

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM

SUBSTITUIÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM PELO PROCESSO DE
FORJAMENTO À QUENTE NA FABRICAÇÃO DA PRÉ-FORMA DE BROCAS DE
FURAÇÃO DE ROCHAS

Charles Chemale Yurgel

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2007

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM

SUBSTITUIÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM PELO PROCESSO DE
FORJAMENTO A QUENTE NA FABRICAÇÃO DA PRÉ-FORMA DE BROCAS DE
FURAÇÃO DE ROCHAS

Charles Chemale Yurgel
Engenheiro Mecânico,

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2007

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador, Co-orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. –Ing. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Roberto Cetlin – UFMG

Prof. Dr. Afonso Reguly – PPGEM/UFRGS

Eng. Dr. Alberto Moreira Guerreiro Brito – UFRGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

Dedico aos meus pais, Carlos Roberto Abbott Yurgel e Dibe Maria Chemale Yurgel; aos meus irmãos Allan Chemale Yurgel e Greice Chemale Yurgel que sempre foram meus amigos e incentivadores de meus estudos.

À minha companheira e grande amor, Ana Rita Gobbo Degani, que sempre esteve a meu lado, dividindo as alegrias e dificuldades.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. –Ing. Lirio Schaeffer pelo estímulo, dedicação, oportunidade, confiança e esforço pessoal proporcionado.

Ao Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, coordenado pelo Prof. Dr. –Ing. Lirio Schaeffer, pela oportunidade e pronto atendimento quando precisei utilizar as máquinas e instrumentos presentes neste laboratório.

Aos amigos Msc. Sergio Eglan Silveira Neto, Msc. Eng. Marcelo Dall’Onder Michelin e Msc. Samanta Bianchi Vearick, colegas de mestrado, pela colaboração e opiniões na estrutura da dissertação.

Ao amigo e colega, Eng. Diego Simões Lima, pela participação na fabricação das matrizes, pelo atendimento e apoio nos ensaios realizados no Laboratório de Transformação Mecânica.

Ao amigo e colega de trabalho, Eng. Fábio André Lora, pela colaboração nos desenhos, croquis e cálculos matemáticos realizados; e por sua disposição, sempre que necessário, neste trabalho.

Ao Senai-Cimatec-Ba pelo apoio proporcionado em todas as solicitações feitas por mim para a realização deste trabalho: viagens, fornecimento de materiais e utilização de equipamentos para fabricação e ensaio de peças.

A todos que colaboraram, direta ou indiretamente, para elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

SUMARIO

Agradecimentos.....	V
Sumário.....	VI
Lista de Figuras.....	VIII
Lista de Tabelas.....	XII
Lista de Símbolos.....	XIII
Resumo.....	XV
Abstract.....	XVI
1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica.....	2
2.1. Processo de Forjamento a Quente.....	2
2.1.1. Aços Baixa Liga Para o Processo de Forjamento a Quente	3
2.2. Processo de Extrusão.....	6
2.2.1. Extrusão Direta.....	6
2.2.2. Extrusão Indireta.....	7
2.2.3. Combinação de Extrusão Direta e Indireta na Fabricação de Peças.....	10
2.3. Avaliação de Peças Forjadas e Extrudadas com Simetria Axial.....	12
2.3.1. Avaliação de Peças Forjadas e Extrudadas com Simetria Axial Através do Modelamento Físico com Plasticina.....	12
2.3.2. Avaliação de Peças Forjadas e Extrudadas com Simetria Axial Através da Teoria dos Elementos Finitos.....	13
2.4. Precisão de Peças Forjadas a Quente.....	16
2.5. Matrizes Utilizadas no Processo de Forjamento a Quente.....	19
2.5.1. Aços para Matrizes de Conformação a Quente.....	22
2.5.1.1. Aço AISI H13 Utilizado no Processo de Conformação a Quente.....	23
2.6. Teoria Elementar da Plasticidade (TEP).....	24
2.6.1. Deformação a Quente.....	28
3. Processo Atual de Fabricação de Brocas.....	32
3.1. Considerações Necessárias para a Troca do Processo de Fabricação da Pré-forma de Brocas.....	33
4. Procedimentos Experimentais para a Obtenção de Pré-formas Utilizando Materiais de Fácil Modelamento.....	35
4.1. Ensaio de Forjamento Utilizando Plasticina.....	36
4.1.1. Obtenção de Pré-formas de Brocas Utilizando <i>Billets</i> de Plasticina e Gesso.....	38

4.2. Ensaio de Forjamento Utilizando Cobre como <i>Billet</i>	43
5. Forjamento da Pré-forma Utilizando o Aço AISI 8640.....	48
5.1. Projeto de Matrizes.....	48
5.1.1. Tratamento Térmico Realizado no Aço AISI H13.....	53
5.2. Resultados Experimentais no Forjamento a Quente do Aço AISI 8640.....	53
6. Teoria Elementar da Plasticidade (TEP).....	63
6.1. Aplicação para o Cobre.....	63
6.1.1. Curva de Escoamento.....	63
6.1.2. Desenvolvimento da TEP.....	64
6.2. Aplicação para o Aço AISI 8640.....	72
6.2.1. Curva de Escoamento.....	72
6.2.2. Desenvolvimento da TEP.....	74
7. Discussão dos Resultados.....	78
7.1. Comparação de Processos para o Ganho de Volume na Produção de Peças.....	78
7.2. Comparação Entre a Utilização da TEP e Ensaio Experimentais.....	78
7.2.1. Comparação Entre a Utilização da TEP e Ensaio Experimentais Aplicado ao Cobre.....	79
7.2.2. Comparação Entre a Utilização da TEP e Ensaio Experimentais Aplicado ao Aço AISI 8640.....	80
7.3. Força Aplicada para obtenção da Pré-forma de Aço AISI 8640.....	81
8. Conclusões.....	83
9. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

LISTA DE FIGURAS

2.1 – Principais parâmetros envolvidos no processo de forjamento.....	2
2.2 – Tarugo de tamanho controlado sendo deformado por um punção em uma matriz bi-partida.....	3
2.3 – Processo de extrusão direta.....	7
2.4 – Peças obtidas por extrusão indireta (Componente A: Matriz superior; Componente B: Matriz inferior; Componente C: Extrator; Componente D: <i>Billet</i> ; Componente E: Punção).....	7
2.5 – Processo de extrusão indireta.....	8
2.6 – Início da penetração do punção caracterizando o processo de forjamento no contato inicial entre o punção e o <i>billet</i>	9
2.7 – Demonstração do processo de extrusão indireta com o material extrudado entre as paredes da matriz e o punção.....	9
2.8 – <i>Billet</i> cilíndrico utilizado no processo de extrusão.....	10
2.9 – Peça sendo extrudada de forma direta.....	10
2.10 – Peça extrudada de forma direta.....	10
2.11 – Peça sendo extrudada em uma segunda etapa de forma indireta.....	11
2.12 – Peça final extrudada de forma indireta.....	11
2.13 – Processos de extrusão direta e indireta combinados.....	11
2.14 – Cilindros de plasticina confeccionados para posterior ensaio.....	13
2.15 – Modelo de elementos finitos para simulação de forjamento em simetria axial.....	15
2.16 – Peça discretizada por elementos finitos.....	15
2.17 – Seqüência de etapas para o forjamento do componente.....	16
2.18 – Final da última etapa de forjamento mostrando falta de preenchimento.....	16
2.19 – Corpo de prova sendo forjado e preenchendo todo o espaço, mostrando aproveitamento de material com precisão do processo.....	18
2.20 – Modos de falha característicos de ferramentas de forjamento a quente.....	20
2.21 – Resistência de aços para matrizes a deformação plástica em temperaturas elevadas (valores entre parênteses indicam dureza a temperatura ambiente).....	22
2.22 – Diagrama de revenimento do aço AISI H13.....	24
2.23 – Divisão da zona de conformação em regiões.....	25
2.24 – Tira do material extrudado.....	26

2.25 – Curva de escoamento para o aço AISI 4140 à 1200°C para diferentes velocidades de deformação.....	29
2.26 – Curvas de escoamento para o aço AISI 8640 para diferentes temperaturas.....	30
3.1 – Broca de furação de rochas de aço AISI 8640 engatada a uma haste através da cavidade interna.....	32
3.2 – Visualização de brocas de aço AISI 8640 fabricadas por usinagem.....	33
3.3 – Peça cilíndrica de aço AISI 8640 para início do processo de usinagem com altura de 62mm, diâmetro de 38,1mm e volume de 70685mm ³	34
4.1 – Desenho do perfil da pré-forma.....	35
4.2 – Matriz inferior à esquerda e da matriz superior à direita.....	36
4.3 – Matriz inferior à esquerda e da matriz superior à direita.....	37
4.4 – Desenho do conjunto das matrizes com canal para pinos de fixação.....	37
4.5 – Matriz inferior engatada a matriz superior através de pinos de fixação.....	38
4.6 – Desenho com vista lateral do punção.....	39
4.7 – Vista do punção cônico de penetração com angulação necessária para o forjamento da cavidade.....	39
4.8 – Vista da passagem do punção através da matriz superior.....	40
4.9 – Peça de gesso mostrando excesso de material.....	41
4.10 – Peça de plasticina forjada com altura inicial de 60mm, diâmetro de 38,1, mm mostrando a formação de rebarba com volume de 68405mm ³	42
4.11 – Peça de plasticina forjada com altura inicial de 56mm não mostrando formação de rebarba com volume de 63845mm ³	43
4.12 - Peça cilíndrica com diâmetro de 38,1mm, altura de 56mm e com volume de 63845mm ³	44
4.13 – Conjunto montado para forjamento do <i>billet</i> de cobre na prensa hidráulica de 2940kN no LdTM/UFRGS.....	45
4.14 – Peça de cobre forjada a frio através da penetração de um punção cônico e sem formação de rebarba.....	46
4.15 – Força aplicada vs. penetração do punção para obtenção da pré-forma de cobre.....	46
4.16 – Altura de penetração do punção.....	47
5.1 – Vista lateral em corte da matriz inferior.....	50
5.2 – Vista lateral em corte da matriz superior.....	50
5.3 – Vista lateral em corte do punção.....	51
5.4 – Matriz inferior produzida em um CNC.....	51

5.5 – Vista de topo da matriz superior produzida em um CNC.....	52
5.6 – Punção de aço AISI H13 produzido em um CNC.....	52
5.7 – Prensa hidráulica de 7350 kN utilizada no LdTM para o forjamento da pré-forma.....	54
5.8 – Peças usinadas de mesmo diâmetro e alturas diferentes para ensaios de forjamento.....	55
5.9 – Matriz superior e punção fixados a parte superior e móvel da prensa.....	56
5.10 – Matriz inferior fixada por prendedores.....	56
5.11 – Sistema montado para a realização do processo.....	57
5.12 – Vista lateral do desenho em corte dos componentes do sistema para forjamento da pré-forma antes do processo.....	58
5.13 – Vista lateral do desenho em corte dos componentes do sistema para forjamento da pré-forma depois do processo.....	59
5.14 – Peça forjada com falta de preenchimento na borda superior.....	60
5.15 – Força necessária para a penetração total do punção em um <i>billet</i> de altura inicial de 58mm.....	61
5.16 – Peça forjada com produção completa da pré-forma.....	61
5.17 – Força necessária para a penetração total do punção em um <i>billet</i> de altura inicial de 60mm.....	62
6.1 – Curva de escoamento do cobre a temperatura ambiente.....	64
6.2 – Separação de duas regiões para cálculo e obtenção da pré-forma de cobre.....	65
6.3 – Demonstração da variação do raio do punção (r).....	65
6.4 – Ponta do punção iniciando contato com a peça.....	66
6.5 – Divisão em tiras para a parte forjada.....	66
6.6 – Divisão em tiras na extrusão da peça.....	67
6.7 – Detalhes dos incrementos através da parte cônica do punção.....	67
6.8 – Demonstração dos diâmetros na tira.....	68
6.9 – Variação da penetração do punção.....	68
6.10 – Curva da força axial necessária em relação à altura da tira.....	72
6.11 – Força aplicada vs. raio de penetração do punção desde seu contato com a peça até o final de seu curso.....	72
6.12 – Curva de escoamento para o aço AISI 8640 à 1200°C.....	73
6.13 – Demonstração do ângulo de saída de 5° da cavidade da matriz para a extrusão do aço.....	75
6.14 – Curva da força axial em relação à altura da tira.....	77

6.15 – Força aplicada vs. raio de penetração do punção desde seu contato com a peça até o final de seu curso.....	77
7.1 – Comparação do desenvolvimento da força em relação a penetração do punção desde o primeiro contato com o <i>billet</i>	80
7.2 – Comparação do desenvolvimento da força em relação à penetração do punção para o aço desde o primeiro contato com o <i>billet</i>	81

LISTA DE TABELAS

2.1 – Propriedades mecânicas do aço AISI 8640, variando com a temperatura em barras redondas de diâmetro de 13,5mm (partindo de 830°C e temperado em óleo).....	4
2.2 – Propriedades mecânicas do aço AISI 8640, variando com a temperatura em barras redondas de diâmetro de 25mm (partindo de 830°C e temperado em óleo).....	5
2.3 – Propriedades mecânicas típicas do aço AISI 4340 (partindo de 845°C para ser temperado em óleo e revenido em várias temperaturas).....	5
2.4 – Variáveis que influenciam na precisão de peças forjadas.....	17
2.5 – Perda de dureza de quatro aços ferramenta em elevadas temperaturas.....	22
2.6 – Composição química dos aços ferramenta ao cromo para trabalho a quente.....	23
6.1 – Etapa de forjamento da pré-forma de cobre.....	70
6.2 – Etapa de extrusão da pré-forma de cobre.....	71
6.3 – Etapa de forjamento da pré-forma da broca de aço.....	75
6.4 – Etapa de extrusão da pré-forma da broca de aço.....	76
7.1 – Comparação entre os dois processos para a obtenção da mesma pré-forma.....	78
7.2 – Comparação de dimensões para a formação completa da cavidade da pré-forma.....	82

LISTA DE SÍMBOLOS

A	<i>constante para construção da curva de escoamento a quente</i>
C	<i>coeficiente de resistência, [MPa]</i>
D_b	<i>diâmetro externo do billet após a penetração do punção abaixo da tira, [mm]</i>
$D_b + dD_b$	<i>diâmetro externo do billet após a penetração do punção acima da tira, [mm]</i>
D_{billet}	<i>diâmetro do billet, [mm]</i>
D_i	<i>diâmetro interno do billet abaixo da tira, [mm]</i>
$D_i + dD_i$	<i>diâmetro interno do billet acima da tira, [mm]</i>
$D_{punção}$	<i>diâmetro do punção, [mm]</i>
dS	<i>diferencial da largura da tira do lado da matriz</i>
dW	<i>diferencial da largura da tira do lado da matriz</i>
$d\sigma_z$	<i>diferencial da tensão axial na tira [MPa]</i>
F_z	<i>força axial na tira, [kN]</i>
h	<i>altura da tira, [mm]</i>
H_{billet}	<i>altura do billet, [mm]</i>
I_d	<i>incremento no diâmetro do punção, [mm]</i>
I_h	<i>incremento na altura, [mm]</i>
I_p	<i>incremento abaixo do punção, [mm]</i>
k_f	<i>tensão de escoamento, [MPa]</i>
L	<i>comprimento do forjado, [mm]</i>
$m1$	<i>constante de construção da curva de escoamento a quente</i>
$m2$	<i>constante de construção da curva de escoamento a quente</i>
$m3$	<i>constante de construção da curva de escoamento a quente</i>
$m4$	<i>constante de construção da curva de escoamento a quente</i>
n	<i>índice de encruamento</i>
R	<i>raio do punção, [mm]</i>
r	<i>variação do raio do punção [mm]</i>

T	<i>temperatura de forjamento, [°C]</i>
V	<i>volume, [mm³]</i>
V_f	<i>velocidade da ferramenta, [mm/s]</i>
α	<i>ângulo do punção, [rad]</i>
β	<i>ângulo de saída da matriz, [rad]</i>
φ	<i>deformação verdadeira</i>
$\dot{\varphi}$	<i>velocidade de deformação, [s⁻¹]</i>
μ_i	<i>coeficiente de atrito entre broca e punção</i>
μ_a	<i>coeficiente de atrito entre broca e punção</i>
μ_b	<i>coeficiente de atrito entre broca e matriz</i>
τ_a	<i>tensão cisalhante entre billet e punção, [MPa]</i>
τ_b	<i>tensão cisalhante entre billet e matriz, [MPa]</i>
σ_a	<i>tensão axial atuando entre billet e punção, [MPa]</i>
σ_b	<i>tensão radial atuante entre billet e matriz, [MPa]</i>
σ_R	<i>tensão radial, [MPa]</i>
σ_r	<i>tensão radial na tira, [MPa]</i>
σ_z	<i>tensão axial na tira, [MPa]</i>
σ_{eq}	<i>tensão equivalente, [MPa]</i>

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo mostrar a viabilidade da troca de processo de usinagem pelo processo de forjamento a quente na fabricação da cavidade interna da pré-forma de brocas de furação de rochas, onde se observa na comparação entre os processos uma menor perda de matéria prima na utilização do novo processo, o que caracteriza a viabilidade dessa mudança.

Foram realizados ensaios de forjamento para fabricação da cavidade da broca. Primeiramente, se utilizou um punção cônico, com um formato conveniente para forjar essa cavidade em materiais de fácil modelamento físico, como plasticina e gesso, pois estes materiais têm o comportamento similar ao do aço durante o processo de forjamento a quente. Os resultados foram satisfatórios, à medida que a cavidade foi formada por este processo com a realização de uma única etapa, com pouca perda de material através da formação de rebarba.

Em uma segunda etapa, foram feitos ensaios com cobre eletrolítico, que apresentam o comportamento ainda mais próximo ao aço no processo. Com os resultados obtidos nos ensaios com materiais de modelamento físico e a utilização da Teoria Elementar da Plasticidade para verificar a aproximação dos ensaios experimentais do cobre com cálculos matemáticos, foram obtidos melhores resultados, pois com a diminuição da altura inicial do *billet* se conseguiu a formação da cavidade e uma formação mínima de rebarba.

A partir dos resultados obtidos nos experimentos acima, foi possível otimizar o projeto do ferramental, tornando o mesmo adequado ao forjamento a quente da peça desejada, sendo esta confeccionada em aço AISI 8640. Variando-se a altura e o volume do *billet*, chegou-se a uma pré-forma ideal, onde se forjou a cavidade da peça, com um mínimo de rebarba. Este fato demonstrou a economia de material em relação a quantidade utilizada no processo atual (por usinagem).

ABSTRACT

The objective of this work is to show the viability of replacing machining process for hot forging process in the manufacturing of the internal cavity of drill bits of rocks, where it is observed, comparing the process, a less loss of raw material using a new process, what characterizes the viability of this change.

Forging tests were done to manufacture the drill cavity. At first, a conic punch was used, with a convenient format to forge this cavity in easy physical modeling materials, as plasticine and chalk, for these materials have a similar behavior as steel during the hot forging process. The results were satisfactory, while the cavity was formed by this process with only one stage, with less loss of material through flash formation.

In a second stage, tests with copper, that present a closer steel process behavior, were also done. With the results obtained in tests with physical modeling materials and in the use of the Elementary Plasticity Theory to verify the proximity of experimental copper tests with mathematical calculus, the best results were obtained, because with the reduction of the initial height of the billet, cavity formation and a minimum flash formation were got.

From the results obtained in the experiments above, it was possible to optimize the tooling project making it appropriate to the hot forging of the desired workpiece, manufactured with AISI 8640 steel. Varying the billet's height and volume, it approached to an ideal preform, where the workpiece cavity was forged, with minimum flash. This fact demonstrated the economy of material in relation to the quantity used in the current process (machining).

1. INTRODUÇÃO

O mercado atual de utilização de brocas de furação de pedras ornamentais vem aumentando exponencialmente seu consumo através da empresa fabricante de brocas de furação: a Rodopar (Salvador-BA); além de outras empresas no exterior. O mercado em potencial é a indústria metal-mecânica, que atua no setor de mineração e perfuração de rochas. As brocas de aço baixa liga do tipo AISI 8640, AISI 4340 e AISI 4140, que são as mais utilizadas na indústria de mineração, em geral são fabricadas através do processo de usinagem. Estes materiais que têm características de ótima temperabilidade mostram uma boa combinação de propriedades mecânicas com o mínimo de adição de elementos de liga.

Com a melhoria da qualidade do produto, o mercado tende a ser mais competitivo, pois os resultados indicarão para o crescimento do consumo das ferramentas, aumentando a atuação no segmento de perfuração de rochas na busca de petróleo e, conseqüentemente, um potencial exportador maior. Por ser um produto que está sob constantes solicitações mecânicas e cíclicas, muitas vezes a vida útil dessas brocas fica reduzida devido às falhas por fadiga ou desgaste mecânico, mostrando assim que o mercado necessita constantemente de peças de reposição e uso imediato.

Por isso, a melhoria proposta neste trabalho é a substituição do processo de usinagem na fabricação da cavidade interna da broca de furação de rochas pelo processo de forjamento a quente, visando a melhores propriedades mecânicas e a menor desperdício de material na fabricação da peça. O processo de forjamento transforma o material bruto em uma peça acabada com melhores propriedades mecânicas, alta qualidade e custo apropriado com maior valor agregado à peça.

Este trabalho tem como objetivo demonstrar as vantagens da troca do processo de usinagem, em que há a geração de cavaco com um considerável desperdício de matéria-prima, pelo forjamento a quente na fabricação da pré-forma, diminuindo o desperdício de material e o custo de usinagem. Com um *billet* inicial de altura menor em relação ao utilizado no início do processo de usinagem, obtém-se a cavidade desejada com redução de matéria-prima e, ainda, com melhores propriedades mecânicas. Além dos estudos preliminares com materiais de modelamento e fácil deformação, empregou-se finalmente o uso do aço AISI 8640 que possui uma excelente forjabilidade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de Forjamento a Quente

Os produtos metálicos semi-acabados não alongados, geralmente, são fabricados através da conformação mecânica por meio de processos como o forjamento a quente. Neste processo, têm-se etapas como a de aquecimento, que visa à homogeneização da microestrutura para, em seguida, nas etapas de deformações, o produto se transformar de uma geometria simples para um outro de geometria complexa. Esta transformação ocorre através de matrizes e punções de penetração que determinam a geometria do produto [1].

Para se obter uma visão do processo de forjamento e os parâmetros de necessário conhecimento, é importante ter o conhecimento de conceitos básicos relacionados a este processo, como: tensões, deformações, velocidade de deformação, temperatura, curva de escoamento, coeficiente de atrito, entre outros parâmetros [2]. Na figura 2.1, se observam os principais parâmetros envolvidos no processo de forjamento.

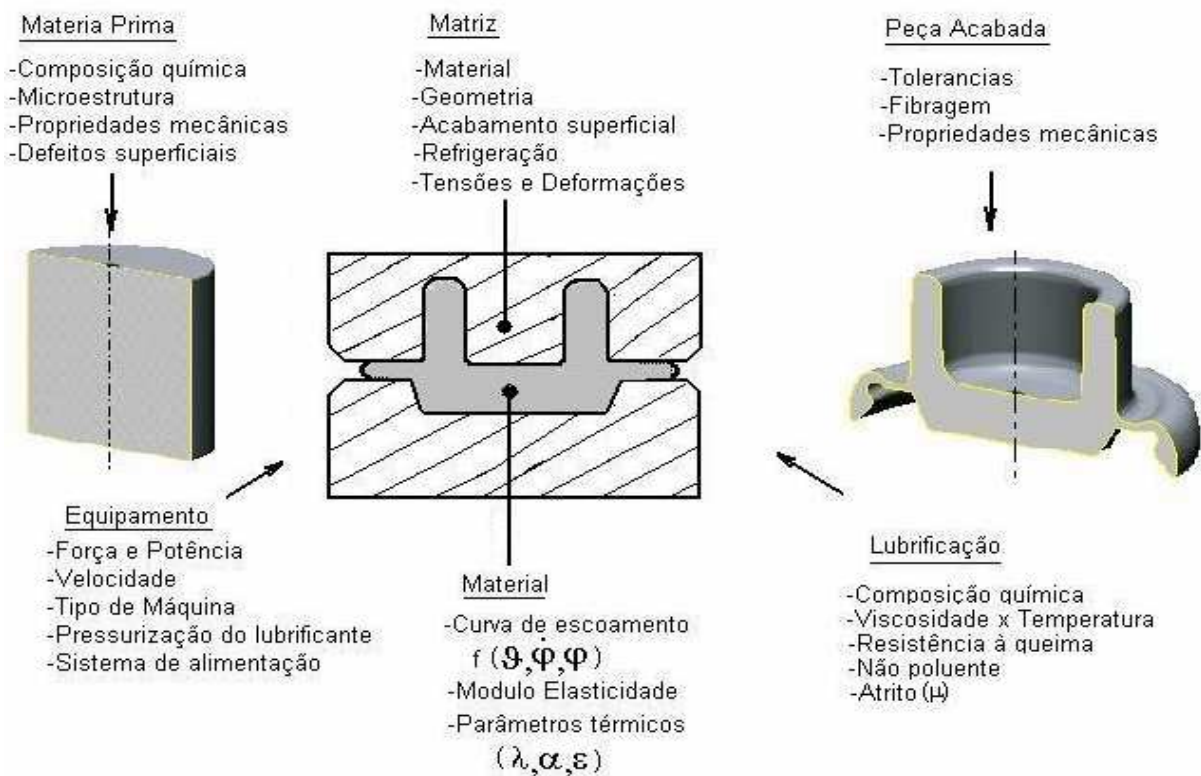


Figura 2.1 – Principais parâmetros envolvidos no processo de forjamento [2].

Os elementos envolvidos neste processo (matrizes, punções, material a ser forjado) e suas características, para que as operações práticas de forjamento a quente ocorram com o mínimo de defeitos internos e externos na peça, devem assegurar o preenchimento e fluxo adequado de material na matriz em que está sendo forjado. Para que isso ocorra de forma otimizada, deve-se ter o conhecimento da resistência do material ao escoamento plástico e sua capacidade de fluir, isto é, sua tensão de escoamento, sua forjabilidade, o atrito, os efeitos do resfriamento no contato entre a matriz, o punção e o material que está sendo forjado [3]. Na figura 2.2, observa-se um tarugo de tamanho controlado sendo deformado por um punção a fim de preencher a cavidade da matriz bi-partida com a mínima perda de material, caracterizando o que foi citado a respeito do processo.

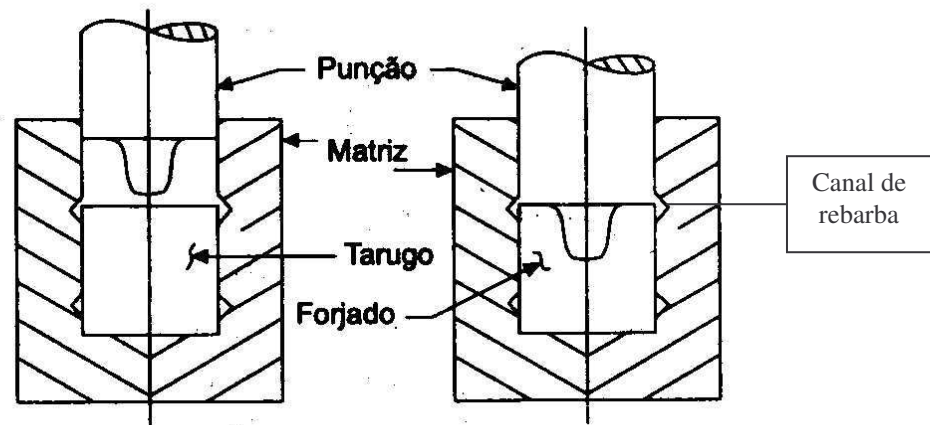


Figura 2.2 - Tarugo de tamanho controlado sendo deformado por um punção em uma matriz bi-partida [3].

Algumas das principais vantagens do processo de forjamento a serem consideradas na utilização desse processo para fabricação de peças são: elevada resistência direcional, integridade e uniformidade estruturais, redução em usinagem requerida, economia de matéria-prima e peso de material forjado [4, 5].

