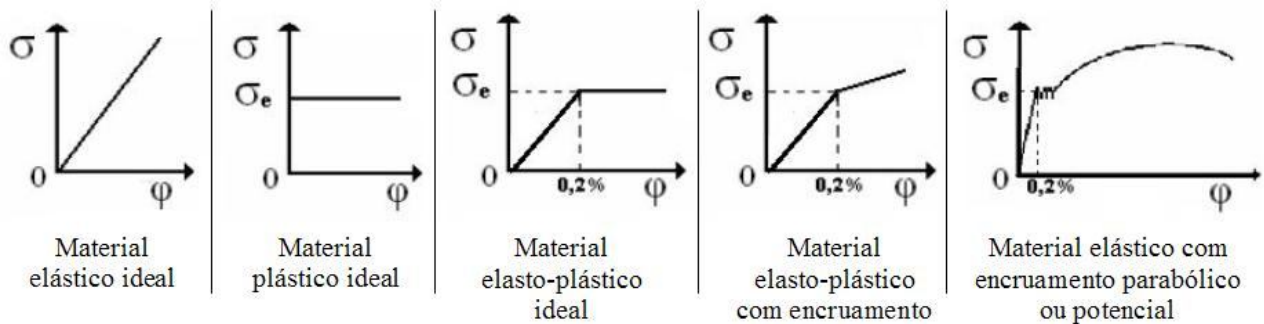


Figura 2.11 – Curvas de escoamento.

Fonte: [adaptado de Bresciani Filho, 1997, p. 310; Dieter, 1981, p. 64; Pacheco, 2007, p. 12].

Os principais fatores que influenciam as curvas de escoamento e, por conseqüência, alteram o comportamento e o valor de tensão “ σ ” atuante no material durante a deformação são: a temperatura “ T ”, a deformação verdadeira “ ϕ ”, a velocidade ou taxa de deformação “ $\dot{\phi}$ ”, além da microestrutura do material “ M_{mat} ”. Logo, $\sigma = f(T, \phi, \dot{\phi}, M_{mat})$, conforme destacam Kobayashi et al, 1989.

Lange, 1994, p. 11.16, salienta que “o mais importante – como no cálculo de todas as forças atuantes no forjamento – é conhecer a tensão de escoamento em função da temperatura, deformação e taxa de deformação, tão exato quanto possível”. Assim, na figura 2.12, são representadas curvas de escoamento de uma liga a base de níquel (denominada comercialmente de VAT[®] 718) obtidas no trabalho de Jarreta et al., 2008, onde se destaca a influência da temperatura sobre essas curvas.

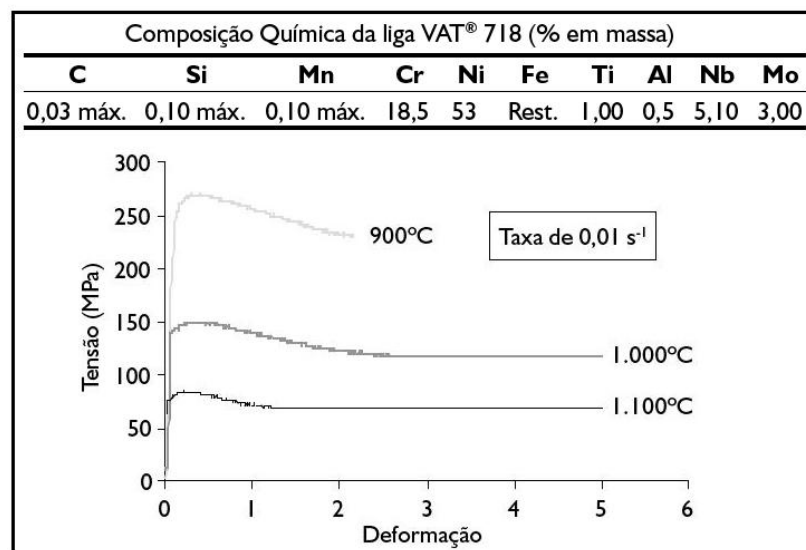


Figura 2.12 – Curvas de escoamentos da liga VAT[®] 718 em diferentes temperaturas.

Fonte: [Jarreta et al., 2008, p. 32].

Para Weisheimer et al., 2005, e Souza et al., 2008, o comportamento do material quando deformado plasticamente, e analisado através de softwares específicos, é resultado da interpolação da curva tensão *versus* deformação existente em seus bancos de dados. Esse procedimento visa obter o comportamento do material para as mais diversas condições de temperatura e/ou taxa de deformação simuladas. Souza et al., 2008, p. 8, salientam que “à medida que se aumenta a velocidade de deformação, maiores são as tensões de escoamento”, o que se evidencia através da figura 2.13, considerando um aço ABNT/SAE/AISI 1045.

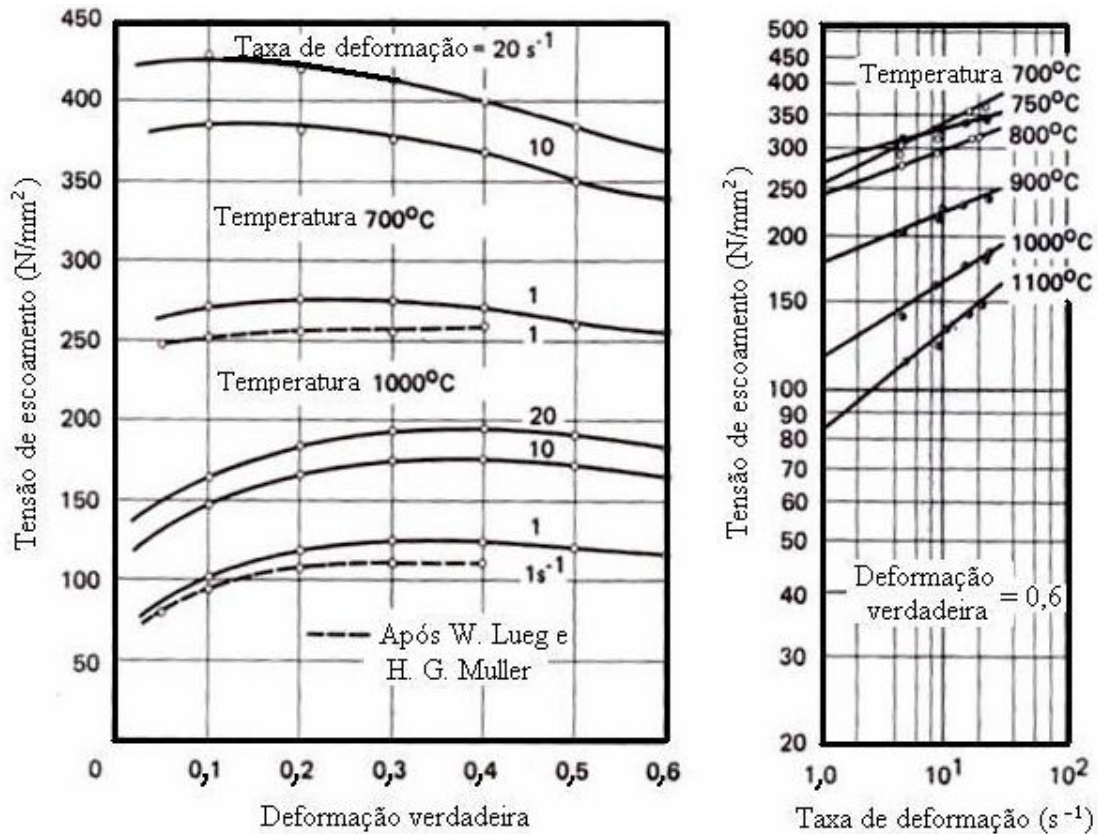


Figura 2.13 – Efeito da temperatura, da deformação e da taxa de deformação na tensão de escoamento do aço ABNT/SAE/AISI 1045.

Fonte: [adaptado de Lange, 1994, p. 11.17].

2.1.2 Efeito do gradiente térmico

Helman e Cetlin, 1983, destacam que os metais são comumente deformados a temperaturas que variam desde a temperatura ambiente até aquelas próximas ao seu ponto de fusão. No processo de conformação metálica, tanto a deformação plástica quanto o atrito contribuem para a geração de calor, sendo que 90 a 95% da energia mecânica envolvida são transformados em calor [Kobayashi et al, 1989]. Logo, o controle e previsão do comportamento termo-mecânico do material durante seu processamento é importante, principalmente para evitar o aparecimento de trincas, fissuras e outros defeitos térmicos, que podem comprometer o

processo e a integridade da peça [Helman e Cetlin, 1983]. Nesse sentido, é comum utilizar temperaturas de referência para classificar o processo e prever suas propriedades. A classificação mais utilizada nos processos de conformação, em especial no forjamento, diz respeito à temperatura homóloga do processo “ T_h ”, que consiste na relação entre a temperatura absoluta do material no início do processo “ T_{mat} ” e a temperatura absoluta de início de fusão desse material “ $T_{fusão}$ ” (todas em Kelvin [K]), expresso na equação (2.10).

$$T_h = \frac{T_{mat}}{T_{fusão}} \quad (2.10)$$

A partir da “ T_h ” é possível classificar os processos e prever algumas situações e/ou características destes, conforme descrito resumidamente na tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Classificação e características do processo a partir de sua “ T_h ”.

	Classificação do processo	Características
$0 < T_h \leq 0,3$	a frio	<ul style="list-style-type: none"> - Exige maior potência de máquina; - Material endurece por encruamento; - Deformação limitada pela ocorrência de fratura; - Necessita de ciclos de deformação e recristalização; - Material apresenta elevada resistência, dureza e tensão de escoamento, com perda da ductilidade e alongamento; - Excelente precisão dimensional (IT8 a IT11); - Acabamento superficial $\approx 10 \mu\text{m}$.
$0,3 < T_h \leq 0,5$	a morno	<ul style="list-style-type: none"> - Ocorre recuperação dos grãos, mas sem a formação de novos grãos (sem recristalização); - Recuperação parcial da ductilidade; - Potência e tensão de conformação, e demais propriedades com valores intermediários entre o trabalho a frio e a quente; - Moderada precisão dimensional (IT11 a IT14); - Acabamento superficial $\approx 30 \mu\text{m}$.
$0,5 < T_h \leq 1$	a quente	<ul style="list-style-type: none"> - Exige menor potência de máquina para a mesma deformação; - Ocorre amaciamento simultâneo do material com o encruamento, a partir da formação de novos grãos (recristalização); - Tensão de escoamento permanece aproximadamente constante; - Diminui a resistência mecânica do metal; - Elevada taxa de oxidação do material devido à intensa vibração térmica; - Temperaturas muito elevadas podem levar a fusão do material e, conseqüente, rupturas por fragilidade a quente (<i>hot shortness</i>), além de desgaste da ferramenta e lubrificação difícil; - Variação dimensional devido à contração do material (IT13 a IT16); - Acabamento superficial ≈ 50 a $100 \mu\text{m}$.

Fonte: [adaptado de Helman e Cetlin, 1983; Chiaverini, 1986, Norton, 2004; Pacheco, 2007; Geier, 2007].

Existe ainda o chamado “forjamento isotérmico”, quando as matrizes possuem a mesma temperatura da peça que está sendo forjada, sendo indicado para peças de ligas leves ou não ferrosas (ex. alumínio) com baixo ponto de fusão. Helman e Cetlin, 1983, e Souza et al., 2008, destacam que o efeito da temperatura sobre as tensões de escoamento é preponderante, e em qualquer taxa de deformação, influenciando diretamente a qualidade do produto final. Na figura 2.14 é representada essa influência a partir da “ T_h ”.

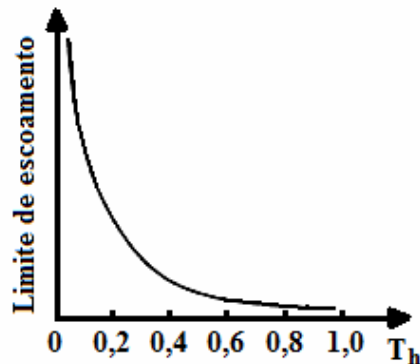


Figura 2.14 – Variação típica do limite de escoamento de um metal com aumento da “ T_h ”.
Fonte: [Helman e Cetlin, 1983, p. 49].

Lange, 1994, apud Lindner, 1965, mostra através da figura 2.15 a variação da tensão de escoamento devido à temperatura, à deformação “ φ ” e à taxa de deformação “ $\dot{\varphi}$ ”, bem como, indicando a perda de carga por oxidação durante o forjamento de um aço ao carbono ABNT/SAE/AISI 1015.

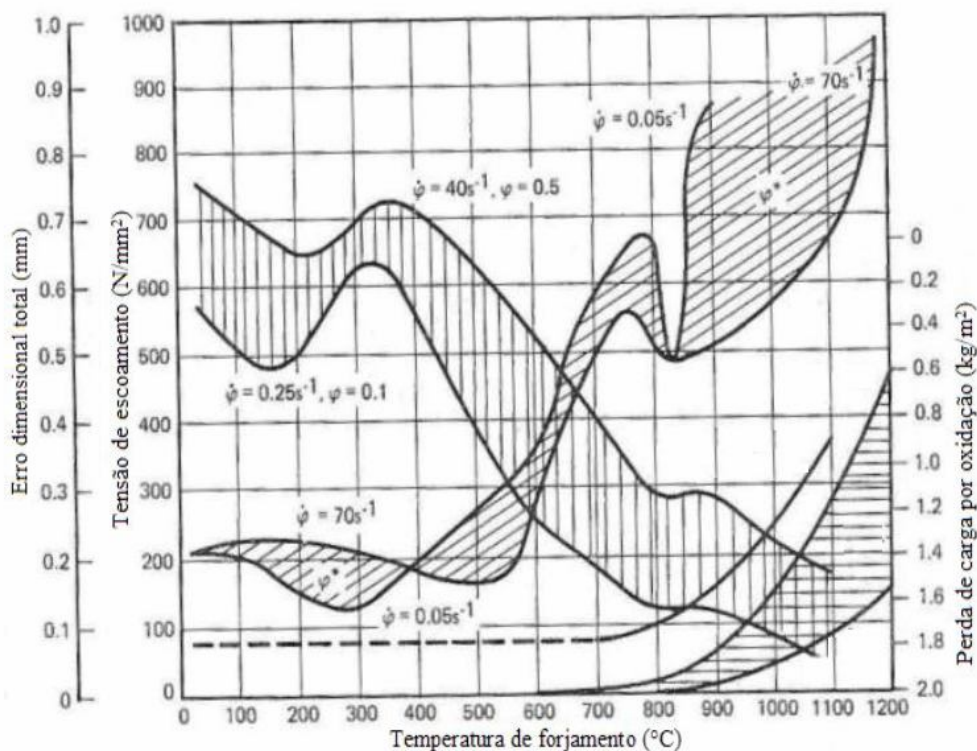


Figura 2.15 – Efeito da temperatura na forjabilidade do aço ABNT/SAE/AISI 1015.
Fonte: [Adaptado de Lange, 1994, p. 11.117, apud Lindner, 1965].

Pacheco, 2007, descreve ainda outro método de classificação a partir da temperatura, que também é citado nos trabalhos de Grüning, 1973, Bresciani Filho et al., 1997, e Norton, 2004. Nesse caso, se a matéria-prima não for aquecida antes da deformação é considerado um processo a frio, caso o aquecimento seja moderado e abaixo da temperatura de recristalização o processo é a morno, mas se o material é aquecido acima da temperatura de recristalização e cuja forma cristalina facilite a deformação, tem-se o processo a quente.

Nenhum dos métodos de classificação por temperatura está completamente certo ou errado, já que o efeito do gradiente térmico se baseia em fenômenos complexos e variáveis conforme: o tipo de processo, o estado de tensões, o tempo e velocidade de trabalho, o nível de discordâncias, a composição química, as condições de troca térmica, etc. [Bresciani Filho et al, 1986; Pacheco, 2007].

Para Bresciani Filho et al., 1997, e considerando o processo de forjamento a quente, o material precisa ser aquecido até uma temperatura tal que lhe confira elevada plasticidade durante todo o processo, sem atingir seu ponto de fusão. Logicamente, essa temperatura varia conforme o tipo de material e sua composição química, como listado na tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Faixas de temperatura para conformação a quente de alguns materiais.

Material	Faixa de temperatura [°C]
Ligas de alumínio	320 a 520
Ligas de cobre (latões)	650 a 850
Aço de baixo teor de C	900 a 1150
Aço de médio teor de C	850 a 1100
Aço de alto teor de C	800 a 1050
Aço-liga com Mn ou Ni	850 a 1100
Aço-liga com Cr ou Cr-Ni	870 a 1100
Aço-liga com Cr-Mo	850 a 1050
Aço inoxidável	750 a 1100

Fonte: [Bresciani Filho et al., 1997, p. 161, apud Billigmann e Feldmann, 1979, p. 77].

Jarreta et al., 2008, ressaltam que a faixa de temperatura para o forjamento de algumas ligas à base de níquel é bastante estreita, sendo necessário controlar o gradiente térmico envolvido no processo. Nesse sentido, um processo a quente com temperaturas iniciais elevadas deve ter seu gradiente térmico controlado, visando evitar que o material atinja sua temperatura de fusão durante o processo, bem como, o surgimento de defeitos devido ao superaquecimento.

Brito et al., 2002, enfatizam que quando o ferramental apresenta temperatura inferior à da peça, e o tempo de fabricação permite a transmissão de calor dissipado pela ferramenta, há o desenvolvimento de gradientes térmicos ainda mais significativos no interior da peça. Helman e Cetlin, 1983, destacam que quanto maior a velocidade de deformação menor será a dissipação de

calor, e conseqüentemente maior será a temperatura do produto fabricado. Logo, a velocidade do processo também influencia na deformação de um material, principalmente, com relação ao gradiente térmico, modificando as curvas de escoamento.

2.1.3 Efeito da velocidade

Grüning, 1973, Norton, 2004, e Silva e Costa, 2006, salientam que o comportamento dos metais durante a conformação é fortemente influenciado pela velocidade do processo, além de sua temperatura. Assim, para um processo de forjamento, quanto maior a temperatura e velocidade do processo maior será a taxa de deformação possível. Para Dieter, 1981, a taxa ou velocidade de deformação exerce três efeitos durante a conformação: aumento da tensão de escoamento, aumento da temperatura devido ao aquecimento adiabático, e a melhoria da lubrificação conforme as características da película lubrificante.

Grüning, 1973, através da figura 2.16, exemplifica que a resistência à mudança de forma num processo a quente é influenciada pela velocidade e temperatura. Velocidades muito elevadas comprometem a formação e o crescimento de novos grãos cristalinos no interior do metal, ocorrendo pequenos encruamentos que interferem na resistência à conformação.

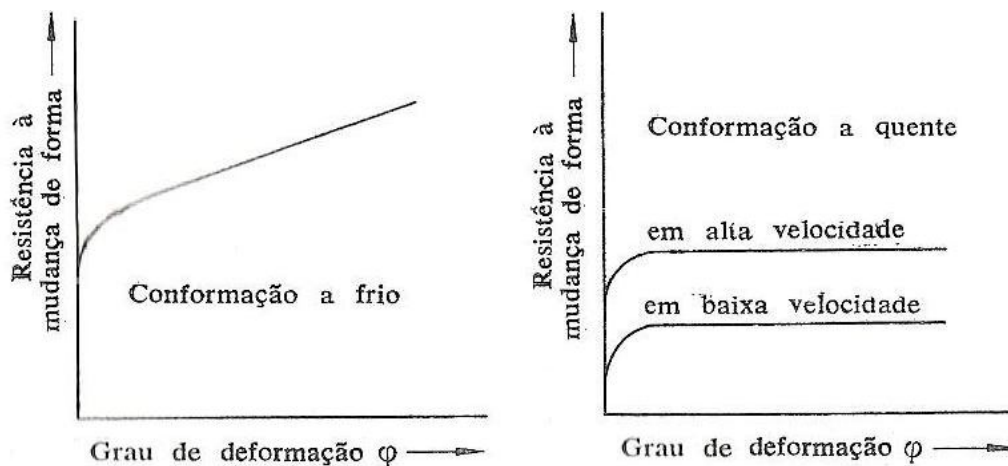


Figura 2.16 – Representação das curvas de encruamento na conformação a frio e a quente.
Fonte: [Grüning, 1973, p. 26].

Para Dieter, 1981, quando as velocidades de conformação são combinadas com zonas de deformação pequenas, é possível produzir processos com taxas de deformação localizadas e com valores elevados. Estes processos são conhecidos como “conformação a altas taxas de energia” (CATE), e possibilitam velocidades superiores à 200m/s. A conformação por explosão é um bom exemplo de um processo CATE, sendo indicado em substituição aos processos que utilizam prensas hidráulicas de grande porte, obtendo elevada dureza e mínima

distorção dos grãos, além de precisão dimensional. Processos com velocidades muito baixas são definidos como “conformação em condições de superplasticidade”, onde há elevada sensibilidade à taxa de deformação, e cujos valores não ultrapassam a $0,01 \text{ s}^{-1}$.

Lange, 1994, apud Stöter, 1960, relata que o tempo de pressão também é outro fator que influencia na deformação plástica, principalmente com relação ao processo de forjamento. O tempo de pressão consiste no período em que a matriz, durante o processo, mantém a força (pressão) de deformação sobre o material, sendo uma grandeza variável e dependente do tipo de maquinário empregado, conforme listado na tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Valores típicos do tempo de pressão conforme o equipamento utilizado.

Maquinário e velocidade	Tempo de pressão [ms]
Martelos de alta velocidade ($\approx 16\text{m/s}$)	0,5 a 5
Martelos de queda livre ($\approx 6\text{m/s}$)	1 a 10
Prensas excêntricas de parafuso	20 a 100
Prensas de fricção por parafuso ($\approx 0,5\text{m/s}$)	50 a 150
Prensas hidráulicas ($\approx 0,1\text{m/s}$)	250 a 500

Fonte: [adaptado de Lange, 1994, p. 11.37].

2.1.4 Efeito do atrito e lubrificação

A tribologia é o ramo da ciência que estuda o atrito, bem como, os sistemas de desgaste e lubrificação dos processos e demais dispositivos mecânicos. O contato entre as superfícies do material e do ferramental, durante o tempo de pressão e ao decorrer do processo, só é possível devido às condições de atrito existentes, que podem ser minimizadas através do uso de lubrificantes. Para Wagoner e Chenot, 1996, o atrito entre a matéria-prima e as ferramentas governa as peças deformadas e a performance de muitas operações de conformação, porém seu valor ainda é minimamente quantificado se comparado a todo o fenômeno envolvido.

Helman e Cetlin, 1983, p. 38, conceituam “atrito por contato” como sendo o mecanismo pelo qual se desenvolvem forças na superfície de dois corpos em contato, que se traduzem numa resistência ao deslizamento de um corpo sobre o outro. O atrito por contato ainda pode ser classificado em “atrito por contato fluido” – quando existe uma película de lubrificante entre as superfícies, ou “atrito por contato seco” – sem qualquer lubrificante interposto.

No forjamento, o movimento relativo entre a matriz e o material pode ser dificultado ou até mesmo impedido pela existência do atrito, principalmente em decorrência das tensões geradas que se opõe ao movimento, e elevam a resistência à deformação. Além disso, outros fatores são comprometidos, como: a regularidade de fluxo do material, a integridade superficial

das matrizes e peças, a temperatura do processo, etc. [Grüning, 1973; Helman e Cetlin, 1983; Kobayashi et al., 1989; Ribeiro, 1993]. Mas vale ressaltar que o atrito não deve ser considerado nocivo para todos os processos de conformação, pois para o processo de laminação a presença do atrito se faz fundamental, já que permite o arraste do material através dos cilindros de laminação [Helman e Cetlin, 1983; Pacheco, 2007].

Helman e Cetlin, 1983, salientam que nos processos de conformação mecânica o atrito depende da natureza dos materiais, bem como, das forças de atração (adesão) atuantes entre as regiões de contato. As micro-irregularidades das superfícies podem apresentar uma solda no estado sólido devido à deformação localizada, à resistência ao cisalhamento e ao efeito de “arar” que as saliências de um material mais duro podem causar sobre a superfície de um material mais macio.

O atrito pode ser representado através de alguns coeficientes, sendo o atrito coulombiano “ μ ” expresso na Lei de Coulomb, descrita na equação (2.11), e verificado entre as superfícies conforme ilustrado na figura 2.17 [Helman e Cetlin, 1983].

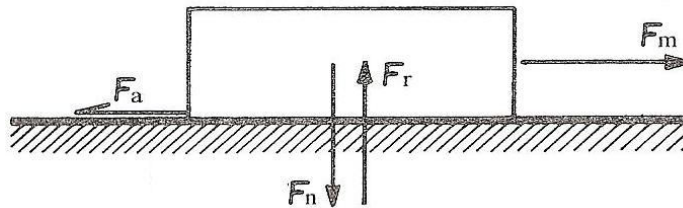


Figura 2.17 – Forças presentes no atrito de um corpo.
Fonte: [adaptado de Helman e Cetlin, 1983, p. 39].

$$\mu = \frac{F_a}{F_r} = \frac{F_a}{|F_n|} \quad (2.11)$$

Na equação (2.11), “ F_a ” é a força de atrito que se opõe a força “ F_m ” que está realizando o movimento, e “ F_r ” é a reação imposta à força normal “ F_n ” do corpo. Helman e Cetlin, 1983, esclarecem que após o início do movimento de um corpo, a força “ F_m ” necessária diminui seu valor e, em conseqüência, “ F_a ” também apresentará valor reduzido. Logo, é possível afirmar que o “atrito dinâmico” – em condições de movimento, será sempre inferior ao “atrito estático” – em condições de equilíbrio.

Devido à “solda” entre saliências das superfícies em contato, sob compressão, existe um atrito dependente da força de cisalhamento dessa solda. Nesse caso, o desprendimento do material ocorrerá por cisalhamento na periferia da solda, já que esta apresenta maior resistência em decorrência do grau de endurecimento e da deformação do material [Helman e Cetlin, 1983].

Sendo assim, a força de atrito “ F_a ” pode ser representada pela equação (2.12), que leva em consideração a tensão de cisalhamento “ τ ” e a área de cisalhamento “ A_s ”, cuja dimensão é um pouco maior que a área de contato efetiva “ A_c ”, e que por sua vez é menor que a área de contato nominal “ A_n ”, conforme ilustrado na figura 2.18a.

$$F_a = \tau_s (A_s) \quad (2.12)$$

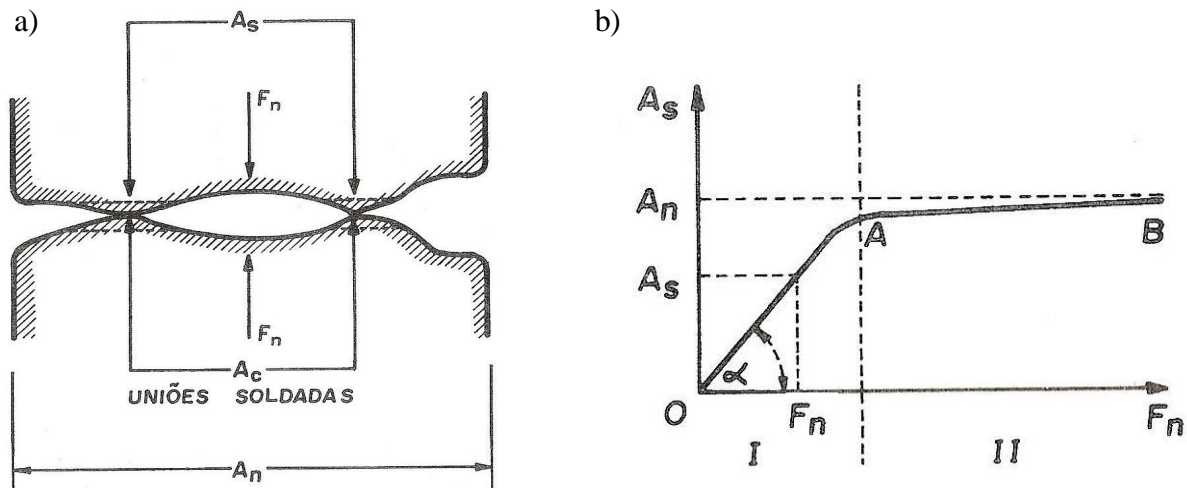


Figura 2.18 – a) Representação à nível microscópico de duas superfícies em contato. b) Relação qualitativa da variação da área de cisalhamento e da força de atrito com a força normal.

Fonte: [Helman e Cetlin, 1983, p. 40 e 41].

Helman e Cetlin, 1983, enfatizam que quanto maiores as forças compressivas maiores serão as áreas “ A_c ” e “ A_s ”, tendendo a “ A_n ”. Assim, na região I da figura 2.18b, é válida a Lei de Coulomb. Com a anulação da inclinação da curva, a tensão por cisalhamento “ τ ” tende a tensão de escoamento por cisalhamento “ τ_e ”. Mas, como a interface dos metais em contato não está livre de impurezas (óxidos, graxas, etc.) existirá uma resistência média ao cisalhamento, menor do que aquela em condições de limpeza total. Nesse caso, a tensão será dada pela equação (2.13) [Helman e Cetlin, 1983; Kobayashi et al., 1989].

$$\tau = m(\tau_e) = \mu(\sigma) \quad (2.13)$$

Na equação (2.13) o coeficiente “ m ” é chamado de “atrito interfacial”, que na deformação plástica assume valores de $0 \leq m \leq 1$. E, considerando um estado uniaxial onde a tensão de escoamento “ σ_e ” torna-se o valor mínimo da tensão aplicada “ σ ”, é possível estabelecer o valor máximo do coeficiente de atrito coulombiano “ $\mu_{\text{máx}}$ ” através do critério de

von Mises, conforme descrito na equação (2.14) [Helman e Cetlin, 1983; Ribeiro, 1993; Wagoner e Chenot, 1996].

$$\mu_{m\acute{a}x} = \frac{\tau_e}{\sigma_e} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cong 0,577 \quad (2.14)$$

Para Helman e Cetlin, 1983, o atrito “ μ ” é geralmente utilizado nos processos de conformação devido a sua simplicidade conceitual, porém em pressões elevadas de contato seu valor passa a ser imprevisível. Ribeiro, 1993, destaca que quando utilizado para pequenas cargas, a nível de elasticidade, o atrito “ μ ” não tem limite máximo, mas se este for utilizado para deformações plásticas (mesmo não sendo o mais indicado) seu valor deve estar compreendido entre 0 e 0,577, cujo limite máximo é obtido pela tensão de cisalhamento conforme von Mises, e já descrito pela equação (2.14).

Para Lange, 1994, as restrições da geometria das matrizes e o atrito são responsáveis pela falta de homogeneidade durante a deformação, sendo possível identificar no forjamento a quente e em matriz fechada três zonas distintas:

- a) *Sticking friction zone* (zona de atrito com agarramento): para elevadas tensões compressivas, apresentando $\mu = 0,5$ ou $0,577$, e sem movimento relativo entre peça e matriz;
- b) *Sliding friction zone* (zona de atrito deslizante): com $\mu \approx 0,3$, para aços, com elevada velocidade entre ferramenta e peça, e marcas unidirecionais na superfície da estrutura;
- c) *Shear-pressure zone* (zona de corte de pressão): apresentando uma transição entre as duas zonas anteriores, com área limitada, e significativa tensão de compressão normal, além de reduzido movimento relativo entre matriz e peça.

O atrito “ m ” é o mais adequado para avaliar situações que envolvam deformação plástica, possuindo uma relação com o atrito coulombiano já apresentada pela equação (2.13) e ilustrada graficamente pela figura 2.19 [Ribeiro, 1993].

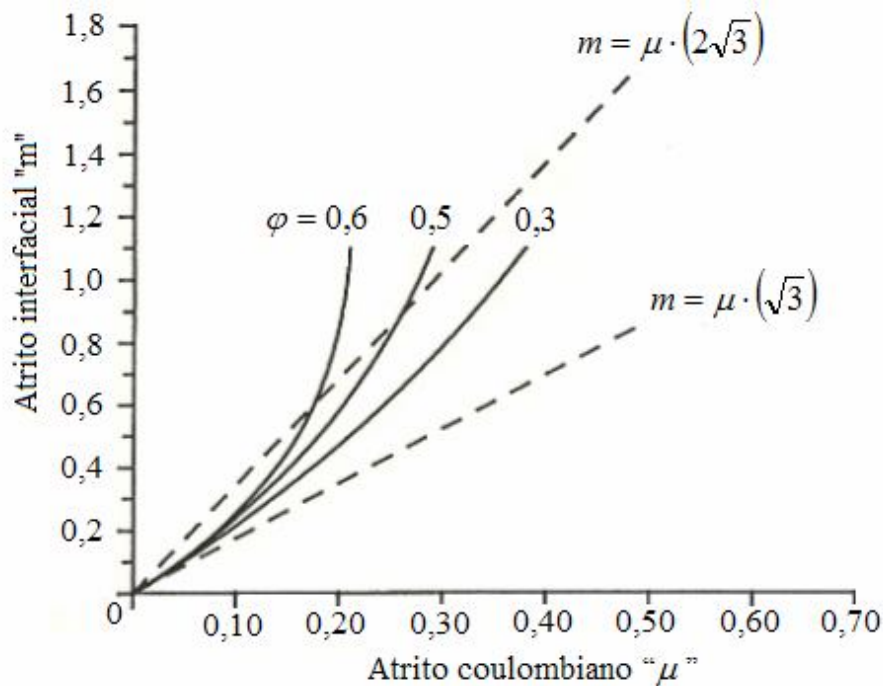


Figura 2.19 – Relação entre os coeficiente de atrito “ μ ” e “ m ”.
 Fonte: [Ribeiro, 1993, p. 22, apud Löwven, 1971].

Kobayashi et al., 1989, descrevem na tabela 2.5 alguns valores para o atrito “ m ” sob determinadas condições de material, tipo de conformação e lubrificação.

