

# Forjamento em matriz fechada de peças em aço

*João Pedro Ribeiro Pedrosa Pinto*

**Dissertação de Mestrado**

Orientador na FEUP: Prof. Dr. Rui Neto

Orientador no INEGI: Eng. José Oliveira



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Janeiro de 2017







## Resumo

No processo de desenvolvimento de um produto forjado, torna-se necessária a definição de todas as variáveis inerentes ao processo, como: a temperatura ideal de forjamento, a adaptação da geometria da peça às condicionantes do forjamento, a carga necessária na máquina de forjamento, entre outras. Esta definição do método de forjamento encontra-se muitas vezes limitada à experiência dos projetistas e operários envolvidos no projeto, sendo usual o produto forjado ser desenvolvido através de um processo de tentativa e erro, associado ao conhecimento adquirido dos intervenientes. Esta falta de sistematização, fragiliza a competitividade industrial através do aumento dos tempos de projecto das peças e diminuição da agilidade e rapidez em fazer ajustes ou alterações ao processo na sua fase inicial de desenvolvimento. Tomando como ponto de partida esta falta de sistematização, almeja-se nesta dissertação, o desenvolvimento de uma linha lógica de passos a tomar no projecto de uma peça forjada, resumido sob a forma de um guia de boas práticas do forjamento de matriz fechada de peças em aço. A materialização deste guia acenta numa compilação da vasta bibliografia associada ao processo, bem como o uso de ferramentas analíticas, prototipagem física e simulação computacional para a caracterização do comportamento do material e das forças associadas ao processo. Será ainda exemplificada a aplicação do guia com o estudo de um caso prático, o forjamento de um olhal duplo cruzado pela empresa Skelt, validado experimentalmente nesta empresa.

Palavras-chave: forjamento; matriz fechada; aços ao carbono; guia de boas práticas.



## Closed die forging of steel components

### Abstract

During the process development of a forged component, it becomes a necessity to correctly define all of the process variables, such as: the ideal forging temperature, the geometry adaptation to the forging process constrains, the necessary available load on the forging machine, etc.. This definition of the forging method is, oftentimes, constrained by the experience of the designers and workers involved in the project, wich results in a product development by trial and error. This lack of systematization, weakens the industrial competitiveness through the increase of the duration of project phase of the components and decrease of the agility and speed in making adjustments or alterations to the process in its initial phase of development. Taking as a starting point this lack of systematization, the aim of this dissertation is to develop a logical line of steps to be taken in the design of a forged part, summarized in the form of a guide to good closed die forgin practices for steel componetns. The materialization of this guide emphasizes a compilation of the vast bibliography associated to the process, as well as the use of analytical tools, physical prototyping and computational simulation to characterize the behavior of the material and the forces associated with it. This guide will also be applied to a practical case studt, the forging of a double eye crossed bracket produced by Skelt, later validated in the same company.

Keywords: forging; closed die; carbon steel; guide; forging pratices.





## Agradecimentos

Ao Engenheiro Rui Neto e ao Engenheiro Ferreira Duarte, o meu agradecimento pela supervisão e orientação prestada ao longo de toda esta dissertação. Obrigado por todos os conselhos, espírito crítico e apoio prestado.

Ao Engenheiro José Oliveira, o meu sincero obrigado, por todos os reparos que oportunamente me dirigiu, pela incansável paciência e disponibilidade e pela essencial colaboração no desenvolvimento das simulações físicas e computacionais.

Aos meus pais e irmã, Helena Maria Ribeiro, João Luís Pinto e Joana Pinto, obrigado por sempre me guiarem e nunca serem menos que um exemplo de esforço, dedicação e carácter. À minha avó, Joaquina Pedrosa, por ser uma referência na minha vida .

À Cláudia, obrigado por todos os momentos vividos em conjunto e apoio essencial na realização desta dissertação.

A todos os meus amigos, universitários ou de infância, que me acompanharam em dias e noites de trabalho e convívio.



## Índice de Conteúdos

1	Introdução .....	1
1.1	Apresentação das empresas.....	1
1.2	Enquadramento e objetivos do projeto.....	2
1.3	Estrutura da dissertação .....	3
2	Pesquisa Bibliográfica .....	5
2.1	Conformação plástica.....	5
2.2	Forjamento .....	8
2.3	Tipos de forjamento .....	10
2.3.1	Temperatura do material.....	11
2.4.2	Tipo de ferramenta utilizada.....	13
2.4	Forjabilidade .....	17
2.5	Velocidade .....	21
2.6	Atrito e lubrificação .....	23
2.7	Equipamentos para forjamento .....	27
2.7.1	Martelos .....	27
2.7.2	Prensas .....	30
2.7.3	Equipamentos de aquecimento da matéria-prima.....	37
2.8	Matrizes.....	39
2.9	Defeitos no forjamento .....	42
2.10	Métodos de simulação, análise e previsão .....	43
2.13.1	Simulação física.....	43
2.13.2	Métodos analíticos.....	45
2.13.3	Métodos computacionais .....	47
3	Guia de boas práticas do forjamento de peças em aço .....	49
3.1	Pedido de projeto .....	51
3.1.1	Definição da finalidade da peça .....	51
3.1.2	Material.....	52
3.1.3	Estado (definição do tratamento térmico e acabamento superficial).....	53
3.2	Definição da geometria .....	55
3.2.1	Plano de separação.....	55
3.2.2	Saídas.....	57
3.2.3	Raios de canto e de concordância.....	61
3.2.4	Rebarba.....	63
3.2.5	Sobreespessuras .....	68
3.2.6	Contrações .....	69
3.3	Definição da pré-forma e do número de etapas .....	72
3.3.1	Definição da complexidade geométrica .....	72
3.3.2	Definição da forma do esboço e número de operações .....	74
3.3.3	Definição das secções críticas .....	76
3.3.4	Definição da geometria da pré-forma teórica.....	76
3.3.5	Adaptação ao processo da empresa .....	78
3.4	Metodologia de previsão de forças e escoamento de material.....	83
3.4.1	Modelação física.....	83
3.4.2	Métodos analíticos.....	84

---

3.4.3	Simulação computacional.....	88
3.5	Fabrico das ferramentas .....	89
3.6	Validação experimental.....	90
4	Exemplificação com o caso de estudo “Olhal duplo cruzado” .....	95
4.1	Pedido de projeto .....	96
Definição da finalidade da peça.....		96
Material.....		96
Estado .....		96
4.2	Definição da geometria .....	96
4.3	Definição da pré-forma do número de operações .....	100
4.4	Metodologia de previsão de forças e escoamento de material.....	106
4.5	Fabrico de ferramentas.....	125
4.6	Validação experimental.....	126
5	Conclusões e perspectivas de trabalho futuro.....	130
5.1	Conclusões .....	130
5.2	Trabalhos futuros .....	131
ANEXO A:	Temperaturas de forjamento .....	136
ANEXO B:	Materiais e tratamentos térmicos das matrizes .....	138
ANEXO C:	Normas e nomenclatura de materiais metálicos.....	140

## Siglas

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASM	<i>American Society for Metals</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i>
DEFORM	<i>Design Environment for Forming</i>
DEMec	Departamento de Engenharia Mecânica
DEMEGI	Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HERF	<i>High Energy Rate Forging</i>
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i>
STFC	<i>Scientific Forming Technologies Corporation</i>



## Índice de Figuras

Figura 1 Instalações do INEGI, Porto. ....	2
Figura 2 Sede da SKELT, Serzedo, Vila Nova de Gaia. ....	2
Figura 3 Curva tensão-deformação de uma liga metálica (Jorge e Dinis 2004). ....	5
Figura 4 Ferramentas e peças obtidas por quinagem de chapa (Rodrigues e Martins 2010a). ..	6
Figura 5 Ferramentas e peças obtidas por estampagem de chapa (Rodrigues e Martins 2010a). .....	6
Figura 6 Ferramentas e peças obtidas por calandragem (adaptado de (ASM 2005)). ....	7
Figura 7 Processo de extrusão. ....	7
Figura 8 Ferramentas e peças obtidas por laminagem (Rodrigues e Martins 2010b). ....	8
Figura 9 Ferramentas e peças obtidas por forjamento (Rodrigues e Martins 2010a). ....	8
Figura 10 Exemplos de algumas peças forjadas (Forge 2016b). ....	9
Figura 11 Nomenclatura do material ao longo do processo de forjamento. ....	9
Figura 12 Exemplo de forjamento em matriz aberta, adaptado de (Technology 2015b) .....	10
Figura 13 Exemplo de forjamento em matriz fechada, adaptado de (Technology 2015a). ....	10
Figura 14 Influência da temperatura na tensão de escoamento, alongamento e espessura da camada de óxidos para alguns aços (Júnior 2007). ....	12
Figura 15 Forjamento em matriz aberta de um veio, adaptado de (ASM 2005). ....	13
Figura 16 Forjamento de veio de grandes dimensões (Whemco 2016). ....	14
Figura 17 Matriz de forjamento de uma cambota e respetiva peça forjada, adaptado de (Whemco 2016). ....	15
Figura 18 Cardan obtido por forjamento de precisão. ....	15
Figura 19 Várias etapas do material no processo de forjamento de uma biela (Siegert e Ringhand 1994). ....	16
Figura 20 Evolução do tamanho de grão e propriedades mecânicas com a temperatura, adaptado de (Kalpakji 2014) .....	17
Figura 21 Aumento da resistência à fratura por torção com o aumento da velocidade de rotação de um provete (ASM 2005) .....	18
Figura 22 Efeito da presença de inclusões no aparecimento de defeitos (Kalpakji 2014) .....	18
Figura 23 Forjabilidade de vários materiais, adaptado de (ASM 2005) .....	19
Figura 24 Exemplo do aparecimento de fissuras no teste de compressão, adaptado de (Kalpakji 2014). ....	20
Figura 25 Máquina de teste de torção a quente, adaptado de (Spretnak 1964). ....	20
Figura 26 Curvas do teste de torção a quente para vários aços ao carbono, adaptado de (ASM 2005). ....	21
Figura 27 Representação esquemática do contacto entre a superfície da peça e da ferramenta (Rodrigues e Martins 2010a). ....	23

---

Figura 28 Forjamento em matriz aberta com atrito nulo (em cima) e com a existência de atrito (em baixo), adaptado de (Palanivendhan 2014). .....	25
Figura 29 Representação esquemática de um martelo de queda-livre (Martins 2014). .....	29
Figura 30 Representação esquemática de um martelo de dupla-ação .....	30
Figura 31 Prensa mecânica excêntrica (Michels et al, 2014). .....	31
Figura 32 Esquema do funcionamento de uma presa excêntrica (Rodrigues e Martins 2010b). .....	32
Figura 33 Esquema de funcionamento de uma prensa de fuso (Martins 2014). .....	34
Figura 34 Esquema representativo de uma prensa hidráulica (Martins 2014). .....	36
Figura 35 Forno de aquecimento (Rath 2016).....	38
Figura 36 Espessura da camada de material oxidado em função do tempo de aquecimento (Rodrigues e Martins 2010b).....	38
Figura 37 Princípio de funcionamento de um forno de indução (Rodrigues e Martins 2010b)	39
Figura 38 Matrizes lisa (a), concava (b) e em “v” (c), usadas no forjamento em matriz aberta (ASM 2005).....	39
Figura 39 Matriz de três etapas (a) e de quatro etapas (b) para forjamento em matriz fechada .....	40
Figura 40 Nomenclatura utilizada na definição das matrizes de forjamento (Rodrigues e Martins 2010b).....	41
Figura 41 Variação da dureza a quente dos principais aços de ferramentas de trabalho a quente, adaptado de (ASM 2005).....	41
Figura 42 Variação dos resultados do ensaio de impacto de Charpy para alguns aços ferramenta de trabalho a quente, variando a temperatura do provete, adaptado de (ASM 2005). .....	42
Figura 43 Matrizes de simulação do processo de forjamento fabricadas por prototipagem rápida. .....	43
Figura 44 Incremento do custo de modificações ao longo do processo de forjamento (Rodrigues e Martins 2010a).....	44
Figura 45 Simulação do processo de forjamento em plasticina. ....	44
Figura 46 Exemplo de uma peça estudada pelo método dos elementos finitos (SFTC 2014) .	48
Figura 47 Diagrama dos parâmetros utilizados em simulações de elementos finitos (Júnior 2007). .....	48
Figura 48 Fluxograma do processo de desenvolvimento integrado de um produto forjado, adaptado de (Altan e Shirgaokar 2014). .....	49
Figura 49 Principais variáveis do processo de forjamento, adaptado de (Altan e Shirgaokar 2014). .....	50
Figura 50 Temperaturas dos diferentes tipos de recozidos dependendo da percentagem de carbono do aço (Lino 2006).....	54
Figura 51 Representação do plano de separação, adaptado de (Kalpakji 2014). .....	55
Figura 52 Escolha incorreta da posição da peça (à esquerda) origina cavidades muito mais profundas para o material preencher, adaptado de (Spretnak 1964). .....	55



---

Figura 53 Posição da peça propicia a desvios laterais da matriz (imagens à esquerda), posição correta aproveitando a geometria da peça (à direita), adaptada de (Spretnak 1964).....	56
Figura 54 Posição da peça propicia a desvios laterais da matriz (a), utilização de contra-cunha em (b) para evitar esses desvios, alteração do plano de apartação (c), adaptada de (ASM 2005). .....	56
Figura 55 Posicionamento do plano de separação em (a) e (b) causa descontinuidades na estrutura do grão, possível problema resolvido com a modificação em (c) ou (d), adaptada de (ASM 2005).....	57
Figura 56 Ângulos aconselhados para as saídas internas e externas em peças ao carbono.....	58
Figura 57 Ângulo de saída natural em (a) e alteração do posicionamento da peça em (b) para conseguir ângulos de saída naturais, adaptado de (Spretnak 1964). ....	58
Figura 58 Exemplo de coincidência de saídas (esquerda) aumentando o ângulo de saída da matriz inferior. ....	59
Figura 59 Exemplo do aumento dos ângulos de saída a fim de compensar o desalinhamento das nervuras. ....	59
Figura 60 Diferenciação entre raios de canto, e de concordância. ....	61
Figura 61 Variação dos raios de concordância mínimos em função da altura da nervura, adaptado de (Spretnak 1964). ....	61
Figura 62 Variação do número de etapas necessárias para forjar uma peça, em função do rácio entre a altura e a largura da nervura, adaptado de (ASM 2005).....	62
Figura 63 Exemplo de aplicação de um "raio cheio" .....	62
Figura 64 Exemplo da criação de rebarba (Forge 2015). ....	64
Figura 65 Escoamento da rebarba pelo canal e cavidade de rebarba (Rodrigues e Martins 2010b).....	64
Figura 66 Força necessária ao forjamento ao longo do decorrer do processo (Rodrigues e Martins 2010b). ....	65
Figura 67 Espessura (t) e largura (w) da rebarba para uma geometria básica do canal. ....	65
Figura 68 Obtenção da espessura e largura da rebarba em função da massa da peça a forja, adaptado de (ASM 2005).....	66
Figura 69 Esquemática da operação de corte (Rodrigues e Martins 2010b) .....	67
Figura 70 Peça em estudo.....	71
Figura 71 Classificação da complexidade da forma geométrica das peças (Rodrigues e Martins 2010b).....	73
Figura 72 Diferentes geometrias de matéria-prima disponíveis comercialmente (Metals 2016). .....	74
Figura 73 Diferentes etapas no processo de forjamento de uma cambota (REForCh 2014)....	76
Figura 74 Diferentes etapas de pré-forma (ASM 2005).....	77
Figura 75 Encabeçamento livre (a), com cavidade na matriz (b), com cavidade no punção (c) e com cavidade na matriz e punção (d). ....	79
Figura 76 Diferença da influência da temperatura no encabeçamento para aços ao carbono e aços inoxidáveis (ASM 2005). ....	81

---

---

Figura 77 Representação esquemática de máquina de laminagem (ASM 2005). .....	81
Figura 78 Esquemática da operação de encalçamento (Technology 2015a) .....	82
Figura 79 Dobragem de alumínio. ....	82
Figura 80 Exemplo de simulação de forjamento em matriz aberta em plasticina. ....	83
Figura 81 Compressão de um esboço retangular (Rodrigues e Martins 2010b). ....	85
Figura 82 Balanço das solicitações atuantes numa fatia elementar (Rodrigues e Martins 2010b). .....	85
Figura 83 Distribuição da pressão na interface ferramenta/material (Rodrigues e Martins 2010b). ....	87
Figura 84 Pressão de forjamento em função da altura média de peça a forjar (ASM 2005)...	88
Figura 85 Fissuras superficiais em peça forjada (KANAZAWA et al, 2014).....	90
Figura 86 Fissura interna (Rodrigues e Martins 2010b).....	91
Figura 87 Fissuras na rebarba (Rodrigues e Martins 2010b).....	91
Figura 88 Defeito de sobreposição gerado por secção demasiado esbelta (Rodrigues e Martins 2010b). ....	92
Figura 89 Defeito de sobreposição gerado por raios demasiado pequenos (Rodrigues e Martins 2010b). ....	92
Figura 90 Falta de enchimento devido a raio de canto demasiado elevado (Massivumformung 2011). ....	92
Figura 91 Defeito devido a desalinhamento das matrizes (Stahl 2000) .....	93
Figura 92 Defeito devido à presença de carepa na superfície de uma faca forjada (JZknives 2013). ....	93
Figura 93 Defeito gerado por linhas de escoamento perpendiculares à superfície (ASM 2005). .....	94
Figura 94 Olhal duplo cruzado (cortesia SKELT).....	95
Figura 95 Modelação 3D da peça em estudo.....	97
Figura 96 Características de massa e volume da peça modelada. ....	97
Figura 97 Plano de separação escolhido para a peça. ....	97
Figura 98 Presença de saída natural, do lado direito da peça devido à sua geometria arredondada .....	98
Figura 99 Faces com necessidade de ângulos de saída (a azul). ....	98
Figura 100 Ângulos de saída escolhidos. ....	99
Figura 101 Raios de canto e de concordância mínimos. ....	99
Figura 102 Representação esquemática das dimensões da rebarba.....	101
Figura 103 Zonas críticas da peça. ....	102
Figura 104 Representação dos planos gerados (em cima e em baixo à esquerda) e exemplo da área de secção obtida por interseção do plano 11 com a peça (em baixo à direita). ....	103
Figura 105 Gráfico das áreas de secção ao longo da peça. ....	105
Figura 106 Gráfico obtido com as dimensões de referência para um esboço circular. ....	105

---

---

Figura 107 Pré-forma teórica obtida pela aplicação do método de Drabing .....	105
Figura 108 Modelação da matriz final de forjamento. ....	106
Figura 109 Matriz de pré-forma (à esquerda) e matriz final (à direita) fabricadas. ....	107
Figura 110 Simulação do encaimento (em cima) e da matriz fechada (em baixo).....	108
Figura 111 Largura obtida no encaimento a 16,5mm. ....	108
Figura 112 Comprimento obtido no encaimento a 16,5mm. ....	108
Figura 113 Defeito de falta de enchimento e deflexão da geometria. ....	109
Figura 114 Largura obtida no encaimento a 18,5mm. ....	109
Figura 115 Comprimento obtido no encaimento a 18,5mm. ....	109
Figura 116 Defeito de falta de enchimento no encaimento a 18,5mm. ....	110
Figura 117 Largura obtida para um encaimento a 20mm. ....	111
Figura 118 Comprimento total da peça com encaimento a 20mm. ....	111
Figura 119 Defeito de falta de enchimento no encaimento a 20mm. ....	111
Figura 120 Altura média da peça.....	113
Figura 121 Interface Deform. ....	114
Figura 122 Matrizes e esboço modelados. ....	115
Figura 123 Processo de simulação do encaimento (matriz superior oculta para melhor visualização). ....	115
Figura 124 Dimensões da zona encaçada a 18,5mm. ....	116
Figura 125 Cotas alteradas na geometria de pré-forma. ....	117
Figura 126 Sobreposição da forma do esboço (vermelho) e da forma final (verde). ....	117
Figura 127 Detalhes da diferença geométrica entre a pré-forma e a forma final no plano perpendicular ao plano de separação da peça. ....	118
Figura 128 Posicionamento da pré-forma na segunda matriz de pré-forma.....	118
Figura 129 Fases da segunda etapa de pré-forma.....	119
Figura 130 Preenchimento completo da zona crítica.....	119
Figura 131 Preenchimento da matriz na etapa final. ....	120
Figura 132 Distribuição de temperaturas na 1ª pré-forma.....	121
Figura 133 Distribuição de temperaturas na 2ª pré-forma.....	121
Figura 134 Distribuição de temperaturas na forma final. ....	121
Figura 135 Deformação efetiva na 1ª pré-forma. ....	122
Figura 136 Deformação efetiva na 2ª pré-forma. ....	122
Figura 137 Representação da zona crítica de deformação efetiva.....	122
Figura 138 Distribuição de tensões na 1ª pré-forma.....	123
Figura 139 Distribuição de tensões na 2ª pré-forma.....	123
Figura 140 Distribuição de tensões na forma final.....	123
Figura 141 Gráfico Força vs Tempo para a 1ª operação de pré-forma.....	124

---

---

Figura 142 Gráfico Força vs Tempo para a 2ª operação de pré-forma.....	124
Figura 143 Gráfico Força vs Tempo para a operação final. ....	124
Figura 144 Cotas das matrizes.....	125
Figura 145 Dimensões da matriz usada atualmente. ....	125
Figura 146 Principais equipamentos instalados na empresa para o processo de forjamento: Prensa Mecânica excêntrica (à esquerda); Forno de Indução (à direita). ....	126
Figura 147 Diferentes fases do ensaio às ferramentas desenvolvidas, da esquerda para a direita: montagem e lubrificação das matrizes; pré-aquecimento controlado das matrizes fechadas até cerca de 200°C; colocação da 1ª pré-forma na segunda matriz.....	126
Figura 148 Da esquerda para a direita: 1ª pré-forma; 2ª pré-forma com rebarba; forma final sem rebarba. ....	127
Figura 149 Cotas analisadas. ....	128
Figura 150 Peças analisadas. ....	128

## Índice de Tabelas

Tabela 1 Temperaturas de recristalização para vários materiais metálicos, adaptado de (Palanivendhan 2014).	11
Tabela 2 Velocidades de atuação e tempo de contacto das máquinas de forjamento, adaptado de (Rodrigues e Martins 2010b)	21
Tabela 3 Valores típicos das constantes da lei de comportamento rígido-viscoplástica para diferentes materiais metálicos (Rodrigues e Martins 2010a)	23
Tabela 4 Valores indicativos do fator de atrito para diferentes operações e lubrificante, adaptada de (Júnior 2007, Rodrigues e Martins 2010a)	25
Tabela 5 Diferentes tipos de lubrificação e as suas vantagens e desvantagens.	26
Tabela 6 Comparação das principais características das máquinas de forjamento.	36
Tabela 7 Características das principais máquinas de forjamento (Rodrigues e Martins 2010b).	37
Tabela 8 Temperaturas máximas de forjamento de aços, adaptado de (ASM 2005).	53
Tabela 9 Ângulos de saída mínimos recomendados para diferentes materiais, adaptado de (Spretnak 1964).	60
Tabela 10 Raio de concordância e de canto mínimo em função da altura/profundidade de uma nervura/cavidade, adaptado de (Spretnak 1964).	63
Tabela 11 Raios de concordância e de canto mínimos, em função do peso da peça, adaptado de (Spretnak 1964).	63
Tabela 12 Fórmulas empíricas de cálculo das dimensões da rebarba, adaptado de (Walker 1996).	66
Tabela 13 Folga necessária para o corte, em função da altura média da peça, adaptado de (Rodrigues e Martins 2010b).	68
Tabela 14 Materiais de fabrico das ferramentas de corte e respetiva dureza, adaptado de (ASM 2005).	68
Tabela 15 Valores de sobreespessura típicos, adaptado de (Jenson 1970).	69
Tabela 16 Valores de $\alpha$ e $\beta$ para alguns materiais.	71
Tabela 17 propriedades do material em estudo.	71
Tabela 18 Dimensões da cavidade.	72
Tabela 19 Dimensões de referência da pré-forma em função da geometria do esboço (Brites 2009).	78
Tabela 20 Resistência à deformação para diferentes materiais (ASM 2005).	80
Tabela 21 Coeficiente de encabeçamento para diferentes geometrias (ASM 2005).	80
Tabela 22 Coeficiente de sensibilidade à velocidade de deformação para diferentes composições de plasticina com aditivos (ASM 2005).	84
Tabela 23 Propriedades para os principais aços usados no fabrico de matrizes de forjamento (Rodrigues e Martins 2010b).	89
Tabela 24 Dimensões gerais de matrizes de forjamento em função da cavidade (Walker 1996).	90

---

Tabela 25 Áreas de secção para os diferentes planos definidos e respectivas dimensões de referência. ....	104
Tabela 26 Valores de pressão e forjamento obtidos para meia peça. ....	113
Tabela 27 Cálculo das dimensões mínimas dos blocos das matrizes. ....	125
Tabela 28 Valores das cotas analisadas e respetivos desvios para várias peças. ....	128
Tabela 29 Valores de força da etapa de encalcamento e etapa final obtidos por diferentes métodos. ....	130
Tabela 30 Temperatura máxima de forjamento para aços ao carbono e de baixa liga, adaptado de (ASM 2005). ....	136
Tabela 31 Temperaturas de forjamento para outros aços, adaptado de (ASM 2005). ....	136
Tabela 32 Composição química dos principais aços usados no fabrico de matrizes de forjamento, adaptado de (ASM 2005). ....	138
Tabela 33 Temperaturas, tempos de estágio e durezas obtidas para os tratamentos térmicos das matrizes, adaptado de (ASM 2005). ....	138
Tabela 34 Nomenclatura AISI dos aços ao carbono e ligados, adaptado de (Rodrigues e Martins 2010b). ....	140
Tabela 35 Nomenclatura de ligas de alumínio, adaptado de (Rodrigues e Martins 2010b). ..	140
Tabela 36 Nomenclatura de ligas de magnésio, adaptado de (Rodrigues e Martins 2010b)..	141
Tabela 37 Nomenclatura de ligas de cobre, adaptado de (Rodrigues e Martins 2010b). ....	141
Tabela 38 Nomenclatura de ligas de titânio, adaptado de (Rodrigues e Martins 2010b). ....	142
Tabela 39 Nomenclatura de ligas de níquel, adaptado de (Rodrigues e Martins 2010b). ....	142

## 1 Introdução

Sendo considerado o mais antigo processo de fabrico, o forjamento é no seu nível mais básico, o processo de conformação de materiais metálicos através do uso de martelos ou prensas. O processo começa com a matéria-prima sob forma de um semi-produto (placas, perfis redondos, entre outros) sendo esta comprimida entre duas matrizes numa única operação ou numa sequência de etapas, que culminam com a obtenção da geometria desejada. Este processo pode ser realizado com, ou sem aquecimento da matéria-prima. Quando o processo ocorre a quente, a estrutura de grão pode ser refinada e consolidada, melhorando as características mecânicas da peça nas direções desejadas.

Observa-se, não raras vezes, um processo de desenvolvimento de produtos forjados, baseado na experiência dos projetistas e técnicos envolvidos e num ciclo iterativo de tentativa e erro, sem sistematização de qualquer método. Torna-se assim essencial o desenvolvimento de métodos repetíveis e sistemáticos de guiar o processo de conceção de um produto forjado, desde o pedido do cliente até ao fabrico em série do produto.

### 1.1 Apresentação das empresas

O **INEGI** é uma Instituição de interface entre a Universidade e a Indústria vocacionada para a realização de Atividade de Inovação e Transferência de Tecnologia orientada para o tecido industrial. Nasceu em 1986 no seio do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMEGI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), mantendo até hoje uma forte ligação com o Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec). Ao longo dos seus mais de 25 anos de experiência em projetos com empresas e em consórcios nacionais e internacionais, tem vindo a desenvolver atividades de investigação e inovação bem como de consultoria e serviços para um conjunto vasto de mercados e setores de atividade (saúde, energia, metalomecânica, automóvel e transportes, aeronáutica, espacial e defesa, economia do mar, ambiente, bens de equipamento, setor público e outros).

Com a figura jurídica de Associação Privada sem Fins Lucrativos e com o estatuto de «Utilidade Pública», assume-se como um agente ativo no desenvolvimento do tecido industrial Português e na transformação do modelo competitivo da indústria nacional, tendo como principal missão o aumento da competitividade na indústria nacional.



Figura 1 Instalações do INEGI, Porto.

A **Skelt Metalomecânica SA** tem a sua sede e instalações fabris em Serzedo, Vila Nova de Gaia, Portugal, onde produz acessórios metálicos diversos para os campos de produção, transporte e distribuição de Energia Elétrica, como sejam as centrais, linhas aéreas e subestações elétricas, em média, alta e muito alta tensão. Foi constituída em Maio de 2004, resultando do trespasse da atividade e *Know How* da SOLIKAP Acessórios Elétricos, SA, que desde o seu início de atividade nos inícios dos anos 80, desenvolveu tecnologia que lhe permitiu exportar para todo Mundo. A Skelt Metalomecânica Sa, é uma metalomecânica ligeira, cujo produto se insere no sector elétrico. Tem duas grandes famílias de produtos:

- a) Ligadores para subestações elétricas (média, alta e muito alta tensão);
- b) Acessórios para cadeias de isoladores aéreas (média, alta e muito alta tensão);



Figura 2 Sede da SKELT, Serzedo, Vila Nova de Gaia.

## 1.2 Enquadramento e objetivos do projeto

Esta dissertação surge no contexto de uma colaboração entre a Skelt e o INEGI, para apoio no desenvolvimento de processos de forjamento com vista à melhoria do seu desempenho e da qualidade dos seus produtos forjados.

Recentemente, a Skelt realizou um elevado investimento em equipamento de forjamento (prensa, fornos, ferramentas, ...), criando desta forma, um aumento considerável da capacidade produtiva instalada nesta área tecnológica. Este investimento foi o resultado da vontade da



empresa reforçar a confiança dos seus clientes na qualidade dos seus produtos e na sua capacidade de processo e inovação, através da implementação do processo de forjamento, o que obriga a empresa a adquirir novas competências de produção, assim como de conceção de produtos. Face ao exposto, e de modo a fazer face às exigências e pressão competitiva do setor, a empresa pretende, a curto prazo, desenvolver processos de forjamento competitivos, e assim reposicionar-se em função da sua capacidade de fabrico, quer para os seus clientes atuais quer para entrar em novos mercados

O guia de boas práticas do forjamento surge no sentido da Skelt prosseguir para a implementação sustentada de processos de forjamento na sua cadeia produtiva.

### 1.3 Estrutura da dissertação

Este documento encontra-se organizado em 5 capítulos principais:

#### **Capítulo 1: Introdução**

Na primeira parte desta dissertação foi realizada uma introdução do tema abordado, das empresas participantes, bem com uma contextualização e principais objetivos do trabalho realizado.

#### **Capítulo 2: Pesquisa Bibliográfica**

Durante o segundo capítulo é feita uma pesquisa bibliográfica sobre os processos de conformação plástica, focando-se o estudo no processo de forjamento em matriz fechada. Dentro do processo de forjamento em matriz fechada e tendo em conta o propósito desta dissertação, é realizado um levantamento das características mais importantes à definição do processo de forjamento, nomeadamente: as temperaturas de forjamento; tipos de ferramentas utilizados; a definição de forjabilidade; a influência da velocidade do processo no comportamento do material; influência do atrito e lubrificação; os principais equipamentos utilizados para o forjamento (martelos, prensas e fornos); os materiais, temperaturas e tratamentos térmicos das matrizes de forjamento; os defeitos típicos dos produtos forjados. É ainda realizado um levantamento dos principais métodos analíticos de cálculo de forças no forjamento, bem como o método de simulação física com vista à previsão do comportamento do material e os métodos computacionais de simulação com recurso a elementos finitos.

#### **Capítulo 3: Guia de boas práticas do forjamento de peças em aço**

Ao longo do terceiro capítulo é elaborado um guia de boas práticas no projeto e fabrico de componentes forjados em aço. Este guia é conseguido através de um levantamento e compilação das regras de projeto e fabrico de componentes forjados disponíveis na bibliografia, bem como a utilização de métodos analíticos, de simulação física e de simulação computacional direcionados ou adaptados ao processo de forjamento para a previsão de forças e do comportamento do material durante o processo. Este guia encontra-se estruturado em seis subcapítulos:

- 1) **Pedido de projeto:** subcapítulo dedicado à caracterização inicial dos dados fornecidos ao projeto e requisitos iniciais da peça;

- 2) **Definição da geometria:** subcapítulo onde é realizada uma compilação das regras existentes em variadas referências bibliográficas de modo a definir um conjunto de restrições e sugestões de boas práticas ao projeto das peças forjadas e das matrizes para as forjar;
- 3) **Definição da pré-forma e do número de etapas:** neste subcapítulo é apresentado um conjunto de regras de caracterização da complexidade da geometria da peça a forjar, definindo-se o número de etapas mínimas necessárias ao forjamento, bem como a geometria e tipo de operações que devem ser utilizadas nessas etapas;
- 4) **Metodologia de previsão de forças e escoamento do material:** neste subcapítulo é apresentado o processo de simulação física do processo de forjamento recorrendo à utilização de plasticina para simular o material forjado. Procede-se de seguida à apresentação do método da fatia elementar para a previsão das forças associadas a um processo de forjamento em matriz aberta, direcionado para etapas de pré-forma, bem como um método expedito de obtenção de um intervalo de forças necessárias ao forjamento em matriz fechada. Por último é introduzida a utilização de *softwares* baseados no método dos elementos finitos para a caracterização e estudo de todo o processo de forjamento e variáveis envolvidas no mesmo;
- 5) **Fabrico de ferramentas:** são apresentadas neste subcapítulo, regras a seguir para o dimensionamento do bloco das matrizes, bem como os materiais e tratamentos térmicos das mesmas;
- 6) **Validação experimental:** são apresentados neste subcapítulo os principais defeitos a ter em conta na validação do projeto realizado nos subcapítulos anteriores, bem como as principais causas destes mesmos defeitos e principais métodos de eliminação dos mesmos.

#### Capítulo 4: Exemplificação com o caso de estudo “Olhal duplo cruzado”

Compilado o conjunto de regras e metodologias a seguir no projeto de desenvolvimento do produto forjado, no Cap. 3, é realizado no Cap. 4 uma aplicação prática do guia de boas práticas. Para tal, recorre-se ao estudo e aplicação do mesmo a uma peça atualmente forjada pela empresa Skelt, um olhal duplo cruzado. Ao longo deste subcapítulo são aplicadas as regras definidas no guia à peça em estudo, comparando de seguida com as características atualmente em vigor na empresa de modo a perceber de que modo o guia tem uma aplicabilidade prática no contexto industrial. Definidas as geometrias, é ainda realizado um estudo do comportamento do material ao longo do processo, através da aplicação da simulação em plasticina com matrizes obtidas por prototipagem rápida seguido de uma caracterização das forças envolvidas na obtenção da geometria pelos métodos analíticos. Por fim é utilizado o *software Deform*, de modo a validar por simulação computacional os resultados observados nos métodos anteriores, e ainda estudar outras variáveis do processo.

#### Capítulo 5: Conclusões e perspetivas de trabalho futuro

Neste capítulo é realizado um balanceamento entre o trabalho proposto no início da dissertação e o documento obtido e a relevância do mesmo para a melhoria do processo de forjamento da Skelt. É realizada também uma comparação entre os resultados obtidos pelos métodos analíticos e de simulação física e os resultados obtidos por simulação computacional, comparando-se estes também com os resultados obtidos na validação experimental. São ainda referidos pontos de interesse a estudar em trabalhos futuros.

## 2 Pesquisa Bibliográfica

### 2.1 Conformação plástica

Entende-se por conformação plástica, a alteração da forma de um material no estado sólido para uma outra forma pretendida. Esta transformação é conseguida utilizando ferramentas que promovem o escoamento de material em regime plástico, ou seja, as extensões aplicadas ao corpo ultrapassam a tensão limite elástico, provocando uma deformação irreversível (Jorge e Dinis 2004, Rodrigues e Martins 2010a).

Encontra-se representada na Figura 3 a curva tensão-deformação de uma liga metálica quando sujeita a um ensaio de tração. Entre o ponto O e o ponto A, ponto este designado como a tensão limite de proporcionalidade, o comportamento do corpo é linear, obedecendo à Lei de Hooke. O comportamento elástico do material, isto é, a capacidade em retomar a sua forma inicial findo o carregamento, mantém-se até ao ponto B, designado tensão limite elástico (Jorge e Dinis 2004). A conformação plástica ocorre então, para valores de tensões superiores ao valor da tensão limite elástico, de forma a promoverem deformações de geometria permanentes.

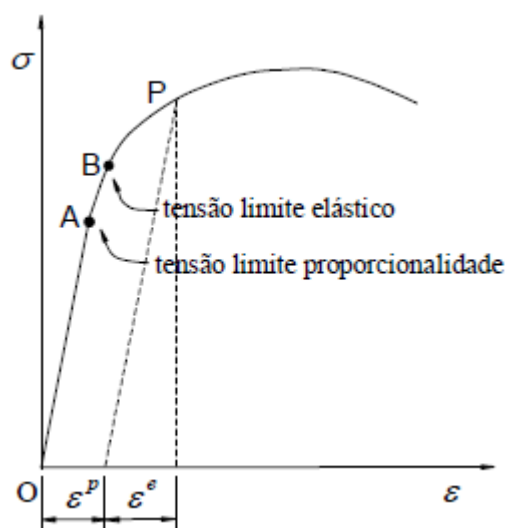


Figura 3 Curva tensão-deformação de uma liga metálica (Jorge e Dinis 2004)

Os processos de conformação plástica podem ser divididos em dois grandes grupos, diferenciados pela forma da matéria-prima com que trabalham:

- Processos de conformação de chapa;
- Processos de conformação de massa.

Os processos de **conformação de chapa** recorrem a matéria-prima sob a forma de chapa ou bobina (rolo de chapa), que é deformada plasticamente até à forma pretendida. Geralmente a forma inicial da chapa é alterada significativamente, não se verificando o mesmo para a sua área de secção. Em alguns casos, a magnitude da deformação plástica é comparável à da deformação elástica, sendo nestes casos necessário ter em conta o processo de recuperação elástica. Estes processos caracterizam-se pelo rácio entre a área e o volume da peça ser bastante

elevado. São exemplos dos processos de conformação de chapa (ASM 2005, Rodrigues e Martins 2010a):

- **Quinagem:**
  - Processo em que uma chapa é conformada sob a forma de uma superfície planificável de geometria cilíndrica, cônica ou prismática.

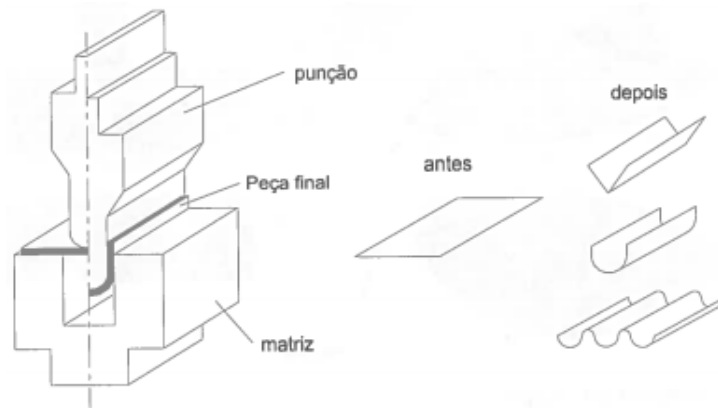


Figura 4 Ferramentas e peças obtidas por quinagem de chapa (Rodrigues e Martins 2010a).

- **Estampagem** (ou embutidura):
  - Processo de conformação de chapa que permite a obtenção de geometrias com superfície não planificável.

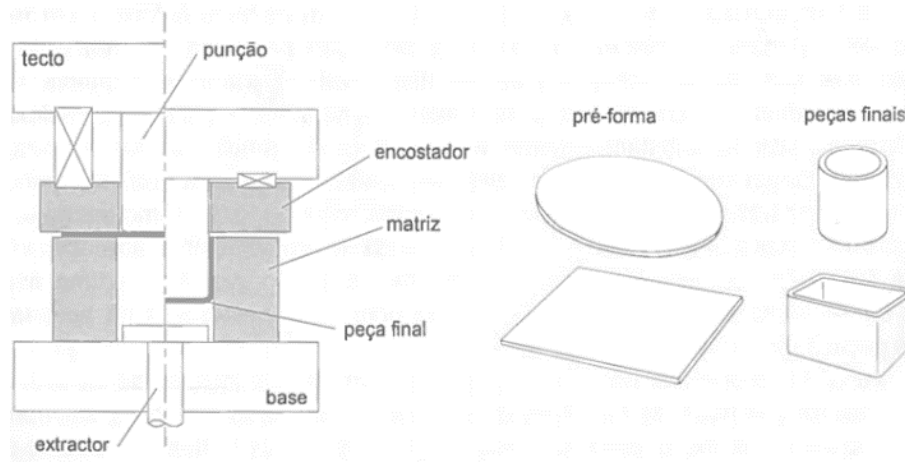


Figura 5 Ferramentas e peças obtidas por estampagem de chapa (Rodrigues e Martins 2010a).

- **Calandragem:**
  - Processo utilizado para a conformação de chapas em virolas ou perfis através de uma ou mais passagens por um conjunto de rolos.

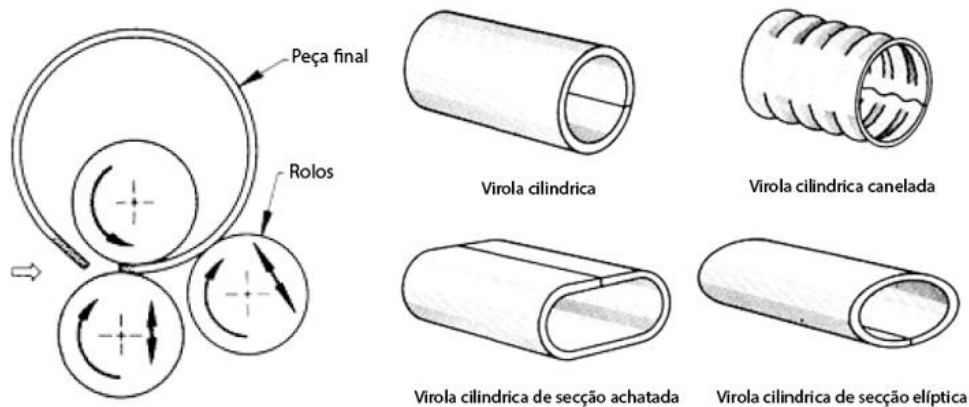


Figura 6 Ferramentas e peças obtidas por calandragem (adaptado de (ASM 2005)).

Por outro lado, os processos de **conformação de massa** recorrem a matérias-primas sob a forma de varões, barras ou blocos e caracterizam-se pela razão entre a área e o volume da peça a trabalhar ser bastante baixo. Os materiais conformados são sujeitos a níveis elevados de deformação, alterando substancialmente a forma e geometria da sua secção resistente. A percentagem da peça sujeita a deformação plástica é geralmente muito maior que a percentagem que sofre deformação elástica, podendo por isso ser desprezada a recuperação elástica após o processo. Dentro da conformação em massa destacam-se os processos de (ASM 2005, Rodrigues e Martins 2010a):

- **Extrusão:**

- Processo de deformação plástica de massa em que um punção força o material a passar por um orifício na matriz, alterando a geometria da sua secção transversal de acordo com a geometria do orifício.

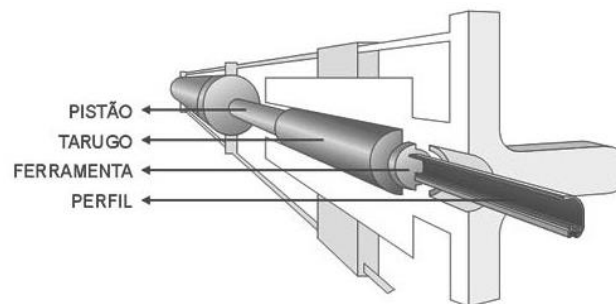


Figura 7 Processo de extrusão..

- **Laminagem:**

- Processo de deformação plástica que consiste em forçar o material a passar entre dois cilindros que rodam em sentidos opostos e com velocidades periféricas iguais, diminuindo a sua espessura ou alterando a geometria da sua secção.

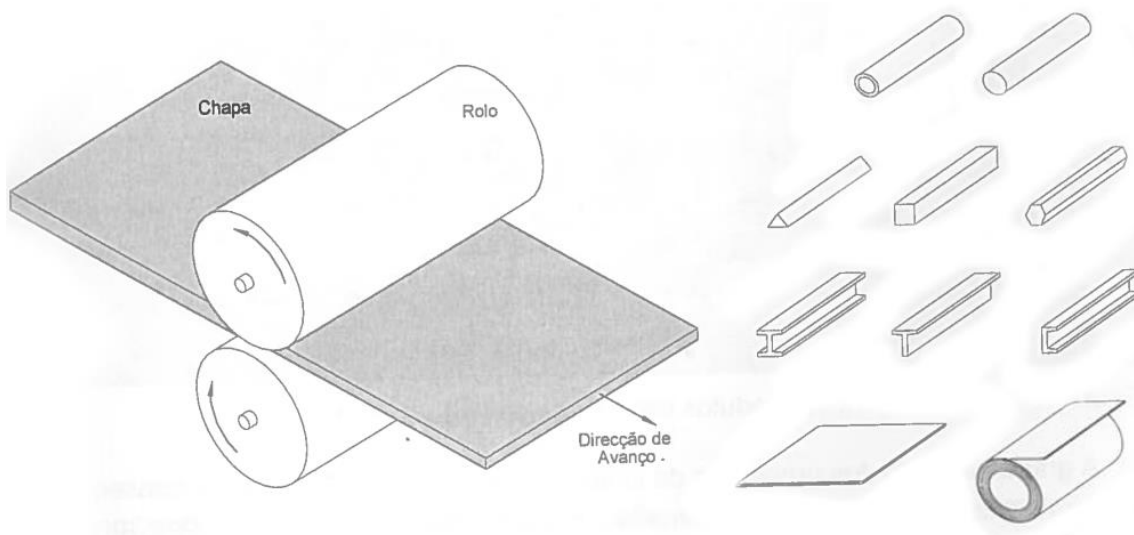


Figura 8 Ferramentas e peças obtidas por laminagem (Rodrigues e Martins 2010b).

- **Forjamento:**

- Processo tecnológico em que a forma de um material é alterada recorrendo a forças de compressão exercidas por matrizes atuadas por martelos ou prensas.

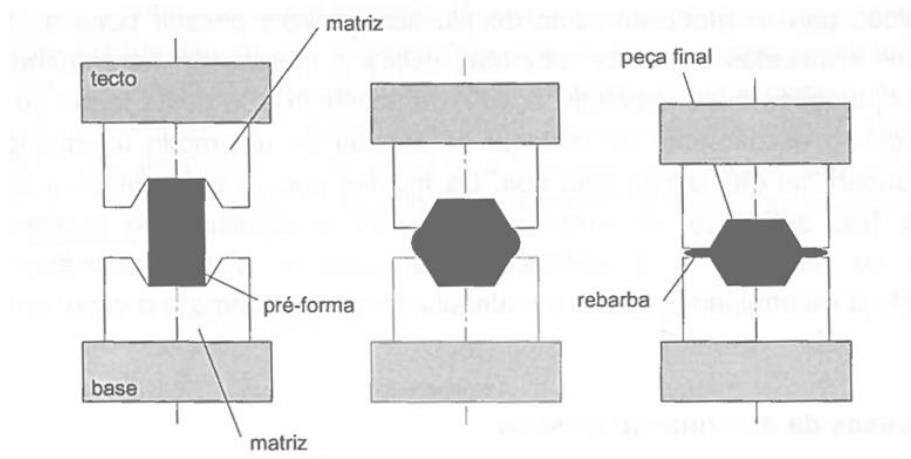


Figura 9 Ferramentas e peças obtidas por forjamento (Rodrigues e Martins 2010a).

## 2.2 Forjamento

Datando as primeiras peças obtidas por forjamento de 4500 A.C., quando era usado na Mesopotamia para a criação de ferramentas, este processo é o mais antigo processo de fabrico conhecido pelo Homem (Forge 2016a).

Através da aplicação sucessiva de golpes com martelos, ou aplicação gradual de uma força com prensas, um determinado material é transformado plasticamente, alterando-se assim a sua forma. Embora certos materiais com elevada propensão ao forjamento ou peças de pequena dimensão, possam ser forjados a frio, a maioria do forjamento é realizado a quente.

Esta tecnologia permite trabalhar uma grande variedade de materiais metálicos e a obtenção de peças com variadas geometrias e dimensões. Esta larga gama de aplicações torna o forjamento

um processo vastamente utilizado, passando o seu uso pelas indústrias dos transportes, militar, maquinaria industrial, componentes mecânicos, ferramentas, entre outros.

A grande utilização deste processo deve-se a um conjunto de fatores como a boa relação entre o custo de produção e as características mecânicas obtidas, diversidade de materiais metálicos usados e baixas taxas de material desperdiçado (Rodrigues e Martins 2010b, Filho *et al*, 2011).



Figura 10 Exemplos de algumas peças forjadas (Forge 2016b).

Ao longo deste documento irão ser usadas diferentes nomenclaturas para o material a forjar dependendo da fase em que este se encontra. Torna-se assim essencial definir esta nomenclatura a fim de evitar algum tipo de confusão:

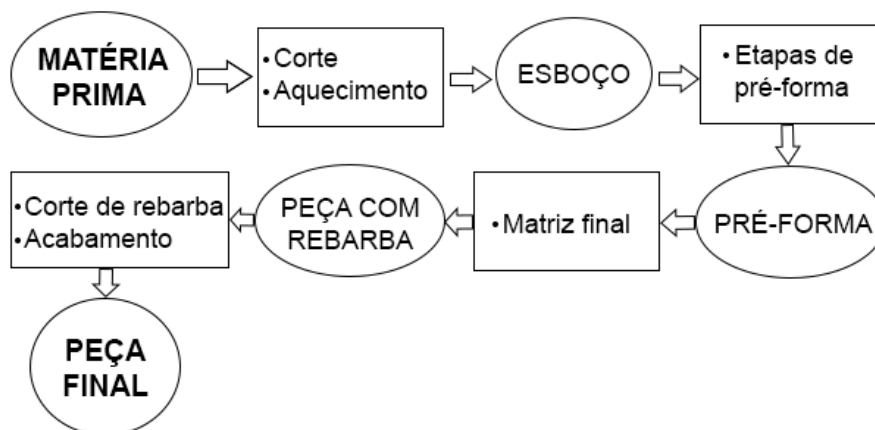


Figura 11 Nomenclatura do material ao longo do processo de forjamento.