2.1.1 Aços Baixa Liga Para o Processo de Forjamento a Quente

A procura por materiais metálicos com qualidade, economia de energia no processo e menor perda de matéria-prima são fatores que as indústrias têm procurado utilizar de forma conjunta, ou seja, formas de peças almejadas e projetadas, forjadas a quente, com a maior proximidade do resultado final. Geralmente, este processo exige, após a sua realização, uma seqüência de tratamentos térmicos para adquirir propriedades desejadas. Com isso, é relevante

a evolução microestrutural durante a deformação, pois influencia diretamente nas características finais do material. E, dependendo do tipo de deformação, das variáveis envolvidas, como temperatura, carga aplicada, funções de alguns elementos de liga e forma da granulação após o processo de conformação, a etapa de tratamento térmico posterior ao processo pode ser eliminada, mostrando uma viabilidade econômica maior para o processo [6].

Os aços do tipo baixa liga são muito utilizados quando se procura a fabricação de peças, como: brocas, engrenagens, eixos, bielas e virabrequins, através do processo de transformação mecânica por forjamento. Isto ocorre devida à sua combinação de características de ter, por exemplo, boa dureza, misturada com propriedades de resistência ao desgaste e à fadiga ao mesmo tempo [7, 8].

A melhor forma de caracterizar os aços de baixa liga, convenientes para a fabricação de peças, através do forjamento, é pelas propriedades existentes no material. No caso do aço AISI 8640, este tem as características de fornecer ótima temperabilidade e uma boa combinação de propriedades com o mínimo de adição de elementos de liga [9, 10, 11]. Este aço é aquecido a temperaturas acima de 1200°C para ser forjado. Mas, usualmente, o processo ocorre entre 1175° e 950°C devido à perda de calor ao sair do forno, ou seja, há conseqüente diminuição de temperatura do material. Após o processo, há um resfriamento lento, caracterizando o recozimento antes de qualquer processo de usinagem necessário para acabamento final [12]. Nas tabelas 2.1 e 2.2, aparecem as alterações de propriedades mecânicas do aço AISI 8640, de acordo com a variação de temperatura e variação de diâmetro das peças.

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas do aço AISI 8640, variando com a temperatura em barras redondas de diâmetro de 13,5mm (partindo de 830°C e temperado em óleo) [12].

Temperatura de revenido, °C	Limite de resistência a tração, MPa	Limite convencional de escoamento, MPa	Alongamento em 50mm, %	Redução em área, %	Energia do golpe (em ensaio de choque), J	Dureza HRC
205	1810	1670	8,0	25,8	11,5	55
315	1585	1430	9,0	37,3	15,6	48
425	1380	1230	10,5	46,3	27,8	44
540	1170	1050	14,0	53,3	56,3	37
650	870	760	20,0	61,0	96,3	28

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas do aço AISI 8640, variando com a temperatura em barras redondas de diâmetro de 25mm (temperado em óleo desde 830°C) [12].

Temperatura de revenido, °C	Limite de resistência a tração, MPa	Limite convencional de escoamento, MPa	Alongamento em 50 mm, %	Redução em área, %	Energia do golpe (em ensaio de choque), J	Dureza, HRC
425	1382	1230	10	46	27	44
480	1250	1120	13	51	41	42
540	1070	940	17	56	54	36
595	1020	910	16	57	73	32
650	865	760	20	61	83	28

O aço baixa liga AISI 4340, com propriedades similares ao AISI 8640, pode ser utilizado em diversas formas iniciais para processo de fabricação, como: *billets*, seções redondas ou barras de seção circular, forjados e alguns outros tipos, como: chapas e soldagem ao arame. Com isso, sua aplicação é vasta na fabricação de parafusos com porcas e parafusos sem porcas, engrenagens, pinos, eixos, componentes de máquinas e motores, como: virabrequins e pistões. Na tabela 2.3, são observadas as variações de propriedades de acordo com a variação de temperatura [12].

Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas típicas do aço AISI 4340 (partindo de 845°C para ser temperado em óleo e revenido em várias temperaturas) [12].

Temperatura de revenido, °C	Limite de resistência a tração, MPa	Limite convencional de escoamento, MPa	Alongamento em 50mm, %	Redução em área, %	Energia do golpe (em ensaio de choque), J	Dureza, HRC
205	1980	1860	11	39	20	53
315	1760	1620	12	44	14	49,5
425	1500	1365	14	48	16	46
540	1240	1160	17	53	47	39
650	1020	860	20	60	100	31
705	860	740	23	63	102	24

2.2 Processo de Extrusão

O processo de extrusão pode ser considerado um processo interessante, quando se tem o objetivo da obtenção de pequenas peças através deste processo da conformação mecânica. Mas, em especial, a extrusão a quente também é uma alternativa, quando o nível de força ou de deformação é extremamente alto. Neste caso, perde-se em precisão e, devido ao aquecimento, surge a carepa, originando uma superfície rugosa, ocasionando, em alguns casos, a necessidade de uma usinagem posterior [2].

A extrusão é um processo utilizado para a fabricação de peças como: tubos e cavidades. A extrusão se dá através da utilização de punções, penetrando de forma direta ou indireta em *billets* sólidos e circulares [13, 14].

O estado de tensões e deformações na fabricação de peças com formas vazadas, através do processo de extrusão, influenciadas por alguns parâmetros, como: a forma das matrizes e punções, as condições de atrito e as propriedades mecânicas do material que será deformado [13].

A extrusão é utilizada em deformação de materiais metálicos no estado plástico. Com isso, considera-se, para esse processo, a conformação de peças como tubos e perfis complicados tanto de aços como de metais leves. Este processo, basicamente, subdivide-se em dois processos: extrusão direta e extrusão indireta [15].

2.2.1 Extrusão Direta

Neste processo, um punção ou um êmbolo move-se na mesma direção da seção extrudada. Um tarugo ou peça de seção cilíndrica servem como exemplo para uma peça que é aquecida e extrudada pela força de um punção ou um êmbolo que é empurrado contra a peça. Com isso, através de uma matriz e um local de saída do material, como um orifício abaixo da peça, ocorre a saída de forma direta do material extrudado [15]. Na figura 2.3, são mostrados os componentes necessários para a extrusão de forma direta de um bloco de metal.

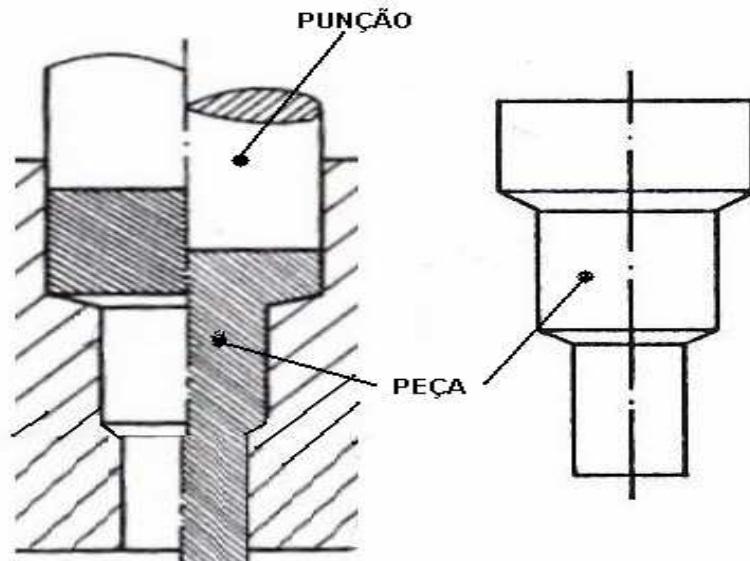


Figura 2.3 – Processo de extrusão direta [15].

2.2.2 Extrusão Indireta

A extrusão indireta é um processo com considerável economia de matéria-prima, tendo em vista que quase não há perdas por usinagem ou rebarbas, quando comparado com outros processos. Além da economia, mostra excelentes propriedades mecânicas devido a uma microestrutura formada por uma fibragem contínua do material [2]. Na figura 2.4, é observado o modo como algumas peças são obtidas por extrusão indireta, através da penetração de um punção.

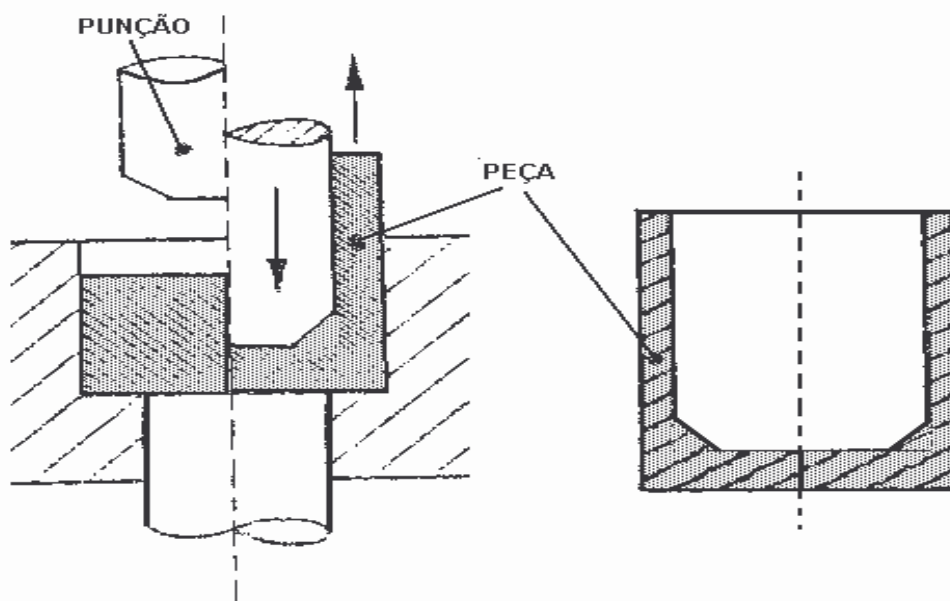


Figura 2.4 – Peças obtidas por extrusão indireta [2].

O forjamento de formas redondas em matriz fechada com rebarba tem, em muitos casos, situações em que trabalha em conjunto com a extrusão indireta, pois os dois processos podem aparecer na fabricação da mesma. Nos dois casos, o material, que é deformado por um punção, é recalçado, considerando que o material remanescente escoar em direção ao canal de rebarba pelas paredes da cavidade da matriz, que está em contato com a peça que está sendo deformada [16].

Uma peça, que é deformada dentro de uma cavidade com certa angulação de saída para a extrusão do material de forma inversa durante o processo e com canal de rebarba para o alojamento de material, mostra a possibilidade de, no mesmo processo, aparecer o forjamento e a extrusão indireta. Na figura 2.5, é observada uma situação característica da ocorrência dos dois processos, pois, quando o punção penetra na peça, a extrusão inversa é caracterizada pelo material, escoando pelas paredes da matriz de forma indireta ao processo. E o forjamento ocorre na parte em que o punção pressiona a partir do primeiro contato com a peça, logo abaixo dele próprio e nos canais de rebarba [16].

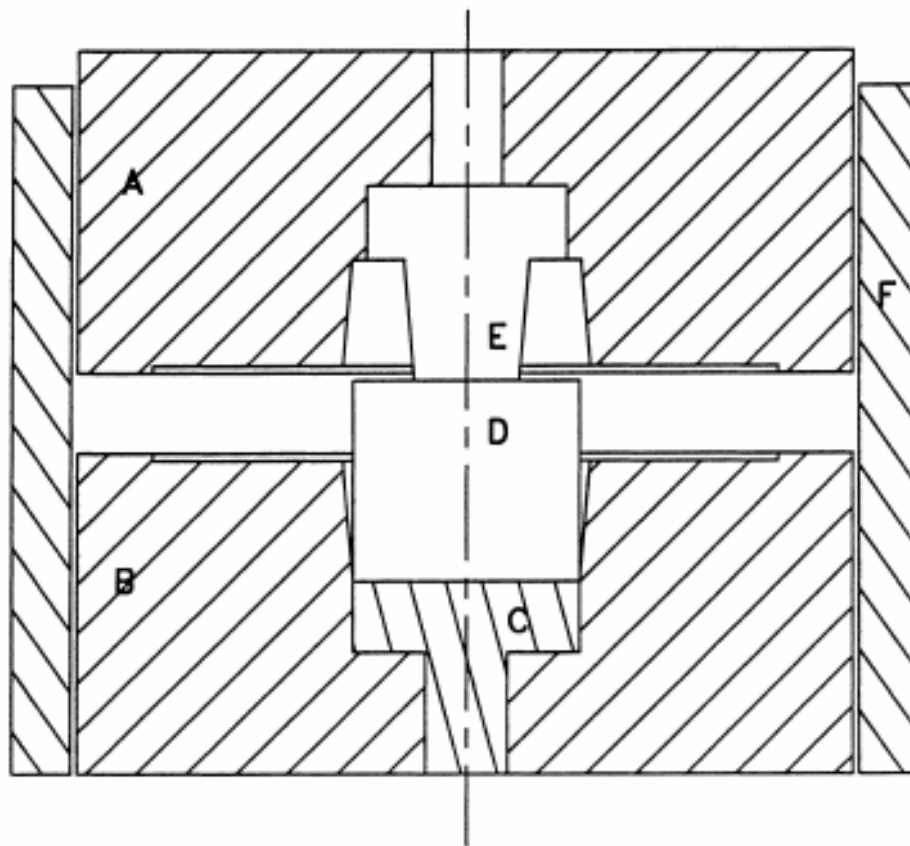


Figura 2.5 – Processo de extrusão indireta (Componente A: Matriz superior; Componente B: Matriz inferior; Componente C: Extrator; Componente D: *Billet*; Componente E: Punção) [16].

Na figura 2.6, observa-se o início da penetração do punção na peça, caracterizando o processo de forjamento no contato entre a parte inferior do punção e parte superior da peça. E na figura 2.7, é observada a continuação desse processo de penetração do punção com o material subindo de forma contrária à penetração do punção, entre as paredes da matriz e a parte lateral do punção, caracterizando o processo de extrusão indireta [17].

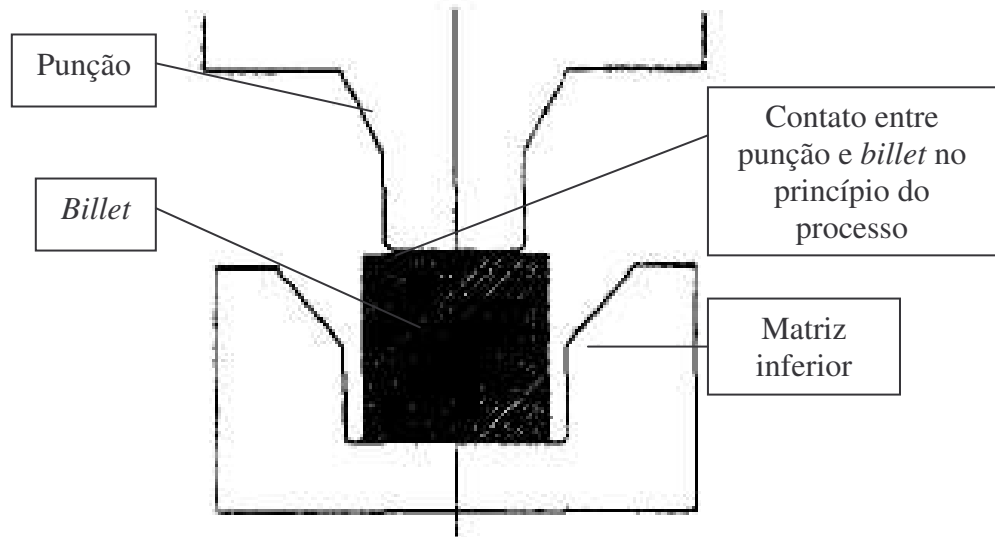


Figura 2.6 – Início da penetração do punção caracterizando o processo de forjamento no contato inicial entre o punção e o *billet* [17].

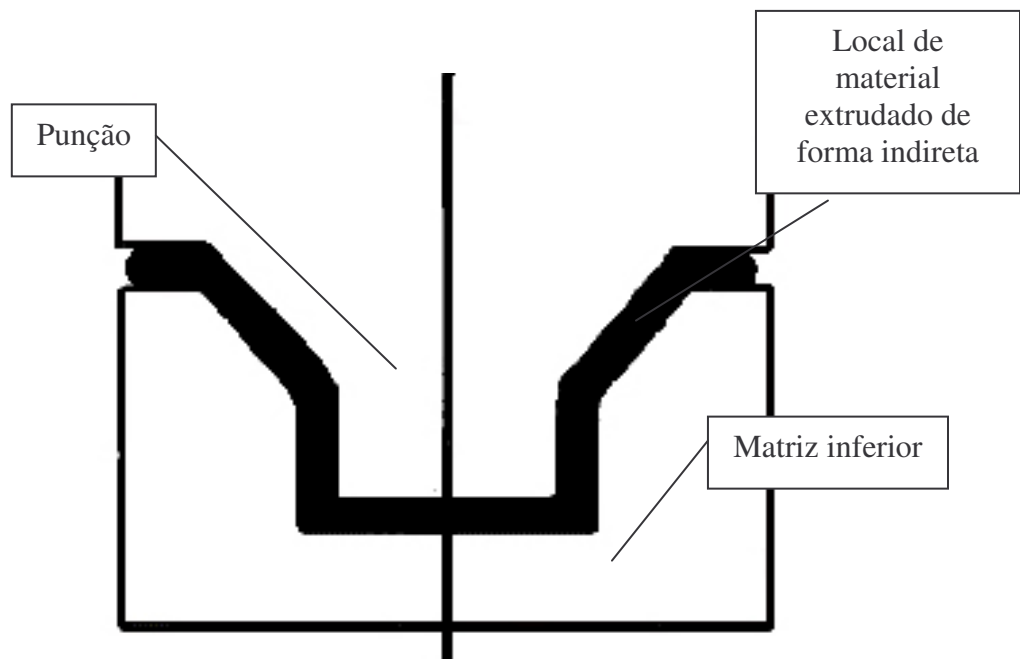


Figura 2.7 – Demonstração do processo de extrusão indireta com o material extrudado entre as paredes da matriz e o punção [17]

2.2.3 Combinação de Extrusão Direta e Indireta na Fabricação de Peças

O processo de extrusão pode ser utilizado na fabricação de peças de simetria axial, partindo do princípio do ensaio com um *billet* cilíndrico, utilizando em duas etapas a extrusão de forma direta e indireta respectivamente [18]. Nas figuras 2.8, 2.9, 2.10 e 2.11, é observada a seqüência de fabricação de uma peça cilíndrica que passa pelo processo de extrusão direta e extrusão indireta até obter seu formato final. Na figura 2.13, é observada a obtenção de um componente através da combinação dos processos de extrusão direta e indireta.



Figura 2.8 – *Billet* cilíndrico utilizado no processo de extrusão [18].

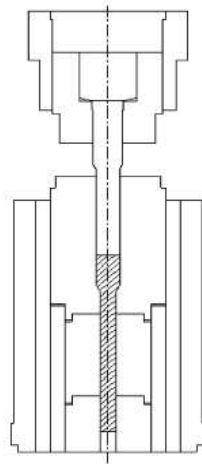


Figura 2.9 – Peça sendo extrudada de forma direta [18].



Figura 2.10 – Peça extrudada de forma direta [18].

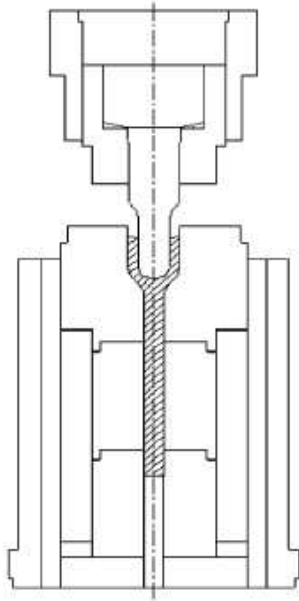


Figura 2.11 – Peça sendo extrudada em uma segunda etapa de forma indireta [18].

Na figura 2.12, é observado o resultado da seqüência de processos de extrusão citados anteriormente.



Figura 2.12 – Peça final extrudada de forma indireta [18].

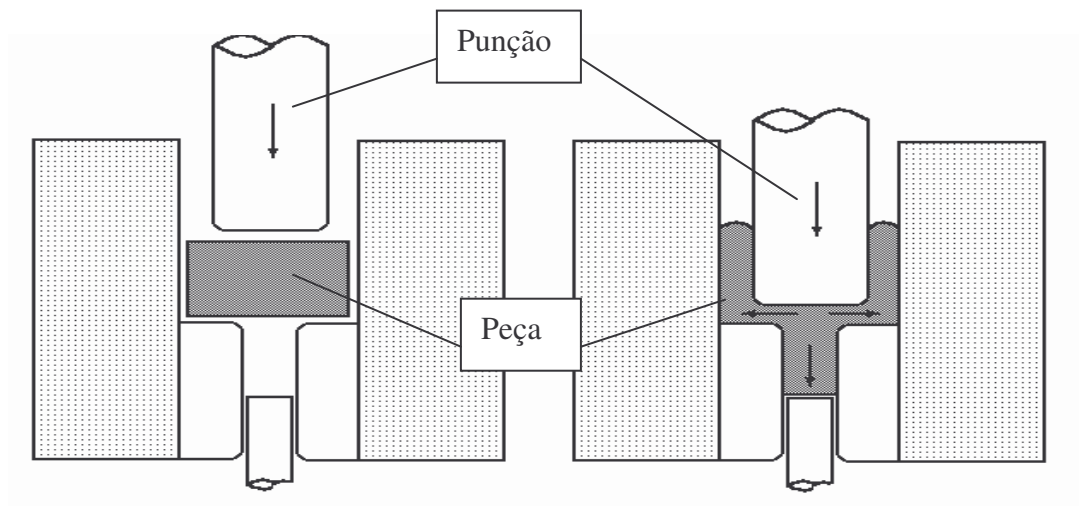


Figura 2.13 – Processos de extrusão direta e indireta combinados.

2.3 Avaliação de Peças Forjadas e Extrudadas com Simetria Axial

A seqüência do desenho de peças com simetria axial para forjamento a quente e extrusão tem como um de seus métodos de análise a técnica de modelamento físico, utilizando materiais de fácil deformação, como: plasticina, gesso, chumbo e cobre, através da similaridade do comportamento desses materiais, quando forjados e extrudados à temperatura ambiente, com o aço nos processos de forjamento e extrusão a quente. Com isto, é possível a realização de ensaios comparativos entre o comportamento desses materiais e o aço, para depois de obtidos os resultados desses ensaios, e avaliado o comportamento desses materiais, desde o início até o final do processo de forjamento e extrusão, facilitar o projeto do ferramental, que será utilizado no processo de forjamento a quente do aço [17].

Pelos motivos citados acima, os resultados obtidos, através da simulação física com estes materiais de fácil modelamento e os resultados de uma simulação, através da teoria dos elementos finitos, são convenientes para reduzir ou evitar o desperdício de material e tempo no projeto de ferramental [17, 20, 23].

2.3.1 Avaliação de Peças Forjadas e Extrudadas com Simetria Axial Através do Modelamento Físico com Plasticina

Com a utilização do modelamento físico e a observação dos estágios intermediários, através do preenchimento de material nas matrizes com a conseqüente formação da peça, é possível avaliar e prever alguns problemas e defeitos, que venham a ocorrer na seqüência do processo de forjamento posterior, com o aço. Esta avaliação e previsão de problemas podem ser analisadas pelos seguintes pontos: quantidade de rebarbas no final do processo; falta de preenchimento devido ao volume incorreto no início do processo; problemas na geometria da peça; e custo para refazer e redesenhar o ferramental. Para isto, o modelamento físico é considerado apropriado, pois é uma técnica experimental, comprovada através de diversos estudos realizados, já que mostra o comportamento da plasticina, um material fácil de deformar e relativamente barato em relação ao aço no processo de forjamento a quente e que, conseqüentemente, facilita o projeto do ferramental [17, 19].

Para a realização de ensaios experimentais de comparação entre peças forjadas e extrudadas de simetria axial, um *billet* de forma cilíndrica, constituído de plasticina, depois de

formado com a utilização de um tubo cilíndrico e polido, com as medidas apropriadas para fazer uma comparação com o *billet* do processo para o ensaio de forjamento de aço, segue o seguinte procedimento para posterior ensaio: a peça é guardada em um pote no congelador de uma geladeira doméstica durante duas horas e depois é deixada ao ar durante 24 horas antes dos experimentos [17].

A plasticina é utilizada para se avaliar, através de seus resultados visíveis de deformação no material, após o ensaio de forjamento, as possibilidades de como o aço vai ser deformado e em quais pontos ele pode ser mais exigido, considerando a comparação de processos, ou seja, ensaios com plasticina, e a utilização de seus resultados para posterior forjamento de aço. Assim, é possível a observação da deformação de diferentes geometrias e outros parâmetros do processo, que podem ser fornecidos para a indústria [20, 21, 22]. A figura 2.14 mostra dois cilindros de plasticina, confeccionados para posterior ensaio.

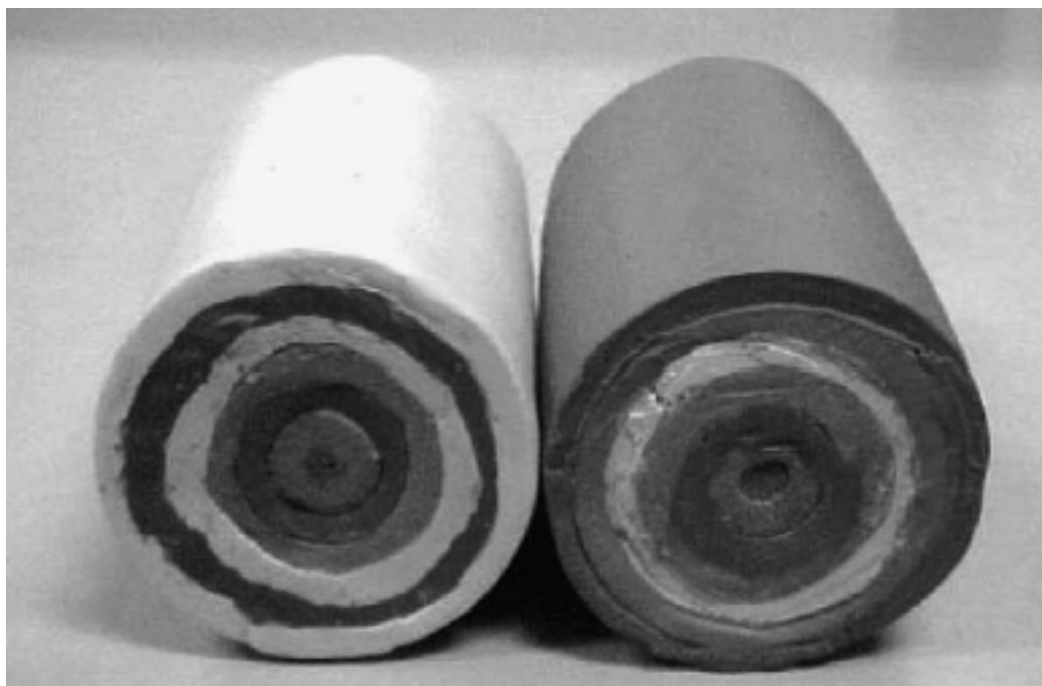


Figura 2.14 – Cilindros de plasticina confeccionados para posterior ensaio [20].

2.3.2 Avaliação de Peças Forjadas e Extrudadas com Simetria Axial Através da Teoria dos Elementos Finitos

Outro modo de comparação com os resultados práticos de ensaio, para demonstrar através do computador o que ocorrerá na prática, é a teoria dos elementos finitos que serve como alternativa para evitar perdas para a indústria [20].

Propriedades e defeitos também são observados na análise por elementos finitos, para simular as operações de forjamento, entre outras razões; isto se dá devido à evolução das capacidades de análises do processo por computador, o que permite rápidas observações de componentes com geometrias complexas. Isto gera grande economia de energia e tempo, bem como a prevenção do desenvolvimento de vazios e trincas, melhorando assim as características do produto final [20].

Os métodos numéricos de otimização do processo de forjamento a quente, como elementos finitos, são utilizados de forma eficiente, com o mesmo intuito do modelamento físico, para prever e eliminar a formação de defeitos na peça que está sendo conformada, buscando um melhor aproveitamento do processo, eliminando perdas de material, energia e tempo. Para o êxito do aproveitamento do processo, um método numérico por elementos finitos é aplicado, a fim de eliminar etapas de tentativa e erro, eliminar as falhas de processo e prever defeitos que ocorrerão no processo entre corpo de prova e matrizes, para sua melhoria. Esta busca por melhoria de processo, através da eliminação de algumas falhas durante o forjamento, não está envolvida somente com a forma inicial do *billet*, mas também leva em consideração as propriedades mecânicas da peça e o desenho da própria matriz [24, 25, 26].