Tabela 2.5 – Valores do coeficiente de atrito “ m ” para diferentes processos.

m	Processos aplicáveis
0,05 a 0,15	- Deformação a frio de ligas de aços, alumínio e cobre, utilizando lubrificantes a base de fosfato ou óleos.
0,2 a 0,4	- Deformação a quente de ligas de aços, alumínio e cobre, utilizando lubrificantes a base de grafite (água + grafite ou óleo + grafite).
0,1 a 0,3	- Deformação a quente de titânio e ligas de elevada temperatura, utilizando lubrificantes a base de vidro.
0,7 a 1,0	- Quando não é utilizado lubrificante, em laminação por cilindros de chapas ou tarugos, ou para extrusão de ligas de alumínio sem lubrificação.

Fonte: [adaptado de Kobayashi et al., 1989, p. 32].

Num processo de deformação o atrito não apresenta um comportamento constante, crescendo das bordas dos materiais em contato para o centro, por isso geralmente se adota um valor médio de atrito, já que também se considera uma tensão média para a deformação [Ribeiro, 1993]. Por sua vez, Helman e Cetlin, 1983, e Hentz et al., 2007, ressaltam que os fenômenos físicos envolvidos no atrito são complexos, sendo praticamente inviável a determinação do atrito real do processo, o que compromete a confiabilidade dos resultados de qualquer simulação. Nesse sentido, são necessários ensaios e testes que reproduzam as condições reais de trabalho visando à obtenção do valor verdadeiro de atrito.

No anexo A, são apresentados valores típicos do coeficiente de atrito coulombiano para diversos processos. Geier, 2007, ainda destaca a existência de outros coeficientes de atrito obtidos pelo Método Geral de Atrito de Wanheim e Bay, e pelo Método de Levanov, os quais são descritos em seu trabalho.

Para Dieter, 1981, e Lange, 1994, o material escoia preferencialmente na direção que apresenta a menor condição à fricção. Pois, considerando um processo de recalque, o fluxo de material se dá mais facilmente para a superfície livre mais próxima, já que esta representa a condição de menor atrito. Ou seja, o atrito influencia e pode ser influenciado por muitos fatores, entre eles: a pressão de contato, a velocidade de deslizamento, a interação dos materiais envolvidos, a temperatura, o tipo de lubrificação, etc. Sendo, a seguir, dado maior destaque às condições de lubrificação.

2.1.4.1 Lubrificação

Helman e Cetlin, 1983, p. 43, definem os lubrificantes como “materiais sólidos, líquidos ou gasosos, interpostos às superfícies dos corpos em contato, e que apresentam baixa resistência ao cisalhamento”. As principais funções de um lubrificante no processo de forjamento são: diminuir o atrito, facilitar movimento do fluxo de material, diminuir a força necessária para a conformação da peça, minimizar o desgaste das ferramentas, controlar a taxa de transferência de calor e o acabamento da peça, etc.

Lange, 1994, p. 11.47, exemplifica a influência dos lubrificantes no processo de forjamento ao citar resultados experimentais envolvendo o forjamento de um aço ao carbono em matriz fechada com temperatura de 930 e 1080°C. Os resultados demonstraram que após a lubrificação à base de grafite foi obtida uma redução aproximada de 0,12 no coeficiente de atrito, que era da ordem de 0,35 a 0,38.

A película de lubrificantes determina as condições de atrito presentes num sistema, podendo ser classificada em: lubrificação seca, lubrificação líquida (ou viscosa), lubrificação limite e situações intermediárias (ex.: semi-seca, semi-líquida, etc.), conforme as características de cada lubrificante [Helman e Cetlin, 1983]. Por sua vez, Zdilla e Poole, 2009, p. 12, afirmam que “a seleção e formulação de lubrificantes são freqüentemente tão únicas quanto a variação dos parâmetros de forjamento nas empresas que os utilizam”, mas que o custo dos lubrificantes situa-se em geral abaixo de 2% do custo do produto final, conforme indicado na figura 2.20.

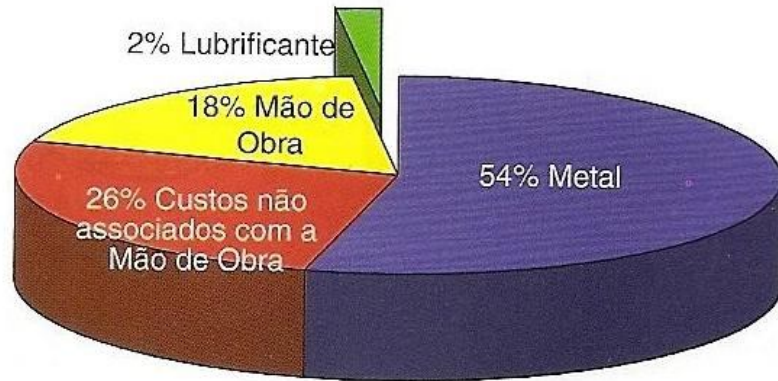


Figura 2.20 – Percentual de custos num processo de forjamento.
 Fonte: [Zdilla e Poole, 2009, p. 12].

Zdilla e Poole, 2009, p. 12, ainda afirmam que “os lubrificantes afetam 100% dos custos de produção, incluindo: quantidade de sucata, taxas de produção, vida útil das matrizes, manutenção, limpeza, otimização do tamanho das peças de trabalho e até mesmo custo com a moral dos operadores”. Nesse contexto, a tribologia tem direcionado suas pesquisas a cerca da adição de novos produtos aos lubrificantes tradicionais (grafite, óleos naturais, sintéticos, etc.), como: uso de ligantes e bio-polímeros, agentes de molhabilidade, incorporação de aditivos antidesgaste, modificadores das condições de atrito, etc. Isto, contribui para a melhoria do desempenho dos lubrificantes, além de reduzir seus índices de inflamabilidade, volume de fumaça gerado, e permitir maior solubilidade em água, reduzindo o impacto ambiental e custos com tratamentos de resíduos.

Tendo contextualizado os princípios da deformação plástica bem como os principais fatores que a influenciam, na seqüência será contextualizado o processo de forjamento (peculiaridades e considerações) visando, posteriormente, apresentar a metodologia de desenvolvimento integrado de produto para forjamento.

2.2 PROCESSO DE FORJAMENTO

Para Bresciani Filho et al, 1997, e Norton, 2004, a utilização do forjamento para a fabricação de peças se deve à melhoria das propriedades mecânicas obtidas pelo material em comparação a outros processos, como: usinagem, fundição, etc. No forjamento ocorre um rearranjo na disposição dos constituintes do material deformado, passando a ter uma orientação, além de permitir refinamento do grão, caldeamento das porosidades e vazios, dentre outras vantagens.

Santos et al., 2006, apud Pertence e Cetlin, 1998, e Hentz et al., 2007, destacam ainda que com o forjamento é possível obter produtos com propriedades mecânicas condizentes à sua aplicação, aliado à economia de material e a alta produtividade. Este processo, pode ser realizado em matriz livre ou em matriz fechada, a quente, a frio, a morno ou isotérmico, conforme a temperatura de processo, apresentando características distintas, já citadas no decorrer deste trabalho.

Durante o processo de forjamento a quente se faz necessário o aquecimento uniforme da matéria-prima em todo volume da peça ou numa parte específica desta. Para isso, são utilizados fornos com câmaras simples ou, até mesmo, fornos com controle específico de atmosfera e temperatura, além de dispositivos mais sofisticados conforme a qualidade requerida. Outra tecnologia de aquecimento utilizada pelas forjarias é o aquecimento por indução, onde a matéria-prima é aquecida através de bobinas elétricas que criam um campo indutivo ao redor da toda a peça ou em parte desta, causando seu aquecimento. Através desse método é possível obter uniformidade de aquecimento, além de redução de custos e tempo de processo, já que essa técnica pode ser realizada durante o transporte e/ou entre as etapas de corte e forjamento propriamente dito.

O forjamento em matriz livre é destinado para quantidade pequena de peças e/ou para peças com dimensões elevadas. O fluxo de material se dá livremente, sem restrição ao movimento, pois suas matrizes apresentam superfícies simples, em geral, planas. Este processo possui baixa precisão dimensional, sendo muito utilizado na preparação das geratrizes visando à obtenção de pré-formas para posterior processo de forjamento em matriz fechada.

No processo em matriz fechada, o ferramental possui formas mais complexas, se comparadas às matrizes do forjamento livre, retratando a geometria final da peça. É um processo com maior qualidade dimensional, já que o fluxo de material dentro da matriz tem seu movimento restringido e direcionado conforme o deslocamento do ferramental. Rodrigues e Martins, 2005, destacam que o processo em matriz fechada pode ser classificado em “forjamento convencional” – para obtenção de peças com dimensões e tolerâncias gerais de forjamento, ou “forjamento de precisão” – com tolerâncias menores que se assemelham às dimensões finais da peça, e que muitas vezes não apresentam rebarba e nem a necessidade de usinagem posterior.

Com relação ao direcionamento do material dentro da matriz, Grüning, 1973, e Lange, 1994, salientam a existência de três modos principais de escoamento: recalque (*upsetting*), alargamento (*spreading*) e ascensão (*rising*), conforme ilustrado na figura 2.21.

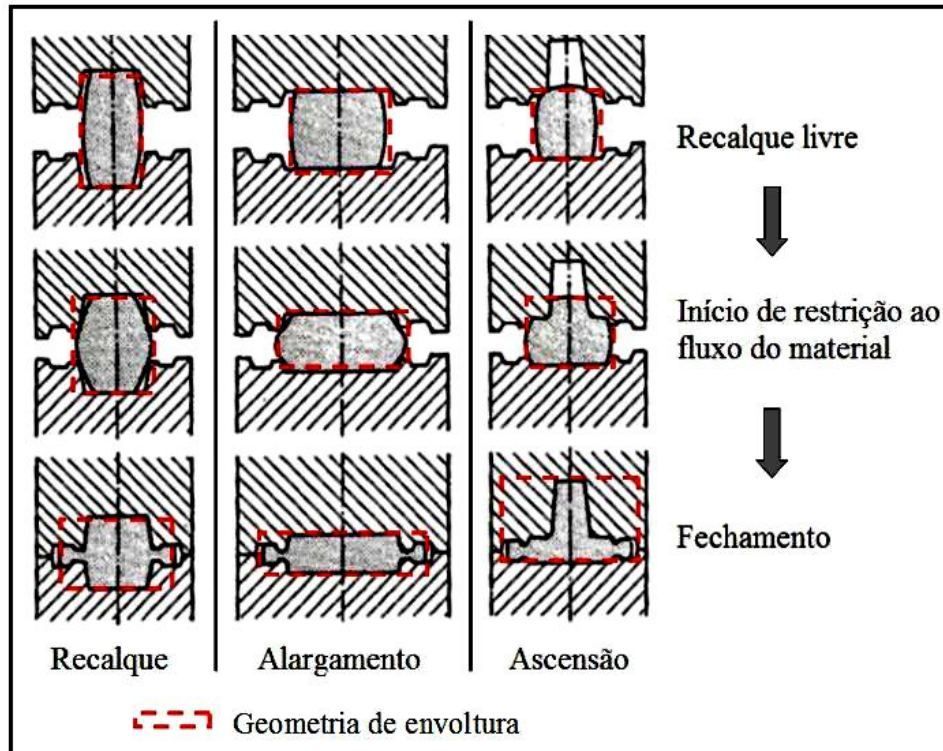


Figura 2.21 – Classificação do forjamento em matriz conforme o fluxo de material.
Fonte: [adaptado de Lange, 1994, p. 11.13].

No recalque a altura da peça é reduzida com escasso alargamento. O alargamento, por sua vez, apresenta fluxo de material fluindo predominantemente em direção perpendicular ao movimento das matrizes. Já na ascensão o fluxo de material se dá predominantemente no sentido contrário às matrizes e perpendicular à linha da rebarba. Essa classificação, conforme Lange, 1994, e Pacheco, 2007, pode ser obtida analiticamente comparando as deformações verdadeiras nas três direções básicas de uma geometria de envoltura, também representada na figura 2.21, e que se assemelha à forma geométrica básica da geratriz. Logo, e considerando uma geratriz cilíndrica, o processo pode ser definido através das relações apresentadas na equação (2.15), onde “ φ_{he} ” é a deformação verdadeira na altura da geometria de envoltura e “ φ_{de} ” é a deformação verdadeira no diâmetro dessa geometria.

$$\varphi_{he} < \varphi_{de} \Rightarrow \text{alargamento} \quad \varphi_{he} \cong \varphi_{de} \Rightarrow \text{recalque} \quad \varphi_{he} > \varphi_{de} \Rightarrow \text{ascensão} \quad (2.15)$$

Com relação aos defeitos oriundos de fabricação, Santos et al., 2006, apud Mendonça 1995, destacam que os defeitos mais comuns encontrados nos produtos forjados são as trincas de tração – formadas durante a expansão livre do material em decorrência de grandes deformações ou fragilidade a quente, as trincas de atrito – decorrentes da ineficiência da lubrificação, e as marcas da ferramenta – quando o material é comprimido contra a borda do punção.

Além desses, os forjados podem apresentar ainda: falha de preenchimento, empenamentos, distorções e desalinhamentos (resultantes de folgas no maquinário e dos processos de resfriamento e tratamentos térmicos sofrido pelo material), gotas frias e dobras (decorrentes de fluxos anormais, incrustações de rebarbas e/ou escolha equivocada da geratriz), inclusões de óxidos, queima e descarbonetação do material (decorrentes do aquecimento excessivo da matéria-prima antes e/ou durante o processo), etc. Logo, percebe-se que a maioria dos defeitos resulta do comportamento do material durante o processo e das condições de fabricação e projeto para um determinado produto.

As etapas típicas de fabricação num processo de forjamento são: corte, aquecimento, forjamento (livre ou em matriz fechada), rebarbação, tratamento térmico (recozimento, normalização, etc.) e tratamentos superficiais posteriores [Bresciani Filho et al., 1997]. Mas para evitar e/ou pelo menos minimizar os defeitos citados anteriormente, não basta apenas conhecer o ciclo do processo e os fatores que o influenciam mas, também, avaliar, definir e/ou modificar certos requisitos de projeto para um determinado produto forjado, integrando o conhecimento técnico à prática industrial. Na seqüência, serão apresentadas algumas considerações que devem nortear o projeto de forjamento para um produto.

2.3 PROJETO DE UM PRODUTO FORJADO

Geier, 2007, destaca que o projeto de fabricação de um produto por forjamento não é uma tarefa simples, já que requer testes e ajustes até se atingir uma condição satisfatória de produção. Para Santos et al., 2006, apud Mendonça, 1995, e Pacheco, 2007, o projeto de forjamento deve contemplar as seguintes etapas: a) desenho da peça a ser forjada (análise crítica); b) escolha da geratriz (matéria-prima, formato e dimensões); c) desenvolvimento de pré-formas (se for necessário); d) projeto e fabricação das matrizes (material, tipo de fixação, número e disposição das cavidades, número de etapas, etc.); e) escolha do equipamento; f) acabamento (rebarbação e tratamento térmico).

2.3.1 Desenho da peça

Com relação ao desenho de uma peça forjada, deve-se realizar uma análise crítica apontando: variações de geometrias e volumes, posição das linhas de partição, direção das linhas de fluxo do material, inclinação das faces, existência de raios pequenos e/ou cantos vivos, e previsão de sobre-metal. As linhas de fluxo do material devem ser definidas em conformidade

aos esforços que atuarão sobre a peça depois de pronta. Esse fluxo, de preferência, deve permitir que a peça alcance as melhores condições de resistência mecânica.

A linha de rebarba deve ser dimensionada e executada na região mais favorável para a confecção das matrizes superior e inferior e, em geral, naquela que apresentar maior perímetro com relação à área da seção média da peça. A escolha da linha de rebarba, ou partição, contribuiu para reduzir tempo e os custos com a usinagem, já que utilizando matrizes mais simples (com baixa complexidade de detalhes) o processo de fabricação se torna otimizado.

As faces da peça devem ter um ângulo que permita sua fácil retirada junto à cavidade da matriz, colaborando também com a lubrificação de toda sua superfície. Em geral, utilizam-se ângulos situados entre 3° e 9° , cuja escolha dependerá do tipo de maquinário, posição junto à seção da peça, e da altura das arestas que delimitam o perfil da peça [Grüning, 1973]. Além disso, algumas peças obtidas por forjamento necessitam de usinagem posterior, neste caso deve-se prever uma quantidade adequada de sobre-metal, em geral, a menor possível, mas sem comprometer a usinagem. Outros fatores que justificam a adoção do sobre-metal são: o empenamento e os desalinhamentos que as peças podem apresentar quando forjadas a quente, ou até mesmo a frio, decorrente da contração do material e das folgas existentes no ferramental, como já citado neste trabalho, e representado na figura 2.22.

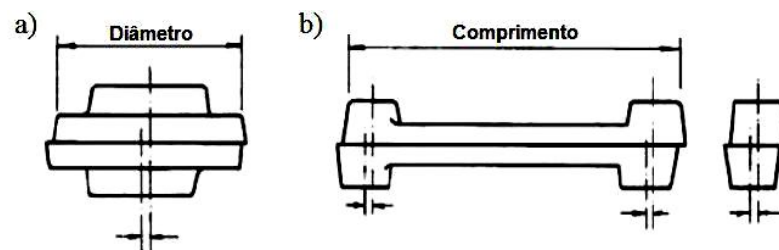


Figura 2.22 – Desalinhamentos em peças forjadas. a) Peça axissimétrica. b) Peça com simetria longitudinal.

Fonte: [Rossi, 1971a, p. 113].

Devem-se evitar grandes variações de geometrias e volumes das peças, já que isto, na maioria das vezes, resulta em maior número de etapas para o processo, desperdício de material junto à rebarba, pontos favoráveis à concentração de tensões e nucleação de trincas, principalmente na zona de intersecção das seções. A deformação de um material, durante o forjamento, está sujeita a estados de tensões complexos, conforme já descrito nesse trabalho, assim, volumes maiores de material apresentam maior dificuldade de movimentação dentro das matrizes, exigindo maior força para seu processamento. Portanto, a caracterização da complexidade de forma da peça é um fator importante no projeto de um produto forjado. Na figura 2.23 é apresentada uma classificação a partir da complexidade de forma, que aumenta

conforme indicado pela seta. As classes I (forma compacta) e II (forma de disco) apresentam simplicidade geométrica, e podem ser fabricadas numa única operação. A classe III (forma muito alongada) é composta por peças mais complexas, que na grande maioria das vezes necessitam operações intermediárias e pré-formas.

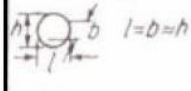


I	Classe quanto à forma I Formas compactas  Esférico e cúbico	Subgrupo	101 Sem elementos subsidiários	102 Elementos subsidiários unilaterais	103 Elementos subsidiários rotacionais ou radiais	104 Elementos subsidiários rotacionais e unilaterais	
		Classe quanto à forma II Forma de disco  Partes em contornos circulares, quadrados e similares Corte transversal com partes em balanço curtas, núcleo bruto de realce e formas alongadas (flanges, válvulas, etc.)	Subgrupo Grupo quanto à forma	Sem elementos subsidiários	Com ressalto	Com ressalto e furo	Com borda
II		21	211	212	213	214	215
		22		222	223	224	225
III	Classe quanto à forma III Formas muito alongadas  Grupos de partes com comprimento de eixo longitudinal pronunciado:	Subgrupo	Sem elementos subsidiários	Elementos subsidiários paralelos ao eixo da forma principal	Com elemento bifurcado aberto ou fechado	Com elementos subsidiários assimétricos ao eixo da forma principal	Com dois ou mais elementos subsidiários de tamanhos similares
		31	311	312	313	314	315
		32	321	322	323	324	325
		33	331	332	333	334	335

Figura 2.23 – Classificação quanto a complexidade de forma para o forjamento.
 Fonte: [adaptado de Dieter, 1981, p. 510].

2.3.2 Projeto e fabricação das matrizes

As matrizes são partes do ferramental que entram em contato direto com o material da peça, sendo constituídas de duas metades: a matriz inferior que é fixada junto à bigorna, e a matriz superior que fica presa junto ao cursor (martelo). As matrizes são submetidas a elevadas tensões de compressão (radial e axial), solicitações térmicas e choques mecânicos que podem deformá-las, comprometendo as dimensões e tolerâncias da peça [Grüning, 1973]. Por isso, essas condições devem ser previstas no projeto, no detalhamento e na fabricação desses dispositivos.

Para Chiaverini, 1986, e Grüning, 1973, os materiais destinados às matrizes apresentam uma série de requisitos, dentre eles destacam-se: tenacidade, resistência mecânica e ao desgaste, dureza a quente, usinabilidade e temperabilidade, limite de escoamento e alongamento elevado, tamanho de grão pequeno e considerável indeformabilidade. Os aços comumente utilizados para as matrizes, tanto de forjamento quanto extrusão ou fundição sob pressão, são designados pela ABNT, SAE e AISI com a letra “H” (ex.: H11, H12, H13 e H15), que consistem em aços ao cromo-molibdênio, possuindo baixo nível de carbono (entre 0,45 e 0,40%), baixo manganês (entre 0,25 e 0,30%), silício (entre 0,50 e 1,0%), cromo (aprox. 5,0%), molibdênio (entre 1,5 e 5,0%), e eventualmente vanádio (entre 0,4 a 1,0%) e tungstênio (em torno de 1,5%) [Chiaverini, 1986].

No forjamento livre, as matrizes não apresentam complexidade de formas e nem detalhes específicos, já que se busca a produção de lotes pequenos de peças que, em geral, possuem dimensões consideráveis. Nas matrizes fechadas, as cavidades são fabricadas através de processos tradicionais de usinagem (ex.: corte, furação, torneamento e fresamento), bem como, por processos mais elaborados (ex.: eletroerosão) devido à complexidade geométrica de algumas peças. Na figura 2.24 é ilustrada uma matriz inferior progressiva para forjamento, com cavidades destinadas a diferentes funções.

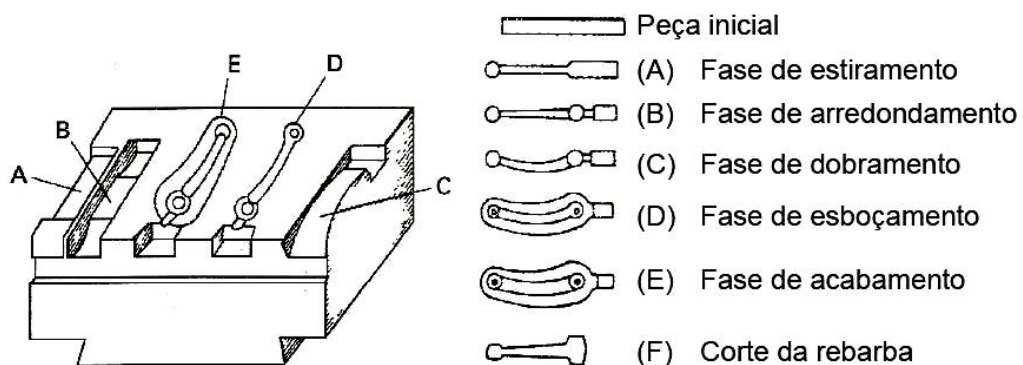


Figura 2.24 – Ilustração de uma matriz inferior progressiva.

Fonte: [adaptado de Rossi, 1971a, p. 137].

Outro fator a ser levado em consideração durante o projeto das matrizes é contração do material após o processo de forjamento. Nesse caso, deve-se executar a confecção das matrizes e de suas cavidades com a tolerância máxima da peça, bem como deve ser previsto sobre-metal para posterior usinagem, se necessário. Além disso, considerações a respeito da variação de geometrias e volumes, existência de raios e ângulos de extração, que já foram citados com relação ao desenho da peça, devem ser novamente verificados. Principalmente, com relação ao centro de aplicação da força, que deve ser dimensionado de tal maneira que coincida com o centro da máquina, evitando assim momentos fletores indesejáveis, e que podem comprometer a vida útil do ferramental.

Dieter, 1981, destaca que no projeto das matrizes deve ser previsto afunilamentos que permitam a remoção das peças acabadas, com ângulos de saída em torno de 5° para aços. Logo, ângulos agudos, almas finas, frisos ou arestas muito altas são de difícil confecção, além de prejudicar a remoção da peça. Grüning, 1973, e Lange, 1994, destacam ainda que a distância entre as cavidades e a borda das matrizes devem ser definidas conforme suas respectivas profundidades, adotando como referência a tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Dimensões mínimas das matrizes de forjamento.

	Profundidade da cavidade "h _c " [mm]	Espessura mínima de parede entre aresta exterior e a cavidade "a" [mm]	Espessura mínima de parede entre duas cavidades "a ₁ " [mm]	Altura mínima da matriz "H" [mm]
	6	12	10	100
	10	32	25	125
	25	40	32	160
	40	56	40	200
	63	80	56	250
	100	110	80	315
	125	130	100	355
	160	160	110	400

Fonte: [adaptado de Grüning, 1973, p. 58, e Lange 1994, p. 11.85].

Outro detalhe a ser considerado durante a fabricação das matrizes é a calha (ou bacia) da rebarba, pois conforme Lange, 1994, o projeto da calha da rebarba afeta as condições de tensão junto ao canal da rebarba e da própria cavidade da matriz. Dieter, 1981, salienta que é muito importante prever uma quantidade suficiente de material para preencher toda a cavidade da matriz. Mas essa previsão, muitas vezes, se torna difícil de mensuração, sendo necessária utilização de uma quantidade de material um pouco maior para compensar as perdas por oxidação, quando o trabalho é efetuado a quente. Portanto, dimensiona-se a chamada "rebarba de

forjamento”, que consiste no excesso de material em formato de tira, que escoo para fora da matriz em torno do perímetro da peça. Rebarbas muito estreitas exigem maior capacidade do maquinário, pois há aumento da resistência ao escoamento do metal no interior da matriz, logo seu adequado dimensionamento é um dos fatores que influenciam no processo.

Dieter, 1981, afirmar que “o segredo para o projeto da rebarba reside no ajuste de suas dimensões de maneira que o deslocamento do metal para a calha da rebarba seja mais difícil do que o preenchimento dos detalhes da matriz”, mas sem que isto eleve as cargas de forjamento, e comprometa a integridade das matrizes. Na figura 2.25 são ilustrados diferentes tipos de calhas para rebarba, e é apresentado o gráfico da força necessária durante o forjamento, onde se verifica a influência da rebarba.

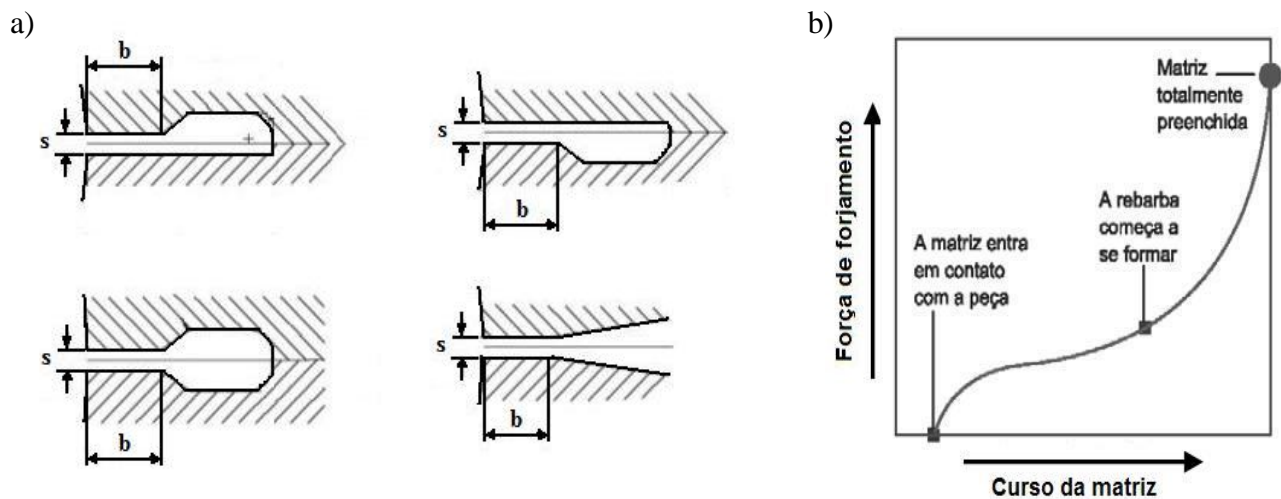


Figura 2.25 – a) Tipos de calhas de rebarba. b) Força típica de forjamento em matriz.
Fonte: [adaptado de Rossi, 1971a, p. 131; Dieter, 1981, p. 499].

Grüning, 1973, apresenta as possíveis dimensões para a rebarba a partir da tabela 2.7, sendo que quanto maior a largura “b” e menor a espessura “s” da rebarba maior será a resistência à deformação do material, bem como, grandes relações de “b/s” necessitam maiores esforços de conformação. Outros fatores que devem ser considerados são: os possíveis desalinhamentos das matrizes (conforme já citado no tópico anterior), e a definição das tolerâncias da peça, que devem ser previamente estabelecidas e em conformidade ao processo de fabricação e da qualidade requerida.

Tabela 2.7 – Valores orientativos para o dimensionamento da rebarba.

Área projetada da peça no plano da rebarba (sem incluir a rebarba) “A _p ” [mm ²]	Espessura da rebarba “s” [mm]	Relação de rebarba “b/s”		
		Recalque	Alargamento	Ascensão
até 1800	0,6	8	10	13
de 1800 até 4500	1,0	7	8	10
de 4500 até 11200	1,6	5	5,5	7
de 11200 até 28000	2,5	4	4,5	5,5
de 28000 até 71000	4	3	3,5	4
de 71000 até 180000	6,3	2	2,5	3
de 180000 até 450000	10	1	2	2,5

Fonte: [Grüning, 1973, p. 63].

Visando garantir a melhor produtividade, aliado a menor tolerância e desgaste das matrizes Pye, 2009, ressalta que a indústria do forjamento tem procurado e testado diversas técnicas metalúrgicas para o aumento da longevidade superficial do ferramental de forjamento. O método mais comumente utilizado é a nitretação, em decorrência da não necessidade de têmpera – que reduz os riscos de distorções nas matrizes com formas e secções complexas. Outro método que vem sendo muito utilizado para revestimento de matrizes é a deposição física de vapor (PVD), que necessita baixa temperatura e não requer transformações de fases na superfície da matriz, que é o caso da deposição química de vapor (CVD).

2.3.3 Escolha das geratrizes e pré-forma

Conforme já ilustrado, na figura 2.23, os componentes forjados podem assumir variadas formas e volumes. A escolha adequada da geratriz contribui para melhorar o fluxo de material, reduzindo possíveis defeitos (ex.: falha de preenchimento, irregularidade do fluxo, etc), além de evitar o desgaste excessivo da matriz e reduzir a força necessária ao forjamento.

A definição da geratriz para um produto forjado, em geral, está condicionada a complexidade da peça, sua forma geométrica básica, disponibilidade comercial e custo. Porém, escolha da geometria básica da geratriz segue algumas regras práticas que são:

1º) Analisar a geometria da peça, fazendo uma comparação desta com as geometrias básicas encontradas para produtos perfilados, trefilados e/ou laminados, como: círculo, polígono, quadrado, retângulo, etc.;

2º) Escolher aquela geometria que melhor se assemelha ao perfil da peça. Porém, deve-se dar preferência à geometria circular, já que essa possibilita condições de atrito e tensões menores no início da deformação, além de disponibilidade comercial em diferentes bitolas (diâmetros), o que facilita sua adequação ao processo. Posteriormente, podem ser utilizadas

geometrias poligonais (hexaédricas), quadradas, retangulares e aquelas confeccionadas através de chapas. Para peças de dimensões maiores são utilizados ainda lingotes ou tarugos;

3º) O volume da geratriz “ V_G ”, já tendo sido definida a geometria básica, deve ser no mínimo igual ao volume da peça “ V_P ” mais o volume da rebarba “ V_R ” e mais o volume decorrente das perdas por oxidação “ V_{Per} ”, quando o processo é efetuado a quente – que na média consiste em 5% do volume da peça com rebarba. Sendo assim, o volume da geratriz pode ser obtido através da equação (2.16), onde “ $p_{médio}$ ” é o perímetro médio entre a extremidade da rebarba e a face externa da peça;

$$V_G = V_P + V_R + V_{Per} = \frac{V_P + V_R}{0,95} = \frac{V_P + (b \cdot s \cdot p_{médio})}{0,95} \quad (2.16)$$

Em muitos casos a geometria da peça é tão complexa que mesmo adotando geratrizes semelhantes ocorrem defeitos que comprometem a qualidade do produto. Sendo assim, para suavizar a deformação do material entre as matrizes são confeccionadas as “pré-formas”.

A pré-forma pode ser definida como aquela geometria e/ou volume de material que antecede a etapa final de forjamento. Para um processo com apenas uma etapa a própria geratriz pode ser considerada a pré-forma deste processo. Brito et al., 2009, e Flach, 2007, destacam que as pré-formas podem ser fabricadas por processos como: recalçamento, estiramento, forjamento em rolo, dobramento e/ou junto à matriz principal, bastando para isso usinar cavidades que antecedem à cavidade final. O dimensionamento da pré-forma proporciona um fluxo uniforme de material na matriz, evitando choques entre o material que está sendo deformado e a matriz, possibilitando maior vida útil da ferramenta e melhor acabamento superficial do forjado. Outro fator que favorece a utilização de pré-formas é minimizar a força necessária à deformação, possibilitando a utilização de maquinário com menor capacidade. Rojas, 2003, ressalta em seu trabalho que a otimização de pré-formas e geratrizes consiste em definir a geometria inicial necessária para um componente, de maneira que após o forjamento obtenha-se o formato desejado da peça.

Rojas, 2003, cita ainda o caso clássico do forjamento de um cilindro, que após o processo assume o formato de barril, conforme ilustrado na figura 2.26 e já abordado neste trabalho. O mesmo autor lança um questionamento que, de certa forma, resume a importância da definição adequada das geratrizes e pré-formas: “Se for desejado que a peça final seja um cilindro, qual deverá ser o formato inicial da peça?”.

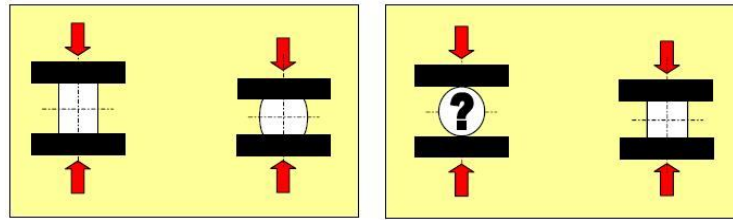


Figura 2.26 – Otimização de pré-forma no forjamento.
Fonte: [Rojas, 2003, p. 112].