Embora algumas peças com geometrias simples possam ser forjadas numa só operação, a grande maioria das peças forjadas são obtidas através de uma série de etapas, quer em matriz aberta, quer fechada.

Normalmente o material começa por ser forjado em matriz aberta, para adquirir uma pré-forma que permita que as etapas seguintes, com matrizes fechadas de geometria mais complexa, possam ser efetuadas com menos deformação.

A última etapa, de acabamento, serve para garantir certos detalhes dimensionais, com o mínimo de escoamento de material possível.

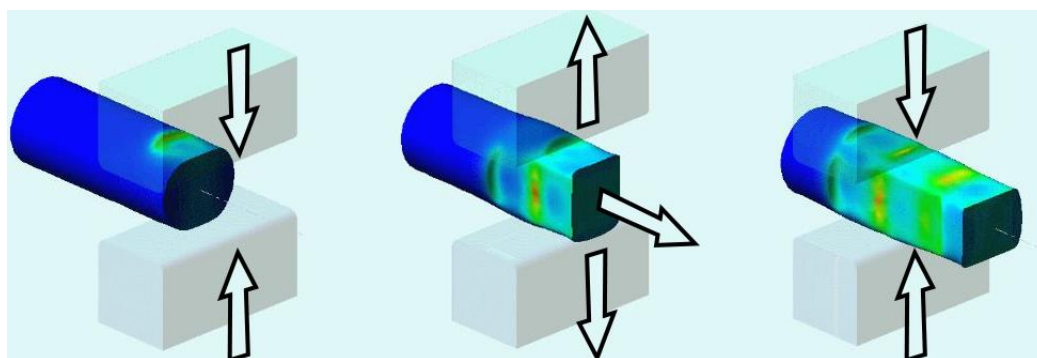


Figura 12 Exemplo de forjamento em matriz aberta, adaptado de (Technology 2015b)

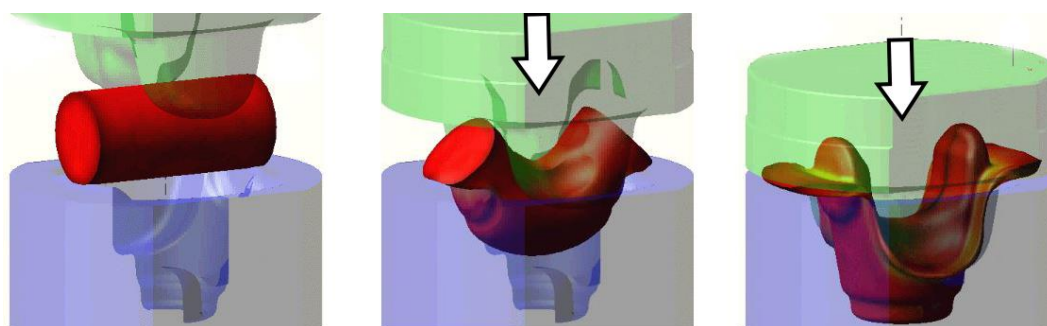


Figura 13 Exemplo de forjamento em matriz fechada, adaptado de (Technology 2015a)

Sendo que as etapas de pré-forma do material envolvem ferramentas de geometrias muito simples, geralmente duas faces planas da prensa apenas, as etapas seguintes envolvem a utilização de matrizes mais complexas, muito dispendiosas de fabricar.

Antes de entrarem para a produção, estas devem ser extensivamente testadas a fim de garantir um bom preenchimento e a eliminação de eventuais defeitos de forjamento que possam surgir (fissuras, sobreposições, etc.) (Altan e Shirgaokar 2014).

Para fins de testes, e devido ao elevado custo de fabricação de protótipos à escala real, procuram-se alternativas, que permitam prever com elevada exatidão o comportamento do material e das próprias matrizes, detetando assim eventuais erros antes do processo de fabricação das mesmas.

Entre estas alternativas, as mais utilizadas passam pela análise matemática, a prototipagem e a simulação numérica.

### 2.3 Tipos de forjamento

O processo do forjamento pode ser caracterizado através do tipo de ferramenta utilizada, temperatura da ferramenta, temperatura do material a forjar, tipo de peça a obter, etc. Existindo



uma panóplia bastante alargada de tipos de forjamento, ir-se-ão apenas referir os que interessam para o domínio deste trabalho e outros bastante comuns na indústria.

### 2.3.1 Temperatura do material

Começando por distinguir o processo pela temperatura de trabalho do material, o forjamento divide-se em forjamento a quente, a forno ou a frio.

#### Forjamento a quente

O forjamento a quente, caracteriza-se pela temperatura do material estar acima da sua temperatura de recristalização, o que diminui drasticamente a dureza e resistência do material e aumenta a sua ductilidade, facilitando o forjamento. Devido a este aumento da capacidade de deformar plasticamente o material, o processo pode ser realizado recorrendo a ferramentas de menores dimensões e com forças disponíveis inferiores (Rodrigues e Martins 2010a). Acresce ainda a facilidade de forjar peças de maiores dimensões e geometrias mais complexas, reduzindo ao mesmo tempo a probabilidade de ocorrência de defeitos como sobreposições ou fissuras (Lima 2007, Kalpakji 2014). Encontram-se representadas na Tabela 1 as temperaturas de recristalização para alguns materiais metálicos.

Como principais desvantagens do forjamento a quente, pode apontar-se o acrescido custo para o aquecimento do material (quer na ferramenta de aquecimento, quer no elevado consumo energético dispendido pela mesma), no fraco controlo dimensional, crescimento do grão com a utilização de temperaturas excessivas e ainda a criação de óxidos na superfície da peça, que pode levar à necessidade de tratamentos térmicos após o forjamento. (Rodrigues e Martins 2010a, Lima 2007).

Tabela 1 Temperaturas de recristalização para vários materiais metálicos, adaptado de (Palanivendhan 2014).

Material	Temperatura de recristalização (°C)
Monel (Ni-Cu)	593
Níquel (99,99%)	571
Aço de Baixo Carbono	538
Ferro Eletrolítico	398
Ligas de Alumínio	315
Cu – 5% Al	288
Alumínio (99,0%)	288
Ligas de Magnésio	252
Zinco	10
Chumbo	-4
Estanho	-44

#### Forjamento a frio

O processo realizado a frio caracteriza-se por um aumento da dureza e resistência mecânica e diminuição da ductilidade e tenacidade da peça. O forjamento a frio resulta em peças de melhor

acabamento superficial e tolerâncias dimensionais, a custo de geometrias mais simples, peças de menor dimensão e ainda ferramentas de trabalho obrigatoriamente maiores, devido ao acrescido esforço necessário para trabalhar o material a frio (Rodrigues e Martins 2010a).

### Forjamento a morno

Com parâmetros que se inserem numa faixa entre o forjamento a quente e o forjamento a frio, surge o forjamento a morno. Este realiza-se numa banda de temperaturas que varia entre a temperatura em que o esforço mecânico necessário para a deformação plástica começa a decrescer e a temperatura em que se começa a observar a criação de óxidos na superfície.

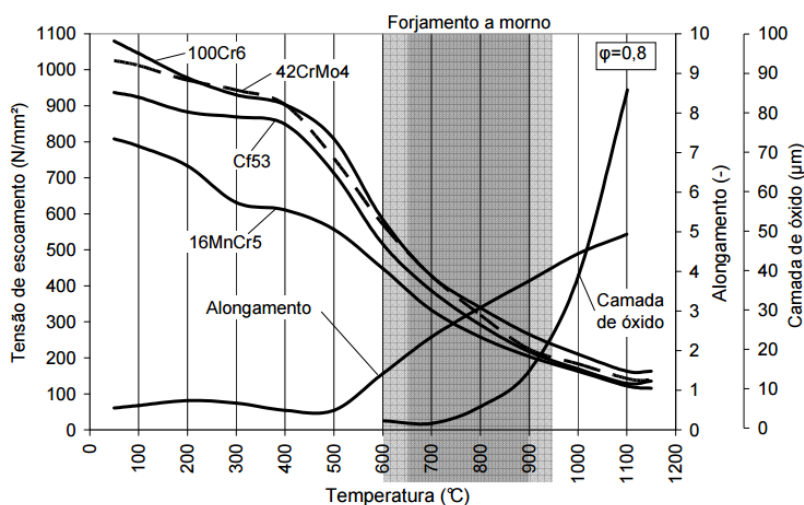


Figura 14 Influência da temperatura na tensão de escoamento, alongamento e espessura da camada de óxidos para alguns aços (Júnior 2007).

Este forjamento apresenta qualidade superficial e tolerância dimensional mais aproximada do forjamento a frio em conjunto com um esforço mecânico inferior, próximo do forjamento a quente (Júnior 2010, Schaeffer 2012).

## 2.4.2 Tipo de ferramenta utilizada

Outro tipo de caracterização do processo de forjamento incide no tipo de ferramenta utilizada para conformar a peça. Pode-se então dividir o processo em forjamento em matriz aberta, forjamento em matriz fechada e forjamento com outro tipo de ferramenta (forjamento por rolos, forjamento rotativo, por compressão axial, etc.) (Rodrigues e Martins 2010b).

### Forjamento em matriz aberta

O forjamento em matriz aberta caracteriza-se pelo baixo, ou inexistente, confinamento lateral do material a forjar por parte da ferramenta. Muitas vezes a peça é sujeita a uma série de compressões, manipulando-se a sua orientação entre estas e aplicando uma força localizada, com escoamento de material descontínuo (Rodrigues e Martins 2010b).

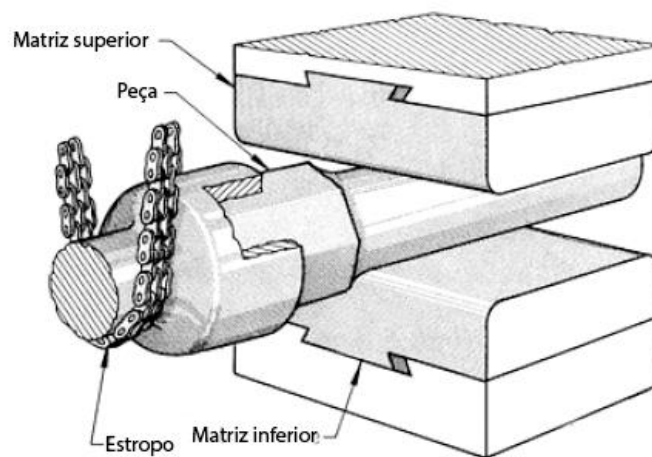


Figura 15 Forjamento em matriz aberta de um veio, adaptado de (ASM 2005).

O forjamento em matriz aberta é utilizado em situações em que:

- O número de peças a fabricar não compense o custo de fabricar uma matriz fechada, ou o prazo de entrega da peça não permita a conceção de matrizes fechadas (quando a geometria da peça assim o permite);
- Fabrico de protótipos;
- A peça tenha dimensões demasiado elevadas para ser produzida em matriz fechada;
- A peça deve sofrer uma etapa de pré-conformação, de modo a facilitar as operações seguintes realizadas em matriz fechada.

O limite de tamanho de peças a forjar em matriz aberta, está apenas condicionado pelo equipamento disponível para o fazer, prensas, martelos e fornos. As peças forjadas por este método podem variar entre peças com vários metros de diâmetro ou de comprimento e centenas de toneladas, até peças com poucos centímetros e algumas gramas (ASM 2005).

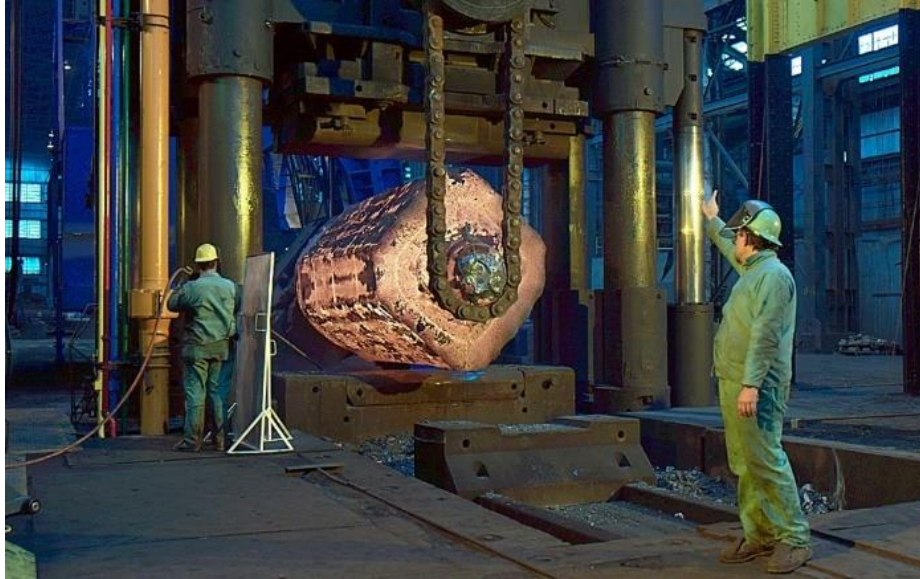


Figura 16 Forjamento de veio de grandes dimensões (Whemco 2016).

As principais vantagens associadas ao forjamento em matriz aberta são:

- Baixo custo de operação, minimizado pelo baixo custo da matriz e grande aplicabilidade da mesma;
- Ampla gama de materiais aplicáveis, todos os metais forjáveis podem-no ser em matriz aberta;
- Permite de igual modo obter peças de praticamente qualquer dimensão ou peso;
- Obtenção de peças com ótimas propriedades mecânicas, resistência mecânica, ductilidade, tenacidade e resistência à fadiga.

Todos estes fatores combinados fazem com que este, seja um processo utilizado em várias situações como processo único ou parte de um conjunto de operações (ASM 2005, Kalpakji 2014, Rodrigues e Martins 2010b). Como principais desvantagens do forjamento em matriz aberta são de destacar:

- Apenas permitir criação de peças geometricamente simples;
- Ser necessária mão de obra especializada;
- Processo com baixas tolerâncias dimensionais, causando a necessidade de etapas posteriores de acabamento.

### **Forjamento em matriz fechada**

Quando o material a transformar é confinado por todos os lados entre duas matrizes, trata-se de forjamento em matriz fechada. Neste tipo de forjamento, o negativo da geometria final da peça pode estar representado na matriz superior, inferior ou nas duas. É geralmente realizado a quente, para diminuir as forças necessárias na ferramenta e aumentar a ductilidade da matéria-prima (ASM 2005).

O tamanho e forma da matéria-prima é de grande importância neste caso, a fim de garantir o completo enchimento de toda a cavidade da matriz e minimizar o desperdício de material que escoar para o exterior das cavidades, formando a chamada rebarba (Rodrigues e Martins 2010b).

Esta representa um papel importante no forjamento por matriz fechada, ao representar uma barreira ao escoamento do material. A fricção elevada entre a matriz e a rebarba devido à grande pressão a que está exposta, cria resistência ao escoamento do material, que tende a deslocar-se pelo caminho que requer menos energia, escoando assim o material para dentro das cavidades da matriz e enchendo-as (Kalpakji 2014).



Figura 17 Matriz de forjamento de uma cambota e respetiva peça forjada, adaptado de (Whemco 2016).

Dentro do forjamento de matriz fechada existe ainda um processo designado por forjamento de precisão, que consiste no fabrico de peças na forma final ou quase final (*near net shape*). Este tipo de forjamento elimina a existência de rebarba, melhorando as tolerâncias dimensionais, diminuindo o desperdício de material e ainda eliminando a necessidade de operações de acabamento (Rodrigues e Martins 2010b, Siegert e Ringhand 1994).

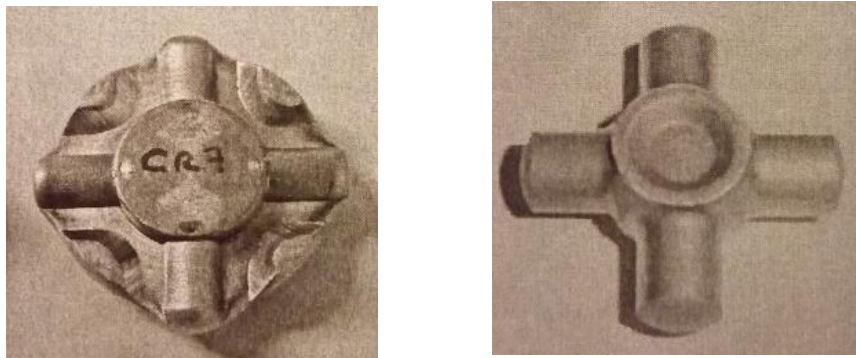


Figura 18 Cardan obtido por forjamento de precisão.

O forjamento em matriz fechado é utilizado quando:

- É necessário produzir grandes séries de peças;
- Produzir peças com geometrias complexas;
- Produzir peças com boa tolerância dimensional e baixo desperdício de material (forjamento de precisão).

O processo do forjamento por matriz fechada envolve uma série de operações, a realizar antes ou depois da compressão da matéria-prima na ferramenta. Este começa com o corte da matéria-

prima para o tamanho adequado. Nesta fase deve-se ter em conta o volume da peça a fabricar bem como a sua contração e o tamanho da rebarba. A peça pode ser cortada em lingotes, barras, tarugos ou estampados. A matéria-prima é de seguida aquecida, em fornos indutivos ou de gás, de forma a melhorar a sua facilidade de forjar, diminuindo o esforço necessário na ferramenta. Dependendo da geometria da peça, vida útil pretendida para a matriz, força disponível na ferramenta, entre outros, é definido o número de etapas de forjamento nesta fase. Poderão haver etapas intermédias, em matriz aberta ou fechada. É então efetuado o forjamento final, numa matriz com as dimensões finais da peça e tendo em conta a contração posterior do material. De seguida, a rebarba é cortada (geralmente com um punção e matriz) a menos que este seja um processo de forjamento de precisão. A peça pode de seguida sofrer algum tratamento térmico dependendo das características mecânicas pretendidas. Devido ao aquecimento da peça, esta pode ser, posteriormente, submetida a processos de acabamento superficial, a fim de remover óxidos formados durante o processo (Filho *et al*, 2011).

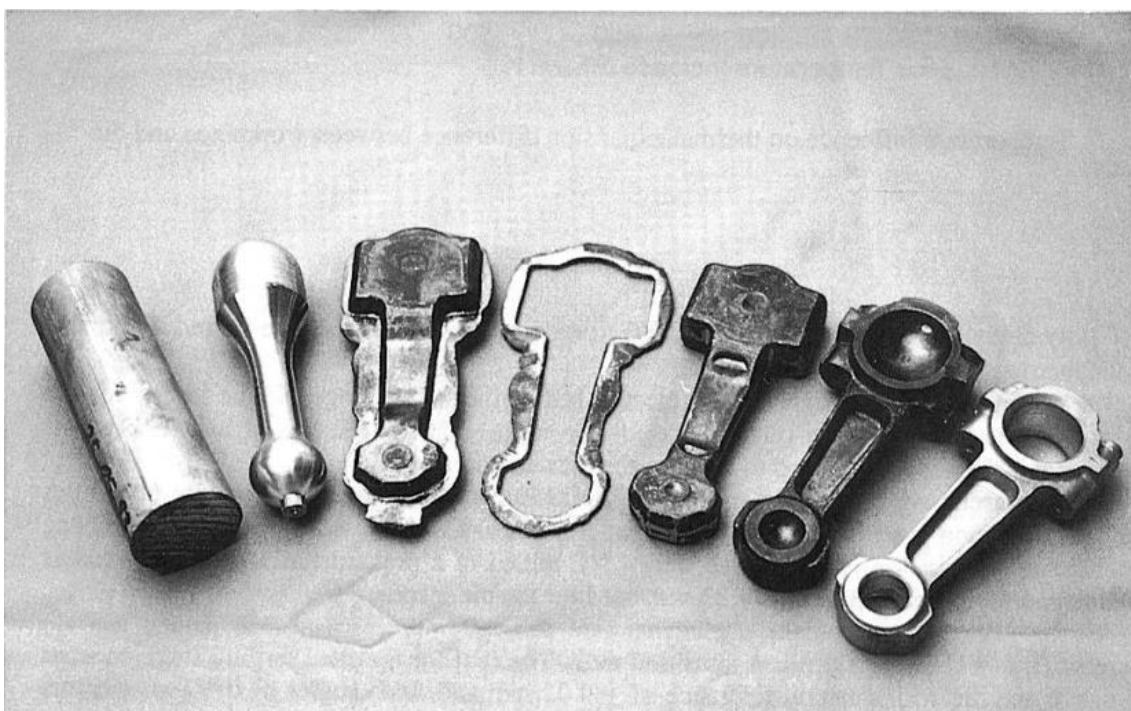


Figura 19 Várias etapas do material no processo de forjamento de uma biela (Siegert e Ringhand 1994).

## 2.4 Forjabilidade

A dificuldade de forjar um certo material pode ser avaliada analisando a sua forjabilidade. Esta característica é definida como a capacidade de um certo material sofrer deformação sem fissurar (Kalpakji 2014). Baixa forjabilidade pode levar à rotura do material durante o enchimento das matrizes ou levar a que o metal escoe pelas cavidades sem as preencher, devido a elevada resistência ao escoamento, levando ao aparecimento de defeitos na peça final (Spretnak 1964).

A forjabilidade aumenta com o aumento da temperatura do material até ao ponto em que uma segunda fase apareça, devendo no entanto ter-se em consideração que o aumento da temperatura provoca o crescimento do grão, que em algumas ligas vai levar a uma diminuição da forjabilidade e ainda causar um decréscimo das propriedades mecânicas da peça final. É por isso de extrema importância definir uma correta temperatura de forjamento, que permita encontrar o ponto óptimo de equilíbrio entre o aumento da forjabilidade sem influenciar em demasia o crescimento do grão (Altan e Shirgaokar 2014).

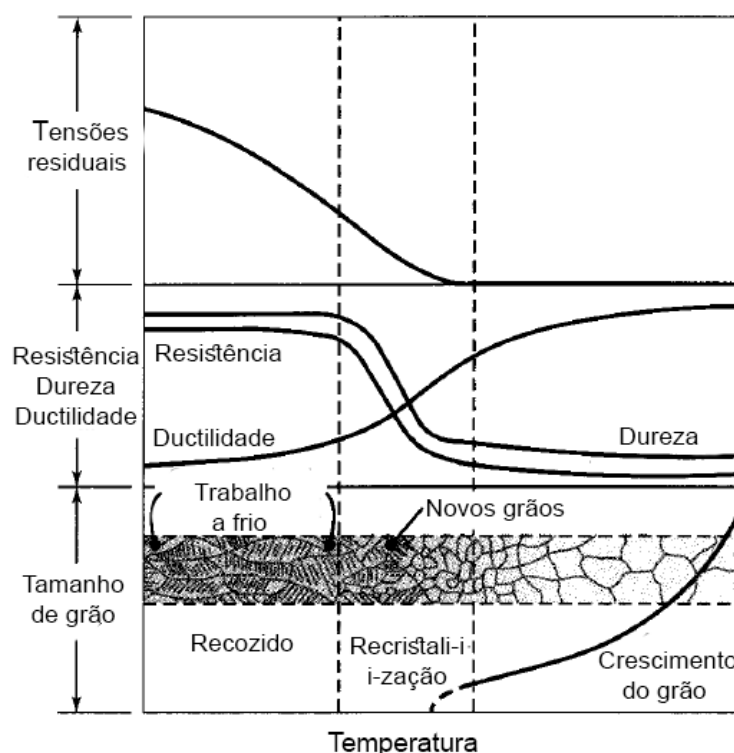


Figura 20 Evolução do tamanho de grão e propriedades mecânicas com a temperatura, adaptado de (Kalpakji 2014)

Outro fator com grande importância para a forjabilidade é a velocidade de deformação,  $\dot{\epsilon}$ . Para a maioria dos aços, o aumento da velocidade de deformação leva ao aumento da forjabilidade. Este aumento é associado à geração de calor devido à deformação, que é para estes casos maior. Aumentos excessivos na temperatura devido à geração de calor poderão, no entanto, causar princípios de fusão de material, diminuindo a forjabilidade e as propriedades mecânicas das peças forjadas. Na Figura 21 pode-se ver o efeito do aumento velocidade de deformação num ensaio de torção de um provete metálico. Quanto maior a velocidade de rotação do provete, maior é o número de revoluções até partir.



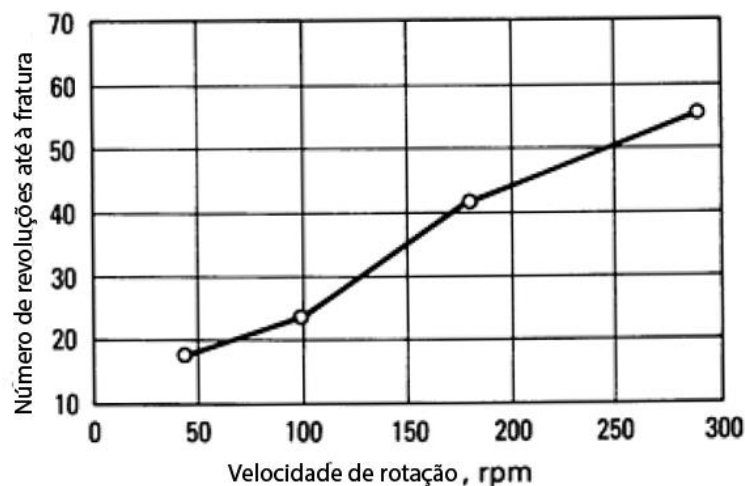


Figura 21 Aumento da resistência à fratura por torção com o aumento da velocidade de rotação de um provete (ASM 2005)

A existência de inclusões nos metais também tem um papel preponderante na sua forjabilidade, visto estas serem uma fonte de nucleação de vazios, como se pode observar na Figura 22, causando fratura dúctil. Estas podem consistir em vários tipos de partículas de fases secundárias como óxidos, carbonetos e sulfuretos. A sua influência depende da sua forma, dureza, distribuição e quantidade, quando maior, menor é a ductilidade e conseqüentemente menor é a forjabilidade do material (Kalpakji 2014).

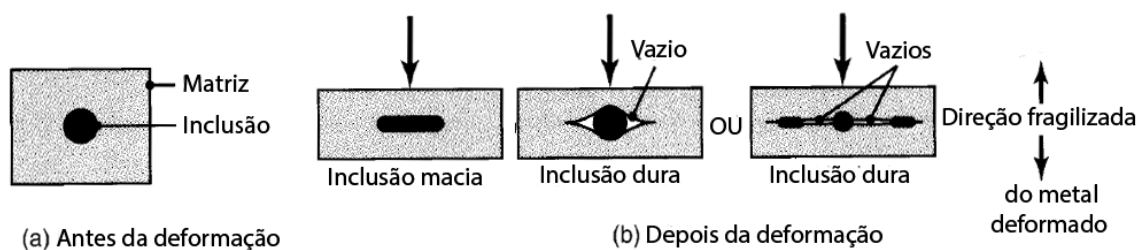


Figura 22 Efeito da presença de inclusões no aparecimento de defeitos (Kalpakji 2014)

Considerando a sua propensão para o forjamento, as ligas metálicas podem ser classificadas em três grupos (Spretnak 1964):

- **Boa forjabilidade:** materiais que apresentam características bastante propícias para o forjamento, são exemplos deste grupo: aços AISI 4340 (Fe6Cr4V), AISI 304 e ligas de titânio Ti-6Al-4V. De notar que a designação dos vários tipos de materiais metálicos pode ser decodificada no Anexo C.
- **Fraca forjabilidade:** ligas com estruturas cristalinas de grãos grosseiros como as ligas de molibdénio e tungsténio, obtidas por fundição a arco (estas ligas apresentam melhorias significativas de forjabilidade quando a matéria prima é extrudida). Ligas com uma só fase que contenham quantidades elevadas de fases na fronteira do grão, como óxidos de molibdénio;



- **Forjabilidade variável:** ligas que possuam elementos raros como Cério (Ce) ou Lantânio (La) nas suas fronteiras de grão, que provoca propriedades variáveis de forjabilidade entre aquecimentos (Wegman 1993). Aços inoxidáveis de níquel-crômio e de alto crômio são exemplos de materiais com forjabilidade variável. Poderá verificar-se esta propriedade pela presença de grandes quantidades de ferrite de fase delta na microestrutura.


<b>MAIOR FORJABILIDADE</b>	
Ligas de Alumínio	
Ligas de Magnésio	
Ligas de Cobre	
Aços ao Carbono e de Baixa Liga	
Aços Inoxidáveis Martensíticos	
Aços Inoxidáveis Austeníticos	
Ligas de Níquel	
Ligas de Titânio	
Superligas de Ferro	
Superligas de Cobalto	
Ligas de Molibedénio	
Superligas de Níquel	
Ligas de Tungsténio	
Ligas de Berílio	
<b>MENOR FORJABILIDADE</b>	

Figura 23 Forjabilidade de vários materiais, adaptado de (ASM 2005)

Existem diversos testes que permitem quantificar a forjabilidade de um material que foram desenvolvidos ao longo dos tempos, sendo alguns bastante complexos. Destacam-se dois ensaios, o teste de compressão e o teste de torção a quente, devido à sua natureza de simples execução e bons resultados demonstrados.

**Teste de compressão:** Neste teste, um cilindro sólido do material a testar é comprimido entre duas matrizes planas até aparecerem fissuras na sua superfície. A distância entre matrizes à qual estas fissuras se formam é anotada. Quanto menor for a distância, mais forjável é o material. De notar ainda que materiais frágeis terão tendência a fraturar enquanto que materiais mais dúcteis terão tendência a criar uma barriga devido aos efeitos do atrito entre as faces das matrizes e o material e ao aparecimento de fissuras (Kalpakji 2014, Dieter e Group 1984).

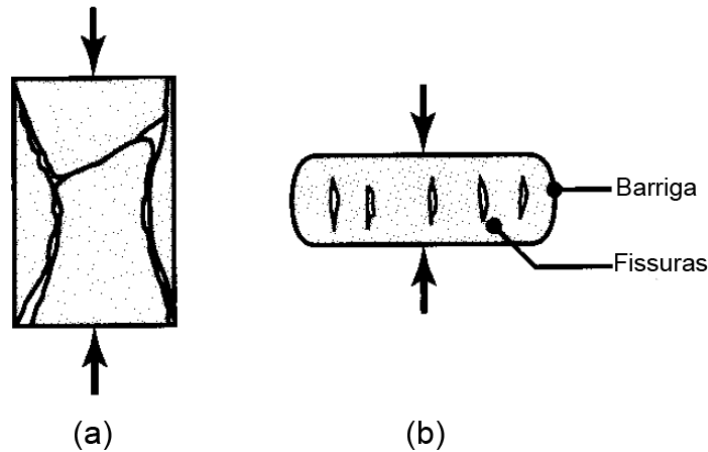


Figura 24 Exemplo do aparecimento de fissuras no teste de compressão, adaptado de (Kalpakji 2014).

**Teste de torção a quente:** Neste teste um provete cilíndrico é aquecido até à temperatura de forjamento do material, sendo depois torcido continuamente numa direção até fracturar. O número de voltas até à fratura bem como o binário necessário para manter a torção a uma velocidade constante são então analisados. Este método poderá ser ainda usado para determinar a temperatura ótima de forjamento, que será a temperatura em que o número de voltas é maximizado (Kalpakji 2014, Dieter *et al*, 2003).

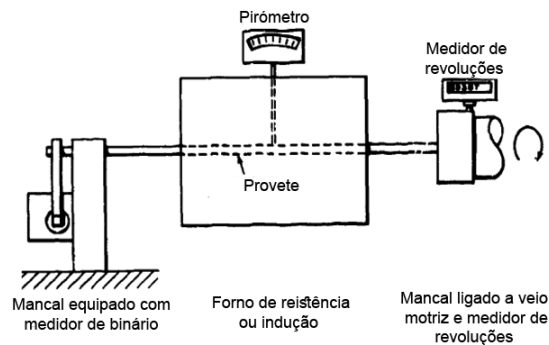


Figura 25 Máquina de teste de torção a quente, adaptado de (Spretnak 1964).

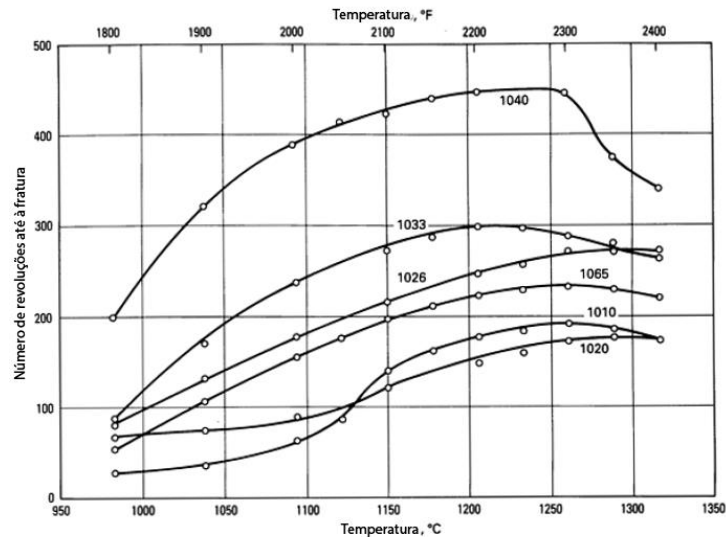


Figura 26 Curvas do teste de torção a quente para vários aços ao carbono, adaptado de (ASM 2005).

## 2.5 Velocidade

Ao planear um processo de forjamento, a velocidade do mesmo, para ser corretamente analisada, deve ser vista de duas óticas diferentes. A nível económico, a indústria necessita de cadências altas de peças com boa qualidade, a fim de maximizar os lucros inerentes ao processo. Ao nível de definição dos parâmetros do processo do forjamento em si, a velocidade de deformação deve ser tal, que não afete as boas características finais da peça, minimizando o aparecimento de defeitos.

Assim sendo, deve-se ter em conta, que velocidades demasiado elevadas no processo de forjamento podem acabar por causar cadências mais baixas de fabrico de peças para venda, devido ao aumento do número de peças rejeitadas. Um compromisso deve ser encontrado, garantindo a maior velocidade possível do processo sem se sacrificar as características finais da peça. Para tal, deverão conhecer-se as limitações da maquinaria envolvida, do processo em si e da deformação plástica do material a usar. A Tabela 2 mostra as velocidades de atuação e tempos de contacto para os principais equipamentos usados no forjamento.

Tabela 2 Velocidades de atuação e tempo de contacto das máquinas de forjamento, adaptado de (Rodrigues e Martins 2010b)

Equipamento	Tempo de contacto da matriz com a peça [ms]
Martelo de alta velocidade	0,5-5
Martelo de queda livre	1-10
Prensa excêntrica	20-100
Prensa de fuso	50-150
Prensa hidráulica	250-500

Para se conhecerem as limitações do material é importante caracterizar a sua velocidade de deformação,  $\dot{\epsilon}$ , definida por:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Onde:

$\dot{\varepsilon}$  é a velocidade de deformação do material;

No trabalho a frio, o encruamento tem um papel preponderante no comportamento mecânico dos materiais, enquanto que, no trabalho a quente, este deixa de se considerar relevante focando-se a influência na velocidade de deformação. Torna-se assim importante clarificar a lei de comportamento tensão-velocidade de deformação dos materiais metálicos a temperaturas superiores à de recristalização (Rodrigues e Martins 2010b):

$$\dot{\varepsilon} = A \cdot \frac{\sigma^m}{D^P} \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) = B \cdot \sigma^{1/m}$$

Onde:

$A$  e  $B$  são constantes;

$R$  é a constante universal dos gases ( $kJ \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ );

$T$  a temperatura do material ( $K$ );

$\sigma$  a tensão aplicada ( $MPa$ );

$D$  o tamanho do grão ( $m$ );

$P$  o coeficiente de influência do tamanho do grão;

$m$  o coeficiente de sensibilidade à velocidade de deformação;

$Q$  a energia de ativação aparente para a deformação ( $kJ \cdot mol^{-1}$ ).

No entanto, a prática corrente de engenharia veio a determinar que se utiliza sobretudo a forma matemática inversa:

$$\sigma = C \cdot \dot{\varepsilon}^m$$

Onde:

$C$  é uma constante dependente das condições da operação.

Os materiais metálicos possuem valores de  $m$  muito baixos à temperatura ambiente, valores inferiores a 0,05, daí não se considerar a influência da velocidade nos processos de deformação a frio. Quanto ao trabalho a quente, a caracterização viscoplástica dos materiais metálicos define valores na ordem de 0,1 a 0,2 para  $m$ , não se podendo assim ignorar a influência da velocidade. A Tabela 3 mostra valores típicos de  $C$  e  $m$  para materiais metálicos recozidos válidos para valores de extensões verdadeiras entre 0,2 e 1,0 (Rodrigues e Martins 2010a, Sofuoglu 2006)

Tabela 3 Valores típicos das constantes da lei de comportamento rígido-viscoplástica para diferentes materiais metálicos (Rodrigues e Martins 2010a)

Material	Temperatura (°C)	C (MPa)	m
Aços ao Carbono	900-1200	165-48	0,07-0,24
Aços Inoxidáveis	600-1200	415-35	0,02-0,4
Alumínio	200-500	82-14	0,07-0,23
Chumbo	100-300	11-2	0,1-0,2
Cobre	300-900	240-20	0,06-0,17
Magnésio	200-400	140-14	0,07-0,43
Titânio	200-1000	930-14	0,04-0,3

## 2.6 Atrito e lubrificação

Na maioria dos casos, o atrito representa um papel negativo nos processos de fabrico, aumentando as cargas necessárias para deformação, o desgaste das ferramentas e provoca pior acabamento superficial. No entanto, em alguns processos como no caso do forjamento, o atrito desenvolvido na interface material/matriz é essencial para o processo. O atrito ocorre, pois a nível microscópico as superfícies nunca são perfeitamente lisas, tendo uma determinada rugosidade. Estas imperfeições impedem o movimento relativo entre as superfícies sobre pressão (Rodrigues e Martins 2010a).

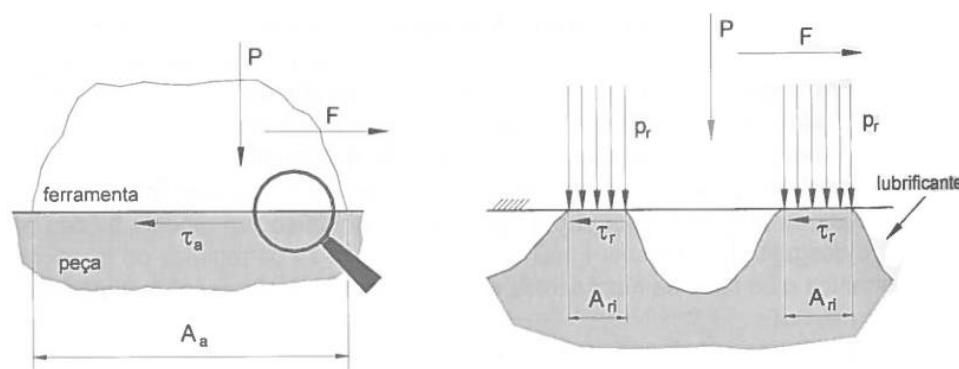


Figura 27 Representação esquemática do contacto entre a superfície da peça e da ferramenta (Rodrigues e Martins 2010a).

Embora a mecânica do atrito seja um processo muito complexo, algumas formulações simplificadas são assumidas a fim de o quantificar. Uma dessas formulações é a *teoria de Amonton-Coulomb*.

Na Figura 27 apresentam-se duas superfícies sujeitas a uma carga  $P$ , a área real de contacto  $A_{ri}$  é inferior à área de contacto aparente,  $A_a$ , pela razão falada anteriormente. Tendo em conta este valor real de contacto, a condição de equilíbrio dita que:

$$P = \sum_i p_r \cdot A_{ri}$$

Em que:

$p_r$  representa a pressão real de contacto.

Desta forma, a força tangencial, necessária para vencer a força de atrito entre as superfícies,  $F$ , será dada por:

$$F = \sum_i \tau_r \cdot A_{ri}$$

Onde:

$\tau_r$  é a tensão de corte real.

Define-se assim o coeficiente de atrito,  $\mu$ , como o rácio entre a força necessária ao movimento,  $F$ , e a força normal entre as superfícies,  $P$ :

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{\sum_i \tau_r \cdot A_{ri}}{\sum_i p_r \cdot A_{ri}} = \frac{\tau_r}{p_r} = \mu_r$$

Onde:

$\mu_r$  é o coeficiente real de atrito.

Repare-se que nesta teoria, o atrito é independente das áreas de contacto, quer a real, quer a aparente, dependendo apenas da carga aplicada entre as superfícies (Rodrigues e Martins 2010b, Júnior 2007).

A tensão de corte máxima na interface material/ferramenta é equivalente à tensão limite de elasticidade em corte puro  $\tau_{m\acute{a}x} = k$ . Segundo a *Lei de Prandtl*, a tensão de corte devido ao atrito é independente da pressão aplicada entre as superfícies, introduzindo um coeficiente corretivo,  $m'$ , designado por fator de atrito, que representa o rácio entre a tensão de atrito e a tensão de corte máximo:

$$\tau = m' \cdot \tau_{m\acute{a}x} = m' \cdot k$$

Onde:

$m'$  é fator de atrito na interface (normalmente designado por  $m$ , será designado por  $m'$  a fim de o diferenciar do coeficiente de sensibilidade da tensão à velocidade de deformação referido no subcapítulo anterior);

Esta lei deve ser aplicada em situações em que a pressão entre as superfícies seja muito elevada, situações as quais em que o fator de atrito,  $\mu$ , deixa de ter significado. O fator de atrito  $m'$ , varia entre  $m'=0$  para os casos que não existe atrito e  $m'=1$  para os casos em que existe atrito máximo, quando se verifica adesão. A Tabela 4 mostra diferentes valores de  $m'$  para o forjamento de aços e ligas de alumínio, variando a temperatura de trabalho e o lubrificante usado (Júnior 2007, Rodrigues e Martins 2010b).

Tabela 4 Valores indicativos do fator de atrito para diferentes operações e lubrificante, adaptada de (Júnior 2007, Rodrigues e Martins 2010a)

Fator de atrito $m'$	Tipo de forjamento	Lubrificante
0,2-0,4	Quente	Água-grafite ou Óleo-grafite
0,13-0,32	Morno	Óleo-grafite
0,15-0,4	Quente	Grafite
0,05-0,15	Frio	Grafite
0,6-1,0	Morno	Sem lubrificação

O efeito do atrito no forjamento pode ser facilmente observado com o forjamento em matriz aberta de um esboço com seção quadrada. Comprimindo o esboço entre duas superfícies paralelas, em condições ideais,  $m'=0$ , a sua largura iria aumentar e a altura diminuir, sem que as suas paredes laterais perdessem o seu paralelismo. Em condições reais,  $m' \neq 0$ , observa-se a formação de uma barriga nas paredes laterais devido à tensão de corte na interface matriz/esboço. Este efeito é acentuado no forjamento a quente em matriz aberta devido à transferência de calor na interface matriz/esboço, que arrefece o material nesta zona dificultando a sua deformação (Palanivendhan 2014).

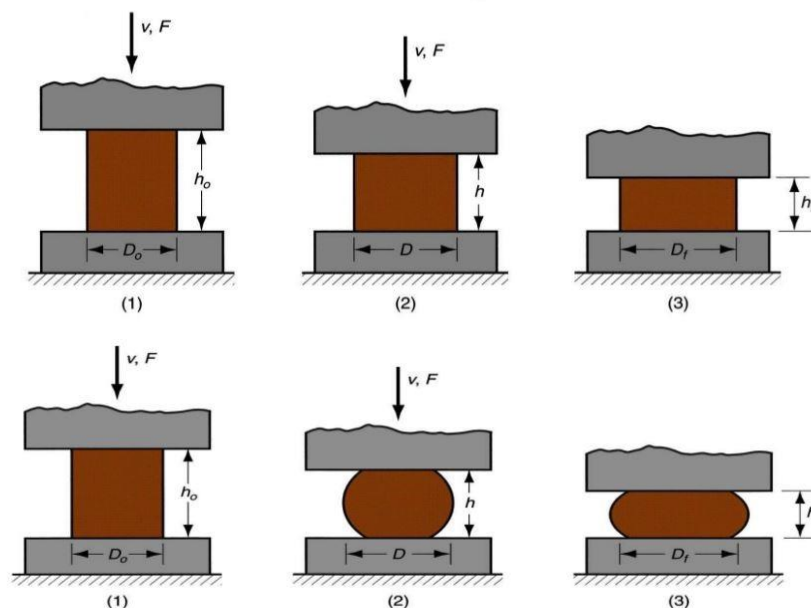


Figura 28 Forjamento em matriz aberta com atrito nulo (em cima) e com a existência de atrito (em baixo), adaptado de (Palanivendhan 2014).

A fim de diminuir o atrito entre as matrizes e o esboço, são aplicados materiais lubrificantes nas matrizes. Existem vários tipos de lubrificantes como, óleos com alto ponto de fusão (devem ser livres de chumbo e enxofre), suspensões de grafite coloidal em água ou óleo e lubrificantes sintéticos, estes últimos destacam-se por serem bastante limpos. Os principais métodos de aplicação utilizadas para a sua aplicação são o pincelamento, ou a pulverização através de pistolas próprias para o efeito.(ASM 2005).

Uma correta lubrificação deverá levar a:

- Diminuição da fricção entre a matéria-prima e as matrizes;
- Funcionar como desmoldante, evitando a soldadura entre a matéria-prima e a matriz,
- Diminuir a transferência de calor, evitando grandes perdas de temperatura da matéria-prima;
- Permitir um escoamento do material mais uniforme;
- Proteger as matrizes da erosão e corrosão;
- No caso da ausência de ejetores, permitir criar pressão gasosa que ajuda a remover a peça da matriz;
- Evitar ser poluente e tóxico, para melhorar as condições de trabalho dos operários e diminuir o impacto ambiental do processo.

Dentro dos tipos de lubrificantes existentes destacam-se:

Tabela 5 Diferentes tipos de lubrificação e as suas vantagens e desvantagens.

<b>Tipo de lubrificante</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Grafite com base de água	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elimina fumo e fogo;</li> <li>• Arrefece as matrizes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tem de ser aplicado por pulverização para se obterem bons resultados.</li> </ul>
Sintético com base de água	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elimina fumo e fogo;</li> <li>• É mais limpo que os outros desta tabela;</li> <li>• Arrefece as matrizes;</li> <li>• Facilmente diluível;</li> <li>• Não necessita de ser agitado antes de usar;</li> <li>• Reduz o entupimento dos equipamentos de pulverização;</li> <li>• Não pinta a peça.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tem de ser aplicado por pulverização para se obterem bons resultados;</li> <li>• Lubrificação inferior à da grafite.</li> </ul>
Grafite com base de óleo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pode ser pulverizado ou pincelado;</li> <li>• Apresenta bons resultados até temperaturas de 540°C.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cria fumo e fogo;</li> <li>• Cheiro nauseabundo;</li> <li>• Caracter explosivo prejudica a vida da matriz;</li> <li>• Implicações graves na saúde e segurança dos operários.</li> </ul>

A seleção dos lubrificantes para o forjamento deverá então basear-se em alguns fatores inerentes ao processo, nomeadamente:



- A temperatura de forjamento;
- A temperatura da matriz;
- Método de aplicação;
- Complexidade da peça a forjar;
- Preocupações de higiene e segurança laboral;
- Preocupações ambientais.

No forjamento a quente de aços ao carbono e de baixa liga, os lubrificantes mais usados são os lubrificantes de grafite com base de água, sendo que para forjamento com martelos é usual o uso de grafite com base de óleo.

Devido as elevadas temperaturas de forjamento de aços ao carbono, utilizam-se por vezes revestimentos do esboço em conjunto com o lubrificante. Estes revestimentos são normalmente compostos por grafite em algum fluido usados em conjugação com fosfato. Para forjamentos a temperaturas inferiores (menos de 400°C) o bissulfureto de molibedénio apresenta melhores propriedades que a grafite. Este pode ser aplicado sob a sua forma sólida, ou pulverizado disperso num solvente (Spretnak 1964).

## 2.7 Equipamentos para forjamento

Serão introduzidos neste capítulo os equipamentos utilizados no forjamento, nomeadamente as máquinas de forjamento e os fornos. O forjamento pode ser realizado através de dois tipos diferentes de máquinas, com princípios de funcionamento diferentes, os martelos e as prensas. A escolha varia conforme a capacidade, velocidade, precisão ou custo pretendido (Martins 2014).

### 2.7.1 Martelos

O uso de martelos remonta aos primórdios do forjamento. Devido à sua simplicidade de fabrico, ampla variedade de aplicações e facilidade de uso e manutenção, estes foram o meio mais utilizado para o forjamento ao longo dos tempos.

Os martelos possibilitam o uso de grandes forças, com pequenos tempos de contacto, conformando o material através de sucessivos golpes a alta velocidade de uma massa cadente. Este movimento pode ser devido apenas à gravidade, ou ter uma aceleração adicional. Neste caso, a pressão é máxima no instante inicial do impacto, diminuindo rapidamente enquanto a energia é dissipada através da deformação do material (Chiaverini 1978, Filho *et al*, 2011).

Embora o próprio martelo seja o elemento fundamental para a realização do forjamento, os atuadores, responsáveis pela elevação do punção até à altura máxima, podem auxiliar e contribuir para o aumento da força utilizada no impacto. Os atuadores normalmente utilizados são cilindros que operam por pressão de ar, vapor ou hidráulicamente (Michels *et al*, 2014):

Características gerais:

- Maiores deformações próximo à superfície;
- O ângulo de saída é, normalmente, maior;
- Vários golpes necessários para produzir a peça;
- Energia dissipada perto da superfície;

- Devido ao impacto são necessárias matrizes específicas de custos superiores

Variantes:

- De queda livre;
- De dupla ação;
- HERF (high-energy-rate forging machine).