Outra avaliação que pode ser feita nos estágios intermediários, através do método de elementos finitos, é a distribuição de pressão através da direção radial. Podem-se, também, analisar as tensões residuais do processo em peças de simetria axial forjadas a quente. As tensões residuais nos produtos forjados afetam diretamente a estabilidade do material, a resistência à deformação, a precisão e a fadiga que ocorre nos produtos. Esta simulação é um mecanismo alentador para engenheiros da área industrial, pois ajuda a diminuir razoavelmente o método de “tentativa e erro” no desenho de matrizes e no desenho das peças a serem forjadas, bem como a previsão dos estágios intermediários do forjamento [27]. Na figura 2.15, é observada a forma de simulação numérica, por meio de um modelo de elementos finitos, que é utilizado no cálculo do forjamento, através da divisão da matriz e do corpo de prova em malhas hexaédricas.

Em linhas gerais, a metodologia, utilizando a teoria dos elementos finitos, consiste em discretizar a peça a ser deformada em um número finito de elementos, minimizar o variacional representativo da energia envolvida na conformação e seguir as etapas necessárias

de avaliação do processo de conformação, observando a velocidade, as tensões e deformações para cada nó da malha [28].

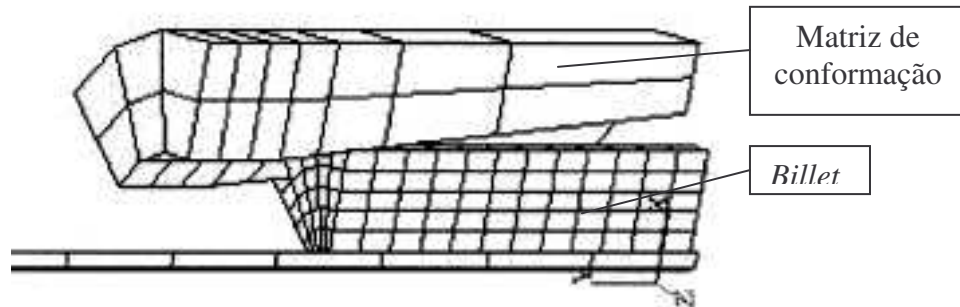


Figura 2.15 – Modelo de elementos finitos para simulação de forjamento em simetria axial [27].

Na figura 2.16, observa-se uma peça discretizada com o detalhe para os nós de malha utilizada no método de elementos finitos.

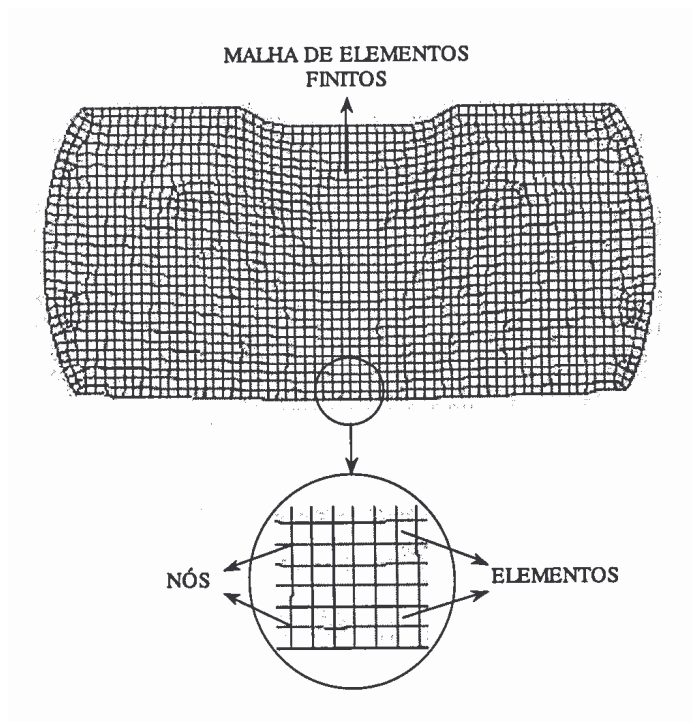


Figura 2.16 – Peça discretizada por elementos finitos [28].

No forjamento de uma peça com simetria axial, por meio da penetração de um punção de forma cônica, é possível, com as malhas resultantes do processo de elementos finitos, verificar a causa da falha em uma matriz inferior. Na figura 2.17, observa-se a seqüência de

etapas para o forjamento do componente de simetria axial, através do recalçamento da peça e das etapas de formação da peça por penetração do punção e da matriz superior; e na figura 2.18 observa-se o detalhe da etapa final de forjamento, mostrando a falta de preenchimento na matriz inferior, caracterizando o benefício desse processo de simulação [28].

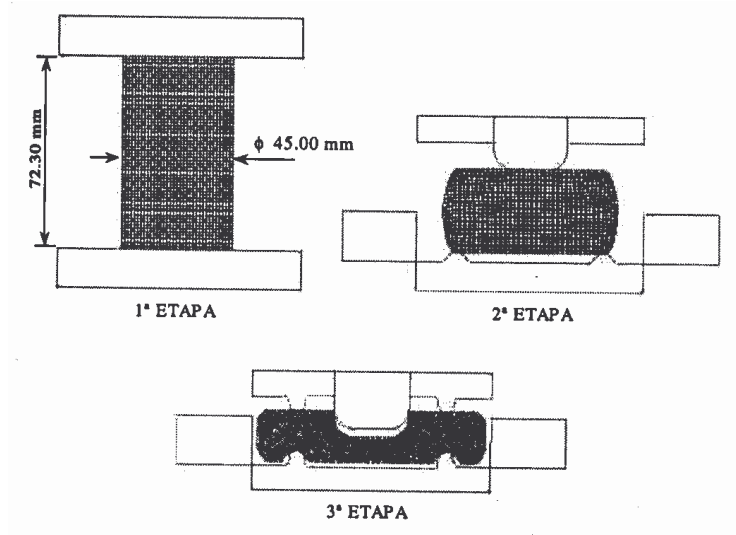


Figura 2.17 – Sequência de etapas para o forjamento do componente [28].

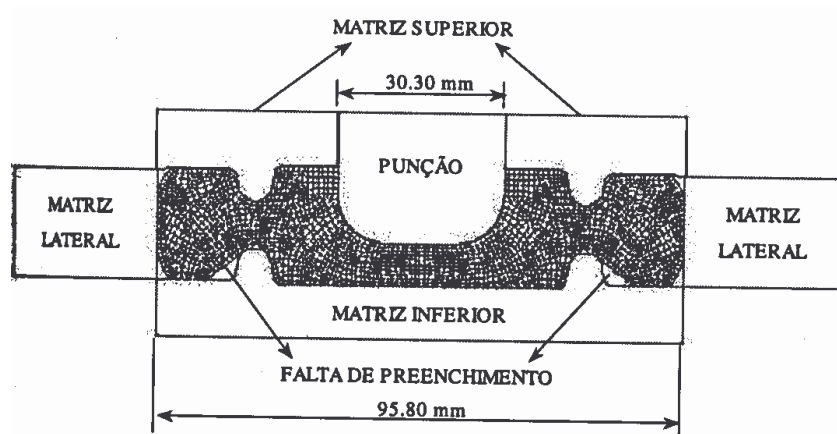


Figura 2.18 – Final da última etapa de forjamento mostrando falta de preenchimento [28].

2.4 Precisão de Peças Forjadas a Quente

Novas ferramentas têm mostrado a possibilidade de simular e controlar o processo de forjamento de um modo que não se imaginava possível no passado. Como resultado, tem-se a possibilidade de precisão de peças forjadas a quente que, antigamente, acreditava-se ser possível somente com forjados a frio. A precisão de peças forjadas a quente é afetada por

muitas variáveis que são, principalmente, classificadas de modo que possam ser modificadas antes do processo de forjamento, durante e depois que este estiver completo [29]. Na tabela 2.4, são citadas as variáveis que influenciam na precisão de peças forjadas.

Tabela 2.4 – Variáveis que influenciam na precisão de peças forjadas [29].

Antes do forjamento	Durante o forjamento	Depois do forjamento
<ul style="list-style-type: none"> - Material do <i>billet</i> - Medidas do <i>billet</i> - Forma do <i>billet</i> - Precisão de fabricação das matrizes - Polimento da cavidade da matriz - Deformação elástica na matriz <ul style="list-style-type: none"> - Desenho das matrizes - Seqüência de forjamento <ul style="list-style-type: none"> - Tipo de prensa - Carga e energia requerida pelo processo 	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura do <i>billet</i> - Tensão de escoamento <ul style="list-style-type: none"> - Carepa formada - Contração do material <ul style="list-style-type: none"> - Volume do <i>billet</i> - Lubrificação - Temperatura das matrizes - Desgaste das matrizes 	<ul style="list-style-type: none"> - Rebarbação - Tratamento térmico <ul style="list-style-type: none"> - Processo de resfriamento - Processo de limpeza <ul style="list-style-type: none"> - Retificação final - Usinagem final

Antes do forjamento, os elementos considerados no processo são: o material, as dimensões e a forma da peça que vai ser forjada. O conhecimento das características do material que vai ser forjado é de primordial importância para a precisão do processo. A tensão de escoamento desse material é a principal característica a ser considerada. Entretanto, a composição do material, a microestrutura e o histórico de processos primários desse material também afetam a sua forjabilidade. E, obviamente, a precisão na fabricação da matriz é impactante na precisão do processo [29].

A lubrificação, durante o processo de forjamento é um fator de extrema importância porque reduz o atrito na interface entre a matriz e o corpo de prova que está sendo conformado. Esta redução do atrito será necessária para a diminuição da carga aplicada, redução do desgaste da matriz e auxiliará no preenchimento da cavidade [29]. Este contato com a matriz, durante o processo, a avaliação da condição de atrito por deslizamento na interface peça-ferramenta consideram a tensão cisalhante (a interface) em relação à tensão normal a interface [30].

Quando se comenta a respeito de forjamento de precisão, a intenção é mostrar uma saída econômica para a produção de peças próximas à forma final ou do produto acabado cuja denominação é *near net shape*. Isto visa à diminuição ou, às vezes, à eliminação do processo de usinagem, quando se fala em produção de peças mais leves e de geometrias complexas. Conseqüentemente, tem-se menor tempo de produção, pois há a possibilidade de eliminar etapas como a rebarbação e a usinagem final, economizando tempo, energia, material e mão-de-obra para a obtenção da peça acabada [31].

Para um eficiente aproveitamento do processo com menor perda de energia, processo sem rebarba ou quase sem, eliminação do processo de usinagem, diminuição de carga aplicada para benefício da prensa, redução da demanda de dependência de habilidade do forjador, a automatização do processo é uma alternativa bastante aplicável na busca por aproveitamento e precisão de processo. Para isso, a posição, a velocidade e a pressão aplicada de punções e matrizes podem ser preparadas para os ensaios de forjamento, individualmente, para posterior aproveitamento de prensa. Na figura 2.19, são observados os elementos necessários para forjar uma peça com intuito de preencher a matriz, sem sobra de material [32].

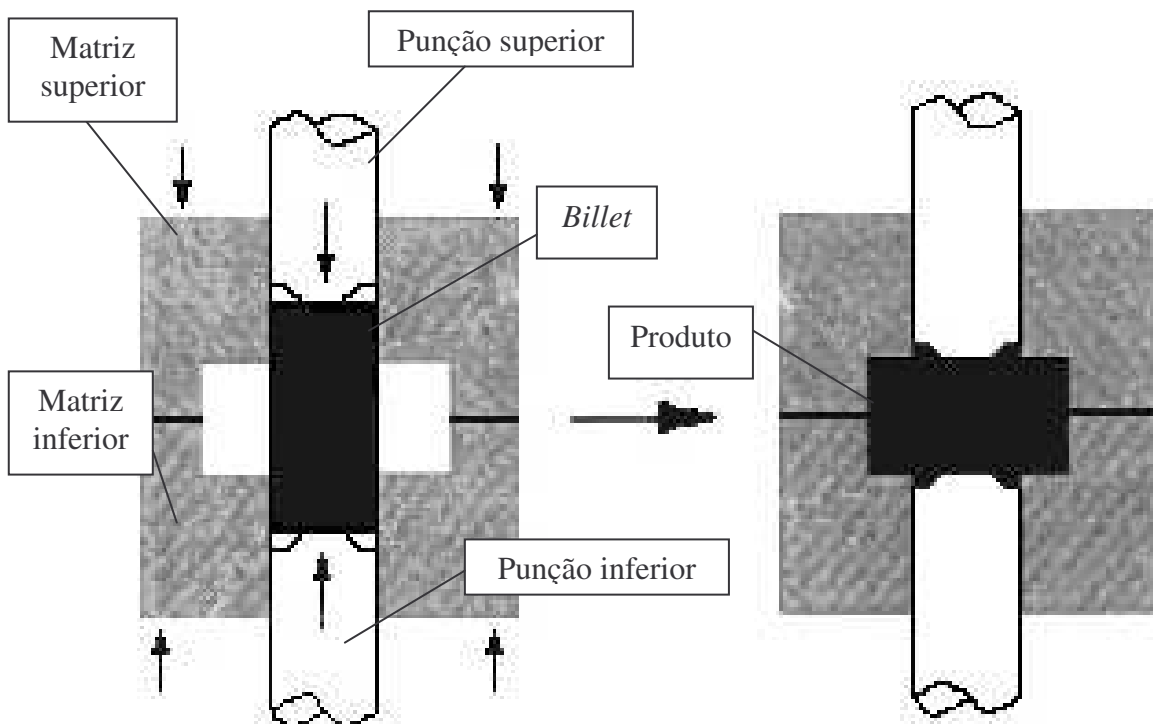


Figura 2.19 – Corpo de prova sendo forjado e preenchendo todo o espaço, mostrando aproveitamento de material com precisão do processo [32].

2.5 Matrizes Utilizadas no Processo de Forjamento a Quente

Os materiais das matrizes de forjamento são denominados, na área da metalurgia, como aços-ferramenta para matrizes. O aço, como produto industrial, é uma liga ferro-carbono na qual se adicionam elementos de liga com o propósito de se alcançarem propriedades especiais que o deixem em condições de uso dentro dos objetivos para os quais foi fabricado. Os elementos de liga mais usuais são: cromo, níquel, tungstênio, vanádio, molibdênio, cobalto, manganês, silício, alumínio, fósforo, enxofre, entre muitos outros. É a variedade desses elementos nos aços que permite a formação de diferentes tipos de aços [33].

Os aços conhecidos como aços-ferramenta destinam-se à transformação de outros materiais. São aqueles utilizados nas operações de corte, conformação, afiação e quaisquer outras relacionadas à modificação de um material para uma forma pretendida. Estes aços caracterizam-se pela sua elevada dureza e resistência à abrasão, geralmente associadas à boa tenacidade e manutenção das propriedades de resistência mecânica em elevadas temperaturas. Estas características, normalmente, são obtidas com a adição de elevados teores de carbono e ligas, como tungstênio, molibdênio, vanádio, manganês e cromo [33].

Desde o princípio da utilização de uma matriz até sua falha, deve-se levar em consideração os principais modos de desgaste: erosão, em que o material é removido da superfície da matriz por pressão e deslizamento durante o processo de forjamento; fadiga térmica e mecânica (abrasão), que são consequência do carregamento cíclico até o limite de escoamento da superfície da matriz, devido ao contato com o material aquecido em deformação; quebra ou trinca de matrizes, que ocorrem devido à fadiga mecânica e em casos nos quais a matriz é sobrecarregada, gerando tensões locais elevadas; e, por fim, deformação permanente (plástica) [3].

O desgaste é uma mudança gradual nas dimensões ou no formato de um componente causado por corrosão, dissolução, abrasão e remoção ou transporte de produtos de desgaste. A abrasão resultante do atrito é o mais importante destes mecanismos em termos de desgaste de matrizes. Quanto maior o limite de tração e a dureza de um aço próximo à superfície da matriz, maior a resistência à abrasão. Portanto, em conformação a quente, o aço da matriz deverá ter resistência à deformação plástica: uma alta dureza a quente. E ser capaz de mantê-la por longos períodos de exposição a elevadas temperaturas [34].

A matriz deve ser fabricada a partir de materiais apropriados, a fim de fornecer uma vida aceitável a um custo razoável. Frequentemente, o sucesso econômico de um processo de conformação depende da vida da ferramenta e do custo por peça produzida. A seleção adequada do material da matriz e da técnica de fabricação determina, de forma geral, a vida útil de serviço da ferramenta de conformação, evitando, ao máximo, reparo e substituição das matrizes [3].

O estudo de melhorias da vida de ferramentas de forjamento, como matrizes e punções, é importante quando se visualiza o âmbito econômico no sentido de diminuir custos com o aumento da produção e um menor número de substituição e reparos desses tipos de ferramentas. A análise de falhas é requisito básico para observações de problemas a serem corrigidos e para futuros ganhos de produção, pois envolve o ajuste de condições de forjamento de materiais utilizados e de seu processamento, além de melhorias de projeto de ferramentas. O modo de falha de uma ferramenta de forjamento a quente depende de suas condições de utilização, das características do material e das características da superfície. Os modos de falha característicos desses materiais são: o desgaste abrasivo, a fadiga térmica, a fadiga mecânica e a deformação plástica [35]. Na figura 2.20, observam-se os modos de falha em uma ferramenta comum de forjamento a quente.

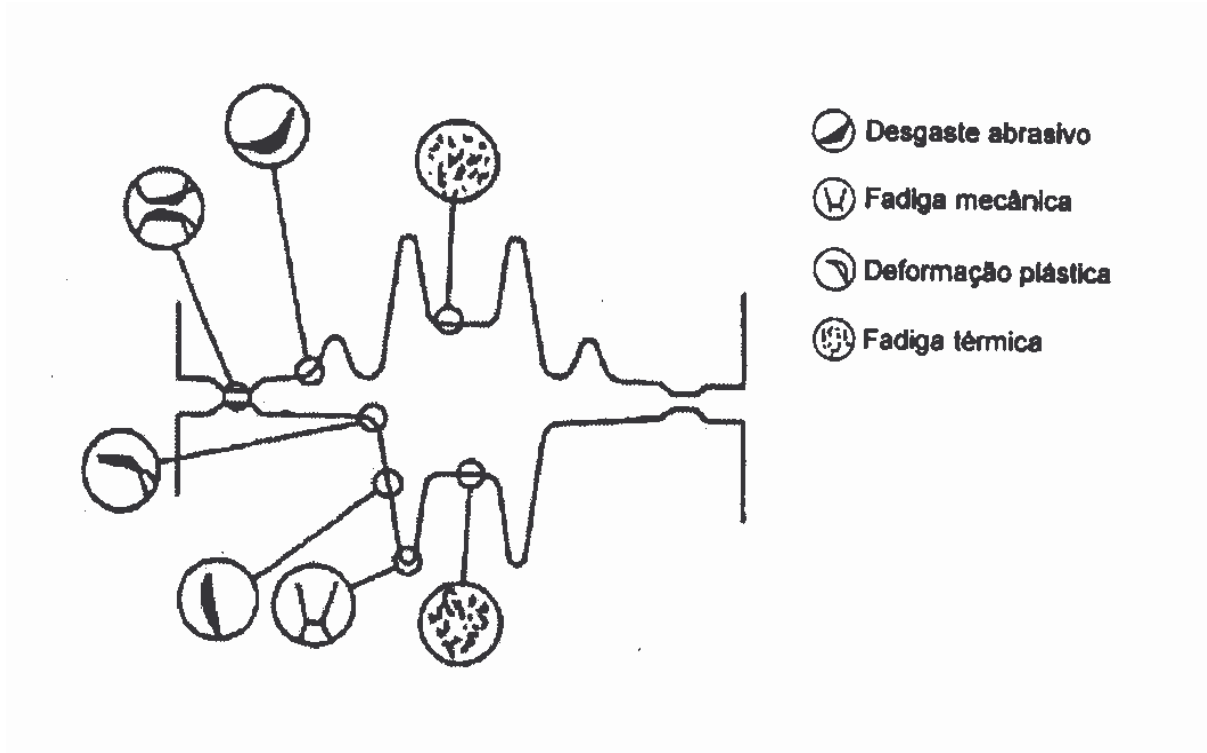


Figura 2.20 – Modos de falha característicos de ferramentas de forjamento a quente [3]

Para a aplicação relacionada ao forjamento de aços baixa liga, a seleção do material apropriado para matriz depende de variáveis relacionadas ao processo propriamente dito, incluindo fatores, tais como: o tamanho da cavidade da matriz, o tipo de máquina utilizada e a velocidade de deformação, o tamanho inicial e a temperatura do tarugo, a temperatura da matriz a ser utilizada, a lubrificação, a razão de produção e o número de peças a serem produzidas. Variáveis relacionadas ao tipo de carga na matriz e as propriedades mecânicas do material da matriz são, também, de necessário conhecimento para estimar sua vida útil de serviço que será utilizada no processo de conformação a quente [3].

Em um processo contínuo de conformação, como os processos de forjamento a quente, muitas vezes realizados a altas velocidades, podem estar envolvidos grandes aumentos de temperatura. As temperaturas desenvolvidas no processo influenciam diretamente nas propriedades do produto final e no tempo de serviço durante a vida útil da matriz, devido ao problema do desgaste originado pelo processo e devido à deformação plástica do material da matriz [36].

Uma estimativa do tempo de vida útil de uma matriz para o processo de forjamento a quente, é feita considerando o desgaste e a deformação plástica da matriz durante o processo. Esse tempo de serviço de utilização de uma matriz é diminuído devido ao amolecimento térmico da camada superficial, causado pelas altas temperaturas do processo e pelo longo tempo de contato entre as matrizes e o material a deformar. Por isto, é importante ter um conhecimento da variação que ocorrerá com a temperatura entre a peça que vai ser forjada e a matriz para benefício de sua vida útil [29, 36]. Na tabela 2.5, aparecem alguns dos principais aços ferramentas para matrizes de forjamento relacionados com o amolecimento térmico em elevadas temperaturas.

O limite de resistência à deformação plástica dos aços diminui em altas temperaturas. Contudo, este limite é também dependente do tratamento térmico prévio, da composição e da dureza. Quanto maior a dureza inicial, maior o limite de escoamento nas várias temperaturas. Na prática normal, o nível aos quais os aços são endurecidos é determinado pela tenacidade requerida: quanto maior a dureza, menor a tenacidade do aço [3]. Na figura 2.21, observa-se a resistência de aços para matrizes à deformação plástica em altas temperaturas.

Tabela 2.5 – Perda de dureza de quatro aços ferramenta em elevadas temperaturas [16].

Tipo de aço-ferramenta	Dureza original, HRC	Dureza a 480°C [HRC]	Dureza a 540°C [HRC]	Dureza a 595°C [HRC]	Dureza a 650°C [HRC]	Dureza a 705°C [HRC]	Dureza a 760°C [HRC]
AISI H13	50,2-41,7	48,7-38,6	45,3-39,3	29,0-27,7	22,7-23,7	20,1-20,2	13,9-13,2
AISI H21	49,2-36,7	48,7-34,8	47,6-34,9	37,2-32,6	27,4-27,1	19,8-19,8	15,2-14,9
AISI H23	40,8-38,9	40,0-38,9	40,6-38,0	40,8-38,0	38,6-37,1	33,2-32,5	25,8-25,6
AISI H26	51,0-42,9	50,6-42,4	50,3-42,3	47,1-41,3	38,4-34,9	26,9-26,4	21,3-21,1

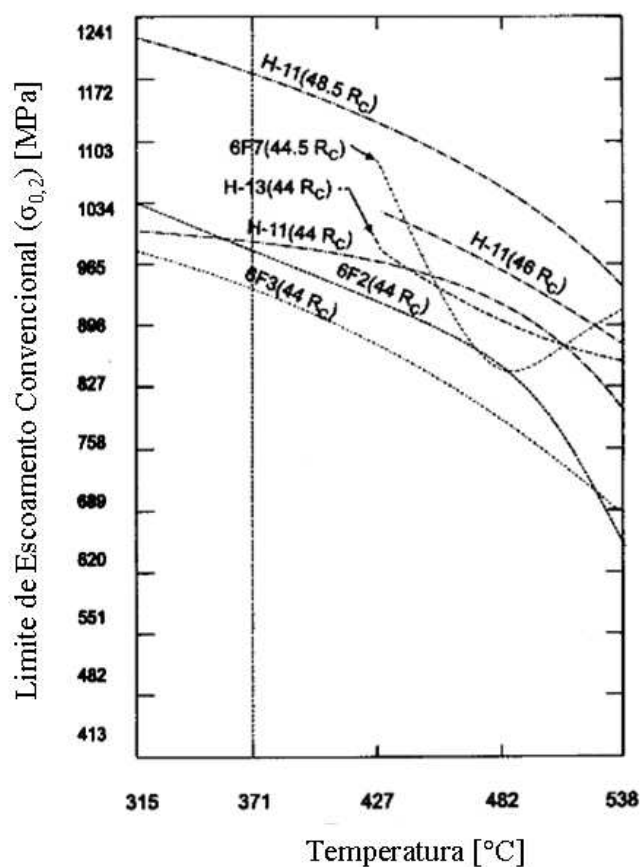


Figura 2.21 – Resistência de aços para matrizes à deformação plástica em temperaturas elevadas (valores entre parênteses indicam dureza a temperatura ambiente) [3].

2.5.1 Aços para Matrizes de Conformação a Quente

Os materiais mais comumente empregados para o forjamento a quente podem ser agrupados em relação à quantidade de elementos de liga existentes. Aços para trabalho a

quente são usados em temperaturas da ordem de 315 a 650°C e contêm cromo, tungstênio e, em alguns casos, vanádio ou molibidênio ou ainda ambos. Estes elementos induzem ao endurecimento profundo aumentando a resistência à abrasão e ao amolecimento. Geralmente, esses aços são temperados por resfriamento brusco em ar ou em banhos de sais fundidos. Os aços-cromo contêm cerca de 5% de cromo [3, 12, 37]. Na tabela 2.6, estão demonstrados os principais aços-cromo para matrizes de trabalho a quente.

Tabela 2.6 – Composição química dos aços ferramenta ao cromo para trabalho a quente [3].

Código (AISI)	Composição nominal (%)								
	C	Mn	Si	Co	Cr	Mo	Ni	V	W
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

Altos conteúdos de molibidênio dão a estes aços alta resistência ao amolecimento; o vanádio aumenta a resistência a trincas de calor ou queima e resistência à abrasão; e o tungstênio melhora a tenacidade e a dureza a quente; contudo, os aços contendo tungstênio não são resistentes ao choque térmico e não podem ser resfriados imediatamente com água [3, 12, 37].

2.5.1.1 Aço AISI H13 Utilizado no Processo de Conformação a Quente

Um tipo de aço conveniente para matrizes de forjamento a quente é o AISI H13, pois é um aço ligado ao cromo, com adições de vanádio e molibidênio em sua composição. Com isso, o aço AISI H13 apresenta elevada temperabilidade, grande resistência ao amolecimento, quando este está sujeito a altas temperaturas, boa resistência ao desgaste (também, em altas temperaturas), boa soldabilidade, boa resistência à oxidação e à corrosão, boa tenacidade para absorver a quantidade de energia necessária ao processo, excelente resistência ao choque térmico e boa usinabilidade [12, 37, 38].

Nas matrizes de forjamento a quente, muitas vezes o tarugo é forjado a temperaturas acima de 1100° C. Durante a conformação, a superfície da ferramenta é aquecida a temperaturas maiores que a do tarugo, devido ao atrito. Isto ocorre principalmente no

forjamento em prensa em que o tempo de contato entre a matriz e o tarugo é maior. Se a temperatura da superfície da matriz atingir aproximadamente 550° C, o processo de revenimento pode começar a ocorrer em alguns aços-ferramenta utilizados em matrizes, promovendo a perda de resistência mecânica nessa superfície. Por isso, é importante ter o devido conhecimento dessa propriedade fundamental que é a resistência ao revenimento, ou seja, a perda de dureza do aço ferramenta [39]. Na figura 2.22, observa-se o gráfico de revenimento do aço AISI H13 para matrizes de forjamento a quente, mostrando-se a variação da dureza e a alteração dimensional em função da temperatura [38].