Para o dimensionamento da pré-forma Pacheco, 2007, apresenta, como um dos métodos mais conhecidos, o “Método de *Drabing*” ou também chamado “Método das Áreas Projetadas”, conforme detalhado por Flach, 2007, apud Metals Handbook, 1988.

Esse método é descrito resumidamente a seguir, e ilustrado na figura 2.27:

1º) Desenhar a peça em duas vistas: uma delas deve ser o plano da rebarba e a outra perpendicular a este plano, em escala reduzida ou tamanho natural;

2º) Estimar a rebarba (largura e espessura) e desenhá-la junto às duas vistas;

3º) Traçar planos perpendiculares ao plano da rebarba, interseccionando a peça, pelo menos, em suas discontinuidades (quanto mais planos melhor);

4º) Calcular a área da seção “ $A_{seção}$ ” correspondente à intersecção de cada plano com as vistas da peça, lançando num gráfico de valores das áreas;

5º) A partir dos valores das áreas, e com a forma geométrica básica escolhida, deve-se definir a grandeza de referência, conforme tabela 2.8, lançando os valores num gráfico da pré-forma;

6º) A partir do gráfico da pré-forma, dimensiona-se a geratriz pelo maior valor obtido da grandeza de referência. Logicamente, deve-se considerar a disponibilidade comercial dessa grandeza, ou seja, sua bitola. Posteriormente, a pré-forma pode ser dimensionada através do gráfico da pré-forma, porém, neste caso, devem ser previstas operações que antecedem o forjamento propriamente dito, ou ainda, a confecção de matrizes progressivas. Vale destacar que a pré-forma ainda deve ter seu contorno suavizado, eliminando vértices acentuados. O uso de pré-formas é utilizada para geometrias complexas, que exijam um elevado grau de deformação e força excessiva ao processo de deformação, necessitando maior número de etapas.

A aplicação de softwares de desenho em 3D auxilia no desenvolvimento do Método de *Drabing*, já que os procedimentos 1 a 4 são facilmente obtidos com a utilização dessas ferramentas, além do modelamento das geratrizes e pré-formas para posterior simulação. O uso de planilhas eletrônicas também contribui para o cálculo de diferentes grandezas de referência, considerando as principais geometrias básicas fornecidas comercialmente.

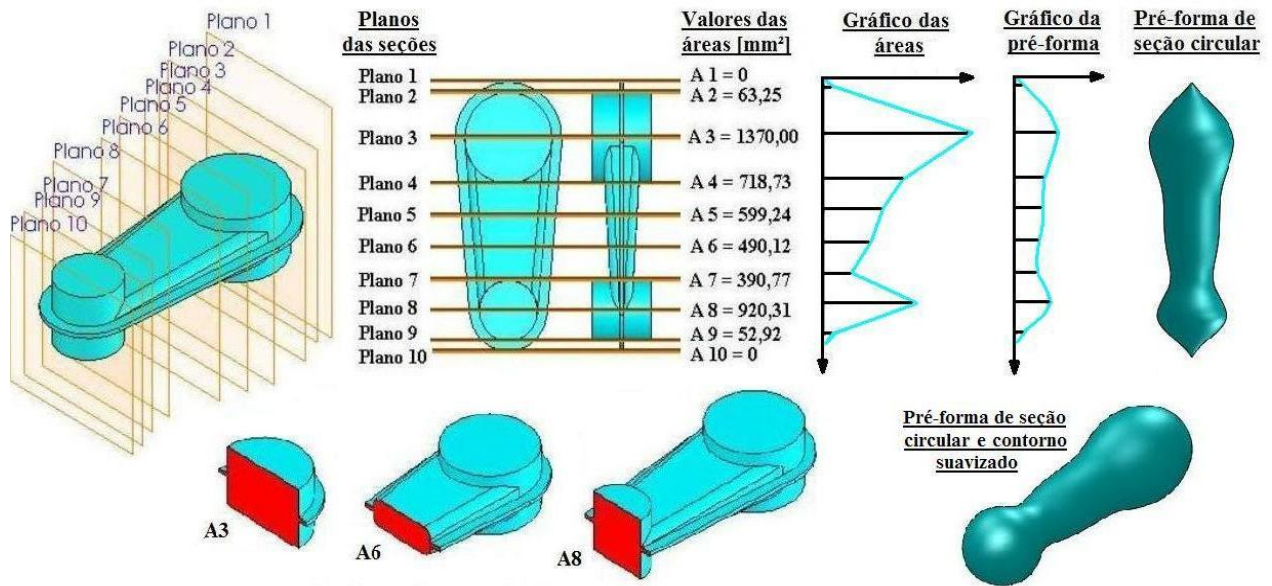
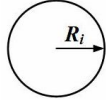
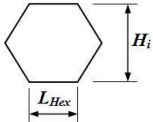
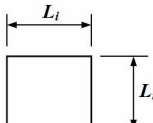
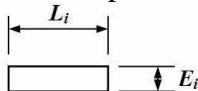


Figura 2.27 – Ilustração do Método de *Drabing*.

Tabela 2.8 – Grandezas de referência conforme a geometria básica.

Geometrias básicas	Área da seção “A _{seção} ”	Grandezas de referência
Circular 	$A_{seção} = \pi(R_i)^2$	$R_i = \sqrt{\frac{A_{seção}}{\pi}}$
Poligonal hexaédrica 	$A_{seção} = 2,5981(L_{Hex})^2$	$L_{Hex} = \sqrt{\frac{A_{seção}}{2,5981}} \therefore H_i = \frac{2}{3} \left(\frac{A_{seção}}{L_{Hex}} \right)$
Quadrada 	$A_{seção} = (L_i)^2$	$L_i = \sqrt{A_{seção}}$
Retangular ou em chapa 	$A_{seção} = E_i(L_i)$	$E_i = \sqrt{\frac{A_{seção}}{3}} \therefore L_i = \frac{A_{seção}}{E_i}$

(R_i = Raio da seção; L_i = Largura da seção; L_{Hex} = Lado do hexágono; H_i = Altura da seção; E_i = Espessura da seção)

Brito et al., 2009, ressaltam que no forjamento em matriz é freqüente a utilização de pré-formas, as quais têm impacto sobre a viabilidade técnica e/ou econômica do processo, já que o uso otimizado das pré-formas gera redução no custo da produção, em virtude da matéria-prima ser responsável por 30 a 50% do custo total unitário de um forjado. Logo, toda e qualquer redução na quantidade de material empregado no forjamento se reflete em economia para as empresas, conforme exemplificado na figura 2.28.



Figura 2.28 – Economia de material que pode ser obtida com o uso de pré-formas.

Fonte: [Brito et al., 2009, apud Erxleben e Suttan, 2007].

Flach, 2007, destaca em seu trabalho que devido à variação de forma e volume, que muitos produtos forjados apresentam, torna-se difícil o dimensionamento da geratriz inicial e das pré-formas, resultando num percentual de rebarba elevado, comprometendo os custos da produção e o poder de competitividade das empresas. O mesmo autor salienta ainda que 20% a 40% de todo o aço forjado em matriz aberta são transformados em rebarba, a qual deve ser removida da peça através de uma etapa denominada “rebarbação”.

Na rebarbação é realizado o corte por cisalhamento desse excesso de material, etapa que também pode estar inserida junto à cavidade final da peça ou ser realizada em outra operação, através de um maquinário de menor capacidade. Posteriormente, a peça é encaminhada para acabamento, execução de tratamento térmico, alívio de tensões ou tratamento superficial, conforme as especificações técnicas de fornecimento.

2.3.4 Escolha do maquinário

Para Dieter, 1981, existem duas classes de maquinário destinado ao forjamento: os martelos de queda – que realizam golpes sucessivos sobre a superfície do metal onde a energia de deformação resulta da queda de uma massa cadente, cuja energia cinética é transformada em energia de deformação, e as prensas – que podem ser hidráulicas ou mecânicas, e que submetem o material a uma força compressiva gradual. Na figura 2.29, são exemplificados alguns equipamentos utilizados no processo de forjamento.

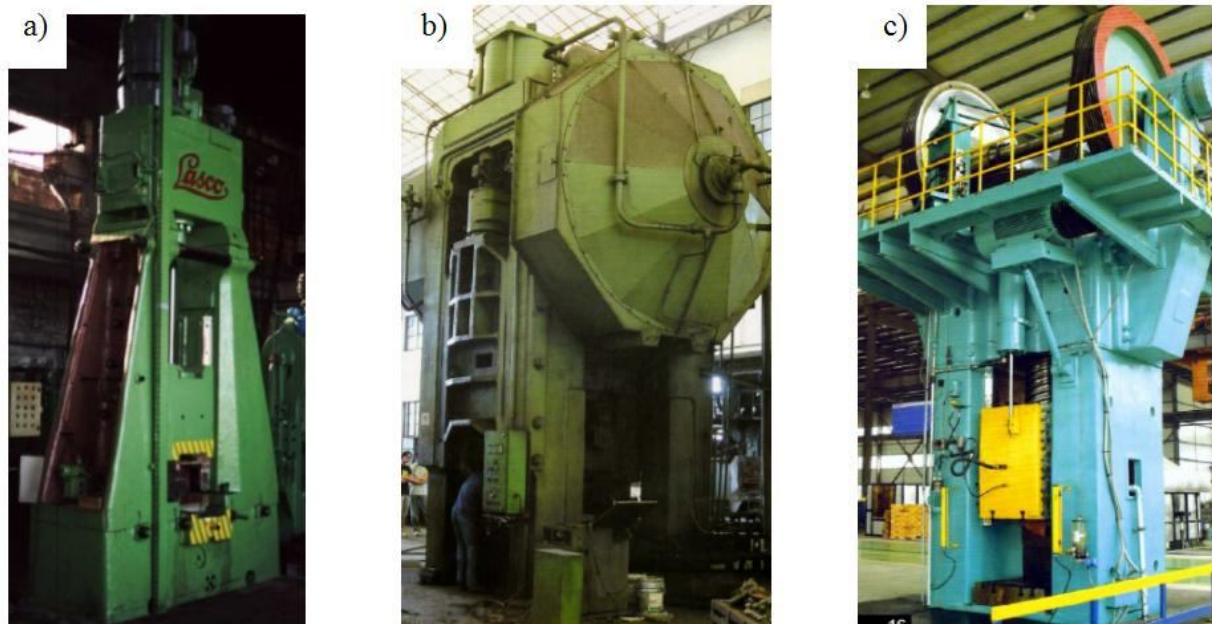


Figura 2.29 – Exemplos de maquinários utilizados no forjamento. a) Martelo de queda. b) Prensa excêntrica. c) Prensa de parafuso tipo fricção com disco duplo.
 Fonte: [Forjaço, 2009; Virtual Máquinas, 2009, p. 5 e 16].

Dieter, 1981, e Crout, 2009, destacam que a força máxima obtida por um martelo de queda se dá no instante em que a massa cadente toca o material, posteriormente, há diminuição desta força conforme a energia cinética é absorvida pela deformação do material. A movimentação dos martelos se dá em altas velocidades – apresentando elevada taxa de deformação, e sua potência pode ser fornecida por sistemas de gravidade, a vapor ou por ar comprimido.

Os componentes produzidos através do martelo de forjamento apresentam, em geral, grandes dimensões, produção de múltiplas partes numa única peça de trabalho (perfil progressivo). Os principais defeitos encontrados em peças forjadas por martelos são os desalinhamentos entre a parte superior e a inferior da matriz, cuja impressão se verifica na peça, e a produção de trincas internas no material, devido à elevada energia do processo. Para Dieter, 1981, a imprecisão dimensional dos martelos de forjar reside nas características de impacto inerentes a esse maquinário, ao contrário das prensas – que apresentam uma aplicação de carga crescente, favorecendo a vida útil das matrizes se comparadas àquelas utilizadas no martelamento.

As prensas comumente utilizadas no forjamento são: as prensas hidráulicas e mecânicas (por fricção ou excêntricas). Nessas prensas a força máxima é obtida no instante que há o preenchimento total da matriz considerando, inclusive, a rebarba. Para Bresciani Filho et al., 1997, as prensas hidráulicas são adequadas para a fabricação de grandes peças, aplicando uma pressão uniforme aliada à velocidade de deformação constante. Porém, e considerando um

forjamento convencional, a força das prensas hidráulicas se torna restrita devido à baixa taxa de deformação, isso se reflete no longo tempo associado à deformação e ao elevado tempo de contato do material aquecido com as matrizes mais frias [Kuhlman, 1988].

As prensas de fricção utilizam um sistema composto por embreagem, engrenagens e acionamento elétrico, que são empregados para acelerar um volante montado num sem-fim, que converte energia cinética angular em movimento linear. Nas prensas de fricção por discos duplos, o acionamento se efetua quando um desses discos (que giram continuamente) pressiona o volante.

As prensas mecânicas excêntricas são comumente utilizadas no processo de forjamento a quente de diversas ligas metálicas, e para a obtenção de peças de pequeno a médio porte. Além disso, essas máquinas apresentam facilidade de manuseio e baixo custo de operação, conforme destaca Bresciani Filho et al., 1997.

A precisão dimensional de um produto forjado está diretamente relacionada à rigidez do maquinário utilizado em sua fabricação. Por isso, o dimensionamento de um equipamento para forjamento deve contemplar uma força superior àquela requerida ao sistema, visando produzir peças de elevada precisão dimensional e isentas de falhas ou com número reduzido de defeitos [Dieter, 1981].

Mas não basta ter um maquinário em condições e com as melhores regulagens se o processo de forjamento é influenciado por outros parâmetros, já descritos neste trabalho. Sendo assim, e visando evitar investimentos exagerados em maquinário, devem-se analisar atentamente as possíveis alterações no processo e no projeto de um produto, objetivando resultados condizentes com a importância e à qualidade requerida da peça. Esta afirmação é facilmente constatada pois, ao utilizar o processo de trabalho a quente ao invés do processo a frio a deformação do material se torna mais fácil, em virtude do aumento da ductilidade do material e da diminuição da tensão de escoamento. Logo, torna-se possível a utilização de um maquinário com capacidade inferior do que aquele destinado ao forjamento a frio.

2.4 SIMULAÇÕES DO PROCESSO DE FORJAMENTO

Para reduzir a possibilidade de defeitos durante o processo de forjamento, bem como, otimizar seus parâmetros é necessário, ainda na etapa de projeto, prever de alguma maneira o comportamento dos materiais (peça e ferramental) e as condições do forjamento. Para isso são utilizadas técnicas de simulação, que tentam retratar as mesmas condições de processamento de um dado produto.

Lino et al., 2006, destacam que as tecnologias de fabricação assistida por computador – *Computer Aided Design* (CAD) e *Computer Aided Manufacturing* (CAM), da prototipagem rápida e da rápida fabricação de ferramentas possibilitam às empresas diminuir o tempo de lançamento (*time-to-market*) de um dado produto, tornando-as mais competitivas junto ao mercado consumidor. Nesse contexto, Santos et al., 2006, e Flach, 2007, ressaltam que as metodologias mais utilizadas em simulação de conformação, e que auxiliam no desenvolvimento de novos produtos e processos, são os experimentos reais (simulações físicas ou prototipagem) e as simulações numérico-computacionais.

2.4.1 Simulações físicas ou prototipagem

As simulações físicas ou prototipagem utilizadas em forjamento são aquelas simulações onde são elaborados modelos de geratrizes a partir de materiais “modelos” mais dúcteis (ex.: plasticina, cera, gesso calcinado, etc.), além da fabricação de modelos das matrizes através de resina, silicone, gesso calcinado, alumínio, etc. Esses materiais podem representar as dimensões reais da peça ou dimensões em escala reduzida, visando economia de material e tempo de fabricação.

Lino et al., 2006, destaca que a fabricação de protótipos através de moldes em silicone ou resina tem uma importância significativa nas etapas iniciais do desenvolvimento de novos produtos. Por serem mais maleáveis os moldes em silicone permitem ao projetista definir a linha de partição posteriormente, porém suas tolerâncias dimensionais são comprometidas.

Os moldes confeccionados em resina acrílica poliéster, em geral transparente, apresentam elevada rigidez principalmente após seu tempo de cura, necessitando prévia definição quanto à posição da linha de partição. Possibilitam maior precisão dimensional, além de favorecer a visualização do fluxo de material durante a simulação da deformação [Santos et al., 2006]. Outro material muito utilizado para a fabricação de moldes é o gesso calcinado que ao ser diluído em água se torna uma solução líquida que rapidamente se solidifica, apresentando fácil formabilidade e elevada precisão dimensional.

Deve-se ter cuidado com relação aos defeitos dos moldes em silicone, resina ou gesso, evitando o aparecimento de bolhas e/ou rachaduras durante a cura desses materiais, já que, posteriormente, serão utilizados materiais modelos (ex.: plasticina, cera, gesso e/ou outra resina) em suas simulações. Esses materiais modelos apresentam elevada ductilidade e formabilidade, e por isso tendem a entrar nos furos e/ou imperfeições impressas nos moldes.

Santos et al., 2006, esclarecem que além da plasticina (= massa de modelar) que é fabricada a partir de ceras micro-cristalinas, é possível utilizar uma mistura de vaselina filtrada no estado líquido e gesso em pó na proporção de 2,5:1, sendo utilizado como “lubrificante” talco ou farinha visando simulações com baixo coeficiente de atrito. Logicamente que com este tipo de simulação, que em geral é realizada manualmente, não é possível verificar e/ou prever parâmetros relativos à temperatura, força ou energia do processo, bem como, microestrutura e/ou qualquer propriedade do material. Sendo possível apenas avaliar o fluxo do material durante o processo, a formação de rebarba e/ou preenchimento da cavidade. Na figura 2.30 são apresentados alguns moldes e peças protótipos confeccionados para simulações físicas ou prototipagem.



Figura 2.30 – Moldes em resina e protótipos em cera, cerâmica e metálicos.
Fonte: [Lino et al., 2006, p. 4].

Além da utilização de resinas, silicone e gesso, é possível ainda confeccionar matrizes em escala reduzida. Ou seja, todos os componentes do sistema são fabricados em tamanhos menores do que aqueles que serão utilizados realmente na fabricação da peça. Para isso, é necessário reduzir na mesma proporção todas as grandezas (força, energia, calor, etc.) envolvidas no processo. Porém, muitas destas grandezas não seguem uma linearidade que permita uma conversão adequada, logo, deve-se garantir a possibilidade de execução deste processo não apenas em nível de usinagem e fabricação, mas sim sob o ponto de vista da conversão das grandezas físicas envolvidas.

2.4.2 Simulações numérico-computacionais

As simulações numérico-computacionais utilizam softwares dotados de algoritmos específicos para prever analiticamente as condições dos processos de deformação, inclusive o forjamento. Jarreta et al., 2008, apud Harrer et al., 2005, destaca a existência de modelos matemáticos que descrevem o processo de deformação e o desenvolvimento microestrutural para

um determinado material conformado. Isto possibilita a previsão do tamanho de grão e a otimização dos parâmetros de processamento desse material.

Para Santos et al., 2006, e Geier, 2007, os softwares de simulação via computador são grandes ferramentas para auxiliar no desenvolvimento dos produtos. Sendo que, para o forjamento, esses softwares são utilizados para seleção da máquina (a partir da força necessária), previsão de dobras e outros defeitos, análise do fluxo de material, previsão das tensões atuantes, definição das etapas e possíveis pré-formas ao processo, redução no tempo de processo, etc. Na figura 2.31 são representados dois tipos de resultados que podem ser obtidos através da utilização de softwares de simulação.

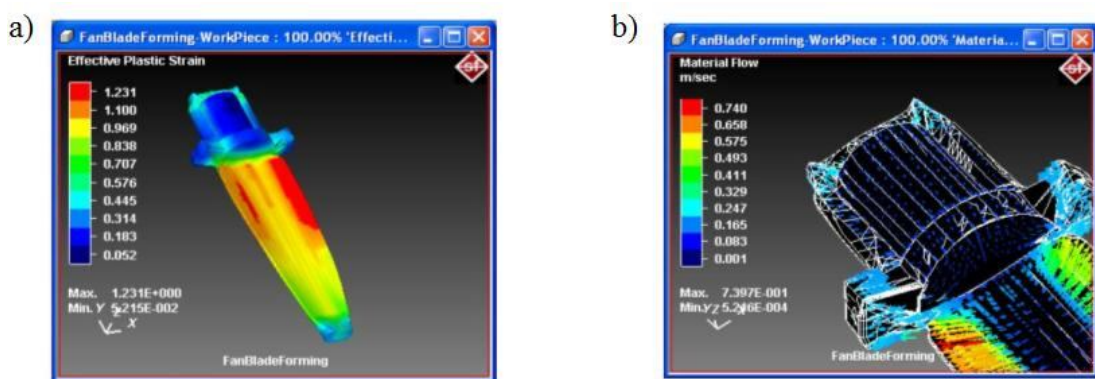


Figura 2.31 – Simulação de forjamento via software. a) Análise da deformação efetiva. b) Análise do fluxo de material.

Fonte: [Simufact, 2008, p. 12 e 13].

Em geral, os problemas de engenharia não possuem soluções analíticas simples, apresentando um nível de complexidade considerável para descrever o fenômeno físico e variações das grandezas envolvidas (ex.: escoamento do material, plasticidade, atrito, gradiente térmico, etc.). Por isso, são utilizadas as simulações computacionais, que realizam combinações gráficas através de métodos numéricos, resultando numa resposta que convergirá com o processo real se seus dados de entrada tiverem sido corretamente definidos. Sendo necessário, portanto, caracterizar com maior precisão os materiais e os parâmetros envolvidos [Santos et al., 2006; Geier, 2007; Jarreta et al., 2008; Hentz et al., 2007].

Brito et al, 2002, ressaltam que se devem lançar esforços no intuito de caracterização do produto (mecânica e metalúrgica) e do processo (maquinário, calor, atrito, etc.) a fim de ajustar cada vez mais os modelos numérico-computacionais às condições reais de fabricação. Lenhard Júnior, 2007, destaca ainda que a utilização de simulações numéricas para o forjamento requer o conhecimento de diversos dados de entrada, como os que estão expostos na figura 2.32.

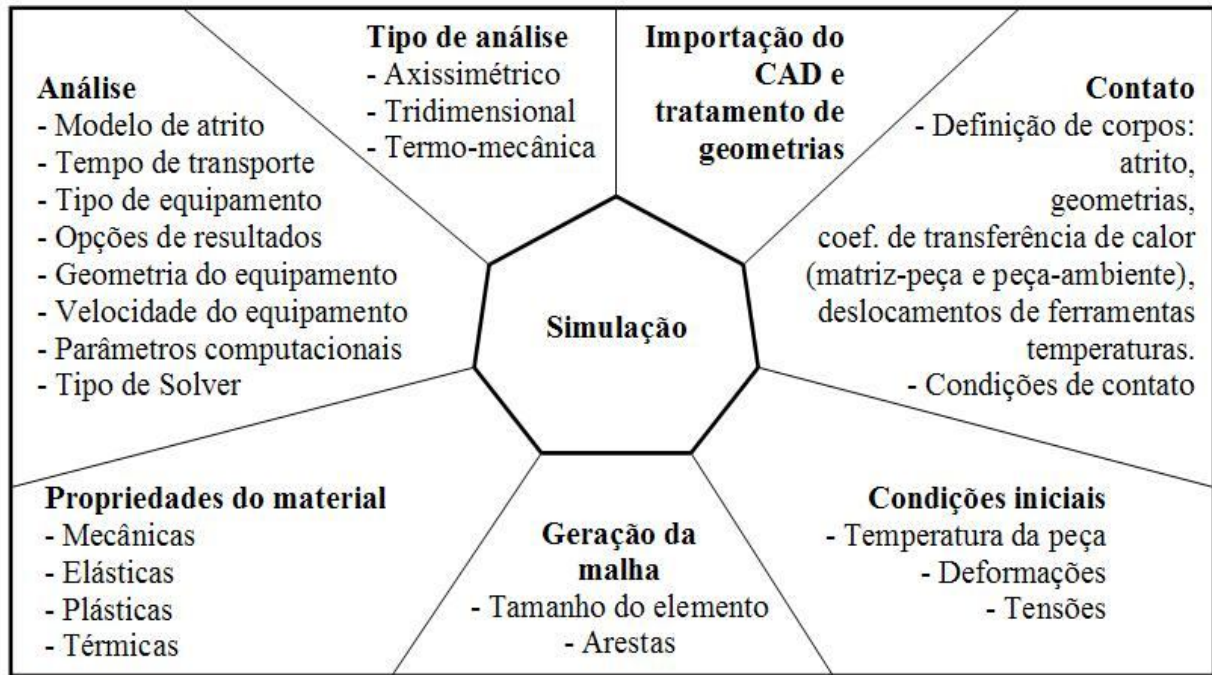


Figura 2.32 – Diagrama dos parâmetros utilizados nas simulações.

Fonte: [Lenhard Júnior, 2007, p. 50].

Vale ressaltar que a fim de simplificar os modelos e métodos de cálculo, muitas vezes se faz necessário assumir algumas hipóteses, já citadas neste trabalho, que envolvem o material, as ferramentas e as variáveis atuantes no processo, e que podem comprometer a exatidão dos resultados. As principais hipóteses adotadas em simulações, e que não condizem muitas vezes com a realidade, são: ferramental rígido (não sofre deformação durante o processo), material isotrópico, atrito constante, material incompressível e isotérmico, etc. [Santos et al. 2006].

Os softwares de simulação, em geral, baseiam-se em dois métodos numéricos de análise, que podem ser escolhidos conforme a capacidade de processamento e as características de cada processo, são eles: o Método dos Volumes Finitos (MVF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF). O MVF é destinado para obter uma versão discreta de uma equação diferencial parcial que representa o sistema a ser analisado. O desenvolvimento dessa metodologia se concentra no fluxo de uma determinada grandeza (ex.: massa e energia) que atravessa regiões (ou volumes adjacentes) de controle, obtendo a quantidade desta grandeza por unidade de tempo. Logo, esta técnica permite desenvolver as relações de conservação de massa e energia, resultando em interpretações físicas diretas, além de viabilizar sua aplicação em malhas com espaçamentos não-uniformes [Bortoli, 2000; Fortuna, 2000]. O MVF é utilizado em escoamento de fluidos e simulações termo-mecânicas, que envolvem gradiente de temperatura através de volumes discretos. Este tipo de análise é mais rápido do que aquela realizada por MEF, exigindo menor capacidade de processamento para a mesma situação.

Kobayashi et al., 1989, destacam que o MEF surgiu na década de 60, quando foram utilizados computadores na análise estrutural. A partir da última década ocorreu uma grande evolução nos sistemas de simulação numérica dos processos de deformação plástica, especialmente, aqueles que utilizam o MEF para análises bidimensionais ou tridimensionais, com destaque para as análises de transferência de calor, taxa de deformação, propriedades dos materiais, etc.

Para Kobayashi et al., 1989, e Assan, 2003, o MEF surgiu como uma possibilidade para resolver problemas da teoria da elasticidade, prevendo a divisão de um meio contínuo em um número finito de pequenas regiões. Estas divisões são chamadas de elementos finitos, já que tornam um elemento contínuo em discreto, e formam uma rede – que cuja malha pode ser aumentada ou diminuída dependendo do tamanho do elemento escolhido para representá-la. Os pontos de interseção da rede são chamados de nós, e buscam-se, neste método, as funções que satisfaçam o domínio de cada elemento.

Geier, 2007, ressalta que devido à mudança de forma envolvida no processo de forjamento há grande distorção na malha através do MEF, sendo essa modificada por outra, no que vem a ser chamado de “remalhamento”, conforme ilustrado na figura 2.33. Esse processo permite a continuidade da simulação, facilitando o processamento e a obtenção dos resultados.

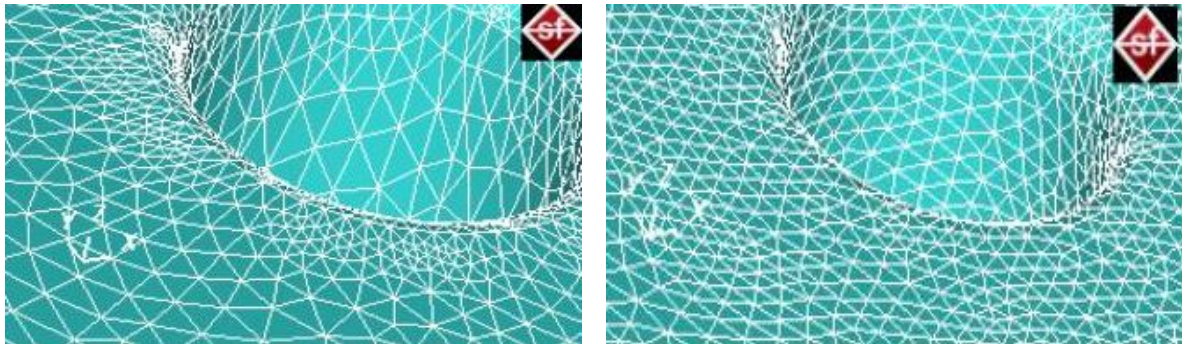


Figura 2.33 – Processo de remalhamento utilizado no MEF.

Fonte: [Simufact, 2008, p. 51].

Hentz et al., 2007, destacam que na conformação mecânica o uso de simulação via MEF possibilita analisar a distribuição da deformação, tensões na ferramenta, efeito das velocidades de deformação, gradientes de temperatura, preenchimento da matriz, entre outros fatores.

3. MÉTODOS E PROCEDIMENTOS

Em conformidade aos objetivos deste trabalho, e já tendo contextualizado os princípios que regem a deformação plástica, bem como, os parâmetros envolvidos no projeto e no processo de produtos forjados, na seqüência, será explicitada a metodologia proposta visando o desenvolvimento integrado de produto para forjamento. Posteriormente, essa metodologia será aplicada na melhoria de um produto já existente (utilizado em elevadores), visando redução na quantidade de rebarba (desperdício), mensuração da força e energia necessária ao forjamento, sendo possível, então, consolidar e/ou sugerir modificações para a metodologia utilizada.

3.1 METODOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DE PRODUTO PARA FORJAMENTO

A metodologia apresentada neste trabalho se baseia nos trabalhos de Pahl et al., 2005, e Alvarenga, 2006, onde é realizado um apanhado das principais metodologias para o desenvolvimento eficaz de projetos, aplicáveis ao meio industrial. Porém, nenhuma direcionada ao desenvolvimento integrado de um componente obtido por forjamento.

Nesse sentido, o presente trabalho apresenta uma metodologia proposta cujo desenvolvimento de produtos forjados não se restrinja apenas às técnicas de “tentativa e erro” e “empirismo” comumente utilizadas no forjamento, mas sim que se possua uma interação efetiva entre os conhecimentos práticos e científicos desse processo, bem como, dos recursos disponíveis, buscando a melhoria contínua da qualidade e produtividade.

Todo o processo para ser executável e, principalmente, confiável deve ser plenamente planejado e controlado. Ou seja, num processo de forjamento, considerações e definições sobre o ferramental, material, produto, fatores de influência, bem como, dos objetivos das empresas tornam-se necessários para antever possíveis situações que comprometam a qualidade do produto, a integridade do processo e a lucratividade das empresas.

Sendo assim, a metodologia apresentada na figura 3.1 projeta o desenvolvimento integrado de produto para forjamento a partir de cinco fases: Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar, Projeto Detalhado e o Controle da Qualidade e Produção. Estas etapas têm início nas necessidades e desejos dos clientes, e sofrem constante influência dos parâmetros envolvidos no produto, processo, e pelas metas e objetivos das forjarias.

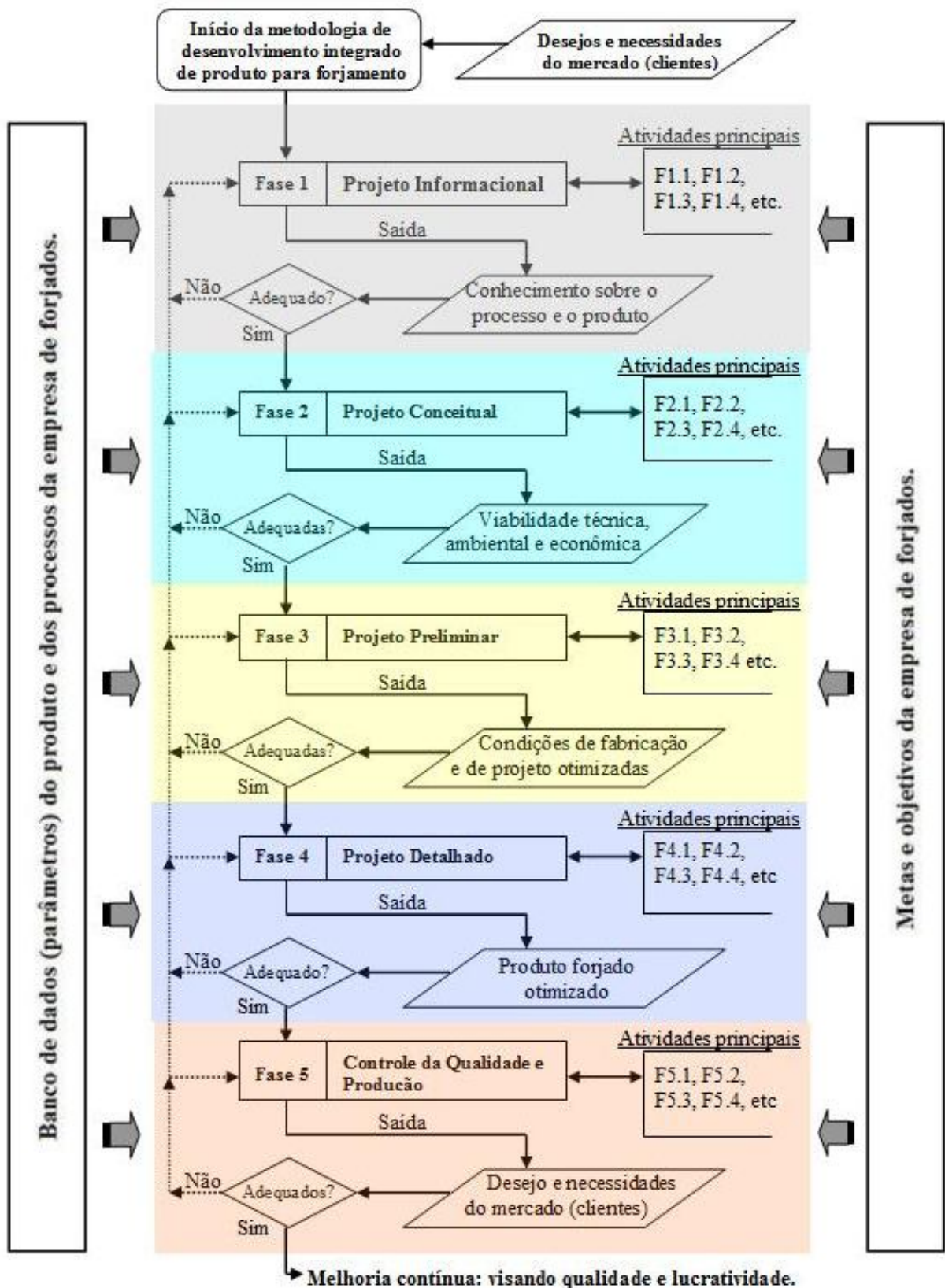


Figura 3.1 – Metodologia para o desenvolvimento integrado de produto para forjamento.