### De queda livre

O martelo de queda livre é o equipamento mais simples, versátil e barato que permite a realização do processo de forjamento através da deformação plástica provocada pela queda livre de uma massa a partir de determinada altura. Este equipamento é composto por um carro que está rigidamente ligado a uma prancha, correia, cadeia ou cilindro pneumático ou hidráulico. O carro, durante o curso de trabalho, acumula energia cinética que é consumida na deformação plástica da peça e na deformação elástica do carro e da base da prensa. O mecanismo de elevação pode ser acionado por rolos de atrito ou ar comprimido, sendo este último o que oferece maior velocidade e rendimento (Filho *et al*, 2011). A elevação do carro é feita até determinada altura, sendo depois deixado cair livremente, ou seja, apenas sobre o efeito da força gravítica. O mecanismo de subida atua imediatamente após a conclusão da queda, resultando em 30 a 150 golpes por minuto.

A limitação deste tipo de equipamento é dada pela massa do martelo e pela altura máxima de elevação, que são os fatores condicionantes da energia cinética gerada. A capacidade nominal do martelo é geralmente fornecida em termos de energia máxima a ser disponibilizada pela massa em queda. A expressão que permite calcular a energia deste tipo de martelo é dada por:

$$W_H = m \cdot g \cdot h$$

Onde:

$m$  é o valor da massa [kg];

$g$  a aceleração da gravidade [ $m \cdot s^{-2}$ ];

$h$  a altura da qual a massa cai [m].

A energia utilizada na deformação da peça é cerca de 10 a 30% da calculada na expressão anterior, uma vez que existem perdas de energia para a estrutura do martelo, ferramentas e das fundações para o solo (Rodrigues e Martins 2010b).

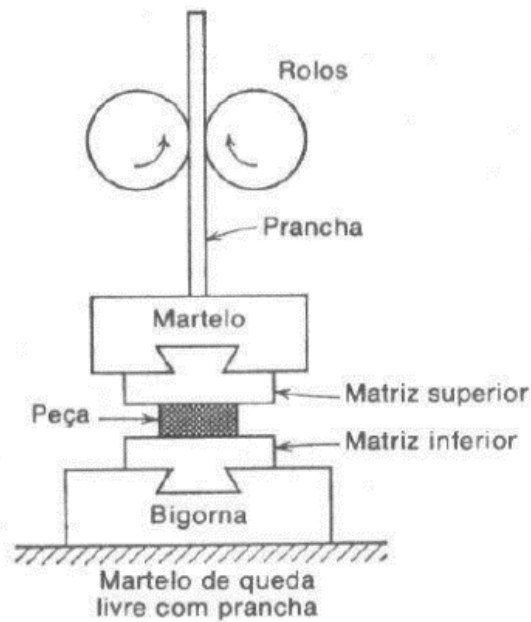


Figura 29 Representação esquemática de um martelo de queda-livre (Martins 2014).

### De dupla ação

Os martelos de dupla ação possuem o mesmo princípio de funcionamento que os martelos de queda livre, contudo, não utilizam somente a energia fornecida pela massa em queda, sendo o carro acelerado não só pela ação da gravidade como por ação pneumática ou hidráulica. Deste modo, existe uma força adicional que resulta numa energia fornecida muito superior à dos martelos de queda por gravidade, sendo o controle do impulso inicial mais simples. A carga em questão pode atingir valores vinte vezes superiores ao peso da massa em queda. Este tipo de ferramenta é preferível quando o forjamento é em matriz. A intensidade de cada golpe pode ser alterada, através da aceleração ou desaceleração da massa. A energia disponível, sem considerar as perdas, é dada por:

$$W_H = (m \cdot g + p \cdot A)$$

Onde:

$p$  é a pressão do ar, gás ou do vapor [MPa];

$A$  a área do êmbolo do cilindro [ $m^2$ ].

A velocidade de impacto do martelo pode ser calculada da seguinte forma:

$$v^2 = 2 \cdot h \cdot \left( g + \frac{p \cdot A}{m} \right) = 2 \cdot a_H \cdot h$$

Sendo:

$a_H$  a aceleração do martelo [ $m \cdot s^{-2}$ ].

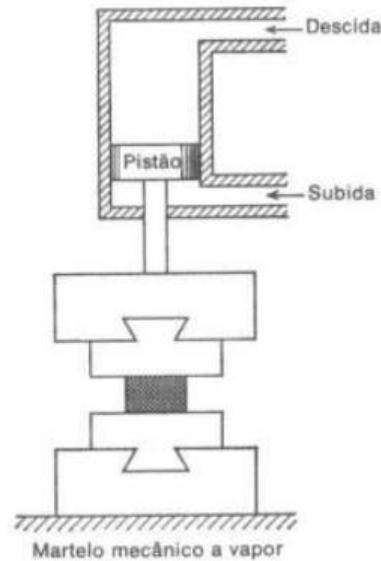


Figura 30 Representação esquemática de um martelo de dupla-ação

## HERF

Este tipo de equipamento consiste num martelo de queda de alta velocidade que desenvolve elevadas energias, sendo o pistão acelerado por gases a alta pressão. A sua aplicação é limitada ao forjamento de peças completamente simétricas ou concêntricas, como é o caso de rodas e engrenagens, ou cunhagem de moedas, uma vez que requer pouco escoamento de material, mas cargas disponíveis muito elevadas. Devido à sua perigosidade de manuseamento não são equipamentos muito utilizados (ASM 2005).

Em suma:

- Princípio de funcionamento similar a um motor de combustão interna;
- Impacto a alta velocidade, forjando em poucos milissegundos;
- Velocidades de cerca de 230 [m/s].

### 2.7.2 Prensas

As prensas por outro lado aplicam a força lentamente, com o valor máximo de pressão a ser atingido pouco antes do final da descida, distribuindo melhor a sua força ao interior da peça. Ao contrario dos martelos, que o realizam superficialmente. Como características gerais devem-se destacar (Martins 2014):

- Baixa velocidade;
- Peças de grandes dimensões;
- Matrizes com menores custos;
- Melhor acabamento;
- Distribuição de fluxo uniforme (Deformação plástica);
- Equipamento de custo elevado;
- Maior troca térmica;

- Tempo suficiente para produzir camada de óxido que dificulta a soldagem e perda de calor;
- O valor máximo da pressão é atingido pouco antes da prensa ser retirada.

Existem vários critérios que permitem a classificação das prensas de acordo com as suas características. Desde a natureza do agente motor, forma da estrutura, número de carros móveis, direção de atuação e velocidade de atuação. Neste capítulo as variantes encontram-se de acordo com a natureza do agente motor (Rodrigues e Martins 2010b):

- Mecânicas:
  - Excêntricas;
  - De fuso (podendo ser por discos de fricção, acoplamento direto do motor elétrico ou por engrenagens);
- Hidráulicas;
- Manuais;
- Pneumáticas

Dada a sua rara utilização na indústria, as duas últimas não se encontram descritas nesta secção. As prensas manuais encontram-se em desuso, enquanto que as pneumáticas possuem pequena capacidade e níveis de ruído associados ao seu funcionamento muito elevados.

### Mecânicas excêntricas

O princípio de funcionamento de uma prensa excêntrica baseia-se na transformação do movimento de rotação em movimento linear (Michels *et al*, 2014). A energia transmitida pelo motor elétrico é armazenada em um volante de inércia, transmitindo-se ao carro (ou carros) através de engrenagens excêntricas (Rodrigues e Martins 2010b).

Este tipo de prensas possui um manuseamento simples e um custo de operação baixo, o que permite o seu uso frequente no forjamento de peças de dimensões médias a pequenas (Filho *et al*, 2011).

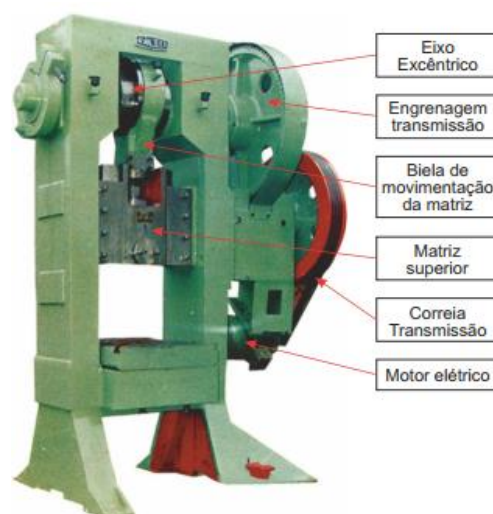


Figura 31 Prensa mecânica excêntrica (Michels *et al*, 2014).

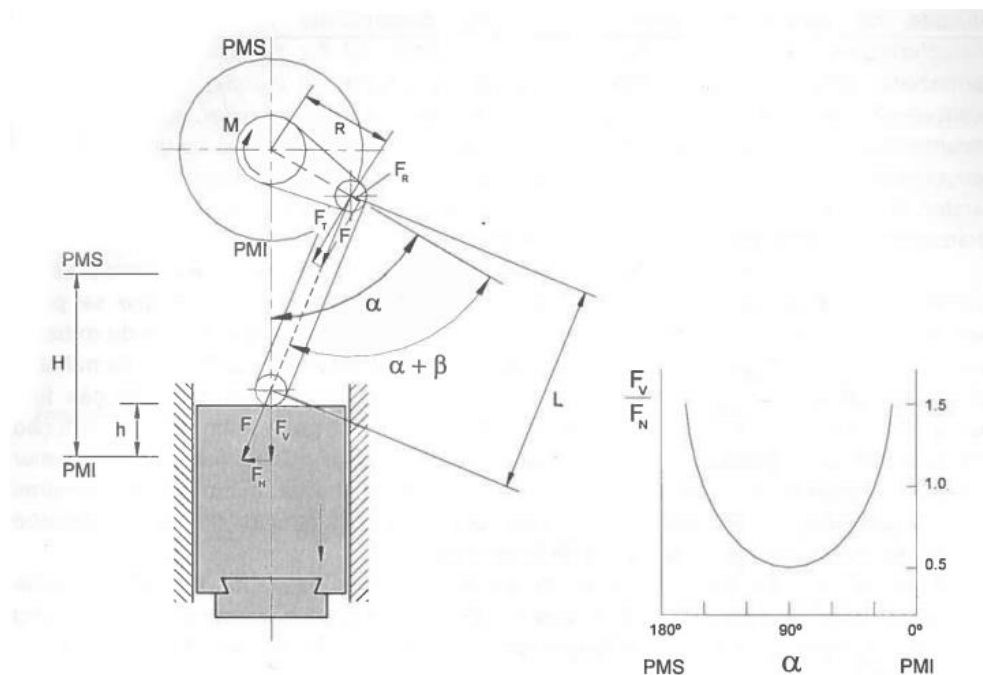


Figura 32 Esquema do funcionamento de uma presa excêntrica (Rodrigues e Martins 2010b).

O binário  $M$ , atuante no veio da manivela, desenvolve forças que podem ser calculadas através das equações seguintes. Desprezando as forças de atrito, a força tangencial na manivela  $F_T$ , é dada por:

$$F_T = \frac{M}{R}$$

Logo, a força segundo o eixo da biela  $F$ , é:

$$F = \frac{F_T}{\text{sen}(\alpha + \beta)} = \frac{M}{R} \cdot \frac{1}{\text{sen}(\alpha + \beta)}$$

Onde, a força segundo a direção radial  $F_R$  é dada por:

$$F_R = F \cdot \cos(\alpha + \beta) = \frac{M}{R} \cdot \frac{1}{\tan(\alpha + \beta)}$$

Ao analisar o sistema de forças que se desenvolve no carro móvel, verifica-se que a força  $F$  gera o aparecimento de uma força vertical  $F_V$  na direção do movimento, e uma força horizontal  $F_H$  perpendicular ao movimento do carro. As equações abaixo expressam as forças  $F_V$  e  $F_H$ , respetivamente:

$$F_V = F \cdot \cos \beta = \frac{M}{R} \cdot \frac{\cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)}$$

$$F_H = F \cdot \sin \beta = \frac{M}{R} \cdot \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} = F_V \cdot \tan \beta$$

O binário  $M$  para este tipo de prensas é dado por:

$$M = F_N \cdot R \cdot \sin \alpha_N$$

Sendo  $F_N$  a força nominal e  $\alpha_N$  a posição angular da manivela

Para qualquer ângulo, a força aplicada no carro, em função dos valores nominais, é dada por:

$$F_V = F_N \cdot \frac{\sin \alpha_N}{\sin \alpha}$$

Para prensas mecânicas excêntricas, algumas normas especificam que a força nominal deve ser definida para um curso correspondente a  $\alpha_N = 30^\circ$  entre a manivela e o ponto mínimo inferior (PMI).

A velocidade com que se desloca o carro móvel  $v_v$  pode ser obtida considerando uma velocidade do veio da manivela constante  $\omega$ :

$$v_T = \omega \cdot R$$

$$v = v_T \cdot \sin(\alpha + \beta)$$

A energia armazenada no volante de inércia, ou seja, a energia necessária à realização do processo, pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$W_{volante} = \frac{I \cdot \omega^2}{2}$$

Sendo  $I$  o momento de inércia relativamente ao eixo de rotação do volante e  $\omega$  a velocidade angular em radianos por segundo.

### Mecânica de Fuso (por discos de fricção)

Estes equipamentos são apropriados para cunhar moedas, medalhões e objetos semelhantes, em aço ou em metais duros (Filho *et al*, 2011).

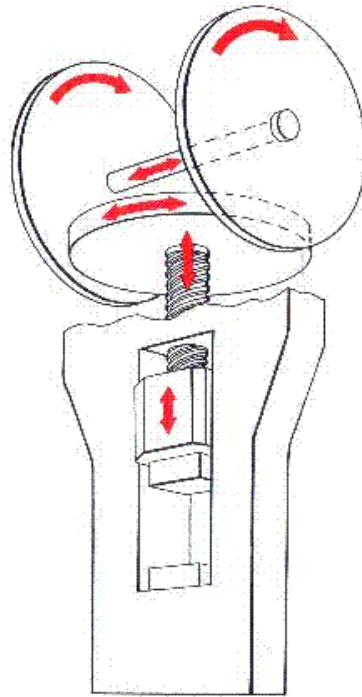


Figura 33 Esquema de funcionamento de uma prensa de fuso (Martins 2014).

A velocidade circunferencial do volante nas prensas de fuso, assumindo que não existe escorregamento entre o disco e o volante, é dada por:

$$v_c = \omega \cdot r = \omega_v \cdot R = \frac{d\alpha_v}{dt} \cdot R$$

Onde:

$\omega$  é a velocidade de rotação do disco;

$\omega_v$  a velocidade de rotação do volante;

$\alpha_v$  o ângulo de rotação do volante.



A evolução da energia com a carga para este tipo de prensa pode ser representada por uma parábola. Esta característica é devida ao facto da energia despendida na deformação elástica da estrutura da prensa possuir uma variação quadrática deste tipo:

$$W_p = \frac{F^2}{2K}$$

Onde:

$K$  é a rigidez total da prensa de fuso.

### Hidráulicas

As prensas hidráulicas são bastante versáteis, uma vez que podem ser utilizadas em vários processos de conformação, como embutidura, dobragem, e parcialmente no estiramento. As principais vantagens são a precisão obtida, o curso variável com elevado deslocamento e a força e velocidade controláveis (Michels *et al*, 2014).

Podem ter uma configuração vertical ou horizontal, sendo as verticais com um cilindro na parte superior especialmente adequadas para o forjamento de peças de elevadas dimensões. É o único tipo de prensa que aplica uma pressão uniforme com uma velocidade de deformação praticamente constante. A capacidade máxima de carga da prensa limita o valor máximo da força disponível para o forjamento (Filho *et al*, 2011).

A força de uma prensa acionada hidraulicamente depende de dois fatores, a área do êmbolo do atuador linear de duplo efeito e da pressão da bomba:

$$F = P \cdot A$$

Onde:

$F$  é a força da prensa [N];

$P$  é a pressão da bomba [Pa];

$A$  é a área do embolo [ $m^2$ ].

A equação acima apresentada baseia-se no princípio da Lei de Pascal, o qual possui uma aplicação direta neste tipo de prensas, e estabelece que “a pressão aplicada num ponto no interior de um fluido é transmitida, sem perdas, a qualquer outro ponto do fluido e às paredes do recipiente no qual este se encontra”. Ao analisar esta relação, torna-se relativamente simples concluir que para atingir forças maiores é necessário utilizar bombas com pressões,  $P$ , de trabalho mais elevadas ou cilindros com êmbolos de maiores áreas,  $A$ . Uma opção para concretizar este último caso, trata-se de utilizar mais que um cilindro (Chiaverini 1978).

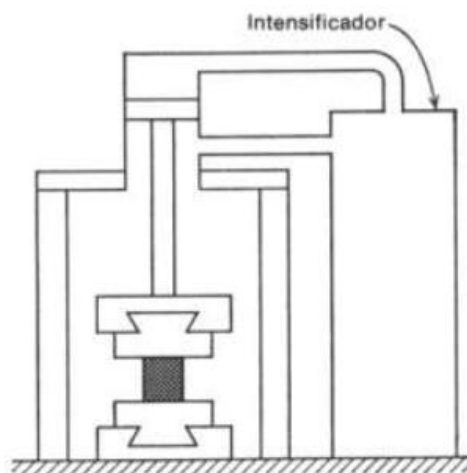


Figura 34 Esquema representativo de uma prensa hidráulica (Martins 2014).

### Comparação

De um modo geral, o martelamento provoca uma deformação principalmente nas camadas superficiais, enquanto que, a utilização de uma prensa, não só atinge as camadas mais profundas como também origina uma deformação mais regular.

Tabela 6 Comparação das principais características das máquinas de forjamento.

<b>Martelos</b>	<b>Prensas</b>
Baixo tempo de aplicação de carga e contacto entre matriz e peça	Maior tempo de aplicação de carga e contacto entre matriz e peça
Menores perdas de calor	Maiores perdas de calor
Golpes sucessivos	Contacto constante entre a peça e a matriz
Altas velocidades	Baixas velocidades
Menor vida útil das matrizes	Maior vida útil das matrizes
Menos custo de equipamento	Maior custo de equipamento

Tabela 7 Características das principais máquinas de forjamento (Rodrigues e Martins 2010b).

Equipamento	Energia (KN m)	Massa (kg)	Força (KN)	Velocidade (m/s)	Cadência Golpes/min	Curso (m)	Eficiência Mecânica
<i>Martelos</i>							
Mecânicos	0.5-40	30-5000	-	3,5-5	350-35	0.1-1.6	0.2-0.5
Vapor e ar	20-600	75-17000	-	3-8	300-20	0.5-1.2	0.05-0.3
Contragolpe	5-1200	-	-	3-5	60-7	-	0.2-0.7
H.E.R.F.	15-750	-	-	8-300	<2	-	0.2-0.6
<i>Prensas</i>							
Hidráulica	-	-	100-80000	<0.5	5-30	0.3-1	0.1-0.6
Mecânica	-	-	10-80000	<0.5	10-130	0.1-1	0.2-0.7
Fuso	-	-	100-80000	<1	6-35	0.2-0.8	0.2-0.7

### 2.7.3 Equipamentos de aquecimento da matéria-prima

Para o forjamento a quente e a morno, o controle do intervalo de temperatura do processo, e a forma como o esboço é aquecido até à temperatura inicial são de extrema importância. O intervalo de temperatura do forjamento define a diferença entre a temperatura final do processo, no momento do corte da rebarba e a temperatura do esboço aquando da primeira operação de conformação. Temperaturas baixas, prejudicam a forjabilidade do material, obrigando à utilização de cargas excessivas nas máquinas ou mesmo a defeitos. Por outro lado, temperaturas demasiado elevadas, conduzem a consumos de energia elevados para o aquecimento e crescimento do grão. Torna-se por isso essencial um correto uso dos equipamentos usados para aquecer a matéria-prima. Os equipamentos de aquecimento mais comuns para a indústria são os fornos a gás, elétricos de resistências ou de indução (Rodrigues e Martins 2010b).

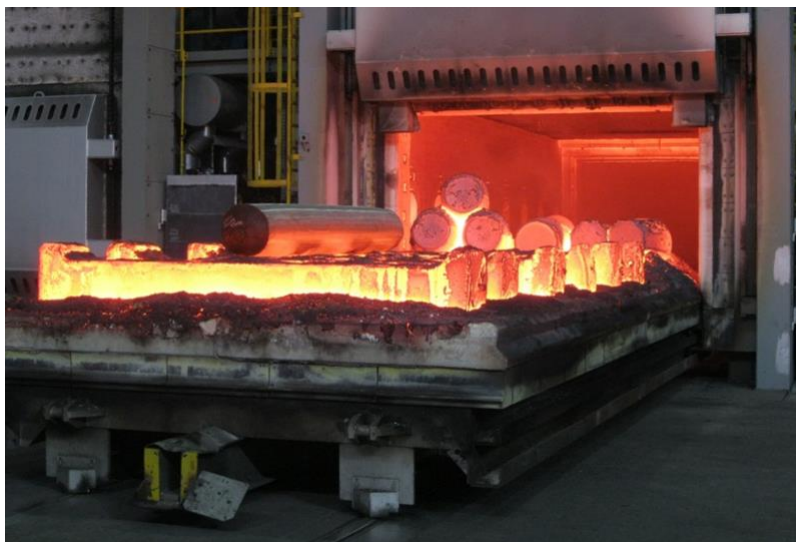


Figura 35 Forno de aquecimento (Rath 2016)

Nos fornos a gás, a transferência de calor é efetuada por convecção entre a atmosfera do forno e a superfície do material assim como nos fornos elétricos de resistências, sendo que nestes existe de igual modo a transmissão por radiação. Este tipo de aquecimento pode provocar gradientes térmicos elevados entre a superfície e o núcleo da peça, obtendo-se temperaturas superiores na superfície. A fim de se obter um aquecimento correto do interior da peça, recorre-se a estágios elevados de aquecimento, provocando a formação de óxidos superficiais na matéria-prima e provocando um aumento significativo no tempo de ciclo, diminuindo a produtividade e aumentando o consumo energético associado. Os tempos elevados de arranque e pré-aquecimento deste tipo de fornos obrigam a que estes trabalhem sem parar durante todo o dia de trabalho (Rodrigues e Martins 2010b).

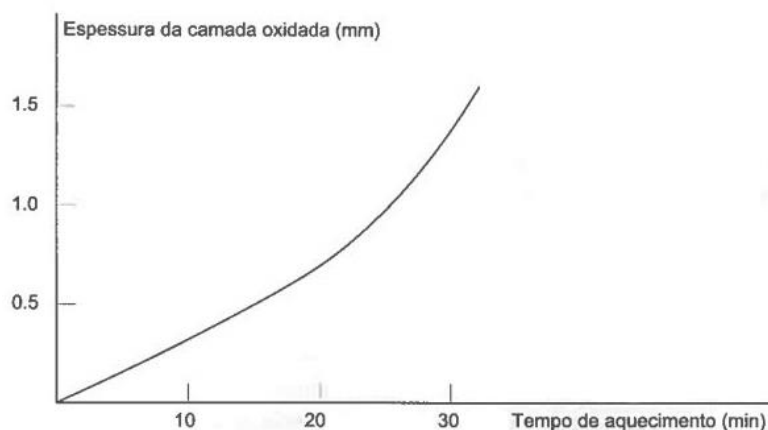


Figura 36 Espessura da camada de material oxidado em função do tempo de aquecimento (Rodrigues e Martins 2010b)

Os fornos elétricos de indução apresentam uma série de vantagens em relação aos fornos a gás e elétricos de resistências. O seu princípio de funcionamento baseia-se na transferência de energia de uma bobine para a peça sem contacto, através de um campo magnético. O calor é gerado pelo efeito de Joule. A corrente elétrica induzida na peça encontra-se praticamente toda

concentrada perto da superfície (cerca de 87% na zona de profundidade  $\delta$ ). Como tal, a peça aquece de fora para dentro. O seu funcionamento encontra-se representado na Figura 37.

Estes fornos permitem reduzir drasticamente os tempos de *setup* associados ao pré-aquecimento dos fornos a gás ou resistências elétricas e têm taxas de aquecimento associadas muito elevadas (para elevar a temperatura de um aço ao Carbono de 25°C até 1000°C é necessário uma potência de 3,5 [kg/kWh] (Rodrigues e Martins 2010b)). De notar, no entanto, que o custo de aquisição destes equipamentos é extremamente elevado quando comparado com os fornos tradicionais a gás.

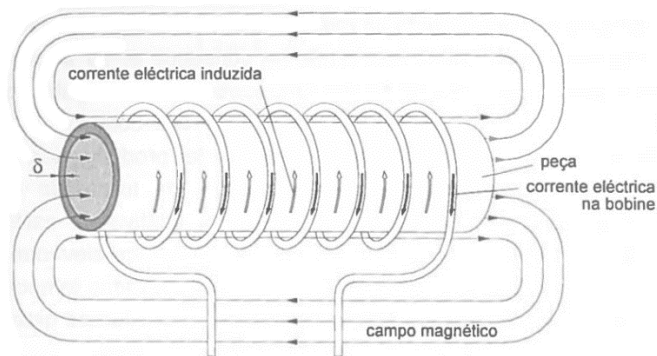


Figura 37 Princípio de funcionamento de um forno de indução (Rodrigues e Martins 2010b)

## 2.8 Matrizes

A principal preocupação no projeto de uma matriz de forjamento passa por ter o máximo de vida útil possível. Fatores como o material utilizado, os tratamentos térmicos, as condições da superfície, a transferência de calor no processo, a lubrificação utilizada, o material a forjar e a prática de manutenção da ferramenta, influenciam largamente este parâmetro (Schaeffer 2012). As matrizes devem ser produzidas recorrendo a materiais com alta resistência mecânica, resistência ao desgaste, elevada tenacidade e ainda, no caso do forjamento a quente, suportar a fadiga térmica inerente sem sofrer danos ou alterações dimensionais.

No forjamento em matriz aberta, as matrizes são predominantemente simples, podendo ter faces paralelas e lisas, faces com concavidades, etc. Estas são geralmente fabricadas pelos processos tradicionais de maquinagem.

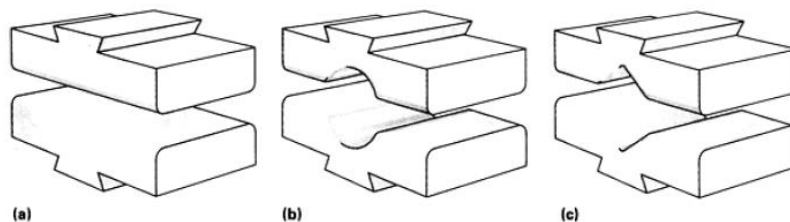


Figura 38 Matrizes lisa (a), concava (b) e em “v” (c), usadas no forjamento em matriz aberta (ASM 2005).

As matrizes usadas para o forjamento em matriz fechada são geralmente de uma complexidade muito superior, sendo muitas vezes constituídas por várias formas que permitem efetuar operações de pré-forma e de finalização numa só matriz, mas em várias etapas. Estas são fabricadas por maquinagem ou electroerosão em alguns casos.

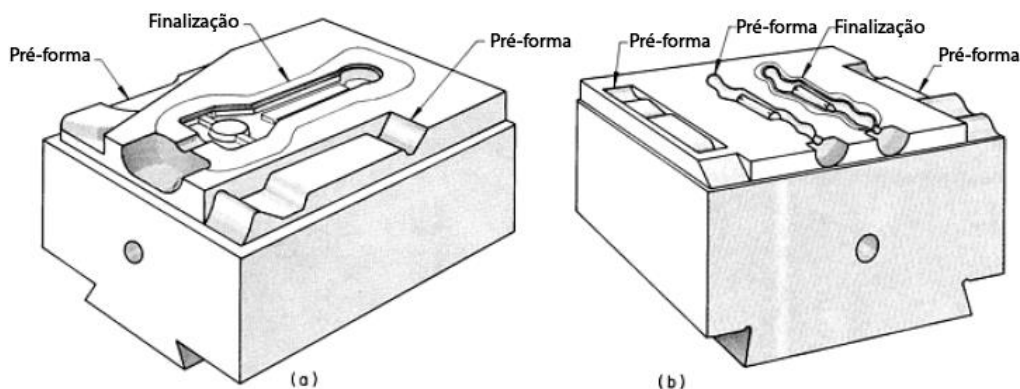


Figura 39 Matriz de três etapas (a) e de quatro etapas (b) para forjamento em matriz fechada

Aços de ferramenta ligados ao crómio, tungsténio, molibdénio e vanádio são os principais materiais utilizados na fabricação de matrizes (Rodrigues e Martins 2010b). Para o forjamento a quente são correntemente utilizados aços para trabalho a quente (série AISI H) e ainda algumas ligas como a AISI 4100 ou 43000. Realizam-se ainda tratamentos térmicos de têmpera e revenido para obter durezas superficiais na ordem dos 55 a 65 HRC para matrizes de forjamento a frio e 35 a 55 HRC para matrizes de forjamento a quente (ASM 2005).

Em conjunto com a têmpera e revenido, é ainda possível recorrer-se a tratamentos superficiais de modo a aumentar a resistência ao desgaste da superfície das matrizes, exposta a elevadas cargas, ciclos térmicos e corrosão. São exemplos destes revestimentos:

- Deposição Química (CVD- *‘chemical vapour deposition’*);
- Deposição física a vapor (PVD- *‘physical vapour deposition’*).

Na Figura 40 destaca-se a principal nomenclatura das matrizes utilizada ao longo deste documento, estando disponível no Anexo B informação relativa aos principais materiais usados na construção de matrizes e os tratamentos térmicos associados.

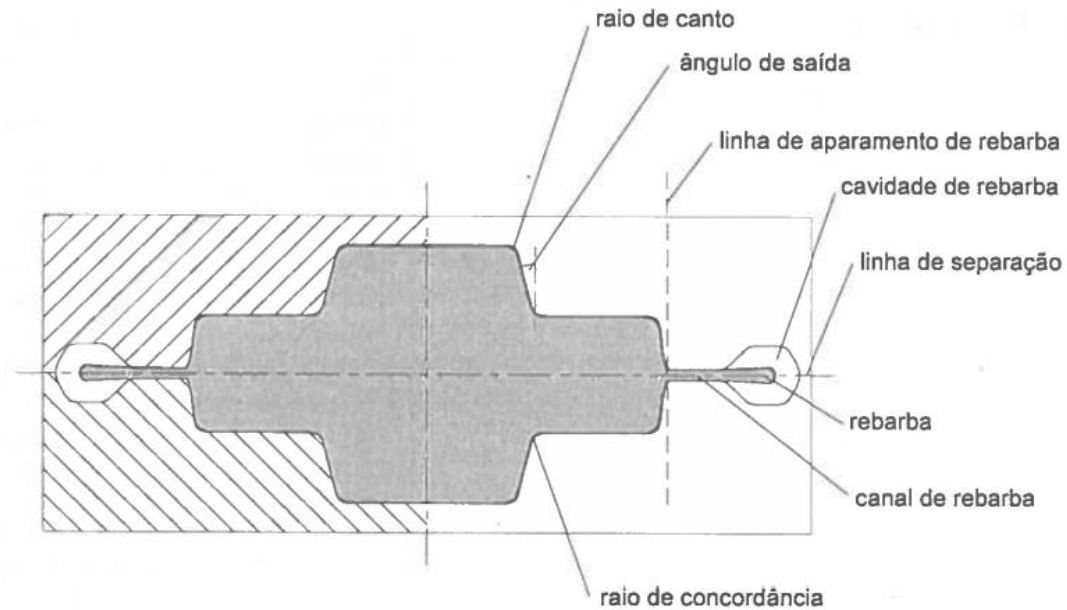


Figura 40 Nomenclatura utilizada na definição das matrizes de forjamento (Rodrigues e Martins 2010b).

Outro fator a ter em conta na definição das matrizes de forjamento é a sua **temperatura de trabalho**. A fim de diminuir as perdas de calor, por condução térmica entre a matriz e o esboço, e as variações térmicas nas matrizes, estas devem ser pré-aquecidas no início do ciclo de forjamento. A Figura 41 demonstra a necessidade do pré-aquecimento de aços como o H11 e H13 para se poderem obter boas resistências a quente, mostrando também, em conjunto com a Figura 42, que temperaturas demasiado elevadas das matrizes causam um decréscimo das suas propriedades. Como tal, define-se que para os aços H11 e H13 a temperatura de pré-aquecimento deverá ser de 200°C a 315°C.

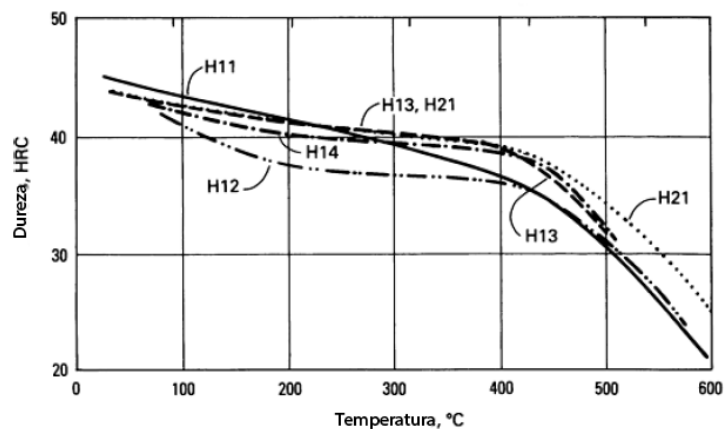


Figura 41 Variação da dureza a quente dos principais aços de ferramentas de trabalho a quente, adaptado de (ASM 2005).

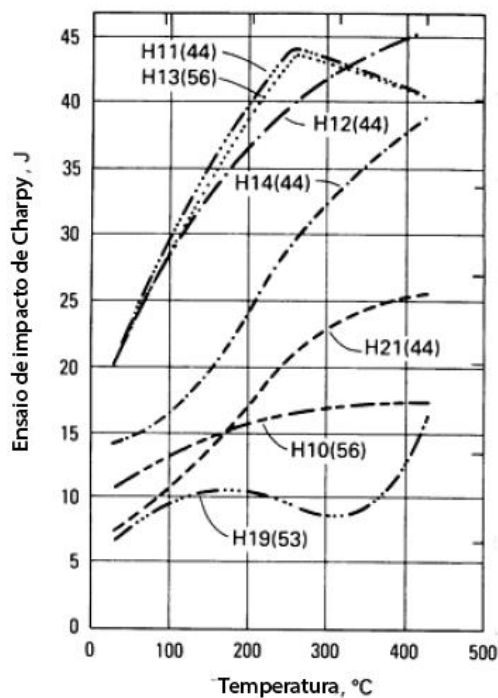


Figura 42 Variação dos resultados do ensaio de impacto de Charpy para alguns aços ferramenta de trabalho a quente, variando a temperatura do provete, adaptado de (ASM 2005).

## 2.9 Defeitos no forjamento

Os defeitos no forjamento podem surgir em várias etapas do processo e serem devidos a vários fatores. Defeitos na matéria-prima, falhas técnicas causadas pelo operador, defeitos na ferramenta, defeitos de projeto, defeitos no processo de aquecimento, todos estes fatores podem contribuir para o aparecimento de defeitos na peça final (Filho *et al*, 2011).

Os defeitos podem levar ao decréscimo das propriedades da peça como a sua resistência mecânica e eventualmente levar a peça a falhar sob carga devido a concentração de tensões ou fraca resistência à fadiga (Rodrigues e Martins 2010b, Rathi e Jakhade 2014).

Os principais defeitos em peças forjadas são:

- Falha de penetração;
- Fissuras superficiais;
- Fissuras internas;
- Fissuras da rebarba;
- Sobreposições;
- Falha de enchimento;
- Desalinhamento das matrizes;
- Defeito superficial;
- Escoamento do grão incorreto;
- Tensões residuais.

As principais causas e soluções para estes defeitos serão discutidas no Cap. 3.6.



## 2.10 Métodos de simulação, análise e previsão

Serão apresentados nesta secção, os principais métodos para simulação e análise das forças de forjamento. Será ainda analisado como prever o comportamento do material no processo, bem como eventuais defeitos.

### 2.13.1 Simulação física

Uma alternativa aos métodos analíticos, que devido à complexidade das equações envolvidas apenas são viáveis para geometrias e condições de fronteira relativamente simples e à simulação numérica, que implica um conhecimento avançado sobre o software, sobre as equações características do material e ainda máquinas de computação potentes, é a modelação física de protótipos para o estudo do processo. Este método implica a construção de protótipos das matrizes e do esboço, de forma a se poder estudar o escoamento de material, as geometrias de pré-forma e o enchimento correto de todas as cavidades. A modelação física apresenta-se assim como uma alternativa expedita do estudo do processo, com custos e conhecimentos necessários bastante reduzidos, quando comparado com o dos métodos analíticos e computacionais (Sofuoglu 2006).

Este tipo de abordagem física é especialmente apropriado a casos em que se deseje forjar uma geometria que nunca tenha sido abordada anteriormente, em que o comportamento de escoamento do material e a geometria das matrizes é desconhecido por completo. Com este tipo de abordagem os custos do processo de tentativa e erro podem ser minimizados, permitindo um estudo expedito e barato das geometrias do processo (ASM 2005).



Figura 43 Matrizes de simulação do processo de forjamento fabricadas por prototipagem rápida.

As matrizes são geralmente produzidas em resina, silicone, alumínio, ABS, PLA, madeira, etc. Estas podem ser fabricadas à escala real ou em escala reduzida, dependendo das dimensões da peça em estudo. Matrizes fabricadas em resina acrílica apresentam boa precisão dimensional, elevada rigidez e permitem visualizar o escoamento de material durante a simulação (Brites e Barbosa 2012, Brites 2009).

A tecnologia da prototipagem rápida apresenta uma mais valia na criação das matrizes para a simulação, permitindo um fabrico rápido e pouco dispendioso das mesmas, com flexibilidade

em alterar a geometria rapidamente. Esta dinâmica de alteração torna-se crucial nas fases iniciais do projeto das ferramentas, onde os custos associados são relativamente baixos, como pode ser visto na Figura 44 (Neto *et al*, 2006).

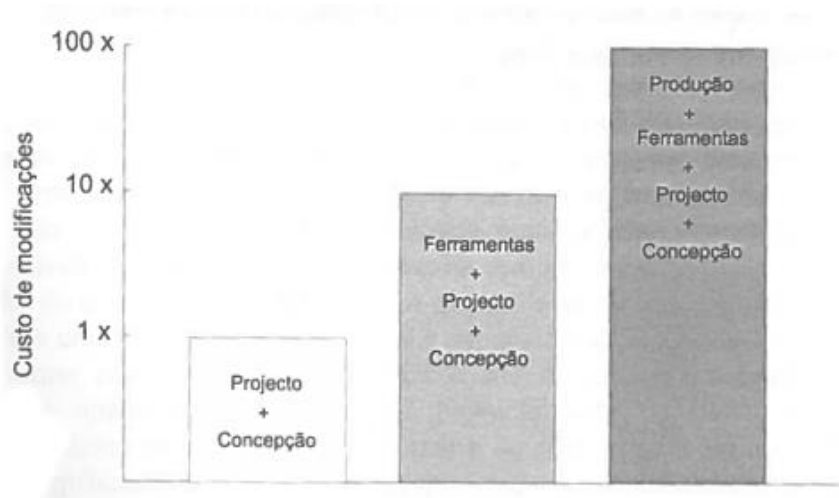


Figura 44 Incremento do custo de modificações ao longo do processo de forjamento (Rodrigues e Martins 2010a)

Para a produção dos protótipos de esboços utiliza-se plasticina, cera, massa de modelar, misturas de gesso e vaselina, etc. O material mais usado para estudos de modelação é a plasticina (*Plasticine*), uma marca registada da Harbutt, Reino Unido. De notar que plasticina não é o nome do material, mas sim o nome de uma massa de moldar desenvolvida na década de 80. Esta é constituída por sais de cálcio, parafina líquida (mais conhecida pelo seu nome comercial de vaselina) e ácidos alifáticos. De notar ainda que as várias cores disponíveis de plasticina, partilhando a sua composição base, têm diferentes agentes químicos para criar diferentes cores, podendo por isso criar uma pequena variação para testes com tipos diferentes (Sofuoglu e Rasty 2000, Santos e Cetlin 2009).



Figura 45 Simulação do processo de forjamento em plasticina.

A fim de se observar melhor o escoamento com recurso a peças de plasticina, é geral utilizarem-se dois métodos distintos:

1. Pintar uma grelha bidimensional na superfície do esboço, sendo possível visualizar a sua deformação através de matrizes transparentes.
2. Construir o esboço em camadas de plasticina de cores diferentes, neste método é possível analisar constantemente o fluxo de material usando matrizes transparentes.

Em suma, o uso de plasticina como matéria-prima nos ensaios permite:

- Cargas relativamente pequenas para a deformação;
- Fácil observação do fluxo da deformação;
- Protótipos do esboço e matrizes são fáceis, rápidos e baratos de fabricar;
- Procedimento experimental simples.

### 2.13.2 Métodos analíticos

Existem diversos métodos teóricos de análise dos processos de deformação plástica com vista a determinar as principais variáveis do processo e distribuição destas. Estes métodos ajudam a prever as forças e trabalho necessário para as operações de forjamento, determinando assim as tensões a que irão estar sujeitas as matrizes, e a força necessária nas máquinas de forma a conseguir realizar o processo desejado. Entre os principais métodos analíticos podem-se destacar:

- Método da energia uniforme;
- Método da fatia elementar;
- Método das linhas de escorregamento;
- Método do limite superior.

O **método da energia uniforme** baseia-se na determinação da quantidade de trabalho necessário para realizar operações de deformação plástica. Este método é bastante utilizado para o estudo da extrusão e trefilagem, sendo usado para determinar as condições limite de deformabilidade. Sendo um método expedito, no qual se recorre a um conjunto de simplificações na definição do comportamento do material em estudo, este não permite calcular os campos de velocidades nem distribuição de tensões, fornecendo apenas o trabalho necessário ao processo. Como tal, a sua aplicação resume-se à caracterização de características das matrizes e máquinas de forjamento, nomeadamente material de fabrico e força necessária.

No **método da fatia elementar** recorre-se a uma divisão da peça que sofre deformação plástica em várias fatias elementares sobre as quais se estabelecem equações de equilíbrio segundo as principais direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Desta análise formulam-se várias equações diferenciais com as tensões envolvidas no processo. Estas equações são então aplicadas a cada fatia em conjunto com o critério de plasticidade e as suas condições de fronteira. Somando as contribuições de cada uma das fatias elementares, obtém-se a distribuição de tensões e o valor da força de deformação. O método da fatia elementar permite estudar processos estacionários ou não estacionários e tal como o método da energia uniforme, recorre a um conjunto de hipóteses simplificativas na caracterização do material e do processo.

Um dos métodos com os fundamentos teóricos mais antigos, remontando a Coulomb em 1773, o **método das linhas de escorregamento**, ainda que seja um método aproximado, descreve a deformação plástica de sólidos de forma completa, na medida em que resolve simultaneamente os campos de tensões e de deformações ou velocidades. Para tal, começa por se estudar as equações estáticas e cinemáticas dos sólidos rígido-plásticos sujeitos a deformação plástica em condições de deformação plana. Introduzindo os conceitos de descontinuidade de tensão e de velocidade e utilizando o plano de Mohr para o plano das tensões e o hodógrafo para o plano

das velocidades. As linhas de escorregamento representam as direções dos planos com tensão de corte e deformação máximos, com ângulos de  $45^\circ$  relativamente aos planos principais. Tal como os outros métodos apresentados, este recorre a hipóteses simplificativas, não considerando a componente elástica da deformação e ainda considerando a condição de deformação plana, em que todos os deslocamentos resultantes das solicitações impostas ocorrem em planos paralelos entre si e ao plano  $xy$ .

Durante os anos 70 surgem os primeiros programas computacionais de simulação de conformação plástica, programas estes baseados no método do limite superior. Nas décadas de 80 e 90 estes acabaram por ser substituídos por programas baseados no método dos elementos finitos. O método do limite superior baseia-se no conceito de campo de deslocamentos cinematicamente admissível, ou seja, cumpre a condição de incompressibilidade, característica da deformação plástica dos materiais metálicos, e cumpre as condições de fronteira ao longo das superfícies dos deslocamentos. Este método permite maior aplicabilidade em comparação ao método da fatia elementar ou das linhas de escorregamento uma vez que estes, devido às hipóteses simplificativas em que se baseiam, estão muito restringidos a formas geométricas e condições operatórias simples, enquanto que o método do limite superior permite estudar peças bidimensionais simples até peças tridimensionais moderadamente complexas. Este método não permite o cálculo dos campos de tensão, permitindo apenas variáveis de campo cinemáticas como a velocidade de deformação, velocidade e extensão, de forma a que a sua utilização se foca no estudo do escoamento de material e cálculo de esforços transmitidos pelas ferramentas.

Todos os métodos descritos apresentam hipóteses simplificativas, quer seja por limitações matemáticas associadas ou a fim de os tornar mais expeditos, não obstante, estas simplificações acabam por restringir a sua aplicabilidade (Rodrigues e Martins 2010a, W.T. Wu 2003).

Simplificações gerais a todos os métodos:

- Material considerado homogéneo e isotrópico;
- Material com comportamento mecânico do tipo rígido-plástico, desprezando a componente elástica, considerando-se desprezável o encruamento.

Método da energia uniforme:

- Simplificações:
  - Deformação plástica uniforme, fatias planas da peça permanecem planas no final da deformação;
  - Efeitos do atrito desprezáveis (podem ser tomados em conta com fatores de correção empíricos);
  - Estados de tensão reduzidos a estados equivalentes aos de tração ou compressão uniaxial.
- Aplicações:
  - Determinar condições limite de deformabilidade;
  - Determinação do trabalho total;
  - Cálculo dos esforços necessários para a operação.

Método da fatia elementar:

- Simplificações:
  - Deformação plástica uniforme, fatias planas da peça permanecem planas no final da deformação;
  - Direções de aplicação das forças e dos planos perpendiculares a estas são as direções principais;

- As forças de atrito entram no balanço de forças, mas não influenciam a orientação das direções principais pois admite-se que não há variação das tensões de corte ao longo dos planos perpendiculares a estas.
- Aplicações:
  - Determinar a distribuição de tensões;
  - Determinar a distribuição de pressão;
  - Determinar o valor da força;
  - Determinar a deformação.

Método das linhas de escorregamento:

- Simplificações:
  - Aplicação maioritária deste método na solução de problemas de deformação plástica plana;
  - Desprezam-se os efeitos da variação de temperatura, velocidade de deformação e tempo.
- Aplicações:
  - Determinação dos campos de tensões;
  - Determinação dos campos de deformações;

Método do limite superior:

- Simplificações:
  - Apenas se considera que não existe atrito, ou que este é máximo, não havendo valores intermédios.
- Aplicações:
  - Determinação do campo de velocidades;
  - Determinação da velocidade de deformação;
  - Determinação do campo de extensões.

### 2.13.3 Métodos computacionais

O principal objetivo de qualquer empresa ao desenvolver um novo processo de fabrico é encontrar condições de fabrico ótimas, que permitam maximizar cadências de produção minimizando ao mesmo tempo os custos de produção e prazos de entrega. Para tal, é necessário encurtar o tempo decorrido entre o início de um novo projeto e o aperfeiçoamento do mesmo, tempo durante o qual existem testes, estudos e experimentação a fim de definir e otimizar todos os parâmetros envolvidos. Devido a esta necessidade de competitividade crescente, foram desenvolvidos os métodos computacionais, a fim de reduzir o número de tempo despendido em experimentação. Dentro destes métodos computacionais, destaca-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) como o mais poderoso e estudado atualmente (Fu 2015, Altan e Shirgaokar 2014).

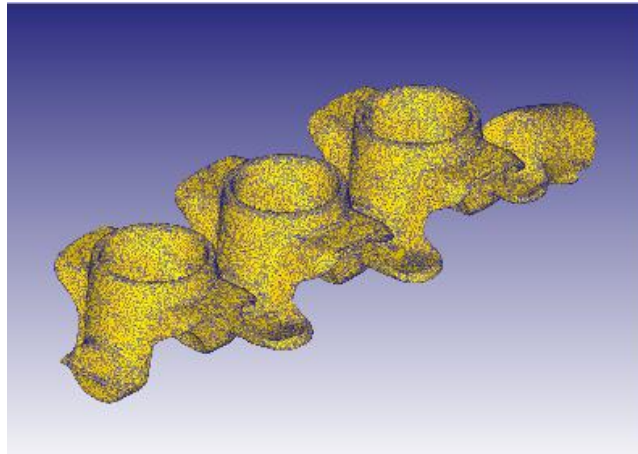


Figura 46 Exemplo de uma peça estudada pelo método dos elementos finitos (SFTC 2014)

O desenvolvimento do MEF data da década de 50, por Tuner, Argyris, Kelsey e Clough. Este foi criado com vista na aplicação de estudos de análises estruturais, sendo que só nos anos 60 começou a ser utilizado para o estudo dos processos de fabrico baseados na formulação sólida para deformações infinitesimais (Rodrigues e Martins 2010b).

Para a correta definição do processo e aproveitamento total das capacidades oferecidas pelos programas computacionais de MEF é necessário especificar corretamente os dados de entrada disponíveis, e definir as condições necessárias.

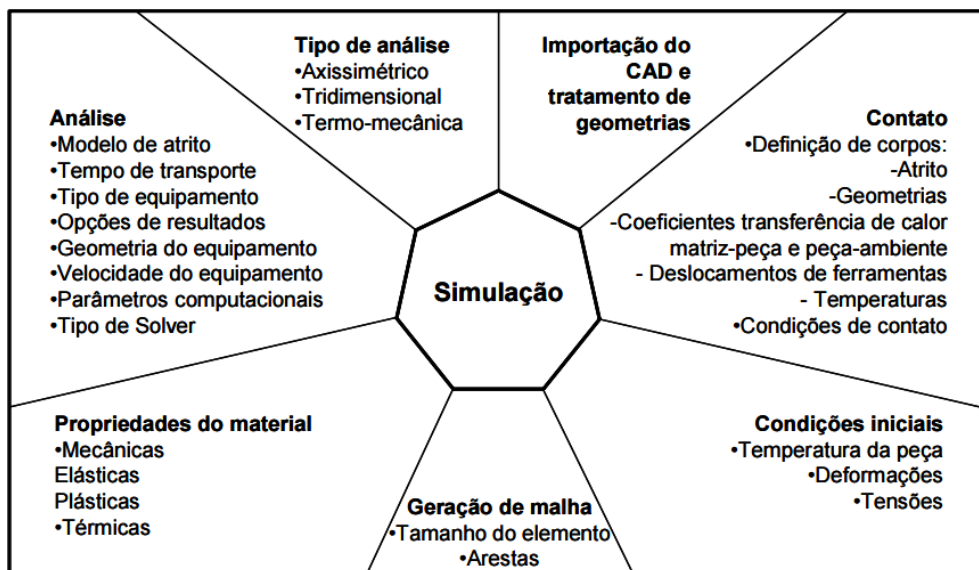


Figura 47 Diagrama dos parâmetros utilizados em simulações de elementos finitos (Júnior 2007).