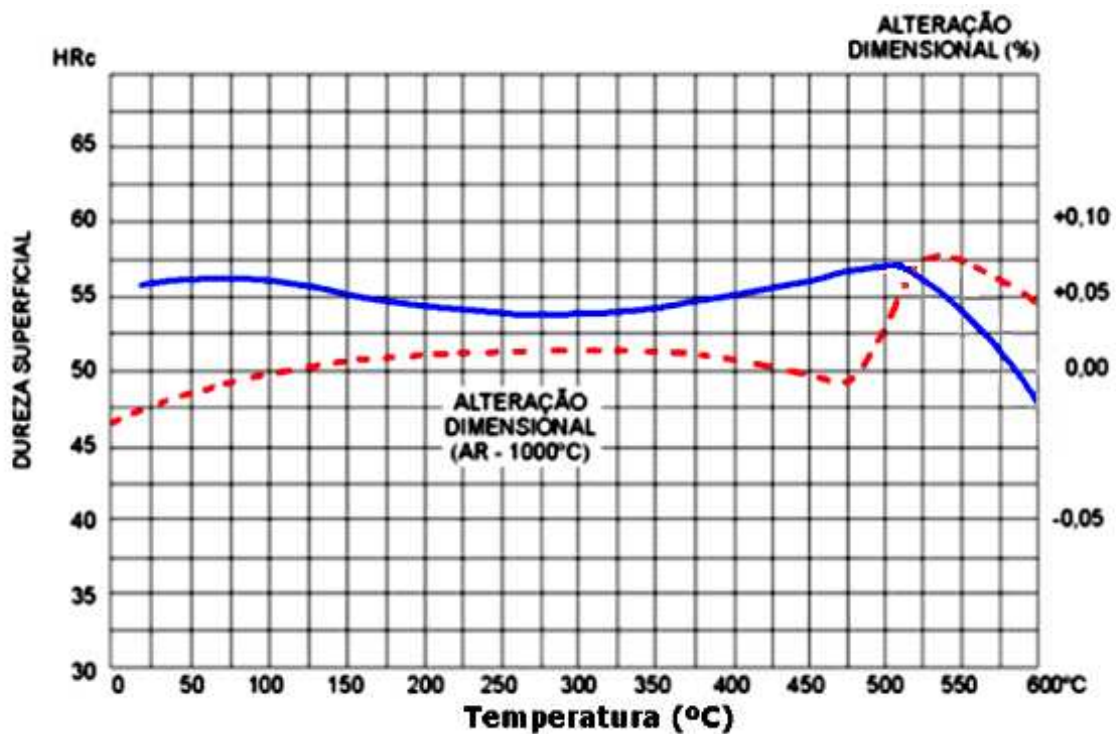


Figura 2.22 – Diagrama de revenimento do aço AISI H13 [38]

2.6 Teoria Elementar da Plasticidade (TEP)

Em diversos casos, o cálculo analítico da carga aplicada em forjamento em matrizes fechadas com o aparecimento de rebarba pode ser feito pela Teoria Elementar da Plasticidade (TEP). O desenvolvimento desta teoria leva a três particularizações: “Método das tiras”, “Método dos discos” e o “Método dos tubos”. São modelos análogos, usados para a solução de problemas relacionados com os processos de trefilação, extrusão, forjamento e laminação [15].

Para o desenvolvimento do “Método das tiras” considera-se um estado plano de deformações. As seguintes condições são necessárias para serem observadas: as ferramentas que efetuam a conformação possuem simetria; as massas e forças de inércia podem ser desprezadas; entre ferramenta e material a ser conformado vale a Lei de Atrito de Coulomb com o coeficiente de atrito μ ; a tensão de escoamento k_f é dada como função da deformação (ϕ), da velocidade de deformação ($\dot{\phi}$) e da temperatura (T) [15]. Este método é largamente aplicado para vários processos de conformação mecânica e tem sido extensivamente usado em análises de peças forjadas [13].

Considerando essas condições acima, podem existir algumas limitações, como ocorrerem dois processos dentro da fabricação de uma mesma peça conformada, assim: forjamento e extrusão. Com o aparecimento dos dois processos durante a conformação de uma peça é possível obter uma formulação analítica, separando a peça forjada em uma parte de extrusão indireta, na parte que o material flui entre o punção e a parede da matriz com ângulo de saída, considerando extrusão indireta e a parte recalçada sobre o punção, entrando em contato com a peça e na região de rebarba (quando aparecer no processo), sendo considerado assim parte analiticamente calculada como forjamento [16]. Com isso, separou-se de forma simplificada a peça forjada em duas situações: material é forjado (situação A) e o material é extrudado (situação B), conforme mostrado na figura 2.23:

- A. O material é forjado. Na parte abaixo do punção há uma compressão do material.
- B. O material é extrudado. Nas paredes do punção há o escorregamento do material caracterizando a extrusão indireta, simbolizados pelos números 1, 2, 3 e 4;

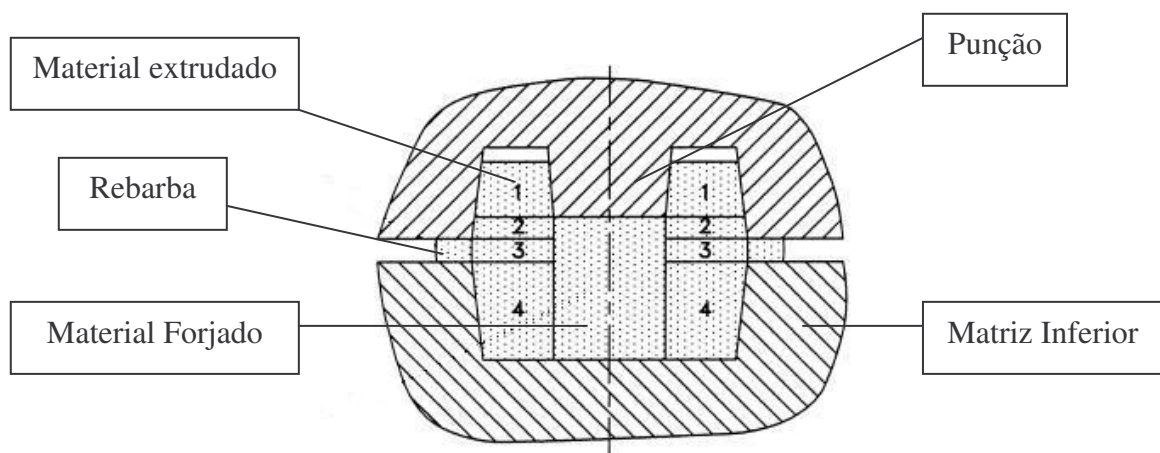


Figura 2.23 – Divisão da zona de conformação em regiões [16].

Para solução das várias forças devido à atuação das tensões sobre as tiras (figura 2.24), na direção axial e para o equilíbrio, tem-se:

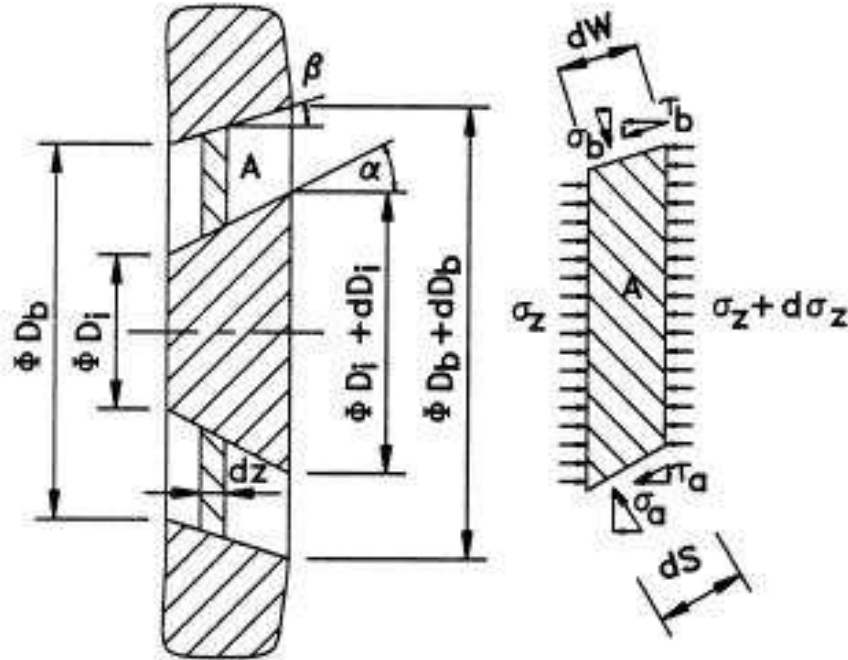


Figura 2.24 – Tira do material extrudado [16].

$$\begin{aligned} & \sigma_z \frac{\pi}{4} (D_b^2 - D_i^2) - (\sigma_z + d\sigma_z) \frac{\pi}{4} [(D_b + dD_b)^2 - (D_i + dD_i)^2] = \\ & = \tau_b \cos \beta \pi D_b dW - \sigma_b \pi D_b dW \sin \beta + \tau_a \pi D_i dS \cos \alpha + \sigma_a \pi D_i dS \sin \alpha \end{aligned} \quad (1)$$

Onde σ_z é tensão axial, $\sigma_a \cdot \cos \alpha$ e $\sigma_b \cdot \cos \beta$ são tensões radiais e D , W , S são dimensões geométricas.

σ_a = tensão axial atuando entre *billet* e punção;

σ_b = tensão radial atuante entre *billet* e matriz;

α = ângulo do punção ;

β = ângulo da matriz;

τ_a = é a tensão cisalhante entre *billet* e punção;

τ_b = é a tensão cisalhante entre *billet* e matriz (interface);

μ_a = coeficiente de atrito entre broca e punção

μ_b = coeficiente de atrito entre broca e matriz

$D_i + dD_i$ = diâmetro interno do billet acima da tira;

D_i = diâmetro interno do *billet* abaixo da tira;

D_b = diâmetro do *billet* após a penetração do punção abaixo da tira;

$D_b + dD_b$ = diâmetro do *billet* após a penetração do punção acima da tira.

O critério de máxima tensão de cisalhamento (Tresca) considera que o escoamento inicia, quando a diferença entre a maior e menor tensão aplicada sobre o corpo atinge um valor crítico num estado uniaxial de tensões [15]:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = k_f \quad (2)$$

Onde k_f (que é obtido em função de grandezas como: temperatura, grau de deformação e velocidade de deformação) significa a tensão de escoamento do material. Através das tensões radiais nesta equação e conforme o critério de Tresca para o caso em questão, tem-se:

$$\sigma_z - k_f = \sigma_a \cos \alpha \quad (3)$$

$$\sigma_z - k_f = \sigma_b \cos \beta \quad (4)$$

$$\sigma_a \cos \alpha \cong \sigma_b \cos \beta = \sigma_z - k_f \quad (5)$$

$$\tau_b = \mu_b (\sigma_z - k_f) \quad (6)$$

$$\tau_a = \mu_a (\sigma_z - k_f) \quad (7)$$

Onde k_f é a tensão de escoamento e μ é coeficiente de atrito. Com as relações geométricas:

$$dW \cos \beta = dz \quad (8)$$

$$dW \sin \beta = \frac{dD_b}{2} \quad (9)$$

$$dS \sin \alpha = \frac{dD_i}{2} \quad (10)$$

$$dS \cos \alpha = dz \quad (11)$$

$$dD_b = 2tg\beta dz \quad (12)$$

$$dD_i = 2tg\alpha dz \quad (13)$$

Juntando as equações do balanço das forças, tem-se:

$$\frac{d\sigma_z}{\sigma_z} + \frac{4(D_b\mu_b + D_i\mu_i)}{D_b^2 - D_i^2}$$

$$\sigma_{z1} = \sigma_{eq} \frac{4[D_b(\mu_b - tg\beta) + D_i(\mu_i + tg\alpha)]}{D_b^2 - D_i^2} \quad (14)$$

Para o caso de forjamento, abaixo do punção, foi calculado:

$$\sigma_r = -k_f \left(\exp\left\{\frac{2\mu}{l}(R-r)\right\} - 1 \right) + \sigma_R \exp\left\{\frac{2\mu}{l}(R-r)\right\} \quad (15)$$

Onde σ_R é a tensão radial obtida pela média das tensões radiais entre as seções 2, 3 e 4 da figura 2.22 ($\sigma_r = \sigma_R$ para $R = \frac{1}{2}D_{\text{punção}}$), pois na seção 1 ocorre apenas extrusão, [16].

2.6.1 Deformação a Quente

A tensão de escoamento é um dos parâmetros fundamentais do processo de forjamento e conhecimento desse parâmetro para materiais a serem conformados torna-se imprescindível para quantificar força e trabalho. As curvas de escoamento são construídas através de testes mecânicos (compressão de corpos cilíndricos, compressão plana, tração para pequenas deformações). Os testes são realizados em diferentes temperaturas e diferentes velocidades de deformação e as tensões plotadas em função da deformação [2].

Na deformação a quente, as curvas de escoamento apresentam-se, em geral, como são demonstradas na figura 2.25. A tensão de escoamento (k_f) tem uma pequena variação com o grau de deformação (ϕ), e é muito sensível à velocidade de deformação ($\dot{\phi}$) e a temperatura (T). Na figura 2.25 observam-se as curvas de escoamento do aço 4140 para as velocidades de deformação de 5, 10 e 15 s^{-1} , em que se pode perceber que quanto maior a velocidade de deformação aplicada ao material, mais alto serão de resistência ao escoamento [40].

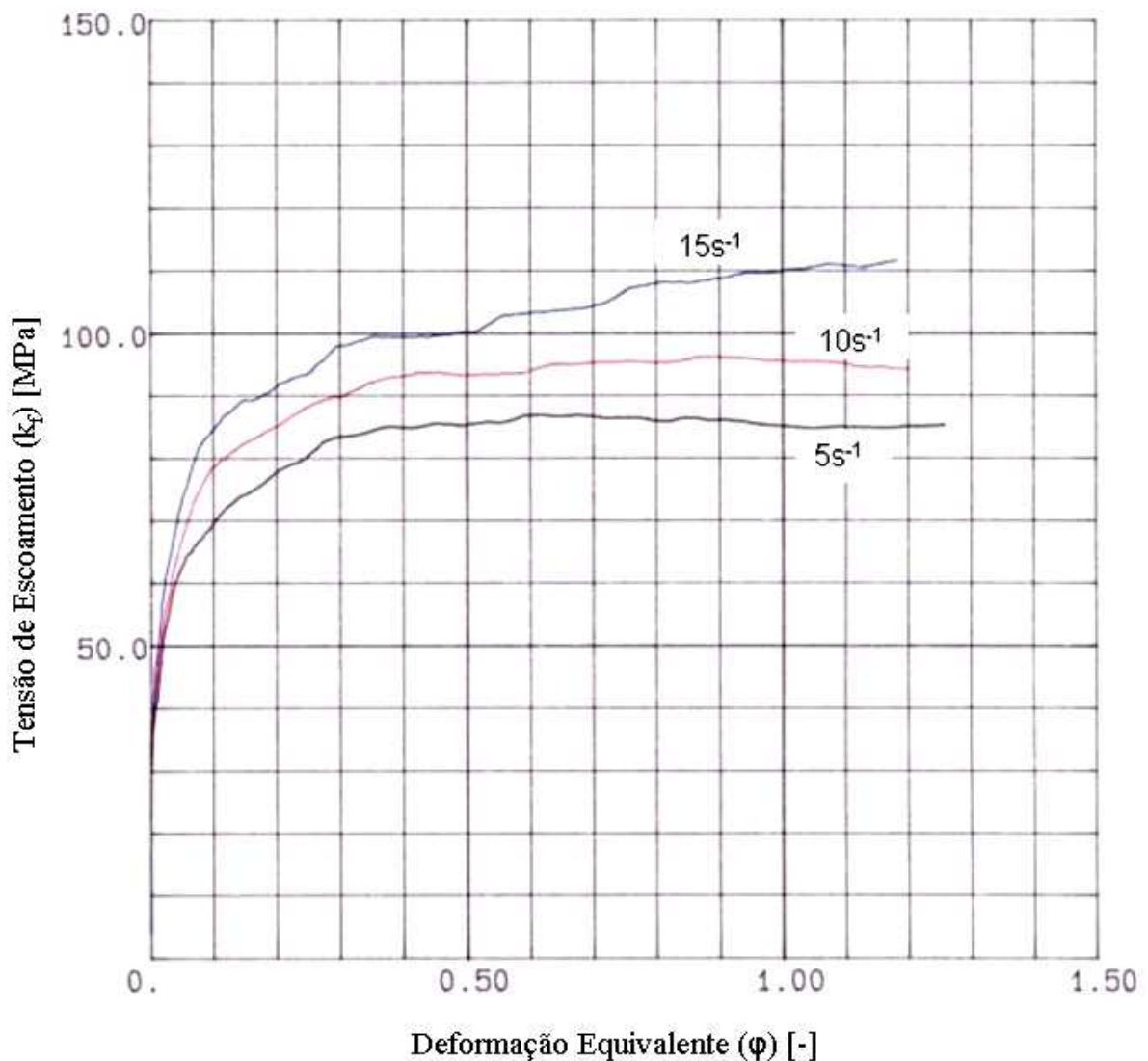


Figura 2.25 – Curva de escoamento para o aço AISI 4140 à 1200°C para diferentes velocidades de deformação [40].

Quando se deforma um material ou ao se construir curvas de escoamento, deve-se levar em consideração o aumento de temperatura em virtude do calor gerado devido ao trabalho

mecânico [41]. Na figura 2.26 são observadas as curvas de escoamento do aço AISI 8640 para as temperaturas de 800, 1000 e 1200°C.

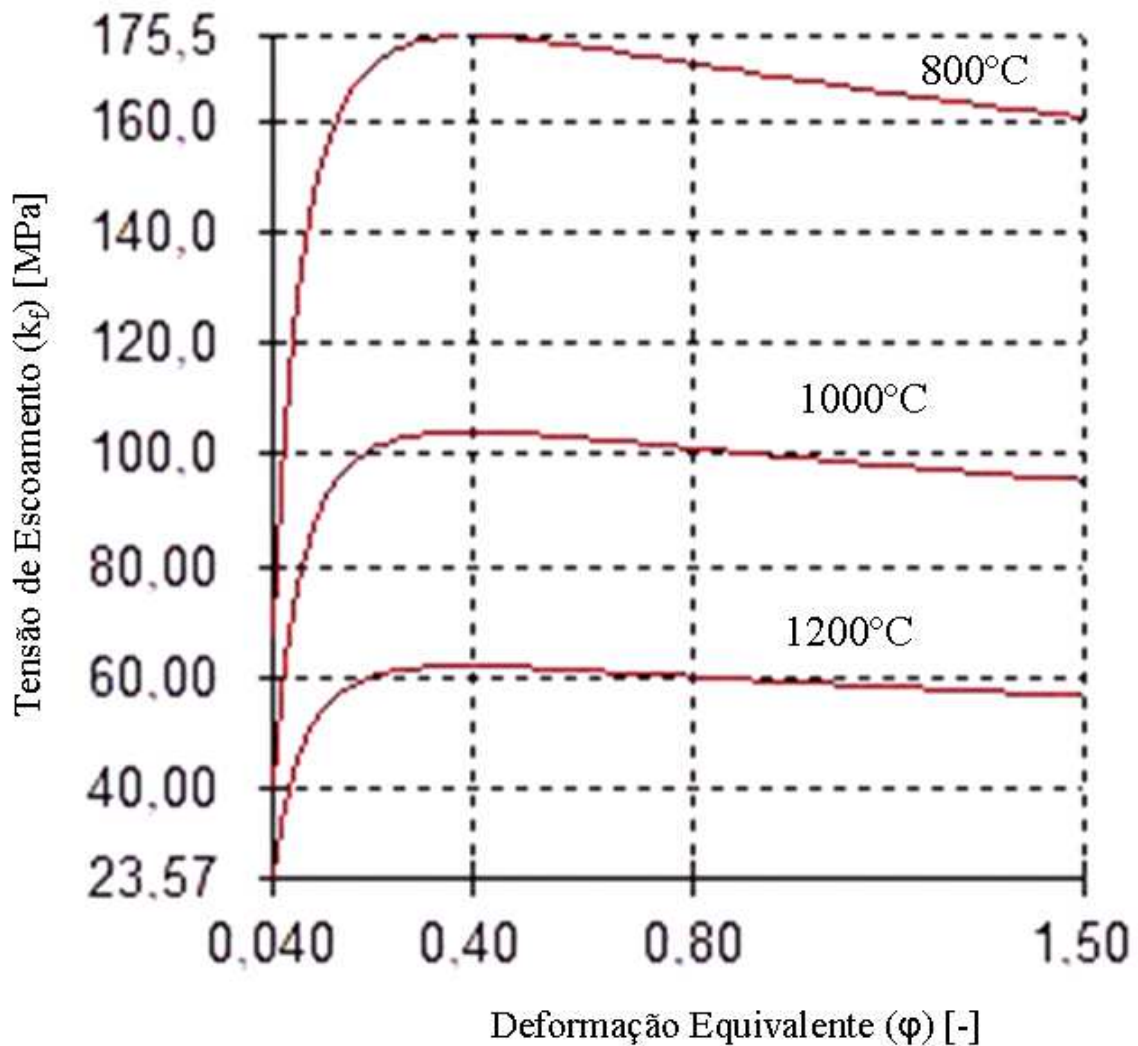


Figura 2.26 – Curvas de escoamento do aço AISI 8640 para diferentes temperaturas [42].

Através das curvas de escoamento dos aços, pode-se estimar a resistência que esses materiais oferecem ao escoamento. Uma formulação matemática para a curva de escoamento é dada por Spittel da seguinte forma [41]:

$$k_f = A \cdot e^{m_1 T} \cdot \varphi^{m_2} \cdot e^{m_4 / \varphi} \cdot \dot{\varphi}^{m_3}, \quad (16)$$

onde A, m₁, m₂, m₃ e m₄ são constantes relacionadas a cada material; φ , a deformação; T, a temperatura em °C; e $\dot{\varphi}$, a velocidade de deformação do material em s⁻¹.

A velocidade de deformação ($\dot{\phi}$) é definida como sendo a variação da deformação na unidade de tempo. Considerando-se, portanto, um corpo, e levando-se em conta suas dimensões externas, que sofrem uma deformação f , a velocidade de deformação é definida como:

$$\dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt}. \quad (17)$$

Considerando-se ainda o corpo externo, pode-se também calcular a velocidade de deformação como, por exemplo, em altura (h), onde VF significa a velocidade da ferramenta:

$$\dot{\phi} = \frac{d\phi_h}{dt} = \frac{d \ln(h/h_0)}{dh} \cdot \frac{dh}{dt} = \frac{V_F}{h}. \quad (18)$$

3. PROCESSO ATUAL DE FABRICAÇÃO DAS BROCAS

A usinagem é o processo atual de fabricação na empresa fabricante de brocas. Há, portanto, perda de material que ocorre pela produção de cavaco. Iniciando o processo com as dimensões do *billet* cilíndrico com 62mm de altura e 38,1mm de diâmetro, a peça é, então, usinada para a formação de uma cavidade interna, onde será a entrada da haste de engate. A outra parte usinada é a seção externa de seu corpo onde são feitos rasgos laterais e furos para a colocação de *bits* de carbeto de tungstênio, que serão os responsáveis pelo contato da broca com as rochas durante o trabalho de furação.

No intuito de obter melhorias de processo e economia de matéria-prima, a empresa fabricante espera, com os resultados deste trabalho, que: a parte externa continue a ser usinada conforme citado no parágrafo anterior. Porém, devido aos resultados que serão apresentados posteriormente, a empresa obterá uma nova possibilidade de fabricação da cavidade interna. A empresa terá esta opção com possibilidade da troca do processo de fabricação, quando, na penetração de um punção, se obterá a cavidade desta broca através dos processos de forjamento e extrusão. Na figura 3.1, é possível observar a broca de aço AISI 8640 engatada em uma haste, através de sua cavidade, pronta para realizar o trabalho de perfuração de rochas. Na figura 3.2, é observado o resultado final da fabricação de brocas de furação de rochas (com a visão da cavidade) através do processo de usinagem.

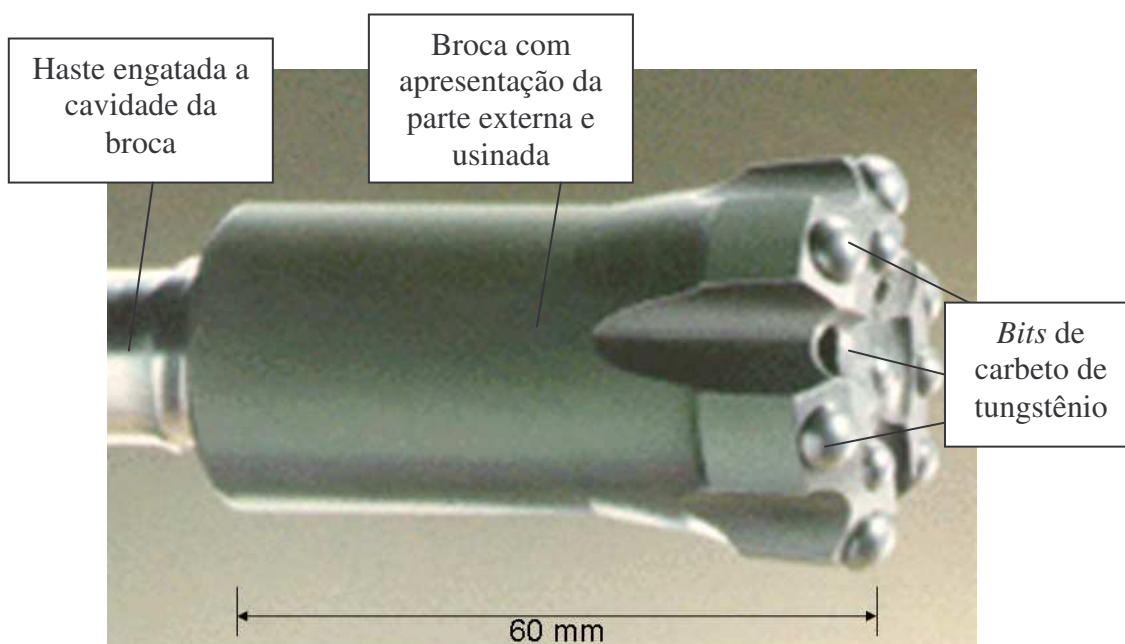


Figura 3.1 – Broca de furação de rochas de aço AISI 8640 engatada a uma haste através da cavidade interna.



Figura 3.2 – Visualização de brocas de aço AISI 8640 fabricadas por usinagem.

3.1 Considerações Necessárias para a Troca do Processo de Fabricação da Pré-forma de Brocas

Para seguir os objetivos de economia de matéria-prima na fabricação de peças, e a manutenção ou melhoria de propriedades mecânicas do material fabricado, deve-se conhecer o processo de fabricação atual para saber as suas condições e o material utilizado no início do processo (por usinagem). Com isso, foi possível comprovar as vantagens através da mudança de processo de fabricação. No intuito de substituir o processo de fabricação dessa cavidade apresenta-se a necessidade do conhecimento do volume e peso da peça de aço, utilizada no início do processo atual de fabricação da pré-forma, para comparar e justificar a economia na mudança de processo.

O *billet* inicial que a empresa fabricante utiliza no princípio da fabricação da peça, através do processo de usinagem para a obtenção da cavidade, tem medidas iniciais de 62mm de altura e 38,1mm de diâmetro, com um peso de 0,554kg, sendo uma peça de forma cilíndrica. Desta forma, a peça começa a ser usinada com um volume de 70685mm³. A fórmula para o cálculo do volume de uma peça cilíndrica é $V = \pi.R^2.H$, em que: π é uma constante de valor 3,1416; R é o raio do cilindro em mm e H é a altura do cilindro em mm. Na figura 3.3, é observada a peça de aço utilizada atualmente no princípio do processo de usinagem, com o volume citado, para a fabricação da cavidade.



Figura 3.3 – Peça cilíndrica de aço AISI 8640 para início do processo de usinagem com altura de 62mm, diâmetro de 38,1mm e volume de 70685mm³.

4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA OBTENÇÃO DE PRÉ-FORMAS UTILIZANDO MATERIAIS DE FÁCIL MODELAMENTO

A característica principal do trabalho proposto é o desenvolvimento da cavidade interna da broca através dos processos de forjamento e extrusão com a realização de ensaios, utilizando matrizes e um punção cônico, seguindo as regras utilizadas nos processos de conformação citados: fabricação das matrizes com ângulo de saída, canal de rebarba, extrator, punção e angulação do punção, ou seja, é um conjunto de itens que são necessários para realização do novo processo de fabricação. Na figura 4.1, observa-se um desenho do perfil da peça, após a penetração total do punção, sem formação de rebarba.