Na tabela 3.1 são listadas as atividades principais previstas em cada fase da metodologia para o desenvolvimento integrado de produto para forjamento.

Tabela 3.1 – Atividades principais do desenvolvimento integrado de produto para forjamento.

Fases	Atividades	Descrição
1- Projeto Informacional	F1.1	- Conhecer o processo de forjamento (conceitos e características);
	F1.2	- Conhecer o produto (características, funções, qualidade requerida, etc) bem como seu material;
	F1.3	- Conhecer o maquinário e as condições de fabricação disponíveis (capacidade do parque fabril);
	F1.4	- Verificar o nível de conhecimento sobre o projeto (processo, produto e material);
2- Projeto Conceitual	F2.1	- Idealizar possíveis processos, ferramental, etapas de fabricação para o produto e matéria-prima;
	F2.2	- Prever possíveis parâmetros de influência (físicos, mecânicos, ambientais, etc.) e controles necessários à fabricação;
	F2.3	- Verificar e sugerir possíveis mudanças/melhorias no produto, visando facilitar o processo e garantir sua viabilidade;
	F2.4	- Verificar a viabilidade técnica, ambiental e econômica;
3- Projeto Preliminar	F3.1	- Detalhamento primário do processo (<i>layout</i> de produção), com a definição do ferramental e parâmetros de processo;
	F3.2	- Definir geratrizes e/ou possíveis pré-formas, através da aplicação de metodologias adequadas (ex: Método de <i>Drabing</i>);
	F3.3	- Realizar simulações físicas, numérico-computacionais, e/ou em escala reduzida, visando obter o melhor desempenho do processo e a qualidade requerida;
	F3.4	- Verificar as condições otimizadas de fabricação e de projeto;
4- Projeto Detalhado	F4.1	- Detalhamento do processo e do produto otimizado;
	F4.2	- Fabricação do ferramental definitivo e confecção de lote-piloto;
	F4.3	- Realização dos testes e ensaios das peças-piloto;
	F4.4	- Verificar a adequação do produto forjado otimizado;
5- Controle da Qualidade e Produção	F5.1	- Avaliar constantemente a qualidade do produto forjado (dimensional, propriedades mecânicas, etc.);
	F5.2	- Avaliar periodicamente o ferramental utilizado (manutenção preventiva, preditiva ou, se necessário, corretiva);
	F5.3	- Avaliar a produtividade do processo (custo <i>versus</i> benefício), bem como, os resíduos gerados na sua produção reduzindo-os;
	F5.4	- Verificar o atendimento das necessidades do cliente e superá-las, visando manter a melhoria contínua do processo.

Primeiramente, é necessário ressaltar que o termo “desenvolvimento” não se limita apenas à fase de concepção ou criação de um produto e/ou processo, e sim deve abranger as demais etapas de fabricação, garantindo versatilidade, produtividade e melhoria contínua ao processo, neste caso, de forjamento.

Na fase 1 – Projeto Informacional, o objetivo principal no desenvolvimento integrado de produto para forjamento é conhecer o processo de forjamento e as características do produto que se deseja trabalhar, verificando seus princípios e peculiaridades. Nessa etapa é importante trocar informações com o cliente, visando conhecer plenamente o produto que está sendo desenvolvido bem como seu material. Além disso, o conhecimento e o domínio do

processo de forjamento, e das condições e limitações de operação do maquinário contribuem para elevar a confiabilidade sobre as decisões que serão tomadas nas demais fases.

Na fase 2 – Projeto Conceitual, deseja-se a elaboração de alternativas e possibilidades para o processo de forjamento, abordando temas sobre o ferramental e o produto, além de prever possíveis parâmetros e controles necessários à fabricação. Sugestões e modificações a respeito da peça também se fazem necessárias. Nesse sentido, o contato realizado anteriormente com o cliente e a troca de informações se torna fundamental, já que permite o desenvolvimento de um produto e/ou processo adequado tanto tecnicamente quanto economicamente, conforme os parâmetros de influência. Outra questão que deve ser abordada nesta fase é a geração de resíduos. Atualmente, questões ambientais são de grande relevância não apenas por exigência de normas ou leis, mas porque a maioria das empresas (que compram produtos forjados) está envolvida em projetos de sustentabilidade, alicerçados por programas de ISO 14001, coleta seletiva, controle de resíduos, etc. Logo, toda a forjaria que deseja se manter no mercado deve verificar a viabilidade ambiental do processo, prevendo, minimizando ou eliminando possíveis resíduos e impactos ambientais indesejáveis.

A fase 3 – Projeto Preliminar, deve focar o detalhamento primário do processo, ou seja, a definição daquela rota de fabricação que melhor resultado fornece a partir das condições técnicas, econômicas e ambientais previstas. Nessa etapa definições sobre: ferramental, parâmetros do processo, material (produto), geratriz e possíveis pré-formas de forjamento se tornam essenciais para posterior simulação do processo. Nas simulações, tanto físicas, numérico-computacionais e/ou em escala reduzida, deve-se ter preocupação em adotar parâmetros condizentes à realidade do processo, visando à obtenção de resultados adequados e que retratem as condições de fabricação. O processo de simulação, como já destacado neste trabalho, permite analisar diferentes panoramas e configurações de fabricação, sendo uma ferramenta essencial para a otimização do processo de forjamento.

A fase 4 – Projeto Detalhado, é aquela etapa posterior aos resultados das simulações, e da definição das condições otimizadas de fabricação e projeto. Nessa etapa são realizadas a confecção do ferramental definitivo e a fabricação do lote-piloto. Posteriormente, testes e ensaios físicos com as peças-piloto devem ser efetuados, visando comprovar o atendimento das exigências técnicas requeridas ao produto.

A fase 5 – Controle de Qualidade e Produção, ocorre depois de constatada a otimização do produto forjado, e marca o início da produção seriada da peça. Nessa etapa recursos como Controle Estatístico da Qualidade (CEQ), Controle Estatístico do Processo (CEP), Análise do Tipo e Efeito de Falha (FMEA), Análise da Árvore de Falha (FTA) e outras

ferramentas de controle do processo podem e devem ser utilizadas constantemente, visando a manutenção e evolução da qualidade de todo o sistema.

A influência dos parâmetros do produto e do processo, bem como, das metas e objetivos das forjarias também estão presentes na metodologia proposta. Esses fatores devem nortear todo o desenvolvimento, e por consequência estarem envolvidos em todas as suas fases, as quais devem permitir a “retro-alimentação” por etapas posteriores. Sendo, só assim, efetivada a integração idealizada por esta metodologia.

É importante destacar que, mesmo tendo sido alcançados todos os desejos e necessidades do mercado (clientes), o desenvolvimento integrado do produto deve ainda almejar alternativas e soluções que garantam às empresas aumento de qualidade e lucratividade. A economia globalizada não permite a estaticidade dos processos e das empresas, ao contrário, exige constante desenvolvimento e aprimoramento. Portanto, as expectativas dos clientes e das próprias forjarias devem ser superadas e não apenas alcançadas.

3.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Visando aplicar a metodologia para o desenvolvimento integrado de produto para forjamento, primeiramente, fez-se a escolha de um produto forjado que tivesse problemas de fabricação e/ou de projeto, como: excesso de rebarba, falha de preenchimento, exigência de força excessiva ao forjamento, etc. Porém, vale ressaltar que na aplicação dessa metodologia não foi possível efetuar as fases 4 e 5 (Projeto Detalhado e Controle da Qualidade e Produção, respectivamente) devido ao elevado investimento e indisponibilidade de recursos necessários para efetuar estas fases.

Sendo assim, na seqüência será exemplificada a adoção da metodologia proposta, restringindo-se às fases de Projeto Informacional, Conceitual e Preliminar, destacando as considerações realizadas em cada fase, e as simulações desenvolvidas para a otimização de um produto real, destinado a elevadores. Posteriormente, serão apresentados e discutidos os resultados dessas simulações e a adoção da metodologia apresentada neste trabalho.

3.2.1 Fases 1 e 2 – Projeto Informacional e Conceitual

O produto escolhido, conforme a figura 3.2, consiste num componente utilizado em guias de elevadores, denominado “grampo de 3/8”, que é forjado a quente em prensa mecânica de fricção, apresentando produção elevada (em torno de 4.500 peças/mês). No apêndice A é

apresentado o desenho do grampo de 3/8", com suas respectivas cotas e tolerâncias de projeto. Porém, como se verifica na figura 3.2, esse componente apresenta, durante sua fabricação, excesso de rebarba junto às arestas laterais e um comprometimento dessa junto a seus vértices (cantos).

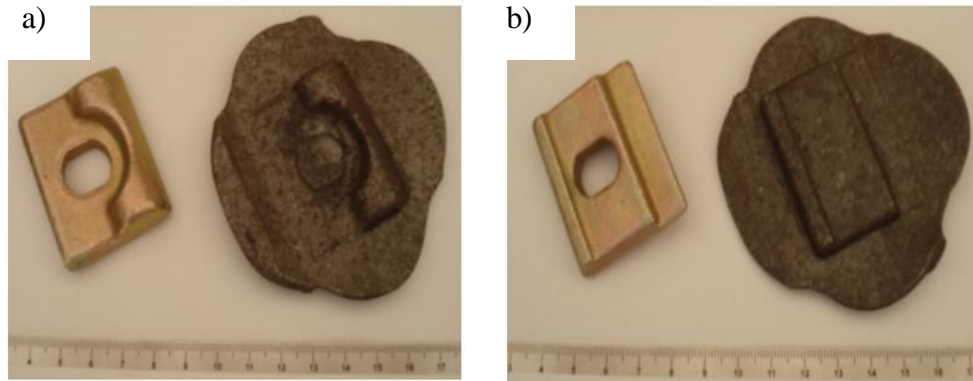


Figura 3.2 – Grampo de 3/8" acabado e com rebarba. a) Vista superior. b) Vista inferior.

Essa não uniformidade na largura da rebarba, que caracteriza a não homogeneidade do fluxo do material se deve, em geral, pela adoção de uma geratriz e/ou pré-forma inadequadas, além de outros possíveis parâmetros influentes, como: complexidade de forma, velocidade de forjamento, posicionamento inadequado do material junto à cavidade da matriz, etc. Logo, e devido à elevada produção desse componente, toda e qualquer otimização no consumo de matéria-prima, principalmente com relação ao dimensionamento correto da geratriz e/ou pré-forma, significaria uma economia para a forjaria. Logo, esta melhoria favorece a redução dos custos de produção e, conseqüente, gera aumento de lucratividade.

A função do grampo de 3/8", junto às guias do elevador, é garantir a fixação destas à alvenaria de um prédio ou de outra estrutura de sustentação, além de ser utilizado para fixar qualquer objeto/dispositivo junto às guias do elevador, conforme indicado na figura 3.3.



Figura 3.3 – Aplicações do grampo de 3/8".

O material utilizado na fabricação do grampo de 3/8” é o aço ABNT/SAE/AISI 1020, que consiste num aço baixo carbono, e cujas características são: baixa temperabilidade e usinabilidade, e excelente forjabilidade e soldabilidade, sendo destinado à construção mecânica em indústrias automobilísticas e de forjados [Gerdau, 2009a]. Na tabela 3.2 é apresentada a composição química desse aço.

Tabela 3.2 – Composição química do aço ABNT/SAE/AISI 1020 em % de massa.

	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Sn
Mínimo	0,18	0,30	0,10	-	-	-	-	-	-
Máximo	0,23	0,60	0,20	0,030	0,050	0,20	0,15	0,15	0,060

Fonte: [SAE J403, 2001; Gerdau, 2009a].

Na tabela 3.3 são apresentadas, a partir de diferentes referências, as propriedades mecânicas, à temperatura ambiente, do aço ABNT/SAE/AISI 1020 laminado a quente. Vale ressaltar que, conforme Chiaverini, 1986, as faixas de valores obtidas se devem a variação dos tratamentos térmicos (normalização, recozimento, etc.) que este material pode ser submetido.

Tabela 3.3 – Propriedades mecânicas aço ABNT/SAE/AISI 1020 em condições de temperatura ambiente.

	[Chiaverini, 1986]	[Norton, 2004]	[Gerdau, 2009a]
Resistência à tração “ σ_B ” [MPa]	420 a 490	379 a 469	450
Limite de escoamento “ σ_e ” [MPa]	–	207 a 393	330
Alongamento [%]	35 a 40	15 a 25	36
Redução de área [%]	–	–	59
Dureza [HB]	125 a 150	111 a 131	143
Impacto [J]	83 a 110	–	87

Fonte: [adaptado de Chiaverini, 1986, p. 121; Norton, 2004, p. 850, Gerdau, 2009a].

Visando ampliar o conhecimento e o entendimento do processo de fabricação do grampo de 3/8”, foram realizadas seis visitas técnicas à forjaria responsável por sua fabricação. Estas visitas ocorreram no período entre 2008 e 2009, sendo elaborado um levantamento detalhado sobre as condições de fabricação, maquinário e os parâmetros envolvidos, objetivando: análise completa do processo, busca de possíveis alternativas, além de parâmetros para as simulações. Na figura 3.4 é apresentada a seqüência de fabricação do referido grampo, com todas as suas etapas, que são descritas detalhadamente através da tabela 3.4, sendo todas as informações obtidos junto á forjaria que fabrica este componente.

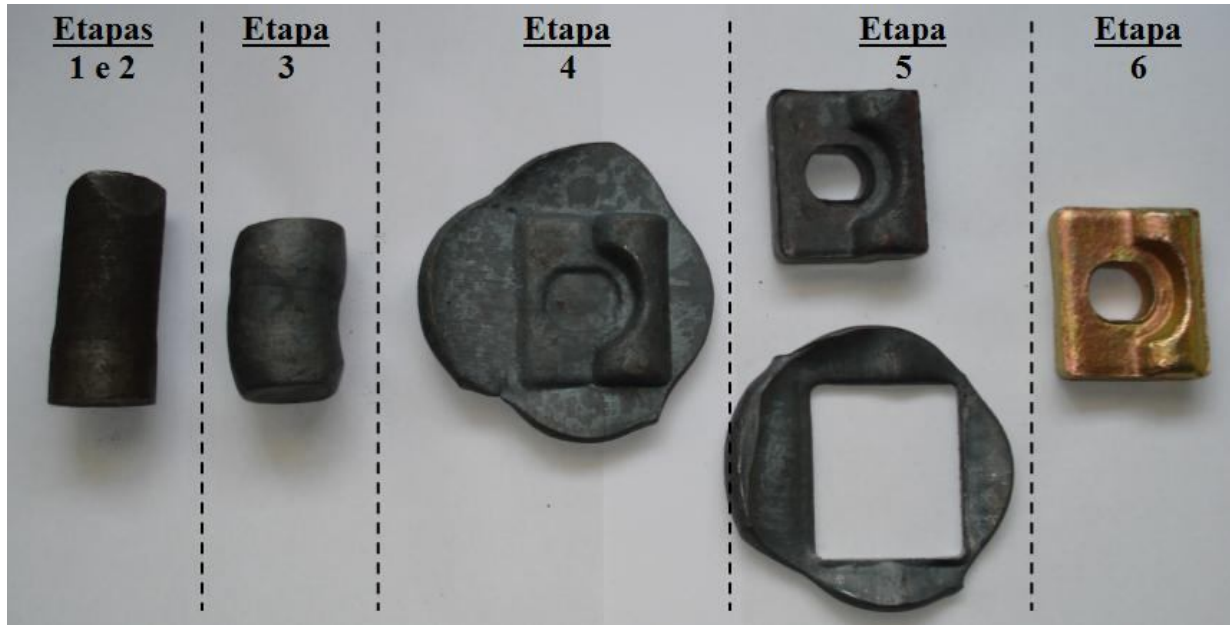


Figura 3.4 – Etapas envolvidas na fabricação do grampo de 3/8”.

Tabela 3.4 – Etapas de fabricação do grampo de 3/8” na forjaria.

Etapas	Descrição detalhada da etapa (procedimentos)
1- Corte	- A geratriz utilizada para confecção do grampo de 3/8” é cortada numa prensa de fricção, a partir de uma barra redonda trefilada com Ø22,22x52mm.
2- Aquecimento	- O aquecimento da geratriz é realizado num forno aberto (sem atmosfera controlada) a $1100 \pm 100^{\circ}\text{C}$ medido através de termopares, onde o material permanece um tempo mínimo de 15min, para homogeneizar sua temperatura.
3- Recalque	- Visando retirar a camada de óxidos, em virtude do aquecimento em forno aberto, é realizado o recalque da peça entre matrizes planas numa prensa excêntrica de baixa capacidade (= 8t), onde sua altura é reduzida de 52mm para 43mm. - O tempo total deste processo é de aproximadamente 15s, o que acarreta uma redução de temperatura na peça, devido às trocas térmicas, não superior a 30°C constatado através de termopares. Ou seja, a peça passa a apresentar uma temperatura de aproximadamente 1070°C no início do forjamento propriamente dito.
4- Forjamento	- Antes da peça ser colocada na matriz principal é realizada a lubrificação desta com uma solução de óleo diesel + grafite (da ordem de 4L:300mL). - O material é forjado numa prensa mecânica de fricção, com capacidade para 250t, num único golpe, e em apenas uma cavidade de maneira intercalada, já que a matriz apresenta três cavidades. - As matrizes (superior e inferior) são fabricadas em aço H13, temperadas e revenidas, sem revestimento superficial, e montadas a 350mm de distância entre a matriz superior e inferior, apresentando curso de operação igual a 347mm. Ou seja, a espessura da rebarba é de 3mm. As matrizes são pré-aquecidas até 150°C . - A inclinação das faces das cavidades é aproximadamente 5° , não apresentando raios inferiores à 1mm. - Nessa operação não é realizado o furo central, sendo apenas confeccionado um rebaixo (projeção do furo) na peça, em torno de 1,5mm de profundidade.

5- Rebarbação	<ul style="list-style-type: none"> - Após o forjamento, o grampo de 3/8" sofre o processo de rebarbação e furação, que lhe confere as dimensões definitivas conforme projeto. - Nessa etapa são utilizadas: uma prensa excêntrica de 8t e matrizes de cisalhamento construídas em aço H13.
6- Acabamento, e inspeção final	<ul style="list-style-type: none"> - Após o resfriamento lento ao ar, as peças sofrem o acabamento em granalha para a retirada de óxidos e incrustações superficiais (decorrentes do resfriamento) e, então, são encaminhadas ao processo de bicromatização numa empresa terceirizada. - Posteriormente, as peças são contadas, inspecionadas e entregues ao cliente.

Durante todo o trajeto entre o aquecimento (etapa n°. 2) até a rebarbação (etapa n°. 5) as peças são manipuladas através de tenazes, e direcionadas por rampas deslizantes entre as máquinas, as quais são dispostas em linha, conforme demonstra a figura 3.5a. Essas alternativas de manipulação e de transporte entre o maquinário são bem eficazes, pois o material aquecido (em estado rubro) deve ser manipulado com o máximo cuidado para evitar acidentes. Portanto, o posicionamento dessas rampas permite um tempo curto de manipulação das peças por parte do operador, além de agilizar o processo. Logicamente, que existe a perda de calor por condução entre as rampas e a peça, já explicitada na fase 3 da tabela 3.4, mas isso é compensado pela agilidade e maior segurança do processo. Na figura 3.5b é apresentada a matriz atualmente utilizada pela forjaria para a fabricação dos grampos de 3/8", onde se destaca a existência das três cavidades.

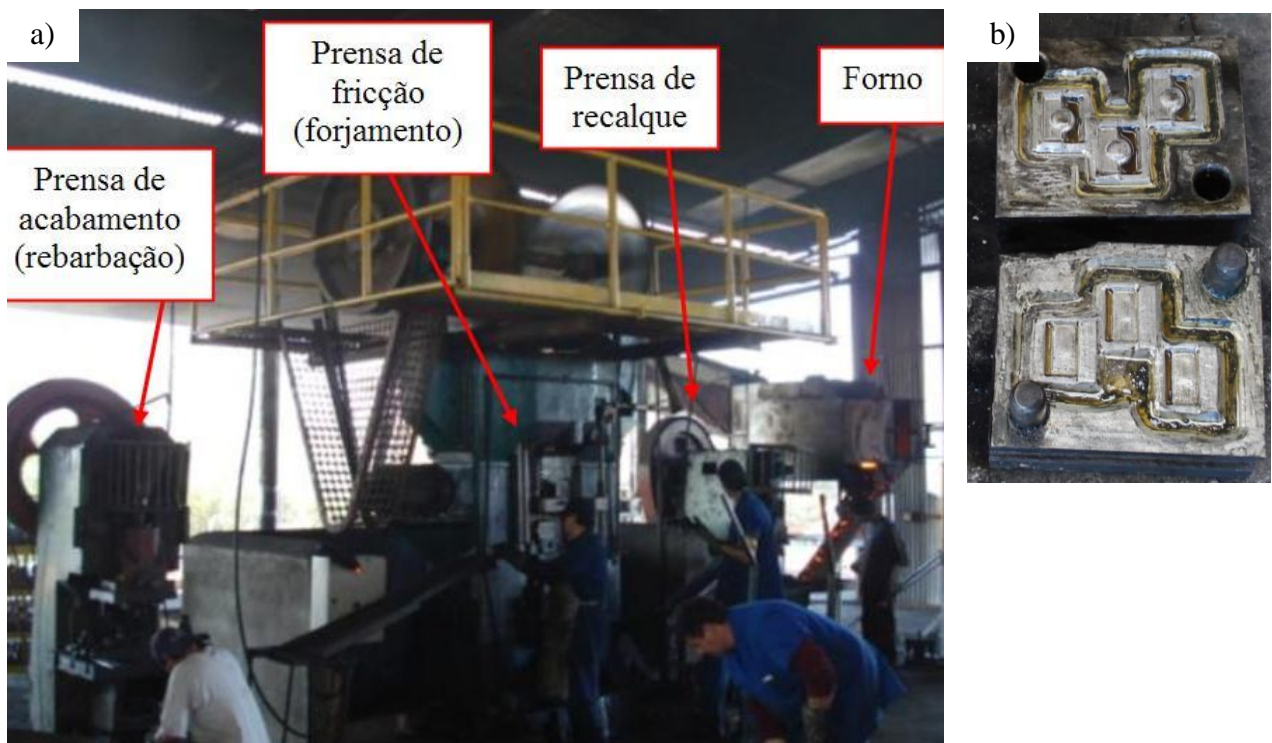


Figura 3.5 – Ferramental utilizado na fabricação do grampo de 3/8". a) Disposição do maquinário. b) Matrizes superior e inferior.

A partir do conhecimento adquirido no referencial teórico, desenvolvido neste trabalho, das condições de fabricação descritas anteriormente e do desenho da peça (Projeto Informacional) é possível realizar as seguintes considerações referentes ao Projeto Conceitual:

Quanto ao produto: o grampo de 3/8" possui eixo de simetria que cruza o furo central, sendo sua largura e profundidade maiores do que sua altura, o que sugere um processo de alargamento durante o forjamento. Esse componente apresenta um raio e uma concentração de material excessivos na parte superior frontal, decrescendo das bordas para o centro, que pode dificultar a homogeneidade de fluxo do material e, por conseqüência, a uniformidade da rebarba. A temperatura de forjamento, em torno de 1070°C, está adequada ao tipo de material (aço baixo carbono), porém a espessura da rebarba ($s = 3\text{mm}$) aparentemente pode estar super dimensionada, já que a altura da parte plana da peça é 8mm, logo a rebarba representa 37,5% dessa altura. Quanto à inclinação e raios de concordância encontrados na matriz e em amostras dos grampos, a princípio estão adequados ao tipo de maquinário utilizado e à complexidade da peça (que conforme a figura 2.23 pode ser atribuída a classe III, número 314). Porém, o excesso de rebarba e sua irregularidade de distribuição reforçam a desconfiança no uso de uma geratriz inadequada. Em contato com o cliente final, também se verificou a não aplicação de sobre-metal ao produto, já que este não necessita usinagem posterior.

Quanto ao processo e maquinário: as matrizes são confeccionadas com material adequado ao forjamento a quente, podendo ainda ser aplicado tratamento de nitretação e/ou acabamento superficial por PVD ou CVD, visando evitar seu desgaste prematuro. A utilização de apenas uma cavidade por pancada, enquanto existem três cavidades na matriz, chama a atenção, talvez por não se ter uma estimativa da força envolvida no processo. Isto só pode ser obtido através de simulações numérico-computacionais ou por ensaios mecânicos com células de cargas e/ou outros dispositivos, exigindo investimentos e instrumentação. Nesse sentido, a confecção do furo da peça junto à etapa de rebarbação se torna perfeitamente compreensível, pois se esta operação fosse realizada junto ao forjamento (etapa 4) exigiria maior capacidade de máquina, além de matrizes mais complexas. Com relação à lubrificação utilizada no processo, e considerando que esta seja realizada de maneira adequada, possibilita a obtenção de um fator de atrito interfacial da ordem de 0,2 a 0,4. Porém, sua composição química a base de óleo diesel + grafite contribui para a geração de resíduos, como a fumaça decorrente de sua inflamabilidade, portanto, devem ser estudadas outras soluções com lubrificantes específicos e não-poluentes. Outro aspecto, que poderia ser melhorado neste processo, é a eliminação da operação de recalçamento realizada antes do forjamento propriamente dito. Para isso, são necessárias

modificações no processo de aquecimento, fazendo uso de um forno com atmosfera controlada e/ou pela adoção de um sistema de aquecimento por indução, hipóteses já avaliadas pela forjaria.

Logicamente, que todas essas considerações e ponderações devem ser amparadas pelos parâmetros e possibilidades do processo, bem como, pela conscientização das empresas com relação à sua posição perante o mercado (ex.: grau de qualidade, produtividade, atendimento das expectativas dos clientes, etc). Pois, mesmo integrando os conhecimentos práticos, científicos e os recursos disponíveis, o desenvolvimento do processo só é possível se esse estiver alinhado com os objetivos e metas das forjarias, devido à necessidade contínua de investimentos e alternativas inovadoras ao processo. Isso só vem a reforçar o comprometimento da metodologia apresentada com o desenvolvimento integrado de produto para forjamento.

A partir do conhecimento do processo de forjamento, do produto, das condições de fabricação e da viabilidade técnica, ambiental e econômica do processo, torna-se possível lançar esforços na obtenção do Projeto Preliminar (fase 3).

3.2.2 Fase 3 – Projeto Preliminar

O processo de fabricação do grampo de 3/8” apresenta peculiaridades que poderiam ser eliminadas e/ou modificadas, conforme já relatado no tópico 3.2.1, principalmente com relação ao aquecimento do material, quantidade de peças forjadas por pancada, número de cavidades, modificação do lubrificante, tratamento térmico e superficial das matrizes, etc.

Porém, devido à impossibilidade de grandes investimentos e da modificação do *layout* de produção existente, o Processo Preliminar se concentrou na adequação da geratriz utilizada junto à etapa de forjamento do grampo de 3/8”, e nas simulações físicas e numérico-computacionais. Nesse sentido, e visando agilizar o Método das Áreas Projetadas (ou de *Drabing*), já descrito nesse trabalho, foi modelada em 3D a peça forjada – presente no apêndice A, conforme apresentado na figura 3.6. Para isso foi empregado o software SolidWorks 2009, que consiste num programa CAD utilizado em projetos industriais para o detalhamento de peças.

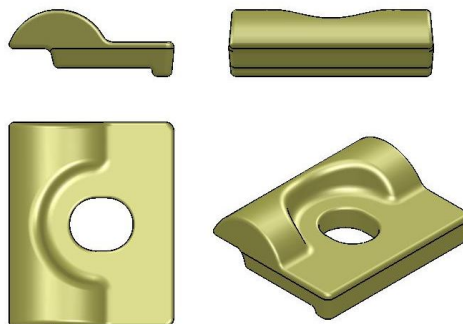


Figura 3.6 – Grampo de 3/8” modelado em 3D.

Através do modelamento em 3D e do banco de dados, existente no SolidWorks 2009, foi possível obter o volume da peça modelada sem rebarba “ $V_{P_{msr}}$ ” igual a $12.154,59\text{mm}^3$, a massa da peça modelada sem rebarba “ $M_{P_{msr}}$ ” igual a 95,6g, sendo considerada uma massa específica de 7.870g/mm^3 (grandeza atribuída pelo software ao aço ABNT/SAE/AISI 1020).

Para verificar a convergência das informações fornecidas pelo software, e comprovar que a modelagem em 3D retrata a peça escolhida, foi realizada a verificação da massa de cinco amostras de grampos escolhidas aleatoriamente junto a um lote de peças prontas. Para isso foi utilizada uma balança digital marca Toledo, capacidade 2.500g e resolução de 0,5g. Os valores obtidos, bem como, média e desvio padrão destes são expressos na tabela 3.5, onde se verifica a convergência do valor de massa obtido via software.

Tabela 3.5 – Valores de massa para cinco amostras do grampo de 3/8”.

Nº. da amostra	Massa das amostras [g]	Média de massa [g]	Desvio padrão [g]	MP_{msr} [g]
1	91,0	96,3	3,6	95,6
2	100,5			
3	95,0			
4	98,5			
5	96,5			

Tendo sido verificada a convergência dos valores de massa do grampo de 3/8”, foi realizado o dimensionamento da rebarba. Nesse caso, a linha de partição foi colocada junto ao plano de transição entre a parte plana da peça e o raio da parte superior frontal, resultando no maior perímetro. A escolha desta região facilita ainda a confecção das matrizes, reduzindo tempo e custos de produção. Através do SolidWorks 2009 foi obtido o valor da área projetada na peça no plano da rebarba “ A_p ” sendo igual a 1.824mm^2 que, considerando um processo de alargamento, resulta numa espessura de rebarba “ s ” igual a 1mm e largura “ b ” igual a 8mm, pois a relação “ b/s ” prevista na tabela 2.7 é igual a 1. Posteriormente, foi realizado o modelamento da peça com rebarba junto ao plano de partição escolhido, conforme ilustrado na figura 3.7.

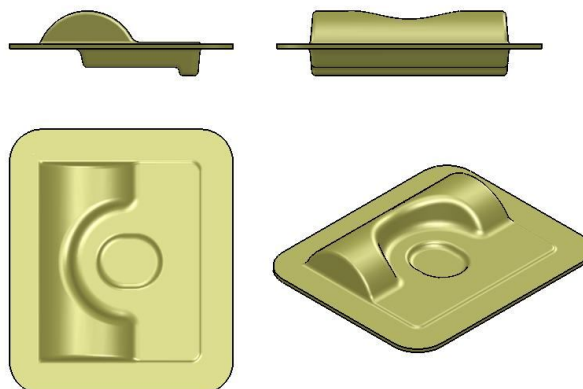


Figura 3.7 – Grampo de 3/8” modelado em 3D com rebarba.

A partir do modelamento da peça com rebarba foi possível obter o volume da peça modelada com rebarba “ $V_{P_{mcr}}$ ” igual a $14.481,70\text{mm}^3$, a massa da peça modelada com rebarba “ $M_{P_{mcr}}$ ” igual a $113,97\text{g}$ e a área projetada no plano da rebarba considerando a rebarba “ A_{p^*} ” igual a $3.401,06\text{mm}^2$. Ainda, através do SolidWorks 2009, foram modeladas em 3D as matrizes superior e inferior, tomando como referência o desenho do produto, a peça modelada e um modelo em gesso obtido a partir do ferramental original utilizado pela forjaria, conforme representado na figura 3.8. Assim, as dimensões externas das matrizes modeladas ficaram em: $27,5\text{mm}$ de altura, $42,5\text{mm}$ de largura e 77mm de comprimento.

Faz-se necessário ressaltar que no modelamento das matrizes foi considerada a simetria da peça, sendo confeccionada apenas metade de uma das cavidades existentes na matriz original. Esse procedimento se justifica na medida em que favorece e agiliza a análise numérico-computacional, minimizando o tempo de processamento.

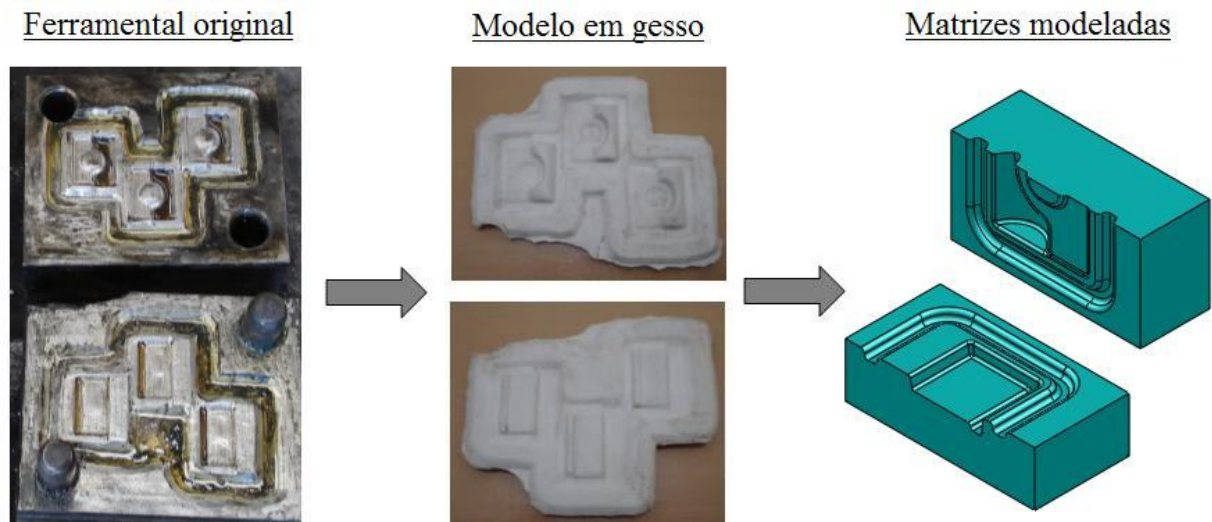


Figura 3.8 – Matrizes modeladas em 3D considerando o ferramental original.