### 3 Guia de boas práticas do forjamento de peças em aço

Ao longo deste capítulo irá desenvolver-se um manual de boas práticas para o forjamento de peças em aço. Pretende-se com este manual, apoiar o desenrolar do projeto de uma peça forjada desde a receção do pedido por parte do cliente, até ao início da produção em série da mesma. Este documento visa o uso de informação bibliográfica disponível bem como o auxílio de ferramentas experimentais, analíticas e computacionais em conjunto com o “*know how*” adquirido pela empresa. Deste modo, pretende-se a execução de um projeto de forma viável e otimizada, tentando fugir-se ao usual método empírico de “tentativa e erro” que acarreta elevados desperdícios de tempo e recursos, bem como elevados custos associados. Torna-se assim interessante estudar o processo de desenvolvimento integrado do produto típico no forjamento. Figura 48.

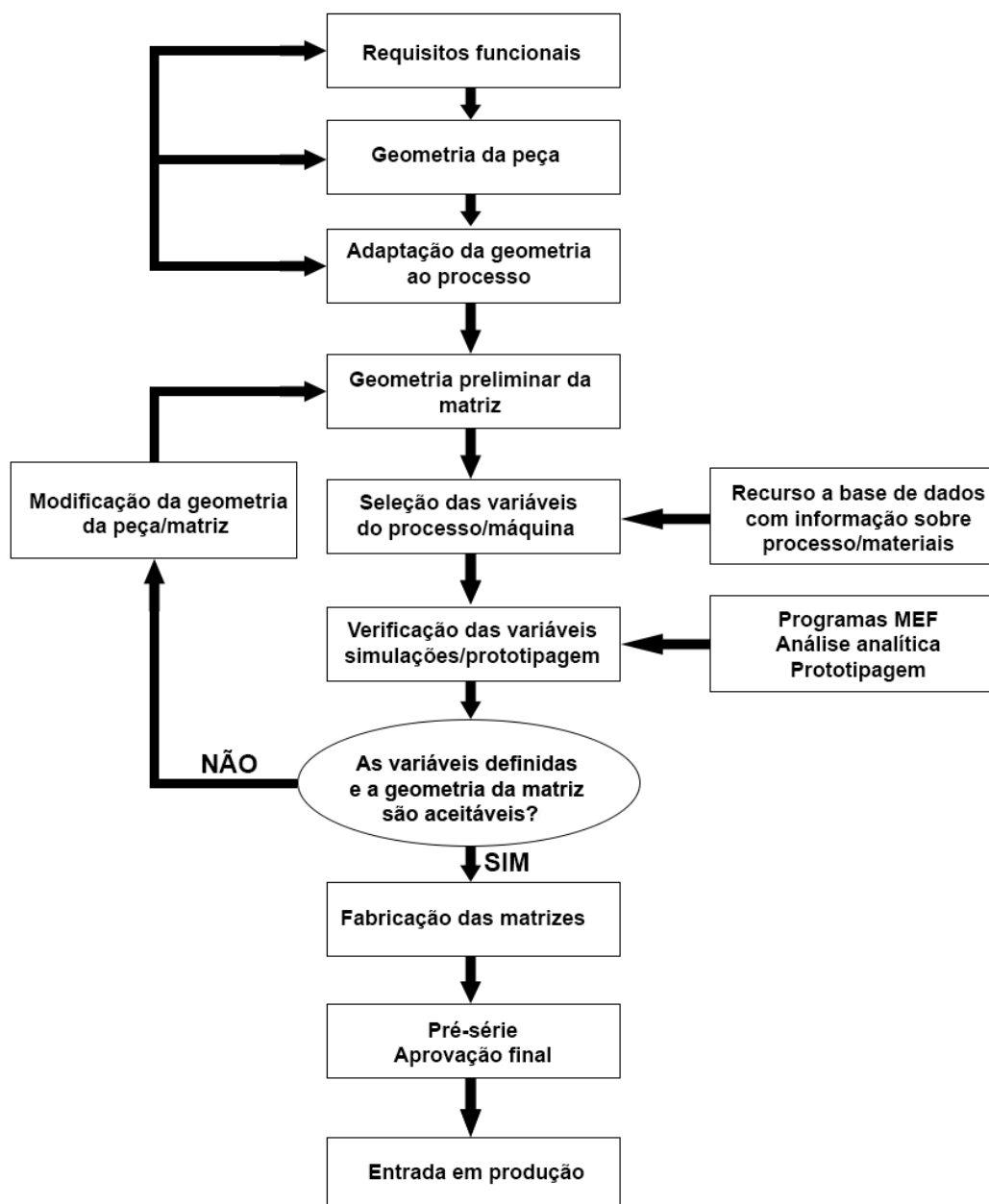


Figura 48 Fluxograma do processo de desenvolvimento integrado de um produto forjado, adaptado de (Altan e Shirgaokar 2014).

Como se verifica na Figura 48, o processo de desenvolvimento de um produto envolve várias fases, muitas delas com dependências entre si em ciclos iterativos de aperfeiçoamento e afinação de variáveis e métodos, de modo a poder solucionar problemas e definir condições do processo. Utilizando as ferramentas corretas como a base de dados fornecida neste documento e o apoio de programas de simulação numérica, almeja-se conseguir melhorias na produtividade e qualidade, diminuindo o número de iterações necessárias ao afinamento do processo e trazendo como mais valia uma diminuição significativa no desperdício de recursos temporais e monetários associados.

As variáveis a definir ao longo do projeto de uma peça forjada passam por:

- Caracterizar o material a forjar, forjabilidade, resistência ao escoamento, temperatura de forjamento, restrições geométricas associadas, etc.;
- Definir a lubrificação e caracterizar o material, temperatura e geometria das ferramentas;
- Caracterizar o equipamento necessário, fornos e máquina de forjamento. Desde cargas necessárias, tempo de contacto, velocidade de forjamento e cadência disponível.

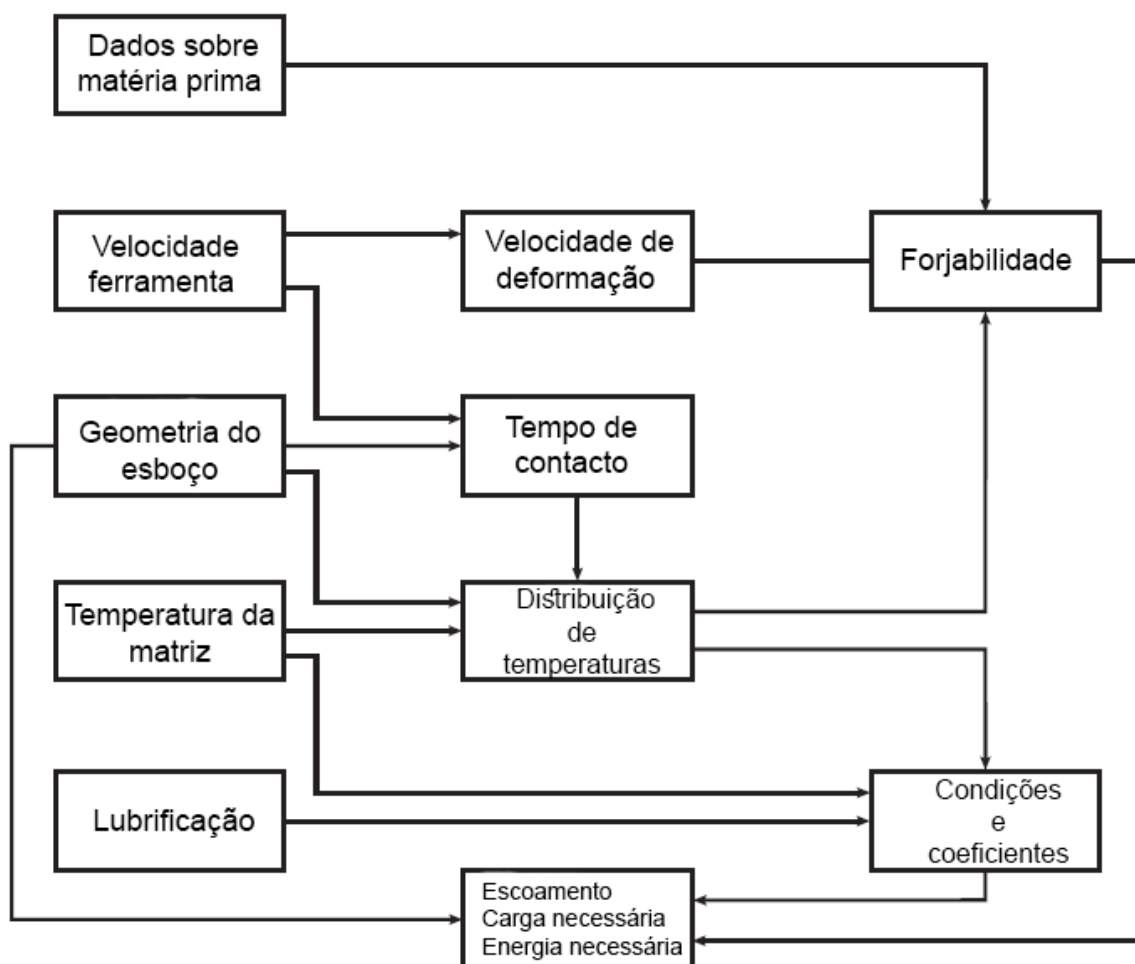


Figura 49 Principais variáveis do processo de forjamento, adaptado de (Altan e Shirgaokar 2014).



Este manual encontra-se repartido em sete secções principais, correspondentes às principais etapas do desenvolvimento do processo de forjamento a quente e que interagem entre si de forma iterativa.

- 1) Pedido de projeto;
- 2) Definição da geometria;
- 3) Definição da pré-forma e do número de etapas;
- 4) Metodologia de cálculo de forças e escoamento de material;
- 5) Fabrico das ferramentas;
- 6) Validação experimental.

Dado a ampla gama de aplicações possíveis para o forjamento, metodologias associadas e materiais tratados, o foco deste capítulo será o forjamento a quente em matriz fechada de uma peça de aço ao carbono.

### **3.1 Pedido de projeto**

O projeto de uma peça forjada deverá começar com um pedido por parte do cliente com toda a informação necessária para se poder fazer uma apreciação económica correta do mesmo. A este pedido corresponderá uma cotação, que poderá tornar-se numa ordem de encomenda.

A informação fornecida pelo cliente deverá conter os seguintes tópicos:

- Número de peças a forjar e cadência;
- Geometria da peça;
- Finalidade da peça;
- Material;
- Estado a ser fornecida;

De notar que alguns dos tópicos acima listados poderão não ser considerados no pedido, como o estado em que a peça deverá ser fornecida, ou ainda sofrer alterações no decorrer do projeto, como a geometria da peça.

#### **3.1.1 Definição da finalidade da peça**

Nesta fase, o cliente deverá definir a finalidade da peça, a sua importância a nível estrutural, estético, o seu valor acrescido, etc.

Esta informação, em conjunto com os três subtópicos seguintes (material, estado fornecido e microestrutura), deverá tornar possível caracterizar os seguintes parâmetros da peça no seu estado final:

- 1) Propriedades mecânicas;

- a. Tensão de cedência;
  - b. Tensão de rotura;
  - c. Dureza.
- 2) Tolerâncias dimensionais;
  - 3) Acabamento superficial;
  - 4) Tratamento térmico.

Sendo o primeiro passo do projeto, este conjunto de propriedades está intimamente ligado à última fase, de validação experimental. A validação deverá remeter para a obtenção dos parâmetros definidos nesta etapa, garantido que a peça forjada no seu estado final obedece aos requisitos do cliente. Caso obedeça, conclui-se o a fase de projeto e pode-se dar início à produção em série da peça.

### 3.1.2 Material

O material a forjar é um dos focos primários de todo o processo do forjamento. O estudo do material pedido para a peça deverá começar com a procura de fornecedores do mesmo. Poderá em alguns casos não haver possibilidade de fornecimento do aço a nível nacional, sendo preciso recorrer a fornecedores fora do país ou, caso haja flexibilidade para tal, recorrer-se a um aço com propriedades semelhantes e disponível localmente.

Definido o fornecedor, deverá requerer-se uma ficha de especificações do aço. Esta referência geralmente:

- Norma;
- Composição química;
- Estado em que é fornecido;
- Características mecânicas;
- Temperatura de trabalho;
- Tratamentos térmicos.

Conjugando os dados fornecidos pelo fornecedor e os dados deste manual, deverá ser caracterizada a temperatura de forjamento. Para um aço ao carbono, a temperatura de forjamento deverá ser escolhida de acordo com a percentagem de carbono, lembrando que o aumento da temperatura leva a uma melhor forjabilidade devido ao aumento de plasticidade do material bem como um menor desgaste da ferramenta. Deve-se ter em conta que velocidades elevadas e escoamento de material elevados poderão levar a um aumento da temperatura devido à energia transferida para o aço. Este sobreaquecimento poderá causar o crescimento do grão, diminuindo as propriedades mecânicas do aço e a formação de óxidos. Encontra-se disponível no Anexo A as temperaturas de forjamento aconselhadas para os aços ao carbono

No caso dos aços de liga, devido à sua fraca condutibilidade térmica, estes devem ser aquecidos até 800°C lentamente, de forma a evitar gradientes térmicos elevados entre o núcleo e a superfície da peça, que poderão originar tensões elevadas. Atingidos os 800°C, estes podem ser aquecidos até à temperatura desejada normalmente (ASM 2005, Rodrigues e Martins 2010b).

Como se pode verificar pela Tabela 8 a temperatura máxima de forjamento tende a diminuir com o aumento da percentagem de carbono, bem como com o aumento de elementos de liga. Para os aços ao carbono a temperatura de forjamento deverá estar contida no intervalo entre 850°C e a temperatura máxima apresentada a baixo.

Tabela 8 Temperaturas máximas de forjamento de aços, adaptado de (ASM 2005).

Percentagem de carbono (%)	Temperatura máxima de forjamento (°C)	
	Aço ao Carbono	Aço Ligado
0,10	1290	1260
0,20	1275	1245
0,30	1260	1230
0,40	1245	1230
0,50	1230	1230
0,60	1205	1205
0,70	1190	1175
0,90	1150	1175
1,10	1110	1175

Encontram-se no Anexo A tabelas com as temperaturas máximas recomendadas para o forjamento de aços ao carbono, aços ligados, aços de ferramenta e aços inoxidáveis.

### 3.1.3 Estado (definição do tratamento térmico e acabamento superficial)

De acordo com o estado pedido para a peça final, deverá ser nesta etapa definido o tratamento térmico, caso este seja necessário, bem como o acabamento superficial. Para o caso dos aços, os tratamentos térmicos mais comuns são:

- Recozidos:
  - De difusão;
  - De normalização;
  - Completo;
  - Globulização (amacramento).
- Têmpera e revenido;

#### **Recozidos**

Os recozidos são tratamentos térmicos que visam a formação de estruturas de ferrite e carbonetos depois da passagem por um estado austenítico através da obtenção de um estado próximo do equilíbrio termodinâmico. Dependendo da sua finalidade, existem vários tipos de recozidos, que variam na temperatura a que são efetuados e tempo de estágio, como se pode verificar pela Figura 50.

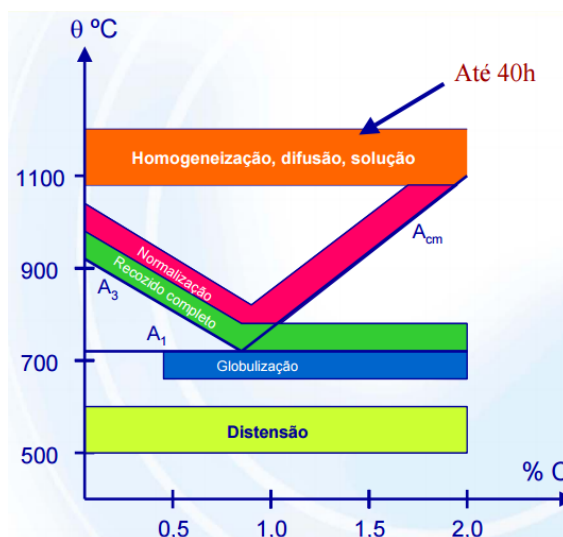


Figura 50 Temperaturas dos diferentes tipos de recozidos dependendo da percentagem de carbono do aço (Lino 2006).

O **recozido de difusão** visa a homogeneização da estrutura dos aços através da difusão dos componentes solúveis. A sua temperatura é de 1050°C a 1200° e o seu tempo de estágio é de 2 a 45 horas. O recozido de difusão pode provocar o aumento do tamanho do grão, que leva à realização de um recozido de normalização.

O **recozido de normalização** tem por fim a homogeneização da estrutura ou a regeneração e refinamento do grão. Este tipo de tratamento térmico pode ser usado em casos em que, devido a altas temperaturas de forjamento, se assista ao crescimento do grão. A temperatura deste tratamento é de 30°C a 50°C superior à temperatura crítica  $A_{c3}$  ( $A_{c1}$  no caso dos aços hipereutectóides). O estágio é de 20 a 60 minutos com arrefecimento ao ar.

O **recozido completo** tem o objetivo de eliminar heterogeneidades estruturais como segregações. A sua temperatura deverá ser ligeiramente acima de  $A_{c3}$  para os aços hipoeutectóides ou 50°C acima de  $A_{c1}$  para os aços hipereutectóides.

O **recozido de globulização (amaciamento)**, visa obter uma estrutura globular de cementite na matriz ferrítica. Aços até 0,9% de carbono deverão ser aquecidos até uma temperatura um pouco inferior a  $A_{c1}$ , ou seja, 680°C a 700°C. Não se deve realizar recozidos de globulização em aços com percentagens de carbono inferiores a 0,5% (Soares 1992, Lino 2006).

### Têmpera e revenido

A **têmpera** visa a austenitização completa da massa do aço com o aquecimento do mesmo, de forma a transforma-la em martensite com um arrefecimento adequado. Com uma têmpera correta aumenta-se a dureza, tensão de rotura, tensão limite elástico e resistência ao desgaste de um aço em detrimento duma diminuição da tenacidade ao choque, extensão após rutura e ductilidade. Imediatamente a seguir à realização da têmpera, deverá efetuar-se um **revenido**. Este tratamento térmico visa a eliminação de tensões provocadas pelo arrefecimento rápido da têmpera, aumentando a tenacidade das peças. O revenido consiste no aquecimento do aço a uma temperatura inferior à do ponto crítico  $A_{c1}$  com estágio a essa temperatura e posterior arrefecimento em ar ou água (Soares 1992, Lino 2006).

## 3.2. Definição da geometria

### 3.2.1 Plano de separação

Ao contorno do encosto ou fecho da matriz superior com a inferior chama-se plano de separação, também denominado de plano de apartação ou linha de separação. O primeiro passo na definição geométrica de uma peça forjada, passa pela definição deste plano. A sua escolha influencia fortemente os ângulos de saída, as linhas de escoamento de material, o custo final da matriz e o processo de corte da rebarba (Spretnak 1964, Rodrigues e Martins 2010b).

Na maioria dos casos, o plano de separação é definido como sendo o plano com maior área de secção da peça, evitando assim a criação de cavidades profundas. Esta escolha prende-se com o fato de ser mais fácil espalmar material pela força da máquina, do que forçá-lo a preencher cavidades profundas. No caso da área de maior secção coincidir com uma face plana da peça, torna-se possível obter toda a conformação numa matriz, sendo a outra uma superfície plana. Este caso particular baixa o custo de fabrico das matrizes e torna impossível a ocorrência de erros de desalinhamento, sendo por isso muito vantajoso (ASM 2005).

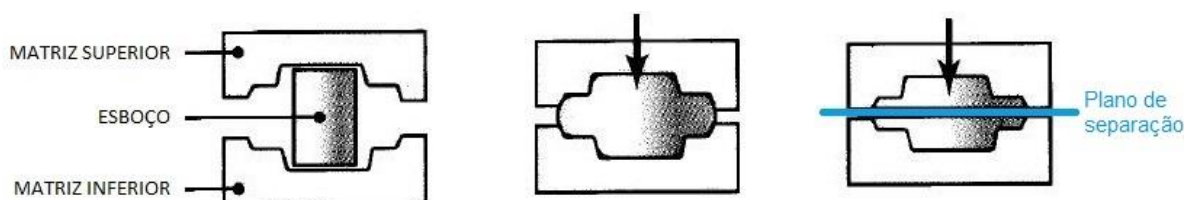


Figura 51 Representação do plano de separação, adaptado de (Kalpakji 2014).

Para formas mais complexas, o plano de separação pode ser curvo e irregular relativamente ao plano de forjamento (plano perpendicular ao descolamento da matriz móvel). Embora a escolha da sua localização e forma não seja um processo direto, existindo v, poderão utilizar-se os seguintes exemplos como recomendações:

- **Exemplo 1:** devem-se evitar cavidades profundas, que promovem o aparecimento de defeitos devido a faltas de enchimento ou mesmo fraturas do esboço. A escolha ideal da linha de separação passa pela área de maior secção, como se pode verificar na Figura 52 (Kalpakji 2014, Spretnak 1964).

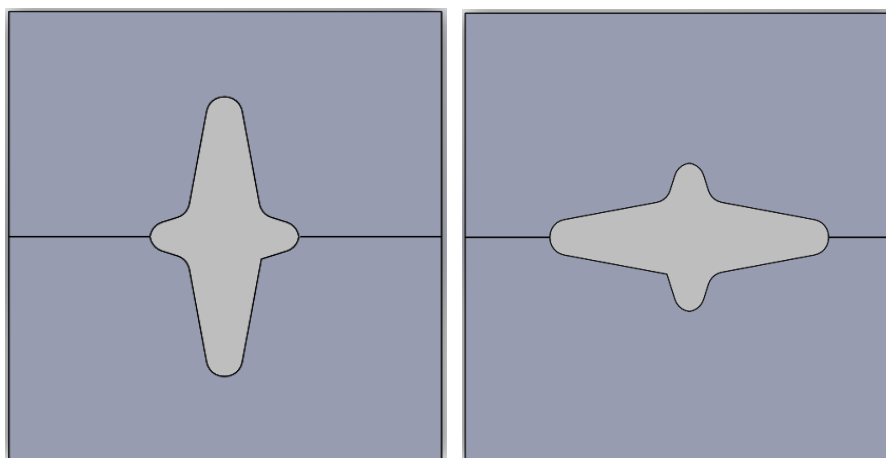


Figura 52 Escolha incorreta da posição da peça (à esquerda) origina cavidades muito mais profundas para o material preencher, adaptado de (Spretnak 1964).

**Exemplo 2:** a geometria da peça tende a desvios laterais da matriz móvel no movimento de fecho. Poderá evitar-se estes deslocamentos através da rotação da linha de separação ou através da criação de contra-cunhas laterais nas matrizes, como se pode verificar na Figura 53 e Figura 54 (ASM 2005, Spretnak 1964).

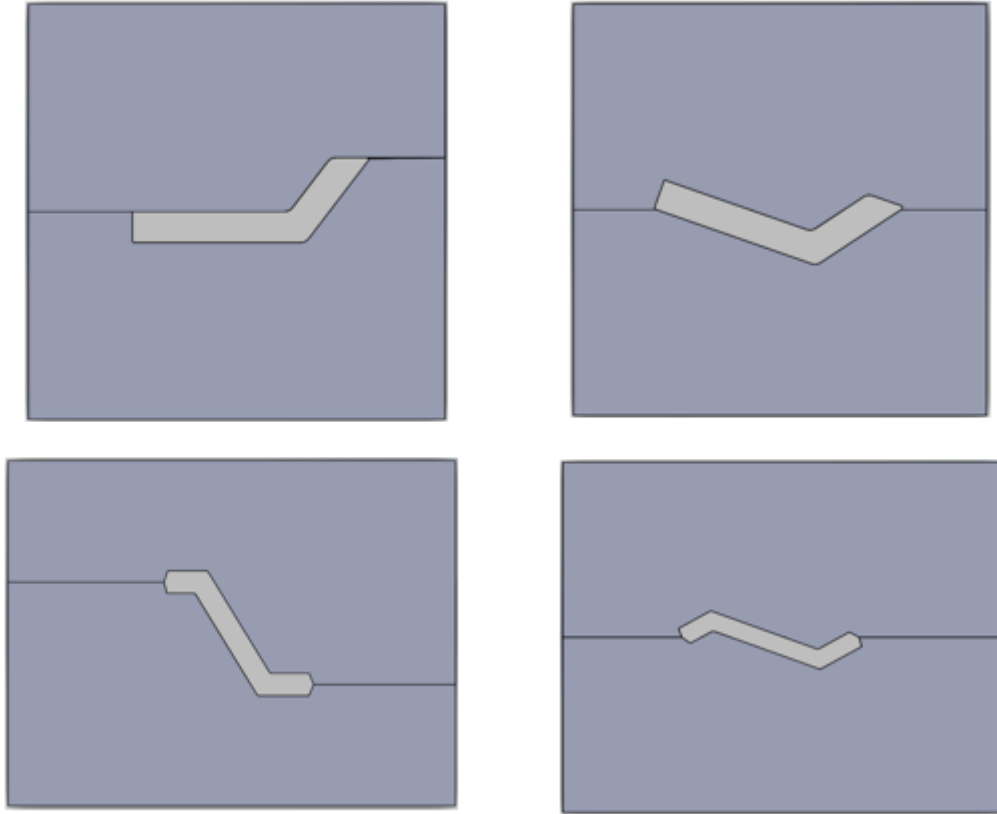


Figura 53 Posição da peça propicia a desvios laterais da matriz (imagens à esquerda), posição correta aproveitando a geometria da peça (à direita), adaptada de (Spretnak 1964).

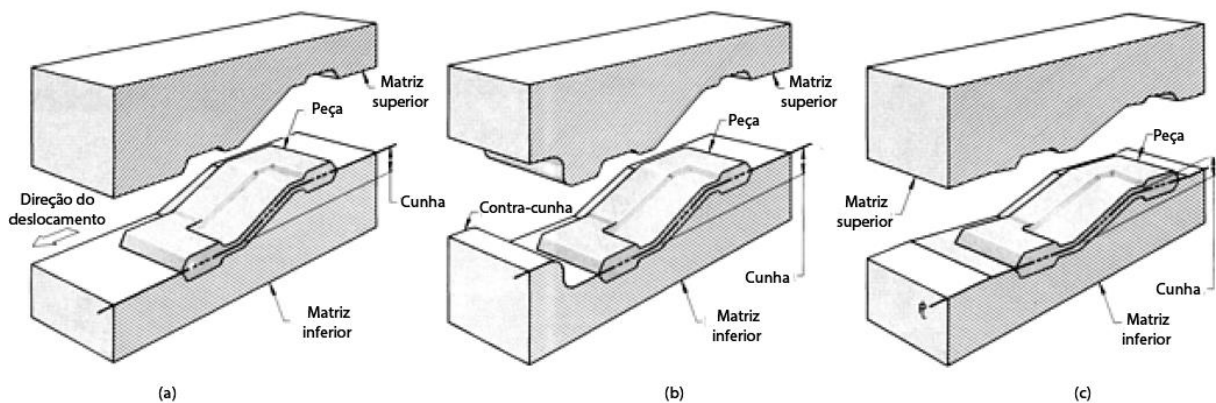


Figura 54 Posição da peça propicia a desvios laterais da matriz (a), utilização de contra-cunha em (b) para evitar esses desvios, alteração do plano de apartação (c), adaptada de (ASM 2005).

**Exemplo 3:** neste exemplo a preferência baseia-se na direção do escoamento do material. Como se pode observar na Figura 55, em (a) e (b) o plano de separação interrompe o fluxo natural do grão, podendo provocar defeitos como faltas de enchimento ou sobreposições. A fim de evitar estes defeitos, deverá optar-se por soluções como a geometria (c), que se torna a mais económica por apenas se ter de maquinar uma matriz, ou a solução (d), com o plano de separação nas extremidades das nervuras (ASM 2005, Spretnak 1964).

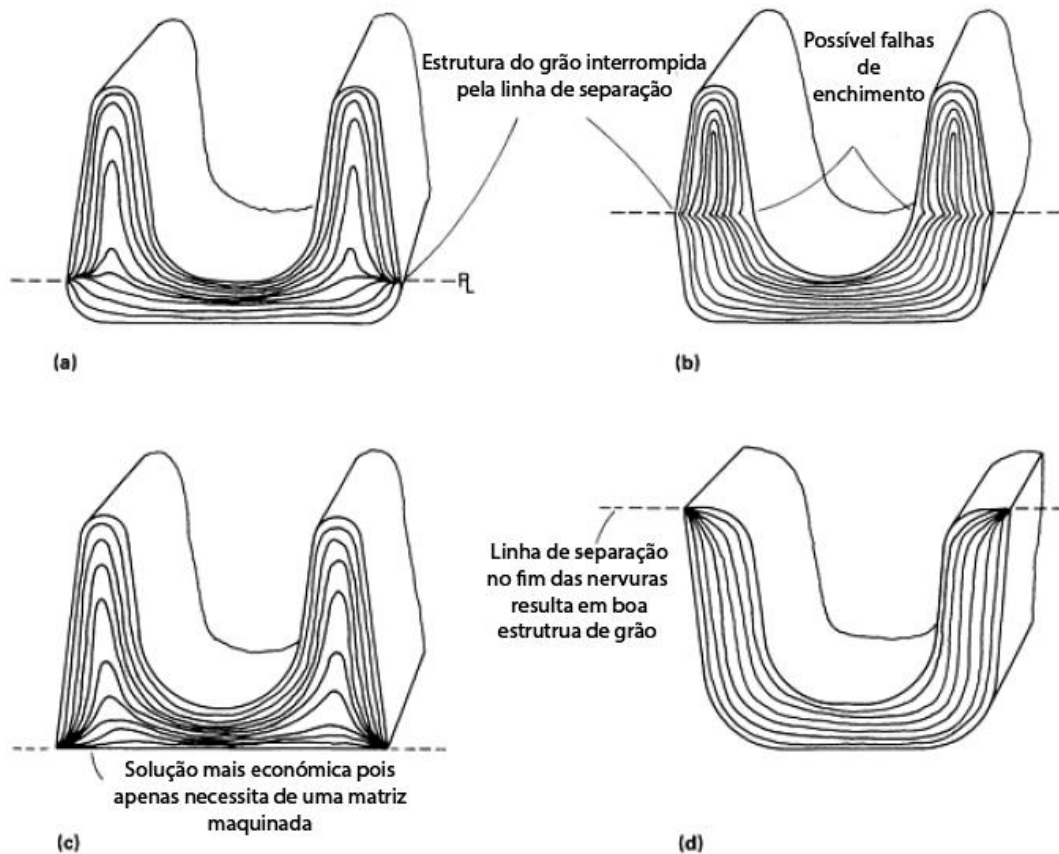


Figura 55 Posicionamento do plano de separação em (a) e (b) causa descontinuidades na estrutura do grão, possível problema resolvido com a modificação em (c) ou (d), adaptada de (ASM 2005).

### 3.2.2 Saídas

Saída é o nome dado ao ângulo entre as faces da peça e o plano perpendicular ao plano de separação da matriz. A fim de facilitar a extração da peça das matrizes após a conformação, as peças forjadas deverão ser projetadas com ângulos de saída. Deve-se evitar assim ter faces paralelas ao plano perpendicular ao de separação (Edge 2016b). Ao arrefecer, a peça encolhe quer radialmente, quer longitudinalmente, devido à contração do material. Como tal, é usual a criação de ângulos internos entre os  $5^\circ$  e os  $10^\circ$  e a criação de ângulos externos menores, entre os  $3^\circ$  e os  $7^\circ$ , pois a superfície externa afasta-se da matriz com a contração da peça (ASM 2005, Kalpakji 2014). Em casos especiais, em que a geometria da peça o obrigue, estes valores poderão ser muito inferiores aos recomendados ou quase nulos, sendo necessário usar extratores especiais para remover a peça da matriz (Spretnak 1964).

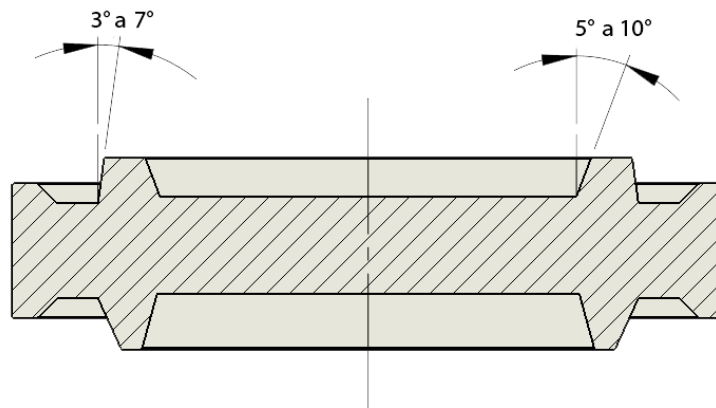


Figura 56 Ângulos aconselhados para as saídas internas e externas em peças ao carbono.

Algumas considerações poderão ser tomadas em conta para a definição do ângulo de saída das peças em função da sua geometria, e do material trabalhado:

Algumas peças poderão apresentar um ou mais ângulos de **saída naturais**, combinando a sua própria geometria com uma escolha correta da linha de separação das matrizes.

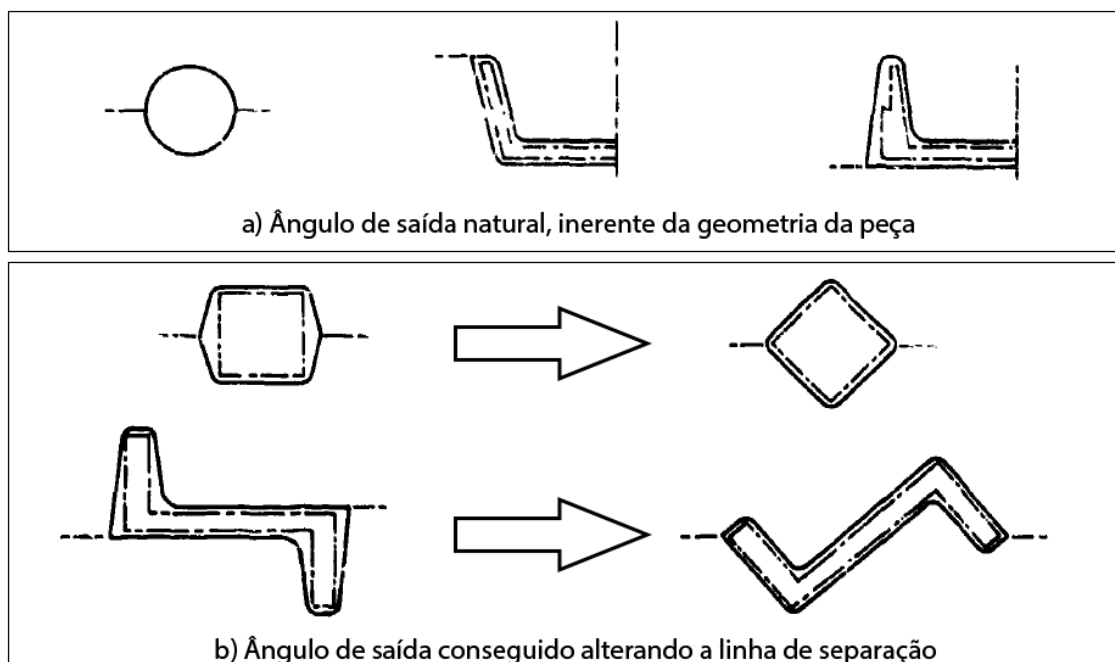


Figura 57 Ângulo de saída natural em (a) e alteração do posicionamento da peça em (b) para conseguir ângulos de saída naturais, adaptado de (Spretnak 1964).

Quando existem alturas assimétricas que se encontram na linha de separação, é prática comum aumentar o ângulo de saída da cavidade da matriz mais rasa, de modo a que as superfícies exteriores desta e da cavidade mais profunda coincidam na linha de separação. A estes casos chama-se **coincidência de saídas**.



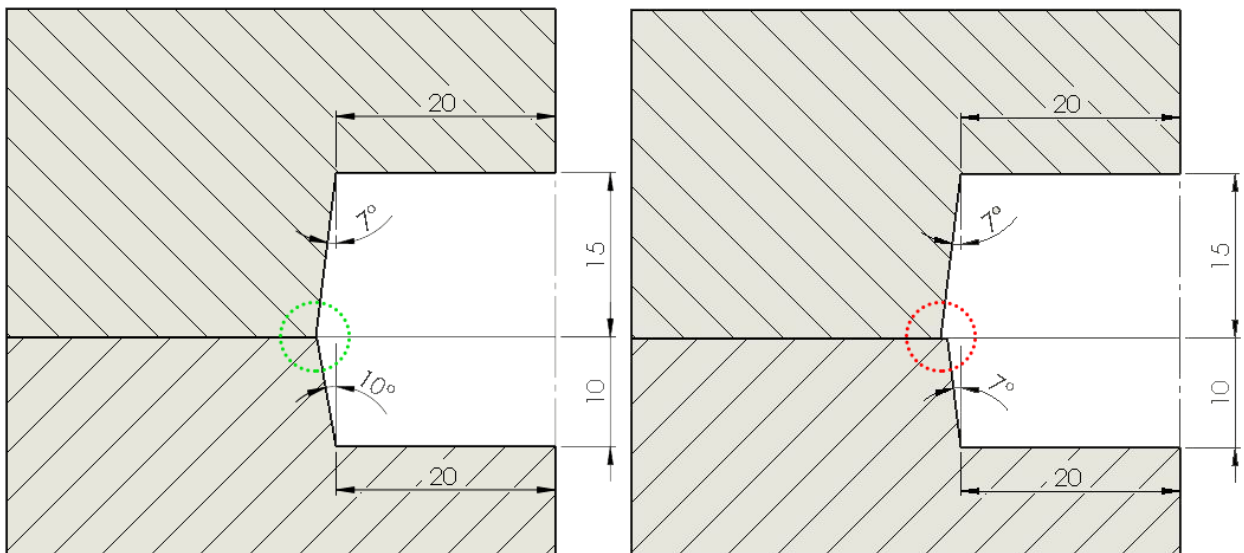


Figura 58 Exemplo de coincidência de saídas (esquerda) aumentando o ângulo de saída da matriz inferior.

Esta prática também deverá ser usada quando se têm nervuras descentradas no meio da peça, de forma a garantir um escoamento de grão favorável na nervura e prevenir o aparecimento de defeitos (Spretnak 1964).

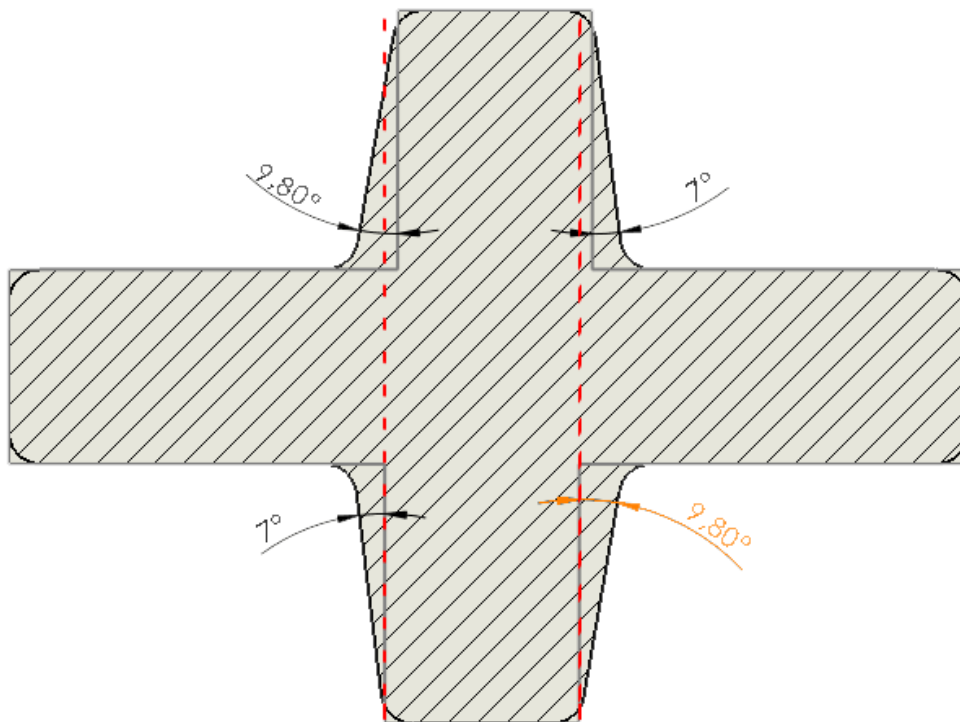


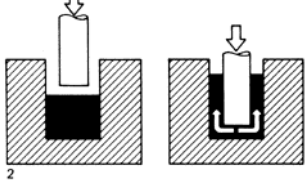
Figura 59 Exemplo do aumento dos ângulos de saída a fim de compensar o desalinhamento das nervuras.

A fim de reduzir as operações de maquinagem na fase de acabamento das peças, é desejável o uso do menor ângulo possível nas saídas. O uso de martelos no forjamento torna inviável o uso de ângulos demasiado pequenos, pois o impacto da matriz com a peça tende a partir os extratores que são necessários para a extração da peça. Utilizando prensas hidráulicas ou mecânicas, e com o devido estudo do sistema de extração, as saídas já podem ser minimizadas

ou mesmo anuladas. O valor mais usado no forjamento para os ângulos de saída é de  $7^\circ$  (Spretnak 1964).

O material a ser forjado também tem influência a escolha do ângulo de saída. Regra geral, ligas com maior forjabilidade apresentam ângulos de saída mínimos inferiores. Outro fator que influencia o ângulo de saída é a diferença entre a temperatura da matriz e da peça a forjar. Quando a temperatura de forjamento do material é muito superior à das matrizes, o material tende de separar-se das cavidades da matriz ao contrair no arrefecimento, simplificando a sua remoção. Metais como o aço formam uma camada de óxidos à superfície, que serve como uma ajuda à separação do material e da matriz. Ligas de titânio e níquel, por não formarem uma camada de óxido espessa como a do aço, tendem a prender em cavidades com ângulos de saída pequenos, sendo por isso necessário considerar ângulos superiores aos dos aços (Spretnak 1964).

Tabela 9 Ângulos de saída mínimos recomendados para diferentes materiais, adaptado de (Spretnak 1964).

Material	Ângulo de saída mínimo recomendado ( $^\circ$ )	Observações
Ligas de alumínio Ligas de Magnésio	$0^\circ$ a $1^\circ$	Aplicavel em forjamento do tipo de extrusão 
Aço ao carbono Aço baixa liga Aço inoxidável	$3^\circ$ a $5^\circ$	É recomendado, mas não necessário, o uso de extratores
Ligas de titânio	$5^\circ$	Ângulos inferiores podem bloquear a saída da peça
Metais refratarios Superligas de níquel Aços inoxidaveis austeniticos	$7^\circ$	-

### 3.2.3 Raios de canto e de concordância

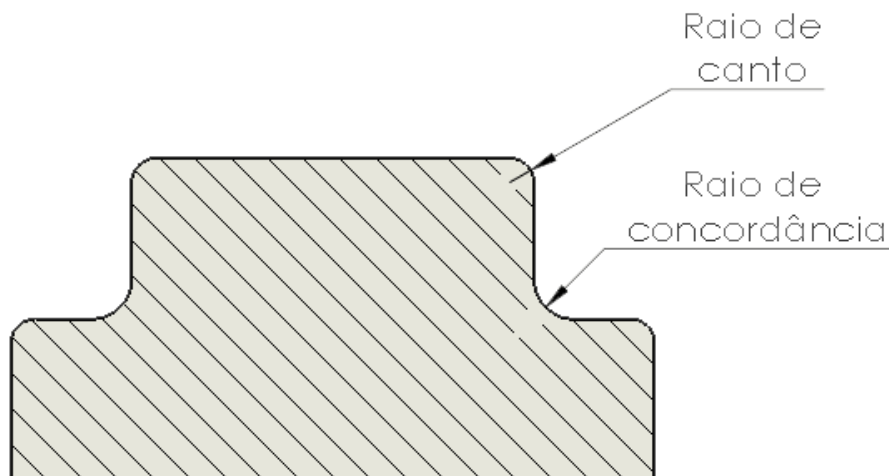


Figura 60 Diferenciação entre raios de canto, e de concordância.

A dimensão escolhida para os raios de canto e de concordância das matrizes de forjamento tem um papel preponderante no correto escoamento do material e na vida da ferramenta. Raios demasiado pequenos provocam um mau escoamento do material bem como uma tendência para um desgaste local rápido devido a ciclos térmicos e a concentração de tensões elevadas, podendo mesmo levar a fraturas nas matrizes. A dimensão mínima depende do material, da geometria da peça e do processo de forjamento associado (Kalpakji 2014, Altan *et al*, 2004). É prática comum realizar-se o forjamento em múltiplas etapas, com os raios de canto e concordância a diminuírem ao longo das etapas de pré-forma, até se obterem os valores desejados na etapa final. A Figura 61 mostra como variam os raios de concordância mínimos com o aumento da altura das nervuras para forjamentos de peças realizados numa só etapa, ou em múltiplas etapas.

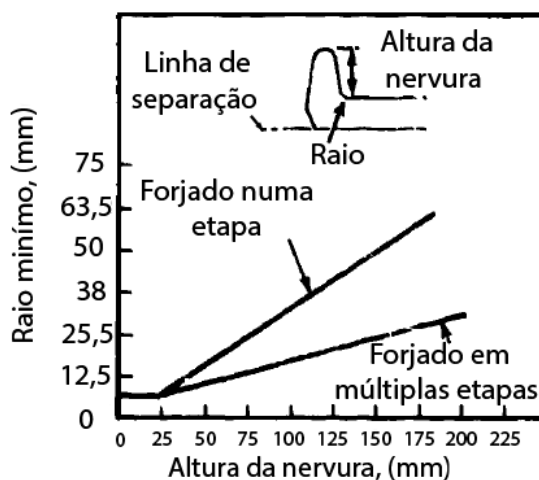


Figura 61 Variação dos raios de concordância mínimos em função da altura da nervura, adaptado de (Spretnak 1964).

Um método aceitável para a redução dos raios de concordância em peças com nervuras é a que para se diminuir o raio em 50%, deverá utilizar-se mais uma etapa de pré-forma. Ou seja, uma

peça com uma nervura de 75 mm precisará de uma matriz para um raio de 25 mm e duas matrizes sucessivas para um raio de 12,5 mm. Outra regra que se poderá utilizar é a de que nervuras em zonas centrais da peça permitem raios de concordância até 25% inferiores aos raios das localizadas nas extremidades (Spretnak 1964, Walker 1996). De igual modo, a relação entre a altura e largura das nervuras deverá ser igual ou menor que o número de etapas que antecedam a final (ASM 2005).

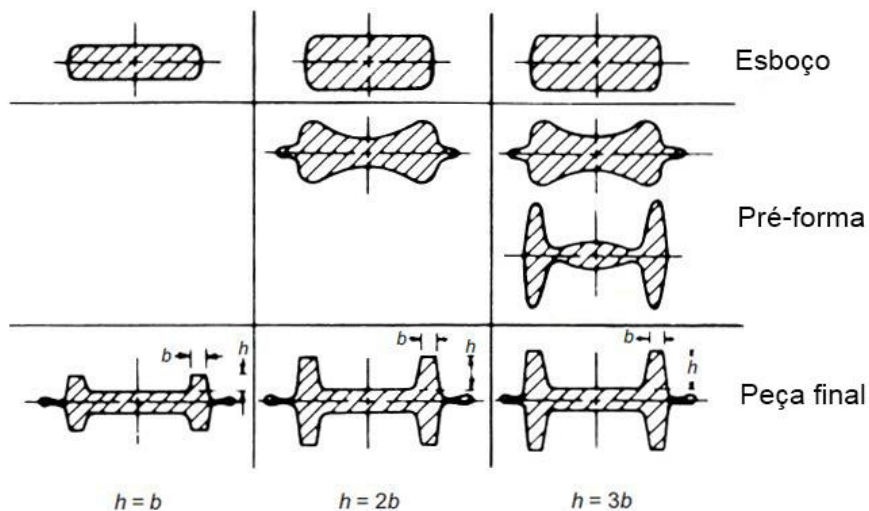


Figura 62 Variação do número de etapas necessárias para forjar uma peça, em função do rácio entre a altura e a largura da nervura, adaptado de (ASM 2005).

A escolha dos raios de canto não apresenta uma importância tão grande como a dos raios de concordância, não devendo, no entanto, usar-se raios demasiado pequenos e recorrer-se, sempre que possível, a um “raio cheio” como exemplificado na Figura 63. Dever-se-á tentar uniformizar os valores dos diferentes raios da peça, de modo a se diminuir o número de ferramentas necessárias para fabricar as matrizes, diminuindo assim o seu custo (Spretnak 1964).

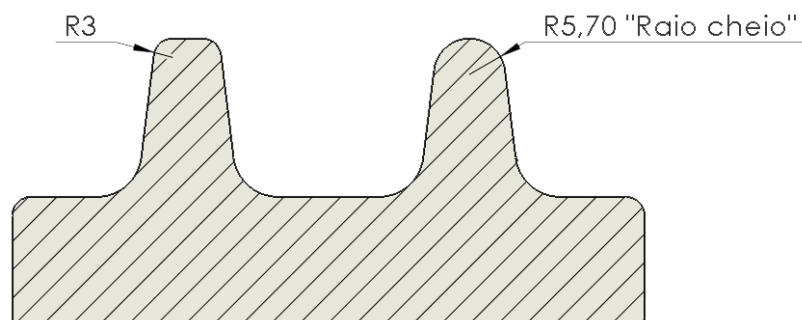


Figura 63 Exemplo de aplicação de um "raio cheio"

Sendo bastante difícil definir valores padrão para raios de canto e concordância, variando estes em função da bibliografia escolhida, a Tabela 10 mostra alguns valores aconselhados em função da altura ou profundidade das nervuras da peça. Para casos com protuberâncias menos acentuadas, a Tabela 11 pode ser usada, dando valores mínimos em função do peso da peça a forjar.

Tabela 10 Raio de concordância e de canto mínimo em função da altura/profundidade de uma nervura/cavidade, adaptado de (Spretnak 1964).