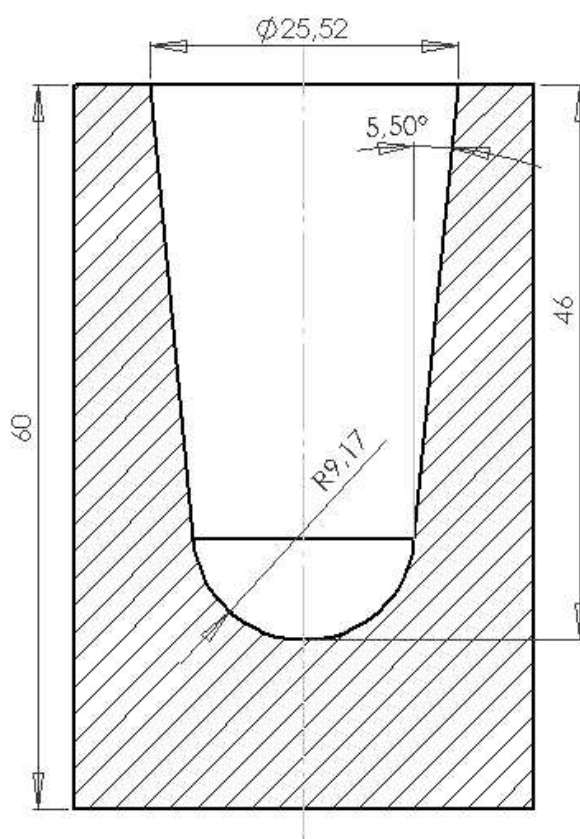


Figura 4.1 – Desenho do perfil da pré-forma.

No desenvolvimento deste trabalho, estão incluídos alguns grupos de ensaios com materiais fáceis de modelar e fáceis de deformar, como: plasticina, gesso e cobre. Estes ensaios foram realizados para utilizar os seus resultados, durante e depois do processo de forjamento, em uma aproximação de como se comportaria o aço AISI 8640 no processo de forjamento a quente na fabricação da pré-forma. Vale ressaltar que o comportamento dos materiais citados acima, durante o processo, tem similaridade com o aço no processo a quente.

Estes resultados serviram de auxílio para a obtenção da pré-forma do aço utilizado neste trabalho.

4.1 Ensaios de Forjamento Utilizando Plasticina

No forjamento de peças de simetria axial, como a cavidade da broca, que tem uma angulação de $5,5^\circ$, foram utilizados materiais em que fosse viável observar o comportamento do material durante e após o processo, a fim de se obter uma aproximação do que ocorreria com o aço no forjamento a quente, relacionado a tópicos muito relevantes ao processo, como: volume do *billet*, angulação do punção e angulação da parede interna da matriz inferior para facilitar a retirada da peça forjada.

Foram projetados os seguintes componentes para realizar o processo de forjamento com plasticina e gesso: uma matriz superior, uma matriz inferior com ângulo de saída de 1° , um extrator, um pino extrator e um punção, sendo todos estes fabricados de material AISI 1045, pois este aço tem resistência mecânica suficiente para a realização dos ensaios com esses materiais de modelamento. Estes componentes, depois de usinados no SENAI-CIMATEC-BA, utilizando um CNC (centro de usinagem CNC – modelo Discovery 560 marca Romi – ano de fabricação 2004) e devidamente polidos, ficaram prontos para os ensaios experimentais de forjamento com estes materiais de fácil modelamento físico. Nas figuras 4.2 e 4.3, observam-se as matrizes projetadas e usinadas de acordo com as regras do forjamento, antes da fabricação de pinos de fixação. Essas matrizes se utilizam nos ensaios de gesso e plasticina.

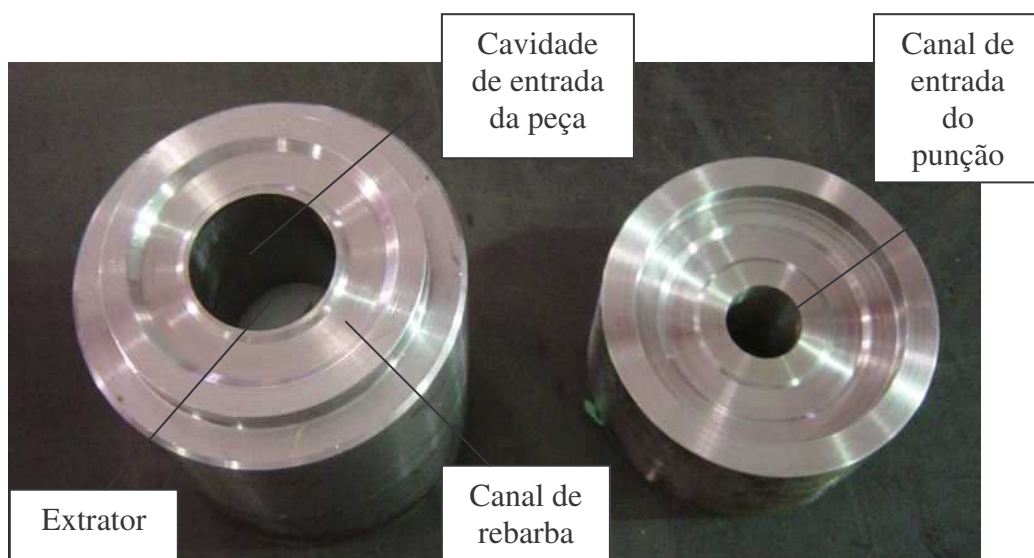


Figura 4.2 – Matriz inferior à esquerda e matriz superior à direita.



Figura 4.3 – Matriz inferior à esquerda e matriz superior à direita.

Após a fabricação dos canais de passagem nas matrizes para a utilização dos pinos de fixação, passou a ser possível utilizá-los e montá-los para o ensaio, seguindo as regras do processo de forjamento, ou seja, a matriz superior é encaixada na matriz inferior (orientada por pinos de fixação), com canal de rebarba, ângulo de saída para a peça forjada na matriz inferior e canal cilíndrico para a passagem do punção na matriz superior. Depois do conjunto de matrizes montado, ocorre a penetração do punção neste canal de entrada da matriz superior para conseqüente forjamento e obtenção da pré-forma. Na figura 4.4, é observado um desenho, em corte, do sistema montado; e na figura 4.5, observa-se o sistema montado com a matriz superior engatada na inferior.

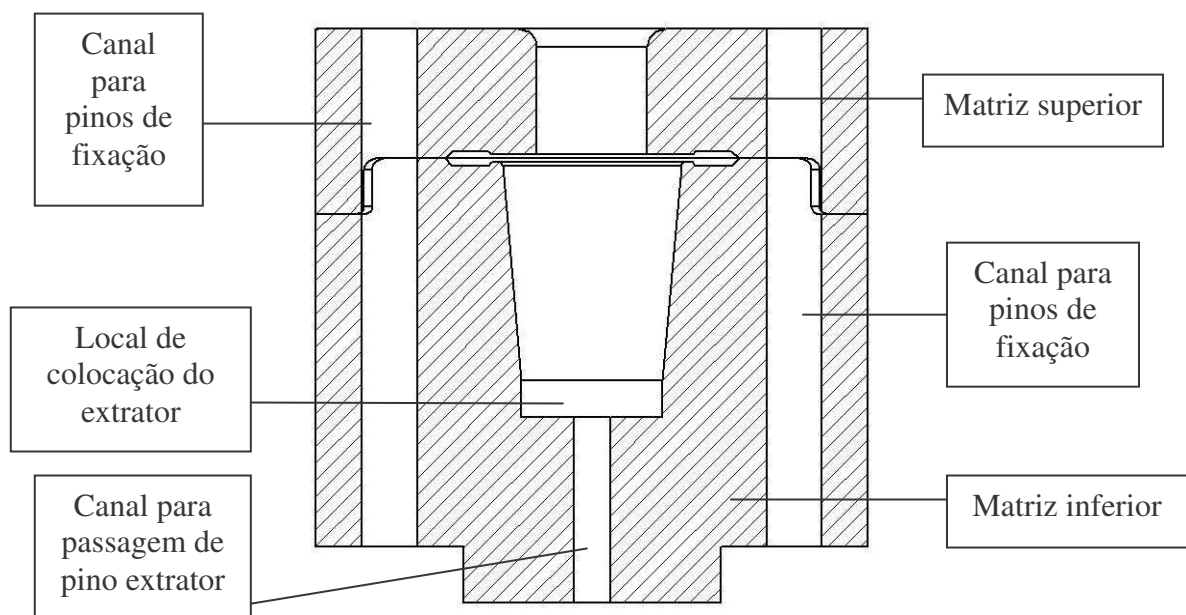


Figura 4.4 – Desenho do conjunto das matrizes com canal para pinos de fixação.

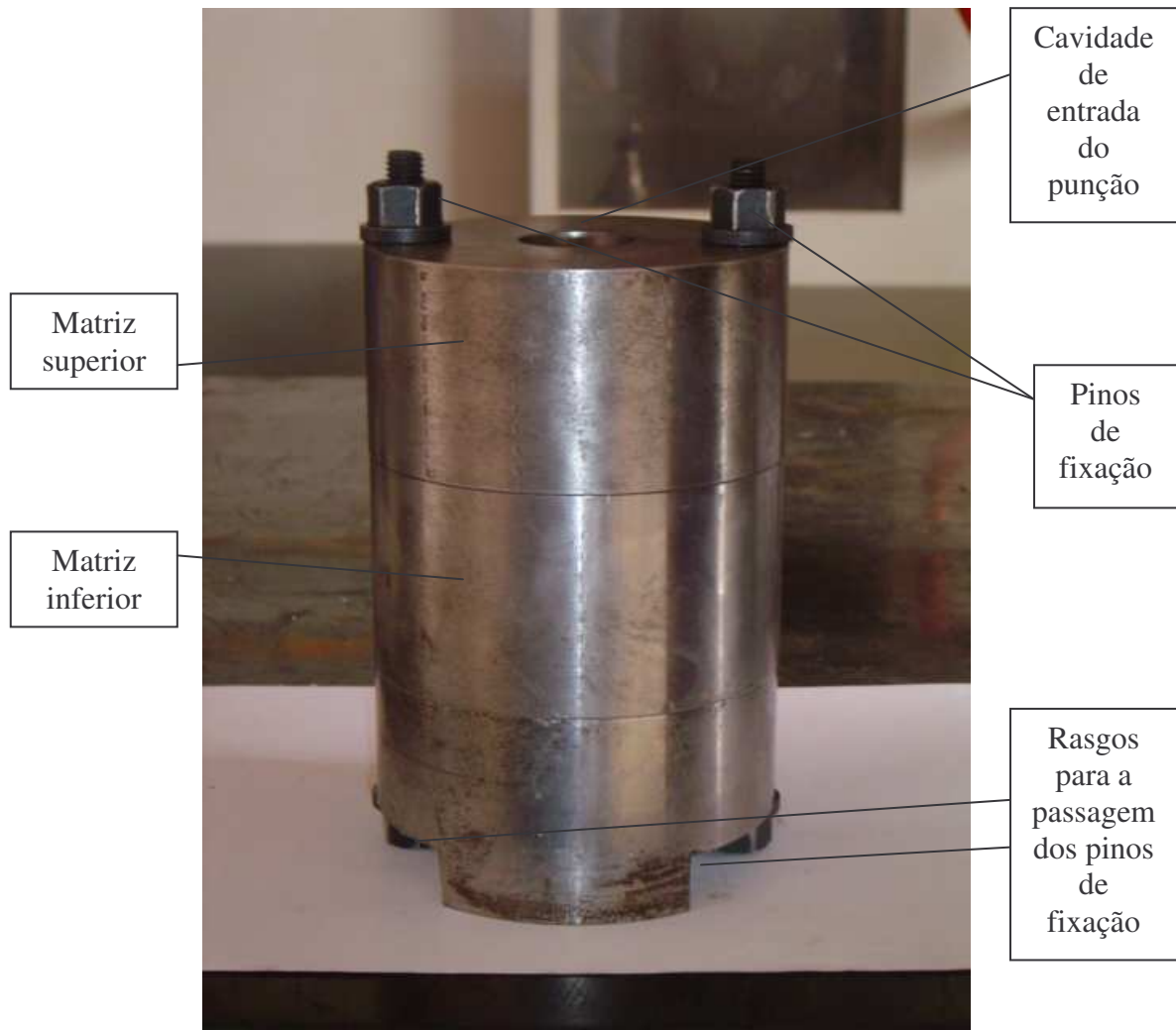


Figura 4.5 – Matriz inferior engatada a matriz superior através de pinos de fixação.

4.1.1 Obtenção de Pré-formas de Brocas Utilizando *Billets* de Plasticina e Gesso

Após o *billet* ser confeccionado, ele deve ser colocado dentro da cavidade da matriz inferior para a realização do ensaio. Com as matrizes engatadas, o punção deve formar a cavidade completa, ou seja, a altura necessária para forjar a cavidade da pré-forma da broca. Na figura 4.6, é observado o desenho com vista lateral do punção utilizado nos ensaios e, na figura 4.7, é observado em maior detalhe a ponta cônica do punção. Conforme visualizado no desenho e na peça, a angulação de $5,5^\circ$ do punção, que formará a cavidade da peça através do forjamento por este punção, será necessária para o engate da haste no momento em que a broca estiver pronta para utilização.

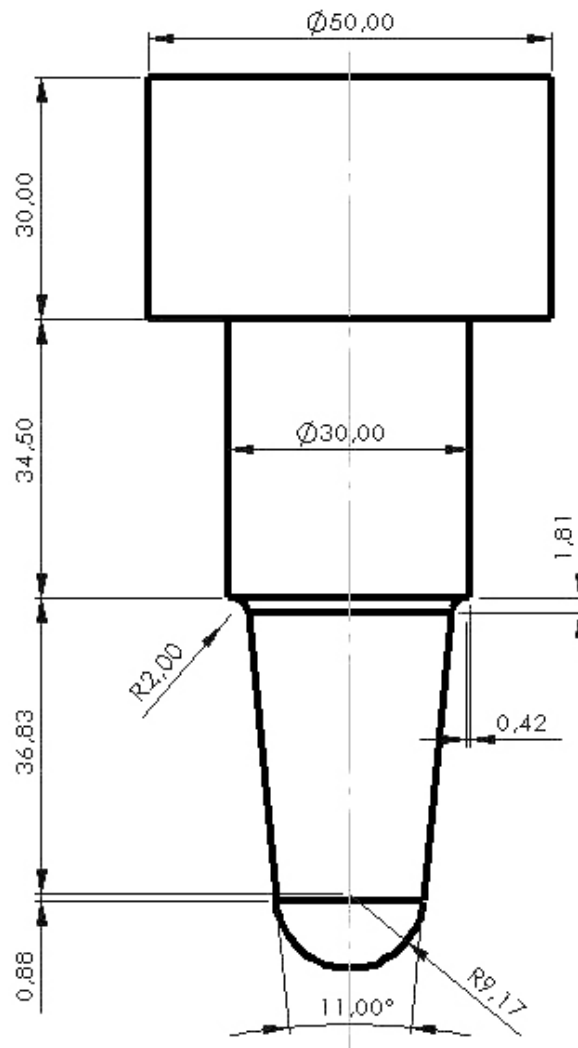


Figura 4.6 – Desenho com vista lateral do punção.



Figura 4.7 – Vista do punção cônico de penetração com angulação necessária para o forjamento da cavidade.

Na figura 4.8, é observada a direção de entrada do punção no canal de passagem da matriz superior, que seguiu o procedimento comum do processo de forjamento, pois tanto o punção quanto a parede da matriz inferior foram devidamente lubrificadas com vaselina, para diminuir o atrito do material de modelamento durante a formação da peça. Esta lubrificação servirá primeiramente para a penetração do punção na peça e no contato da peça em formação com a matriz inferior. E, após a peça formada, ocorre a retirada do material, através da força que o pino extrator exerce sobre o extrator, assim ocorrendo o atrito entre o material e as paredes da matriz inferior na extração do material.



Figura 4.8 – Vista da passagem do punção através da matriz superior.

No procedimento experimental, o ponto de partida foi a utilização de peças cilíndricas com alturas diferentes para, através da formação de rebarba, ver qual seria o resultado mais viável para a menor perda de material. No primeiro ensaio, foi utilizada uma altura e diâmetro iguais à peça que começa a ser fabricada pelo processo de usinagem, ou seja, um *billet* de 62mm de altura e 38,1mm de diâmetro, com um volume de 70685mm³. Este procedimento experimental foi feito primeiramente com gesso na forma pastosa, para verificar a primeira forma da cavidade, testar a viabilidade do que foi projetado em relação às matrizes e à quantidade de material que fica dentro da matriz após o final da penetração do punção na peça. Esse gesso depois de moldado com a forma da cavidade da broca no ensaio de forjamento, tem a condição de secar, endurecer e se desgrudar em poucos minutos (15 em

média) das paredes da matriz e do punção. Na figura 4.9, é observado o excesso de material de gesso com a formação de rebarba, onde não foi possível obter o curso completo do punção, devido ao excesso de volume de material para formar a cavidade da pré-forma. Este resultado mostrou a necessidade de se começar o ensaio com um volume menor de *billet*.



Figura 4.9 – Peça de gesso mostrando excesso de material.

Após o forjamento da peça de gesso, foram realizados alguns ensaios com plasticina, com o mesmo processo de lubrificação, utilizando vaselina. Com os resultados da peça de gesso e a comprovação de excesso de material, os ensaios com plasticina foram realizados a partir de uma altura menor em relação ao *billet* de gesso, com 60mm de altura e com o mesmo diâmetro de 38,1mm. Com esses dados, o volume de *billet*, no início do processo, fica com 68405mm^3 , já mostrando uma redução em relação ao volume anterior.

A plasticina, que é considerada uma boa opção para um comparativo visual em relação ao comportamento do aço, durante o processo e em relação ao volume de material necessário, mostra na figura 4.10, a peça de plasticina forjada com o volume de 68405mm^3 , ou seja, menor que a peça que começa a ser usinada que tem um volume de 70685mm^3 .



Figura 4.10 – Peça de plasticina forjada com altura inicial de 60mm, diâmetro de 38,1mm, mostrando a formação de rebarba com volume de 68405mm³.

Neste último resultado, ocorreu a penetração total do punção, fato que não ocorreu com o gesso devido ao excesso de volume de material. Porém, mostrou-se ainda excesso de material com a formação de rebarba (pois a rebarba seria eliminada no processo). Devido a isso, partiu-se para alturas menores de *billets* nos ensaios de plasticina com o objetivo de chegar o mais próximo possível da forma desejada, ou seja, à cavidade formada sem rebarba ou quase sem. Um *billet* de plasticina com altura inicial de 56mm apresentou um resultado bem positivo após a penetração total do punção, considerando que não formou rebarba.

No momento em que se realizou a comparação da peça inicial do processo de usinagem (altura de 62mm, diâmetro de 38,1mm e volume de 70685mm³) com a peça de plasticina (altura inicial de 56mm, diâmetro de 38,1mm e volume de 63845mm³), foi possível observar que é viável utilizar um volume menor para formar a mesma cavidade objetivada no processo de obtenção da pré-forma. Isto demonstra uma boa possibilidade de economia de matéria-prima no processo, pois para a formação da mesma cavidade se obtém, na troca de processo, uma aproximação de economia de material no volume de 6840mm³ por peça forjada, considerando que ocorra um resultado bem próximo ao que ocorreria com o aço. Na figura 4.11, é mostrada a peça de plasticina forjada com um *billet* de altura inicial de 56mm, mostrando a cavidade interna quase formada no processo sem perda de material.



Figura 4.11 - Peça de plasticina forjada com altura inicial de 56mm não mostrando formação de rebarba com volume de 63845mm³.

4.2 Ensaio de Forjamento Utilizando Cobre como *Billet*

O cobre é um material com características de boa maleabilidade, ou seja, se deforma facilmente, fazendo com que seu comportamento durante o processo de forjamento, na penetração do punção, seja comparável ao comportamento do aço forjado a quente, assim mostrando resultados de avaliação de formação da cavidade da peça.

A etapa seguinte deste trabalho, após utilizar materiais de fácil modelamento físico como a plasticina, foi a utilização do cobre eletrolítico para avaliar a fabricação da cavidade da broca. Considerando a obtenção dos resultados anteriores nos ensaios de forjamento com materiais de modelamento, através da penetração do punção na peça, e a conseqüente formação de rebarba, viu-se a possibilidade de diminuir o volume da peça inicial através da diminuição da altura com a possível economia de matéria-prima no processo. Na figura 4.12, observa-se a peça inicial com 56mm de altura, diâmetro de 38,1mm e volume de 63845mm³, com as dimensões aproximadas dos melhores resultados de ensaios realizados com materiais de modelamento físico.



Figura 4.12 - Peça cilíndrica com diâmetro de 38,1mm, altura de 56mm e com volume de 63845mm³.

O ensaio de forjamento com cobre foi realizado em uma prensa hidráulica de capacidade máxima de 2940kN, com compressão lenta e a força foi medida com uma célula de carga de 2940kN que foi desenvolvida e calibrada no LdTM/UFRGS. A velocidade de prensa utilizada foi constante e de 0,1 mm/s, a temperatura de 25 °C e um sistema de aquisição de dados Spider 8 da empresa HBM com o software Catman Express V.3.1, que possibilitou a obtenção da curva média da força vs. deslocamento.

Os procedimentos de lubrificação foram os mesmos dos ensaios anteriores, ou seja, a cavidade da matriz inferior, o punção e o canal de rebarba foram lubrificados com vaselina. Os procedimentos de fabricação das matrizes para os ensaios com *billets* de cobre foram os mesmos utilizados nas matrizes anteriores, porém, com a diferença de que neste caso foi aplicado tratamento térmico às matrizes e punção de aço AISI 1045. Para estes componentes aplicou-se uma seqüência de tratamentos térmicos de têmpera e revenido, obtendo-se uma dureza média de 37 HRC. Na figura 4.13, observa-se o ensaio de forjamento para deformar o cobre e fabricar a pré-forma.

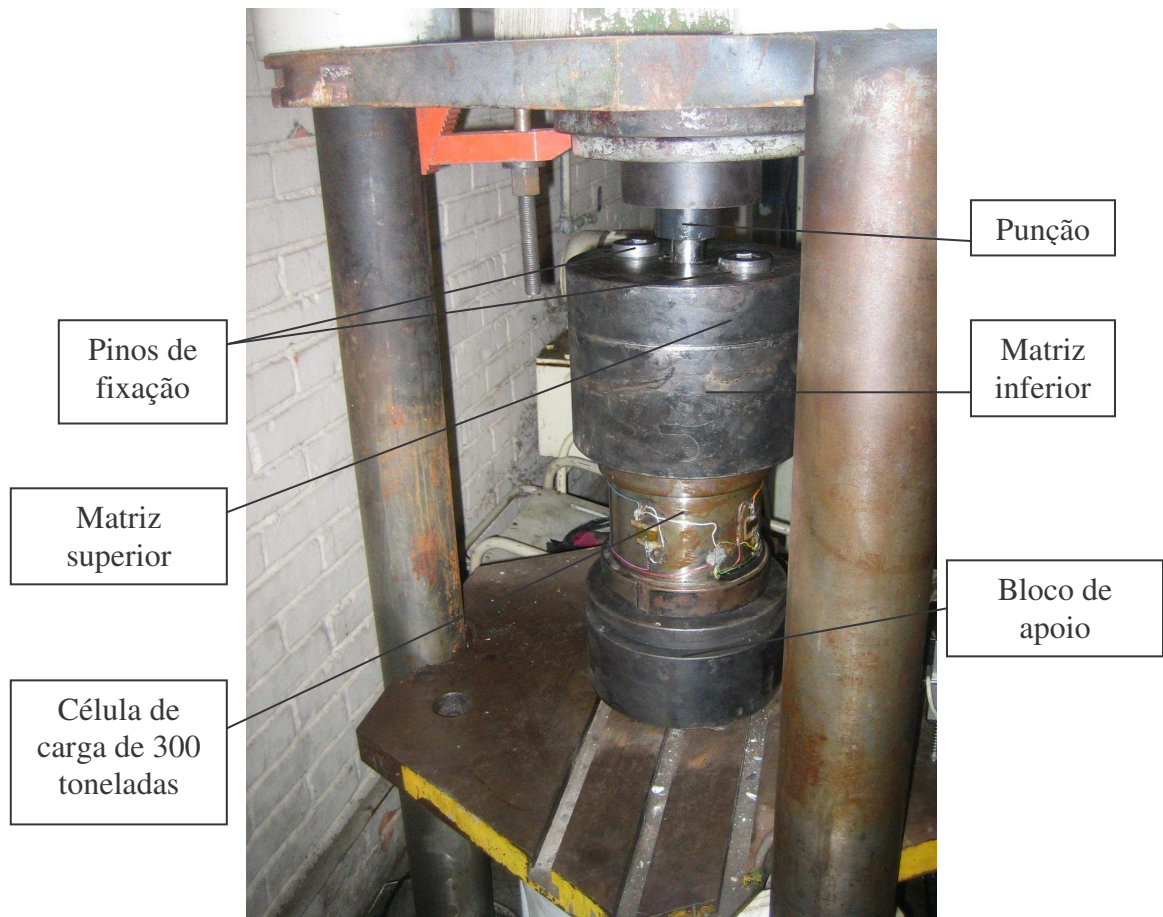


Figura 4.13 – Conjunto montado para forjamento do *billet* de cobre na prensa hidráulica de 2940kN no LdTM/UFRGS.

Como resultado, o cobre confirmou suas características de deformabilidade a frio, mostrando a formação da cavidade final através da penetração do punção e através da economia de material. Isto porque com um *billet* de 56mm de altura e um ângulo de saída na matriz de 1° formou a cavidade necessária para o engate da haste com a peça pronta. E também, observou-se uma projeção boa para o forjamento de aço a quente.

Numa comparação parcial de economia de matéria-prima do processo de usinagem (que tem como ponto de partida um *billet* de 62mm de altura) com os ensaios do cobre e dos materiais de modelamento, mostraram que essa altura inicial pode ser reduzida, dando uma boa porcentagem de economia de material no princípio do processo para obter-se a mesma pré-forma. Na figura 4.14, observa-se a cavidade da pré-forma produzida com 42mm de deslocamento do punção a partir do primeiro contato com um *billet* inicial com altura de 56mm com a vantagem da não formação de rebarba, o que mostra economia de matéria-prima.

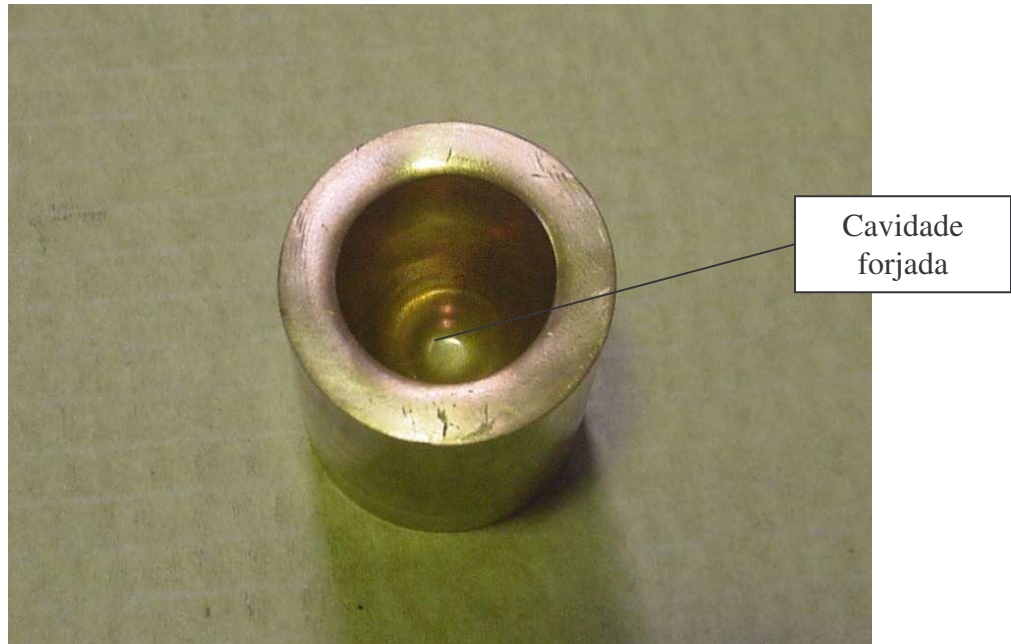


Figura 4.14 – Peça de cobre forjada a frio através da penetração de um punção cônico e sem formação de rebarba.