Após o modelamento do produto e das matrizes, a próxima etapa consistiu em definir a geometria básica conforme aquelas geratrizes comercialmente utilizadas no ramo industrial, bem como, considerando o perfil apresentado pela peça. Para isso foi utilizado o Método de *Drabing*, otimizado através da aplicação e auxílio de recursos computacionais.

3.2.2.1 Seleção da forma geométrica básica para a geratriz e pré-forma

A partir da peça modelada com rebarba em 3D, foram definidos 33 planos defasados 2mm cada um, visando o cálculo da área das seções interseccionadas pelos planos. Devido à

complexidade de forma da peça, esse cálculo se torna de difícil solução manual, sendo novamente utilizados os recursos do SolidWorks 2009, conforme ilustrado na figura 3.9.

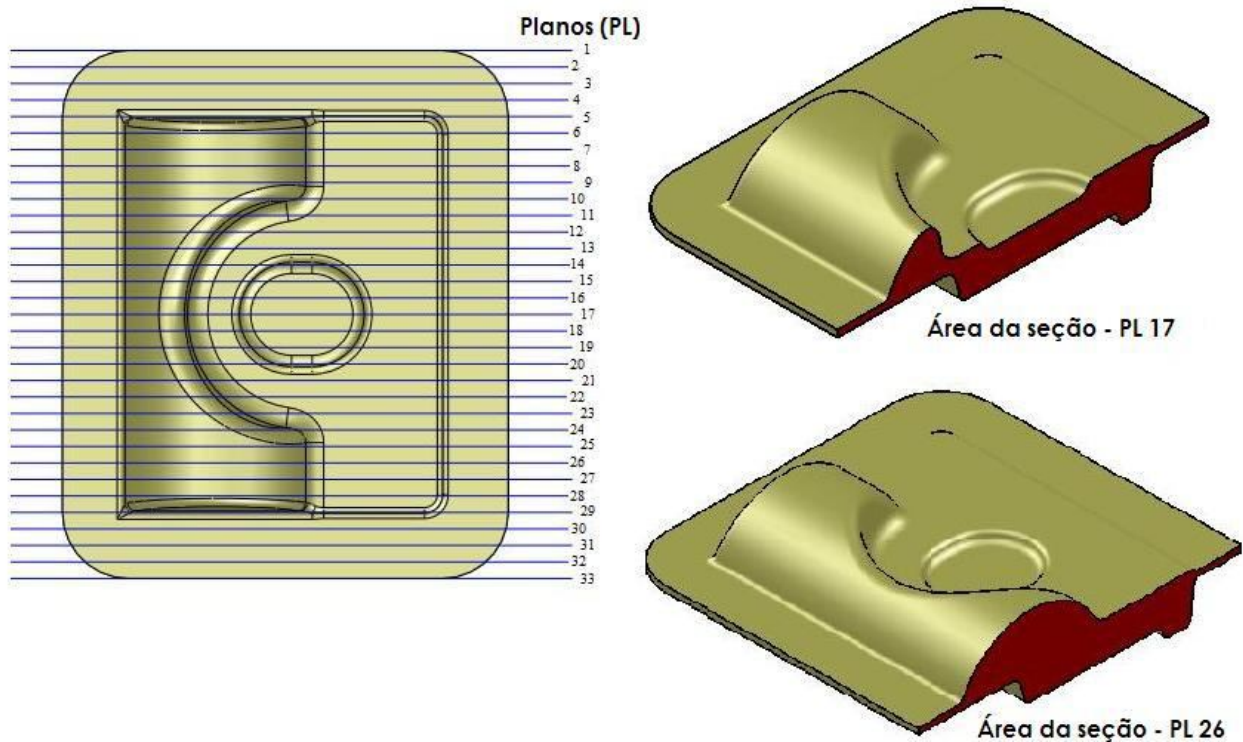


Figura 3.9 – Aplicação do Método de *Drabing* otimizado para o grampo de 3/8”.

As áreas de seção de cada plano (PL) foram lançadas numa planilha eletrônica, conforme tabela 3.6, visando à obtenção das grandezas de referência e posterior escolha das geometrias básicas disponíveis comercialmente para o dimensionamento das geratrizes e pré-forma, tendo como referência as equações da tabela 2.8.

Tabela 3.6 – Grandezas de referência das formas geométricas básicas para as possíveis geratrizes ou pré-formas do grampo de 3/8”.

Plano	Perímetro [mm]	Área da seção [mm ²]	Circular	Poligonal hexaédrica		Quadrada	Retangular ou em chapa	
			R _i [mm]	L _{Hex} [mm]	H _i [mm]	L _i [mm]	H _i [mm]	L _i [mm]
PL 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PL 2	99,17	48,58	3,93	4,32	7,49	6,97	4,02	12,07
PL 3	105,71	51,86	4,06	4,47	7,74	7,20	4,16	12,47
PL 4	108,98	53,49	4,13	4,54	7,86	7,31	4,22	12,67
PL 5	110,31	85,20	5,21	5,73	9,92	9,23	5,33	15,99
PL 6	125,39	333,77	10,31	11,33	19,63	18,27	10,55	31,64
PL 7	125,45	333,94	10,31	11,34	19,64	18,27	10,55	31,65
PL 8	125,45	333,94	10,31	11,34	19,64	18,27	10,55	31,65
PL 9	125,45	333,94	10,31	11,34	19,64	18,27	10,55	31,65
PL 10	125,32	326,93	10,20	11,22	19,43	18,08	10,44	31,32

PL 11	126,68	293,63	9,67	10,63	18,41	17,14	9,89	29,68
PL 12	126,96	273,54	9,33	10,26	17,77	16,54	9,55	28,65
PL 13	126,77	260,67	9,11	10,02	17,35	16,15	9,32	27,96
PL 14	126,82	244,70	8,83	9,70	16,81	15,64	9,03	27,09
PL 15	127,07	228,46	8,53	9,38	16,24	15,11	8,73	26,18
PL 16	126,98	221,85	8,40	9,24	16,01	14,89	8,60	25,80
PL 17	126,93	219,82	8,36	9,20	15,93	14,83	8,56	25,68
PL 18	126,98	221,85	8,40	9,24	16,01	14,89	8,60	25,80
PL 19	127,07	228,46	8,53	9,38	16,24	15,11	8,73	26,18
PL 20	126,82	244,70	8,83	9,70	16,81	15,64	9,03	27,09
PL 21	126,77	260,67	9,11	10,02	17,35	16,15	9,32	27,96
PL 22	126,96	273,54	9,33	10,26	17,77	16,54	9,55	28,65
PL 23	126,68	293,63	9,67	10,63	18,41	17,14	9,89	29,68
PL 24	125,32	326,93	10,20	11,22	19,43	18,08	10,44	31,32
PL 25	125,45	333,94	10,31	11,34	19,64	18,27	10,55	31,65
PL 26	125,45	333,94	10,31	11,34	19,64	18,27	10,55	31,65
PL 27	125,45	333,94	10,31	11,34	19,64	18,27	10,55	31,65
PL 28	125,39	333,77	10,31	11,33	19,63	18,27	10,55	31,64
PL 29	110,31	85,20	5,21	5,73	9,92	9,23	5,33	15,99
PL 30	108,98	53,49	4,13	4,54	7,86	7,31	4,22	12,67
PL 31	105,71	51,86	4,06	4,47	7,74	7,20	4,16	12,47
PL 32	99,17	48,58	3,93	4,32	7,49	6,97	4,02	12,07
PL 33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Grandeza de referência definida pela maior área da seção \rightarrow			10,31	11,34	19,64	18,27	10,55	31,65

Através dos dados obtidos pela tabela 3.6, é possível verificar que os valores acima e abaixo do eixo de simetria, que se encontra no plano PL 17, se repetem. Outra constatação é com relação aos planos que possuem a maior área na seção, neste caso, são os planos PL 7, PL 8 e PL 9, e por simetria os planos PL 25, PL 26 e PL 27.

De posse dos valores das grandezas de referência da maior seção, foram escolhidos através de um catálogo comercial de barras trefiladas – apresentado no anexo B, a matéria-prima que tivesse no mínimo o mesmo valor da grandeza de referência, considerando sua tolerância de fabricação. Sendo obtidas as grandezas de referência disponíveis comercialmente, e identificadas pelo sufixo “-com”, conforme expresso na tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Grandezas de referência escolhidas conforme disponibilidade comercial.

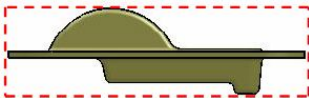
Circular	Poligonal hexaédrica		Quadrada
R_{i-com} [mm]	$L_{Hex-com}$ [mm]	H_{i-com} [mm]	L_{i-com} [mm]
10,47	11,92	20,64	19,05

A exclusão da geometria retangular ou em chapa, junto à tabela 3.7, deve-se ao elevado atrito e força presentes no início do forjamento quando se utiliza esta geometria, já que a

área de contato entre as matrizes e o material no início do processo é, em geral, superior as demais geometrias. Outro motivo que se destaca através do conhecimento e prática industrial corrente é que essa geometria acarreta maior custo de fabricação com relação às suas matrizes, já que necessita de eletroerosão com eletrodos de cobre eletrolítico, o que encarece e torna complexo o processo de obtenção das geratrizes a partir dessa geometria. Além disso, o preço por quilo consumido dos materiais em forma de chapa é, na grande maioria das vezes, superior aquele atribuído aos materiais em barra.

A partir da definição das grandezas de referência disponíveis comercialmente, foi possível comprovar que o processo de forjamento do grampo de 3/8” realmente se dá por alargamento. Pois, e considerando as dimensões iniciais da matéria-prima escolhida e as dimensões finais da peça (conforme apêndice A), os valores das deformações verdadeiras na altura da geometria de envoltura “ φ_{he} ” são menores do que a deformação no diâmetro “ φ_{de} ” ou na largura “ φ_{le} ” da mesma geometria, conforme explicitado na tabela 3.8, e em conformidade às equações (2.2) e (2.3) e das relações expressas na equação (2.15).

Tabela 3.8 – Deformações verdadeiras da geometria de envoltura com relação às formas geométricas comerciais escolhidas.

Geometria de envoltura do grampo de 3/8”	Formas geométricas comerciais escolhidas	Deformações verdadeiras da geometria de envoltura
	Circular	$\varphi_{he} = \ln \frac{15}{2(10,47)} = -0,33 \therefore \varphi_{de} = \ln \frac{54}{2(10,47)} = 0,94$ $\varphi_{he} < \varphi_{de} \Rightarrow \text{alargamento}$
	Poligonal Hexaédrica	$\varphi_{he} = \ln \frac{15}{20,64} = -0,32 \therefore \varphi_{le} = \ln \frac{54}{23,83} = 0,82$ $\varphi_{he} < \varphi_{le} \Rightarrow \text{alargamento}$
	Quadrada	$\varphi_{he} = \ln \frac{15}{19,05} = -0,24 \therefore \varphi_{le} = \ln \frac{54}{19,05} = 1,04$ $\varphi_{he} < \varphi_{le} \Rightarrow \text{alargamento}$

Para a obtenção do comprimento das geratrizes, primeiramente, foi encontrado o valor do volume da geratriz “ V_G ” através da equação (2.16), já citada neste trabalho. E, considerando que a soma de $V_P + V_R = 14.481,70\text{mm}^3$ (informação extraída diretamente do SolidWorks 2009), chega-se a um valor de $V_G = 15.243,89\text{mm}^3$.

Rodrigues e Martins, 2005, destacam que a matéria-prima para forjamento em matriz fechada deve ser cortada com uma dimensão tal que o seu volume assegure o enchimento das

cavidades das matrizes e garanta a formação da rebarba. Nesse sentido, e considerando as geratrizes como prismas regulares foi possível prever o comprimento dessas a partir da área da seção encontrada comercialmente “ $A_{\text{seção-com}}$ ” visando atingir, no mínimo, o valor de V_G , conforme apresentado na tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Comprimento das geratrizes escolhidas visando atingir o valor do “ V_G ”.

	Circular	Poligonal hexaédrica	Quadrada
$A_{\text{seção-com}} [\text{mm}^2]$	344,38	369,15	362,90
Comprimento da geratriz [mm]	44,27	41,30	42,01

Também foi idealizada uma pré-forma de seção circular a partir dos valores obtidos das áreas, sendo modelada no SolidWorks 2009 através do comando “*loft*”, que une todas as seções defasadas para a formação de um sólido com contorno suavizado. O volume deste sólido também foi limitado, no mínimo, ao V_G calculado. Nesse caso, o comprimento total da pré-forma ficou em 48mm, apresentando diâmetro máximo igual a 25,04mm e mínimo igual a 16,73mm. Na figura 3.10, são apresentadas todas as geratrizes e a pré-forma obtidas pela aplicação do Método de *Drabing* otimizado para o grampo de 3/8”, e que foram utilizadas nas simulações.

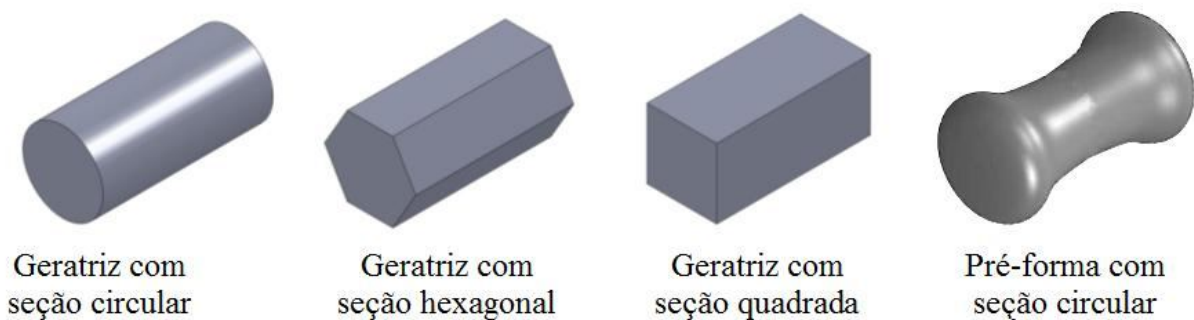


Figura 3.10 – Geratrizes e pré-forma obtidas para o grampo de 3/8”.

Vale ressaltar que ainda poderiam ser adotadas e/ou confeccionadas pré-formas a partir das seções hexagonal e quadrada, apresentando redução destas seções junto ao plano médio. Isto possibilitaria mais algumas alternativas de simulações visando a obtenção da peça.

3.2.2.2 Simulações através de plasticina

Antes das simulações numérico-computacionais, foram confeccionados matrizes em resina poliéster cristal transparente (Arazyn 1.0#41) para representar as cavidades da matriz, e visando análise do fluxo de material e da quantidade de rebarba. Nesse caso um material modelo (plasticina) foi utilizado para simular o material ABNT/SAE/AISI 1020.

Na confecção dos moldes foi necessário cortar um grampo de 3/8” junto a linha de partição, idealizada nesse trabalho, obtendo duas metades do produto (parte superior e inferior). Esse corte foi realizado numa máquina de eletroerosão a fio em virtude da baixa taxa de remoção de material ($\approx 0,32\text{mm}$) durante o processo de corte, possibilitando obter duas metades que juntas apresentavam altura semelhante à peça original ($\approx 14,68\text{mm}$). Posteriormente, as duas metades do grampo foram colocadas num dispositivo de madeira para a confecção dos moldes em resina, sendo misturada à resina um catalisador Butanox M50 para iniciar o processo de cura da resina. Tentou-se evitar a formação de bolhas e outros defeitos superficiais que poderiam comprometer as análises. Na figura 3.11, são apresentados todos os dispositivos (itens) utilizados nas simulações em plasticina.

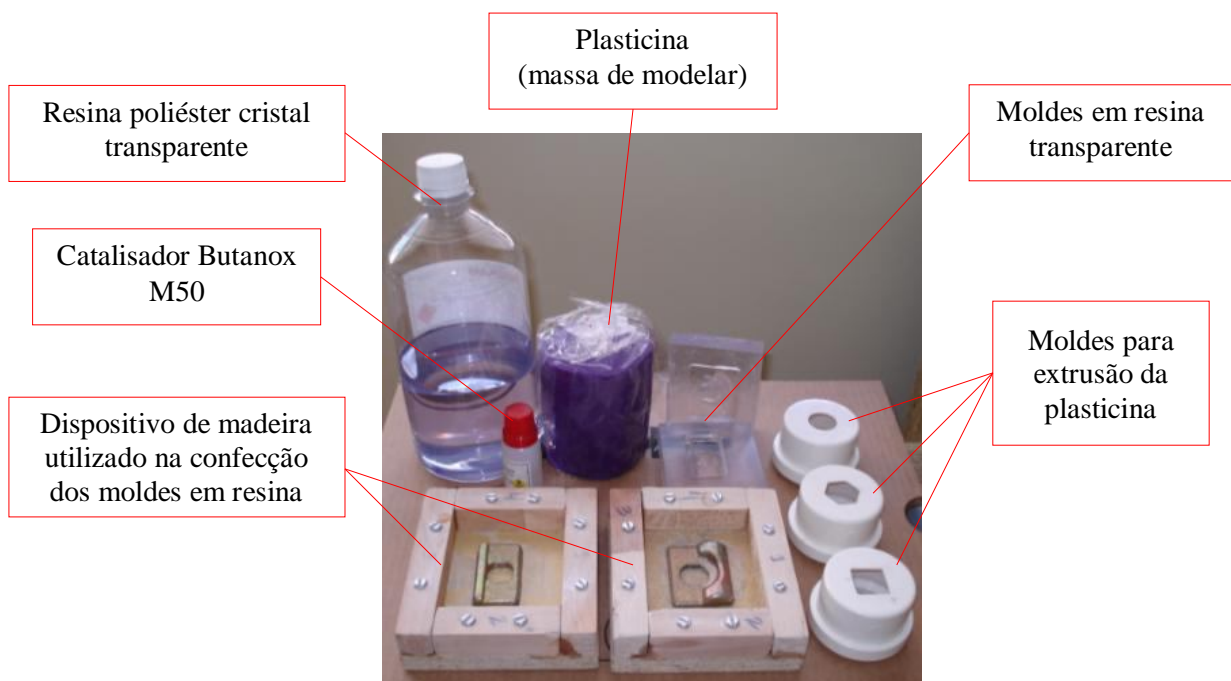


Figura 3.11 – Dispositivos (itens) utilizados nas simulações em plasticina.

Como os moldes em resina foram fabricados a partir de uma peça real é possível prever a existência de uma semelhança e/ou, pelo menos, uma condição mais aproximada das dimensões das cavidades da matriz real, principalmente, com relação aos raios de concordância e ângulos de inclinação. Isso favorece a simulação e a confiabilidade dos resultados das análises do fluxo do material modelo, ou seja, da plasticina.

A utilização dos moldes em resina transparente possibilita a visualização do comportamento da plasticina durante o fechamento manual das matrizes modelo, porém isso só é possível se o molde apresentar acabamento adequado (ex.: transparente polido), caso contrário esta visualização é comprometida. Nesse procedimento foi utilizada ainda vaselina líquida junto às superfícies das matrizes, visando diminuir o atrito durante a deformação do material modelo.

Posteriormente, foram confeccionadas as geratrizes a partir de um sistema de extrusão especialmente idealizado para obter as formas e dimensões das geratrizes comerciais escolhidas. Porém, não foi possível obter a pré-forma definida neste trabalho em virtude da diferença no diâmetro das seções deste sólido, o que torna inviável sua obtenção pelo processo de extrusão utilizado. Assim, foram realizadas cinco simulações para cada geratriz proposta (exceto a pré-forma), visando obter resultados com relação à quantidade final de rebarba a partir de uma foto ao final de cada simulação.

Vale ressaltar que como o processo de “forjamento” foi manual, não foi possível obter valores quantitativos do esforço necessário para deformar das geratrizes. Nesse sentido, na figura 3.12 são representados os cinco pontos de verificação escolhidos “ b_{p1} , b_{p2} , b_{p3} , b_{p4} , b_{p5} ”, visando análise da largura da rebarba a partir das fotos tiradas das simulações em plasticina, totalizando quinze fotos (imagens).

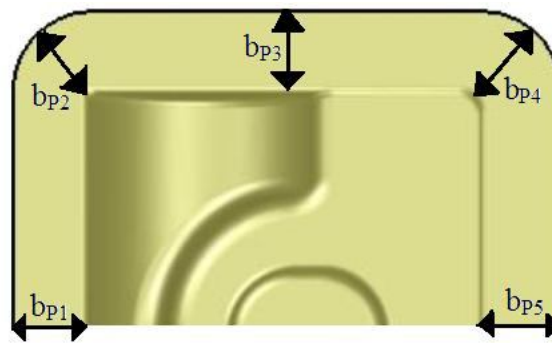


Figura 3.12 – Pontos de verificação da largura da rebarba.

De posse das imagens foi possível avaliar a largura da rebarba com o auxílio do software *ImageTool* 3.0, cuja área de trabalho é representada no apêndice B. Este programa, indicado para análise de imagens, foi desenvolvido pela *University of Texas Health Science Center* de *San Antonio* – EUA, e consiste num software disponível na internet, compatível com o sistema *Windows 95TM* ou *Windows NTTM*, e destinado a adquirir, demonstrar, editar, analisar e processar fotos com os mais diversos formatos e extensões (ex.: BMP, PCX, TIF, JPEG, etc.).

A utilização deste software para obter a largura da rebarba, justifica-se na medida em que eleva o grau de exatidão das medidas, já que possibilita a calibração da escala utilizada nas medições para todas as figuras analisadas. Pois, possibilita obter diversas informações relacionadas à imagem analisada, com destaque para a mensuração de grandezas, como: comprimento, área, perímetro, ângulo, etc.

3.2.2.3 Simulações através do Simufact.Forming 8.1

As simulações numérico-computacionais foram realizadas através do software Simufact.Forming 8.1, que é aplicado na simulação de diversos processos de conformação, inclusive do forjamento em matriz aberta ou fechada, a partir de diferentes gradientes de temperatura, materiais, maquinários, etc. Esse software consiste numa opção para análise da otimização de material e da vida útil da ferramenta, já que suas análises podem ser realizadas tanto através de modelos digitais em 2D quanto em 3D, além de ser possível escolher o tipo de análise (por MEF ou MVF) dependendo das peculiaridades do processo [Simufact, 2008].

Buijk, 2009, destaca que tanto o MEF quanto o MVF podem ser utilizados nas análises dos processos de conformação, porém o tipo de deformação que o material apresenta é o fator determinante na escolha do tipo de análise. Onde, e reportando-se ao software Simufact.Forming 8.1, para análises em 3D de um processo à quente, com elevado e complexo nível de deformação do material – que é o caso do grampo de 3/8”, o MVF se torna o mais apropriado, do contrário o MEF passa a ser o mais indicado.

Outra vantagem do MVF é que este não necessita de remalhamento, sendo duas a dez vezes mais rápido do que o MEF, considerando a mesma análise [Buijk, 2009]. No caso do Simufact.Forming 8.1, isso ocorre devido a não deformação dos nós relacionados com a malha, já que esta representa um limite de contorno, conforme ilustrado na figura 3.13.

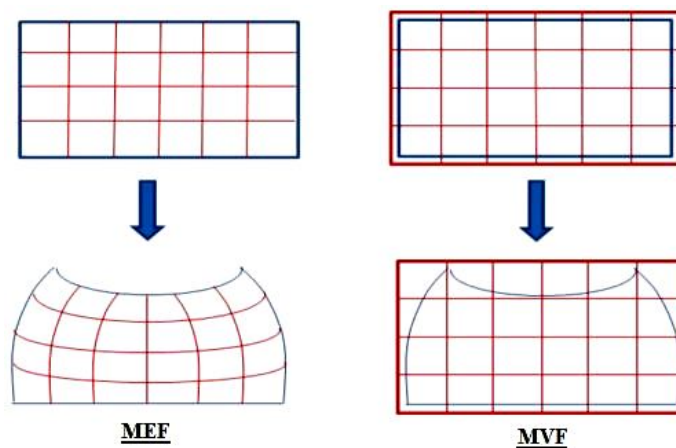


Figura 3.13 – Demonstração simplificada do MEF e MVF existente no Simufact.Forming 8.1.
Fonte: [Buijk, 2009].

Para viabilizar as simulações através do software foi necessário realizar a montagem das peças (matrizes, geratrizes e pré-forma) modeladas em 3D, de maneira que as geratrizes ou pré-forma ficassem apoiadas na matriz inferior, deixando uma altura livre entre matrizes de 20mm, sendo ainda definido o eixo “Z” como o eixo de operação da matriz superior, a qual é

responsável pela ação de deformação do material. Vale destacar que o posicionamento do material junto às matrizes levou em consideração o raio e volume excessivos de material na parte frontal do grampo de 3/8". Nesse sentido, todas as geratrizes e a pré-forma foram posicionadas o mais próximo possível da parte frontal da peça, sendo limitadas pelo raio de concordância da cavidade inferior. E, como foi modelada apenas metade de uma das cavidades, tanto da matriz inferior quanto da matriz superior devido à simetria do sistema, também se fez o “corte” das geratrizes e da pré-forma modeladas exatamente na seção central destas.

Os parâmetros de simulação (dados de entrada) utilizados se basearam nas informações e ponderações resultantes da análise do processo real – conforme listados na tabela 3.10, bem como, do banco de dados do Simufact.Forming 8.1. Vale destacar que a definição desses parâmetros só foi possível devido às fases de Projeto Informacional e Conceitual plenamente analisadas para o grampo de 3/8" ao longo deste trabalho, e que a escolha do tamanho de malha igual a 1mm se deu em conformidade ao tamanho da rebarba, que também era 1mm. Logicamente, que poderia ser adotado um valor de malha inferior a este, porém as simulações apresentariam de um maior tempo de processamento, considerando os mesmos recursos computacionais.

Tabela 3.10 – Parâmetros utilizados nas simulações com Simufact.Forming 8.1.

	Parâmetros
Tipo de análise e processo	Análise: 3D, MVF (tamanho da malha = 1,0mm) Processo: matriz fechada, a quente ($T_h = 0,76$, sendo considerado $T_{fusão} = 1760K$, conforme LdSM, 2009)
Material das matrizes	Classificação: H13 Módulo de Young: 210GPa Coef. Poisson: 0,3 Densidade: 7.800kg/m ³ Condutividade Térmica: 24,6W/(m.K) Emissividade: 0,8
Material das geratrizes e pré-forma	Classificação: AISI 1018 Módulo de Young: 199,95GPa Coeficiente de Poisson: 0,29 Densidade: 7.833,4kg/m ³ Condutividade Térmica: 46,7W/(m.K) Emissividade: 0,8
Prensa	Tipo: Prensa de parafuso tipo fricção com disco duplo Energia bruta (<i>Gross Energy</i>): 36.282J Velocidade máxima de recalque: 450mm/s Força máxima de impacto: 2.452,5kN (dados da prensa conforme apresentado no anexo C) Distância entre as matrizes: 20mm Curso da matriz superior: 19mm ($s = 1\text{mm}$)

Atrito	Fator de atrito: interfacial ($m = 0,3$)
Temperatura das matrizes	150°C
Temperatura das geratrizes e pré-forma	1070°C ($T_{mat} = 1343K$)
Temperatura ambiente	23°C

Na figura 3.14, é apresentada a área de trabalho do Simufact.Forming 8.1, onde se destacam a montagem realizada e alguns parâmetros envolvidos. Porém, devido à inexistência do material ABNT/SAE/AISI 1020 com a mesma faixa de temperatura de forjamento junto ao banco de dados do programa, foi utilizado nas simulações o aço ABNT/SAE/AISI 1018, já que este possui composição química e propriedades mecânicas equivalentes.

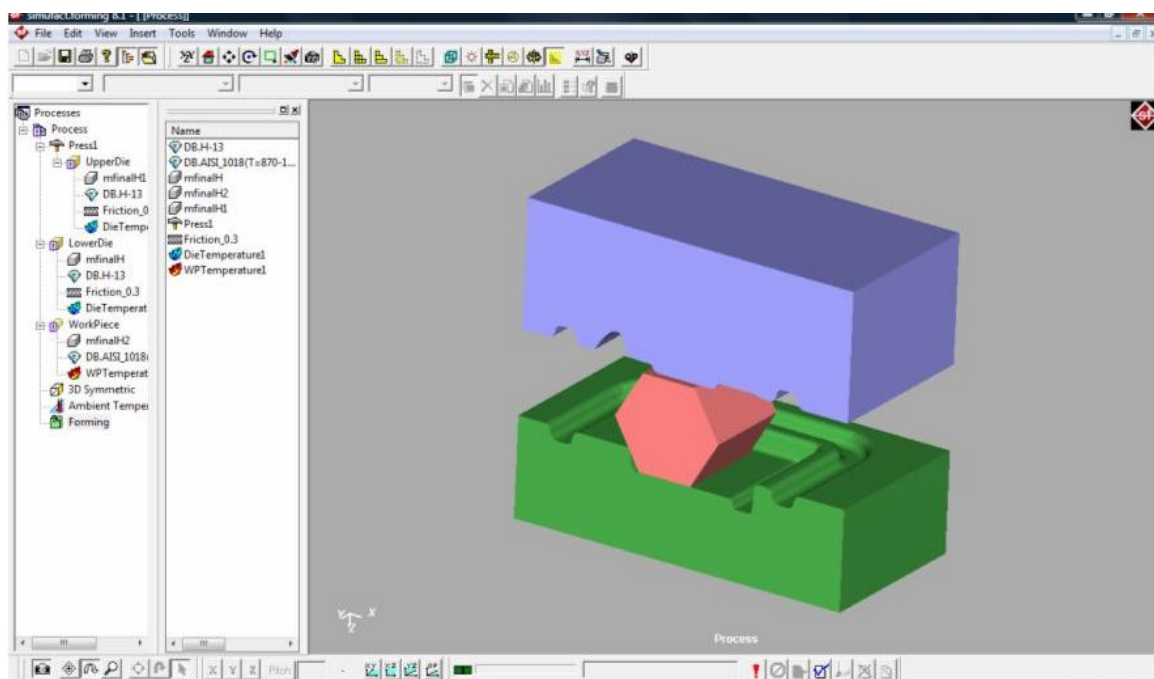


Figura 3.14 – Área de trabalho do software Simufact.Forming 8.1.

Grüning, 1973, esclarece que o conhecimento da força de conformação e da potência é importante para a escolha e projeto adequado do ferramental (máquinas e matrizes), bem como, para a definição da quantidade de etapas necessárias ao processamento do material. Nesse sentido, buscou-se analisar através das simulações numérico-computacionais a quantidade de rebarba, a força e energia necessária ao processo.

Na avaliação da quantidade de rebarba, foram utilizados os mesmos pontos de verificação escolhidos nas simulações via plasticina, bem como, o *ImageTool 3.0* para a obtenção de cinco medições em cada ponto. Vale ressaltar que, devido à capacidade de repetitividade das simulações via software, foi analisada apenas uma foto da condição final resultante de cada simulação, totalizando quatro fotos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como descrito nos objetivos desse trabalho, e em consequência da aplicação da metodologia proposta, a seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos com as simulações em plasticina e numérico-computacionais. Posteriormente, se fará uma análise da metodologia de desenvolvimento integrado de produto para forjamento apresentada neste trabalho, e que foi aplicada ao grampo de 3/8”.

4.1 SIMULAÇÕES COM PLASTICINA

A figura 4.1 apresenta o procedimento adotado nas três geratrizes utilizadas para a simulação em plasticina, com destaque ao resultado da deformação do material modelo. Porém, vale destacar que não foi possível obter fotos durante o processo, já que o mecanismo utilizado (que era manual) não garantia o reposicionamento dos componentes caso fossem “abertos” os moldes durante a deformação. Além disso, não foi possível obter um molde em resina com qualidade de transparência que permitisse a análise do fluxo de material durante a simulação.



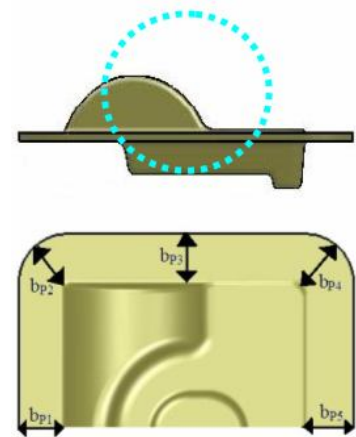
Figura 4.1 – Procedimento utilizado nas simulações com plasticina.

Nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 são dispostos os valores da largura da rebarba obtidos em cada ponto verificado (b_{P1} , b_{P2} , b_{P3} , b_{P4} e b_{P5}) após a deformação do material modelo e, bem

como, a largura média da rebarba “ \bar{b}_P ” e o desvio padrão “ S_{b_P} ” desses valores, considerando as geratrizes simuladas.

Tabela 4.1 – Largura da rebarba das simulações em plasticina – geratriz com seção circular.