<b>Altura/Profundidade da nervura (mm)</b>	<b>Raio de concordância mínimo (mm)</b>	<b>Raio de canto mínimo (mm)</b>
0-15	5,0	1,5
15-25	6,5	3,0
25-50	10,0	5,0
50-100	10,0	6,0
100-200	25,0	15,0
200-400	50,0	20,0

Tabela 11 Raios de concordância e de canto mínimos, em função do peso da peça, adaptado de (Spretnak 1964).

<b>Peso da peça (kg)</b>	<b>Raio de concordância mínimo (mm)</b>	<b>Raio de canto mínimo (mm)</b>
0,5	1,2-3,2	1,2-3,2
0,5-1,0	1,6-3,2	1,6-3,2
1,0-2,5	3,2-6,4	2,4-3,2
2,5-4,5	3,2-6,4	2,4-3,2
4,5-13,5	6,4-12,7	3,2-6,4
13,5-45	12,7	6,4

### 3.2.4 Rebarba

A rebarba é o material em excesso que preenche cavidades em torno da geometria da peça entre os planos de separação. Esta, sendo desperdício de material uma vez que é removida da peça na fase final do processo, tem um papel muito importante no controlo do processo do forjamento em matriz fechada uma vez que ao aumentar o atrito entre o material e a matriz, constringe o escoamento do material para fora da mesma, obrigando-o a preencher todas as cavidades (Zhu 2014, Rathi e Jakhade 2014).



Figura 64 Exemplo da criação de rebarba (Forge 2015).

A rebarba é composta por duas partes definidas na geometria da matriz pelo canal de rebarba e a cavidade de rebarba. O canal de rebarba é geralmente constituído por duas superfícies paralelas e lisas e a sua geometria controla a pressão na cavidade da matriz, definindo a largura e espessura da rebarba. A razão entre a largura e espessura varia normalmente entre 2:1 e 5:1. Usam-se rácios menores em prensas e superiores em martelos (ASM 2005). A cavidade é mais espessa e deverá ser grande o suficiente de modo a poder acomodar o excesso de material e não ficar pressurizada (ASM 2005, Spretnak 1964).

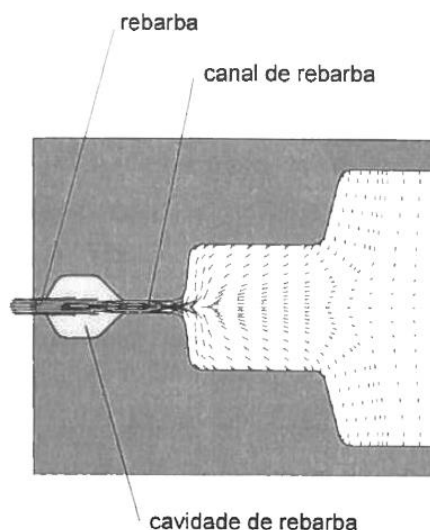


Figura 65 Escoamento da rebarba pelo canal e cavidade de rebarba (Rodrigues e Martins 2010b).

Pode-se analisar, na Figura 66 , a força de forjamento em função do deslocamento da matriz ao longo do processo. A energia despendida aumenta a um ritmo praticamente constante desde que as matrizes tocam no esboço, até ao início da formação da rebarba. Nesta altura, a energia aumenta rapidamente devido à dificuldade do material em preencher detalhes mais complexos da geometria como cavidades profundas. É nesta fase que a rebarba apresenta um papel preponderante no processo, dificultando o escoamento de material para o exterior devido ao aumento do atrito e fazendo aumentar a pressão no interior da matriz. Este aspeto é ainda

acentuado devido ao rápido arrefecimento de material no canal de rebarba (Rodrigues e Martins 2010b).

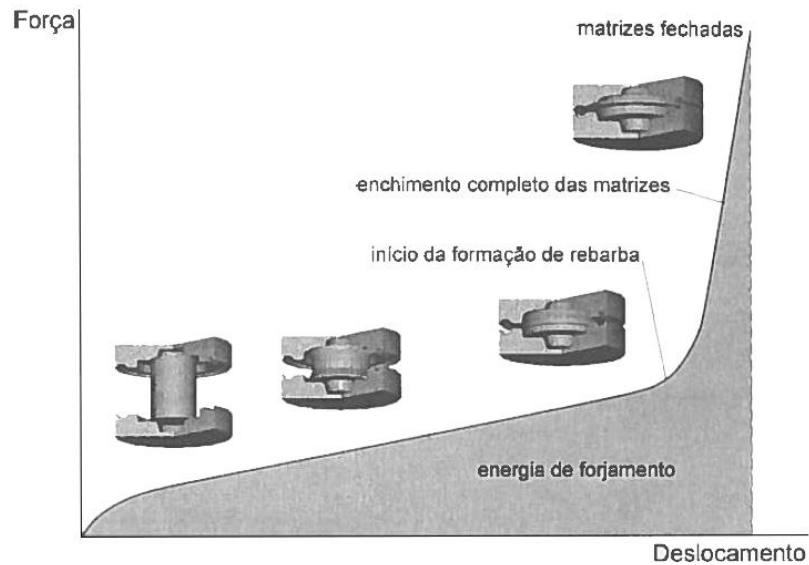


Figura 66 Força necessária ao forjamento ao longo do decorrer do processo (Rodrigues e Martins 2010b).

Como tal a geometria da rebarba deverá ser tal que:

- O escoamento de material pelo canal de rebarba deverá ser mais difícil que no interior da matriz;
- A espessura do canal não deverá ser excessivamente pequena, o que poderá levar a um aumento exagerado da energia necessária ao forjamento e conseqüente aumento do desgaste das matrizes;
- A espessura não deverá ser demasiado grande, permitindo que o material escoe pelo canal prematuramente, causando falhas no enchimento da matriz.

Não havendo apenas uma geometria para a rebarba de uma certa peça, apresentam-se de seguida regras que podem ser seguidas para a sua obtenção. Para uma geometria básica, o rácio entre a espessura e a largura pode ser em função do peso, como mostra a Figura 68.

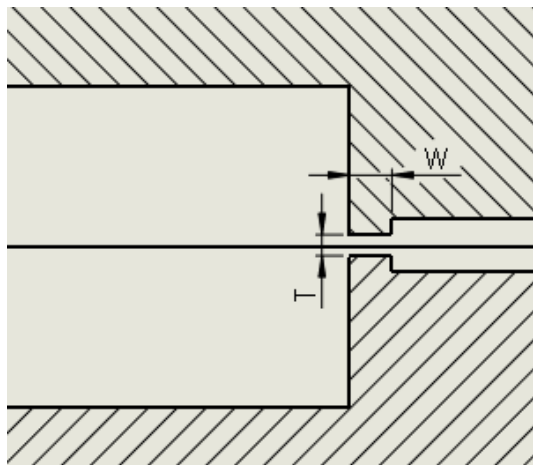


Figura 67 Espessura ( $t$ ) e largura ( $w$ ) da rebarba para uma geometria básica do canal.

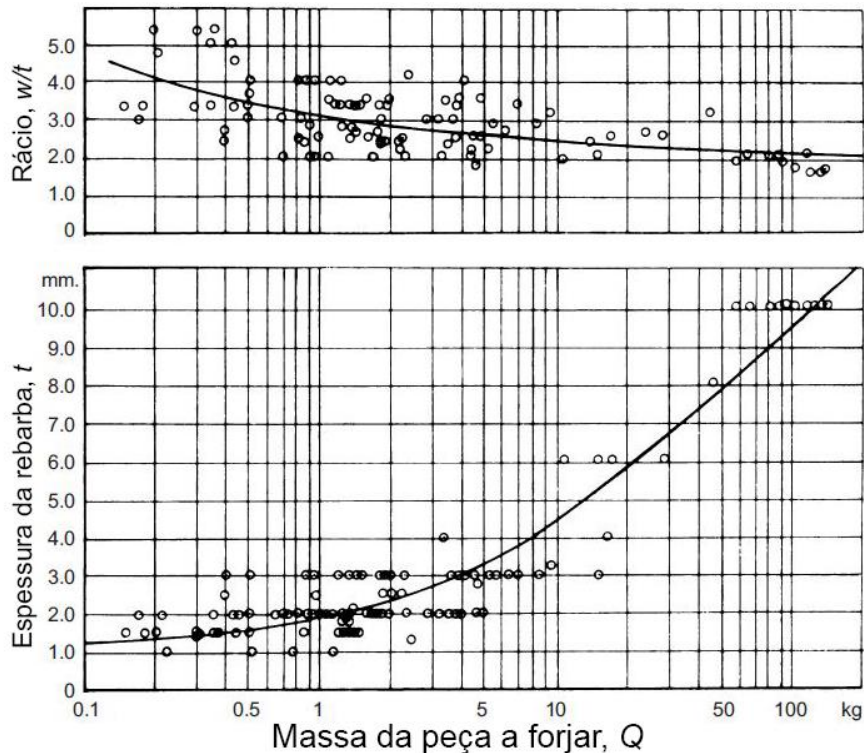


Figura 68 Obtenção da espessura e largura da rebarba em função da massa da peça a forjar, adaptado de (ASM 2005).

Existem no entanto, um conjunto de fórmulas empíricas que permitem o dimensionamento do canal da rebarba. De entre elas, destacam-se as seguintes três:

Tabela 12 Fórmulas empíricas de cálculo das dimensões da rebarba, adaptado de (Walker 1996).

Referência	Espessura, $t$ [mm]	Razão, $w/t$
Voiglander	$0,016D + 0,0018A_p^{0,5}$	$65 \cdot D^{0,5}$
Neuberger e Mockel	$1,13 + 0,89W^{0,5} - 0,017W$	$3 + 1,2e^{-1,09W}$
Teterein e Tarnovski	$2W^{0,33} - 0,01W - 0,09$	$0,0038kD/t + 4,93/W^{0,2} - 0,2$

Onde,

$A_p$  é a área projetada da peça no plano de separação [ $mm^2$ ];

$W$  é o peso da peça a forjar [ $kg$ ];

$D$  é o diâmetro médio da peça [ $mm$ ];

$K$ , é o fator de complexidade da peça (definido no Cap.3.3.1).

A primeira fórmula não tem em consideração a complexidade da peça, sendo usada maioritariamente para peças axissimétricas. A segunda e terceira fórmulas, são baseadas em dados estatísticos obtidos para um grande grupo de estudo de peças forjadas em aço, mostrando-se fiáveis na determinação do volume. Devido à sua fácil aplicação, a segunda fórmula é a mais utilizada. Embora tenha sido obtida em grupos de estudo de peças em aço, esta pode ser utilizada para outros metais, alterando a sua variável peso, para volume (Walker 1996):



$$t = 1,13 + 0,0789V_P^{0,5} - 0,000134V_P$$

$$\frac{W}{t} = 3 + 1,2e^{-0,00857V_P}$$

Onde:

$V_P$  é o volume da peça a forjar [ $cm^3$ ].

O volume e peso da rebarba, podem ser também calculados recorrendo a fórmulas empíricas. O peso da rebarba pode ser calculado multiplicando a sua massa volúmica,  $\rho$  [ $g/cm^3$ ], pelo seu volume, calculado por:

$$V_R = p_{médio} \cdot 0,1234V_P^{0,5}$$

Onde:

$V_R$  é o volume da rebarba [ $cm^3$ ];

$p_{médio}$  é o perímetro médio, calculado entre a extremidade da peça e da rebarba [ $cm$ ];

A fase final do processo de forjamento passa pelo corte da rebarba, realizado geralmente com recurso a uma punção e uma matriz. Para o caso de o corte se dar com a peça quente, pode-se definir a folga entre o punção e a matriz,  $j$ , como 0,3 mm caso o ângulo de saída  $\alpha$  seja superior a  $15^\circ$ , caso seja inferior, deverá usar-se a tabela seguinte (Rodrigues e Martins 2010b).

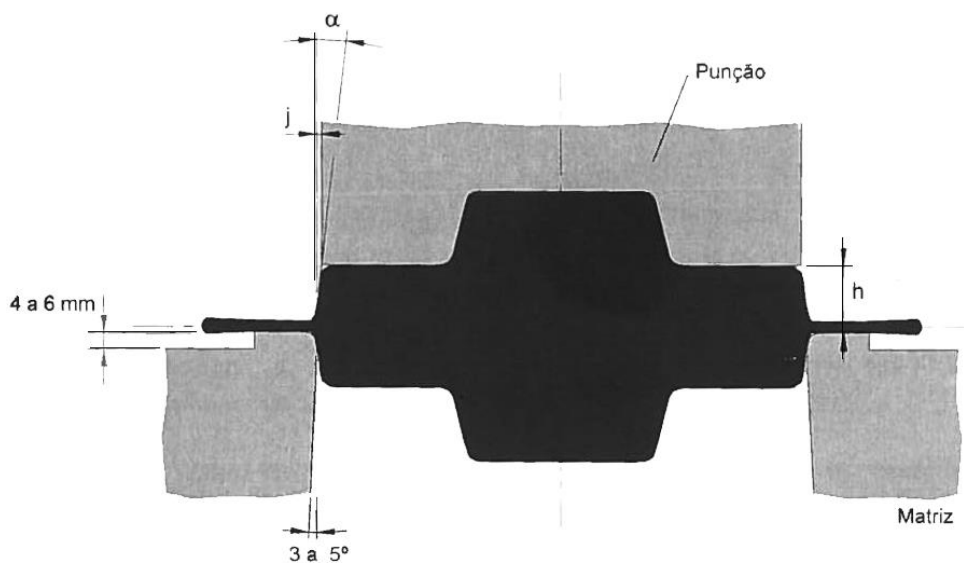


Figura 69 Esquemática da operação de corte (Rodrigues e Martins 2010b)

Tabela 13 Folga necessária para o corte, em função da altura média da peça, adaptado de (Rodrigues e Martins 2010b).

Altura média da peça (mm)	Folga entre o punção e a matriz, j (mm)
<10	0,3
10-20	0,5
20-40	0,8
40-50	1,0
50-60	1,2
>60	1,5

Os punções e matrizes de corte deverão manter o seu rebordo afiado a fim de não deformar a peça durante o corte. Para tal é necessário que estas ferramentas sejam produzidas com materiais apropriados. A escolha do material depende do material a forjar e a temperatura a que o corte ocorre. Para aços ao carbono ou inoxidáveis é comum usarem-se aços ferramenta enquanto que para materiais não ferrosos utilizam-se aços com baixo teor de carbono com superfície endurecida para fabricar os punções. As matrizes são comumente fabricadas em aços ligados para ferramentas de trabalho a frio como o aço C 265 (AISI D2) (ASM 2005).

Tabela 14 Materiais de fabrico das ferramentas de corte e respetiva dureza, adaptado de (ASM 2005).

Material a cortar	Corte a frio		Corte a quente	
	Punção	Matriz	Punção	Matriz
<b>Aços ao carbono e ligados</b>	6F2 ou 6G (340-375 HB)	D2 (54-56 HRC)	6F2 ou 6G (340-375 HB)	D2 (58-60 HRC)
<b>Aços Inoxidáveis e ligas resistentes ao calor</b>	Geralmente cortadas a quente		6F2 ou 6G (388-429 HB)	D2 (58-60 HRC)
<b>Alumínio e magnésio</b>	6150 (461-477 HB)	O1	1020	1020

### 3.2.5 Sobreesspessuras

Sobreesspessura é o material em excesso que é tido em conta no processo de projeto da peça, de modo a permitir operações de maquinagem no final do forjamento. Estas operações de maquinagem tornam-se necessárias quando são pedidas:

- Tolerâncias dimensionais ou geométricas muito apertadas;
- Esquinas vivas;
- Paredes sem angulo de saída;
- Rugosidades superficiais muito baixas;
- Ou caso existam furos não possíveis de obter diretamente.

Para ser possível realizar estas operações, é preciso ter em conta no projeto da peça a forjar sobreespessuras, que permitam haver material em excesso a ser maquinado. Os valores de sobreespessura poderão ser escolhidos com base na Tabela 15 (Jenson 1970, Bralla 1999).

Tabela 15 Valores de sobreespessura típicos, adaptado de (Jenson 1970).

Material	Área projetada no plano de separação ( $mm^2$ )		
	<65000	65000-260000	>260000
Ligas de alumínio e magnésio	0,5-1,5	1,0-2,0	1,5-3,0
Aços ao carbono e de baixa liga	0,5-1,5	1,5-3,0	3,0-6,0
Ligas de titânio	1,0-1,5	1,5-3,0	3,0-6,0
Aços inoxidáveis austeníticos	0,0-1,5	1,5-3,0	1,5-4,5

### 3.2.6 Contrações

Contração é a variação de volume que o esboço, ou a matriz sofrem, quando aquecidas. O volume de qualquer material aumenta aquando do aumento da sua temperatura. Esta expansão deve-se a um crescente grau de agitação dos seus átomos, que leva a que se afastem entre si. A influência da temperatura na expansão volumétrica dos corpos varia muito de material para material, sendo por isso essencial caracteriza-la analiticamente a fim de se poder prever o comportamento dos materiais sujeitos a operações de forjamento a quente ou morno. Embora na realidade este comportamento não seja linear, devido à grande complexidade em obter curvas reais da dilatação de um corpo em função da sua temperatura, são feitas aproximações, recorrendo ao coeficiente de expansão linear  $\alpha$ , que indica quanto irá aumentar em comprimento um varão com 1 metro de comprimento se a sua temperatura aumentar em  $1^\circ\text{C}$  ou  $1\text{ K}$ . De modo análogo, a expansão volumétrica dos materiais é caracterizada pelo coeficiente de expansão volumétrica  $\beta$  (Zdzisław Pluta 2012).

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \cdot \Delta T$$

Ou:

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

E:

$$\Delta V = V_0 \cdot \beta \cdot \Delta T$$

Onde:

$\varepsilon_l$  é o incremento relativo do comprimento do corpo;

$\Delta l$  é a variação do comprimento do corpo [ $m$ ];

$l_0$  é o comprimento inicial do corpo [ $m$ ];

$\Delta V$  é a variação de volume do corpo [ $m^3$ ];

$V_0$  é o volume inicial do corpo [ $m^3$ ];

$\alpha$  é o coeficiente linear de dilatação térmica do material [ $(C^\circ)^{-1} \cdot 10^{-6}$ ];

$\beta$  é o coeficiente volumico de dilatação térmica do material [ $(C^\circ)^{-1} \cdot 10^{-6}$ ];

$\Delta T$  é a variação da temperatura do corpo [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Considerando que a maioria dos metais são isotrópicos (Podendo, no entanto, os metais, quando sujeitos a processos mecânicos como o forjamento ver as suas propriedades mecânicas alteradas, passando a comportarem-se anisotropicamente (Callister e Rethwisch 2012)), ou seja, expansão térmica é igual em todas as direções do espaço, pode-se admitir que (Silva 2007):

$$\beta = 3 \cdot \alpha$$

Pode-se assim definir o aumento em volume de uma peça no processo de aquecimento, de modo a ter em conta o desenho das matrizes. É importante referir que a compensação volumétrica no projeto de peças forjadas deve ter em conta a expansão do material e das matrizes, uma vez que estas também são aquecidas. Considerando os valores de expansão térmica da matriz, iguais aos do aço a forjar, pode-se definir um fator de contração volumétrico  $FC_v$ , que quando multiplicado pelo volume da peça resulta no volume que a cavidade da matriz deverá ter:

$$\begin{aligned}\Delta V &= V_0 \cdot \beta \cdot \Delta T \\ V_f - V_0 &= V_0 \cdot \beta \cdot \Delta T \\ V_f &= V_0 \cdot (\beta \cdot \Delta T + 1) \\ \frac{V_f}{V_0} &= (\beta \cdot \Delta T + 1) = FC_v\end{aligned}$$

Onde:

$FC_v$  é o fator de contração volumétrico

Com:

$$\Delta T = \text{Temperatura da peça} - \text{Temperatura da matriz}$$

Do mesmo modo, podemos obter o fator de contração linear,  $FC_l$ , que multiplicado pelas cotas da peça, resulta no valor das cotas correspondentes para a matriz:

$$FC_l = (\alpha \cdot \Delta T + 1)$$

Onde:

$FC_l$  é o fator de contração linear

Tabela 16 Valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para alguns materiais.

Material	$\alpha [(C^\circ)^{-1} \cdot 10^{-6}]$	$\beta [(C^\circ)^{-1} \cdot 10^{-6}]$
Alumínio	23,6	70,8
Aço Inoxidável (316)	16,0	48
Aço ao carbono (1025)	12,0	36
Aço H11	11,9	35,7

Segue-se um exemplo simples de aplicação:

*Deseja-se obter a peça da Figura 70, em aço ao carbono 1025 (todas as cotas em mm), qual deverá ser o volume e cotas da cavidade matriz?*

Nota: para efeitos de demonstração não serão considerados raios mínimos nem saídas da peça.

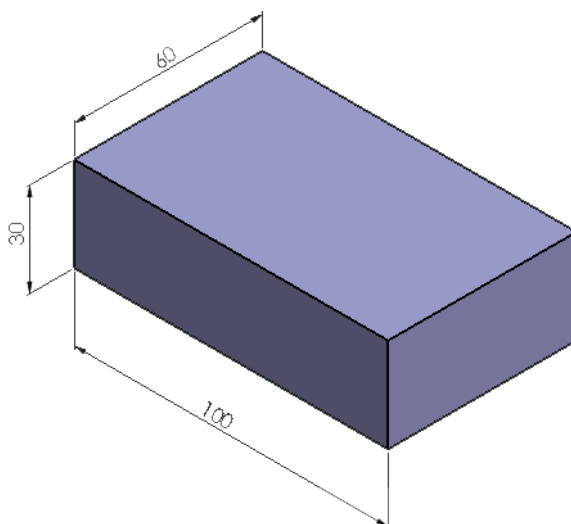


Figura 70 Peça em estudo

Considerando uma temperatura de forjamento de 1200°C e temperatura da matriz de 300°C:

Tabela 17 propriedades do material em estudo.

Material	1025
$\alpha [(C^\circ)^{-1} \cdot 10^{-6}]$	12
$\beta [(C^\circ)^{-1} \cdot 10^{-6}]$	36
Temperatura da matriz [°C]	300
Temperatura da peça [°C]	1200
$V_0 [mm^3]$	180000

Usando o fator de contração volumétrico:

$$FC_v = (36 \cdot 10^{-6} \cdot (1200 - 300) + 1) = 1,0324$$

$$V_f = 1.0324 \cdot 180000 = 185832$$

Usando o fator de contração linear:

$$FC_l = (12 \cdot 10^{-6} \cdot (1200 - 300) + 1) = 1,0108$$

$$V_f = 1,0108^3 \cdot 60 \cdot 100 \cdot 30 \approx 185895,2$$

Conclui-se então que a cavidade da matriz deverá ter as seguintes dimensões:

Tabela 18 Dimensões da cavidade.

Largura [mm]	Comprimento [mm]	Altura [mm]	Volume [ $mm^3$ ]
60,648	101,08	30,324	185895,2

### 3.3. Definição da pré-forma e do número de etapas

#### 3.3.1 Definição da complexidade geométrica

No forjamento em matriz fechada de peças com geometrias algo complexas, torna-se difícil de preencher plenamente as cavidades das matrizes recorrendo a um esboço em forma de varão ou barra numa só etapa. Por esta razão, e a fim de melhorar a vida útil das matrizes bem como diminuir a força necessária nas ferramentas, recorre-se à divisão do processo em várias etapas, podendo-se começar com operações em matriz aberta, seguidas de uma ou mais etapas intermédias em matriz fechada em que se vão obtendo geometrias cada vez mais aproximadas da forma final (Masel *et al*, 2010, Altan e Shirgaokar 2014).

Para se poder projetar corretamente a pré-forma deve-se, numa primeira fase, identificar a complexidade da forma geométrica da peça final. Para tal, recorre-se a um sistema qualitativo de três classes:

- Classe 1 – Formas compactas, esféricas ou cúbicas:
  - Peças que tenham as suas três principais dimensões, comprimento ( $l$ ), largura ( $w$ ) e altura ( $h$ ) aproximadamente iguais;
  - Poucas peças entram nesta categoria.
- Classe 2 – Formas de disco ou flange:
  - Peças com duas dimensões similares, comprimento ( $l$ ) e largura ( $w$ ), e uma terceira bastante inferior, altura ( $h$ );
  - Grande maioria das peças de revolução estão contidas nesta categoria;
  - Inclui cerca de 30% das geometrias de peças forjadas.
- Classe 3 – Formas compridas ou complexas;
  - Formas irregulares e complexas ou peças com uma dimensão bastante maior que as outras duas;
  - Material distribuído segundo planos e orientações diferentes.

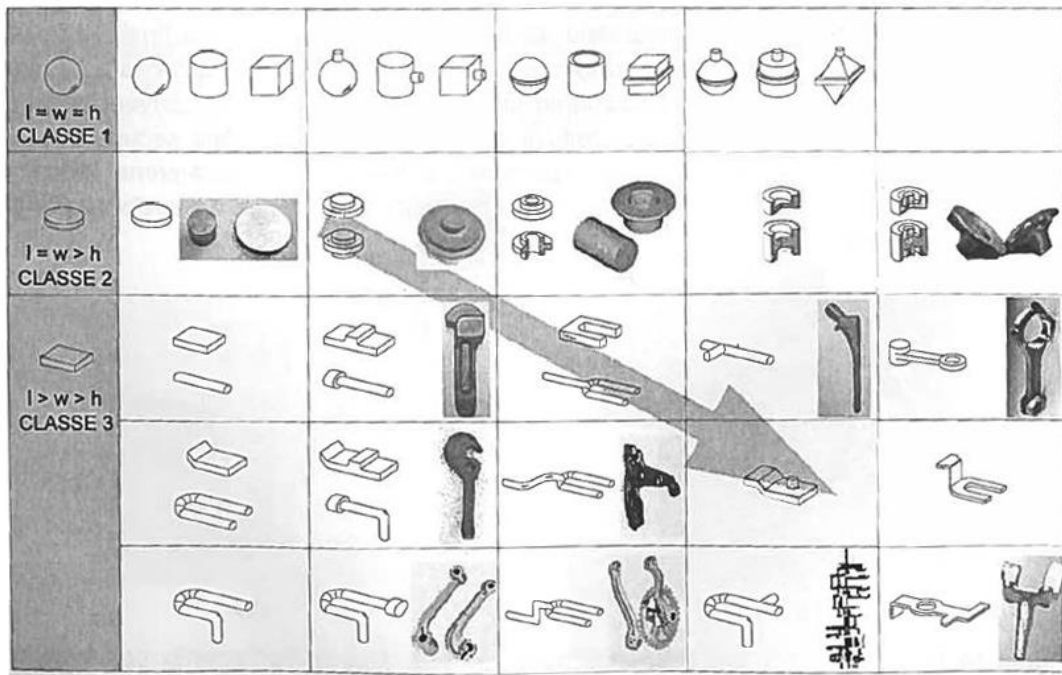


Figura 71 Classificação da complexidade da forma geométrica das peças (Rodrigues e Martins 2010b).

A dificuldade em forjar uma peça aumenta para a direita e para baixo na Figura 71, sendo peças com secções alongadas, com secções transversais finas ou distribuídas por mais que um plano as que apresentam maior dificuldade. Geometrias esbeltas com uma relação *área de superfície / volume da peça* elevadas conduzem a maiores forças de atrito entre a superfície da peça e da matriz, levando a um maior gradiente térmico e aumento das cargas necessárias para o forjamento.

Pode-se ainda classificar a complexidade em forjar uma peça quantitativamente recorrendo ao parâmetro  $k$ , definido por:

$$k_{2D} = \alpha \cdot \frac{I^2}{A}$$

Ou:

$$k_{3D} = \alpha \cdot \frac{A}{V^{2/3}}$$

Onde:

$I$  representa o perímetro ou largura;

$A$  a área;

$V$  o volume;

$\alpha$  constante.

A constante  $\alpha$  vale para geometrias bidimensionais  $1/4\pi$  de modo a que corresponda a peças com geometria circular, o valor mínimo de complexidade  $k_{2D} = 1$ . Para o caso das geometrias

tridimensionais,  $\alpha$  é igual a  $1/\sqrt[3]{144\pi}$ , de modo a que  $k_{3D} = 1$  corresponda a peças com geometria esférica (Rodrigues e Martins 2010b).

De notar que quer o modelo qualitativo, quer o modelo quantitativo apresentados, deverão ser apoiados pela experiência do seu utilizador de modo a poderem ser fiáveis e úteis numa fase inicial do projeto para análise e predição de custos ou escolha do número de etapas de pré-forma (Altan e Shirgaokar 2014).

### 3.3.2 Definição da forma do esboço e número de operações

Designa-se por esboço, a matéria-prima cortada e aquecida, na fase inicial do processo de forjamento. A escolha da geometria do mesmo, encontra-se muito condicionada pela geometria da peça, disponibilidade comercial da matéria-prima bem como os custos associados. Dentro das formas geométricas disponíveis no mercado destacam-se as de perfil redondo, quadrado ou retangular como as mais usuais. Podendo em alguns casos ser vantajoso economicamente, principalmente em caso de forjamento de grandes séries de peças em alumínio, recorrer-se à compra de perfil extrudido. Na seleção do perfil deverá comparar-se a geometria da peça com a dos perfis disponíveis comercialmente escolhendo a que mais se assemelhe. Deverá dar-se, no entanto, especial preferência aos perfis redondos pois estes apresentam melhores condições ao processo, nomeadamente (Rodrigues e Martins 2010b, Brites 2009):

- Áreas de contato entre as superfícies do esboço e da matriz menores no início da deformação, que leva a menores tensões superficiais e atrito;
- Forte disponibilidade comercial em vários materiais e dimensões;
- Facilmente conformável para outras geometrias com operações simples em matriz aberta.



Figura 72 Diferentes geometrias de matéria-prima disponíveis comercialmente (Metals 2016).

De notar ainda que o volume do esboço deverá ser no mínimo a soma do volume da peça final, o volume da rebarba e ainda o volume de material perdido por oxidação no processo de forjamento a quente, volume este que varia com o valor do peso da peça a forjar. Como tal, pode-se obter o volume aproximado do esboço pela fórmula (Masel *et al*, 2010, Brites 2009):



$$V_E = V_P + V_R + V_{per} = (1 + P_{oxi}) \cdot (V_P + V_R)$$

Com:

Peso da peça forjada [kg]	≤ 4,5	]4,5; 11,5]	> 11,5
$P_{oxi}$ (%)	6,0	5,0	4,0

De acordo com o Cap. 3.2.4:

$$V_R = w \cdot t \cdot p_{médio}$$

Onde:

$V_E$  representa o volume do esboço;

$V_P$  o volume da peça;

$V_R$  o volume da rebarba;

$V_{per}$  o volume de material perdido por oxidação;

$w$  a largura da rebarba;

$t$  a espessura da rebarba;

$p_{médio}$  o perímetro médio entre a extremidade da rebarba e da peça;

$P_{oxi}$  corresponde à percentagem de oxidação.

Partindo da definição do grau de complexidade da peça, deverá definir-se o número de operações que serão necessárias para forjar a peça, bem como a forma em que deverá ser fornecida a matéria-prima. Regra geral, peças de Classe 1 e Classe 2 são forjadas em uma só etapa, existindo apenas em casos especiais uma operação de pré-forma. Já os componentes da Classe 3, devido à sua complexa geometria, envolvem usualmente mais que uma operação de pré-forma. Os objetivos da operação de pré-forma são, portanto (Rodrigues e Martins 2010b, Altan e Shirgaokar 2014):

- Garantir um bom escoamento de metal e preenchimento total, eliminando possíveis defeitos;
- Minimizar os desperdícios de material nas rebarbas;
- Minimizar o desgaste das matrizes;
- Garantir as propriedades mecânicas desejadas na peça final;
- Garantir o escoamento de grão desejado.



Figura 73 Diferentes etapas no processo de forjamento de uma cambota (REForCh 2014).

### 3.3.3 Definição das secções críticas

Por secções críticas entendem-se zonas com variações de secção abruptas, áreas de secção máxima, descontinuidades ou gargantas. Estas secções devem ser estudadas, de forma a garantir o seu correto preenchimento e garantir que não se formam defeitos nas mesmas.

### 3.3.4 Definição da geometria da pré-forma teórica

Designa-se por pré-forma teórica, uma aproximação com uma geometria básica à forma da peça a forjar, baseada no levantamento das áreas de secção de zonas consideradas críticas. No caso de peças mais complexas, como a peça apresentada na Figura 71 de Classe 3, é necessário recorrer a operações de pré-forma de modo a facilitar um correto forjamento. Para as peças em aço, existem algumas diretivas que devem ser seguidas para se poderem obter bons resultados:

- A área de secção transversal da pré-forma ao longo do eixo principal de forjamento deverá ser igual à área do produto final mais a da rebarba;
- Todos os boleados ou raios de canto deverão ser maiores na pré-forma do que na peça final;
- Deverá ser um pouco mais estreita que a peça final no plano perpendicular ao deslocamento das matrizes de modo a melhorar a distribuição de material, cerca de 1 mm;
- As nervuras deverão ser menos espessas e mais profundas que na peça final;
- As dimensões da pré-forma deverão ser maiores na direção do forjamento de modo a que a maior parte do escoamento do material ocorra por compressão ao invés de extrusão, deste modo na etapa final, o material será comprimido lateralmente em direção ao centro da cavidade da matriz não provocando tensões de corte na interface matriz/material e minimizando o atrito e a carga necessária.

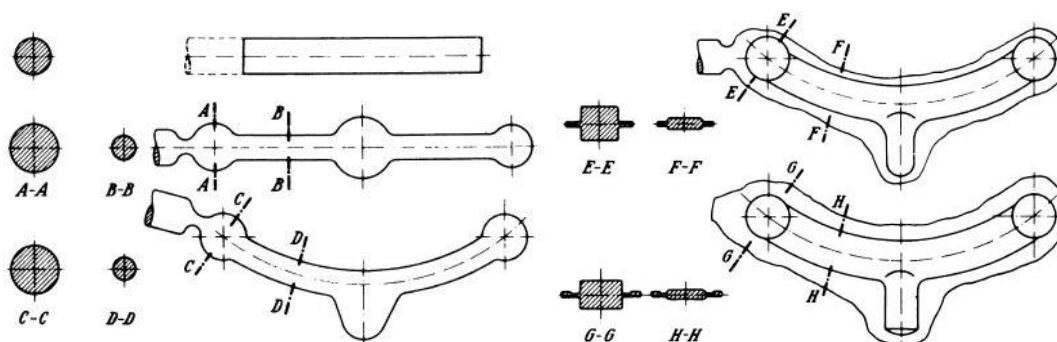


Figura 74 Diferentes etapas de pré-forma (ASM 2005).

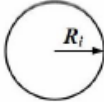
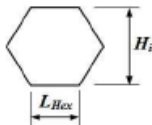
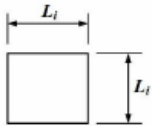
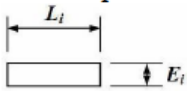
De modo a se criarem regras objetivas de projeto de pré-forma, deve-se compreender profundamente o escoamento de material durante o processo. Este ocorre de duas formas:

- Paralelo ao movimento das matrizes, considerado extrusão.
- Perpendicular ao movimento das matrizes, considerado (impressão) compressão.

De modo a se obter a pré-forma teórica, poderá usar-se o *Método de Drabing*. Este método baseia-se na obtenção de uma geometria teórica de pré-forma ideal, através da revolução de um gráfico de dimensões de referência, obtidas através do valor das áreas de secção transversal ao longo do eixo da peça. Este método será exemplificado no Cap. 4.3 deste documento. A sua execução depende dos seguintes passos:

1. Desenhar a peça com as cotas associadas no plano de separação e no plano perpendicular a este;
2. Estimar as dimensões da rebarba e inclui-la no desenho anterior (geralmente mais larga nas secções mais estreitas e mais pequena em secções mais largas);
3. Traçar o eixo central da peça no plano de separação;
4. Traçar planos perpendiculares ao plano de separação e eixo central da peça, pelo menos nas secções críticas da peça (a um maior número de planos corresponderam melhores resultados);
5. Calcular a área de secção correspondente à interseção dos planos criados no passo anterior com a peça;
6. Criar gráfico com os valores das áreas de secção;
7. A partir dos valores das áreas de secção e com a forma geométrica do esboço definida, calcular o gráfico da pré-forma, com auxílio da Tabela 19;
8. Com o gráfico de pré-forma, obter a geometria da pré-forma.

Tabela 19 Dimensões de referência da pré-forma em função da geometria do esboço (Brites 2009).

Geometria do esboço	Área de secção “ $A_S$ ”	Dimensão de referência
Circular 	$A_S = \pi \cdot (R_i)^2$	$R_i = \sqrt{\frac{A_S}{\pi}}$
Poligonal hexaédrica 	$A_S = 2,5981 \cdot (L_{Hex})^2$	$L_{Hex} = \sqrt{\frac{A_S}{2,5981}}$ $H_i = \frac{2}{3} \cdot \frac{A_S}{L_{Hex}}$
Quadrada 	$A_S = (L_i)^2$	$L_i = \sqrt{A_S}$
Retangular ou em chapa 	$A_S = E_i \cdot L_i$	$E_i = \sqrt{\frac{A_S}{3}}$ $L_i = \frac{A_S}{E_i}$

### 3.3.5 Adaptação ao processo da empresa

A geometria da pré-forma obtida pelo processo anterior é uma geometria abstrata, que é sem dúvida alguma bastante útil para a definição das etapas intermédias no processo do forjamento, mas apenas servindo de referência, sendo necessário examiná-la e adapta-la aos processos disponíveis pela empresa. Ou seja, não será viável produzir uma matriz para a geometria da pré-forma tal com é obtida do gráfico, ou mesmo recorrer a operações de maquinagem para o mesmo fim. Existe todo um conjunto de processos que permitem obter pré-formas aproximadas das geometrias desejadas. Algumas delas são:

- Encabeçamento;
- Laminagem;
- Encalcamento;
- Dobragem.

#### Encabeçamento

O encabeçamento é uma operação de compressão, normalmente realizada na extremidade de um varão, tubo ou outros produtos com secção uniforme, a fim de aumentar a sua área de secção. Pode ser realizada a quente, morno ou frio, e é muito usual na produção de parafusos, pregos, rebites entre outros.

Na sua forma mais simples, o encabeçamento é conseguido prendendo o esboço entre duas matrizes que funcionam como um *gripper* e aplicando pressão na extremidade do mesmo, com a direção do seu eixo de revolução. Desta forma, o material é achatado, aumentando a sua área de seção e diminuída a sua altura. O achatamento pode ser livre, utilizando um punção plano, ou ser confinado por uma cavidade, na matriz móvel ou nos *grippers*, como pode ser observado na Figura 75.

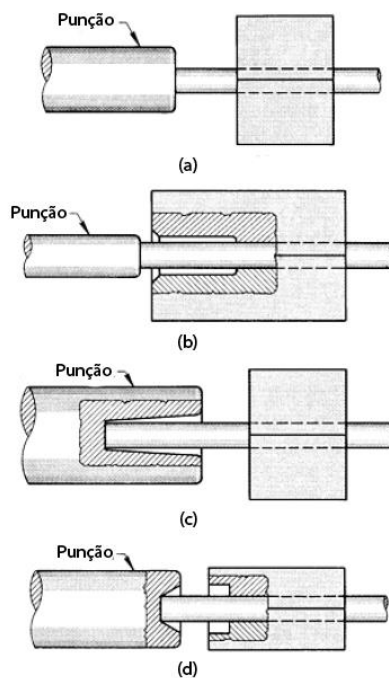


Figura 75 Encabeçamento livre (a), com cavidade na matriz (b), com cavidade no punção (c) e com cavidade na matriz e punção (d).

É usual serem precisos mais do que um golpe para se obter a forma desejada por este processo, usando assim matrizes sequenciais, com várias passagens com níveis sucessivamente superiores de deformação. É essencial ter em conta a tendência para o varão fletir caso o rácio entre o comprimento confinado pelo *gripper* e o seu diâmetro seja demasiado elevado. Regra geral, este rácio deve ser limitado a 3:1 (ASM 2005, Kalpakji 2014)

A fim de se poderem obter razões de encabeçamento (razão entre a altura no fim da operação e a altura inicial em percentagem), sem recorrer a elevadas pressões de trabalho, deverá realizar-se a operação a temperaturas elevadas, sendo que nos aços inoxidáveis a temperatura provoca uma variação muito mais significativa nas pressões necessárias do que nos aços ao carbono, como que pode visualizar na Figura 76(ASM 2005). A pressão necessária ao processo de encabeçamento pode ser calculada através do seguinte método:

$$P_{enc} = A_s \cdot R_d \cdot k$$

Onde:

$P_{enc}$  é a pressão necessária ao encabeçamento [MPa];

$A_s$  é a área de seção da cabeça pretendida [ $mm^2$ ];

$R_d$  é a resistência à deformação do material [MPa];

$k$  é o coeficiente de encabeçamento;

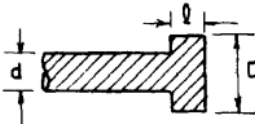
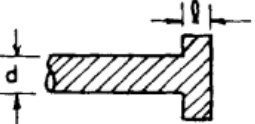
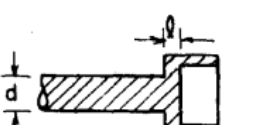

$g$  é a aceleração gravítica [ $m \cdot s^{-2}$ ].

Com:

Tabela 20 Resistência à deformação para diferentes materiais (ASM 2005).

Material	Aço	Cobre	Alumínio	Latão
$R_d$ [MPa]	10~15	6	0,4~0,5	4

Tabela 21 Coeficiente de encabeçamento para diferentes geometrias (ASM 2005).

Geometria da cabeça	Valores de $k$
	$l \geq d \therefore k = 1,2$
	$l \leq 0,8d \therefore 1,5 \leq k \leq 2,7$
	$l \leq 0,8d \therefore 4 \leq k \leq 7$
	$l \leq 0,4d \therefore 6 \leq k \leq 9$

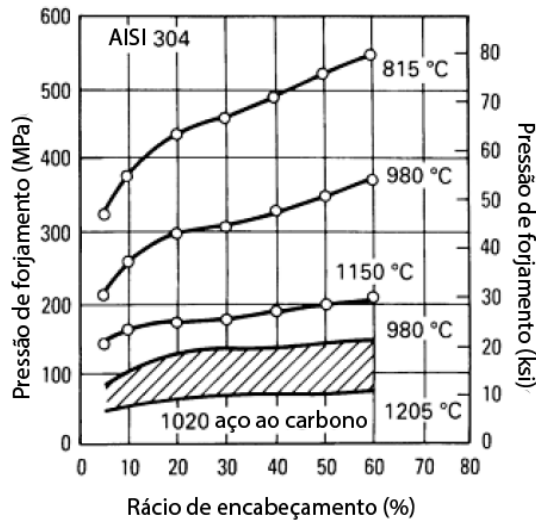


Figura 76 Diferença da influência da temperatura no encabeçamento para aços ao carbono e aços inoxidáveis (ASM 2005).

### Laminagem

A laminagem é um processo de redução da área de secção dos esboços aquecidos forçando-os a passar entre dois rolos que rodam em sentidos opostos e que têm um ou mais cavidades maquinadas. Este processo pode ser usado como um método de fabrico por si só, muito utilizado no fabrico de hélices de aviões, molas de folha, lâminas de facas de cozinha, pás, entre outros, ou usado como uma operação de pré-forma para o forjamento, muito usado para pré-formas de cambotas, pistons, bielas, etc. (ASM 2005).

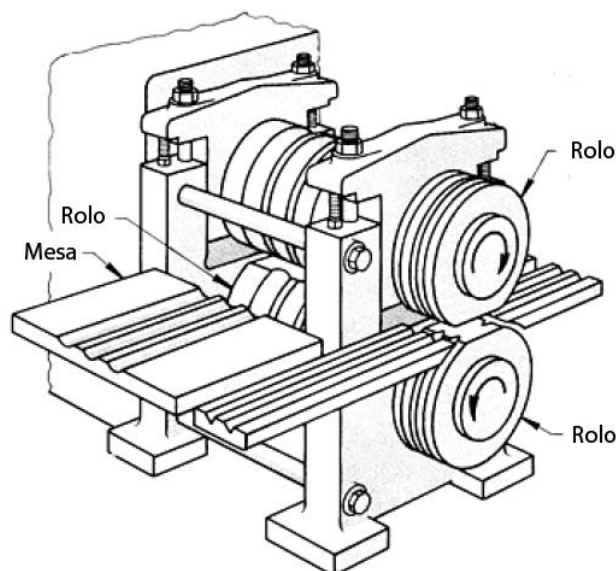


Figura 77 Representação esquemática de máquina de laminagem (ASM 2005).

Uma seleção correta do tamanho da máquina de laminagem provém das seguintes considerações:

- A potência deverá ser suficiente para a redução do esboço;
- A rigidez da máquina deve ser suficiente para garantir a precisão dimensional pretendida;

- O entre eixo dos rolos deverá ser suficientemente grande de forma a acomodar rolos com todas as ranhuras necessárias ao processo;

### Achatamento

Por achatamento entende-se a operação de forjamento em matriz aberta em que o esboço é comprimido entre duas matrizes planas, aumentando a sua área de secção em detrimento da sua altura. A Figura 78 esquematiza este tipo de operação.

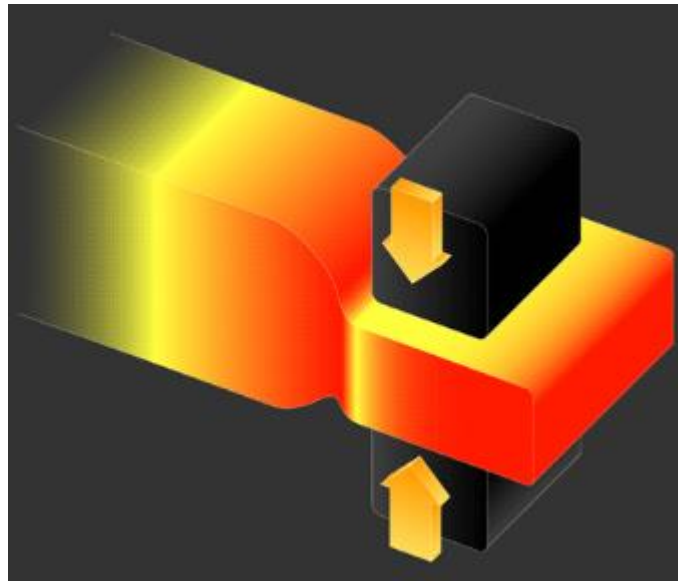


Figura 78 Esquematização da operação de encalcamento (Technology 2015a)

### Dobragem

Processo que permitem alterar a geometria do provete sem alterar a sua área de secção. Deverá ter-se em atenção na dobragem do esboço defeitos que possam ocorrer como a ovalização ou a criação de rugas. A Figura 79 mostra uma operação de dobragem.



Figura 79 Dobragem de alumínio.



### 3.4 Metodologia de previsão de forças e escoamento de material

Nesta secção serão introduzidas formas de cálculo da força teórica necessária ao forjamento, nomeadamente, o método da fatia elementar, introduzido no Cap. 2.13.1, outros métodos analíticos mais grosseiros e expeditos, e ainda a simulação computacional. Será também destacada a análise experimental de simulação do escoamento do material.

#### 3.4.1 Modelação física

A modelação física deverá basear-se numa simulação do ensaio realizado em plasticina. Como discutido no Cap. 2.12.2 deverão ser produzidos esboços em plasticina pura, ou com aditivos de forma a modificar as suas características, sendo vantajoso para a análise do escoamento do material produzir estes esboços com fatias de várias cores, ou desenhar um padrão na superfície, de modo a visualizar o escoamento do material (Santos e Cetlin 2009).



Figura 80 Exemplo de simulação de forjamento em matriz aberta em plasticina.

Na Tabela 22 encontram-se os vários valores do coeficiente de sensibilidade à velocidade de deformação, para diferentes composições de plasticina com aditivos em razão de peso.

O fabrico das matrizes poderá ser feito em madeira, alumínio ou plástico, sendo uma solução bastante interessante de considerar, a utilização dos métodos de prototipagem rápida (impressão 3D). Para simular a lubrificação é comumente usado pó de talco, farinha ou vaselina.

Tabela 22 Coeficiente de sensibilidade à velocidade de deformação para diferentes composições de plasticina com aditivos (ASM 2005).

Plasticina (g)	Vaselina (g)	Caulim (g)	Lanolina (g)	Resina/lanolina 10:4 (g)	Resina/lanolina 10:5 (g)	<i>m</i>
100	-	-	-	-	-	0,05
100	2	-	-	-	-	0,07
100	-	3	-	-	-	0,03
100	-	-	2	-	-	0,07
100	5	-	-	6	-	0,15
100	5	-	-	5	-	0,09
100	2	-	-	3	-	0,09
100	-	-	5	-	5	0,31
100	-	-	10	-	10	0,43
100	13	-	-	-	10	0,14
100	2	-	-	3	-	0,09
100	-	-	5	-	5	0,31
100	-	-	10	-	10	0,43
100	13	-	-	-	10	0,14
100	2	-	10	-	10	0,40

### 3.4.2 Métodos analíticos

Para a previsão das pressões e forças envolvidas em operações de forjamento em matriz aberta, poderá usar-se o método da fatia elementar. Como referido anteriormente, este método baseia-se na divisão da zona de deformação em fatias elementares, estabelecendo-se para cada uma delas as condições de equilíbrio nos três eixos principais.

$$\sum F_x = \sum F_y = \sum F_z = 0$$

Irá então estudar-se o caso da compressão de um esboço de secção retangular entre duas matrizes planas em forjamento de matriz aberta, podendo este exemplo ser adaptado a outras geometrias similares (Rodrigues e Martins 2010b).

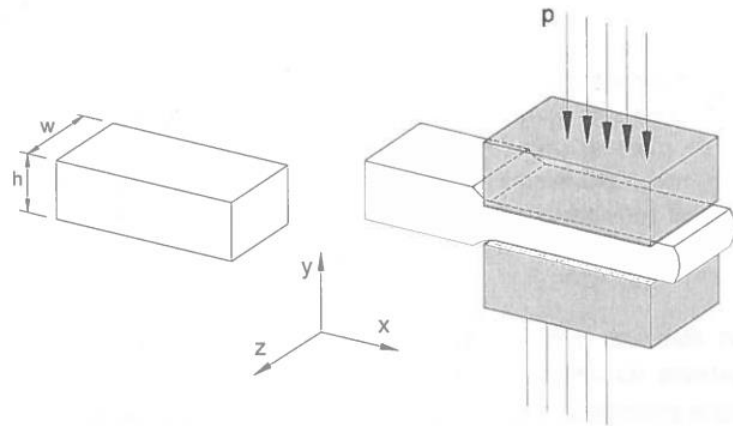


Figura 81 Compressão de um esboço retangular (Rodrigues e Martins 2010b).