Durante a formação da cavidade, foi obtida a curva com a penetração do punção de 42mm (considerando o contato do punção até o final da penetração na peça) e a força aplicada de aproximadamente 1670kN. Na figura 4.15, é observada a curva obtida com velocidade de penetração do punção de 0,1 mm/s, à temperatura de 25 °C e com a utilização de um sistema de aquisição de dados Spider 8 da empresa HBM com o software Catman Expres V.3.1, para a obtenção da curva média da força vs. penetração.

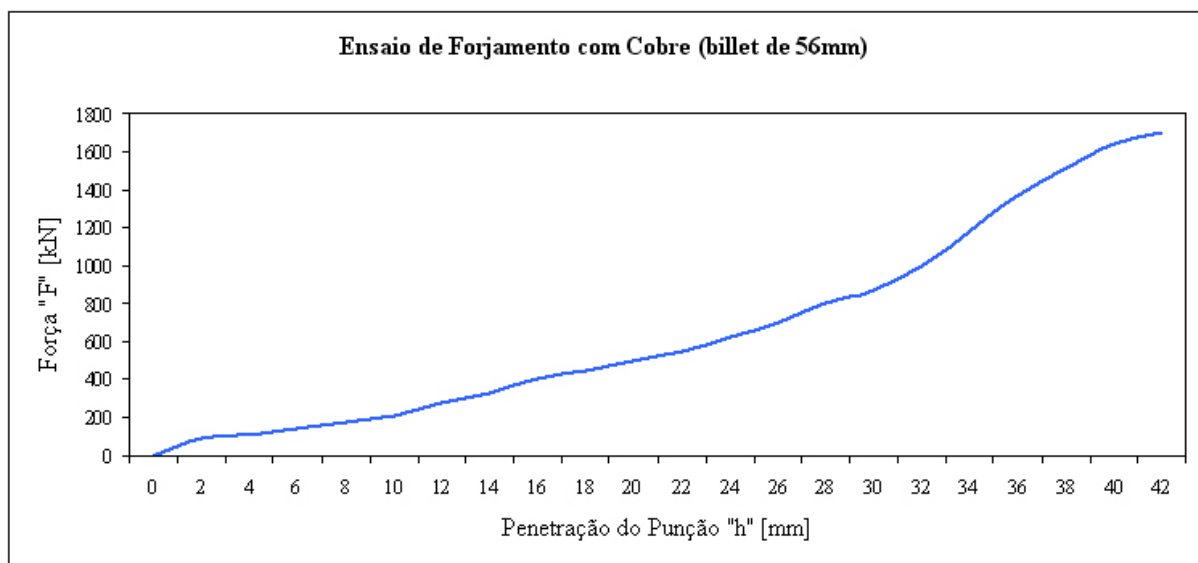


Figura 4.15 – Gráfico da força aplicada vs. penetração do punção para obtenção da pré-forma de cobre.

Na figura 4.16, observa-se, a distância efetiva de 42mm que o punção estará penetrando no *billet* durante a aplicação da força, sendo que esta penetração inicia no contato com o *billet* e termina no final de curso do punção.

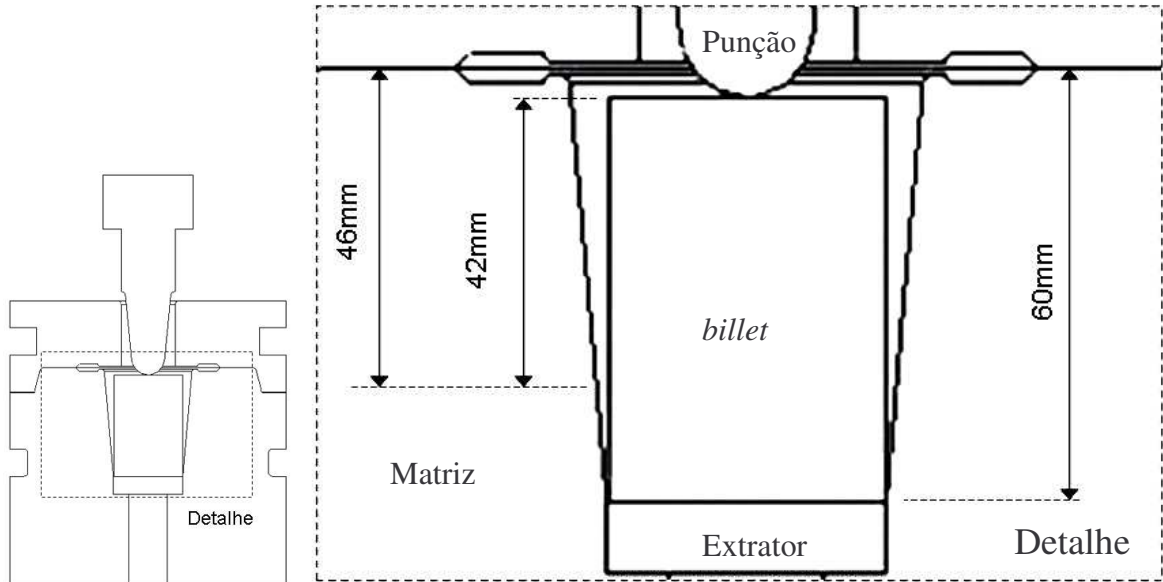


Figura 4.16 – Altura de penetração do punção.

5. FORJAMENTO DA PRÉ-FORMA UTILIZANDO O AÇO AISI 8640

O aço utilizado neste trabalho é o do grupo de aços baixa liga AISI 8640, que é um aço utilizado na fabricação de peças pequenas através da conformação mecânica. Isto devido à sua combinação de características de boa dureza, ótima temperabilidade, unidas à resistência ao desgaste e a fadiga. Devido à existência destas características a empresa fabricante de brocas pelo processo de usinagem julga conveniente utilizar este aço na fabricação de suas peças.

Uma alternativa de melhorar ainda mais a sua condição seria através da economia de matéria-prima na produção de suas peças. Na proposição desse trabalho, e com os resultados anteriores, partiu-se para o forjamento da pré-forma da broca, onde a cavidade passa a ter sua fabricação por forjamento e não mais por usinagem, trazendo uma economia de matéria-prima, conforme será demonstrado nos resultados da peça forjada.

Nos ensaios de forjamento com plasticina e cobre, foi analisado o modo como o material se comporta durante o processo, ou seja, na penetração do punção quando está formando a cavidade. E também foi avaliado no resultado final da peça forjada com a penetração total do punção, para avaliar, de forma aproximada, o quanto se deve diminuir na altura do *billet* no início do processo, para formar a mesma cavidade que é usinada atualmente com um *billet* inicial com altura de 62mm, conforme foi mostrado na figura 3.3.

5.1 Projeto das Matrizes

O procedimento adotado para fabricação de matrizes e punção foi estabelecido, sabendo que o processo de forjamento para obtenção da pré-forma da broca seria a quente, ou seja, aproximadamente à temperatura de 1200° C (de acordo com a temperatura de forjamento do aço AISI 8640). A partir desse ponto, foi projetada a matriz inferior, matriz superior, punção, pino extrator e bolacha extratora de aço AISI H13, que é considerado um aço conveniente para esse processo citado, pois tem as características de resistência à abrasão e à deformação plástica em altas temperaturas.

Após a definição do aço, foram realizados os desenhos necessários de cada componente citado acima, de acordo com os êxitos, erros e resultados dos ensaios anteriores com cobre e

materiais de fácil modelamento, somados às regras necessárias em um projeto de matrizes e punção que serão utilizadas em um projeto de realização do processo de forjamento a quente.

Sabendo que os ensaios seriam realizados em uma prensa hidráulica disponível para o ensaio de capacidade máxima de 7355kN, com um forno elétrico de capacidade de temperatura de 1250° C, foi analisado como seria montado o sistema de montagem e produção das matrizes e punção para a realização dos ensaios de forjamento a quente.

Para o projeto e posterior usinagem da matriz inferior, partiu-se da utilização de um bloco de aço AISI H13, de forma cilíndrica com diâmetro disponível no mercado de aproximadamente 150mm. No desenho para a confecção da peça, foi produzido o rasgo lateral para prender a matriz inferior na prensa, um furo de 21mm de diâmetro para o pino extrator levantar a bolacha extratora para a retirada da peça após o forjamento, um ângulo de saída na cavidade da matriz inferior de 5°, para facilitar a retirada da peça e para diminuir o atrito na extração da peça, o canal de rebarba para deposição de material, quando necessário, e um rebaixo de 15° de angulação na parte superior da matriz inferior para encaixe e alinhamento com a matriz superior durante o processo. Na figura 5.1, é observado uma vista lateral em corte de um desenho da matriz inferior de acordo com o projeto de forjamento da pré-forma da broca.

No desenho para produzir a matriz superior, foi projetado um furo central passante de 30mm para a passagem do punção, durante o processo de forjamento, um rasgo lateral para prender a matriz na parte superior da prensa através de prendedores, canal de rebarba e rebaixo com uma angulação de 15° para encaixe e orientação na união com a matriz inferior durante o processo. Na figura 5.2, é visualizado em corte lateral um desenho da matriz superior com os detalhes citados neste parágrafo.

O projeto do punção é um fator de grande importância para a realização deste trabalho, pois a angulação em sua ponta de entrada na peça que vai ser forjada definirá a cavidade produzida na pré-forma para a posterior fabricação da broca. De acordo com a cavidade que deve ser produzida na peça, tendo uma profundidade de 46mm e uma angulação de 5,5°, foi então projetado um punção de forma cônica. O resto do corpo deste punção foi projetado em relação à sua necessária passagem pelo furo existente na matriz superior e para receber uma força compressiva em direção à peça que vai ser forjada. Na figura 5.3, observa-se um

desenho do punção, mostrando a angulação citada neste parágrafo e os detalhes necessários para a passagem pela matriz superior até chegar ao final do processo.

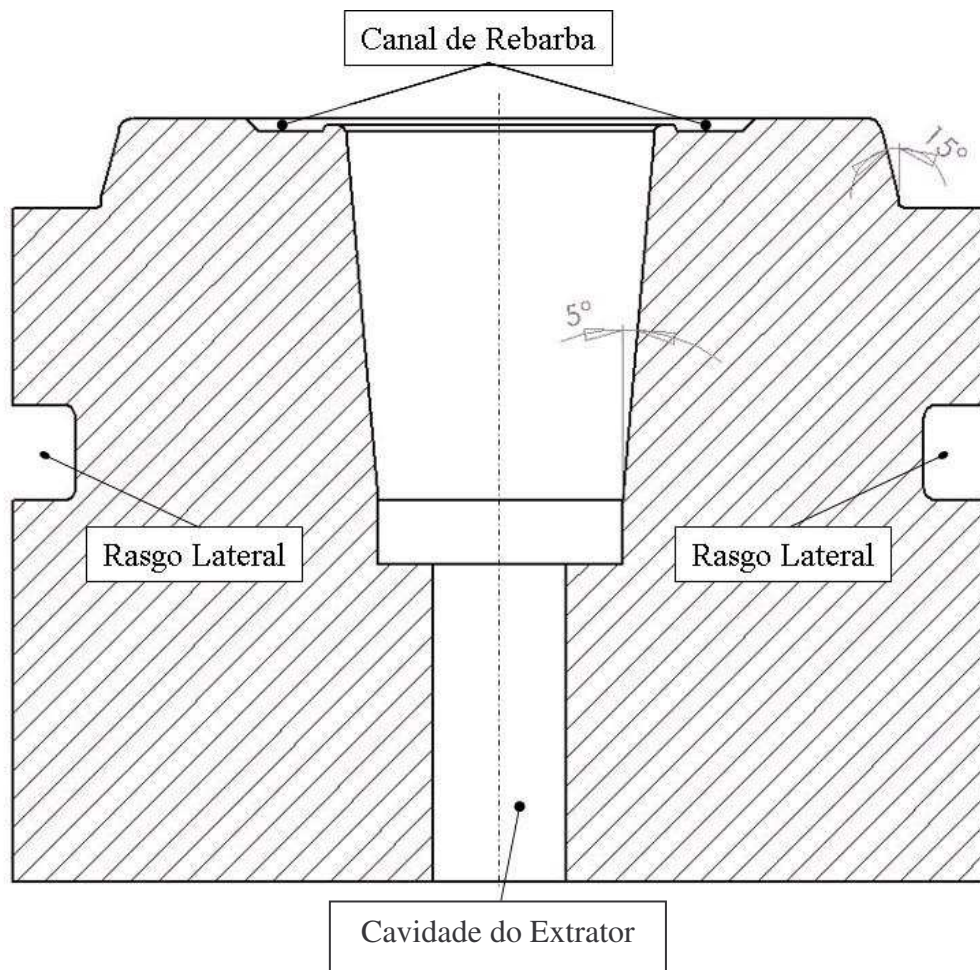


Figura 5.1 – Vista lateral em corte da matriz inferior.

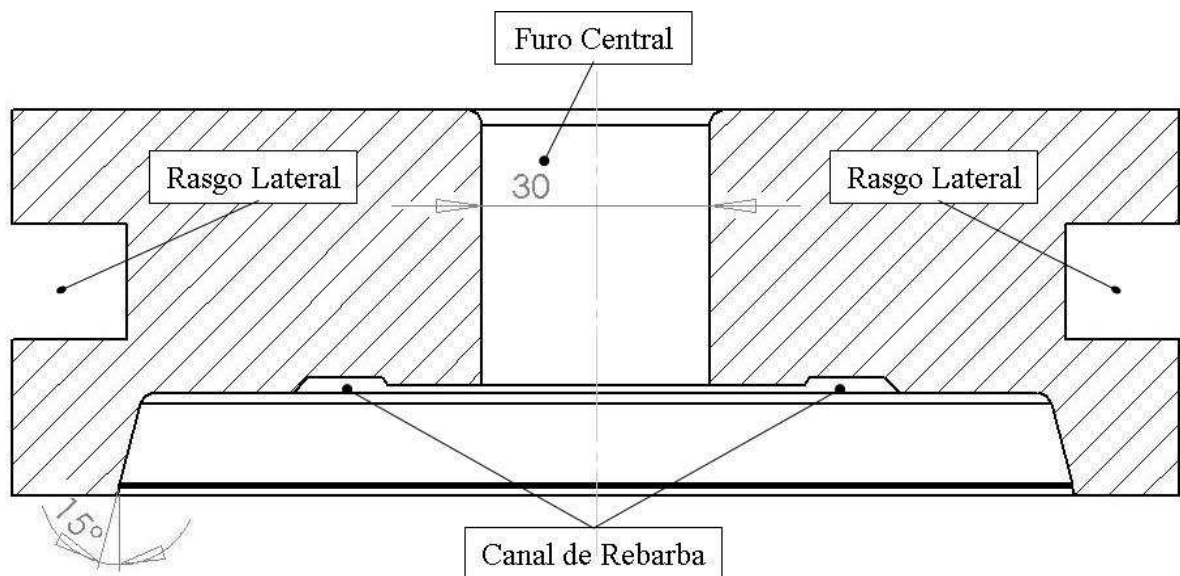


Figura 5.2 – Vista lateral em corte da matriz superior.

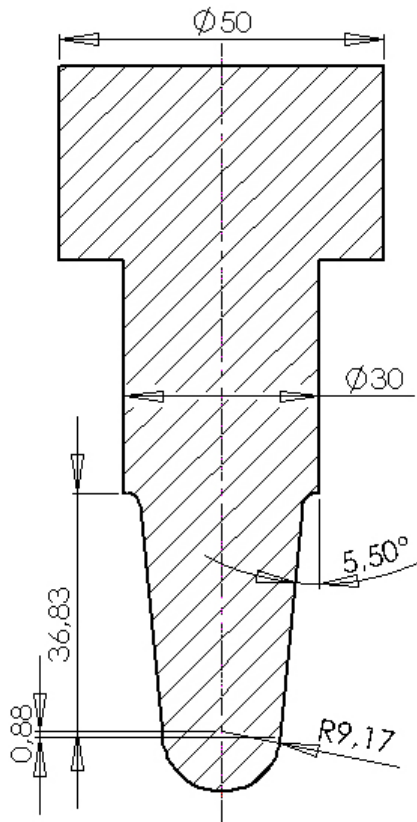


Figura 5.3 – Vista lateral em corte do punção.

O aço AISI H13, utilizado para a fabricação de matrizes e punção deste trabalho, foi usinado a partir de seu estado bruto. Nas figuras 5.4, 5.5 e 5.6, são mostradas estas peças de aço AISI H13, após a usinagem, antes da realização de tratamento térmico necessário para a realização do processo de forjamento.



Figura 5.4 – Matriz inferior produzida em um CNC.

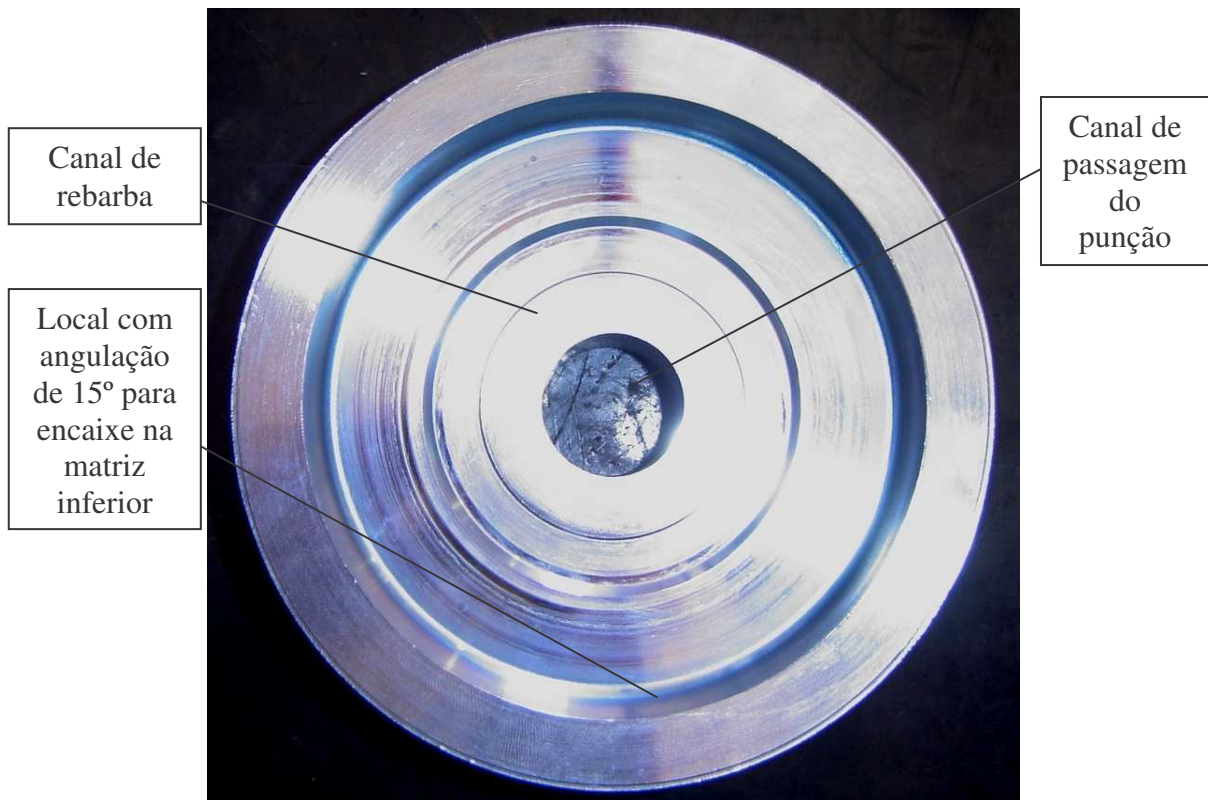


Figura 5.5 – Vista de topo da matriz superior produzida em um CNC.



Figura 5.6 – Punção de aço AISI H13 produzido em um CNC.

5.1.1 Tratamento Térmico Realizado no Aço AISI H13

Estas peças de aço AISI H13 foram fornecidas no seu estado recozido (esferoidizado) com uma dureza máxima de 240 HB. Após as peças serem confeccionadas, realizou-se sobre uma seqüência de tratamentos térmicos necessários às peças que serão utilizadas em um processo de conformação a quente. No caso do aço AISI H13, seguiram-se os seguintes procedimentos: após a usinagem de desbaste, realizou-se um alívio de tensões (uma hora para cada 25mm, considerando da lateral da peça para seu centro) em uma temperatura de 650°C, deixando as peças resfriarem no forno até 500° C e após em ar calmo. Após a usinagem final, realizou-se uma têmpera, elevando o material a uma temperatura entre 1000 e 1040° C com resfriamento rápido em óleo até 400°C e na seqüência, em ar soprado. Para encerrar o tratamento são aplicados dois revenimentos para chegar a uma dureza final mais uniforme.

Após a realização da seqüência de tratamentos térmicos, foi aplicado um passe de retifica nas matrizes (principalmente na cavidade interna da matriz inferior onde será colocado o *billet* na saída do forno e na cavidade de passagem do punção na matriz superior). E no final, obteve-se uma dureza média nas matrizes e punção de 52 HRC. Esta dureza no aço AISI H13 se mostrou apropriada para realizar o processo de forjamento a quente do aço baixa liga AISI 8640.

5.2 Resultados Experimentais no Forjamento A Quente do Aço AISI 8640

O procedimento experimental de forjamento para a obtenção da pré-forma da broca de furação de rochas, foi realizado no LdTM/UFRGS, através da utilização de uma prensa hidráulica (figura 5.7) de capacidade máxima de 7350kN, marca FKL Máquinas Hidráulicas, modelo FKL HDL 750 e com acionamento automático.

Os componentes utilizados nos ensaios foram montados da seguinte forma: uma célula de carga de 3920kN que mostra a carga aplicada durante o processo; quatro prendedores para as matrizes serem fixadas na prensa (dois para a matriz inferior e dois para a matriz superior); dois prendedores para fixar a célula de carga na base inferior da prensa; uma matriz inferior, uma matriz superior, um punção, um pino extrator e uma bolacha extratora, sendo todos estes, citados, de aço AISI H13; um forno elétrico com temperatura máxima alcançada de 1250° para aquecimento dos *billets*; dois termopares para verificar a temperatura do forno e da

matriz em seu pré-aquecimento e um coletor de dados (com software Catman Express, modelo Spider 8, marca HBM), para obter a curva da força vs. deslocamento.



Figura 5.7 – Prensa hidráulica de 7350 kN utilizada no LdTM para forjamento da pré-forma.

Foram usinadas peças cilíndricas de alturas diferentes para a realização dos ensaios, mantendo o mesmo diâmetro em todas elas, ou seja, 38,1mm. Com isso, seria possível cumprir a idéia de ver qual altura e volume de peça preencheriam a matriz inferior, formando a pré-forma inteira com o mínimo de formação de rebarba. Isto é considerado conveniente, já que a parte externa da peça será usinada pela empresa, só interessando ao processo de forjamento a formação da cavidade desta pré-forma. Na figura 5.8, são observados os *billets* usinados com alturas e volumes diferentes.

Com as dimensões de matrizes e punção definidas e tratamentos térmicos adequados, partiu-se para a montagem das matrizes na prensa em que ocorreriam os ensaios. Na parte superior da prensa em que ocorreria o movimento em direção à parte inferior, para forjar a peça, o punção foi encaixado na cavidade de passagem da matriz superior e, depois dessa montagem, estes foram presos por dois prendedores que se encaixaram ao rasgo existente na matriz superior. Na figura 5.9, é observada a matriz superior e punção fixados pelos prendedores à parte superior da prensa.

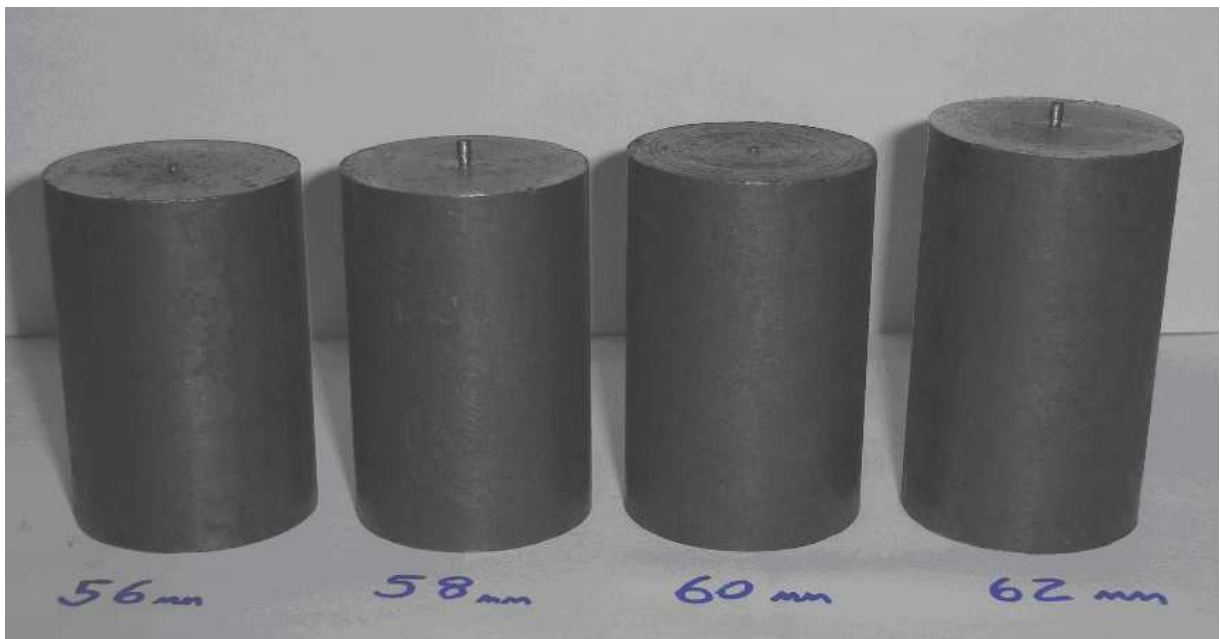


Figura 5.8 – Peças usinadas de mesmo diâmetro e alturas diferentes para ensaios de forjamento.

Para a montagem da matriz inferior, na prensa, seguiu-se o mesmo procedimento, onde, através do rasgo lateral, a matriz foi fixada na célula de carga que estava fixada na parte inferior da prensa. É importante citar que a parte inferior da prensa ficará fixa e a carga aplicada se originará da parte superior da prensa. Na figura 5.10, é observada a matriz inferior fixada pelos prendedores na célula de carga que por sua vez está fixada à parte inferior da prensa; e na figura 5.11 é visto todo o sistema montado com a célula de carga, matriz inferior, matriz superior e punção na prensa hidráulica do LdTM/UFRGS.