Fotos	b_{P1} [mm]	b_{P2} [mm]	b_{P3} [mm]	b_{P4} [mm]	b_{P5} [mm]
1	3,53	3,05	11,18	5,88	5,49
	4,12	3,19	11,37	5,45	5,29
	3,53	2,64	11,76	5,49	5,49
	3,53	3,47	11,76	5,66	5,29
	3,73	2,64	11,76	5,55	5,88
2	4,44	3,14	5,93	3,15	6,30
	4,26	2,62	5,74	3,15	5,93
	4,44	2,63	6,11	3,54	5,74
	4,28	2,52	5,37	2,88	6,48
	4,44	2,36	5,56	3,28	5,93
3	2,73	1,47	9,27	3,61	4,73
	2,36	1,93	9,45	3,35	4,73
	2,55	1,82	9,64	3,38	4,73
	2,19	1,97	8,61	3,47	4,73
	2,36	1,68	9,27	3,22	5,09
4	5,00	5,04	10,83	5,45	5,21
	5,21	4,63	11,04	5,31	4,79
	4,59	4,72	10,83	4,92	5,00
	4,38	5,16	11,04	5,02	4,79
	4,79	4,71	10,83	5,16	4,58
5	5,45	5,82	10,00	6,27	6,59
	5,91	5,63	9,55	5,97	6,36
	5,68	5,33	9,77	5,95	7,05
	5,91	5,18	10,00	6,11	6,59
	5,68	5,82	9,32	6,32	7,05
\bar{b}_P [mm]	4,20	3,57	9,44	4,70	5,59
S_{b_P} [mm]	1,14	1,46	2,08	1,22	0,78



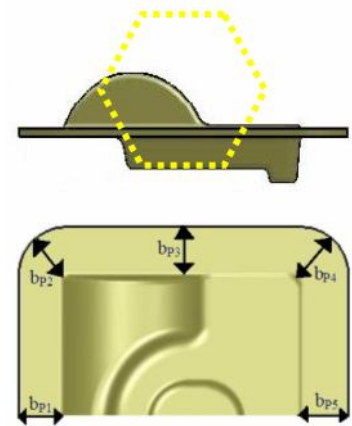
A partir dos valores médios “ \bar{b}_P ” obtidos na tabela 4.1 é possível notar que o ponto de maior largura de rebarba foi o ponto b_{P3} apresentando 9,44mm, seguido do ponto b_{P5} com 5,59mm e, posteriormente, dos pontos b_{P4} , b_{P1} e b_{P2} com 4,70mm, 4,20mm e 3,57mm, respectivamente. Com relação aos desvios padrão “ S_{b_P} ” encontrados é possível afirmar que o ponto de verificação b_{P3} apresentou o maior valor, igual a 2,08mm, seguido dos pontos b_{P2} , b_{P4} , b_{P1} e b_{P5} com valores de desvios iguais a 1,46mm, 1,22mm, 1,14mm e 0,78mm, respectivamente.

Logo, e considerando a variação do desvio padrão imposta à média dos valores encontrados, é possível afirmar que as arestas laterais do grampo de 3/8” (junto aos pontos b_{P1} , b_{P3} e b_{P5}) quando simulado através de plasticina, e a partir de uma geratriz de seção circular,

apresentaram maior concentração de material e, conseqüentemente, demonstram maior probabilidade de formação de rebarba com largura superior do que aqueles pontos de verificação junto aos vértices (b_{P2} e b_{P4}) do grampo de 3/8”.

Tabela 4.2 – Largura da rebarba das simulações em plasticina – geratriz com seção hexagonal.

Fotos	b_{P1} [mm]	b_{P2} [mm]	b_{P3} [mm]	b_{P4} [mm]	b_{P5} [mm]
1	5,31	3,17	9,80	7,84	9,18
	4,69	3,35	9,18	7,81	8,98
	4,69	3,19	9,18	7,81	9,59
	4,70	3,61	9,39	7,68	8,78
	4,90	3,03	10,00	7,07	8,98
2	4,07	3,80	9,26	6,16	6,30
	3,89	3,54	9,26	5,91	6,30
	3,89	3,41	9,81	5,77	6,85
	4,07	3,41	8,89	6,01	6,30
	4,07	3,70	9,63	5,70	6,67
3	3,62	3,62	8,94	4,96	5,32
	4,04	4,21	8,72	5,25	5,74
	4,47	3,91	9,15	4,90	5,96
	4,04	3,66	9,79	5,02	5,32
	4,26	4,39	9,57	4,38	6,17
4	3,67	2,90	8,57	5,57	6,73
	3,47	2,90	8,57	5,32	6,74
	4,08	3,35	8,78	4,98	6,94
	4,08	2,89	8,78	4,65	7,14
	4,08	3,32	8,98	5,23	6,94
5	3,39	2,92	7,12	4,37	5,76
	3,39	3,13	7,46	4,37	6,44
	3,39	2,65	7,80	4,71	5,93
	3,22	2,41	7,63	4,75	6,10
	3,56	2,17	7,46	4,75	6,10
\bar{b}_P [mm]	4,04	3,31	8,87	5,64	6,85
S_{bP} [mm]	0,53	0,52	0,81	1,15	1,25



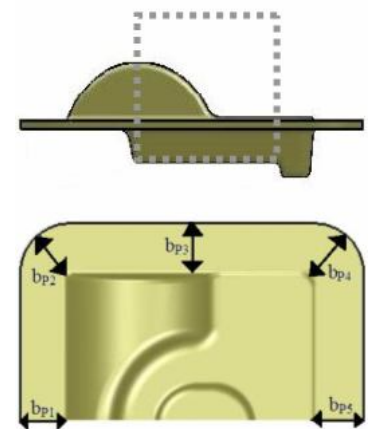
Considerando os valores médios da largura da rebarba, a partir da tabela 4.2, é possível verificar que o ponto de maior largura de rebarba foi o ponto b_{P3} apresentando 8,87mm, seguido do ponto b_{P5} com 6,85mm e, posteriormente, dos pontos b_{P4} , b_{P1} e b_{P2} com 5,64mm, 4,04mm e 3,31mm, respectivamente. Por sua vez, o desvio padrão no ponto de verificação b_{P5} apresentou o maior valor, igual a 1,25mm, seguido dos pontos b_{P4} , b_{P3} , b_{P1} e b_{P2} com valores de desvios iguais a 1,15mm, 0,81mm, 0,53mm e 0,52mm, respectivamente.

Sendo assim, e a partir da variação do desvio padrão imposta à média dos valores encontrados, é possível afirmar que as arestas laterais do grampo de 3/8” (junto aos pontos b_{P1} , b_{P3} e b_{P5}) quando simulado através de plasticina, e a partir de uma geratriz de seção hexagonal,

apresentaram maior concentração de material e, conseqüentemente, demonstram maior probabilidade de formação de rebarba com largura superior do que aqueles pontos de verificação junto aos vértices (b_{P2} e b_{P4}) do grampo de 3/8".

Tabela 4.3 – Largura da rebarba das simulações em plasticina – geratriz com seção quadrada.

Fotos	b_{P1} [mm]	b_{P2} [mm]	b_{P3} [mm]	b_{P4} [mm]	b_{P5} [mm]
1	4,45	2,52	7,96	4,86	8,33
	4,45	2,73	8,33	4,63	8,70
	4,08	2,67	8,15	4,93	7,78
	4,26	2,36	7,59	5,19	8,70
	3,91	2,37	8,33	4,73	8,52
2	3,79	2,21	7,59	5,28	8,11
	3,45	2,45	7,41	5,74	8,45
	3,62	2,56	7,93	5,52	8,10
	3,28	2,69	7,24	5,76	8,10
	3,62	2,81	7,93	5,26	8,45
3	3,15	2,12	6,25	2,73	5,36
	3,25	2,27	6,25	2,54	5,89
	2,96	2,06	6,07	2,29	5,00
	3,06	2,18	5,90	2,43	5,18
	3,30	2,32	6,07	2,29	5,18
4	2,41	2,07	10,74	3,56	6,85
	2,59	1,85	10,37	4,06	6,48
	2,78	2,10	10,00	4,58	6,11
	2,41	2,23	9,63	4,32	7,04
	2,41	2,00	9,63	4,08	7,04
5	3,00	2,48	9,47	3,14	5,96
	3,16	2,53	8,95	3,26	6,84
	3,16	2,51	10,00	3,48	6,49
	3,00	2,36	9,65	3,26	6,84
	2,81	2,25	9,65	3,12	6,49
\bar{b}_P [mm]	3,29	2,35	8,28	4,04	7,04
S_{bP} [mm]	0,61	0,25	1,48	1,14	1,22



Analisando os valores médios obtidos na tabela 4.3 é possível notar que o ponto de maior largura de rebarba foi o ponto b_{P3} apresentando 8,28mm, seguido do ponto b_{P5} com 7,04mm e, posteriormente, dos pontos b_{P4} , b_{P1} e b_{P2} com 4,04mm, 3,29mm e 2,35mm, respectivamente. Foi encontrado o maior valor de desvio padrão junto ao ponto de verificação b_{P3} , igual a 1,48mm, seguido dos pontos b_{P5} , b_{P4} , b_{P1} e b_{P2} com valores de desvios iguais a 1,22mm, 1,14mm, 0,61mm e 0,25mm, respectivamente.

Novamente, e considerando a variação do desvio padrão imposta à média dos valores encontrados, é possível afirmar que as arestas laterais do grampo de 3/8" (junto aos pontos b_{P1} , b_{P3} e b_{P5}) quando simulado através de plasticina, e a partir de uma geratriz de seção quadrada,

apresentaram maior concentração de material e, conseqüentemente, demonstram maior probabilidade de formação de rebarba com largura superior do que aqueles pontos de verificação junto aos vértices (b_{P2} e b_{P4}) do grampo de 3/8". A partir das tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 foi elaborado um gráfico, apresentado na figura 4.2, com todos os valores médios e os desvios padrão das larguras das rebarbas encontradas, conforme cada ponto de verificação das geratrizes simuladas.

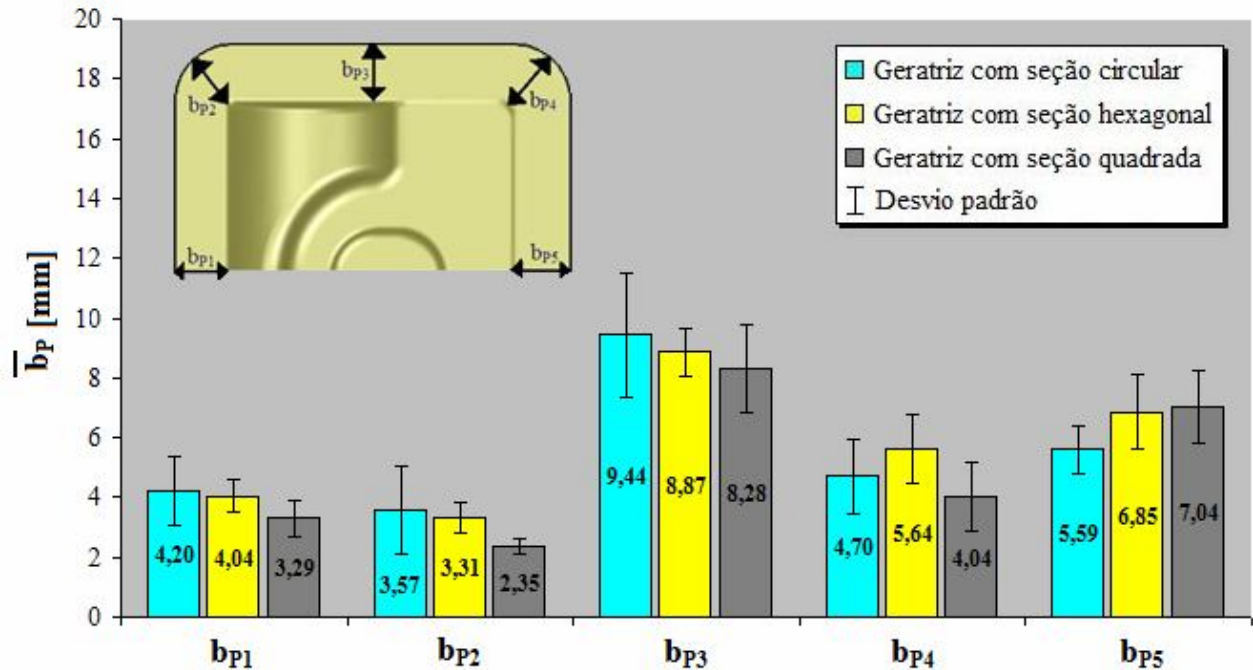


Figura 4.2 – Gráfico dos valores obtidos de \bar{b}_P em cada ponto de verificação e conforme as geratrizes analisadas nas simulações com plasticina.

A figura 4.2 mostra que todas as geratrizes apresentaram o mesmo comportamento quanto à largura da rebarba, havendo uma redução desta grandeza junto aos pontos de verificação b_{P1} , b_{P2} e b_{P4} . Em contrapartida, o ponto de verificação b_{P3} , foi aquele que apresentou maior largura de rebarba comparando todas as geratrizes, seguido dos pontos b_{P5} e b_{P4} . Esse resultado pode ser atribuído à existência de menor área nas seções próximas ao eixo de simetria – conforme ficou evidenciado através da aplicação do método de *Drabing* otimizado, além do menor volume de material exigido para preencher a parte plana (posterior) do grampo de 3/8", e às condições de atrito existentes durante a simulação.

Faz-se importante destacar que o elevado desvio padrão obtido através das simulações em plasticina pode ser atribuído ao processo manual de deformação realizado, e ao sistema de medição empregado. Pois, não foi possível elaborar um dispositivo automatizado de controle da taxa de deformação que pudesse assegurar a repetitividade das simulações e, bem como, da uniformidade da espessura da rebarba, do paralelismo entre as faces do molde, das condições de atrito interfacial, e de outros parâmetros de influência.

4.2 SIMULAÇÕES COM SIMUFACT.FORMING 8.1

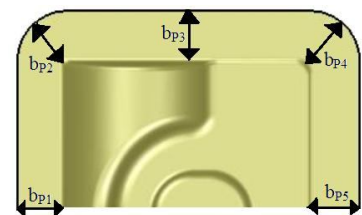
Nas simulações numérico-computacionais foi possível obter, para cada geratriz e inclusive para a pré-forma, resultados com relação à quantidade de rebarba, força e energia do processo, conforme explicitado a seguir.

4.2.1 Quantidade de rebarba

Com relação à quantidade de rebarba foram obtidos valores nos cinco pontos de verificação das geratrizes de seção circular, hexagonal, quadrada, além da pré-forma, sendo estes valores apresentados nas tabelas 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7, respectivamente.

Tabela 4.4 – Largura da rebarba das simulações via software – geratriz com seção circular.

Foto	b_{P1} [mm]	b_{P2} [mm]	b_{P3} [mm]	b_{P4} [mm]	b_{P5} [mm]
1	9,25	6,30	9,25	6,39	9,50
	9,37	6,54	9,12	6,46	9,50
	9,37	6,29	8,87	6,46	9,75
	9,63	6,26	9,12	6,65	9,37
	9,37	6,36	8,87	6,46	9,50
\bar{b}_P [mm]	9,40	6,35	9,05	6,48	9,52
S_{bP} [mm]	0,14	0,11	0,17	0,10	0,14



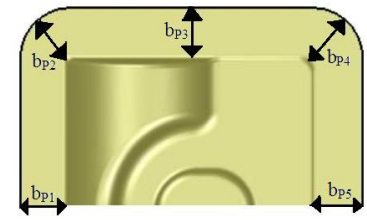
Com relação aos valores médios de rebarba obtidos na tabela 4.4 é possível verificar que os pontos de verificação b_{P5} , b_{P1} e b_{P3} alcançaram os maiores valores, 9,52mm, 9,40mm e 9,05mm, respectivamente. Em compensação, os pontos b_{P4} e b_{P3} apresentaram os menores valores, 6,48mm e 6,35mm, respectivamente.

Com relação aos desvios padrão nota-se, comparando as tabelas 4.1 e 4.4, uma amplitude menor dos valores da simulação via software do que aqueles resultados das simulações em plasticina. Isso, só vem a confirmar o grau de repetitividade das análises via software, sendo que esta variação possivelmente é resultado da incerteza herdada do sistema de medição utilizado, ou seja, da medição através do software *ImageTool 3.0*. Neste caso, o maior valor de desvio padrão ocorreu junto ao ponto b_{P3} com 0,17mm, seguido dos pontos b_{P1} e b_{P5} com 0,14mm e, na seqüência, os pontos b_{P2} e b_{P4} com 0,11mm e 0,10mm, respectivamente.

Da mesma maneira que ocorreu com as simulações em plasticina, as simulações via Simufact.Forming 8.1 da geratriz com seção circular, também foi constatada uma tendência evidente de concentração de material junto às arestas da peça (pontos b_{P1} , b_{P3} e b_{P5}), em detrimento aos cantos (pontos b_{P2} e b_{P4}).

Tabela 4.5 – Largura da rebarba das simulações via software – geratriz com seção hexagonal.

Foto	b_{P1} [mm]	b_{P2} [mm]	b_{P3} [mm]	b_{P4} [mm]	b_{P5} [mm]
1	10,45	8,03	8,29	7,83	8,92
	10,33	8,29	8,29	7,50	9,05
	10,45	8,44	8,41	7,68	9,18
	10,71	8,24	8,16	7,83	8,92
	10,45	8,36	8,54	7,68	9,05
\bar{b}_P [mm]	10,48	8,27	8,34	7,70	9,02
S_{bP} [mm]	0,14	0,15	0,14	0,14	0,11

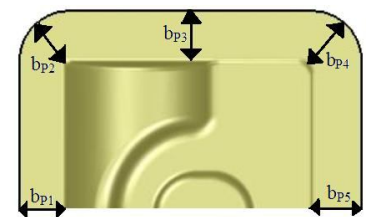


Conforme a tabela 4.5, a geratriz com seção hexagonal apresentou a maior largura média de rebarba junto ao ponto b_{P1} com 10,48mm, seguido dos pontos b_{P5} , b_{P3} , b_{P2} , b_{P4} , apresentando respectivamente 9,02mm, 8,34mm, 8,27mm e 7,70mm. É importante destacar que à exceção do ponto b_{P1} , os demais pontos tiveram grandezas com valores razoavelmente próximos. Logicamente, que se for considerado o desvio padrão dessas grandezas – que por sinal também apresentou valores semelhantes, não se verifica essa afirmação. Mas, e se comparada com as simulações em plasticina da mesma geratriz, conforme tabela 4.2, esta premissa se torna plenamente aceitável.

Sendo assim, e a partir da relação dos desvios padrão apresentados nas tabelas 4.2 e 4.5, nota-se uma amplitude muito menor dos valores de desvio da simulação via software do que em plasticina, comprovando mais uma vez o grau de repetitividade das simulações, e da influência da incerteza do processo de medição utilizado. Neste caso, o maior valor de desvio padrão ocorreu junto ao ponto b_{P2} com 0,15mm, seguido dos pontos b_{P1} , b_{P3} e b_{P4} com 0,14mm, e pelo ponto b_{P5} com 0,11mm. Logo, e a partir dos resultados da tabela 4.5, constata-se que a geratriz com seção hexagonal apresentou uma certa uniformidade na largura da rebarba junto aos cantos (pontos b_{P2} e b_{P4}) e na aresta representada pelo ponto b_{P3} , e sensível aumento desta grandeza junto às arestas indicadas pelos pontos de verificação b_{P1} e b_{P5} .

Tabela 4.6 – Largura da rebarba das simulações via software – geratriz com seção quadrada.

Foto	b_{P1} [mm]	b_{P2} [mm]	b_{P3} [mm]	b_{P4} [mm]	b_{P5} [mm]
1	5,88	4,81	8,70	6,96	11,51
	6,14	4,58	8,44	6,65	11,64
	6,14	5,03	8,70	6,91	11,51
	5,88	5,09	8,44	6,78	11,38
	6,01	4,98	8,83	7,09	11,51
\bar{b}_P [mm]	6,01	4,90	8,62	6,88	11,51
S_{bP} [mm]	0,13	0,21	0,17	0,17	0,09



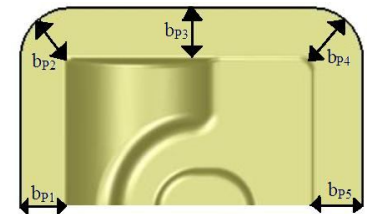
Através da tabela 4.6, é possível verificar que para a geratriz de seção quadrada, quando simulada via software Simufact.Forming 8.1, a maior largura média de rebarba ocorreu

junto ao ponto b_{P5} com 11,51mm, seguido dos pontos b_{P3} , b_{P4} , b_{P1} , b_{P2} com 8,62mm, 6,88mm, 6,01mm e 4,90mm, respectivamente. Com relação aos desvios padrão apresentados nas tabelas 4.3 e 4.6, nota-se, novamente, uma amplitude muito menor dos valores de desvio da simulação via software do que em plasticina. Porém, neste caso, o maior valor de desvio padrão ocorreu junto ao ponto b_{P2} com 0,21mm, seguido dos pontos b_{P3} e b_{P4} com 0,17mm, b_{P1} com 0,13mm e pelo ponto b_{P5} com 0,09mm. Essa variação também pode ser atribuída, entre outros fatores, ao sistema de medição e as condições de atrito estabelecidas (atrito constante, $m = 0,3$).

Assim, e a partir dos resultados da tabela 4.5, constata-se que a geratriz com seção quadrada apresentou grande concentração de material nas arestas representadas pelos pontos b_{P3} e b_{P5} , decaindo os valores de largura junto à aresta do ponto b_{P1} e aos cantos b_{P2} e b_{P4} .

Tabela 4.7 – Largura da rebarba das simulações via software – pré-forma com seção circular.

Foto	b_{P1} [mm]	b_{P2} [mm]	b_{P3} [mm]	b_{P4} [mm]	b_{P5} [mm]
1	6,33	6,37	9,75	7,17	7,73
	6,71	6,46	9,62	6,90	7,47
	6,33	6,57	9,75	6,90	7,35
	6,46	6,47	9,63	7,02	7,48
	6,46	6,46	9,88	6,64	7,35
\bar{b}_P [mm]	6,46	6,47	9,73	6,93	7,48
S_{bP} [mm]	0,16	0,07	0,11	0,19	0,16



Analisando a tabela 4.7 nota-se, que para a pré-forma de seção circular, quando simulada via Simufact.Forming 8.1, a maior largura média de rebarba ocorreu junto ao ponto b_{P3} com 9,73mm, seguido dos pontos b_{P5} , b_{P4} , b_{P2} , b_{P1} com 7,48mm, 6,93mm, 6,47mm e 6,46mm, respectivamente. Neste caso, foi verificada uma certa uniformidade junto aos cantos do grampo de 3/8" em relação às demais arestas, o que pode indicar que esta pré-forma, juntamente com a geratriz hexagonal, tende a garantir um melhor preenchimento da cavidade da matriz, do que as outras geratrizes simuladas.

Com relação aos desvios padrão apresentados na tabela 4.7, o maior valor desta grandeza ocorreu junto ao ponto b_{P4} com 0,19mm, seguido dos pontos b_{P1} e b_{P5} com 0,16mm, b_{P3} com 0,11mm e pelo ponto b_{P2} com 0,07mm. A partir das tabelas 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 foi possível elaborar um gráfico, representado na figura 4.3, com todos os valores médios e os desvios padrão das larguras de rebarba encontrados, e conforme cada ponto de verificação das geratrizes e da pré-forma simulada.

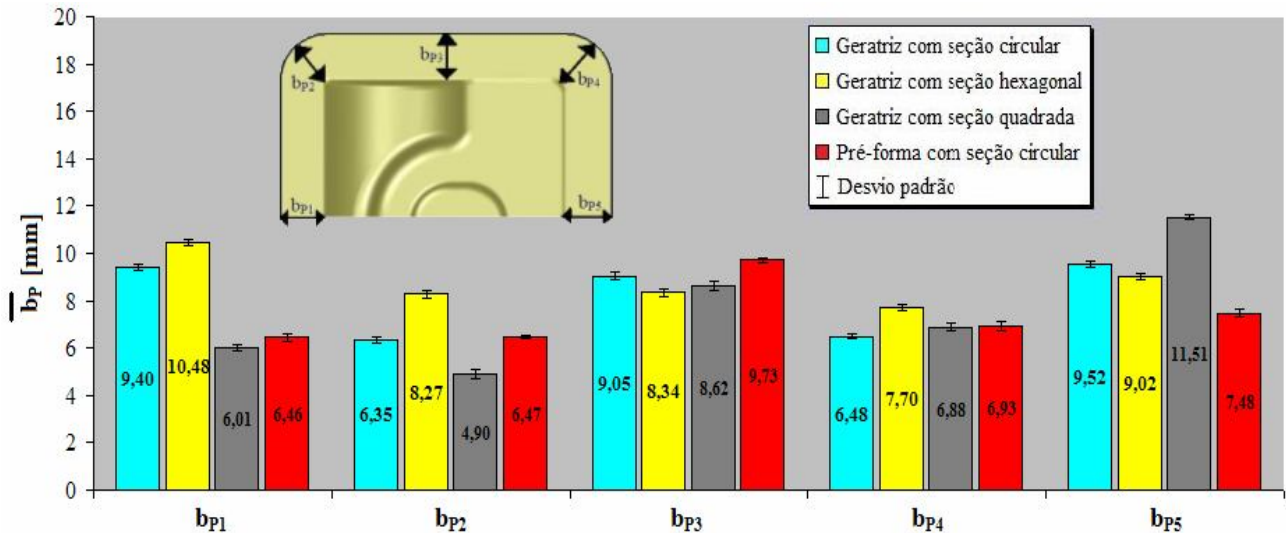


Figura 4.3 – Gráfico dos valores obtidos de \bar{b}_P em cada ponto de verificação e conforme as geratrizes analisadas nas simulações numérico-computacionais.

Nota-se, na figura 4.3, que adotando a geratriz de seção circular há maior probabilidade de rebarbas com baixa largura junto aos cantos, e elevados e semelhantes valores para as arestas do grampo de 3/8". Em contrapartida, a geratriz com seção hexagonal e a pré-forma foram aqueles sólidos que apresentaram maior regularidade na largura de rebarba se comparadas às demais geratrizes.

Por sua vez, a geratriz quadrada foi aquela que apresentou a menor largura de rebarba junto à região delimitada pelos pontos b_{P1} e b_{P2} , que justamente é aquela região frontal do grampo de 3/8", onde se concentra o maior raio da peça. Essa constatação, pode ser explicada em virtude da geratriz quadrada apresentar faces retas, que ao ser posicionada na matriz modelada em 3D, não permitem a projeção de material sobre o raio de concordância da matriz inferior, comportamento este que foi constatado em todas as demais geratrizes e, inclusive, na pré-forma.

4.2.2 Força e energia do processo

Com relação à força e à energia requerida ao forjamento simulado através do Simufact.Forming 8.1 foram elaborados gráficos representativos dessas grandezas, conforme as figuras 4.4 e 4.5, respectivamente. É importante salientar que visando propiciar uma correlação direta com o tipo de geratriz e pré-forma analisadas os gráficos das figuras 4.4 e 4.5 – apresentados a seguir, também utilizam o mesmo padrão de cores utilizado na análise gráfica das larguras das rebarbas, já apresentada nas figuras 4.2 e 4.3.

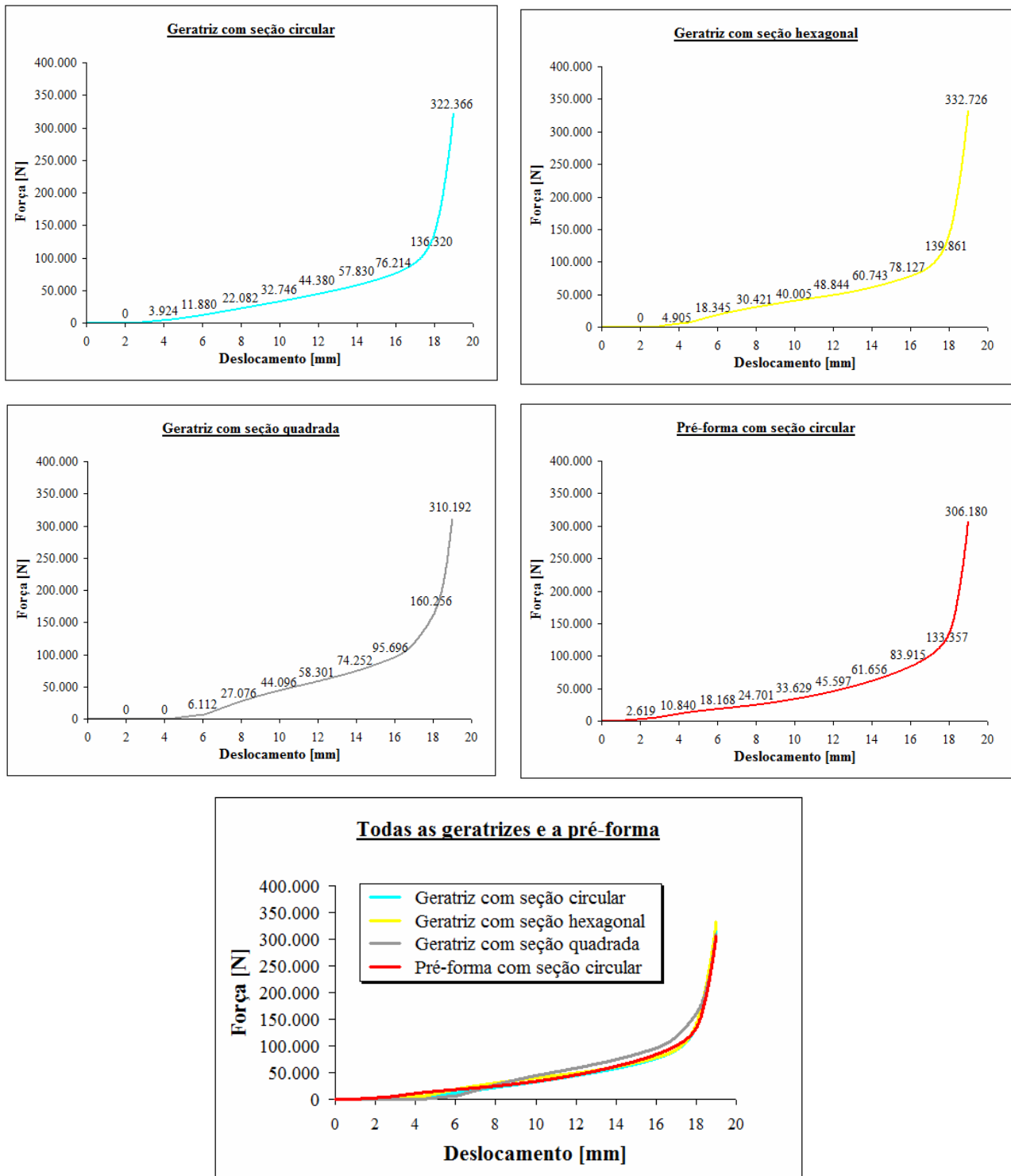


Figura 4.4 – Gráficos da força obtida nas simulações via software.

A partir dos gráficos da figura 4.4, com relação à força de forjamento, é possível notar que a pré-forma obteve o menor valor de força, igual a 306.180N, medido ao final do processo de deformação (deslocamento = 19mm), seguido da geratriz de seção quadrada com 310.192N, da geratriz com seção circular com 322.366N e, finalmente, pela geratriz com seção hexagonal com 332.726N. Porém, ficou evidenciado, através dos valores de força obtidos, que o comportamento dessa grandeza para os diferentes sólidos simulados varia durante o processo, ou

seja, apresenta valores diferentes conforme o deslocamento (ação) da matriz superior. Isto, é verificado, ao serem analisados os valores de força ao longo do deslocamento. Assim, para um deslocamento de 6mm, a geratriz com seção quadrada foi aquela que apresentou a menor força, igual a 6.112N, seguido da geratriz com seção circular, com 11.880N, da pré-forma com 18.168N, e da geratriz com seção hexagonal com 18.345N. Agora, para o deslocamento de 8mm, a geratriz com seção circular foi aquela que apresentou a menor força, igual a 22.082N, seguido da pré-forma, com 24.701N, da geratriz com seção quadrada com 27.076N, e da geratriz com seção hexagonal com 30.421N. E, assim por diante, fazendo o mesmo procedimento de análise para cada deslocamento identificado nos gráficos da figura 4.4, torna-se evidente que a geratriz de seção circular apresentou os menores resultados de força entre os deslocamentos de 8 a 16mm, do que os demais sólidos.

É importante lembrar que, a partir do desenvolvimento de uma curvatura acentuada no gráfico de força (que nesse caso ocorreu junto ao deslocamento de 16mm para todos os sólidos simulados) dá-se início à formação da rebarba. Nesta situação, as condições de atrito são ainda maiores do que no início da deformação, o que pode ter influenciado no comportamento das curvas de força ao final da deformação, além da quantidade de material e o comportamento de seu fluxo ao ser projetado para a bacia da rebarba, resultando na largura da rebarba.

Quanto à energia do processo, esta grandeza possui uma relação direta com a força utilizada no sistema e com o deslocamento (curso) para a deformação do material. Nesse sentido, o comportamento das curvas de energia, ilustradas na figura 4.5, se assemelharam às curvas de força da figura 4.4. Assim, foi verificado que a pré-forma alcançou o menor valor de energia ao final do processo, igual a 5.930J, seguido da geratriz de seção quadrada com 6.008J, da geratriz com seção circular com 6.244J e, finalmente, pela geratriz com seção hexagonal com 6.444J.

Novamente, como os valores de força, os valores de energia apresentaram variação quanto ao seu comportamento ao decorrer do deslocamento. Assim, na faixa de deslocamento entre 8mm e 16mm a geratriz de seção circular obteve os menores valores de energia se comparada às demais geratrizes e à pré-forma simulada, conforme expresso na figura 4.5.

Lange, 1994, p.11.39, destaca que “a estimativa ou cálculo das forças de forjamento em matriz fechada com rebarba podem ser obtidas de diferentes maneiras, ou seja, através de diversos métodos, todos baseados na determinação dos valores máximos”. Logo, e visando correlacionar os valores de força e energia obtidos durante as simulações com o Simufact.Forming 8.1, fez-se um levantamento das metodologias atualmente utilizadas para a previsão dessas grandezas, considerando forjamento a quente em matriz fechada.