O primeiro passo é a escolha de uma secção elementar dentro da área de material trabalhado. Deverá assim realizar-se o balanço estático entre as solicitações internas e externas num determinado instante.

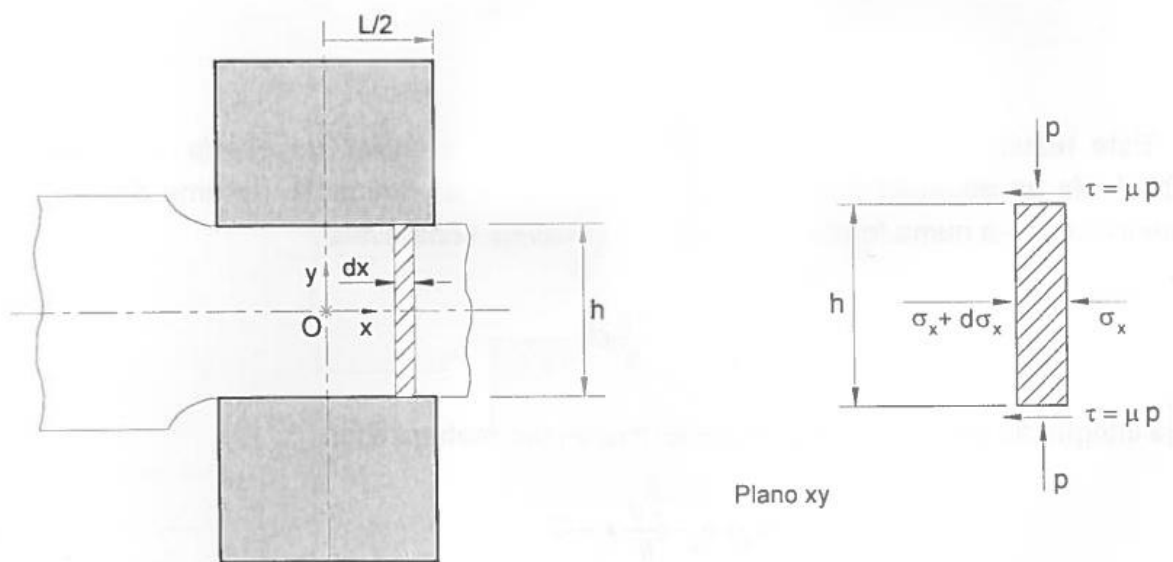


Figura 82 Balanço das solicitações atuantes numa fatia elementar (Rodrigues e Martins 2010b).

De acordo com as simplificações do modelo em estudo, a barra manter-se-á plana durante toda a deformação, ou seja,  $w$  é constante e a tensão nesta direção é a principal, ou seja:

$$\sigma_z = \sigma_2$$

Admite-se que a tensão  $\sigma_x$  não varia ao longo dos planos perpendiculares à direção do escoamento de material, variando apenas segundo  $x$ .

Determinam-se as forças aplicadas longitudinalmente no elemento de volume:

Força de atrito:

$$\tau \cdot A = \tau \cdot w \cdot dx$$

Forças associadas ao escoamento:

$$\begin{aligned} (\sigma_x + d\sigma_x - \sigma_x) \cdot w \cdot h \\ (d\sigma_x) \cdot w \cdot h \end{aligned}$$

O seu balanço determina que:

$$(d\sigma_x) \cdot w \cdot h - 2 \cdot \tau \cdot w \cdot dx = 0$$

Se considerarmos um valor de  $\mu$  relativamente baixo, podemos assumir que  $x$  e  $y$  são direções principais e que as suas tensões correspondentes são principais e constantes ao longo do plano da fatia. Através do critério de plasticidade de Tresca, podemos relacionar estas tensões do seguinte modo:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_1 \\ \sigma_y &= \sigma_3 = -p \\ \sigma_1 - \sigma_3 &= \sigma_x + p = 2k \end{aligned}$$

Pode-se então estabelecer a equação diferencial:

$$d\sigma_x = -dp$$

Substituindo esta equação diferencial na equação e eliminando a largura da barra,  $w$ , obtém-se:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{2\mu}{h} dx$$

Integrando:

$$\ln p = -\frac{2\mu}{h} \cdot x + C$$

Substituindo a condição de fronteira:

$$x = \frac{L}{2} \rightarrow \sigma_x = 0 \therefore \sigma_y = -p = -2k$$

Calculando a constante de integração C:

$$p = 2k \cdot \exp\left[\frac{2\mu}{h}\left(\frac{L}{2}-x\right)\right], \quad x \in [0, L/2]$$

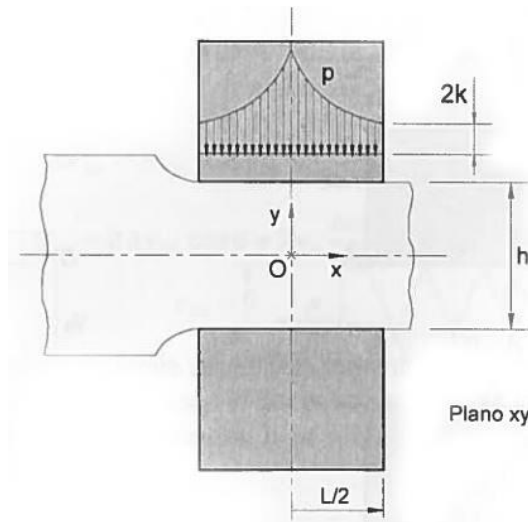


Figura 83 Distribuição da pressão na interface ferramenta/material (Rodrigues e Martins 2010b).

Como se pode verificar pela Figura 83 o valor máximo de pressão ocorre a meio da ferramenta, para  $x=0$ . Pode-se assim definir a distribuição de tensões no interior da pela seguinte equação:

$$\sigma_x = 2k \cdot \left(1 - \exp\left[\frac{2\mu}{h}\left(\frac{L}{2}-x\right)\right]\right) \therefore \sigma_y = -p = -2k \cdot \exp\left[\frac{2\mu}{h}\left(\frac{L}{2}-x\right)\right]$$

$$\sigma_z = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$$

A força de compressão,  $F$ , pode ser então determinada:

$$F = p_{m\acute{e}dia} \cdot A_c$$

Com:

$$A_c = L \cdot w$$

$$p_{\text{média}} = \frac{1}{L/2} \cdot \int_0^{L/2} p \cdot dx = \frac{2k}{\frac{\mu \cdot L}{h}} \cdot \left( \exp \frac{\mu \cdot L}{h} - 1 \right) \cong 2k \cdot \left( 1 + \frac{\mu \cdot L}{2h} \right)$$

Para o **forjamento em matriz fechada**, é possível estimar o intervalo de pressões e forças de forjamento grosseiramente introduzindo a altura média da peça a forjar,  $H_a$ , medida a partir do plano de separação, no gráfico da Figura 84. Obtém-se desta forma o intervalo de pressões de forjamento. Multiplicando estes valores, pelo valor da área projetada da peça no plano de separação, obtém-se uma estimativa para a força necessária ao processo.

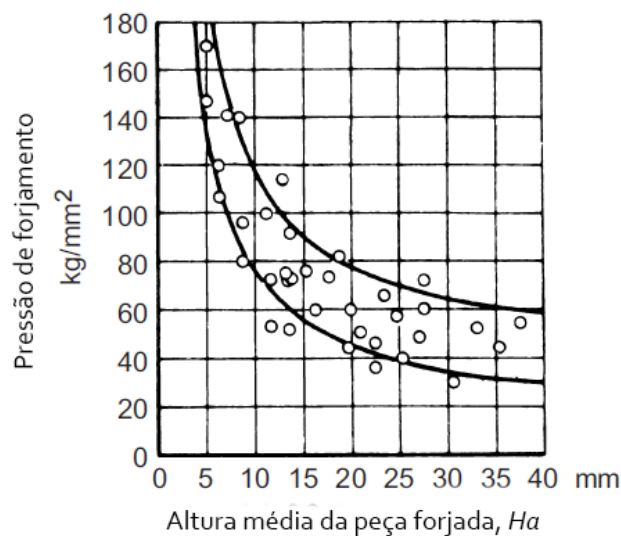


Figura 84 Pressão de forjamento em função da altura média de peça a forjar (ASM 2005).

### 3.4.3 Simulação computacional

Existem diversos programas dedicados ao estudo de processos de conformação plástica, sendo a grande maioria baseada no método dos elementos finitos. Entre os principais programas computacionais devem-se destacar (Walters 2006):

- DEFORM (Scientific Forming Technologies Corporation);
- FORGE NxT (Transvalor);
- SIMUFACT FORMING (MSC Software Company);
- QFORM (QFX Simulations Ltd);

Estes softwares demonstram uma capacidade de previsão e simulação do processo de forjamento poderosa, sendo o seu uso uma mais valia enorme no apoio ao desenvolvimento do processo. As geometrias da matriz e peça podem ser criadas internamente ou recorrendo a um software de CAD 3D, sendo de seguida importadas para a simulação. O uso destes softwares permite obter os resultados de cargas necessárias dos métodos analíticos e de escoamento do material dos métodos de prototipagem com um grão de precisão muito mais elevado. De igual modo, permitem estudar os fenómenos de transferência de calor, desgaste das ferramentas e alguns, permitem até o estudo da microestrutura. Um exemplo de aplicação do software DEFORM, no apoio ao projeto de uma peça forjada e simulação do processo será mostrado no Cap. 4.4.

### 3.5 Fabrico das ferramentas

As matrizes para o forjamento a quente deverão ser fabricadas em aços ao cromo ou ao tungstênio para trabalho a quente. A Tabela 23 mostra as principais propriedades dos principais aços usados no fabrico de matrizes.

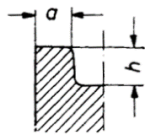
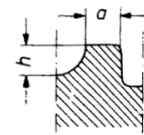
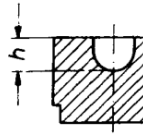
Tabela 23 Propriedades para os principais aços usados no fabrico de matrizes de forjamento (Rodrigues e Martins 2010b).

	<b>Aços ao Crómio (AISI H10 a H19)</b>	<b>Aços ao Tungsténio (AISI H20 a H26)</b>
<b>Resistência aos choques térmicos</b>	Elevada	Fraca
<b>Condutibilidade térmica</b>	Boa	Elevada
<b>Resistência mecânica a quente</b>	Boa	Elevada
<b>Resistência ao desgaste a quente</b>	Boa	Elevada
<b>Suporta refrigeração a água</b>	Sim	Não
<b>Temperatura máxima de trabalho (°C)</b>	300-650	300-650
<b>Dureza após tratamento térmico (HRC)</b>	45-55	43-52

As matrizes devem ser submetidas a tratamentos térmicos de têmpera e revenido de modo a otimizar o seu rendimento e vida útil. O Anexo B fornece mais informação relativa aos materiais e tratamentos térmicos geralmente utilizados no fabrico de matrizes de forjamento.

A nível dimensional, as cotas do bloco da matriz podem ser calculadas em função dos esforços a que esta estará sujeita. A Tabela 24 apoia o dimensionamento do bloco, considerando os valores mínimos do mesmo em função das dimensões da cavidade da matriz e do número de operações a efetuar na mesma. No caso de apenas se fazer uma operação na matriz, deverão usar-se os valores de largura de parede da coluna A. No caso da matriz fazer duas operações, deverão usar-se os valores da coluna B para a distância mínima entre as cavidades, sendo o valor de  $h$ , o valor mínimo das cavidades. Com a coluna C, obtém-se o valor mínimo de altura da matriz, em função da profundidade da cavidade. No caso do bloco possuir múltiplas operações, deverá usar-se o maior valor de  $h$  (Walker 1996).

Tabela 24 Dimensões gerais de matrizes de forjamento em função da cavidade (Walker 1996).

Profundidade da cavidade $h$ [mm]	Espessura mínima $a$ [mm]		Altura mínima $H$ [mm]
			
6	12	10	100
10	20	16	100
16	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

### 3.6 Validação experimental

Uma vez forjada a peça, esta deve ser analisada procurando possíveis defeitos. Os defeitos mais comuns em peças forjadas são:

#### Falha de penetração

Estruturas dendríticas no interior da peça não são rompidas, ou seja, o forjamento acontece só à superfície.

Causas: demasiado trabalho na superfície e temperatura demasiado baixa.

Solução: aumentar a temperatura de forjamento.

#### Fissuras superficiais

Causas: as fissuras superficiais surgem muitas vezes como consequência de um aquecimento incorreto. Quer seja por deformação excessiva com a peça a uma baixa temperatura, quer seja pela fragilidade causada por aquecimento excessivo.

Solução: ajustar a temperatura de forjamento.

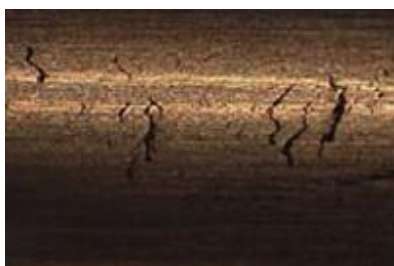


Figura 85 Fissuras superficiais em peça forjada (KANAZAWA *et al*, 2014)



### Fissuras internas

Fraturas no interior da peça forjadas, causadas pelo escoamento do material no seu interior.

Causas: as fraturas internas surgem devido a tensões internas normais,  $\sigma_x$ , de tração no núcleo da peça ou presença de precipitados duros.

Solução: promover um forjamento do tipo de impressão (*upsetting*), ao invés de um de extrusão.

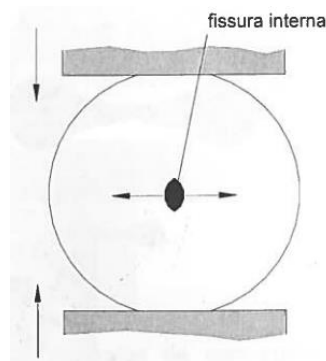


Figura 86 Fissura interna (Rodrigues e Martins 2010b)

### Fissura na rebarba

Os defeitos na rebarba não devem ser ignorados, uma vez que estes se podem propagar à peça em operações posteriores.

Causas: elevada diferença entre a espessura inicial da peça e a espessura da rebarba ou rebarba muito fina.

Soluções: aumentar a sua espessura; efetuar a remoção da aparado a quente ou realiza-lo a frio efetuando uma normalização primeiro de modo a aliviar as tensões na peça (Kalpakji 2014).

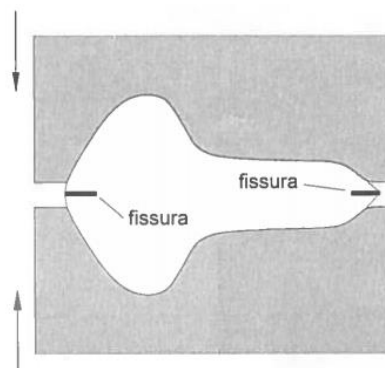


Figura 87 Fissuras na rebarba (Rodrigues e Martins 2010b).

### Sobreposições

Duas superfícies de metal dobram encostando-se uma à outra, mas sem haver soldadura de material.

Causas: raios de concordância demasiado pequenos; arrefecimento excessivo; coeficiente de atrito demasiado elevado; almas demasiado esbeltas.

Soluções: aumentar os raios de concordância da peça; aumentar a espessura da secção crítica.

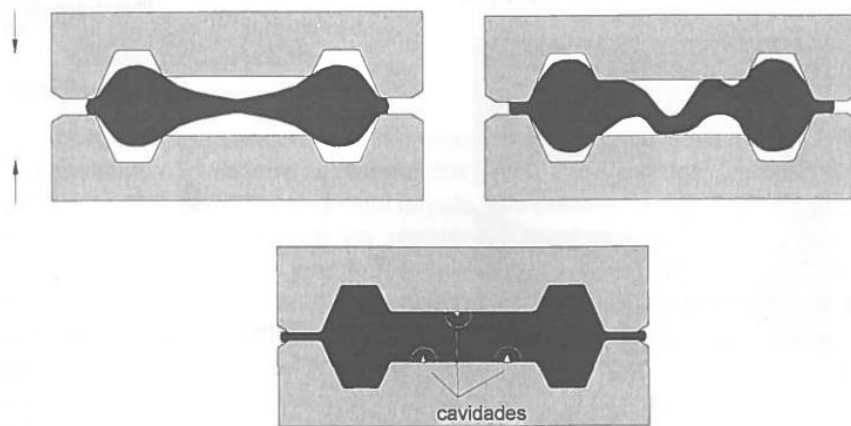


Figura 88 Defeito de sobreposição gerado por secção demasiado esbelta (Rodrigues e Martins 2010b).

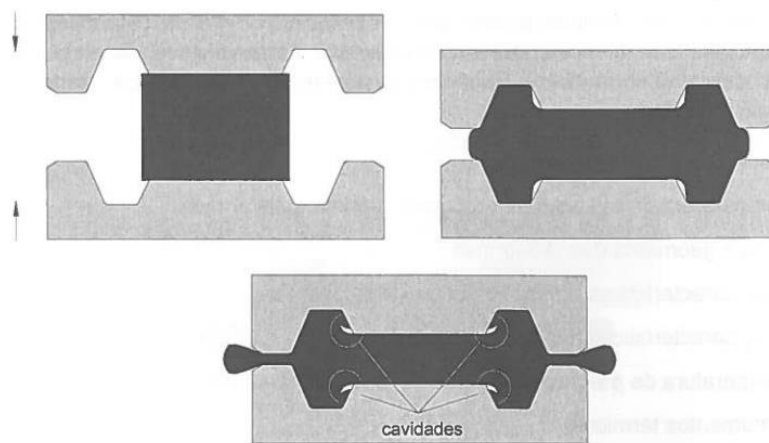


Figura 89 Defeito de sobreposição gerado por raios demasiado pequenos (Rodrigues e Martins 2010b).

### Falha de enchimento

Algumas cavidades da matriz não são completamente cheias de material.

Causas: geometria da matriz incorreta; matéria-prima escassa; temperatura de forjamento demasiado baixa.

Soluções: alterar a geometria da matriz ou acrescentar etapas de pré-forma; aumentar o volume do esboço; aumentar a temperatura de forjamento.

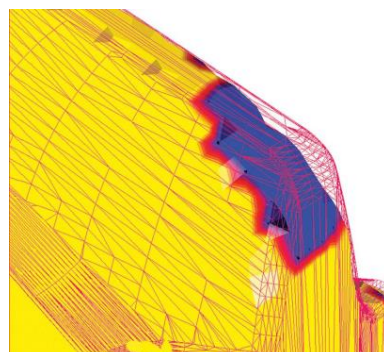


Figura 90 Falta de enchimento devido a raio de canto demasiado elevado (Massivumformung 2011).

### Desalinhamento das matrizes

Desalinhamento da peça forjada na linha de separação.

Causas: desalinhamento entre a matriz superior e a inferior.

Soluções: alinhar as matrizes corretamente recorrendo a soluções do género *PO-ka yo-KAY* (à prova de erro) como pinos ou batentes que obriguem as matrizes a alinhar no seu fecho.

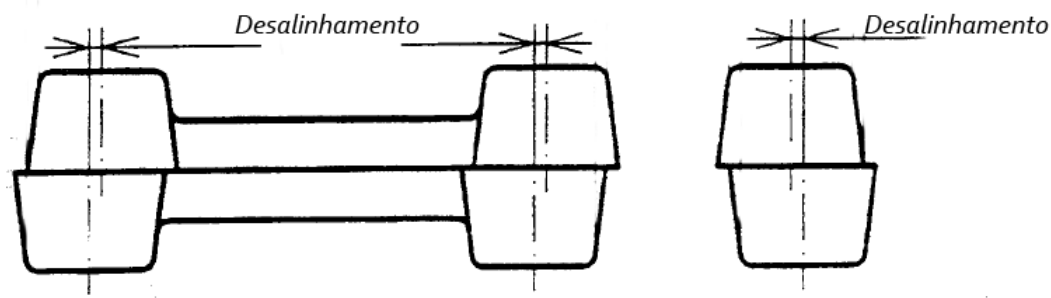


Figura 91 Defeito devido a desalinhamento das matrizes (Stahl 2000)

### Depressão (provocada pela presença de carepa)

Presença de defeitos sobre a forma de micro cavidades na superfície da peça.

Causas: limpeza incorreta do esboço; limpeza incorreta das matrizes; restos de desmoldante, lubrificante ou escória devida a oxidação superficial (calamina/óxidos de ferro) que acabam impregnados na superfície da peça;

Soluções: limpeza correta do esboço e da matriz.



Figura 92 Defeito devido à presença de carepa na superfície de uma faca forjada (JZknives 2013)

### **Escoamento do grão incorreto**

Causa: geometria incorreta da matriz que provoca o escoamento de material numa direção que não a pretendida.

Solução: alterar a geometria da matriz.

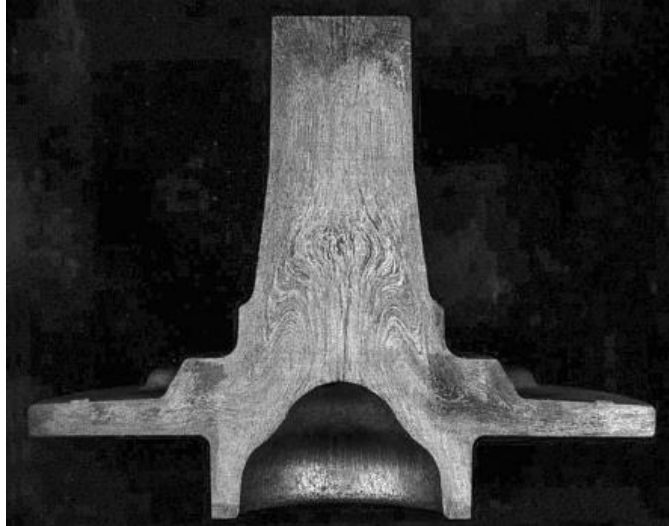


Figura 93 Defeito gerado por linhas de escoamento perpendiculares à superfície (ASM 2005).

### **Tensões residuais**

Presença de tensões residuais nas peças, que as tornam propícias a falhas mecânicas.

Causas: deformação não homogênea e incorreto arrefecimento da peça forjada (têmpera).

Soluções: arrefecimento lento da peça em ambiente controlado (forno ou sob carvão) ou tratamento térmico de distensão de tensões.

## 4 Exemplificação com o caso de estudo “Olhal duplo cruzado”

Com vista a exemplificar a utilização do manual de boas práticas elaborado no Cap. 3, será no presente capítulo estudado o processo de projeto e fabrico de uma peça forjada já validada e em produção atualmente. A peça em questão é produzida pela Skelt, e designa-se “olhal duplo cruzado” sendo um acessório de cadeias de isoladores, para linhas elétricas de Alta Tensão

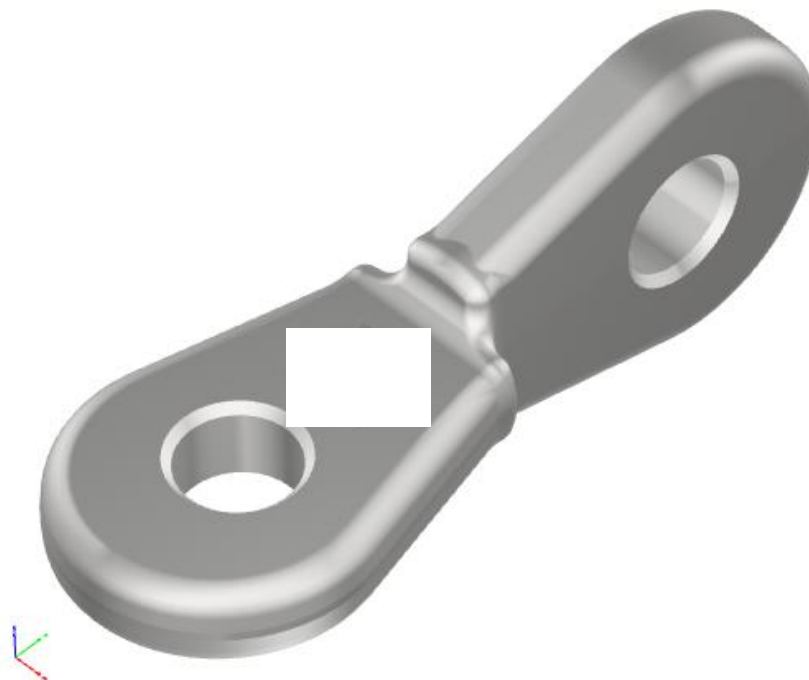


Figura 94 Olhal duplo cruzado (cortesia SKELT)

A peça é atualmente produzida por forjamento a quente, num conjunto de três etapas:

- Pré-forma 1 (encalcamento);
- Pré-forma 2 (matriz com raios e saídas aumentados);
- Forma final.

## 4.1 Pedido de projeto

Irá nesta secção fazer-se uma breve introdução às características do projeto do olhal duplo cruzado.

### Definição da finalidade da peça

Dada a finalidade da peça, o seu uso em linhas de alta tensão, é necessário ter em especial atenção zonas críticas, como a zona central em forma de garganta, a fim de garantir uma peça estruturalmente bem conseguida.

### Material

A peça será fabricada no aço de construção não ligado S355J0, utilizado em construção soldada e todo o tipo de estruturas com componentes de gruas, componentes de plataformas, equipamentos mineiros entre outros. É fornecido pela Ramada no estado natural e está disponível em perfis redondos com diâmetros entre os 20 e os 330 mm e chapa de 8 a 220 mm.

%C	0,22
$\alpha [C^{-1} \cdot 10^{-6}]$	16
E [GPa]	200
$\sigma_e$ [Mpa]	335

Recorrendo à Tabela 30, disponível no Anexo A, para um aço não ligado com 0,22% de Carbono a temperatura de forjamento máxima deverá ser de 1270°C. Para as matrizes irá usar-se aço para ferramentas de trabalho a quente H11, ligado ao Crómio e uma temperatura de trabalho de 200°C.

### Estado

A peça não tem definido o estado de fornecimento.

## 4.2 Definição da geometria

Numa primeira etapa, recorreu-se ao *software* de CAD 3D, *Solidworks*, a fim de modelar tridimensionalmente a peça, que se pode ver na Figura 95. Esta modelação partiu do desenho de definição da peça, fornecido pela Skelt. Uma vez modelada a peça, o *software* permite obter diretamente as propriedades de volume e massa da mesma, como se pode visualizar na Figura 96.

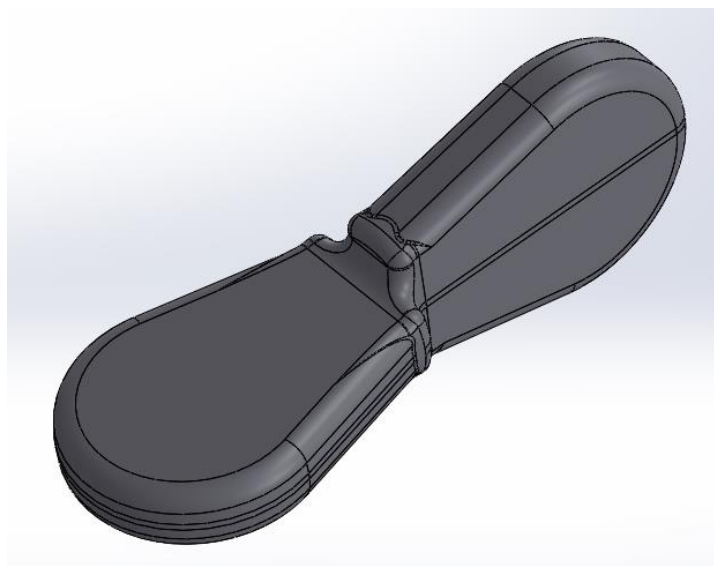


Figura 95 Modelação 3D da peça em estudo.

```
Mass = 1517.74 grams
Volume = 192118.59 cubic millimeters
Surface area = 27200.41 square millimeters
Center of mass: ( millimeters )
X = 0.00
Y = 10.00
Z = -60.00
```

Figura 96 Características de massa e volume da peça modelada.

### Plano de separação

A escolha do plano de separação desta peça revela-se bastante óbvia devido à própria geometria da peça. Escolhendo um dos planos de simetria da peça obtém-se a maior área de secção.

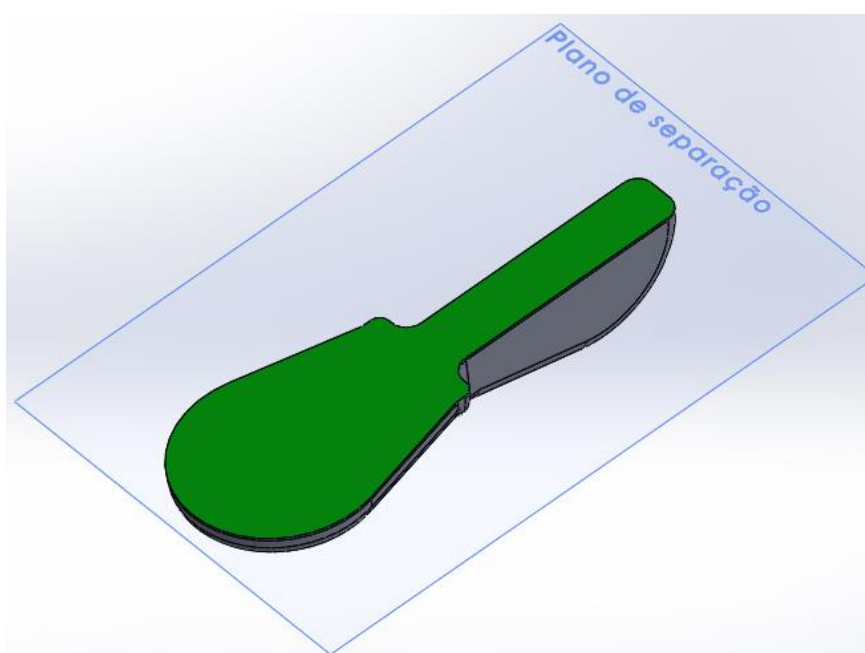


Figura 97 Plano de separação escolhido para a peça.

## Saídas

Definido o plano de separação, o próximo passo prende-se com a definição dos ângulos de saída. De notar que nesta peça, apenas existem saídas externas. Sendo a peça simétrica, não terá de se recorrer a coincidências de saída. Existem saídas naturais na peça na bolacha perpendicular ao plano de separação, que são aproveitadas com a orientação do plano de separação escolhido.

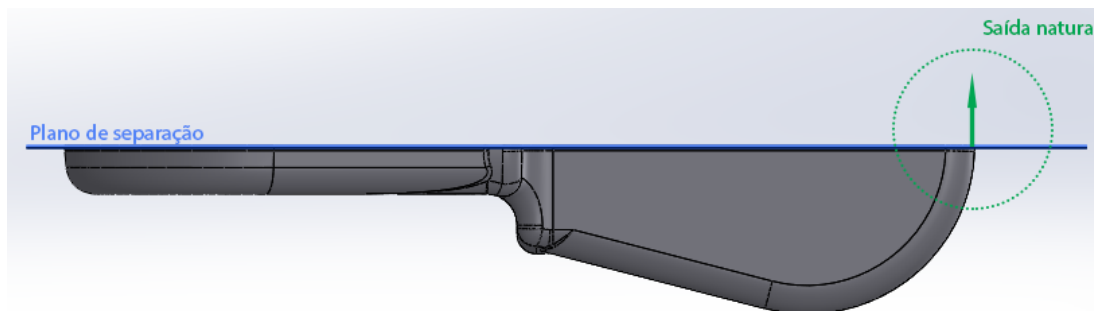


Figura 98 Presença de saída natural, do lado direito da peça devido à sua geometria arredondada

Visto ser uma peça de aço ao carbono, definem-se os limites do ângulo das saídas externas entre  $3^\circ$  e  $7^\circ$ . As faces que necessitam de saídas encontram-se representadas a azul na Figura 99. A Figura 100 mostra os ângulos de saída dados às faces referidas. De notar que na bolacha horizontal o valor escolhido foi de  $5^\circ$ , o valor médio do intervalo definido.

Como referido anteriormente, todas as regras presentes neste manual servem de apoio ao projeto de peças forjadas, não devendo ser consideradas de todo inflexíveis. Tal exemplifica-se na definição do ângulo de saída das faces da bolacha vertical. A especificação do fabricante dita que estas deverão ter um ângulo de saída de  $1^\circ$ , valor inferior ao mínimo de  $3^\circ$  aconselhado neste manual. Este valor minimiza a alteração da geometria destas faces, eliminando a necessidade de se recorrer a operações de maquinagem nestas mesmas faces.

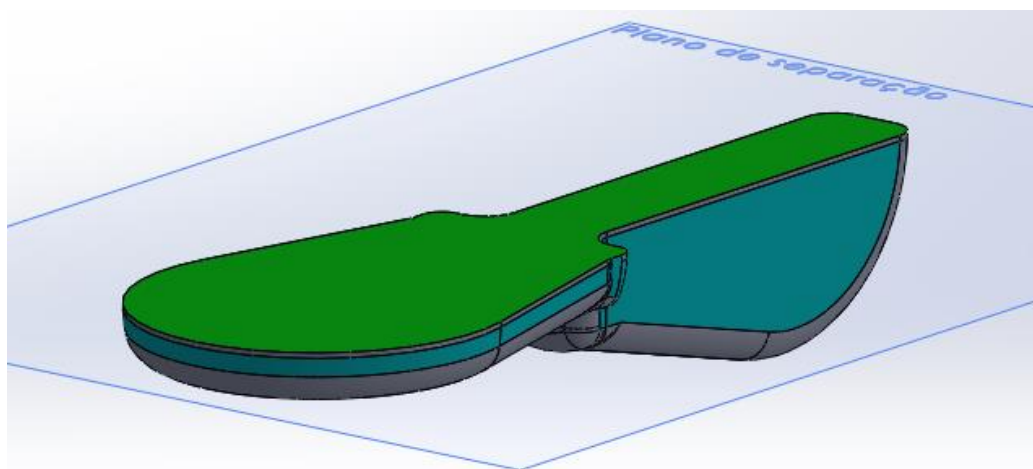


Figura 99 Faces com necessidade de ângulos de saída (a azul).



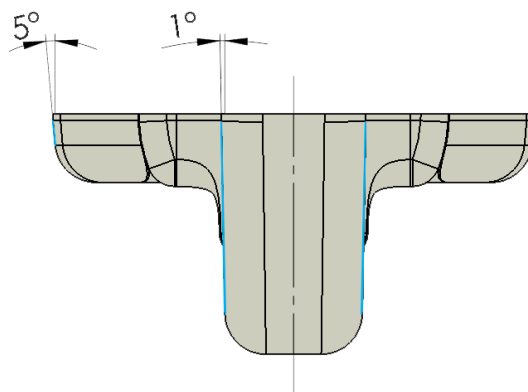


Figura 100 Ângulos de saída escolhidos.

### Raios de canto e concordância

Admitindo a forma da peça como uma nervura com 35mm de altura no lado da bolacha vertical e recorrendo à Tabela 10, define-se um raio de canto mínimo de 5mm. Recorrendo à mesma tabela, considerando a zona central da peça como sendo uma cavidade com 12,5mm de altura, define-se um valor mínimo para o raio de concordância de 5mm. Considerando a mesma zona, mas como sendo uma nervura com 12,5mm de altura, define-se o raio de canto mínimo como 1,5mm. De notar que o uso da Tabela 10 não é direto, devendo-se ter sensibilidade na aplicação às geometrias em estudo. O raio de canto da seção AA da peça é de 6 mm, o raio de concordância da zona central é de 6,5 mm e o raio de canto da mesma zona é de 4 mm, sendo todos os valores superiores aos mínimos calculados.

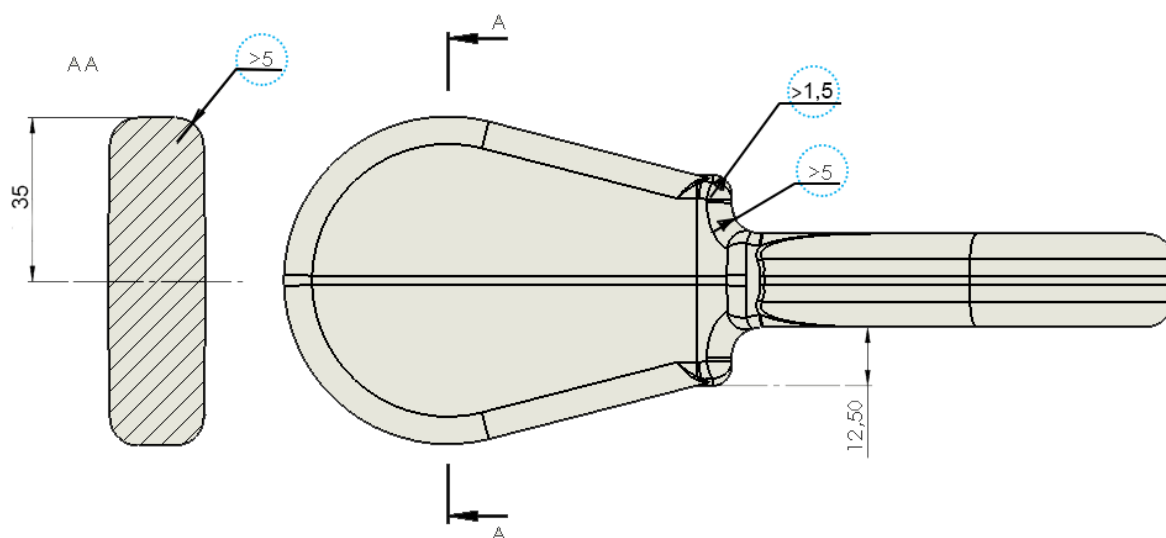


Figura 101 Raios de canto e de concordância mínimos.

### Rebarba

Recorrendo à equação de Neuberger e Mockel, definida no Cap. 3.2.4, e sabendo que a peça tem um volume de cerca de  $209,84 \text{ cm}^3$ , obtém-se uma espessura de rebarba,  $t$ , e uma largura do canal de rebarba,  $w$ , de:

$$t = 1,13 + 0,0789 \cdot 209,84^{0,5} - 0,000134 \cdot 209,84 \approx 2,2 \text{ mm}$$

$$w = 2,2 \cdot (3 + 1,2e^{-0,00857 \cdot 209,84}) \approx 7,1 \text{ mm}$$

### Sobreespessuras

São efetuadas operações de maquinagem de dois furos no olhal duplo, depois de forjado. Estas operações não necessitam, no entanto da existência de sobreespessuras para serem realizadas. Não havendo mais nenhuma exigência de maquinagem, não serão consideradas sobreespessuras na peça.

### Contrações

Como visto na fase inicial deste guia, o aço utilizado, S355J0, apresenta um coeficiente de dilatação térmica linear,  $\alpha$ , igual a  $16 [10^{-6} \cdot K^{-1}]$ . Define-se a temperatura de forjamento máxima como  $1270^{\circ}\text{C}$  com recurso à Tabela 30 do Anexo A. A fim de diminuir as perdas por oxidação, e diminuir a propensão a crescimento de grão, a temperatura de forjamento escolhida é de  $1200^{\circ}\text{C}$ . A temperatura de trabalho das matrizes define-se como sendo de  $200^{\circ}\text{C}$ , um valor baixo de forma a diminuir o tempo necessário e energia despendida no aquecimento das mesmas, mas dentro dos valores definidos no Cap. 3.4.4. Procede-se então ao cálculo do  $FC_v$  e do  $FC_l$ :

$$FC_l = (16 \cdot 10^{-6} \cdot (1200 - 200) + 1) = 1,016$$

$$FC_v = (48 \cdot 10^{-6} \cdot (1200 - 200) + 1) = 1,048$$

De notar que este valor não irá ser tomado em conta na modelação da peça, mas sim na modelação das matrizes. No caso do uso do *Solidworks*, deverá usar-se o  $FC_l$  na função *SCALE*, pois esta atua sobre todas as cotas da peça e não sobre o seu volume diretamente.

## 4.3 Definição da pré-forma do número de operações

### Definição da complexidade geométrica

Recorrendo à Figura 71, classifica-se esta peça com uma geometria de classe 3, sendo uma das dimensões principais muito maior que as outras duas. Pode-se assim inferir que existirá a necessidade de recorrer a etapas de pré-forma. Não se mostra necessário calcular o fator de complexidade geométrica,  $k$ , devido à escolha da equação para dimensionamento da rebarba.

### Definição da forma do esboço e número de operações

O material da peça, encontra-se disponível comercialmente sobre a forma de perfil redondo e de chapa. Dada a geometria da peça, e sabendo que sempre que possível se deverá preferir a utilização de esboços cilíndricos, a escolha torna-se simples. Define-se assim a forma do esboço como sendo de seção circular. Torna-se então necessário calcular as suas dimensões.

Recorre-se à equação definida no Cap. 3.2.4 para o cálculo do volume de rebarba:

$$V_R = p_{\text{médio}} \cdot 0,1234 \cdot 192,119^{0,5} = 81,5868 \text{ cm}^3$$

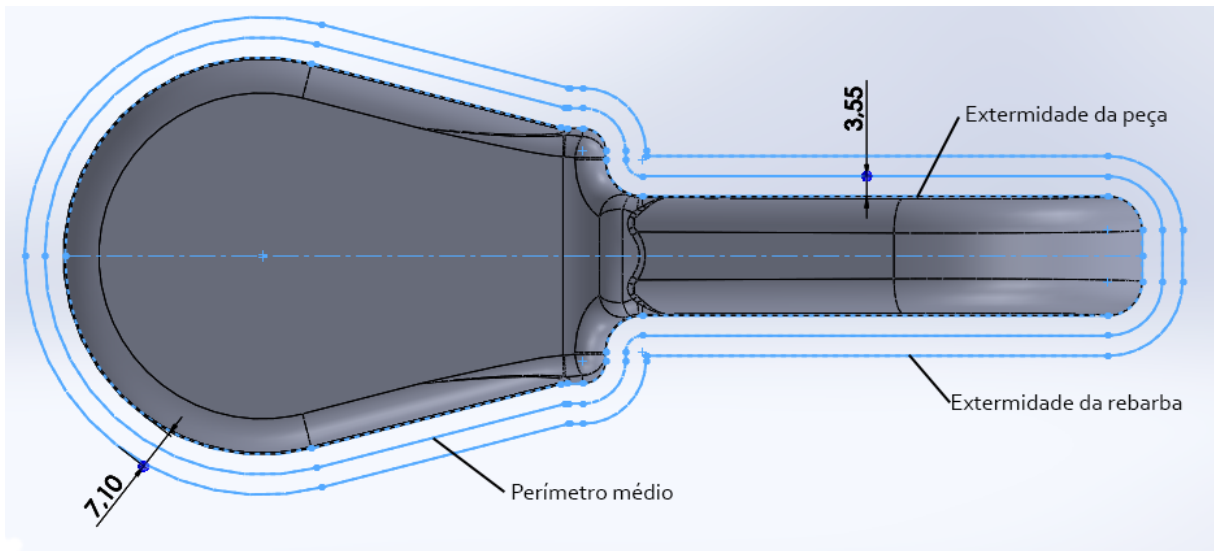


Figura 102 Representação esquemática das dimensões da rebarba.

Calcula-se o perímetro médio,  $p_{médio}$ , através do Solidworks, resultando em:

$$p_{médio} \approx 477 \text{ mm}$$

$$V_R = 81,5868 \text{ cm}^3$$

$$\rho = 7,80 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$$P_R = 7,80 \cdot 81,5868 \approx 620,06 \text{ g}$$

Aplicando-se de seguida a fórmula definida no Cap. 3.2.2:

$$V_E = (1 + P_{oxi}) \cdot (V_P + V_R)$$

$$V_E = (1 + 0,06) \cdot (192118,59 + 81586,8) = 290127,7134 \text{ mm}^3$$

$$P_E = 290,128 \cdot 7,80 = 2,263 \text{ kg}$$

Considerando um esboço circular, com o comprimento da peça, 190 mm:

$$V_E = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot 190$$

$$d = 44,09 \text{ mm}$$

Não havendo a matéria-prima com diâmetro de 44 mm, deverá usar-se de 45 mm.

### Definição das secções críticas

De acordo com a geometria da peça, devem-se destacar três zonas críticas:

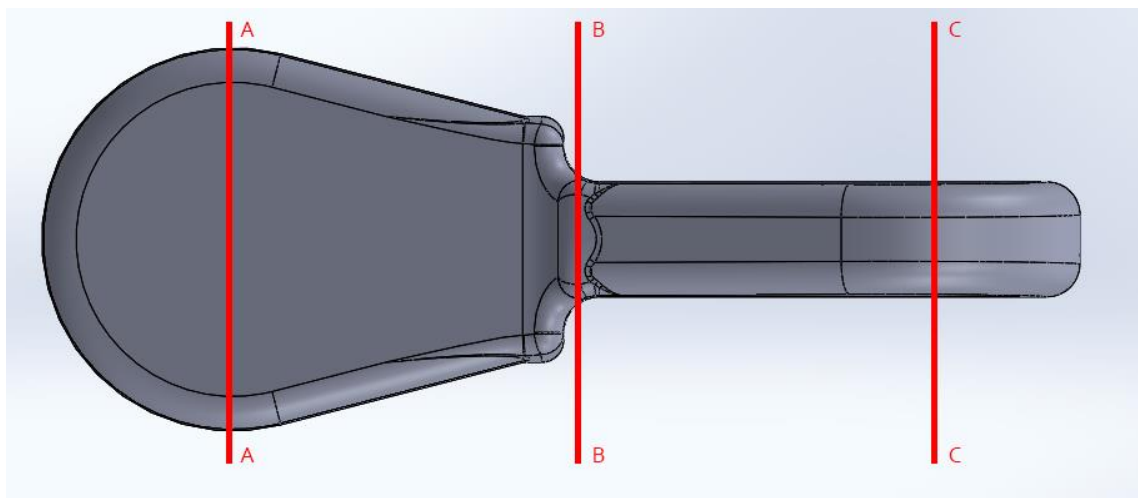


Figura 103 Zonas críticas da peça.

As secções AA e CC apresentam a maior área de secção de toda a peça, enquanto que a secção BB apresenta uma geometria bastante complexa. Estas zonas são propícias ao aparecimento de defeitos devido à grande quantidade de material necessária para preencher as secções AA e CC e a grande quantidade de deformação a que o material estará sujeito na secção BB. A secção BB é também uma zona crítica a nível estrutural, não devendo diminuir-se a sua secção sob o risco de se diminuírem as características estruturais da peça.

### Definição da geometria da pré-forma teórica

Irá proceder-se nesta secção à definição da geometria da pré-forma teórica, principiando por exemplificar o Método de Drabing:

1. Desenhar a peça com as cotas associadas no plano de separação e no plano perpendicular a este;
2. Estimar as dimensões da rebarba e inclui-la no desenho anterior;
3. Traçar o eixo central da peça no plano de separação;
4. Traçar planos perpendiculares ao plano de separação e eixo central da peça, pelo menos nas secções críticas da peça (a um maior número de planos corresponderam melhores resultados);

Já estando a rebarba definida, a etapa 2 passa por modelar no ficheiro CAD a mesma, com as dimensões de 2,2mm por 7,1mm. Para a 4ª etapa, definiu-se o plano médio da peça (plano crítico BB), sendo depois traçados planos paralelos de 10 em 10 mm. Deste modo garante-se que estes planos irão incluir os planos críticos definidos AA e CC, sendo estes simétricos em relação a BB com uma distância de 60mm ao mesmo. Garantem-se também bons resultados, com a inclusão de um número relativamente elevado de planos. De notar que os planos 1 e 21 não estão a 10mm do plano 2 e 20, respetivamente, mas sim 5mm de forma a garantir o comprimento da peça de 190mm.

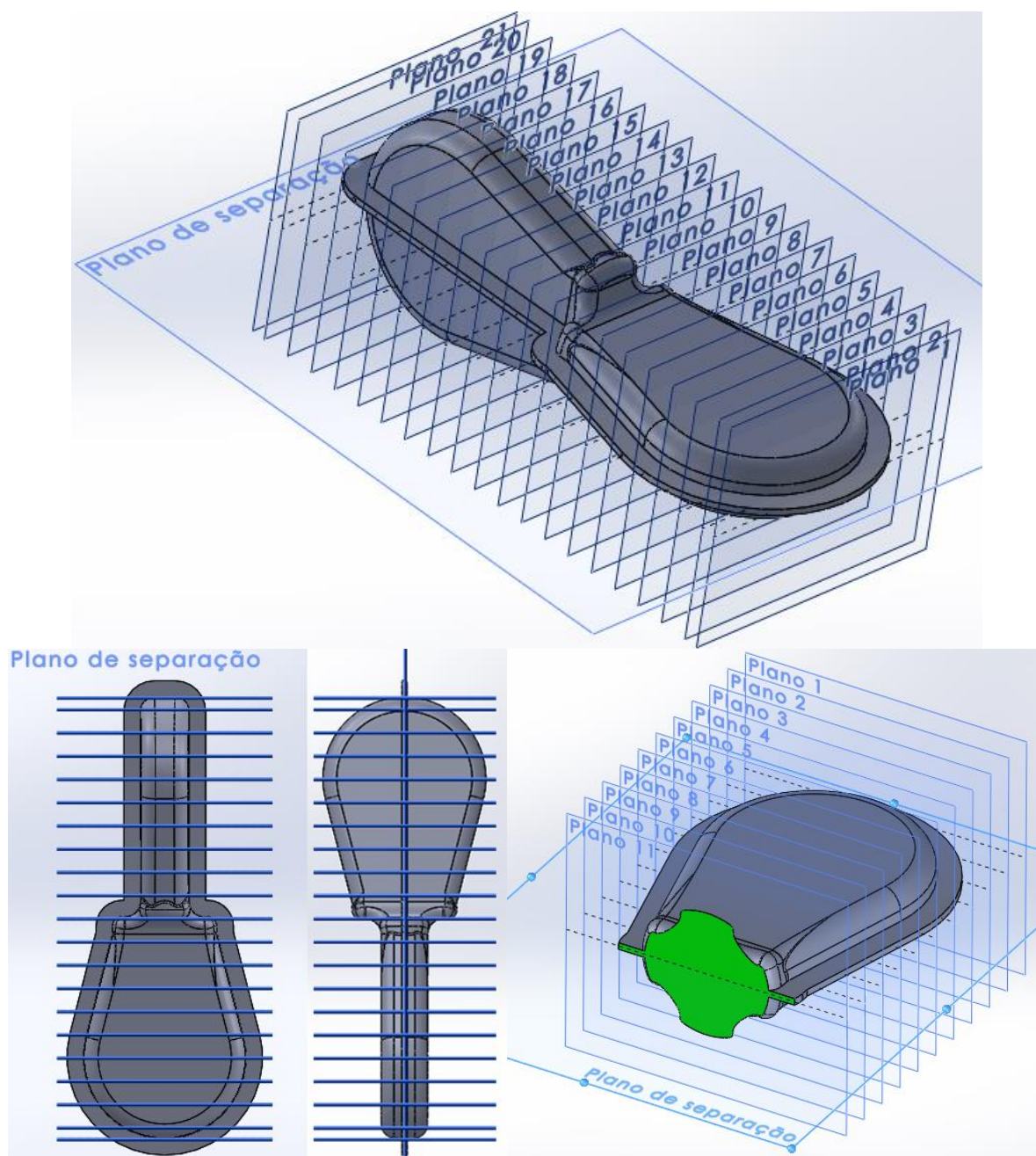


Figura 104 Representação dos planos gerados (em cima e em baixo à esquerda) e exemplo da área de secção obtida por interseção do plano 11 com a peça (em baixo à direita).