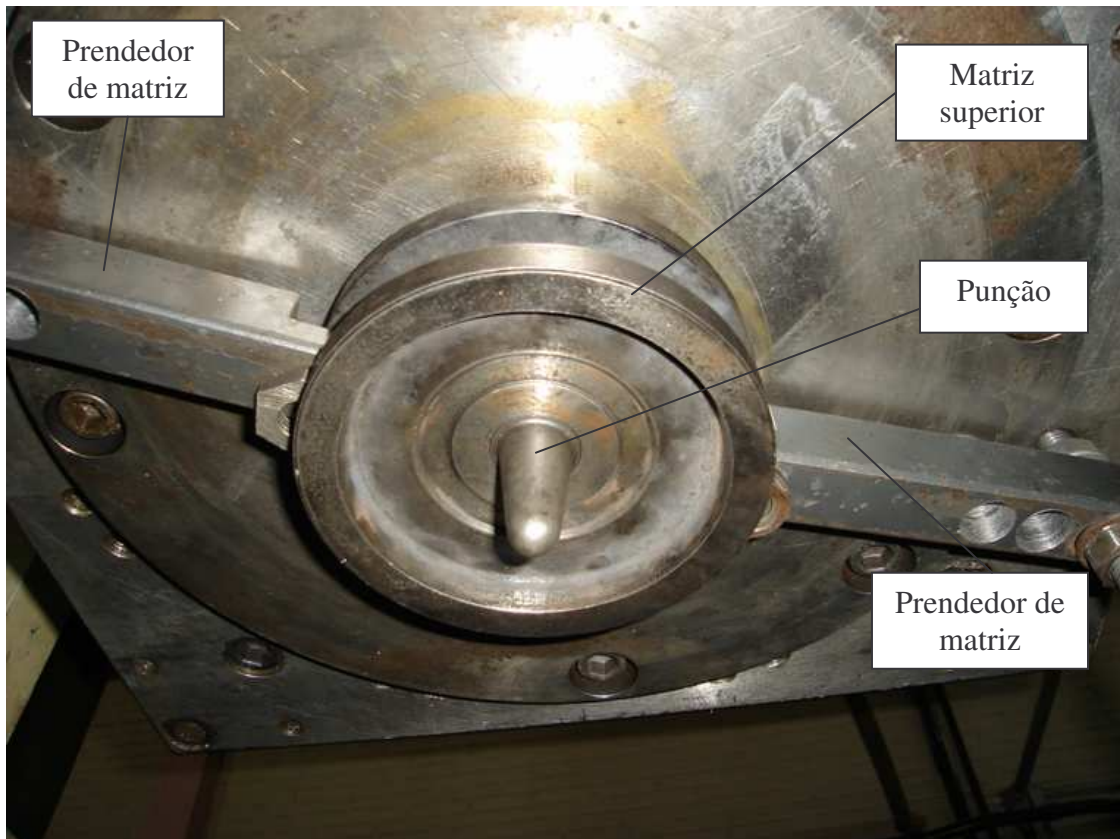


Figura 5.9 – Matriz superior e punção fixados a parte superior e móvel da prensa.

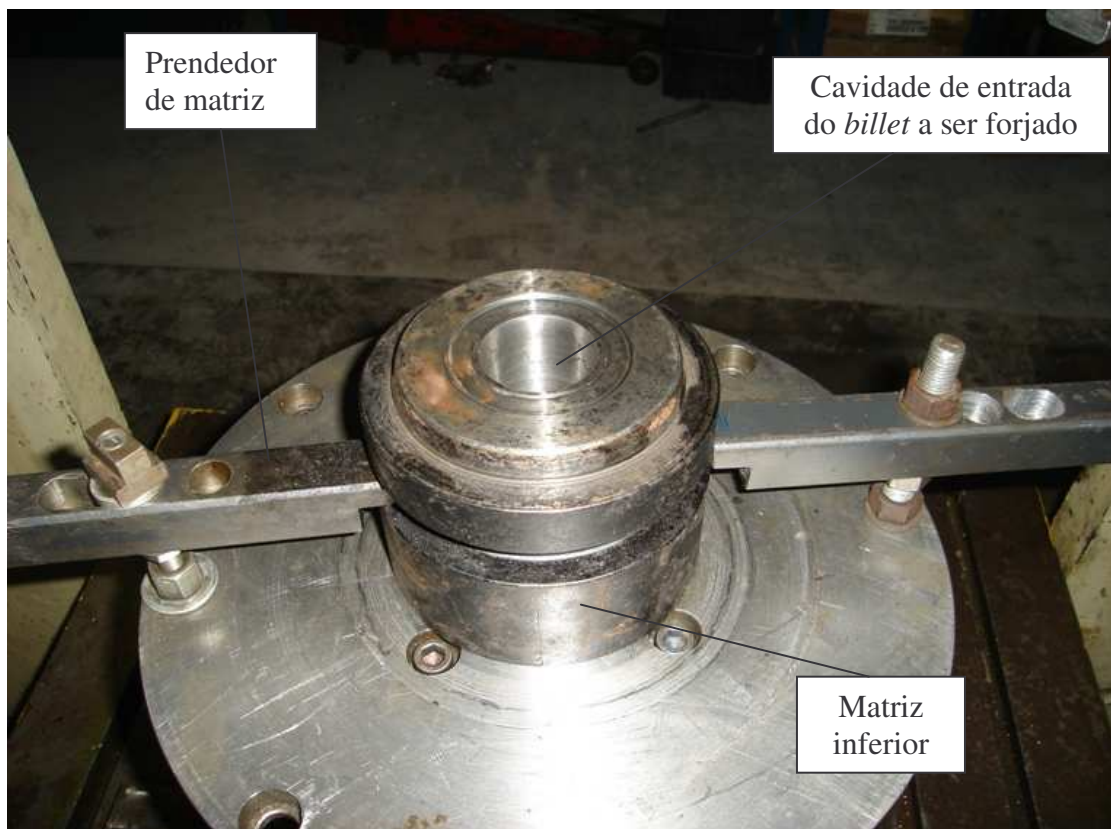


Figura 5.10 – Matriz inferior fixada por prendedores.

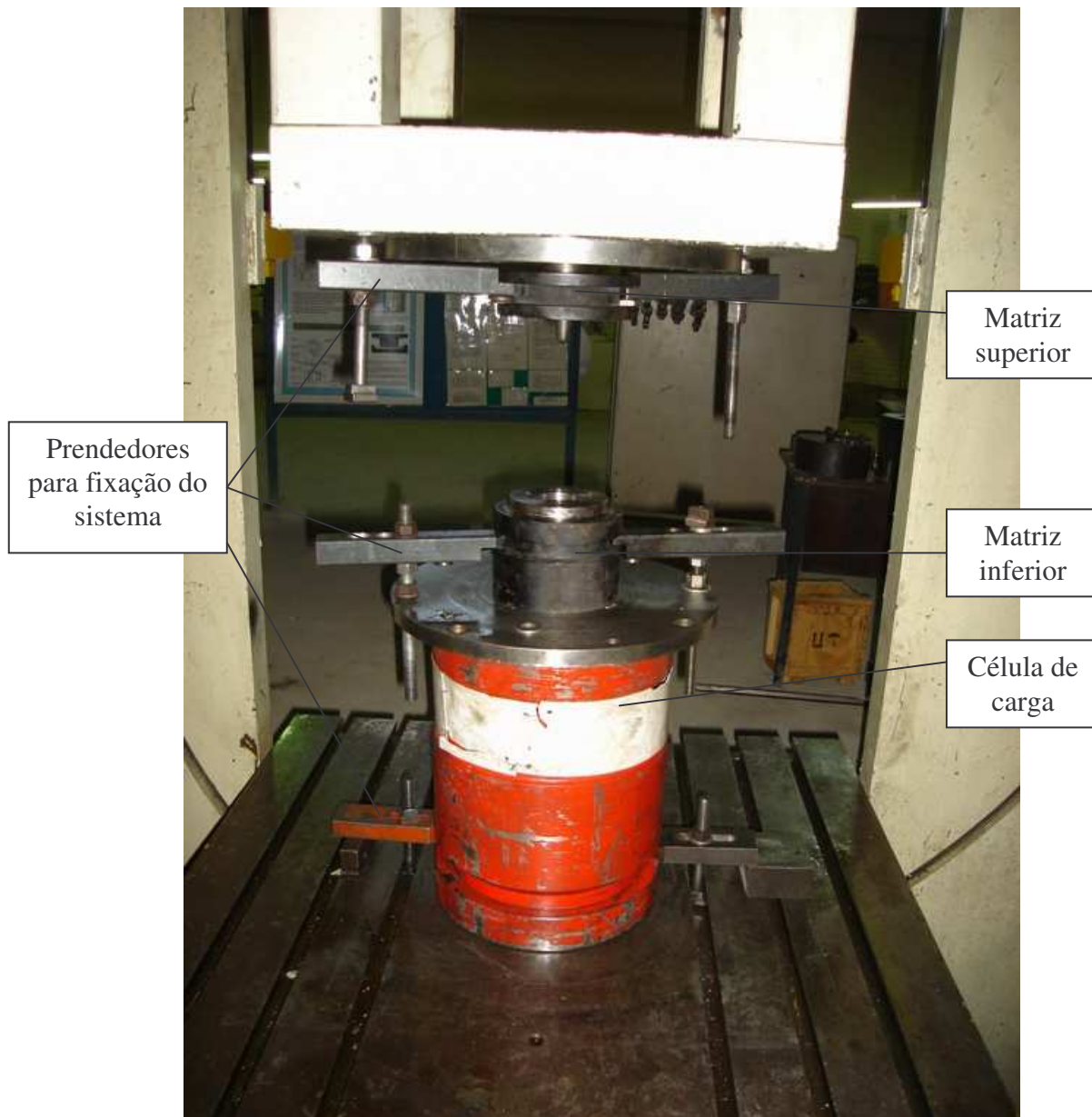


Figura 5.11 – Sistema montado para realização do processo.

As peças de aço AISI 8640 que foram forjadas, anteriormente ao processo, foram colocadas dentro de um forno elétrico à temperatura de 1200°C, até atingirem essa temperatura em toda a sua seção. Com a montagem das matrizes e punção na prensa e com a instalação do coletor de dados, para verificar o deslocamento do punção, desde o primeiro contato com o *billet* (que estará colocado na cavidade da matriz inferior para ser forjada) até a penetração total do punção, faz-se necessário seguir a seguinte seqüência para a obtenção da pré-forma: a peça deve ser retirada do forno, colocada na cavidade da matriz inferior, forjada através de um punção e imediatamente deve ser extraída pelo extrator. Na figura 5.12 e 5.13, é observado um desenho da montagem do sistema, mostrando o caminho seguido pelo punção para forjar a peça antes da penetração e ao final da penetração respectivamente.

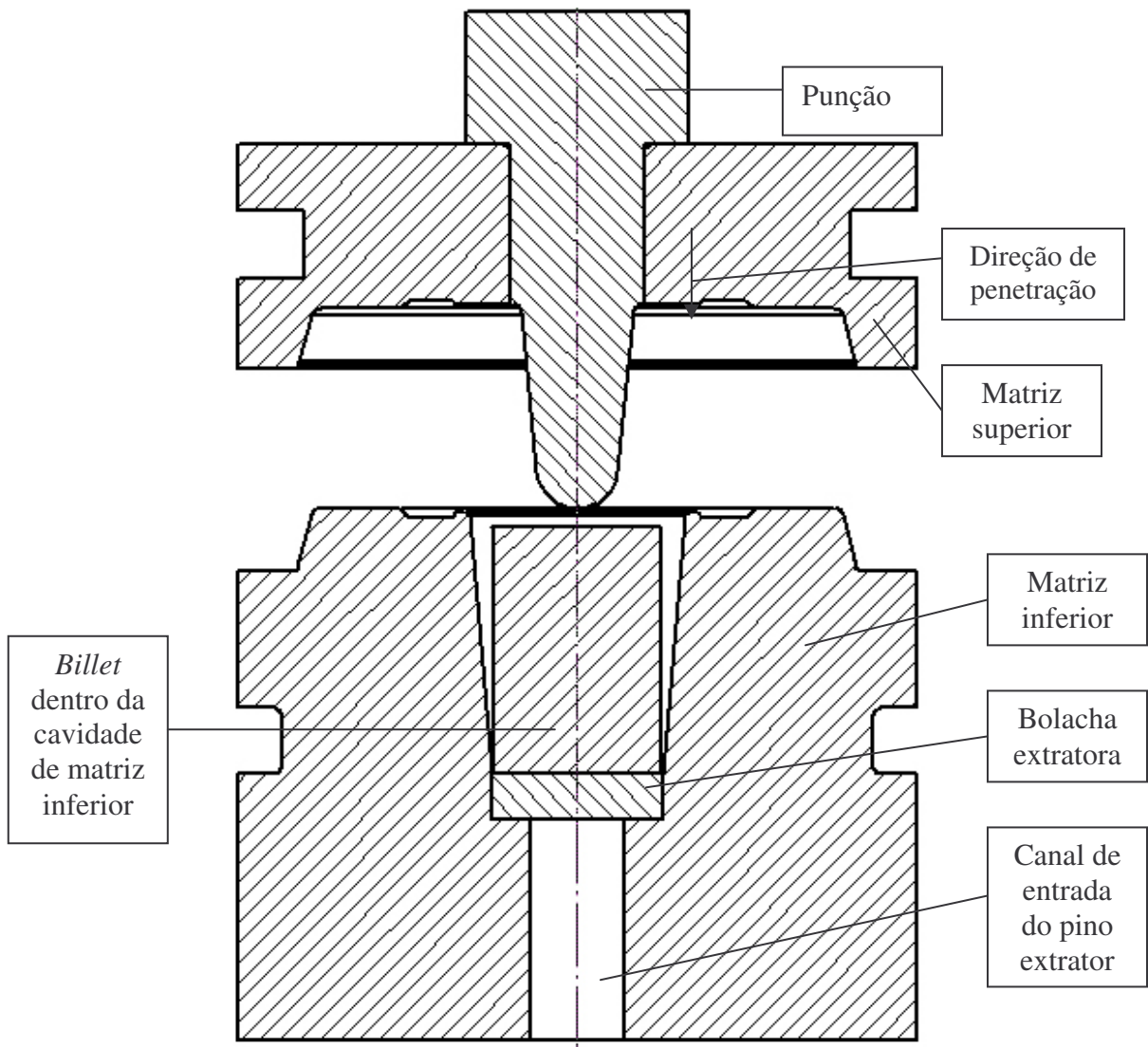


Figura 5.12 – Vista lateral do desenho em corte dos componentes do sistema para forjamento da pré-forma antes do processo.

Para a realização dos ensaios, foi necessário seguir os procedimentos de lubrificação das matrizes e punção antes da colocação da peça aquecida para o forjamento. Foi utilizado um produto grafitado (ATAN 777), e seguiram-se as seguintes instruções do fabricante: como o produto foi fornecido de forma concentrada, houve o procedimento de diluição em água na proporção de 1:5 (produto: água). A aplicação foi feita por pulverização sobre as matrizes e punção, e estes estavam a uma temperatura acima de 100° C para evaporação da água. E, para o sucesso dessa aplicação, as matrizes e punção devem estar isentas de sujeiras e carepas.

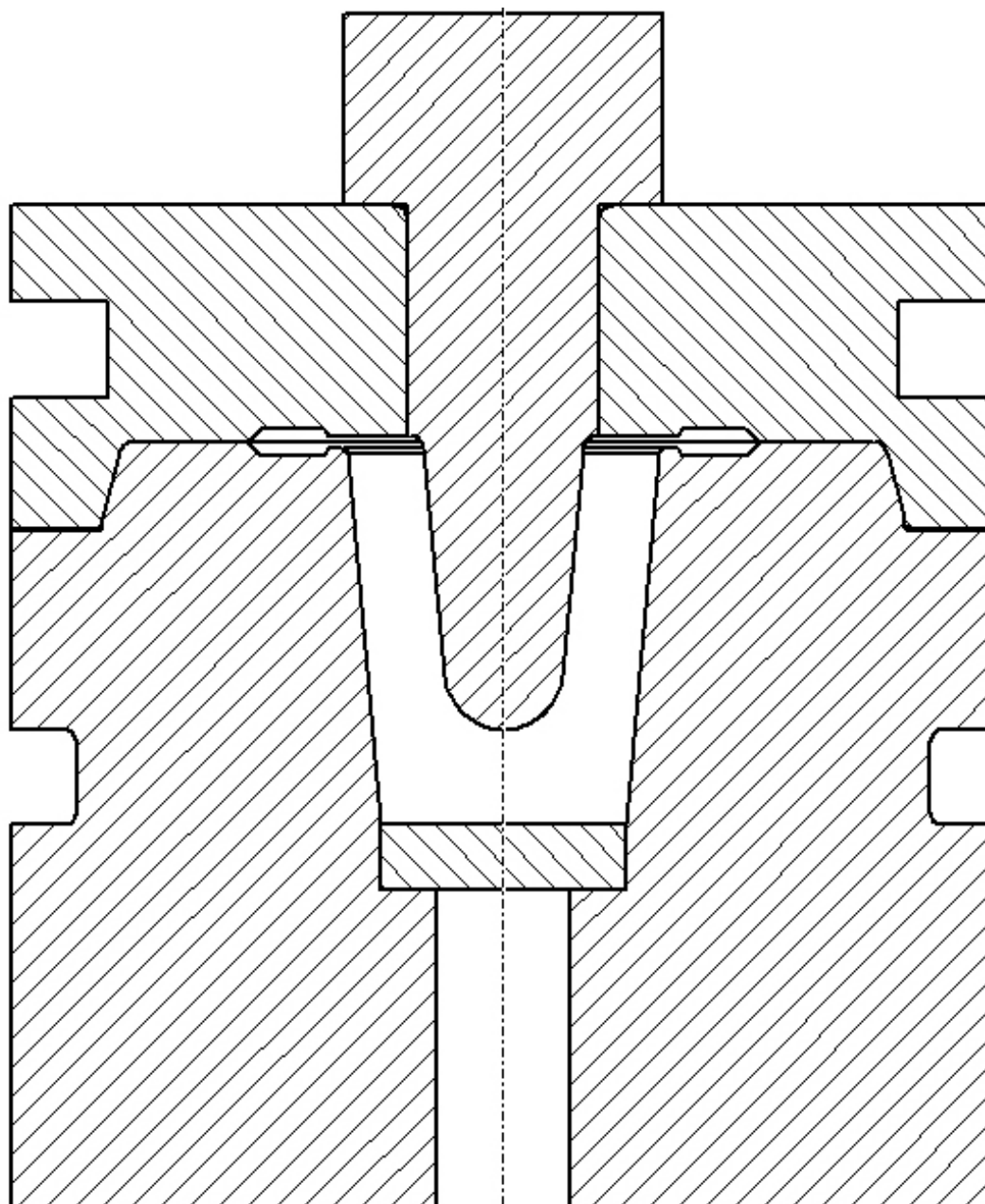


Figura 5.13 – Vista lateral do desenho em corte dos componentes do sistema para forjamento da pré-forma depois do processo.

Partiu-se, então, para um ensaio de forjamento a quente, com um *billet* de 38,1mm de diâmetro e 58mm de altura, considerando um volume inicial de 66125mm³. Esta peça de aço AISI 8640 foi ao forno que estava à temperatura de 1200° C. A peça deve atingir esta temperatura em toda sua seção, para ser forjada. Após esse aquecimento, e com todo o sistema pronto para forjar a peça, esta foi retirada do forno e levada até a cavidade da matriz inferior, o mais rápido possível, com o intuito de não perder temperatura no caminho do forno até a cavidade citada para o princípio da penetração do punção e conseqüente conformação da peça.

A cavidade da matriz inferior e o punção foram previamente aquecidos a uma temperatura de 100°C, necessária para a absorção do lubrificante. Na figura 5.14, é observada a cavidade formada, porém, com falta de preenchimento na sua borda superior devido ao ângulo de saída da matriz inferior de 5° (maior em relação ao ensaio feito com cobre). E também é observada a conseqüente formação de carepa, fator que é comum ao processo de conformação a quente, o que causa um pouco mais de perda de material na parte superficial da peça neste processo de conformação a quente.



Figura 5.14 – Peça forjada com falta de preenchimento na borda superior.

Pelo gráfico obtido no programa que coleta os dados dos ensaios em relação à força, com uma penetração de 44mm, foi necessária uma força de aproximadamente 605kN para obter esta cavidade com um billet inicial de altura de 58mm. Na figura 5.15, é observado o gráfico força vs. penetração do punção, considerando desde o contato inicial do punção com a peça até a penetração de 44mm e conseqüente formação da cavidade da pré-forma.

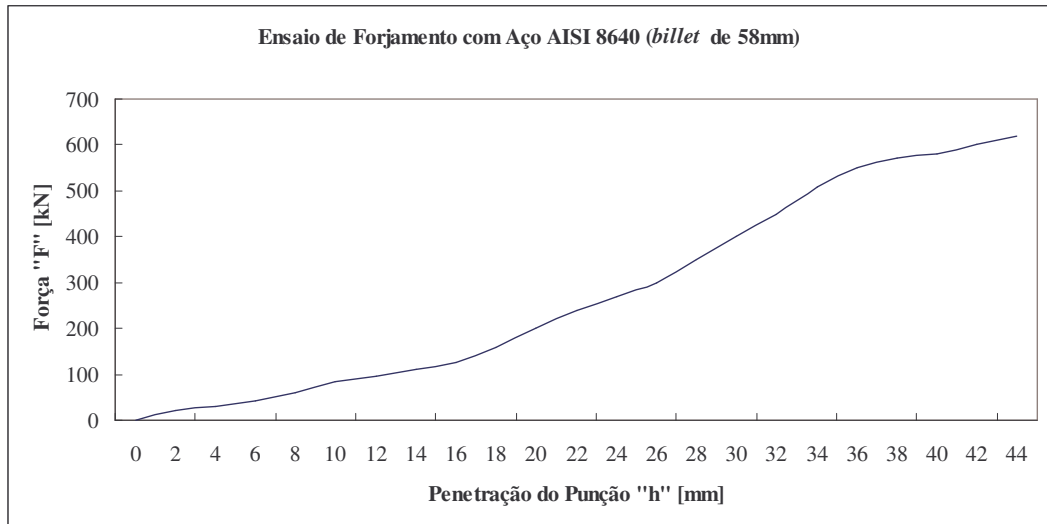


Figura 5.15 – Força necessária para a penetração total do punção em um *billet* de altura inicial de 58mm.

A partir deste resultado, utilizou-se, como ponto de partida, um *billet* com o aumento da altura inicial para 60mm, o mesmo diâmetro de 38,1mm e conseqüente volume de 68405mm³, ou seja, um aumento de 2mm na altura e de 2280mm³ de volume de peça inicial em relação ao *billet* do ensaio anterior. Foi seguido o mesmo procedimento de lubrificação e aquecimento utilizados no ensaio da peça anterior. Com o resultado ocorreu o preenchimento da parte superior da peça, praticamente sem formação de rebarba (figura 5.16).



Figura 5.16 – Peça forjada com a produção completa da pré-forma.

O ensaio realizado com um *billet* inicial com altura de 60mm, diâmetro de 38,1mm e volume de 68405mm³, mostrou a formação da pré-forma necessária para a fabricação da broca de furação de rochas com uma força de prensa aplicada de aproximadamente 660kN.

Na figura 5.17, é observado o gráfico força vs deslocamento que mostrou a formação da pré-forma para a fabricação de brocas.

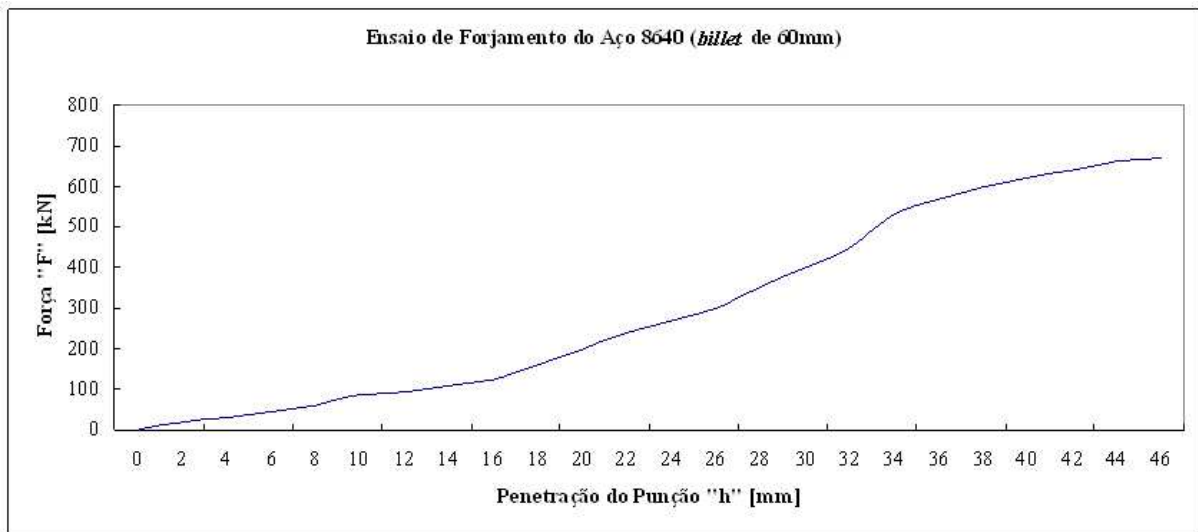


Figura 5.17 – Força necessária para a penetração total do punção em um *bilhet* de altura inicial de 60mm.

6. TEORIA ELEMENTAR DA PLASTICIDADE (TEP)

Existem diferentes métodos aproximados, tanto analíticos como numéricos, para analisar os problemas de conformação dos metais. Nenhum deles é perfeito, por hipóteses assumidas no desenvolvimento do modelo matemático. Além disso, todos os métodos de análise requerem como entrada a descrição do comportamento do material sob as condições do processo, isto é, dados de tensão de escoamento, um valor quantitativo para descrever o atrito, índice de encruamento e coeficiente de resistência.

Para a busca do comportamento do material, sob as condições de processo, é necessária a realização de testes, como os ensaios de compressão que fornecem a curva de escoamento do material, do qual são retirados os dados necessários à aplicação da teoria elementar da plasticidade.

Para a construção das curvas de escoamento nas situações em que não há uma dependência da velocidade de deformação, como os realizados à temperatura ambiente, qualquer máquina universal de ensaios mecânicos pode ser utilizada. Para determinados materiais, principalmente os utilizados nos processos de conformação em altas temperaturas, a influência da velocidade de deformação passa a ser extremamente significativa.

As curvas de escoamento, nestes casos, devem ser construídas para parâmetros constantes que não se alteram durante o ensaio. Assim sendo, um material pode ser perfeitamente conhecido sob o ponto de vista de suas propriedades de conformabilidade, quando suas curvas de escoamento forem construídas em função da deformação, mantendo-se constante a velocidade de deformação e temperatura.

6.1 Aplicação para o Cobre

6.1.1 Curva de Escoamento

O ensaio de compressão é o processo que, com boa lubrificação, mais se adapta à determinação das curvas de escoamento. No ensaio em questão, foi utilizado como lubrificante Teflon, que é recomendado para utilização até a temperatura de 300°C. O ensaio de compressão foi realizado à temperatura ambiente com cobre eletrolítico no Laboratório de

Transformação Mecânica (LdTM), com corpos de provas cilíndricos com dimensões de 8mm de diâmetro por 12mm de altura. Deste ensaio, pode-se retirar a tensão de escoamento inicial do material, sendo 103MPa.

Na figura 6.1, pode-se observar a curva de escoamento obtida pelo ensaio de compressão do material. Através da fórmula fornecida pela curva tendência de região de deformação plástica do cobre, a qual relaciona a tensão de escoamento, a deformação e o índice de encruamento obtém-se uma constante “C” ($C = 451,7\text{MPa}$) e o índice de encruamento ($n = 0,596$).

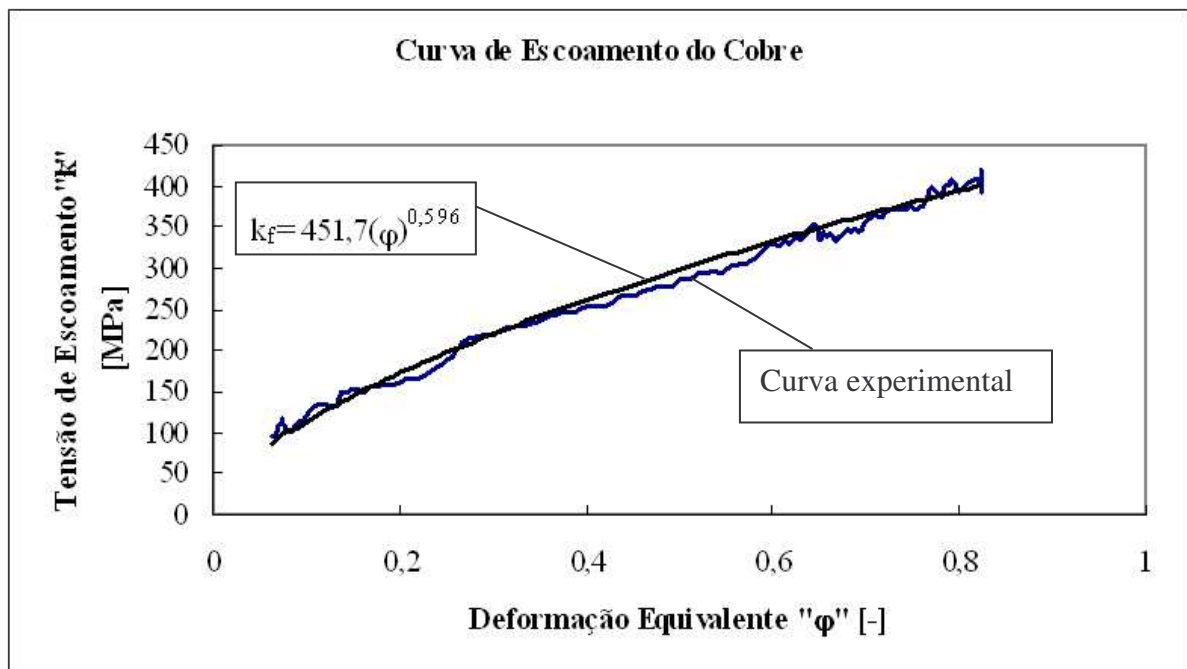


Figura 6.1 – Curva de escoamento do cobre a temperatura ambiente.