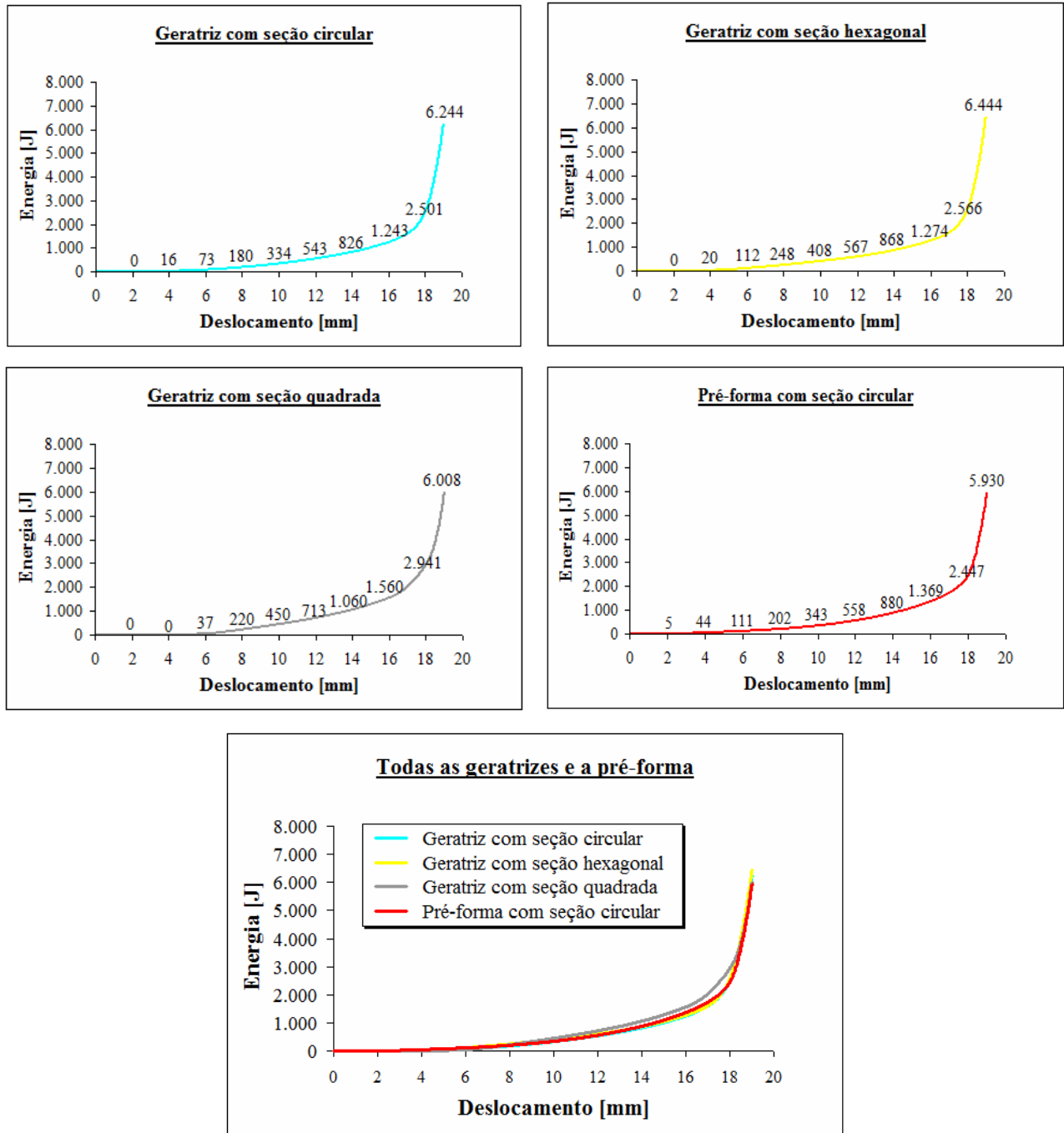


Figura 4.5 – Gráficos da energia obtida nas simulações via software.

Nos apêndices C, D e E são apresentados alguns métodos práticos para a estimativa da força e energia do forjamento (Método das Grandezas Equivalentes, Método de Lange e o Método de Makelt, respectivamente). Esses métodos são obtidos experimentalmente através de diagramas e formulações simples, e são amplamente difundidos na indústria de forjados, principalmente, devido à rapidez de suas respostas e aos poucos recursos necessários tanto em hardwares e softwares quanto no treinamento de pessoal.

Assim, fez-se uma correlação dos valores encontrados neste trabalho – resultantes das simulações via Simufact.Forming 8.1, com aqueles obtidos através dos métodos

apresentados nos apêndices C, D e E, sendo confeccionada a tabela 4.8. A partir desta tabela, e comparando os valores de força e energia, não foi possível verificar uma convergência de valores, principalmente, com relação aos Métodos das Grandezas Equivalentes e de Makelt. O método que alcançou os valores mais próximos aos obtidos via Simufact.Forming 8.1 foi o Método de Lange porém, e ainda assim, seus valores foram inferiores.

Tabela 4.8 – Valores de força e energia considerando os diferentes métodos, e o custo das geratrizes simuladas.

		Simufact. Forming 8.1	Método das Grandezas Equivalentes	Método de Lange	Método de Makelt	Custo da barra de 6m [R\$]
Geratriz com seção circular	Força [N]	322.366	272.085	206.530	1.468.033	69,96
	Energia [J]	6.244	1.585	4.000	27.893	
Geratriz com seção hexagonal	Força [N]	332.726	272.085	206.530	1.468.033	101,95
	Energia [J]	6.444	1.512	4.000	27.893	
Geratriz com seção quadrada	Força [N]	310.192	272.085	206.530	1.468.033	102,77
	Energia [J]	6.008	1.768	4.000	27.893	
Pré-forma com seção circular	Força [N]	306.180	272.085	206.530	1.468.033	
	Energia [J]	5.930	1.556	4.000	27.893	

Logo, e considerando apenas os valores obtidos via Simufact.Forming 8.1, não foi verificada uma diferença significativa, tanto da força quanto da energia exigida ao forjamento, que pudesse excluir qualquer um dos sólidos (geratrizes ou pré-forma) da possibilidade de se tornarem a matéria-prima do grampo de 3/8”. Essa constatação permite que o processo de fabricação deste grampo possua mais alternativas com relação à matéria-prima básica, não se limitando a apenas uma geometria. Isso acaba se tornando um diferencial competitivo para as empresas de forjados, já que aumenta a carteira de fornecedores devido à possibilidade de se trabalhar com diferentes bitolas de matérias-primas, além de possibilitar maior poder de negociação, visando o menor custo de matéria prima.

Nesse sentido, e reportando-se a metodologia apresentada neste trabalho – que almeja a qualidade contínua e a lucratividade das empresas de forjados, foi realizado um orçamento com as diferentes bitolas das matérias-primas simuladas. Este orçamento está presente junto ao anexo D, sendo o custo por barra de 6m de cada geratriz transcrito na última coluna da tabela 4.8. A partir da análise destes custos fica evidente que as barras trefiladas com seção circular tem custo mais acessível do que aquelas de seção quadrada ou hexagonal (sextavada), que por sua vez chegam a ser 45% mais caras.

4.3 ANÁLISE DA METODOLOGIA APLICADA

Analisando a metodologia proposta ao longo deste trabalho, e com relação às simulações físicas e numérico-computacionais, verificou-se a importância da otimização dos parâmetros de influência sobre o processo de forjamento em pró do desenvolvimento de produtos forjados de qualidade. Principalmente, com relação à redução na quantidade de rebarba (desperdício), mensuração da força e energia necessária. Essa constatação também pode ser atribuída à análise numérico-computacional, onde acredita-se haver maior confiabilidade com relação aos resultados de energia e força do que aqueles obtidos pelos métodos das Grandezas Equivalentes, de Makelt e de Lange. Vale ressaltar que esta premissa se fundamenta na medida em que todos os parâmetros de entrada utilizados nas simulações numérico-computacionais foram avaliados nas etapas de Projeto Informacional e Conceitual, retratando da maneira mais fiel possível o processo utilizado na fabricação do grampo de 3/8". Porém, esta constatação ainda deve ser verificada através de ensaios e medições experimentais, conforme defende a metodologia de desenvolvimento integrado apresentada.

Mesmo não sendo aplicada todas as etapas da metodologia proposta, devido às limitações deste trabalho, foi possível reduzir a quantidade de matéria-prima utilizada no grampo de 3/8". Pois, até então era utilizada uma geratriz com diâmetro de 22,22mm e comprimento de 52mm, sendo que todas as geratrizes simuladas tinham medidas inferiores a estas. Ou seja, além de se obter diferentes soluções (alternativas) de fabricação, principalmente, com relação ao tipo de matéria-prima utilizada para o grampo de 3/8", também foi possível a redução no consumo de material.

Durante a aplicação da metodologia ficou evidente o quão importante é ter informações concretas sobre as relações de custo *versus* benefícios envolvidos no forjamento, já que determinadas matérias-primas, adequadas tecnicamente à fabricação de um dado produto, podem elevar o custo de produção e comprometer a lucratividade da empresa. Logo, o controle e a otimização do consumo de matéria-prima e seu custo representam significativos diferenciais para as empresas de forjados, agregando qualidade e versatilidade e, conseqüente, lucratividade.

Assim, e a partir de mais análises e simulações, com diferentes produtos e processos de forjamento, a metodologia apresentada neste trabalho tende a se consolidar numa ferramenta de gestão ao desenvolvimento integrado de produtos forjados. Possuindo como embasamento os parâmetros de fabricação, os objetivos das empresas, a integração dos diferentes conhecimentos (prático e científico) e a utilização otimizada dos recursos disponíveis à fabricação de peças com elevada qualidade, superando os desejos e anseios dos clientes.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, com a aplicação da metodologia proposta para o desenvolvimento integrado de produto para forjamento, foi possível retirar algumas conclusões que atendem aos objetivos deste trabalho, sendo estas descritas a seguir.

Quanto à pesquisa acerca dos principais parâmetros envolvidos na deformação plástica, no forjamento e no projeto de componentes forjados, este trabalho viabilizou o desenvolvimento desses temas. Além disso, a análise destes assuntos e sua contextualização favorecem a metodologia apresentada, já que possibilita a outros profissionais – da área de conformação e forjamento, elevar seu conhecimento e, bem como, possibilitar maior discernimento sobre as condições exigidas e atuantes no processo.

Quanto às simulações físicas através de plasticina, e visando a otimização da geratriz utilizada no grampo de 3/8” com relação à largura da rebarba, foi verificado um comportamento semelhante em todas as geratrizes simuladas. Onde, preferencialmente, ocorreu um comprometimento da largura da rebarba junto aos cantos (vértices) do grampo de 3/8”, situação que também ficou evidenciada nas simulações através do Simufact.Forming 8.1.

A partir das simulações numérico-computacionais verificou-se, ainda, uma largura de rebarba mais homogênea para a geratriz de seção circular precedida de pré-forma (com distribuição de massa) do que para as demais geratrizes que foram simuladas sem previsão de pré-forma. Este comportamento pode ser atribuído, além de outros fatores, às condições de atrito e à relação entre a geometria da geratriz e a geometria final da peça forjada, evidenciando maior facilidade de fluxo na matriz, quando se produz uma distribuição prévia de massa. Outra constatação que se fez, utilizando o Simufact.Forming 8.1 para análise do forjamento, foi com relação ao comportamento dos valores de força e de energia obtidos em cada geratriz e a pré-forma simuladas. Os valores apresentaram variação durante o processo de deformação, e conforme o deslocamento da matriz, resultando nos seguintes valores máximos: 322.366N e 6.244J para a geratriz com seção circular, 332.726N e 6.444J para a geratriz com seção hexagonal, 310.192N e 6.008J para a geratriz com seção hexagonal e 306.180N e 5.930J para a pré-forma. A partir da análise dos valores de energia, a utilização das três cavidades da matriz se torna aceitável, já que multiplicando por três o valor de força obtido pela geratriz com seção hexagonal – que apresentou o maior valor de força, ainda assim, não se atinge a capacidade da prensa utilizada na etapa de forjamento. Porém, vale destacar que os valores de força e energia obtidos via software não apresentaram convergência com os valores obtidos pelos métodos das Grandezas Equivalente, de Lange e de Makelt, já que estes métodos simplificados não

consideram muitos dos fatores de influência atuantes na deformação, como: atrito, fator de forma, velocidade e tipo de maquinário, etc. Fatores estes, que são considerados pelo software utilizado nas análises numérico-computacionais.

Por fim, e a partir do custo de fornecimento da matéria-prima de cada geratriz, e aos resultados obtidos, pode-se prever que a geratriz de seção circular e a pré-forma são economicamente e tecnicamente mais viáveis do que as geratrizes de seção quadrada ou hexagonal. Sendo esta premissa fortemente influenciada pela questão custo e com relação à largura média da rebarba, já que os resultados quanto à força e energia das diferentes geratrizes e para a pré-forma, se mostraram muito próximos.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Analisar através de ensaios reais e instrumentados as diversas condições simuladas neste trabalho, visando verificar a convergência dos resultados obtidos com relação à força, à energia e à largura da rebarba do forjamento.

Correlacionar os resultados das simulações realizadas neste trabalho com o grau de tensões resultantes no material, bem como, do efeito dos parâmetros de influência sobre as propriedades mecânicas (ex.: dureza, tenacidade, etc.) do material simulado.

Aplicar a mesma metodologia, porém obtendo resultados através de simulações com o MEF, que também está disponível no Simufact.Forming 8.1.

Utilizar outros softwares de simulação, além do Simufact.Forming 8.1, visando elaborar um comparativo com os resultados obtidos neste trabalho.

Sugere-se avaliar os efeitos decorrentes da variação de outros parâmetros envolvidos no processo de forjamento, como: coeficientes de atrito, maquinários, taxas de deformação, temperaturas, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarenga, F. B., 2006, **Uma abordagem metodológica para o projeto de produtos inclusivos**. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Projeto Mecânico, Campinas, 218 p.

Assan, A. E., 2003, **Métodos dos elementos finitos: primeiros passos**. 2 ed., Campinas, SP, Unicamp, 299 p.

Billigmann, J., Feldmann, H. D., 1979, **Estampado e prensado a máquina**. Ed. Reverté, Barcelona.

Bortoli, A. L., 2000, **Introdução à dinâmica de fluídos computacional**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 134 p.

Bresciani Filho, E., et al., 1986, **Conformação plástica dos metais**. 3 ed., Campinas, SP, Unicamp, 234 p., 2v.

Bresciani Filho, E., et al., 1997, **Conformação plástica dos metais**. 5 ed., Campinas, SP, Unicamp, 385 p.

Brito, A. M. G., et al., 2002, **Utilização de simulações numéricas termo-mecânicas no estudo de componentes forjados**. Artigo publicado no V Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia (SEMNI), Madrid, 13 p.

Brito, A. M. G., et al., 2009, **Processos de obtenção de pré-formas na produção de forjados em matriz**. Artigo publicado na Revista Ferramental, jan.-fev., p. 15-21.

Buijk, A. J., 2009, **Finite volume (FV) and finite element (FE) integration in Simufact.forming**. Disponível em: www.simufact-americas.com/reference, acesso em: 28/10/2009.

Chiaverini, V., 1986, **Tecnologia mecânica**. 2. ed., São Paulo, McGraw-Hill, 2 e 3v.

Crout, C. J., 2009, **Equipamentos para forjamento: martelos**. Revista Forge, ed. 1.

Dieter, G. E., 1981, **Metalurgia mecânica**. 2. ed., Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 653 p.

Erxleben, S., Suttan, F., 2007, **Preforming processes in the production of forgings**. XI Conferência Internacional de Forjamento, Bento Gonçalves, 2007.

Ferreira, J. C., 2002, **Tecnologia da pulverometalurgia**. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, p. 32-33.

Flach, A., 2007, **Otimização de pré-forma para forjamento de chave combinada**. Trabalho de diplomação do curso de Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), 49 p.

Forjaço, 2009, **Equipamentos**. Disponível em: www.forjaco.com, acesso em: 01/10/09.

Fortuna, A. O., 2000, **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluídos – conceitos básicos e aplicações**. Edusp, 426 p.

Garcia, A., et al., 2000, **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro, LCT, 247 p.

Geier, M., 2007, **Considerações sobre o atrito para processos de forjamento a frio através do ensaio de compressão do anel**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Porto Alegre, 82 p.

Gerdau, 2009a, **Manual de aços especiais: aços construção mecânica**. Disponível em: www.gerdau.com.br, acesso em: 21/09/2009.

Gerdau, 2009b, **Catálogo de barras e perfis: barras trefiladas Gerdau**. Disponível em: www.gerdau.com.br, acesso em: 21/09/2009.

Grüning, K., 1973, **Técnica da conformação**. São Paulo, Polígono, 251 p.

Harrer, O., et al., 2005, **Microstructure simulation in radial forging of nickel base alloys**. In: International Esaform Conference on Material Forming, 8. 2005, The Romanian Academy, v.1, p.515-518.

Helman, H., Cetlin, P. R., 1983, **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. Rio de Janeiro, RJ, Guanabara Dois, 171 p.

Hentz, E. A., et al., 2007, **Influência da curva de escoamento na simulação computacional do processo de forjamento a quente da liga de titânio Ti-6Al-4V**. Artigo publicado na Ciência & Engenharia, v. 16, n.1/2, p. 53-59, jan.-dez.

Jarreta, D. D., et al., 2008, **Análise crítica da base de dados de programa de simulação numérica para conformação a quente da liga VAT® 718**. Artigo publicado na Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v. 5, n.1, p. 28-34, jul.-set.

Kobayashi, S., et al., 1989, **Metal forming and finite-element method**. New York: Oxford University Press, 377 p.

Kuhlman, G. W., 1988, **Metals Handbook: Forging of Titanium Alloys**. ed. 9, v.14, ASM, Metals Park, Ohio, p. 267-287.

LdSM, 2009, **Metais – Ferrosos – À baixo teor de carbono**. Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM). Disponível em: www.ndsm.ufrgs.br, acesso em: 10/11/2009.

Lange, K., 1994, **Handbook of metal forming**. Society of Manufactores Engineers (SME), Dearborn, Michigan, cap 11.

Lenhard Júnior, A. L., 2007, **Análise da influência das propriedades do material e parâmetros do processo na simulação numérica do processo de forjamento**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Porto Alegre, 78 p.

Lindner, H., 1965, **Bulk forging of steel between 600 and 900 °C**. Dr. Ing. Thesis, Technische Universität, Hannover.

Lino, F. J., et al., 2006, **Utilização da prototipagem rápida no apoio ao desenvolvimento de produtos forjados e fundidos**. Artigo publicado nos anais do XXVI Senafor (IX Conferência Nacional de Conformação de Chapas), 12 p.

Löwven, J., 1971, **Ein beitrage zur bestimmungdes reibungszustandesbeim gesenkschmieden**. Technische Universität, Hannover, Doktor Arbeit.

Maxiforja, 2009, **Produtos automotivos e agrícolas**. Disponível em: www.maxiforja.com.br, acesso em: 10/03/09.

Mendonça, A. A., 1995, **Desenvolvimento de fio-máquina de aço ultra baixo carbono para estampagem a frio**. Dissertação de mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, MG.

Metals Handbook, 1988, **Forging and casting**. [s.l], v.5, 7a.

Norton, R. L., 2004, **Projeto de máquinas - Uma abordagem integrada**. São Paulo, Bookman, 931 p.

Pacheco, J. L., 2007, **Apostila da disciplina de Fabricação por Deformação**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), 51 p.

Pahl, G., et al., 2005, **Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações**. Edgard Blücher, São Paulo. 411 p.

Peres, G. C., 2002, **Comparação de métodos da análise de processo de forjamento**. Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica, 2000/2001, Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS, 23 p.

Pertence, A. E. M., Cetlin, P. R., 1998, **Analysis of a new model material for the physical simulation of metal forming**. Journal of Materials Processing Technology.

Pye, D., 2009, **Técnicas de modificação de superfície para matrizes de forjamento**. Revista Forge, 1 ed., jan., p. 18-21.

Ribeiro, J. D., 1993, **Avaliação do atrito no forjamento**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Porto Alegre, 111 p.

Rodrigues, J. M. C., Martins, P., 2005, **Tecnologia mecânica: tecnologia da deformação**. Lisboa, Escolar, v. 1 e 2, 695 e 742 p.

Rojas, P. A. M., 2003, **Otimização de pré-formas e matrizes em problemas bidimensionais de forjamento**. Tese de doutorado apresentada ao PROMEC/UFRGS, 228 p.

Rossi, M., 1971a, **Estampado en caliente de los metales**. Barcelona, Hoepli, 387 p.

Santos, M. R., et al., 2006, **Simulações física e numérica de rotas alternativas para a fabricação de parafuso de rosca métrica**. Artigo apresentado no 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 12 p.

Silva, R. F., Costa, C. E., 2006, **Forjamento e extrusão de pré-formas de alumínio obtidas pela metalurgia do pó**. Artigo apresentado no XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia (CRICTE 2006) e VI Feira de Protótipos. UNIJUI, 2p.

Simufact, 2008, **User guide Simufact.Forming 8.1**. Simufact Engineering GmbH, 109 p.

Sindiforja, 2009, **Panorama da indústria: dados de produção atual e situação do setor na estrutura nacional e internacional**. Disponível em: www.sindiforja.org.br, acesso em: 16/06/2009.

Society of Automotive Engineers, 2001, **Chemical compositions of SAE carbon steels: SAE J403**. SAE Iron and Steel Technical Committee Division I – Carbon and Alloy Steels.

Souza, E. N., et al., 2008, **Otimização do perfil de velocidade de uma prensa hidráulica de forjamento através de simulação por elementos finitos**. Artigo publicado na revista Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.4, n.3, p. 7-12, jan.-mar.

Stöter, J., 1960, **Investigation of the hammer and press forging operations with special reference to rising**. Köln/Opladen, Westdeutscher Verlag.

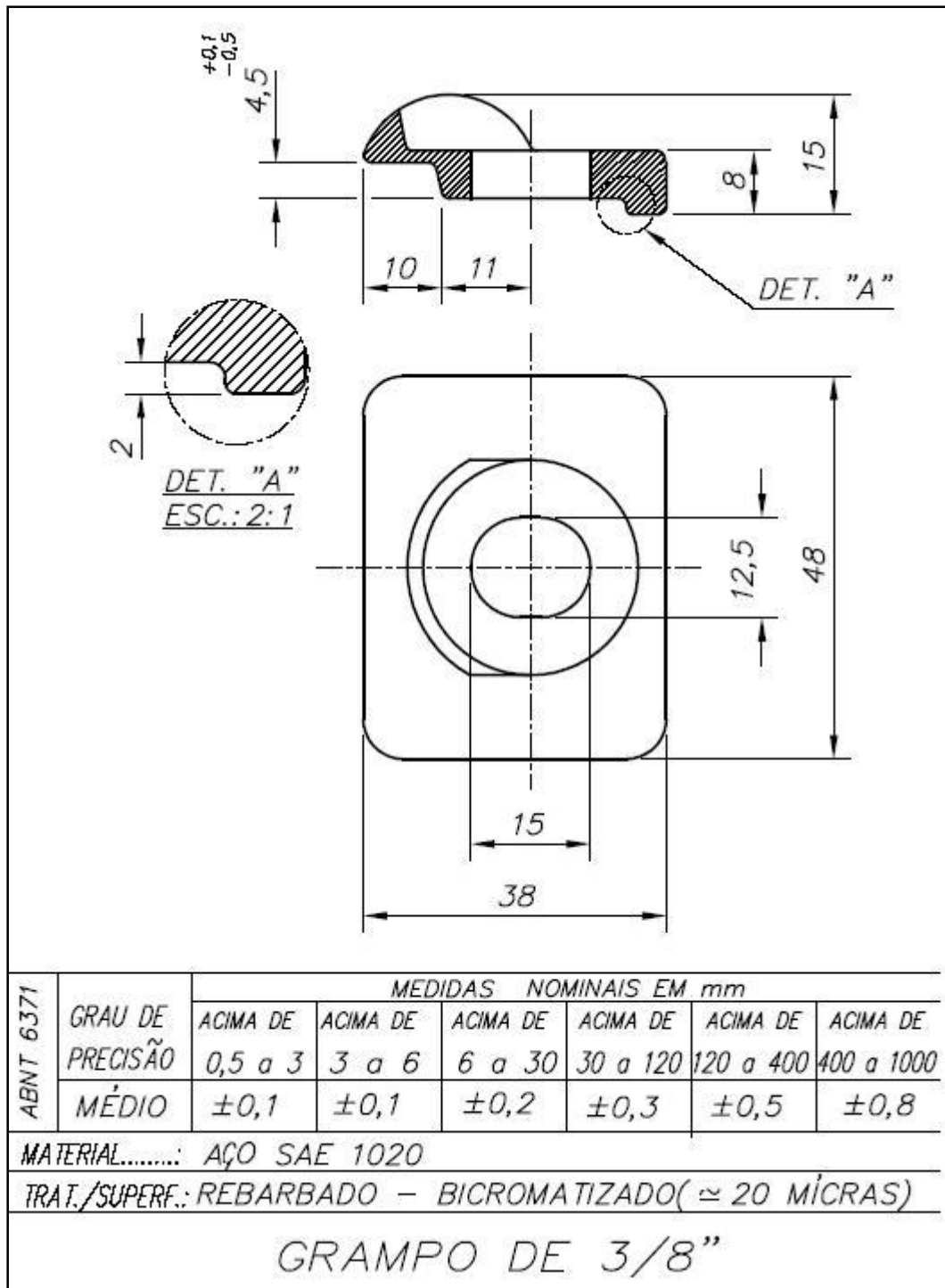
Virtual Máquinas, 2009, **Máquinas novas para forjaria: catálogo Yiyou**. Disponível em: www.virtualmaquinas.com.br/maquinas/novas/forjaria/Catalogo_Yiyou.pdf, acesso em: 01/10/09.

Wagoner, R. H., Chenot, J. L., 1996, **Fundamentals of metal forming**. New York, John Wiley and Sons, 385 p.

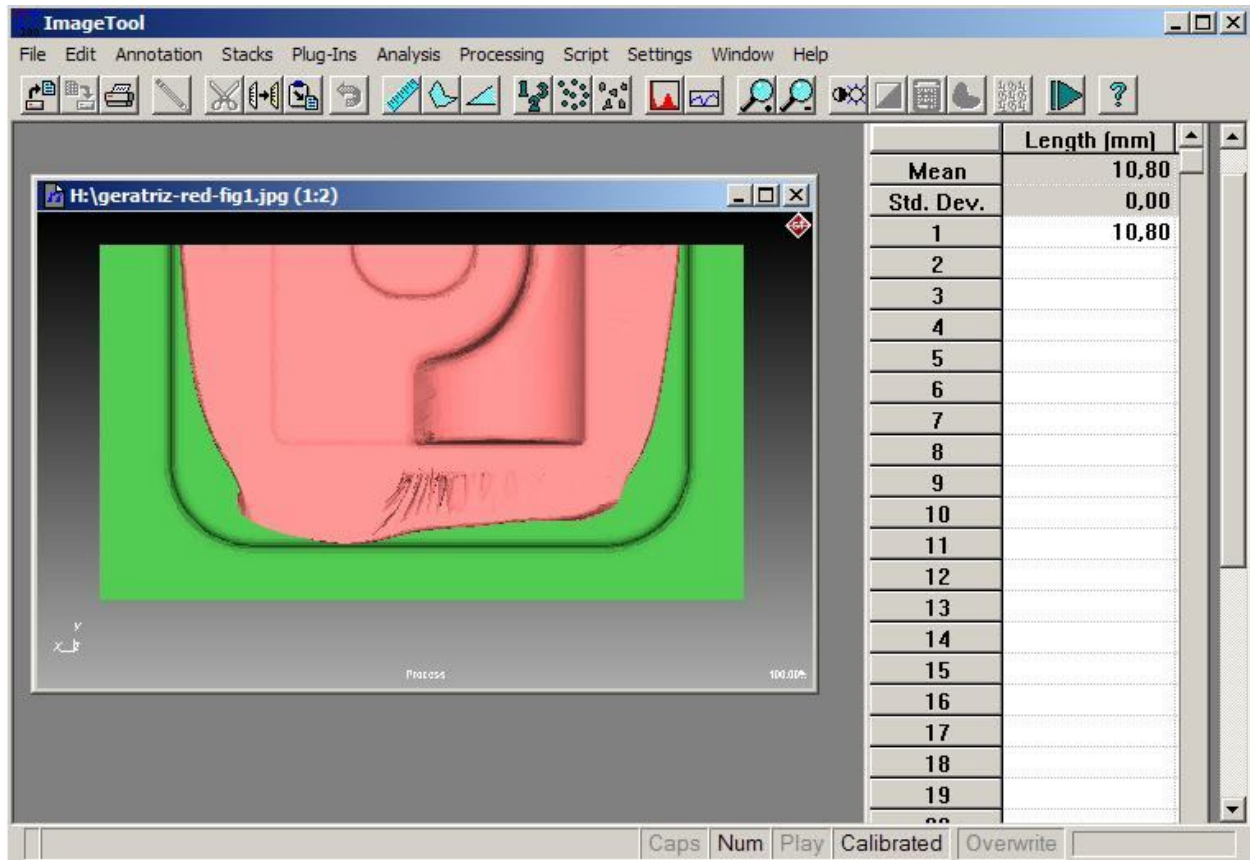
Weisheimer, G. K., et al., 2005, **Simulação do forjamento a frio de cruzeta de pequeno porte utilizando os aços ABNT 1020 e 16MnCr5**. Artigo apresentado no VI Encontro de Iniciação Científica – Labor. de Fenômenos de Superfície, 18-19 de abril de 2005, p. 15-18.

Zdilla, J., Poole, D., 2009, **Uma visão mais próxima dos lubrificantes para forjamento**. Revista Forge, ed. 1, jan., p. 12-16.

APÊNDICE A – DESENHO DO GRAMPO DE 3/8”.



APÊNDICE B – ÁREA DE TRABALHO DO SOFTWARE IMAGETOOL 3.0.



APÊNDICE C – CÁLCULO DA FORÇA E ENERGIA DE FORJAMENTO PELO MÉTODO DAS GRANDEZAS EQUIVALENTES.

A metodologia das grandezas equivalentes para o cálculo da força e energia de forjamento é um método que não considera condições de atrito, complexidade de forma da peça que se deseja produzir, tipo de máquina, etc. Possui formulações simples, porém seus resultados apresentam baixa confiabilidade, servindo apenas como uma aproximação quando não se possuem métodos mais confiáveis e/ou resultados obtidos por simulações ou ensaios.

Através desta metodologia é possível de obter, além da força e energia, a taxa de deformação do processo. Porém, é necessário destacar que esta metodologia utiliza a tensão de escoamento em forjamento a quente “ σ_{ef} ”, que considera a temperatura de forjamento e a taxa de deformação, parâmetros que podem ser encontrados no trabalho de Lange, 1994, p. 11.19. A seguir, é detalhado este método para cada geratriz e para a pré-forma analisada neste trabalho.

C.1 – Para a geratriz com seção circular:

Parâmetros utilizados:

$R_{i-com} = 10,47\text{mm};$	$A_{seção-com} = 344,38 \text{ mm}^2;$
$\text{Comprimento} = 44,27\text{mm};$	$V_G = 15.245,70 \text{ mm}^3;$
$Ap^* = 3.401,06\text{mm}^2;$	Material = ABNT/SAE/AISI 1020;
$\sigma_{ef} = 80\text{MPa} = 80\text{N/mm}^2;$	Velocidade da prensa “ V_{prensa} ” = 450mm/s;
Forjamento a quente: σ_{ef} = constante durante o processo.	