5. Calcular a área de secção correspondente à interseção dos planos criados no passo anterior com a peça;

A obtenção das áreas de secção em cada plano torna-se fácil com o auxílio de programas de CAD 3D, torna-se por isso claro que num estudo sem o auxílio dos mesmos, o número de planos deverá ser reduzido. Na Tabela 25 mostram-se os resultados obtidos para as áreas de secção de cada plano, bem como as dimensões de referência para um esboço redondo, obtidas recorrendo à fórmula definida na Tabela 19. De notar que os valores dos planos 1 e 21 não deverão ser considerados como valores de área de secção mínima pois apenas têm em conta a área da rebarba.

Tabela 25 Áreas de secção para os diferentes planos definidos e respectivas dimensões de referência.

<b>Plano</b>	<b>Cota [mm]</b>	<b>Área de secção [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Dim. Ref. [mm]</b>	
1	0	102,95	5,72	Apenas rebarba
2	5	679,38	14,717	
3	15	1136,61	19,02	
4	25	1332,82	20,60	
5	35	1391,93	21,05	CC
6	45	1334,33	20,61	
7	55	1231,39	19,80	
8	65	1128,45	18,95	
9	75	1025,69	18,07	
10	85	925,16	17,166	Área de secção mínima
11	95	1181,09	19,39	BB
12	105	960,74	17,49	
13	115	1064,54	18,41	
14	125	1167,94	19,28	
15	135	1270,87	20,11	
16	145	1373,35	20,91	
17	155	1431,17	21,34	AA
18	165	1371,78	20,90	
19	175	1173,42	19,361	
20	185	706,85	15	
21	190	71,04	4,76	Apenas rebarba

6. Criar um gráfico com os valores das áreas de secção
7. A partir dos valores das áreas de secção e com a forma geométrica do esboço definida, calcular o gráfico da pré-forma, com auxílio da Tabela 19.

Sendo que a tabela referida na etapa 7 já foi criada, deverá proceder-se à criação dos gráficos da área de secção da peça ao longo do seu eixo, e da pré-forma.

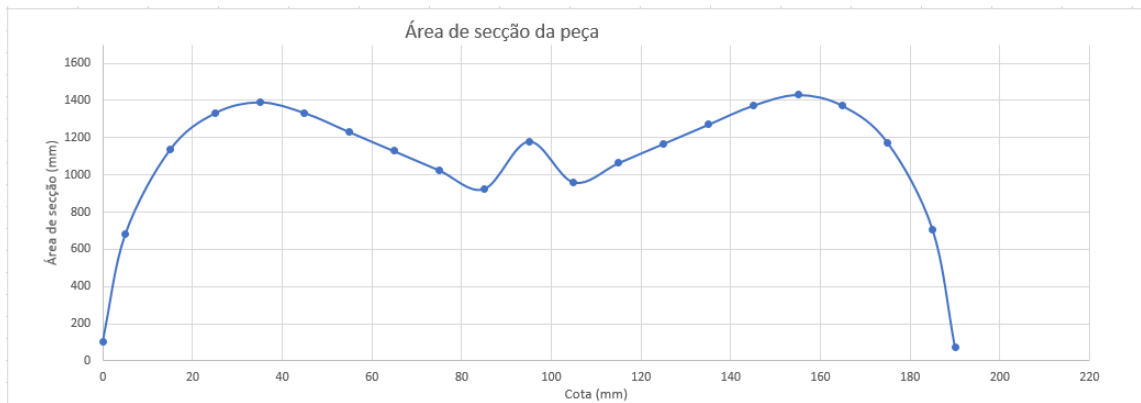


Figura 105 Gráfico das áreas de seção ao longo da peça.

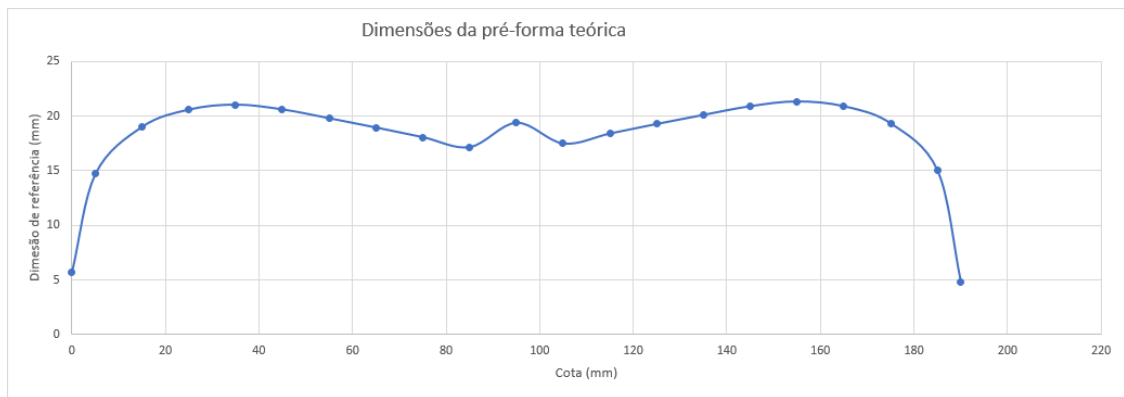


Figura 106 Gráfico obtido com as dimensões de referência para um esboço circular.

8. Com o gráfico de pré-forma, obter a geometria da pré-forma.

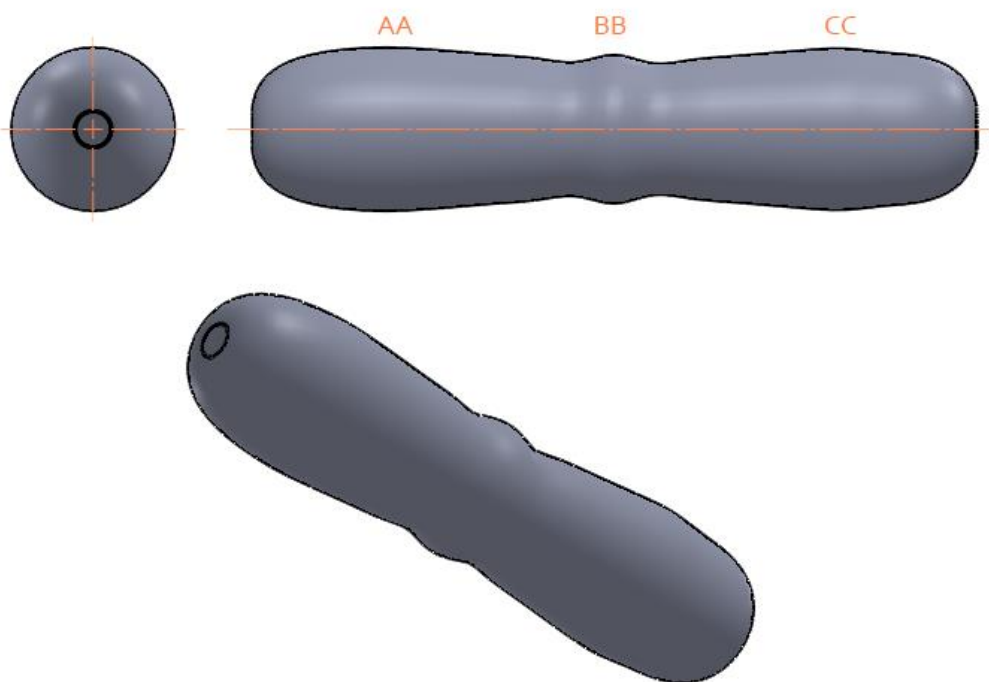


Figura 107 Pré-forma teórica obtida pela aplicação do método de Drabing.



### Adaptação ao processo da empresa

De modo a vencer a grande diferença de alturas entre os lados da peça, garantindo o preenchimento da cavidade mais profunda, parece adequado o encalcamento de metade do esboço, aumentando a sua área de seção e diminuindo a sua espessura. Seguido do encalcamento, a pré-forma seria colocada na matriz com a sua parte achatada ao alto, facilitando o preenchimento da cavidade mais profunda. Outra vantagem deste encalcamento é o aumento do comprimento do esboço, sendo assim necessário um esboço mais curto.

### 4.4 Metodologia de previsão de forças e escoamento de material

Como visto na secção anterior, o esboço deverá ser submetido a, no mínimo, uma etapa de pré-forma de modo a se conseguir um bom forjamento. Nesta secção serão estudadas as forças necessárias para a etapa de pré-forma de encalcamento, bem como a necessidade de se adicionarem mais etapas ao processo. Para tal serão usados os métodos analíticos de predição de força de forjamento, a simulação física com recurso a plasticina para estudar o preenchimento da matriz e escoamento de material e ainda a simulação computacional. A simulação computacional será efetuada com recurso ao *software Deform*, comparando-se os resultados obtidos pelos outros métodos com os obtidos pelo estudo por elementos finitos.

### Modelação física

Para a modelação física do processo, foi utilizado o processo de compressão de plasticina. Para tal, foram materializadas ferramentas à escala real, para a etapa de pré-forma e para a etapa final. Para a etapa de pré-forma, e devido à sua geometria plana, foram desenvolvidas matrizes utilizando madeira com revestimento de fita de alumínio. Para a etapa final, a partir da peça modelada no decorrer do manual, desenvolveram-se as matrizes em CAD. Estas foram então fabricadas recorrendo ao processo de estereolitografia. A fim de se poupar material, estas foram impressas sob a forma de casca, recorrendo-se a nervuras internas para aumentar a resistência das mesmas. As cavidades foram depois preenchidas com uma resina epoxídica. Nestas ferramentas foram ainda definidos sistemas de guiamento para garantir um correto alinhamento entre as ferramentas superiores e inferiores.

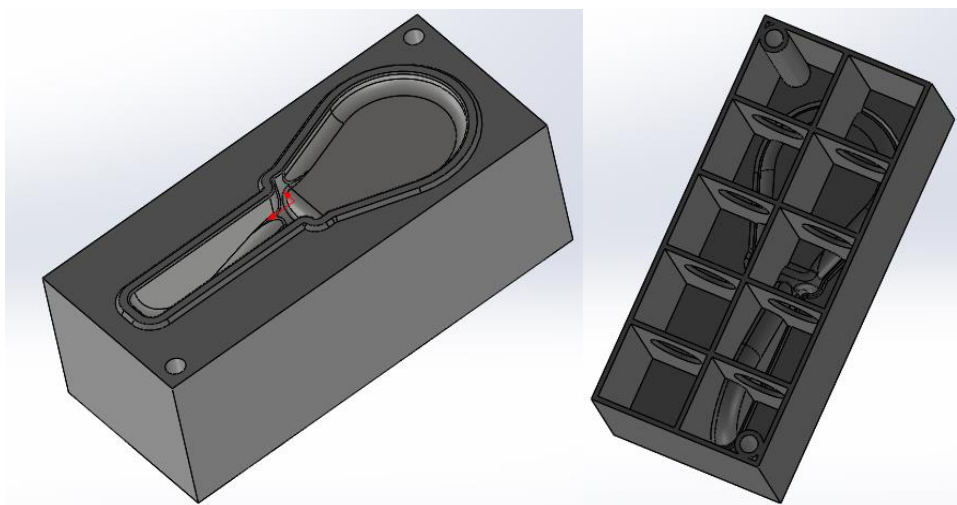


Figura 108 Modelação da matriz final de forjamento.



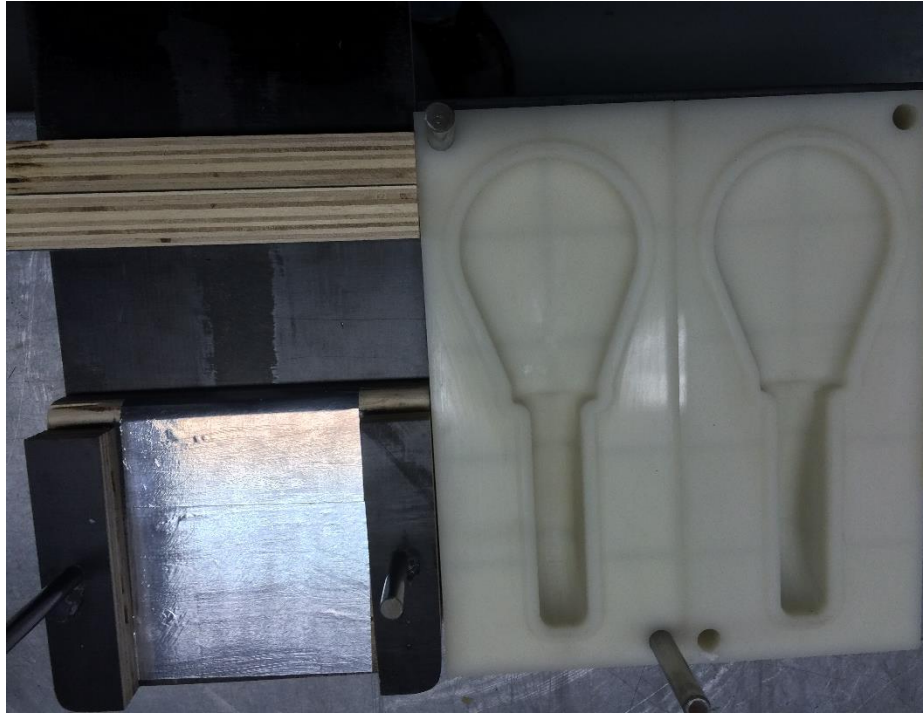


Figura 109 Matriz de pré-forma (à esquerda) e matriz final (à direita) fabricadas.

Após alguma experimentação com o encalcamento livre da plasticina verificou-se que o aumento do comprimento do esboço permite valores de comprimento iniciais inferiores ao comprimento total da peça. Definiu-se assim um esboço de diâmetro 45mm e comprimento de 160mm, com encalcamento em metade do esboço, 80mm. Procedeu-se então ao estudo da espessura de encalcamento. Sendo a espessura da bolacha vertical de 20mm, estudaram-se encalcamentos as 16,5mm, 18,5mm e 20mm.

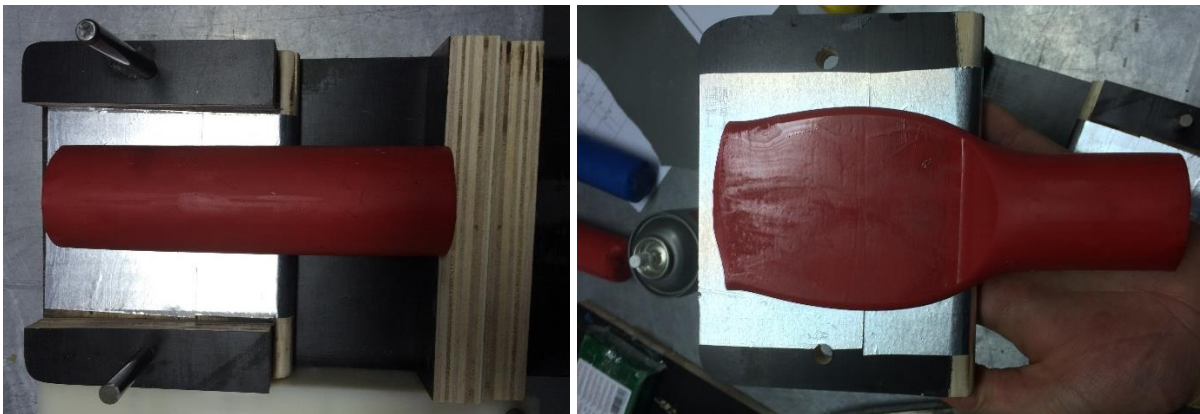




Figura 110 Simulação do encalcamento (em cima) e da matriz fechada (em baixo).

### Encalcamento a ~16,5mm

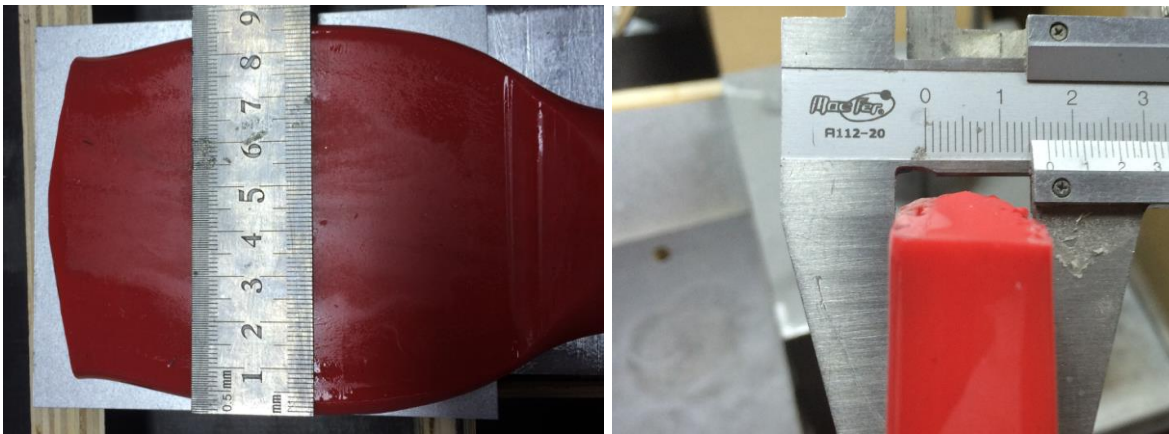


Figura 111 Largura obtida no encalcamento a 16,5mm.



Figura 112 Comprimento obtido no encalcamento a 16,5mm.



Figura 113 Defeito de falta de enchimento e deflexão da geometria.

Para o encaimento a 16,5mm obteve-se uma largura da parte encaçada de cerca de 85mm e um comprimento de 95mm. Pode-se verificar na Figura 113 que com um encaimento a aproximadamente 16,5mm, a bolacha torna-se demasiado fina, não preenchendo a cavidade vertical na totalidade, observando-se ainda deflexão a meio da mesma.

### Encaimento a ~18,5mm

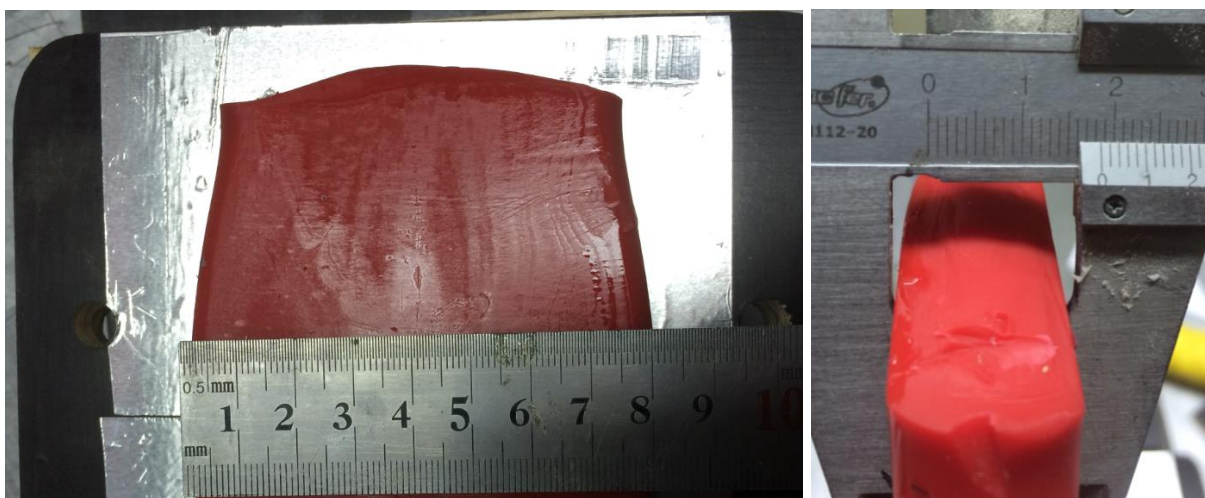


Figura 114 Largura obtida no encaimento a 18,5mm.



Figura 115 Comprimento obtido no encaimento a 18,5mm.





Figura 116 Defeito de falta de enchimento no encaimento a 18,5mm.

No encaimento a 18,5mm obteve-se uma largura da parte encaçada de 80mm e um comprimento de 95mm. Verifica-se ainda um defeito de falta de enchimento na bolacha vertical. Como se pode ver na Figura 116 as zonas sem brilho indicam que não houve contacto da plasticina com o desmoldante da matriz.

### Encalcamento a ~20mm



Figura 117 Largura obtida para um encalcamento a 20mm.



Figura 118 Comprimento total da peça com encalcamento a 20mm.



Figura 119 Defeito de falta de enchimento no encalcamento a 20mm.

No encalcamento a 20mm obteve-se uma largura de 80mm e um comprimento de 90mm para a parte encalcada. Observou-se ainda que a pré-forma não entrou em contacto com a matriz na parte superior e inferior da matriz, na zona crítica AA. Pode-se constatar este defeito na Figura 119.

Tendo em conta os resultados obtidos com estes modelos, foi possível estudar e as dimensões mínimas da matéria-prima a adotar no fabrico do componente em estudo (diâmetro e comprimento dos billets), avaliar as geometrias das ferramentas projetadas para as etapas de pré-forma e forma final e prever a evolução do comportamento do material e da rebarba gerada, bem como a existência de defeitos ao nível das peças forjadas como a falta de enchimento das cavidades. Torna-se assim evidente que não será necessário um esboço com o comprimento total da peça, e que apenas o encalcamento não parece suficiente para se obter uma peça final sem defeitos. Como tal, deverá criar-se mais uma etapa de pré-forma, com a geometria da peça final um pouco alterada.

### Métodos analíticos

Nesta secção irá estudar-se a força necessária à etapa de pré-forma de encalcamento através do método da fatia elementar. Será ainda feita uma previsão grosseira da pressão de forjamento para a etapa final, baseada na Figura 84.

Uma vez definida a geometria da pré-forma no final do encalcamento, é possível prever a força necessária para a realização do mesmo. Utilizando o método da fatia elementar:

$$F = p_{média} \cdot A_c$$

$$A_c = L \cdot w$$

$$p_{média} = 2k \cdot \left(1 + \frac{\mu \cdot L}{2h}\right)$$

Para o aço S335J0, considerando o deslizamento entre duas peças em aço com lubrificação, pode considerar-se um coeficiente de atrito cinético,  $\mu$ , de cerca de 0,12 (Edge 2016a):

$$\sigma_e = 335 \text{ [MPa]}$$

$$k = \frac{335}{2} = 167,5 \text{ [MPa]}$$

$$F = 2 \cdot 167,5 \cdot \left(1 + \frac{0,12 \cdot L}{2 \cdot h}\right)$$

Com:

$$h = \text{espessura da parte encalcada}$$

$$L = \text{comprimento da parte encalcada}$$

$h$ [mm]	$W$ [mm]	$L$ [mm]	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$p_{média}$ [MPa]	$F$ [kN]	$F$ [tonf]
16,5	85	95	8075	450,73	3639,62	371,14
18,5	80	95	7600	438,22	3330,44	339,61
20	80	90	7200	425,45	3063,24	312,36

Visto a peça ser simétrica segundo o seu plano de separação, pode-se utilizar a Figura 84 do Cap. 3.4.2 para efetuar uma estimativa da força necessária ao forjamento da etapa final. De notar que como se utiliza a altura média de apenas metade da peça, os valores obtidos para a força deverão ser multiplicados por 2 para se obterem os valores reais da peça. Assim sendo, utilizam-se os seguintes dados para inserção no gráfico:

- A altura média da peça,  $H_a$ , representada na Figura 120 como a média da altura máxima e mínima da peça medida a partir do plano de separação;
- A área projetada da peça no seu plano de separação igual a 7244,61 [mm<sup>2</sup>].

Obtém-se deste modo, os intervalos de valores de pressão e força de forjamento apresentados na Tabela 26, que multiplicados por 2 resultam em valores de pressão entre 382,3 e 686,5 [MPa] e valores de força entre 580 e 869 [tonf].

Tabela 26 Valores de pressão e forjamento obtidos para meia peça.

Unidade de medida	Intervalo de valores
[kgf/mm <sup>2</sup> ]	40-60
[Mpa]	382,27-686,48
[tonf]	289,98-434,68

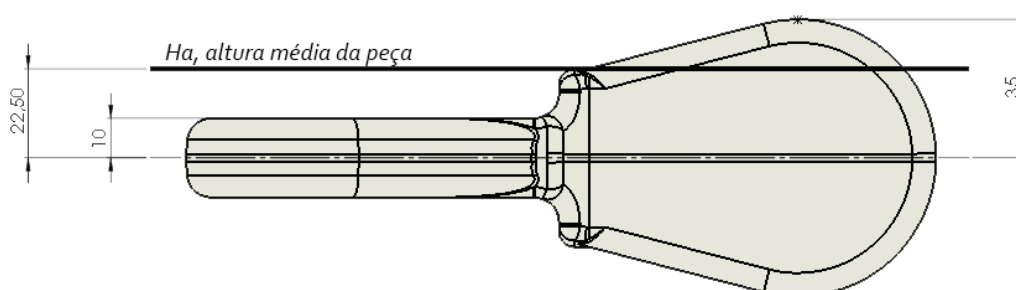


Figura 120 Altura média da peça.

## Simulação computacional

Para a simulação computacional do processo foi utilizado o software DEFORM V11.1, da STFC. Este software recorre ao método dos elementos finitos para caracterizar processos de conformação plástica. Este software permite a criação de estudos sequenciais, “Multi Operations”, que permitem simular uma etapa e importar a geometria e todas as características obtidas para etapas seguintes. Deste modo, consegue-se simular uma operação de forjamento com etapas de pré-forma com relativa facilidade. A interface deste software pode ser vista na Figura 121.

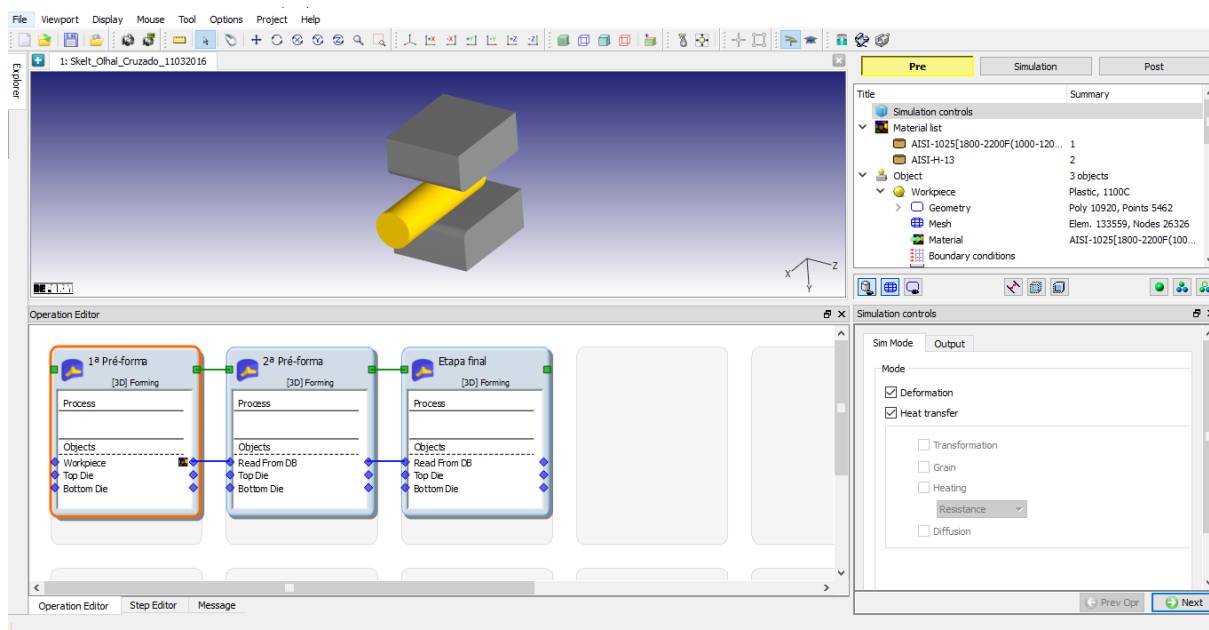


Figura 121 Interface Deform.

A simulação foi efetuada em três etapas:

- 1ª Pré-forma (encalcamento);
- 2ª Pré-forma;
- Fase de acabamento.

Para a **primeira etapa** foram modeladas duas matrizes planas e um esboço de 45mm de diâmetro e 160mm de comprimento. Não existindo o aço S355J0 na base de dados disponível no software, escolheu-se o seu equivalente em percentagem de carbono, o AISI 1025 na gama de temperaturas de 1000°C a 1200°C, para o estudo em questão. Para a definição da temperatura do material na simulação, é importante considerar que a peça sofre perdas de calor por convecção e radiação com o ambiente e por condução com as matrizes. No entanto, o processo de deformação do material dissipa energia sob a forma de calor. Uma vez que se não se malharam as matrizes, de modo a ter tempos de simulação mais curtos, as perdas por condução térmica não são completamente consideradas, como tal, estabelece-se a temperatura do esboço como sendo de 1100°C, um pouco a baixo da temperatura recomendada anteriormente. A temperatura das matrizes é definida em 200°C. A fim de reduzir o tempo de computação, as



matrizes foram consideradas como sólidos rígidos. A velocidade da matriz, foi definida em 800mm/s.

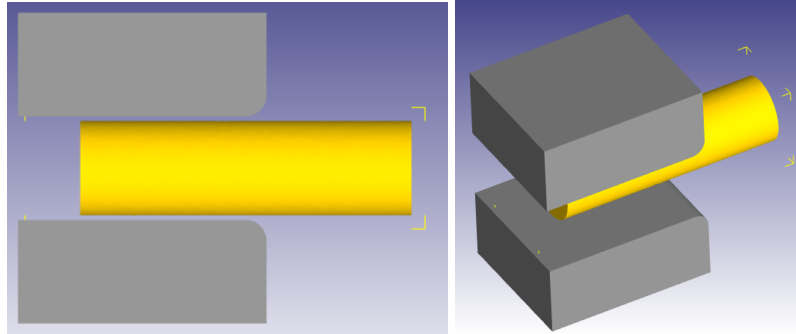


Figura 122 Matrizes e esboço modelados.

Como se verifica na Figura 124, simulando a operação de encalcamento de 18,5mm a meio do esboço (80mm), obtiveram-se resultados similares aos obtidos pela simulação em plasticina. Estes resultados fortificam a importância que este tipo de simulações físicas apresenta em qualquer projeto de forjamento.

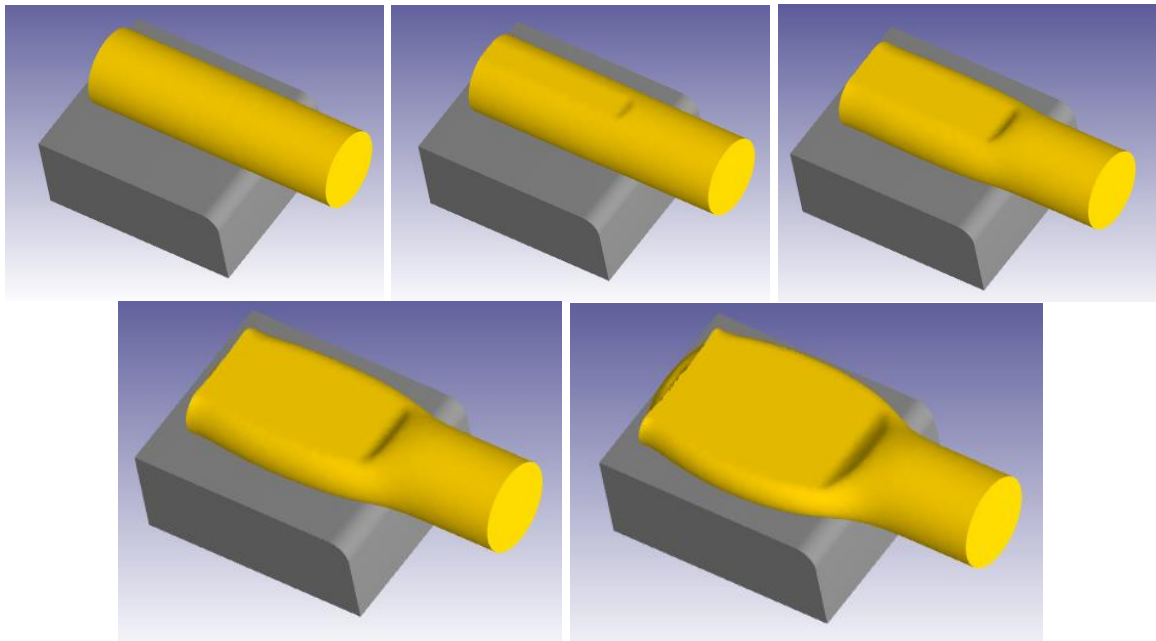


Figura 123 Processo de simulação do encalcamento (matriz superior oculta para melhor visualização).

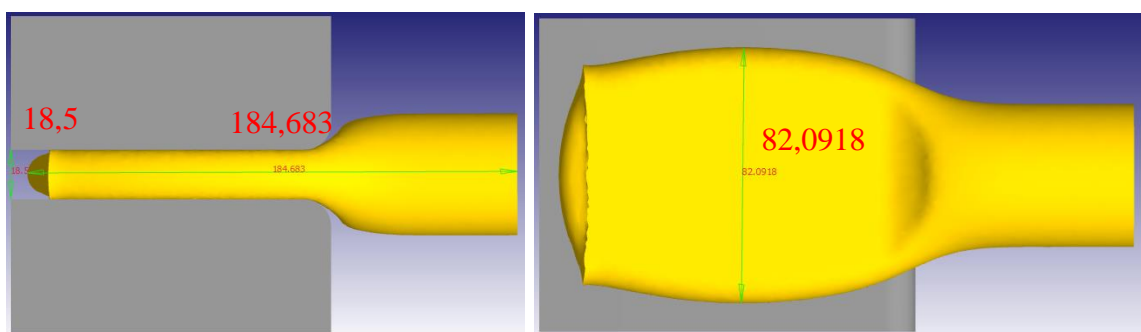


Figura 124 Dimensões da zona encalcada a 18,5mm.

Com os resultados da simulação em plasticina para as etapas seguintes, torna-se evidente a dificuldade da bolacha vertical em preencher totalmente as cavidades. Torna-se assim necessária uma etapa de pré-forma adicional. Para a modelação da matriz de pré-forma desta **segunda etapa**, definiu-se que a cavidade vertical, deverá ser mais profunda e mais fina que a forma final, de acordo com as regras gerais de geometrias de pré-forma. Desta forma será mais fácil a acumulação de material naquela zona, sendo este, na etapa final deformado por compressão e não extrusão. O facto de esta geometria ser mais fina do que a final prende-se também com a fácil extração da peça da matriz de pré-forma, e inserção na matriz final. Quanto aos raios de canto e de concordância, as regras gerais ditam que os raios deverão ser maiores na pré-forma que na matriz final. Uma vez que o problema evidenciado na simulação em plasticina foi a falta de enchimento, e não qualquer tipo de defeito de sobreposição, irá seguir-se um caminho diferente, e diminuir o raio de canto exterior da peça de 6mm para 4mm na pré-forma. Esta diminuição, em conjunto com a maior altura da cavidade e menor espessura da bolacha tencionam uma maior acumulação de material na zona crítica, que depois será conformado para as dimensões pretendidas na etapa final. A espessura da bolacha horizontal foi também aumentada, de 20mm para 21mm, a fim de garantir que esta é completamente compactada na etapa final. Estas alterações podem ser visualizadas na Figura 125 Cotas alteradas na geometria de pré-forma.

Na Figura 126 pode-se ver a sobreposição das geometrias internas das matrizes de pré-forma e da fase final, evidenciando a menor espessura e maior altura da pré-forma (a vermelho) na zona crítica e maior espessura na bolacha horizontal. Na Figura 127 podem ver-se alguns dos detalhes da diferença das duas geometrias.

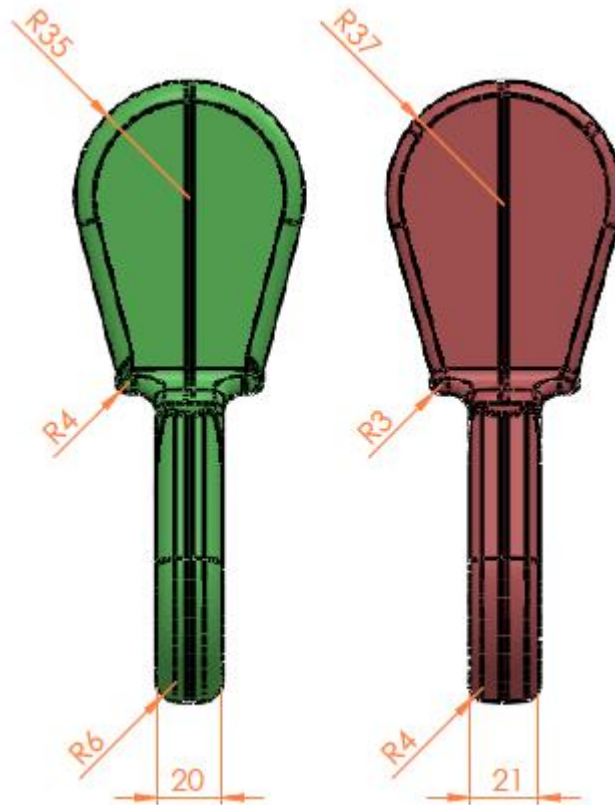


Figura 125 Cotas alteradas na geometria de pré-forma.

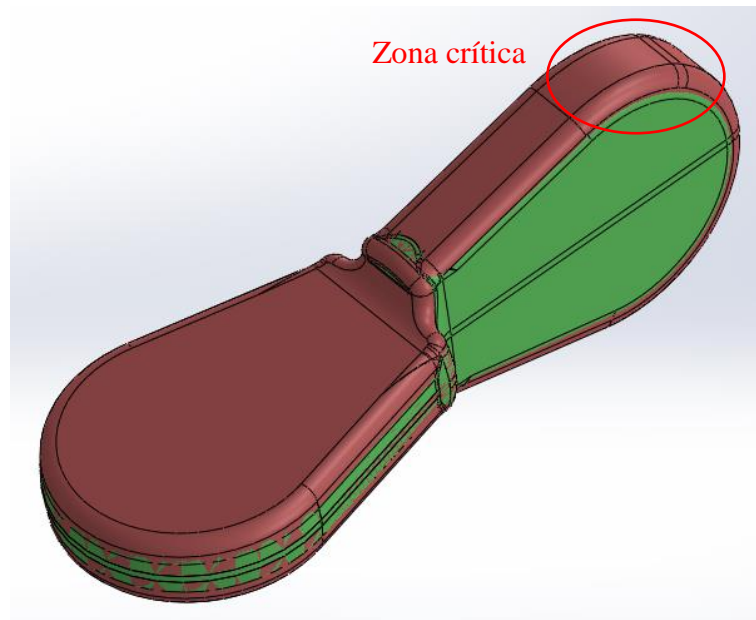


Figura 126 Sobreposição da forma do esboço (vermelho) e da forma final (verde).

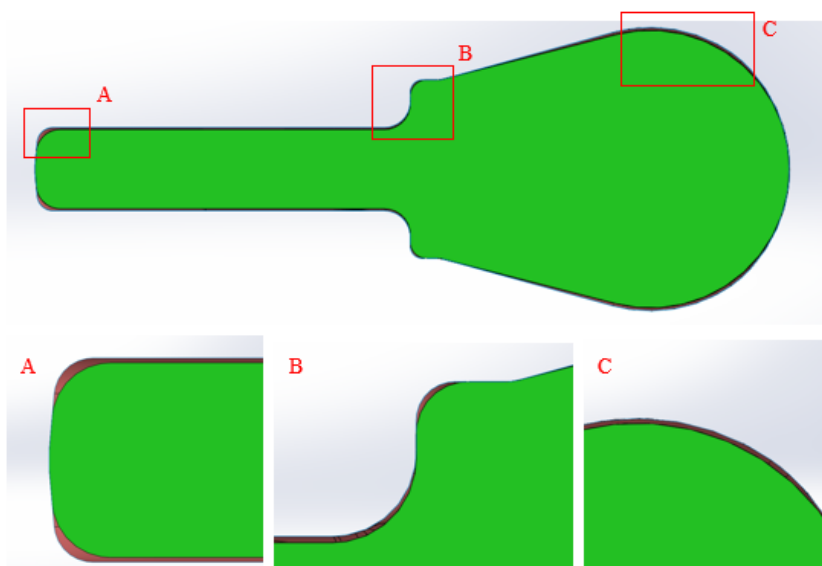


Figura 127 Detalhes da diferença geométrica entre a pré-forma e a forma final no plano perpendicular ao plano de separação da peça.

Foram então modeladas as matrizes de pré-forma e matriz final, e simulado o processo na sua totalidade. A posição com que a primeira pré-forma é inserida na matriz da segunda pré-forma é mostrada na Figura 128.

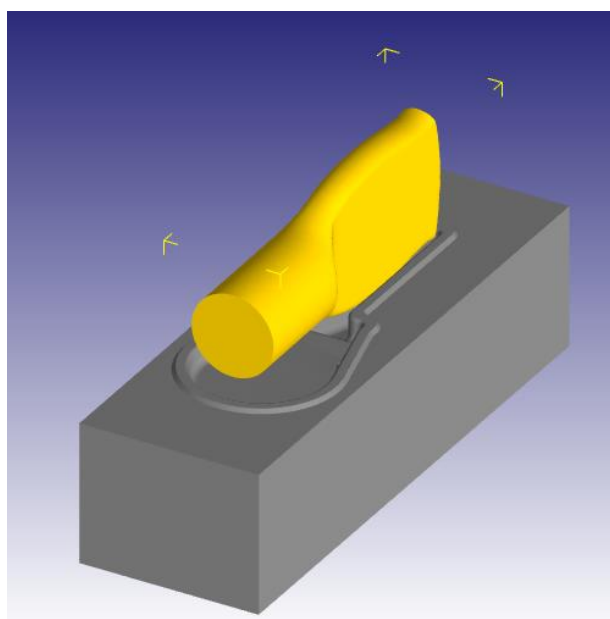


Figura 128 Posicionamento da pré-forma na segunda matriz de pré-forma.

Pode-se visualizar, na Figura 129, o contacto entre a pré-forma e a matriz, representado por pontos verdes. Como se pode ver, com a adição de mais uma etapa de pré-forma consegue-se o preenchimento total da cavidade na zona crítica ainda na etapa de pré-forma, sendo apenas necessário definir a geometria final na matriz final. Este detalhe pode ser visualizado na Figura 130.

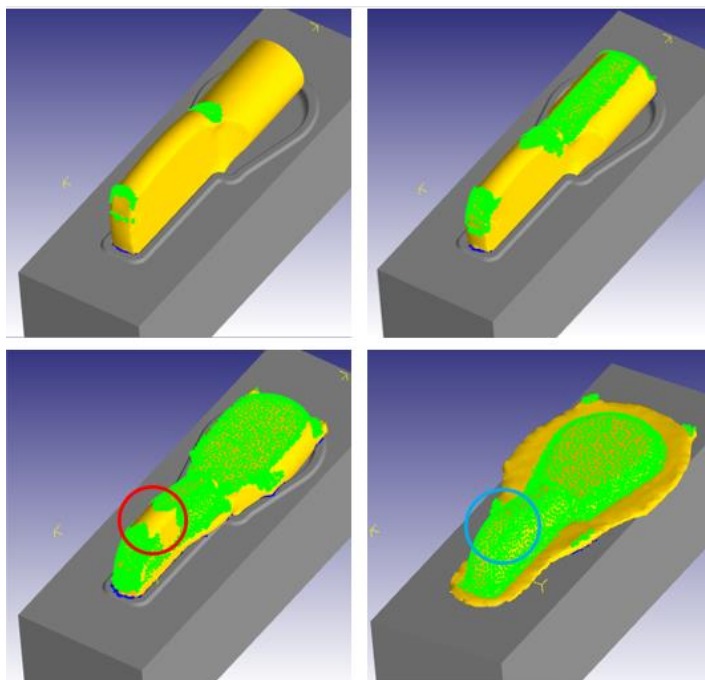


Figura 129 Fases da segunda etapa de pré-forma.

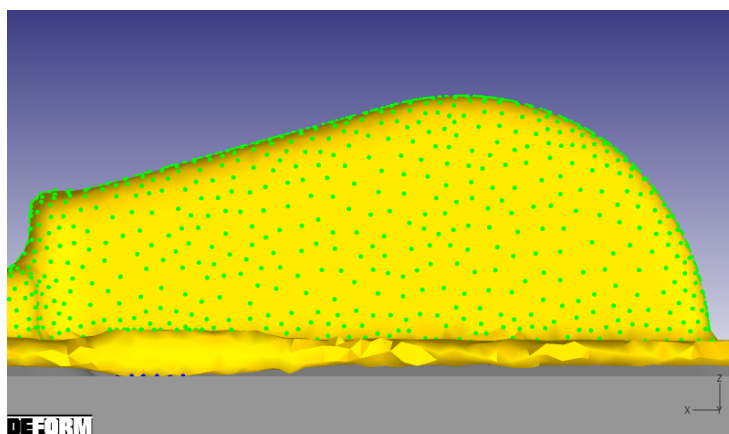


Figura 130 Preenchimento completo da zona crítica.

Uma vez garantido o preenchimento de material, a forma final da peça é conseguida pela etapa final de forjamento. Esta pode ser observada na Figura 131 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** Na fase C observa-se claramente a conformação do raio de canto externo da peça, que havia sido definido em 4mm na etapa de pré-forma, para 6mm na peça final. Na etapa D começa a conformação das bolachas vertical e horizontal para as dimensões finais. Na etapa E e F observa-se o crescimento da rebarba.

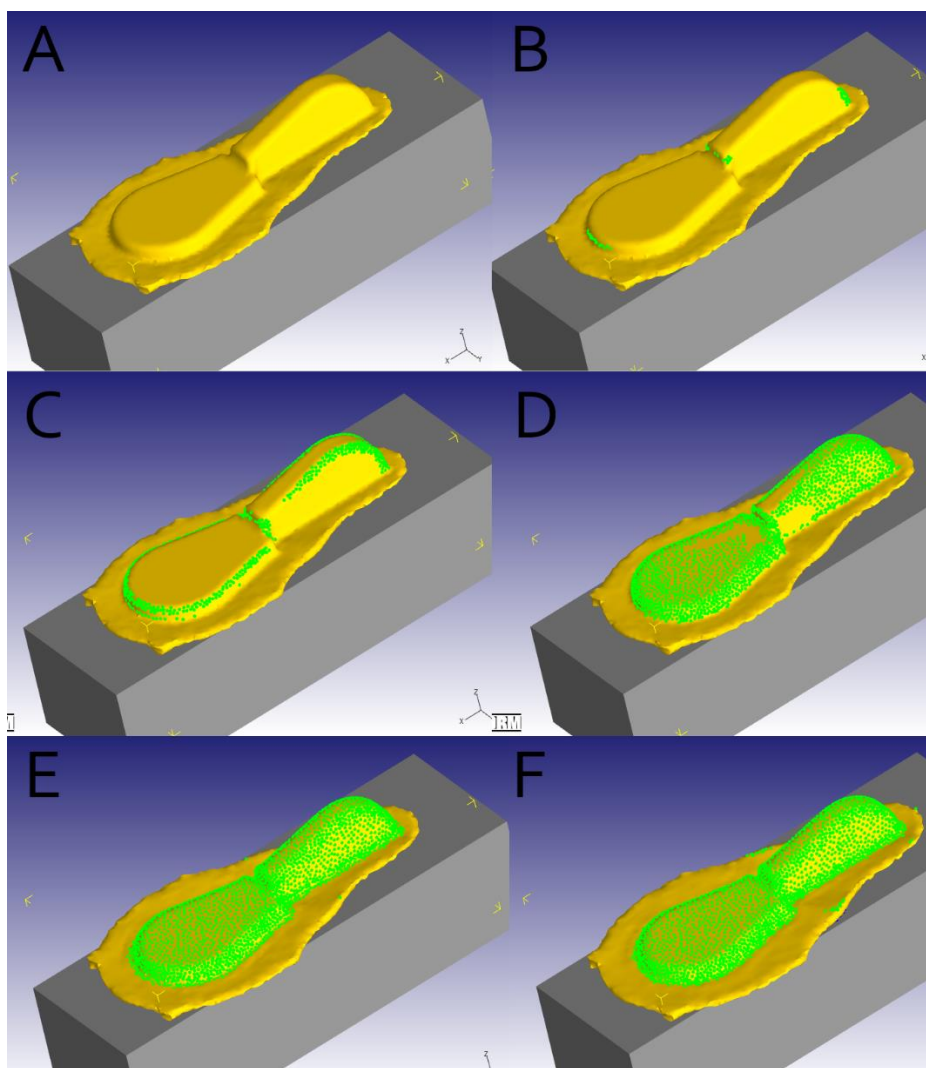


Figura 131 Preenchimento da matriz na etapa final.

Depois de verificado o correto preenchimento da matriz com material, foram estudadas outras variáveis do processo através dos recursos disponíveis do *Deform*. Começando pela distribuição de temperaturas ao longo da peça no final de cada etapa.

Verifica-se nas Figura 132 que na etapa de encalçamento a temperatura da parte conformada aumenta um pouco em algumas zonas enquanto que no centro da peça diminui. Este arrefecimento gradual da peça, de dentro para fora pode ser observado ao longo das várias etapas. Importante notar ainda o grande aumento de temperatura em zonas localizadas de criação de rebarba nas Figura 133 e Figura 134 .