$1^\circ) A_G = [2 \cdot (R_{i-com})] \cdot \text{Comprimento}$	$2^\circ) \varphi_{eq} = \ln \frac{Ap^*}{A_G}$	$3^\circ) \dot{\varphi}_{eq} = \left(\frac{V_{prensa}}{2 \cdot (R_{i-com})} \right) \cdot e^{-\varphi_{eq}}$
$A_G = [2 \cdot (10,47)] \cdot 44,27$	$\varphi_{eq} = \ln \frac{3.401,06}{927,01}$	$\dot{\varphi}_{eq} = \left(\frac{450}{2 \cdot (10,47)} \right) \cdot e^{-1,3}$
$A_G = 927,01\text{mm}^2$	$\varphi_{eq} \cong 1,30$	$\dot{\varphi}_{eq} \cong 5,86\text{s}^{-1}$
$4^\circ) \text{Força} = Ap^* \cdot (\sigma_{ef})$	$5^\circ) \text{Energia} = V_G \cdot (\sigma_{ef}) \cdot \varphi_{eq}$	
$\text{Força} = 3.401,06 \cdot (80)$	$\text{Energia} = 15.245,70 \cdot (80) \cdot 1,30$	
$\text{Força} \cong 272.085\text{N}$	$\text{Energia} \cong 1.585.553\text{Nmm} \cong 1.585\text{J}$	

C.2 – Para a geratriz com seção hexagonal:

Parâmetros utilizados:

$H_{i-com} = 20,64\text{mm};$	Raio da circunferência circunscrita “ R_{cir} ” = 11,915mm;
$A_{seção-com} = 369,15 \text{ mm}^2;$	Comprimento = 41,30mm;
$V_G = 15.245,90 \text{ mm}^3;$	$Ap^* = 3.401,06\text{mm}^2;$

$$\sigma_{ef} = 80\text{MPa} = 80\text{N/mm}^2;$$

$$V_{prensa} = 450\text{mm/s};$$

Material = ABNT/SAE/AISI 1020;
Forjamento a quente: σ_{ef} = constante durante o processo.

$$1^\circ) A_G = [2 \cdot (R_{cir})] \cdot \text{Comprimento}$$

$$A_G = [2 \cdot (11,915)] \cdot 41,30$$

$$A_G = 984,18\text{mm}^2$$

$$2^\circ) \varphi_{eq} = \ln \frac{Ap^*}{A_G}$$

$$\varphi_{eq} = \ln \frac{3.401,06}{984,18}$$

$$\varphi_{eq} \cong 1,24$$

$$3^\circ) \dot{\varphi}_{eq} = \left(\frac{V_{prensa}}{H_{i-com}} \right) \cdot e^{-\varphi_{eq}}$$

$$\dot{\varphi}_{eq} = \left(\frac{450}{20,64} \right) \cdot e^{-1,24}$$

$$\dot{\varphi}_{eq} \cong 6,31\text{s}^{-1}$$

$$4^\circ) \text{Força} = Ap^* \cdot (\sigma_{ef})$$

$$\text{Força} = 3.401,06 \cdot (80)$$

$$\text{Força} \cong 272.085\text{N}$$

$$5^\circ) \text{Energia} = V_G \cdot (\sigma_{ef}) \cdot \varphi_{eq}$$

$$\text{Energia} = 15.245,90 \cdot (80) \cdot 1,24$$

$$\text{Energia} \cong 1.512.393\text{Nmm} \cong 1.512\text{J}$$

C.3 – Para a geratriz com seção quadrada:

Parâmetros utilizados:

$$L_{i-com} = 19,05\text{mm};$$

$$\text{Comprimento} = 42,01\text{mm};$$

$$Ap^* = 3.401,06\text{mm}^2;$$

$$\sigma_{ef} = 80\text{MPa} = 80\text{N/mm}^2;$$

$$\text{Forjamento a quente: } \sigma_{ef} = \text{constante durante o processo.}$$

$$A_{seção-com} = 362,90\text{mm}^2;$$

$$V_G = 15.245,43\text{mm}^3;$$

$$\text{Material} = \text{ABNT/SAE/AISI 1020};$$

$$V_{prensa} = 450\text{mm/s};$$

$$1^\circ) A_G = (L_{i-com}) \cdot \text{Comprimento}$$

$$A_G = (19,05) \cdot 42,01$$

$$A_G = 800,30\text{mm}^2$$

$$2^\circ) \varphi_{eq} = \ln \frac{Ap^*}{A_G}$$

$$\varphi_{eq} = \ln \frac{3.401,06}{800,30}$$

$$\varphi_{eq} \cong 1,45$$

$$3^\circ) \dot{\varphi}_{eq} = \left(\frac{V_{prensa}}{L_{i-com}} \right) \cdot e^{-\varphi_{eq}}$$

$$\dot{\varphi}_{eq} = \left(\frac{450}{19,05} \right) \cdot e^{-1,45}$$

$$\dot{\varphi}_{eq} \cong 5,54\text{s}^{-1}$$

$$4^\circ) \text{Força} = Ap^* \cdot (\sigma_{ef})$$

$$\text{Força} = 3.401,06 \cdot (80)$$

$$\text{Força} \cong 272.085\text{N}$$

$$5^\circ) \text{Energia} = V_G \cdot (\sigma_{ef}) \cdot \varphi_{eq}$$

$$\text{Energia} = 15.245,43 \cdot (80) \cdot 1,45$$

$$\text{Energia} \cong 1.768.470\text{Nmm} \cong 1.768\text{J}$$

C.4 – Para a pré-forma com seção circular:

Parâmetros utilizados:

$$\text{Raio máximo da seção "R}_{i-\text{máx}} = 19,05\text{mm (obtido através do SolidWorks 2009);}$$

$$A_{seção-com} = \text{variável};$$

$$V_G = 15.317,90\text{mm}^3 \text{ (obtido através do SolidWorks 2009);}$$

$$Ap^* = 3.401,06\text{mm}^2;$$

$$\sigma_{ef} = 80\text{MPa} = 80\text{N/mm}^2;$$

$$\text{Forjamento a quente: } \sigma_{ef} = \text{constante durante o processo.}$$

$$\text{Comprimento} = 48\text{mm};$$

$$\text{Material} = \text{ABNT/SAE/AISI 1020};$$

$$V_{prensa} = 450\text{mm/s};$$

$$1^\circ) A_G = 954,75 \text{ mm}^2$$

(Obtido _via _SolidWorks2009)

$$2^\circ) \varphi_{eq} = \ln \frac{Ap^*}{A_G}$$

$$\varphi_{eq} = \ln \frac{3.401,06}{954,75}$$

$$\varphi_{eq} \cong 1,27$$

$$3^\circ) \dot{\varphi}_{eq} = \left(\frac{V_{prensa}}{2 \cdot (R_{i-máx})} \right) \cdot e^{-\varphi_{eq}}$$

$$\dot{\varphi}_{eq} = \left(\frac{450}{2 \cdot (12,525)} \right) \cdot e^{-1,27}$$

$$\dot{\varphi}_{eq} \cong 5,04 \text{ s}^{-1}$$

$$4^\circ) \text{Força} = Ap^* \cdot (\sigma_{ef})$$

$$\text{Força} = 3.401,06 \cdot (80)$$

$$\text{Força} \cong 272.085 \text{ N}$$

$$5^\circ) \text{Energia} = V_G \cdot (\sigma_{ef}) \cdot \varphi_{eq}$$

$$\text{Energia} = 15.317,90 \cdot (80) \cdot 1,27$$

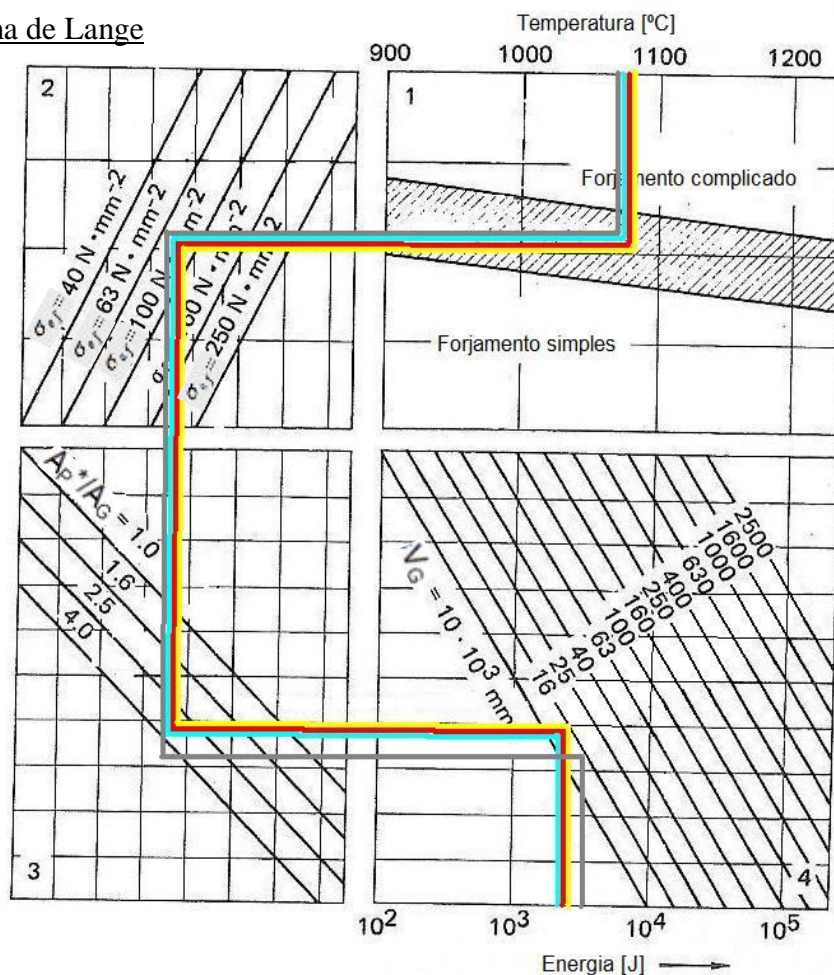
$$\text{Energia} \cong 1.556.299 \text{ Nmm} \cong 1.556 \text{ J}$$

APÊNDICE D – CÁLCULO DA FORÇA E ENERGIA DE FORJAMENTO PELO MÉTODO DE LANGE.





Lange, 1994, p. 11.43, apresenta um diagrama para a previsão da energia e da força para um processo de forjamento em matriz fechada com rebarba, que pode ser aplicado para materiais de baixo carbono e aços de baixa liga. Neste diagrama, que está representado abaixo, a energia resultante do processo é obtida através de considerações acerca do processo, como: temperatura de forjamento do material, tensão de escoamento em forjamento a quente, relação da área inicial da geratriz ou pré-forma com a área final projetada com a rebarba, além do volume de material. Posteriormente, a força pode ser obtida considerando-se o curso utilizado para a deformação.

Da mesma forma que a metodologia das grandezas equivalentes, o diagrama de Lange deve ser utilizado como uma aproximação quando não se possuem métodos mais confiáveis e/ou resultados obtidos por simulações ou ensaios. Já que, neste diagrama, não são utilizados parâmetros com relação às condições de atrito, complexidade de forma, tipo de máquina, taxa de deformação, etc. Isto acarreta, em muitos casos, valores idênticos de força e energia mesmo que as condições iniciais de forma e atrito das peças sejam diferentes.

D.1 – Diagrama de Lange



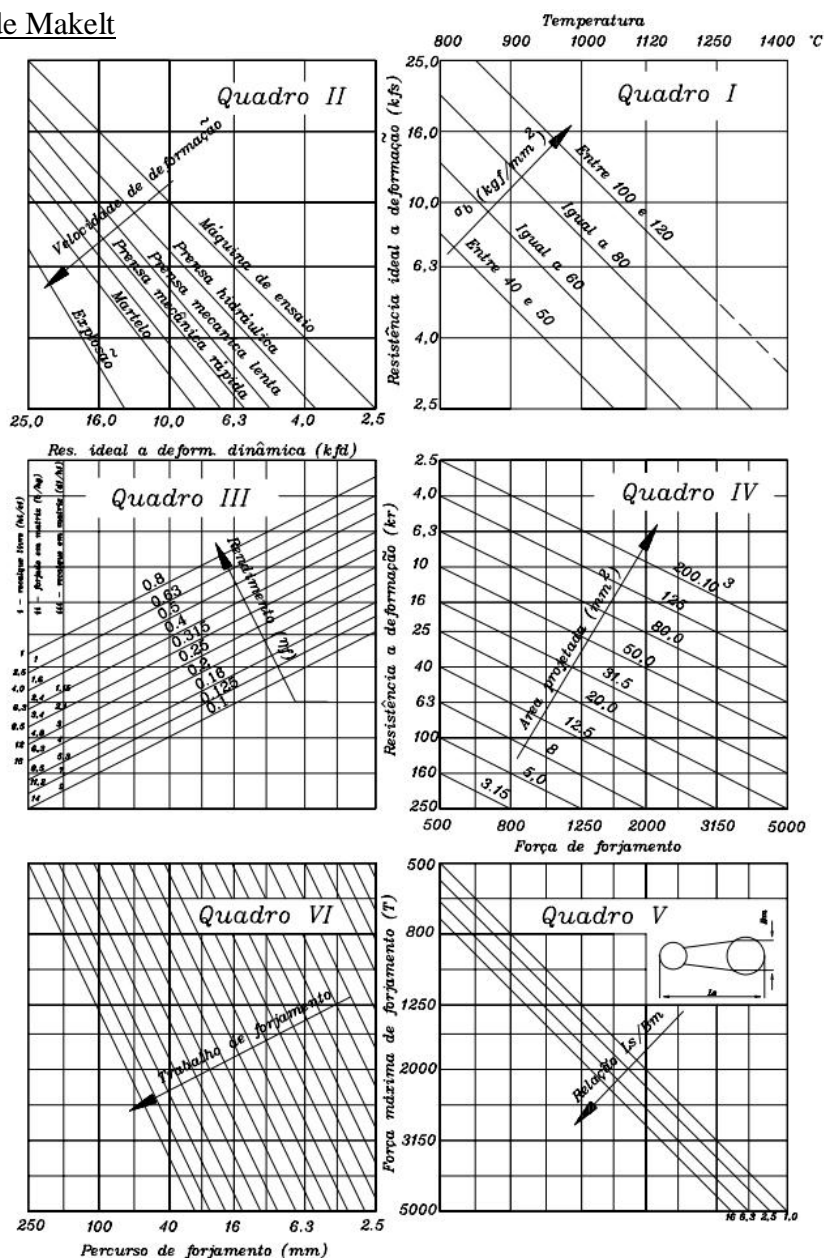
D.2 – Obtenção da força e energia necessária ao forjamento do grampo de 3/8” através do diagrama de Lange:

Parâmetros	Geratriz com seção circular 	Geratriz com seção hexagonal 	Geratriz com seção quadrada 	Pré-forma com seção circular 
A_G [mm ²]	927,01	984,18	800,30	954,75
A_P^* [mm ²]	3.401,06	3.401,06	3.401,06	3.401,06
A_P^*/A_G	3,67	3,45	4,25	3,56
V_G [mm ³]	15.245,70	15.245,90	15.245,43	15.317,90
Energia [J]	≈ 4.000	≈ 4.000	≈ 5.000	≈ 4.000
Curso para deformação [m]	0,019	0,019	0,019	0,019
Força [N]	≈ 206.530	≈ 206.530	≈ 258.160	≈ 206.530

APÊNDICE E – CÁLCULO DA FORÇA E ENERGIA DE FORJAMENTO PELO MÉTODO DE MAKELT.

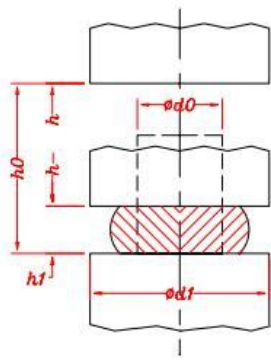
O método de Makelt é apresentado no trabalho de Billigmann e Feldmann, 1979, e também citado por Grüning, 1973, sendo um método baseado num diagrama com seis quadros, visando à previsão aproximada da força e energia ao final do processo de forjamento. Ao contrário das metodologias das grandezas equivalentes e de Lange, o diagrama de Makelt faz considerações a respeito do maquinário, do rendimento do processo, da forma final da peça forjada e da tensão limite de resistência à tração “ σ_B ”. Além, da temperatura de forjamento, da área projetada e do percurso de forjamento. Através do diagrama de Makelt é possível ainda obter de maneira analítica todos os parâmetros desejados, já que são conhecidas as equações de cada quadro do diagrama.

E.1 – Diagrama de Makelt

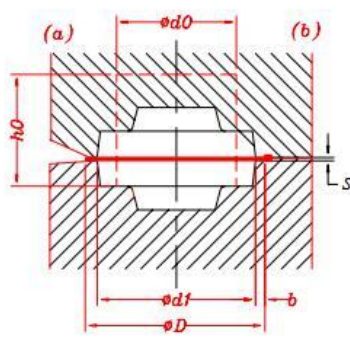


E.2 – Parâmetros e equações utilizadas no diagrama de Makelt:

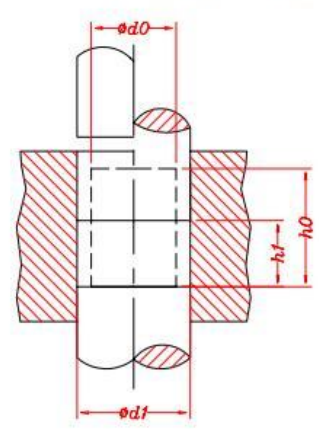
i. forjamento em matriz aberta



ii. forjamento em matriz fechada com saída de rebarbas livre (a) e em bacia (b)



iii. recalque em matriz fechada



Quadro I :

σ_B entre 40 e 50 kgf/mm² → $Kfs = 0,112 \cdot 10^{14} \cdot T^{-4,18}$

σ_B igual a 60 kgf/mm² → $Kfs = 0,487 \cdot 10^{13} \cdot T^{-4,0}$

σ_B igual a 80 kgf/mm² → $Kfs = 0,146 \cdot 10^{14} \cdot T^{-4,09}$

σ_B entre 100 e 120 kgf/mm² → $Kfs = 0,180 \cdot 10^{15} \cdot T^{-4,39}$

Quadro II :

Máquinas de ensaio → $Kfd = Kfs$

Prensa Hidráulica → $Kfd = 1,47 \cdot Kfs^{0,95}$

Prensa mecânica lenta → $Kfd = 2,59 \cdot Kfs^{0,84}$

Prensa mecânica rápida → $Kfd = 3,5 \cdot Kfs^{0,76}$

Quadro III :

	Rendimento	a	b	Rendimento	a	b
$Kr = a \cdot (Kfd)^b$	0,8	1,26	1	0,25	3,84	1,02
	0,63	1,71	0,952	0,2	4,15	1,12
	0,5	2,14	0,952	0,16	6,15	1,02
	0,4	2,78	0,909	0,125	7,34	1,06
	0,375	2,94	1,05	0,1	9,84	1,02

Quadro IV : $F_{forj} = Kr \cdot Ap$

Quadro V :

$Ls/Bm = 1$ → $Fm = 0,979 \cdot Fs$

$Ls/Bm = 2,5$ → $Fm = 1,31 \cdot Fs^{0,98}$

$Ls/Bm = 6,3$ → $Fm = 1,46 \cdot Fs^{0,98}$

$Ls/Bm = 16,0$ → $Fm = 1,63 \cdot Fs^{0,98}$

E.3 – Obtenção da força e energia necessária ao forjamento do grampo de 3/8”:

1°)

$$\sigma_B = 450 \text{ MPa} = 450 \text{ N/mm}^2$$

$$Kfs = 0,112 \cdot (10^{14}) \cdot T^{-4,18}$$

$$Kfs = 0,112 \cdot (10^{14}) \cdot 1070^{-4,18}$$

$$Kfs \cong 2,43 \text{ kgf/mm}^2$$

$$Kfs \cong 23,84 \text{ N/mm}^2$$

4°)

$$h = 0,16 \therefore a = 6,15 \therefore b = 1,02$$

$$Kr = a \cdot (Kfd)^b$$

$$Kr = 6,15 \cdot (6,87)^{1,02}$$

$$Kr \cong 44 \text{ kgf/mm}^2$$

$$Kr \cong 431,64 \text{ N/mm}^2$$

2°) Prensa mecânica rápida

$$Kfd = 3,5 \cdot (Kfs)^{0,76}$$

$$Kfd = 3,5 \cdot (2,43)^{0,76}$$

$$Kfd \cong 6,87 \text{ kgf/mm}^2$$

$$Kfd \cong 67,39 \text{ N/mm}^2$$

5°)

$$Ap^* = 3.401,06 \text{ mm}^2$$

$$\text{Força} = Kr \cdot (Ap^*)$$

$$\text{Força} = 431,64 \cdot (3.401,06)$$

$$\text{Força} \cong 1.468.033 \text{ N}$$

3°) Forjamento em matriz fechada com rebarba e bacia (ii)

$$hg = s = 1 \text{ mm}$$

$$b = 8 \text{ mm}$$

$$b/s = 8 \text{ mm}$$

$$h \cong 0,16$$

6°)

$$\text{Energia} = \text{Força} \cdot (\text{curso})$$

$$\text{Energia} = 1.468.033 \text{ N} \cdot (0,019 \text{ m})$$

$$\text{Energia} \cong 27.893 \text{ J}$$

ANEXO A – VALORES TÍPICOS DE ATRITO CONFORME O PROCESSO.

Fonte: [Helman e Cetlin, 1983, p. 46].

Valores de μ para diferentes processos	μ
A – Laminação a frio	
Aço ao C – cilindro de aço polido – lubrificada	0,04 a 0,05
Aço ao C – cilindro de aço polido – imersão – boa lubrificação	0,05 a 0,10
Aço ao C – cilindro rugoso (“sand blast”)	0,30
Al, Cu e Pb – cilindro de aço polido	0,10
Al, Cu e Pb – cilindro rugoso	0,40
A’ – Laminação a quente	
Aço ao C – cilindro de aço – 400 a 900°C	0,40
Aço ao C – cilindro de aço – 1000°C	0,30
Aço ao C – cilindro de aço – 1100°C	0,20
Aço ao C – cilindro fundido (aprox. 50% maior)	
Alumínio – cilindro de aço – 375°C	0,54
Cobre – cilindro de aço – 750°C	0,35
Níquel e chumbo – cilindro de aço – 90 e 180°C	0,32
Bismuto e cádmio – cilindro de aço – 150 e 180°C	0,25
Estanho e zinco – cilindro de aço – 100 e 110°C	0,17
B – Trefilação	
Aço ao C – matriz CW – diferentes lubrificantes	0,03 a 0,06
Cobre – matriz CW – lubrificação forçada de óleo	0,06
Latão – matriz de aço – lubrificação forçada de óleo	0,10
Cobre e inox – matriz CW – cera	0,07
Cobre e inox – matriz CW – azeites minerais	0,30
C – Estampagem profunda	
Alumínio – lubrificado com sebo	0,10
Cobre – lubrificado com óleo sob pressão	0,15
Latão – lubrificado com óleo sob pressão	0,08 a 0,12
Bronze – lubrificado com óleo sob pressão	0,14

ANEXO B – CATÁLOGO COMERCIAL DE BARRAS TREFILADAS.

Fonte: [Gerdau, 2009b].

||||| BARRA REDONDA TREFILADA GERDAU

Com uma ampla série de bitolas e fornecida nas medidas de 5 a 7 m, é empregada nas indústrias parafuseira, de utilidades domésticas, de bicicleta, de eletroferragem, automobilística e de máquinas e implementos agrícolas.



Bitola	Tolerância	Peso Nominal	Bitola	Tolerância	Peso Nominal	Bitola	Tolerância	Peso Nominal	Bitola	Tolerância	Peso Nominal
d (mm)	mm	kg/m	d (mm)	mm	kg/m	d (mm)	mm	kg/m	d (mm)	mm	kg/m
3,97	+0/-0,08	0,097	12,70	+0/-0,11	0,994	22,22	+0/-0,13	3,044	41,28	+0/-0,16	10,506
4,76	+0/-0,08	0,140	13,30	+0/-0,11	1,091	23,15	+0/-0,13	3,304	44,45	+0/-0,16	12,182
5,00	+0/-0,08	0,154	14,00	+0/-0,11	1,208	23,81	+0/-0,13	3,495	45,00	+0/-0,16	12,485
5,50	+0/-0,08	0,187	14,28	+0/-0,11	1,257	25,00	+0/-0,13	3,853	46,00	+0/-0,16	13,046
6,00	+0/-0,08	0,222	14,35	+0/-0,11	1,270	25,20	+0/-0,13	3,915	47,62	+0/-0,16	13,981
6,35	+0/-0,09	0,249	14,50	+0/-0,11	1,296	25,30	+0/-0,13	3,946	50,00	+0/-0,16	15,413
6,90	+0/-0,09	0,294	15,00	+0/-0,11	1,387	25,40	+0/-0,13	3,978	50,80	+0/-0,19	15,911
7,00	+0/-0,09	0,302	15,88	+0/-0,11	1,555	26,00	+0/-0,13	4,168	53,98	+0/-0,19	17,965
7,94	+0/-0,09	0,389	16,00	+0/-0,11	1,578	26,99	+0/-0,13	4,491	55,00	+0/-0,19	18,650
8,00	+0/-0,09	0,395	16,90	+0/-0,11	1,761	28,00	+0/-0,13	4,834	57,15	+0/-0,19	20,137
8,20	+0/-0,09	0,415	17,00	+0/-0,11	1,782	28,58	+0/-0,13	5,036	60,00	+0/-0,19	22,195
8,40	+0/-0,09	0,435	17,20	+0/-0,11	1,824	30,00	+0/-0,13	5,549	60,32	+0/-0,19	22,433
8,50	+0/-0,09	0,445	17,46	+0/-0,11	1,880	30,16	+0/-0,16	5,608	63,50	+0/-0,19	26,860
9,00	+0/-0,09	0,499	17,90	+0/-0,11	1,975	30,30	+0/-0,16	5,660	65,00	+0/-0,19	28,049
9,52	+0/-0,09	0,559	18,00	+0/-0,11	1,998	31,75	+0/-0,16	6,215	66,68	+0/-0,19	27,413
9,80	+0/-0,09	0,592	19,05	+0/-0,13	2,237	32,00	+0/-0,16	6,313	76,20	+0/-0,19	35,799
10,00	+0/-0,09	0,617	20,00	+0/-0,13	2,466	32,30	+0/-0,16	6,432	80,00	+0/-0,22	39,458
10,50	+0/-0,11	0,680	20,20	+0/-0,13	2,516	34,92	+0/-0,16	7,518	85,00	+0/-0,22	46,545
11,00	+0/-0,11	0,746	20,64	+0/-0,13	2,627	35,00	+0/-0,16	7,553	90,00	+0/-0,22	49,940
11,11	+0/-0,11	0,761	20,94	+0/-0,13	2,703	36,00	+0/-0,16	7,990	95,00	+0/-0,22	55,642
11,30	+0/-0,11	0,787	21,00	+0/-0,13	2,719	38,10	+0/-0,16	8,950	100,00	+0/-0,22	61,654
11,84	+0/-0,11	0,864	21,05	+0/-0,13	2,732	39,00	+0/-0,16	9,378			
12,00	+0/-0,11	0,888	22,00	+0/-0,13	2,984	40,00	+0/-0,16	9,865			

OBS.: Sob consulta podem ser produzidas em outras qualidades de aço. Todos os pesos e dimensões constantes destas tabelas são nominais, podendo

||||| BARRA QUADRADA TREFILADA GERDAU

Fornecida nas medidas de 4 a 8 m, tem excelente acabamento em canto vivo, totalmente adequado às tolerâncias exigidas para eixos de máquinas agrícolas e implementos agrícolas, ferramentas e indústria de autopeças.



Bitola	Tolerância	Peso Nominal	Bitola	Tolerância	Peso Nominal	Bitola	Tolerância	Peso Nominal
h (mm)	mm	kg/m	h (mm)	mm	kg/m	h (mm)	mm	kg/m
4,76	+0/-0,08	0,180	14,28	+0/-0,11	1,600	29,85	+0/-0,13	6,990
6,35	+0/-0,09	0,320	15,88	+0/-0,11	1,980	31,75	+0/-0,16	7,910
* 7,94	+0/-0,09	0,488	19,05	+0/-0,13	2,850	38,10	+0/-0,16	11,400
* 9,53	+0/-0,09	0,706	20,00	+0/-0,13	3,140	44,45	+0/-0,16	15,510
10,00	+0/-0,09	0,790	22,22	+0/-0,13	3,880	50,80	+0/-0,19	20,260
12,70	+0/-0,11	1,270	25,40	+0/-0,13	5,060			

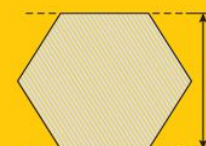
OBS.: *Estas bitolas são produzidas com cantos arredondados.

Sob consulta podem ser produzidas nas tolerâncias h10 e h9, bem como em outras qualidades de aço. Todos os pesos e dimensões constantes destas tabelas são nominais, podendo ter diferenças de acordo com as tolerâncias estabelecidas nas especificações ou em norma.

||||| BARRA SEXTAVADA TREFILADA GERDAU

Com empeno máximo de 2 mm e acabamento em canto vivo, fornecida nas medidas de 4 a 8 m, atende plenamente às especificações dos sistemas de eixo de transmissão. Amplamente empregada em sistemas de transmissão de plantadeiras e cardans das mais diversas linhas de plantio e também nas indústrias moveleira, parafuseira e de ferramentas.

Bitola	Tolerância	Peso Nominal	Bitola	Tolerância	Peso Nominal	Bitola	Tolerância	Peso Nominal
h (mm)	mm	kg/m	h (mm)	mm	kg/m	h (mm)	mm	kg/m
6,35	+0/-0,09	0,270	20,64	+0/-0,13	2,900	33,34	+0/-0,16	7,560
7,94	+0/-0,09	0,430	22,22	+0/-0,13	3,360	34,92	+0/-0,16	8,290
9,53	+0/-0,09	0,620	23,81	+0/-0,13	3,850	36,00	+0/-0,16	8,810
11,11	+0/-0,11	0,840	24,00	+0/-0,13	3,920	38,10	+0/-0,16	9,870
* 12,70	+0/-0,11	1,086	25,40	+0/-0,13	4,390	41,28	+0/-0,16	11,580
* 14,29	+0/-0,11	1,378	26,99	+0/-0,13	4,950	42,86	+0/-0,16	12,490
* 15,88	+0/-0,11	1,704	28,58	+0/-0,13	5,550	44,45	+0/-0,16	13,430
* 17,46	+0/-0,11	2,062	30,00	+0/-0,13	6,120	50,80	+0/-0,19	17,540
19,05	+0/-0,13	2,470	31,75	+0/-0,16	6,850			



OBS.: *Estas bitolas são produzidas com cantos arredondados.

Sob consulta podem ser produzidas nas tolerâncias h10 e h9, bem como em outras qualidades de aço. Todos os pesos e dimensões constantes destas tabelas são nominais, podendo ter diferenças de acordo com as tolerâncias estabelecidas nas especificações ou em norma.

ANEXO C – DADOS DA PRENSA DE FRICÇÃO USADA NO FORJAMENTO.

Fonte: [Prensas Gutmann].

Prensa de Fricção – Fabricante: Gutmann	
Ano: 1972	
Nº. série: 7709 – OF: 1961	
Dados técnicos:	
Capacidade da prensa	250t ($\approx 2.452,5\text{kN}$)
Diâmetro da rosca	220mm
Largura entre as corredeiras	410mm
Largura entre as colunas	610mm
Largura e comprimento da mesa	560 x 600mm
Largura e comprimento do martelo	400 x 400mm
Furo do martelo	R.60 x 120mm
Curso máximo	450mm
Distância máxima entre a mesa e o martelo	700mm
Distância entre a mesa e as corredeiras	250mm
Golpes por minuto com curso máximo	30
Energia (trabalho) disponível com curso máximo	36.282J
Rotação por minuto da polia motora (disco)	220rpm
Força necessária (60Hz/1750rpm)	20Cv
Altura total da máquina	4.220mm
Peso aproximado da máquina	137.340N

ANEXO D – CUSTO DAS BARRAS TREFILADAS PREVISTAS COMO MATÉRIA-PRIMA DO GRAMPO DE 3/8”.

<p>ORÇAMENTO DE CLIENTE N° : 84747 (Industrialização)</p>		<p>Data Emissão : 27/11/2009</p>																																																																									
<p>EMPRESA [REDACTED] CACHOERINHARS CNP.J: [REDACTED] Telefone: [REDACTED] Fax: [REDACTED]</p>	<p>REPRESENTANTE [REDACTED] E-Mail : [REDACTED] Telefones : [REDACTED] Fax: [REDACTED]</p>	<p>CLIENTE [REDACTED] -CACHOERINHARS Telefone: [REDACTED] Fax: [REDACTED]</p> <p>Código: 32 O.C.: [REDACTED] Contato: [REDACTED]</p> <p>Cond. Pgto: 28DIAS Vendedor: [REDACTED] Transporte: [REDACTED] Frete: FOB Data Validade: 07/12/2009</p>																																																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Código</th> <th rowspan="2">Descrição</th> <th rowspan="2">Clas.Fiscal</th> <th colspan="2">Solicitado</th> <th colspan="2">Pedido</th> <th rowspan="2">Unit</th> <th rowspan="2">Total ICMS</th> <th rowspan="2">IPI</th> </tr> <tr> <th>Quant</th> <th>Uni</th> <th>Quant</th> <th>Uni</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>8065</td> <td>ACO SAE 1020 TREF H11 RED 21.000 (Preço Unitário : 69.96)</td> <td>72155000</td> <td>1.000</td> <td>BR</td> <td>21.000</td> <td>16.462</td> <td>KG</td> <td>4.25</td> <td>69.96</td> <td>0.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>1915</td> <td>ACO SAE 1020 TREF H11 RED 22.220 (Preço Unitário : 78.33)</td> <td>72155000</td> <td>1.000</td> <td>BR</td> <td>22.220</td> <td>18.431</td> <td>KG</td> <td>4.25</td> <td>78.33</td> <td>0.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>1967</td> <td>ACO SAE 1020 TREF H11 QUAD 19.050 (Preço Unitário : 102.77)</td> <td>72155000</td> <td>1.000</td> <td>BR</td> <td>19.050</td> <td>17.419</td> <td>KG</td> <td>5.90</td> <td>102.77</td> <td>0.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>1985</td> <td>ACO SAE 1020 TREF H11 SEXT 20.640 (Preço Unitário : 101.95)</td> <td>72155000</td> <td>1.000</td> <td>BR</td> <td>20.640</td> <td>17.279</td> <td>KG</td> <td>5.90</td> <td>101.95</td> <td>0.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td colspan="8" style="text-align: right;">Total KG :</td> <td>69.591</td> <td colspan="2"></td> </tr> </tbody> </table>			Código	Descrição	Clas.Fiscal	Solicitado		Pedido		Unit	Total ICMS	IPI	Quant	Uni	Quant	Uni	8065	ACO SAE 1020 TREF H11 RED 21.000 (Preço Unitário : 69.96)	72155000	1.000	BR	21.000	16.462	KG	4.25	69.96	0.00	5.00	1915	ACO SAE 1020 TREF H11 RED 22.220 (Preço Unitário : 78.33)	72155000	1.000	BR	22.220	18.431	KG	4.25	78.33	0.00	5.00	1967	ACO SAE 1020 TREF H11 QUAD 19.050 (Preço Unitário : 102.77)	72155000	1.000	BR	19.050	17.419	KG	5.90	102.77	0.00	5.00	1985	ACO SAE 1020 TREF H11 SEXT 20.640 (Preço Unitário : 101.95)	72155000	1.000	BR	20.640	17.279	KG	5.90	101.95	0.00	5.00	Total KG :								69.591		
Código	Descrição	Clas.Fiscal				Solicitado		Pedido					Unit	Total ICMS	IPI																																																												
			Quant	Uni	Quant	Uni																																																																					
8065	ACO SAE 1020 TREF H11 RED 21.000 (Preço Unitário : 69.96)	72155000	1.000	BR	21.000	16.462	KG	4.25	69.96	0.00	5.00																																																																
1915	ACO SAE 1020 TREF H11 RED 22.220 (Preço Unitário : 78.33)	72155000	1.000	BR	22.220	18.431	KG	4.25	78.33	0.00	5.00																																																																
1967	ACO SAE 1020 TREF H11 QUAD 19.050 (Preço Unitário : 102.77)	72155000	1.000	BR	19.050	17.419	KG	5.90	102.77	0.00	5.00																																																																
1985	ACO SAE 1020 TREF H11 SEXT 20.640 (Preço Unitário : 101.95)	72155000	1.000	BR	20.640	17.279	KG	5.90	101.95	0.00	5.00																																																																
Total KG :								69.591																																																																			
<p>Observações:</p>																																																																											
<p>*** TOTAIS DO ORÇAMENTO *** Sub-Total : 363.01 Desconto : 0.00 Total IPI : 17.66 Total Pedido : 370.67</p> <p>Cliente _____ Assinatura _____</p>																																																																											