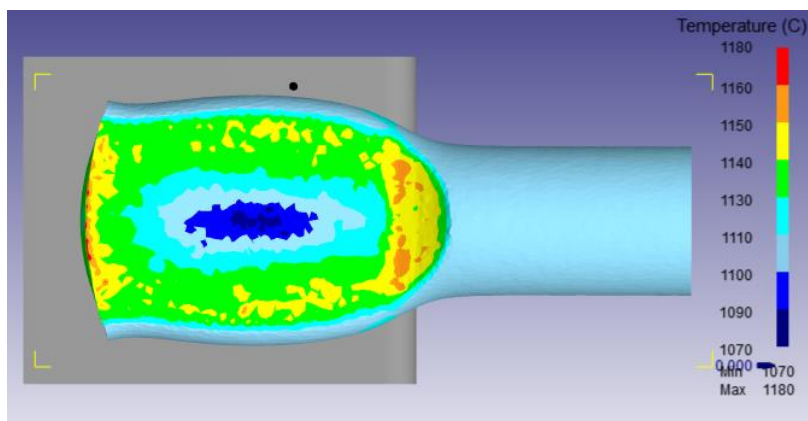


Figura 132 Distribuição de temperaturas na 1ª pré-forma.

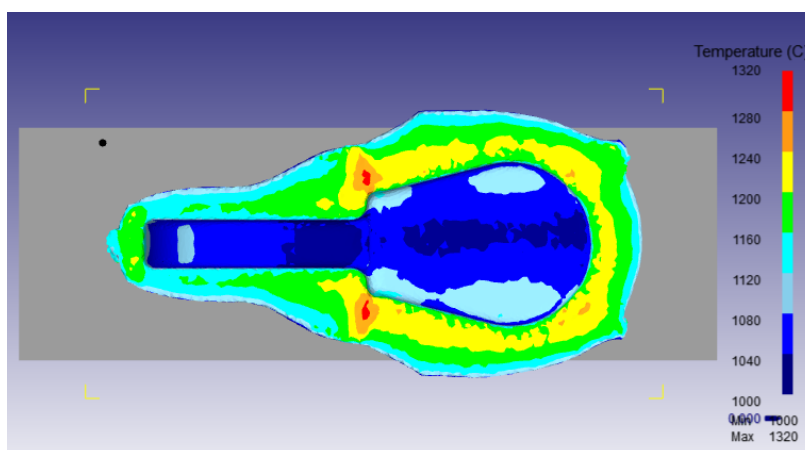


Figura 133 Distribuição de temperaturas na 2ª pré-forma.

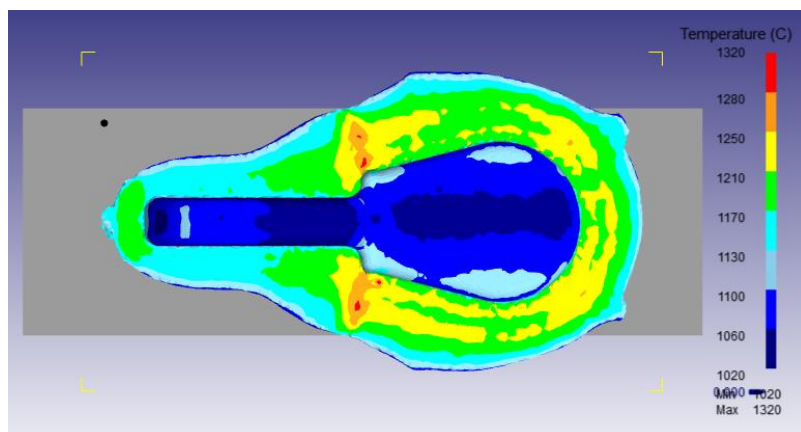


Figura 134 Distribuição de temperaturas na forma final.

Observando a deformação do material ao longo do processo é possível verificar, para a primeira etapa de pré-forma, Figura 135, que as zonas sujeitas a maior deformação se traduzem também nas zonas com maior aquecimento de material, devido à energia dissipada sob forma de calor. Nas etapas seguintes, a zona mais deformada é claro a rebarba, como se pode observar na Figura 136. No entanto, é possível observar que para além da zona de periferia de criação de rebarba e da própria rebarba, a zona com maior deformação da peça é a zona média, Figura 137, confirmando-se a sua escolha como uma zona crítica



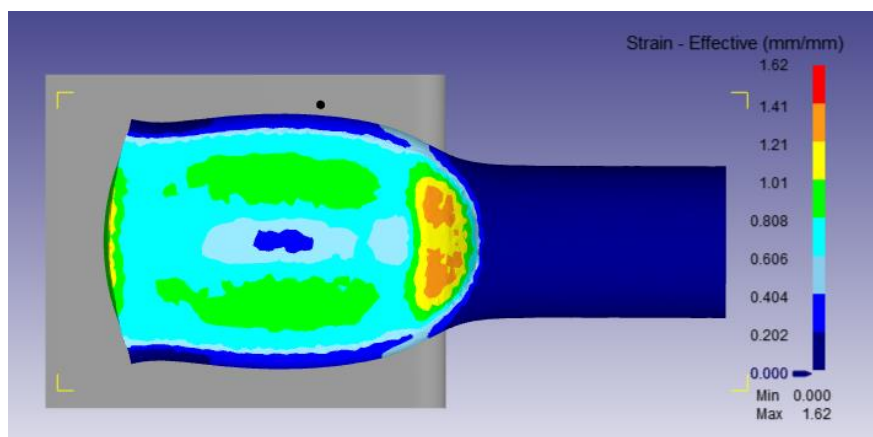


Figura 135 Deformação efetiva na 1ª pré-forma.

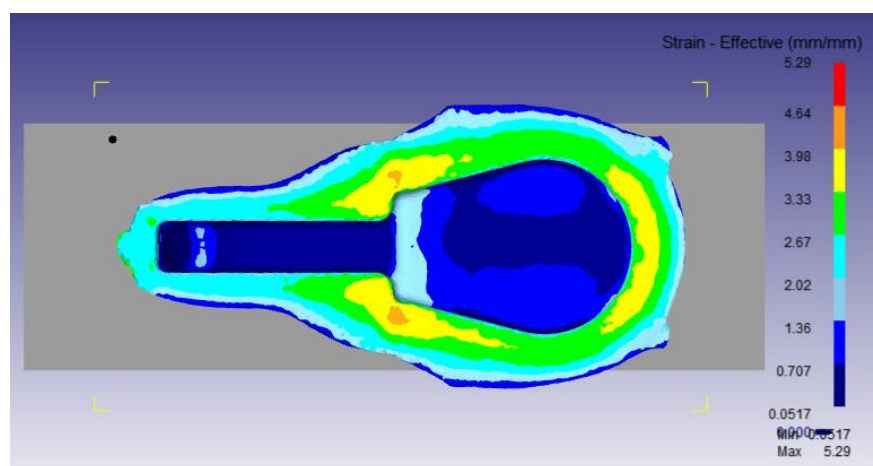


Figura 136 Deformação efetiva na 2ª pré-forma.

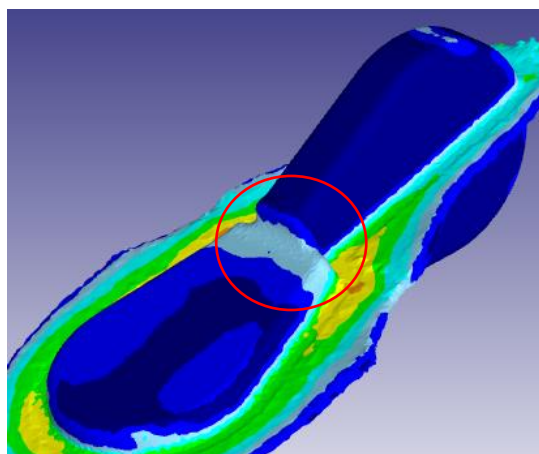


Figura 137 Representação da zona crítica de deformação efetiva.

Quanto às tensões geradas na peça é possível observar que estas se geram principalmente no interior das superfícies encalçadas em todas as etapas, localizando-se maioritariamente numa faixa intermédia da peça. Tal pode ser observado para os dois planos de simetria da peça na Figura 139.



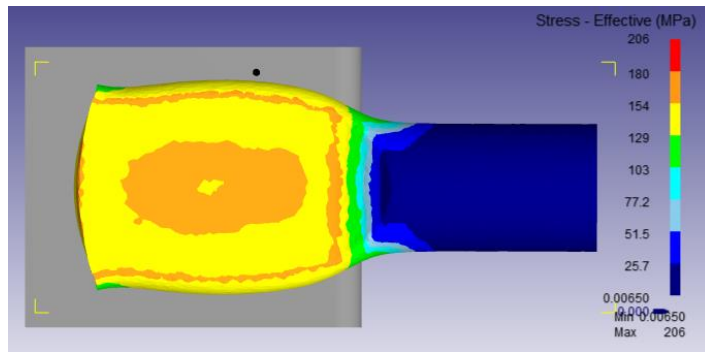


Figura 138 Distribuição de tensões na 1ª pré-forma.

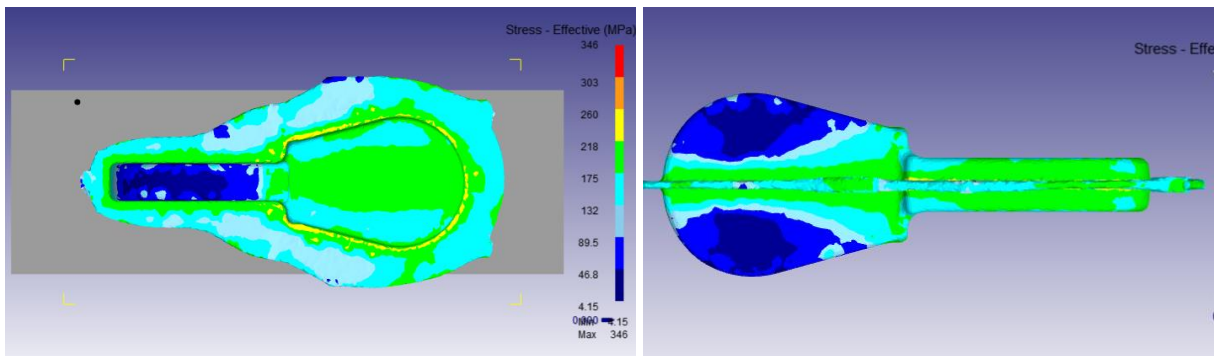


Figura 139 Distribuição de tensões na 2ª pré-forma

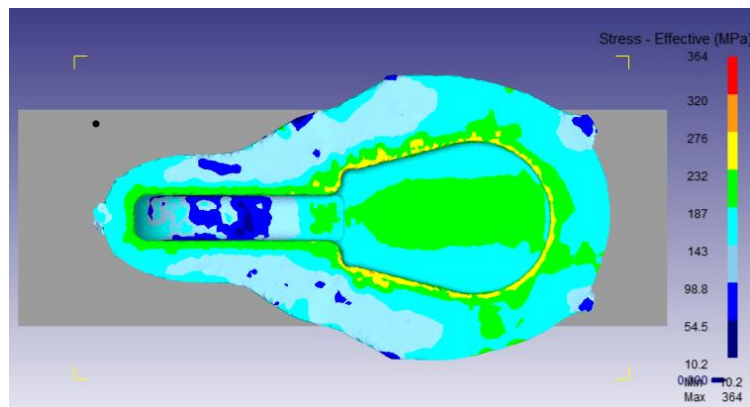


Figura 140 Distribuição de tensões na forma final.

Quanto à força necessária ao forjamento, foram obtidos os gráficos força-tempo para as três etapas. De notar que a designação “Top die” (matriz superior) e “Bottom die” (matriz inferior) varia da primeira etapa para as seguintes. Tal acontece, pois, o software bloqueia a orientação da pré-forma ao importar a sua geometria para as etapas seguintes, como tal, é necessário reorientar as ferramentas em vez da pré-forma.

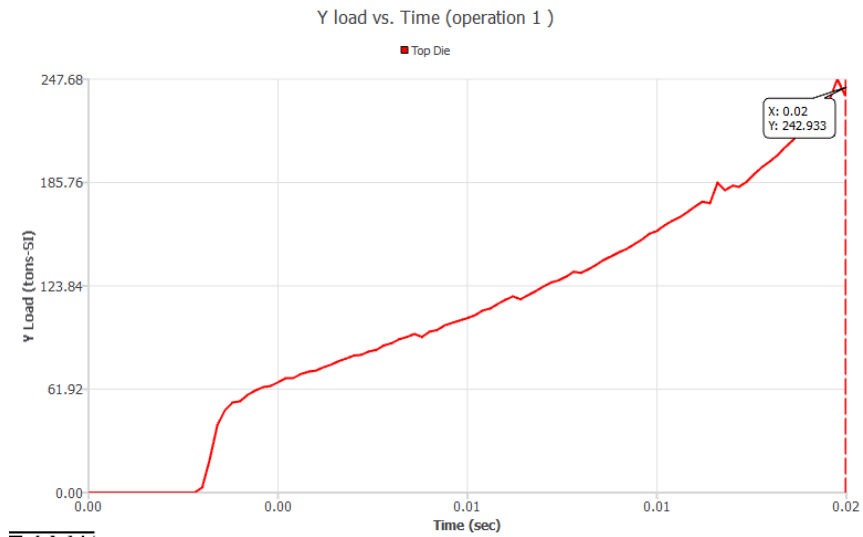


Figura 141 Gráfico Força vs Tempo para a 1ª operação de pré-forma.

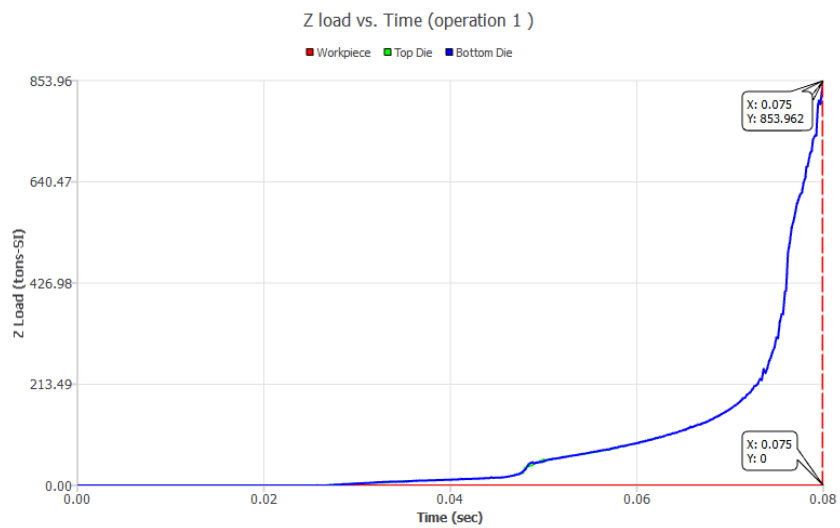


Figura 142 Gráfico Força vs Tempo para a 2ª operação de pré-forma.

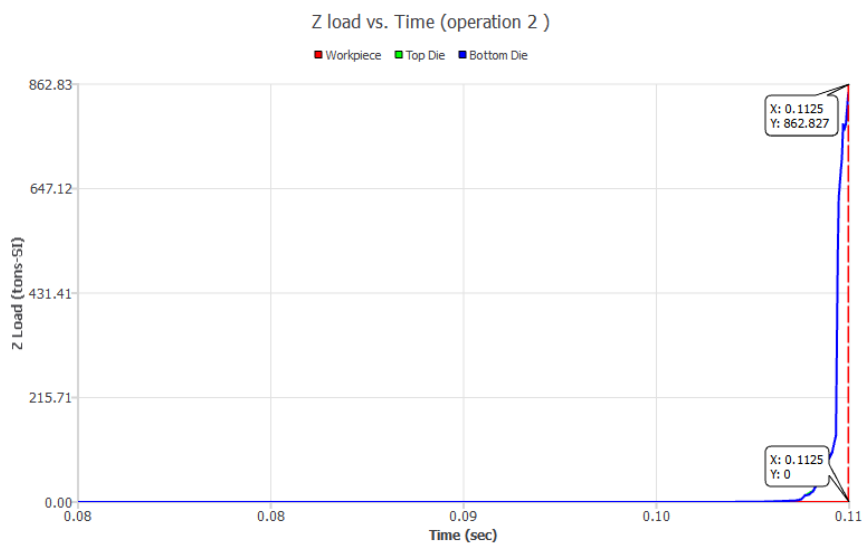


Figura 143 Gráfico Força vs Tempo para a operação final.

### 4.5 Fabrico de ferramentas

Para o dimensionamento do bloco das matrizes da 2ª pré-forma e da forma final, através da Tabela 24, considera-se para a espessura mínima a profundidade da cavidade mais baixa por esta se encontrar mais próxima da periferia. Para o dimensionamento da altura mínima, considera-se a profundidade da cavidade mais profunda. Como tal, as cotas dos blocos das matrizes, representadas na Figura 144, calculam-se através na Tabela 27:

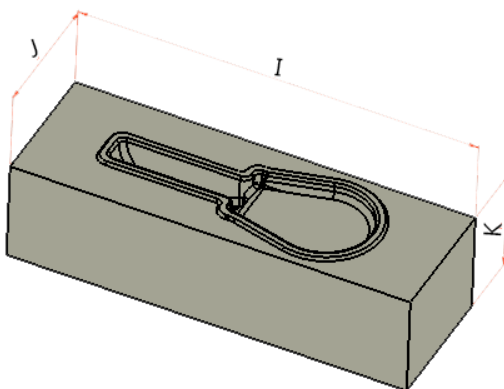


Figura 144 Cotas das matrizes.

Tabela 27 Cálculo das dimensões mínimas dos blocos das matrizes.

Etapa	Cavidade mais baixa [mm]	Cavidade mais alta [mm]	a [mm]	H [mm]	I [mm]	J [mm]	K [mm]
2ª Pré-forma	10,50	35,75	20	185	>230	>110	>185
Etapa final	10,00	35,00	20	185	>230	>110	>185

Para as simulações físicas e computacionais consideram-se matrizes com as dimensões das matrizes com que atualmente se forja na SKELT, que podem ser visualizadas na Figura 145. Uma vez que não foi estudado o desgaste das matrizes, o seu tamanho torna-se irrelevante para os estudos realizados.

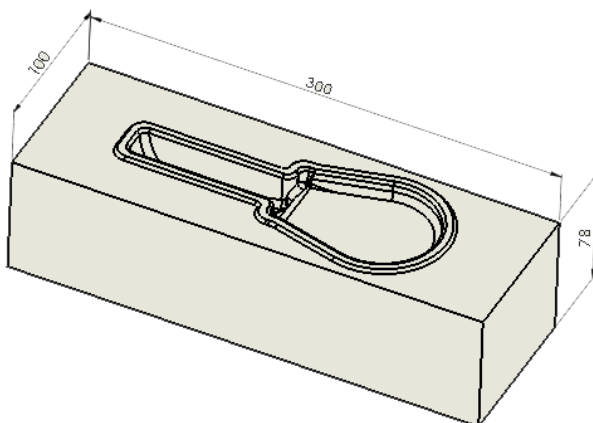


Figura 145 Dimensões da matriz usada atualmente.

## 4.6 Validação experimental

De modo a validar experimentalmente o estudo efetuado, assistiu-se à produção de uma pequena série de peças, analisando as variáveis do processo, máquinas e ferramentas envolvidas e ainda inspecionando visualmente as peças forjadas. Podem-se observar, na Figura 146, os equipamentos envolvidos no forjamento desta peça. A prensa mecânica de excêntrico tem uma capacidade de 1000 toneladas, valor superior aos valores calculados nas simulações efetuadas. O forno disponível na empresa é de indução. O controlo da temperatura da matéria-prima foi efetuado com um pirómetro ótico (1200°C).



Figura 146 Principais equipamentos instalados na empresa para o processo de forjamento: Prensa Mecânica excêntrica (à esquerda); Forno de Indução (à direita).

Na Figura 147 é apresentada a sequência de forjamento normal da peça. As formas intermédias obtidas ao longo das diversas etapas do processo foram avaliadas no decorrer desta fase de ensaios e comparadas com as obtidas no decorrer das simulações.



Figura 147 Diferentes fases do ensaio às ferramentas desenvolvidas, da esquerda para a direita: montagem e lubrificação das matrizes; pré-aquecimento controlado das matrizes fechadas até cerca de 200°C; colocação da 1ª pré-forma na segunda matriz.

Na Figura 148, pode-se observar a peça em várias fases do seu processo de forjamento. Do lado esquerdo encontra-se a 1ª pré-forma, depois de uma grenalhagem de modo a retirar a carepa formada, ao centro está a 2ª pré-forma ainda com rebarba e sem acabamento superficial (visível a formação de carepa na superfície), à esquerda encontra-se a peça na sua forma final de forjamento, com acabamento superficial mas ainda sem a maquinagem dos furos da peça final. A inspeção das peças não relevou nenhum defeito, mostrando ainda uma grande semelhança entre os resultados obtidos por simulação e os resultados reais para o escoamento do material.



Figura 148 Da esquerda para a direita: 1ª pré-forma; 2ª pré-forma com rebarba; forma final sem rebarba.

Deve, no entanto, salientar-se que a limpeza das cavidades entre etapas e entre várias peças, é importante para não haver acumulação de óxidos (carepa) na zona mais inferior das cavidades, levando a possíveis defeitos. Por manifesta falta de tempo não foi realizada uma análise pormenorizada de defeitos, da microestrutura nem a caracterização dimensional das peças obtidas.

Foi ainda realizada uma série de medições às peças forjadas, de modo a caracterizar a sua tolerância dimensional. Para tal foram medidas as cotas apresentadas na Figura 149, em sete peças, Figura 150, encontrando-se as medições na Tabela 28.

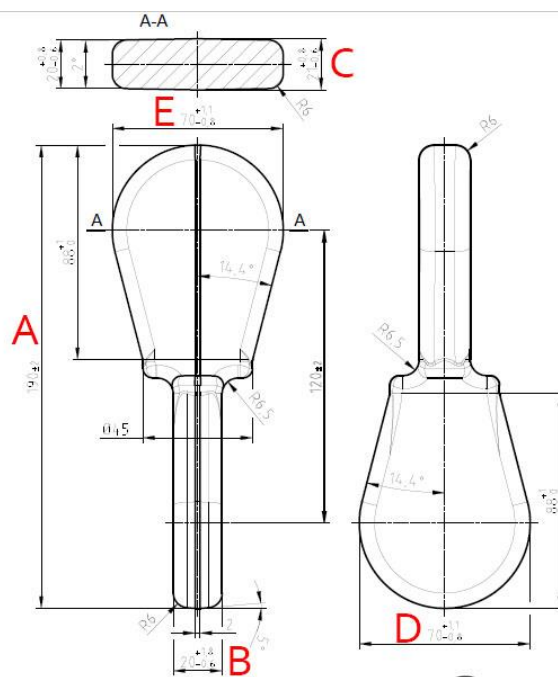


Figura 149 Cotas analisadas.



Figura 150 Peças analisadas.

Tabela 28 Valores das cotas analisadas e respectivos desvios para várias peças.

COTA	Valor [mm]	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4	Peça 5	Peça 6	Peça 7
A	190±2,0	190,7 (+0,7)	190,6 (+0,6)	190,3 (+0,3)	190,4 (+0,4)	190,6 (+0,6)	190,4 (+0,4)	190,6 (+0,6)
B	20 <sup>+0,8</sup> <sub>-0,6</sub>	20,4 (+0,4)	20,3 (+0,3)	20,4 (+0,4)	20,4 (+0,4)	20,2 (+0,2)	20,5 (+0,5)	20,5 (+0,5)
C	21 <sup>+0,8</sup> <sub>-0,6</sub>	21,3 (+0,3)	21,3 (+0,3)	21,4 (+0,4)	21,2 (+0,2)	21,3 (+0,3)	21,2 (+0,3)	21,2 (+0,3)
D	70 <sup>+1,1</sup> <sub>-0,8</sub>	69,7 (-0,3)	70,0	70,0	70,1 (+0,1)	70,0	70,1 (+0,1)	70,0
E	70 <sup>+1,1</sup> <sub>-0,8</sub>	70,9 (+0,9)	70,7 (+0,7)	70,8 (+0,8)	70,3 (+0,3)	70,1 (+0,1)	70,2 (+0,2)	70,0





## 5 Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

### 5.1 Conclusões

A realização desta dissertação permitiu perceber a importância de uma correta estruturação e condução do processo de desenvolvimento de um produto forjado. A sistematização de normas inerentes ao projeto, permite uma maior rapidez de execução do mesmo, bem como uma diminuição significativa nos custos e tempos elevados associados ao típico sistema de tentativa e erro. De notar, no entanto, a importância da experiência em forjamento das pessoas envolvidas no projeto, de forma a haver sensibilidade na aplicação dos meios disponíveis na bibliografia.

Tornaram-se ainda evidentes as potencialidades e vantagens associadas ao uso da modelação física em plasticina, com matrizes produzidas por meio de processos de prototipagem rápida. Em conjunto com métodos analíticos de cálculo de forças, como o método das fatias, é possível de uma forma extremamente expedita e com custos associados bastante baixos, simular o processo de forjamento, definindo o comportamento do material (preenchimento das matrizes, geometria final e escoamento do material) bem como as forças envolvidas. Conclui-se que estes resultados são próximos dos obtidos recorrendo à simulação computacional através de programas de simulação de elementos finitos para a conformação plástica, como é o caso do *Deform*. Tal pode ser observado na Tabela 29 onde se comparam os resultados obtidos por diferentes métodos para a força de forjamento em cada etapa.

Tabela 29 Valores de força da etapa de encalcamento e etapa final obtidos por diferentes métodos.

Etapa	Força de forjamento [tonf]		
	Métodos analíticos	<i>Deform</i>	Reais
(1ª etapa) Encalcamento	339,61	243	-
(3ª etapa) Etapa Final	580-869	862,83	-

Conclui-se ainda que o programa *Deform* é uma ferramenta extremamente poderosa no estudo do processo de forjamento, fornecendo informações sobre o comportamento do material, variáveis do forjamento (temperatura, tensão, deformação, etc.), forças necessárias ao mesmo, bem como variáveis que não foram tidas em conta nesta dissertação como o desgaste das matrizes, a microestrutura da peça, os processos de transferência de calor na interface matriz/peça ou a deteção de defeitos.

Quanto aos valores reais, obtidos no processo, não foi ainda possível a sua quantificação, esperando ser possível a sua integração no documento final.

A formulação deste guia permite assim, introduzir na SKELT novos conhecimentos e metodologias na área do forjamento a quente, bem como ao nível da qualificação dos seus recursos humanos e procedimentos para a produção de produtos forjados de elevada qualidade. A introdução destas abordagens no processo produtivo da empresa, desde a fase de conceção de novos componentes até ao desenvolvimento e teste de ferramentas, permite à SKELT



explorar e desenvolver diversas competências na área de forjamento, como estudar e otimizar dimensões mínimas da matéria-prima, definir e avaliar a geometria das ferramentas a adotar para as diferentes etapas e prever a existência de defeitos, bem como encontrar alternativas à validação do projeto das suas ferramentas, substituindo assim os elevados custos de ferramentas e testes experimentais em prensa.

## 5.2 Trabalhos futuros

Tendo em conta o estado atual desta dissertação, destacam-se como trabalhos interessantes a realizar no futuro:

- Realização de um estudo comparativo de vários métodos analíticos de cálculo de forças de forjamento com validação da força real em prensa;
- Aplicação e validação do manual num novo produto a desenvolver;
- Exploração das funcionalidades do *software Deform* para o estudo do desgaste das matrizes, previsão da microestrutura da peça e existência de defeitos;
- Criação de um software de orçamentação expedita para peças forjadas baseado nos dados fornecidos pelo guia (volume de material, número de operações, temperatura de forjamento, etc.);
- Automatização da linha produtiva da SKELT com recurso a braços robóticos;
- Realização de um estudo microestrutural às peças forjadas na SKELT;
- Realização de um estudo de análise estatística das propriedades mecânicas, controlo dimensional e defeitos nas peças forjadas.

---

## Referências

- Altan, T., and M. Shirgaokar. 2014. *Process Design in Impression Die Forging* Ohio: ERC/NSM, NSM Laboratory, Ohio State University.
- Altan, Taylan, Gracious Ngaile, and Ganshu Shen. 2004. *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*: The Materials Information Society.
- ASM. 2005. *ASM Handbook Volume 14A: Metalworking: Bulk Forming*. Vol. 14.
- Bralla, J.G. 1999. *Design for Manufacturability Handbook*: McGraw-Hill Education.
- Brites, Fabiano da Silva. 2009. "Desenvolvimento Integrado de Produto para Forjamento." Meste em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Brites, Fabiano da Silva, and Itanara da Silva Barbosa. 2012. "O Desafio de Ensinar Conformação Mecânica: Uma Pesquisa Sobre os Diferentes Recursos Didáticos Disponíveis." *COBENGE, XL Congresso Brasileiro De Educação de Engenharia*.
- Callister, W.D., and D.G. Rethwisch. 2012. *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*: Wiley.
- Chiaverini, Vicente. 1978. *Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades Processo de Faricação*. Vol. 1. São Paulo.
- Dieter, G.E., and American Society for Metals. Metal Workability Group. 1984. *Workability Testing Techniques*: American Society for Metals.
- Dieter, G.E., H.A. Kuhn, and S.L. Semiatin. 2003. *Handbook of Workability and Process Design*: A S M International.
- Edge, Engineers. 2016a. "Coefficient of Friction Equation and Table Chart." [http://www.engineersedge.com/coefficients\\_of\\_friction.htm](http://www.engineersedge.com/coefficients_of_friction.htm).
- Edge, Engineers. 2016b. "Design For Forging Manufacturing Considerations." Accessed 2/12/2016. <http://www.engineersedge.com/manufacturing/forging-design.htm>.
- Filho, Ettore Bresciani, Iris Bento da Silva, Gilmar Ferreira Batalha, and Sérgio Tonini Button. 2011. *Conformação Plástica dos Metais*. 6ª ed. São Paulo: EPUSP.
- Forge, Fly. 2015. "Why closed die forging is near net shape forging?" Accessed 12/12/2016. <http://www.dropforging.net/why-closed-die-forging-is-near-net-shape-forging.html>.
- Forge, Steel. 2016a. "History of Forgings." Accessed 02/10/2016. <http://www.steelforge.com/literature/history-of-forgings/>.
- Forge, Walker. 2016b. "The Total Process for Forged Steel Parts." Accessed 12/10/16. <http://www.walkerforge.com/products.html>.
- Fu, Ming Wang. 2015. *Design and Development of Metal-Forming Processes and Products Aided by Finite Element Simulation*. Hong Kong: Springer International Publishing.
- Jenson, Jon E. 1970. *Forging Industry Handbook*. Cleveland Forging Industry Association.
- Jorge, R. M. Natal, and L. M. J. S. Dinis. 2004. "Teoria da Plasticidade."
- Júnior, Adalberto Luiz LENhard. 2007. "Análise da Influência das Propriedades do Material e Parâmetros do Processo na Simulação Numérica do Processo de Forjamento." Pós-

- 
- Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Júnior, José Martinho Pelacani. 2010. "Desenvolvimento do forjamento a morno de um componente mecânico com extrusão reversa e direta " Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica
- JZknives. 2013. "My (short) 1095 hand forged santoku." Accessed 03/01/2017. [http://www.bladeforums.com/forums/showthread.php/1056439-My-\(short\)-1095-hand-forged-santoku](http://www.bladeforums.com/forums/showthread.php/1056439-My-(short)-1095-hand-forged-santoku).
- Kalpakji, Serope. 2014. *Manufacturing: Engineering and Technology*. 7 ed. Singapore: Pearson Education South Asia Pte Ltp.
- KANAZAWA, Ken-ichi, Hajime HIROKAWA, and Norishige OKIMI. 2014. Improvement of Forging Process and Product Quality by FEM Simulation Method Using a Simple Tensile Test. Japan: Department of Mechanical Science & Engineering, CHIBA INSTITUTE OF TECHNOLOGY.
- Lima, Diego Rodolfo Simões de. 2007. "Desenvolvimento de Tecnologia de Forjamento de Aço AISI 8640 Destinado à Produção de Brocas de Perfuração." Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande Do Sul.
- Lino, Jorge. 2006. "Tratamentos Térmicos dos Aços." *MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA I*
- Martins, Fábio. 2014. *Conformação Mecânica, ME-65 I*. Paraná.
- Masel, Dale T., William A. Young, and Robert P. Judd. 2010. "A rule-based approach to predict forging volume for cost estimation during product design." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 46 (1):31-41. doi: 10.1007/s00170-009-2108-6.
- Massivumformung, Deutsche. 2011. "Basic Knowledge: Forgings – Significance, Design, Production, Application."
- Metals, Horizon. 2016. "Fabricated products." Accessed 12/12/2016.
- Michels, Lucas Boeira, Diego Rodolfo Simões de Lima, Lírio Schaeffer, and Vilson Gruber. 2014. Uma visão geral sobre os equipamentos utilizados no processo de forjamento. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Neto, Rui Lemos, F. Jorge Lino, and A. Barata da Rocha. 2006. "Utilização da Prototipagem Rápida no Apoio ao Desenvolvimento de Produtos Forjados e Fundidos." *XXVI SENAFOR, IX Conferência Nacional de Conformação de Chapas*.
- Palanivendhan, M. 2014. "Mechanical Working of Metals." *Manufacturing Technology, Unit-II*.
- Rath. 2016. "Forging Furnace." Accessed 25/10/2016. <http://www.rath-group.com/en/industries/reheating-furnaces-steel/forge/>.
- Rathi, Mahendra G., and Nilesh A. Jakhade. 2014. "An Overview of Forging Processes with Their Defects." *International Journal of Scientific and Research Publications* 4 (6).
- REForCh. 2014. "Resource efficient forging process chain for complicated high duty parts (REForCh)."
-

- Rodrigues, Jorge, and Paulo Martins. 2010a. *Tecnologia Mecânica Vol.1: Tecnologia da Deformação Plástica*. Vol. 1.
- Rodrigues, Jorge, and Paulo Martins. 2010b. *Tecnologia Mecânica Vol.2: Tecnologia da Deformação Plástica* 2ed. Vol. 2.
- Santos, Marta Ribeiro dos, and Paulo Roberto Cetlin. 2009. "Processos Alternativos de Recalque da Cabeça de Parafusos Sextavados." *Tecnologia em Metalurgia e Materiais* 3 (2).
- Schaeffer, Lirio. 2012. *Forjamento: Introdução ao processo*. Porto Alegre: Imprensa Livre.
- SFTC. 2014. DEFORM v11.0.2 System Documentation.
- Siegert, K., and D. Ringhand. 1994. "Flashless and precision forging of connecting rods from P/M aluminum alloys." *Journal of Materials Processing Technology* 46 (1-2):157-167. doi: 10.1016/0924-0136(94)90108-2.
- Silva, C. M. 2007. *Acetatos de física*. Algarve: Departamento de Física, Universidade do Algarve.
- Soares, Pinto. 1992. *Aços: Características tratamentos*. 5 ed.
- Sofuoglu, Hasan. 2006. "A technical note on the role of process parameters in predicting flow behavior of plasticine using design of experiment." *Journal of Materials Processing Technology* 178 (1-3):148-153. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.161>.
- Sofuoglu, Hasan, and Jahan Rasty. 2000. "Flow behavior of Plasticine used in physical modeling of metal forming processes." *Tribology International* 33 (8):523-529. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X\(00\)00092-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X(00)00092-X).
- Spretnak, A. M. Sabroff; F. W. Boulger; H. J. Henning; J. W. 1964. *A Manual on Fundamentals of Forging Practice*. Ohio: Manufacturing Technology Division Air Force Systems Command.
- Stahl, Normenausschuss Eisen und. 2000. European Standard EN 10243-1:1999. In *Steel Die Forgings- Tolerances on dimensions*.
- Technology, Forged. 2015a. "HOT / WARM FORGING." Accessed 20/10/2016. [http://www.forgetechnology.com/hot\\_forming](http://www.forgetechnology.com/hot_forming).
- Technology, Forged. 2015b. "OPEN DIE FORGING / COGGING." Accessed 20/10/2016. <http://www.forgetechnology.com/cogging>.
- W.T. Wu, J.T. Jinn, C.E. Fischer 2003. "Modeling Techniques in Forming Processes." *Handbook of workability and Process Desgin*.
- Walker, Jack M. 1996. *Handbook of Manufacturing Engineering*. 2 ed. Florida: Marcel Dekker.
- Walters, John. 2006. "The Present and Future of Forging Simulation." Accessed 20/12/2016. <http://forgingmagazine.com/feature/present-and-future-forging-simulation>.
- Wegman, Dwight D. 1993. "Investigation into critical parameters which determine the oxygen refining capability of the slag during electroslog remelting of alloy 718." Degree of Master of Science, Metallurgy and Materials Engineering, Lehigh University.
- Whemco. 2016. "MEET THE FORGEMASTER." Accessed 25/10/2016. <http://www.whemco.com/wp-content/uploads/2014/03/forging-bg.jpg>
- Zdzisław Pluta, Tadeusz Hryniewicz. 2012. "Thermal Expansion of Solids " *Journal of Modern Physics*:793-802.

Zhu, Yuntian. 2014. MSE 440/540: Processing of Metallic Materials. In *Lecture 9: Forging*. North Carolina: Department of Materials Science and Engineering, NC State University.

## ANEXO A: Temperaturas de forjamento

Tabela 30 Temperatura máxima de forjamento para aços ao carbono e de baixa liga, adaptado de (ASM 2005).

Percentagem de Carbono (%)	Temperatura máxima de forjamento segura	
	Aços ao carbono	Aços ligados
	[°C]	[°C]
0.10	1290	1260
0.20	1275	1245
0.30	1260	1230
0.40	1245	1230
0.50	1230	1230
0.60	1205	1205
0.70	1190	1175
0.90	1150	...
1.10	1110	...

Tabela 31 Temperaturas de forjamento para outros aços, adaptado de (ASM 2005).

Aços	Temperaturas de forjamento		
	Pré-aquecimento lento até:	Iniciar o forjamento a <sup>(a)</sup>	Não forjar abaixo de:
	[°C]	[°C]	[°C]
<b>Aços de ferramenta (temperados em água)</b>			
W1-W5	790	980-1095 <sup>(b)</sup>	815
<b>Aços de ferramenta resistentes ao choque</b>			
S1, S2, S4, S5	815	1040-1150	870
<b>Aços de ferramenta para trabalho a frio (temperados em óleo)</b>			
O1	815	980-1065	845
O2	815	980-1040	845
O7	815	980-1095	870
<b>Aços de ferramenta de média liga para trabalho a frio (temperados ao ar)</b>			
A2, A4, A5, A6	870	1010-1095	900
<b>Aços de ferramenta para trabalho a frio (alto teor de carbono e cromo)</b>			
D1 – D6	900	980-1095	900
<b>Aços de ferramenta para trabalho a quente (cromo)</b>			
H11, H12, H13	900	1065-1175	900
H14, H16	900	1065-1175	925
H15	845	1040-1150	900

<b>Aços de ferramenta para trabalho a quente (tungsténio)</b>			
<b>H20, H21, H22</b>	870	1095-1205	900
<b>H24, H25</b>	900	1095-1205	925
<b>H26</b>	900	1095-1205	955
<b>Aços rápidos de ferramenta (molibdénio)</b>			
<b>M1, M10</b>	815	1040-1150	925
<b>M2</b>	815	1065-1175	925
<b>M4</b>	815	1095-1175	925
<b>M30, M34, M35, M36</b>	815	1065-1175	925
<b>Aços rápidos de ferramenta (tungsténio)</b>			
<b>T1</b>	870	1065-1205	955
<b>T2, T4, T8</b>	870	1095-1205	955
<b>T3</b>	870	1095-1230	955
<b>T5, T6</b>	870	1095-1205	980
<b>Aços de ferramenta de baixa liga para fins específicos</b>			
<b>L1, L2, L6</b>	815	1040-1150	845
<b>L3</b>	815	980-1095	845
<b>Aços para moldes (baixo teor de carbono)</b>			
<b>P1</b>	...	1205-1290	1040
<b>P3</b>	...	1040-1205	845
<b>P4</b>	870	1095-1230	900
<b>P20</b>	815	1065-1230	815

(a) A temperatura à qual se inicia o forjamento é dada sob a forma de um intervalo; o lado mais elevado do intervalo deve ser utilizado para secções de dimensões mais elevadas e pesadas ou reduções rápidas, o lado mais baixo deve ser utilizado para secções de dimensões menores e reduções leves. À medida que a percentagem de elementos de liga do aço aumenta, o tempo de imersão à temperatura de forjamento aumenta proporcionalmente. De forma similar, à medida que a percentagem de elementos de liga aumenta, torna-se cada vez mais necessário realizar um arrefecimento lento desde a temperatura de forjamento. Com aços de elevado teor de elementos de liga, como os aços rápidos e temperados ao ar, este arrefecimento lento é indispensável para prevenir fissuras. Tanto o arrefecimento do aço no forno como num meio isolante (como carvão) é satisfatório.

(b) Temperaturas de forjamento para aços de ferramenta temperados em água com variação da percentagem de carbono. As temperaturas seguintes são recomendadas: para 0.60-1.25% C, o intervalo dado; para 1.25 a 1.40% C, o lado mais baixo da gama dada.

## ANEXO B: Materiais e tratamentos térmicos das matrizes

Tabela 32 Composição química dos principais aços usados no fabrico de matrizes de forjamento, adaptado de (ASM 2005).

Designação	Composição nominal (%)								
	C	Mn	Si	Co	Cr	Mo	Ni	V	W
<b>Aços ligados para ferramentas de trabalho a quente (ligados ao crómio)</b>									
H10	0.40	0.40	1.00	...	3.30	2.50	...	0.50	...
H11	0.35	0.30	1.00	...	5.00	1.50	...	0.40	...
H12	0.35	0.40	1.00	...	5.00	1.50	...	0.50	1.50
H13	0.38	0.30	1.00	...	5.25	1.50	...	1.00	...
H14	0.40	0.35	1.00	...	5.00	...	...	...	5.00
H19	0.40	0.30	0.30	4.25	4.25	0.40	...	2.10	4.10
<b>Aços ligados para ferramentas de trabalho a quente (ligados ao tungsténio)</b>									
H21	0.30	0.30	0.30	...	3.50	...	...	0.45	9.25
H22	0.35	0.30	0.30	...	2.00	...	...	0.40	11.00
H23	0.30	0.30	0.30	...	12.00	...	...	1.00	12.00
H24	0.45	0.30	0.30	...	3.0	...	...	0.50	15.00
H25	0.25	0.30	0.30	...	4.0	...	...	0.50	15.00
H26	0.50	0.30	0.30	...	4.0	...	...	1.00	18.00

Tabela 33 Temperaturas, tempos de estágio e durezas obtidas para os tratamentos térmicos das matrizes, adaptado de (ASM 2005).

Aço <sup>(a)</sup>	Recozimento			Endurecimento				
	Temperatura <sup>(b)</sup>	Taxa de arrefecimento <sup>(c)</sup>	Dureza [HB]	Temperatura		Estágio [min]	Meio de têmpera	Dureza [HRC]
				Pré-aquecimento	Austenitização			
	[°C]	[°C/h]	[°C]	[°C]				
<b>Aços ligados para ferramentas de trabalho a quente (ligados ao crómio)</b>								
H10	845-900	22	192-229	815	1010-1040	15-40 <sup>(d)</sup>	A	56-59
H11	845-900	22	192-229	815	995-1025	15-40 <sup>(d)</sup>	A	53-55
H12	845-900	22	192-229	815	995-1025	15-40 <sup>(d)</sup>	A	52-55
H13	845-900	22	192-229	815	995-1040	15-40 <sup>(d)</sup>	A	49-53
H14	870-900	22	207-235	815	1010-1065	15-40 <sup>(d)</sup>	A	55-56
H19	870-900	22	207-241	815	1095-2200	2-5	A, O	52-55



Aços ligados para ferramentas de trabalho a quente (ligados ao tungstênio)								
H21	870-900	22	207-235	815	1095-1205	2-5	A, O	43-52
H22	870-900	22	207-235	815	1095-1205	2-5	A, O	48-57
H23	870-900	22	212-255	815	1205-1260	2-5	O	33-35 <sup>(e)</sup>
H24	870-900	22	217-241	815	1095-1230	2-5	A, O	44-55
H25	870-900	22	207-235	815	1150-1260	2-5	A, O	46-53
H26	870-900	22	217-241	870	1175-1260	2-5	A, O, S	63-64

A – ar, O - óleo, S – sal

(a) O tempo de estágio, depois do aquecimento uniforme, varia de cerca de 15 minutos, para secções de pequenas dimensões, até cerca de 1 hora, para secções de grandes dimensões. O trabalho é arrefecido a ar parado.

(b) O limite inferior da gama deve ser usado para secções de pequenas dimensões, o limite superior deve ser usado para secções de dimensões elevadas. O tempo de estágio varia de cerca de 1h para secções mais leves e menores carregamentos de forno, até cerca de 4h para secções pesadas e grandes carregamentos; para um recozimento de conjuntos, manter por 1 h por cada 25 mm de secção transversal

(c) Taxa máxima, para 425°C (800°F) a menos que alguma nota de rodapé indique o contrário

(d) Para tratamentos térmicos em forno aberto. Para endurecimentos de conjunto, manter por  $\frac{1}{2}$  h por cada 25mm de secção transversal.

(e) Têmpera para endurecimento por precipitação

## ANEXO C: Normas e nomenclatura de materiais metálicos

Tabela 34 Nomenclatura AISI dos aços ao carbono e ligados, adaptado de (Rodrigues e Martins 2010b)

Série (Designação AISI)	Tipo de aço
<b>1000</b>	Aços carbono (1000-1200) NOTA: 10XX, XX representa a percentagem de carbono do aço. Aços de baixa liga carbono-manganês (1300)
<b>4000</b>	Aços ligados Crómio – molibdénio (4100) Crómio – molibdénio – níquel (1.83% Ni) (4300, 4700) Molibdénio (4400) Molibdénio-níquel (4600,4800)
<b>5000</b>	Aços ligados Crómio (5000-5200)
<b>6000</b>	Aços ligados Crómio – vanádio (6100)
<b>8000</b>	Aços ligados Crómio – molibdénio – níquel (0.55% Ni) (8600-8800)

Tabela 35 Nomenclatura de ligas de alumínio, adaptado de (Rodrigues e Martins 2010b).

Série (Designação Aluminum Association)	Tipos de ligas de alumínio
<b>1000</b>	Teor em alumínio superior a 99%
<b>2000</b>	Ligas de alumínio-cobre
<b>3000</b>	Ligas de alumínio-manganês
<b>4000</b>	Ligas de alumínio-silício
<b>5000</b>	Ligas de alumínio-magnésio
<b>6000</b>	Ligas de alumínio-magnésio-silício
<b>7000</b>	Ligas de alumínio-zinco
<b>8000</b>	Ligas de alumínio-outros elementos (ex. alumínio-lítio)
<b>9000</b>	Série livre

Tabela 36 Nomenclatura de ligas de magnésio, adaptado de (Rodrigues e Martins 2010b).

<b>Série (Designação ASTM e SAE)</b>	<b>Tipos de ligas de magnésio</b>
<b>AM00-</b>	Ligas de magnésio-alumínio-manganês
<b>AS00-</b>	Ligas de magnésio-alumínio-silício
<b>AZ00-</b>	Ligas de magnésio-alumínio-zinco
<b>HK00-</b>	Ligas de magnésio-tório-zircônio
<b>HM00-</b>	Ligas de magnésio-tório-manganês
<b>LA00-</b>	Ligas de magnésio-lítio
<b>QH00-</b>	Ligas de magnésio-prata-tório
<b>ZC00-</b>	Ligas de magnésio-zinco-cobre
<b>ZH00-</b>	Ligas de magnésio-zinco-tório
<b>ZK00-</b>	Ligas de magnésio-zinco-zircônio
<b>ZM00-</b>	Ligas de magnésio-zinco-manganês

Tabela 37 Nomenclatura de ligas de cobre, adaptado de (Rodrigues e Martins 2010b).

<b>Série (Designação CDA)</b>	<b>Tipos de ligas de cobre</b>
<b>C10000</b>	Cobres (%Cu >99.3%) Ligas de cobre com %Cu > 96%) (ex. bronzes de berílio C17000)
<b>C20000</b>	Ligas cobre-zinco (latões)
<b>C30000</b>	Ligas cobre-zinco-chumbo (latões com chumbo)
<b>C40000</b>	Ligas cobre-zinco-estanho (latões com estanho)
<b>C50000</b>	Ligas cobre-estanho (bronzes de estanho)
<b>C60000</b>	Ligas cobre-alumínio (bronzes de alumínio) Ligas cobre-silício (bronzes de silício)
<b>C70000</b>	Ligas cobre-níquel e cobre-níquel-zinco (pratas de níquel)

Tabela 38 Nomenclatura de ligas de titânio, adaptado de (Rodrigues e Martins 2010b).

<b>Designação</b>	<b>Tipos de ligas de titânio</b>
<b>Titânio comercialmente puro</b>	<b>Teor em titânio superior ou igual a 99.0% (ex; 99.0 Ti, 99.1 Ti)</b>
<b>Alfa (<math>\alpha</math>)</b>	Ti-0.2Pd Ti-5Al-2.5Sn Ti-8Al-1Mo-1V Ti-6Al-2Nb-1Ta-1Mo
<b>Alfa-beta (<math>\alpha - \beta</math>)</b>	Ti-6Al-4V Ti-6Al-5V Ti-3Al-6V-2Sn Ti-8Mn Ti-7Al-4Mo
<b>Beta (<math>\beta</math>)</b>	Ti-10Al-2Fe-3Al Ti-13V-11Cr-3Al Ti-1Al-8V-5Fe

Tabela 39 Nomenclatura de ligas de níquel, adaptado de (Rodrigues e Martins 2010b)

<b>Designação</b>	<b>Tipos de ligas de níquel</b>
<b>Níquel 200</b>	Liga 99.5Ni + Co
<b>Duranickel 301</b>	Liga 93Ni-4.5Al-1Ti-1Si
<b>Monel 400</b>	Liga 66Ni-32Cu
<b>Inconel 617</b>	Liga 44.5Ni-22Cr-13Co-9Mo-3Fe-1.1Al-0.6Ti
<b>Hastelloy W</b>	Liga 62Ni-24Mo-6Fe-5Cr-2.5Co
<b>Waspaloy</b>	Liga 56Ni-19.5Cr-14Co-4.5Mo-3Ti-1.2Al-1Fe