6.1.2 Desenvolvimento da TEP

Para os cálculos da força necessária para formação da pré-forma da broca, dividiu-se em duas etapas de conformação: a região 1 com forjamento e a região 2 com extrusão. Na figura 6.2, pode-se observar a separação da peça forjada em duas regiões.

Região 1 – Material é forjado (área abaixo do punção onde há compressão do material).

Região 2 – Material é extrudado (escoa de forma inversa entre as paredes da matriz e o punção).

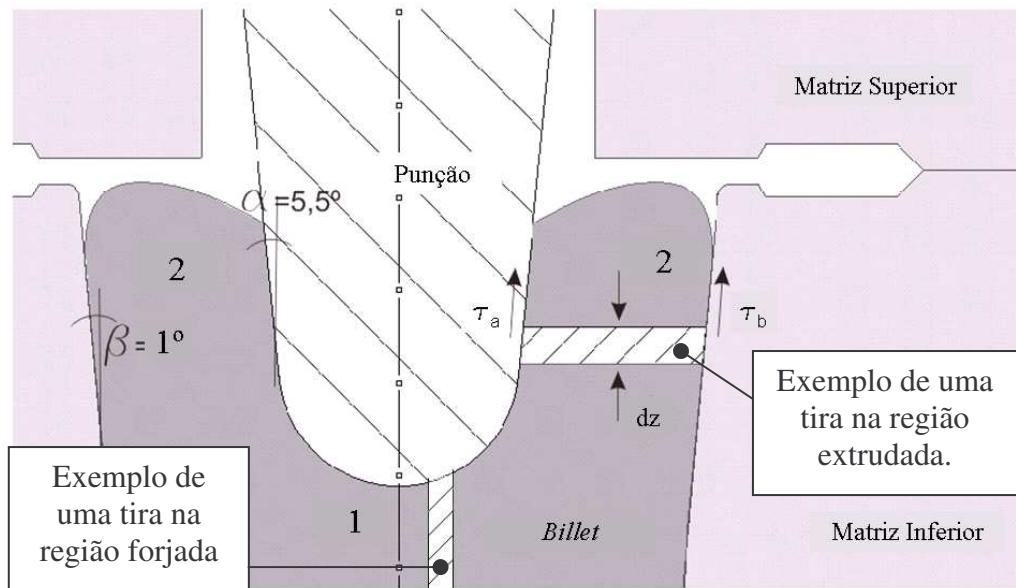


Figura 6.2 – Separação de duas regiões para cálculo e obtenção da pré-forma de cobre.

Na figura 6.3. pode-se observar um croqui demonstrando a variação do raio (r) do punção durante a penetração no *billet* variando de 0 a 9,17 para a parte forjada e de 9,17 a 12,76 para a parte extrudada. Esta variação ocorre devido à angulação de $5,5^\circ$ que deve existir nas paredes internas da pré-forma.

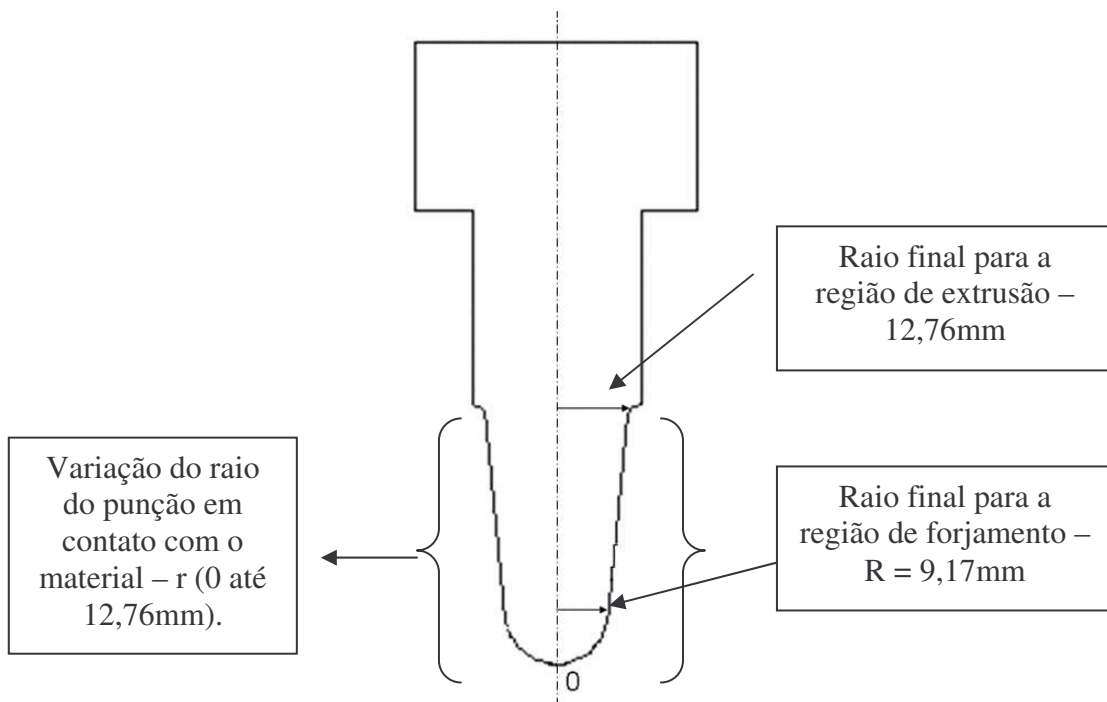


Figura 6.3 – Demonstração da variação do raio do punção (r).

Para a divisão em tiras, nas regiões de forjamento e extrusão, é necessário demonstrar o caminho seguido pelo punção na sua penetração para a fabricação da pré-forma. Nas figuras 6.4, 6.4 e 6.6 é observada a seqüência para a divisão em tiras de acordo com o caminho de fabricação da pré-forma. Primeiramente aparece a demonstração do primeiro contato do punção com o *billet* (figura 6.4), tendo na seqüência a parte forjada no início da penetração (figura 6.5), e finalmente, a parte extrudada com as tiras mostrando a extrusão de forma inversa entre o punção e as paredes da matriz (figura 6.6).

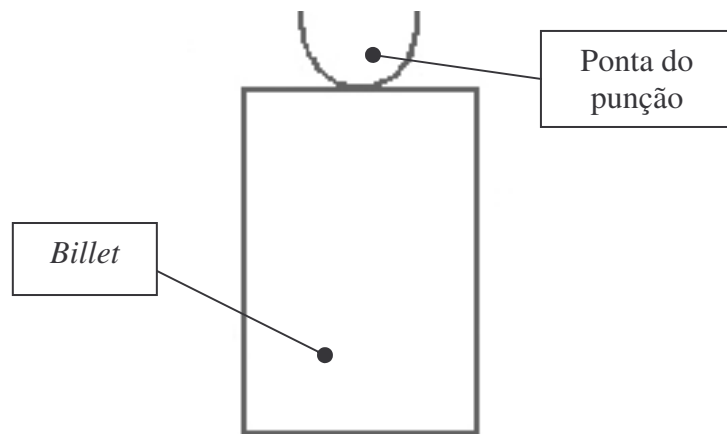


Figura 6.4 – Ponta do punção iniciando contato com a peça.

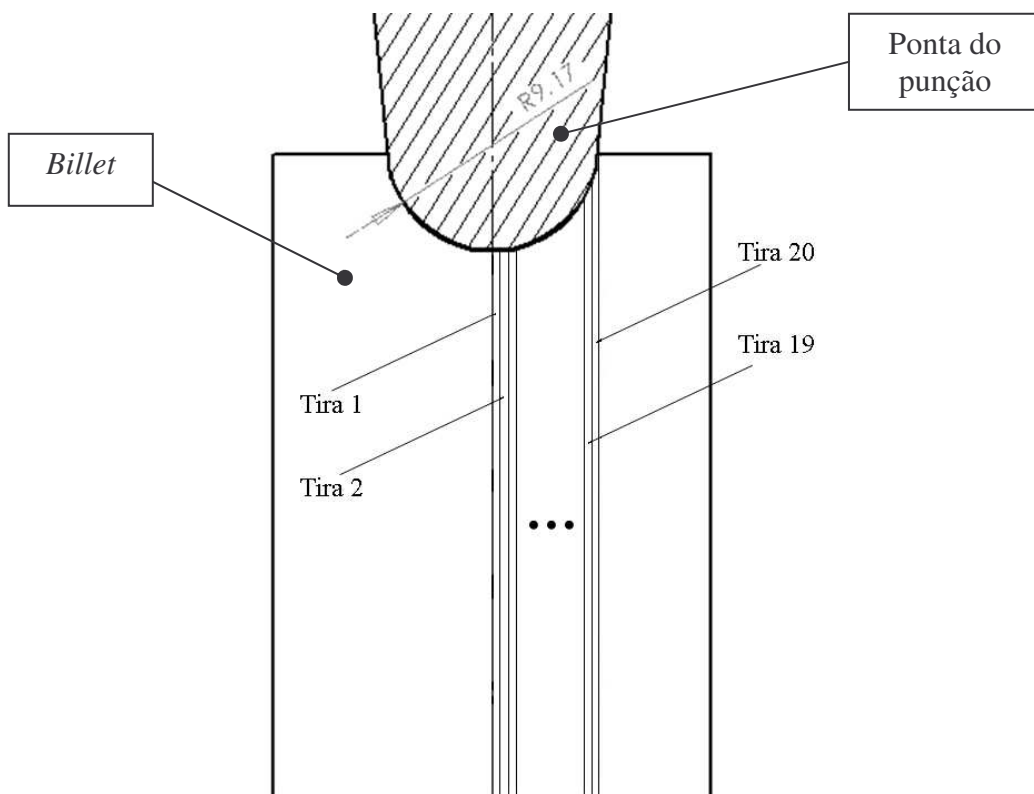


Figura 6.5 – Divisão em tiras para a parte forjada.

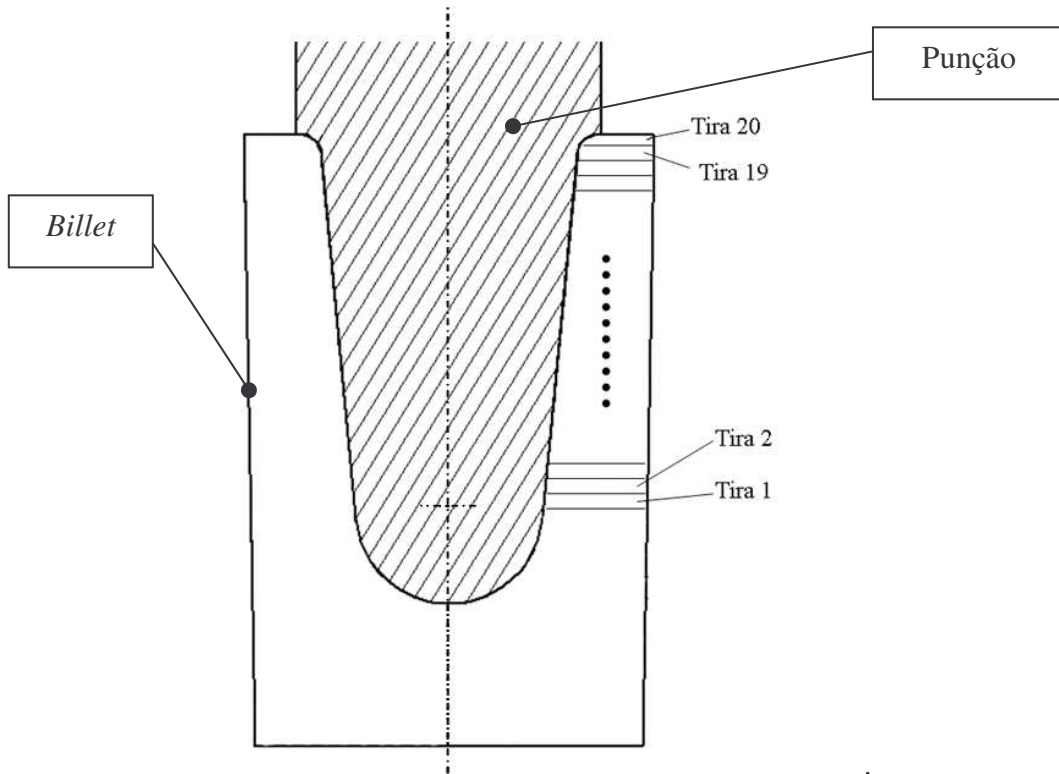


Figura 6.6 – Divisão em tiras na extrusão da peça.

Na figura 6.7, podem-se observar os incrementos utilizados nas tiras das regiões de forjamento e extrusão. Os incrementos são os valores acrescentados para a formação da tira seguinte que será calculada. Os três incrementos utilizados são observados no diâmetro do punção “ I_d ”; na região abaixo do punção “ I_p ” e na altura da tira “ I_h ”.

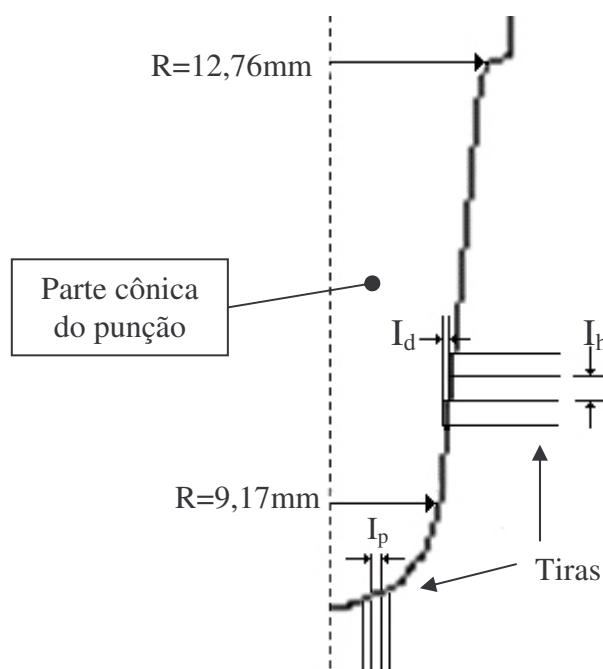


Figura 6.7 – Detalhes dos incrementos através da vista da parte cônica do punção.

Na figura 6.8 são demonstradas as variáveis D_b (diâmetro da matriz na tira) e D_i (diâmetro do punção na tira). Já, na figura 6.9, se pode observar a variação da altura da tira, que é diretamente influenciada pela penetração do punção e o comprimento final do forjado.

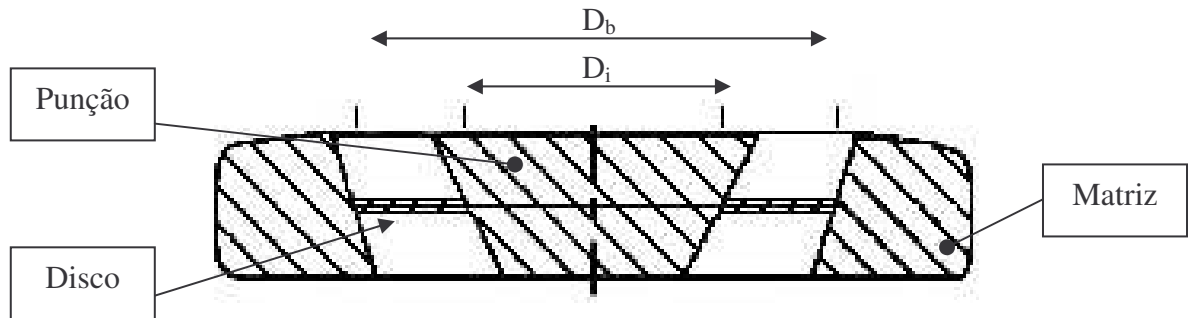


Figura 6.8 – Demonstração dos diâmetros na tira.

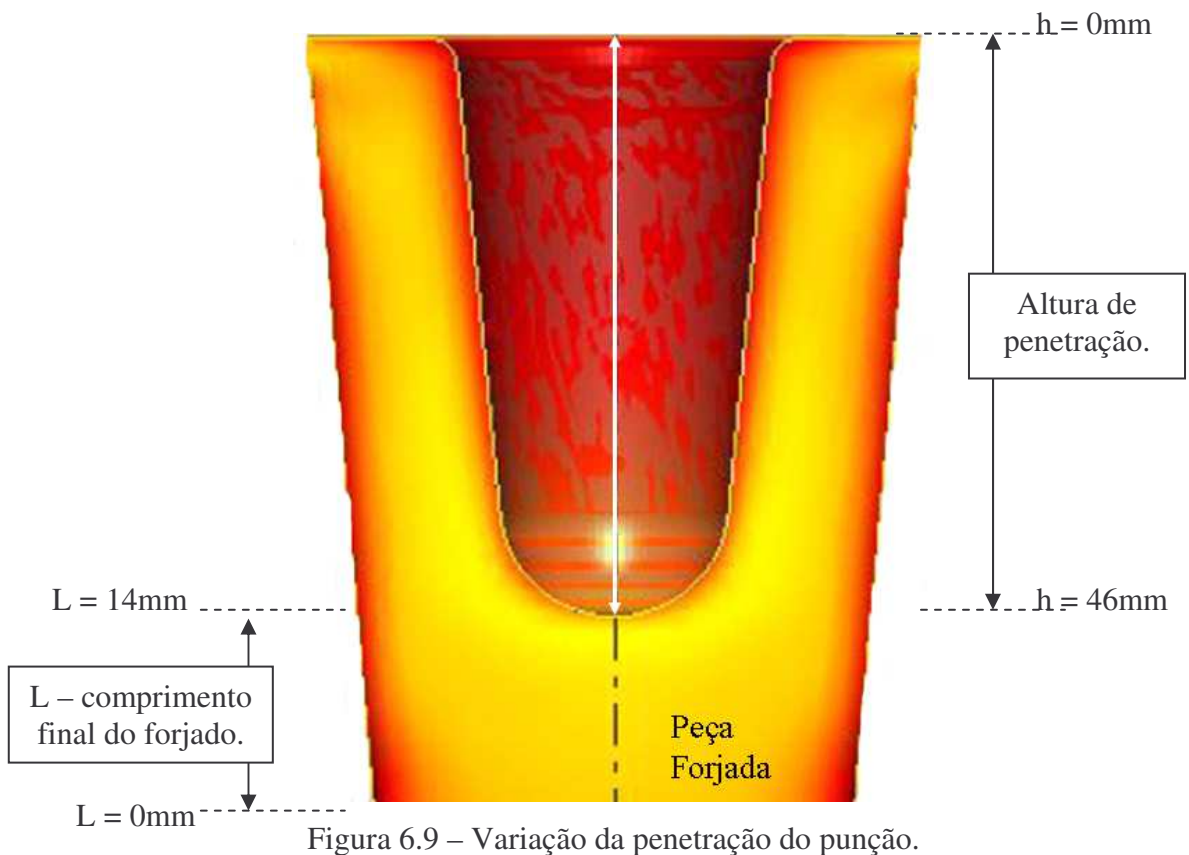


Figura 6.9 – Variação da penetração do punção.

Para a aplicação da TEP, cada região foi dividida em 20 (vinte) tiras para melhor discriminação dos cálculos e alguns parâmetros de entrada para os cálculos são citados abaixo:

k_f = tensão de escoamento – [MPa]

$n = \text{índice de encruamento} = 0,596$
 $\varphi = \text{deformação verdadeira} = \ln (H_{\text{billet}}/L)$
 $C = \text{coeficiente de resistência} = 451,7 \text{ MPa}$
 $H_{\text{billet}} = \text{altura do billet} = 56 \text{ mm}$
 $L = \text{comprimento do forjado} - [\text{mm}]$
 $\mu_i = \text{coeficiente de atrito entre broca e punção} = 0,2$
 $\mu_b = \text{coeficiente de atrito entre broca e matriz} = 0,2$
 $\alpha = \text{ângulo do punção} = 5,5^\circ = 0,0956 \text{ rad}$
 $\beta = \text{ângulo de saída da matriz} = 1^\circ = 0,0174 \text{ rad}$
 $R = \text{raio da ponta esférica do punção} = 9,17 \text{ mm}$
 $r = \text{variação do raio do punção na tira} - [\text{mm}]$
 $D_{\text{billet}} = 2 \times \text{raio do billet} = 38,1 \text{ mm}$
 $\sigma_R = \text{tensão radial} - [\text{MPa}]$
 $h = \text{altura da tira} - [\text{mm}]$
 $I_d = \text{incremento no diâmetro do punção} = 0,359 \text{ mm}$
 $I_p = \text{incremento abaixo do punção} = 0,4585 \text{ mm}$
 $I_h = \text{incremento na altura} = 2,3 \text{ mm}$

A tabela 6.1 é referente à região 1, que se refere à área sob o punção que o material está sendo forjado e foi dividida em cinco colunas, para mostrar as 5 variáveis dessa etapa: tira (tira que está sendo calculada), r [mm] (raio do punção na tira), h [mm] (altura da tira), L [mm] (comprimento do forjado), φ (deformação na tira), k_f [MPa] (tensão de escoamento na tira), σ_r (σ_1) [MPa] (tensão radial na tira), σ_z (σ_3) [MPa] (tensão axial na tira) e F_z [kN] (força axial sendo aplicada na tira). As fórmulas para o cálculo das variáveis da tabela 6.1 podem ser vistas abaixo:

$$r = (n^\circ \text{ da tira}) \times I_p \quad (19)$$

$$\sigma_r = -k_f \left\{ \exp \left[\left(\frac{2\mu_i}{L} (R-r) \right) - 1 \right] + \sigma_R \exp \left[\left(\frac{2\mu_i}{L} (R-r) \right) \right] \right\} \quad (20)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = k_f \quad \longrightarrow \quad \sigma_z = \sigma_r - k_f \quad (21)$$

$$F_z = \frac{\left(\sigma_z \frac{\pi}{4}\right) \cdot \left(\frac{r_{n+1} + r_n}{2}\right)^2}{1000} + F_{z_{n+1}} \cdot 0,8 \quad (22)$$

Tabela 6.1 – Etapa de forjamento da pré-forma de cobre.

tira	r [mm]	h [mm]	L [mm]	φ	k _f [MPa]	σ_r [MPa]	σ_z [MPa]	F _z [kN]
0	0,00	0,00	56,00	0,00	0,00	-1020,15	-1568,93	41,51
1	0,46	2,86	55,54	0,01	25,83	-999,73	-1548,51	51,80
2	0,92	4,00	55,08	0,02	39,14	-979,58	-1528,36	64,03
3	1,38	4,83	54,62	0,02	49,96	-959,69	-1508,47	78,07
4	1,83	5,50	54,17	0,03	59,46	-940,06	-1488,84	93,78
5	2,29	6,07	53,71	0,04	68,09	-920,68	-1469,46	111,00
6	2,75	6,55	53,25	0,05	76,10	-901,56	-1450,33	129,57
7	3,21	6,97	52,79	0,06	83,63	-882,68	-1431,46	149,32
8	3,67	7,34	52,33	0,07	90,79	-864,05	-1412,83	170,03
9	4,13	7,66	51,87	0,08	97,65	-845,66	-1394,44	191,47
10	4,59	7,94	51,42	0,09	104,25	-827,52	-1376,29	213,37
11	5,04	8,19	50,96	0,09	110,63	-809,61	-1358,38	235,39
12	5,50	8,40	50,50	0,10	116,83	-791,93	-1340,70	257,17
13	5,96	8,59	50,04	0,11	122,86	-774,48	-1323,25	278,22
14	6,42	8,75	49,58	0,12	128,76	-757,26	-1306,03	298,00
15	6,88	8,88	49,12	0,13	134,53	-740,26	-1289,04	315,83
16	7,34	8,98	48,66	0,14	140,19	-723,48	-1272,26	330,88
17	7,79	9,07	48,21	0,15	145,74	-706,92	-1255,70	342,11
18	8,25	9,12	47,75	0,16	151,21	-690,58	-1239,36	348,27
19	8,71	9,16	47,29	0,17	156,60	-674,45	-1223,23	347,80
20	9,17	9,17	46,83	0,18	161,92	-658,53	-1207,31	338,75

A tabela 6.2 refere-se à região 2, representando a etapa da extrusão. Esta tabela foi dividida em sete colunas: tira (tira que está sendo calculada), r [mm] (raio do punção na tira), h [mm] (altura da tira), L [mm] (comprimento do forjado), φ (deformação na tira), k_f [MPa] (tensão equivalente na tira), D_b [mm] (diâmetro da cavidade na matriz), D_i [mm] (diâmetro do punção na tira), V [mm³] (volume) e F_z [kN] (força axial sendo aplicada na tira). As fórmulas para o cálculo das variáveis da tabela 6.2 podem ser vistas abaixo:

$$r = \left(\frac{I_d}{2}\right) + r_{n-1} \quad (23)$$

$$I_h = \frac{46}{20} = 2,3 \quad (24)$$

$$D_b = \left((L + h) \cdot (\tan \beta) + \frac{D_{billet}}{2} \right) * 2 \quad (25)$$

$$D_i = 2 \cdot r \quad (26)$$

$$V = \left(L + \left(\frac{h_n + h_{n+1}}{2} \right) \right) \cdot (D_b^2 - D_i^2) \cdot \left(\frac{\pi}{4} \right) \quad (27)$$

$$F_z = \frac{V}{1000} \cdot \sigma_{eq} \cdot 4 \cdot \frac{\{(D_b (\mu_b - \tan \beta)) + D_i (\mu_i + \tan \alpha)\}}{D_b^2 - D_i^2} \quad (28)$$

Tabela 6.2 – Etapa de extrusão da pré-forma de cobre.

Tira	r [mm]	h [mm]	L [mm]	φ	k _f [MPa]	D _b [MPa]	D _i [MPa]	Volume [mm ³]	F _z [kN]
0	9,17	9,17	46,83	0,18	161,92	38,91	18,34	13716,15	325,92
1	9,35	11,01	45,19	0,21	180,46	38,97	18,70	15701,25	379,04
2	9,53	12,85	43,55	0,25	198,42	39,04	19,06	17656,92	433,12
3	9,71	14,69	41,91	0,29	215,96	39,10	19,42	19581,84	488,16
4	9,89	16,54	40,26	0,33	233,24	39,17	19,78	21474,67	544,16
5	10,07	18,38	38,62	0,37	250,36	39,23	20,14	23334,10	601,12
6	10,25	20,22	36,98	0,41	267,41	39,29	20,49	25158,80	659,04
7	10,43	22,06	35,34	0,46	284,48	39,36	20,85	26947,43	717,91
8	10,61	23,90	33,70	0,51	301,65	39,42	21,21	28698,68	777,75
9	10,79	25,74	32,06	0,56	318,99	39,49	21,57	30411,20	838,55
10	10,97	27,59	30,42	0,61	336,58	39,55	21,93	32083,69	900,31
11	11,14	29,43	28,77	0,67	354,49	39,62	22,29	33714,81	963,03
12	11,32	31,27	27,13	0,72	372,81	39,68	22,65	35303,23	1026,71
13	11,50	33,11	25,49	0,79	391,62	39,74	23,01	36847,62	1091,34
14	11,68	34,95	23,85	0,85	411,04	39,81	23,37	38346,67	1156,94
15	11,86	36,79	22,21	0,92	431,17	39,87	23,73	39799,04	1223,50
16	12,04	38,63	20,57	1,00	452,16	39,94	24,08	41203,40	1291,02
17	12,22	40,48	18,92	1,08	474,18	40,00	24,44	42558,43	1359,49
18	12,40	42,32	17,28	1,18	497,43	40,07	24,80	43862,80	1428,93
19	12,58	44,16	15,64	1,28	522,18	40,13	25,16	45115,19	1499,33
20	12,76	46,00	14,00	1,39	548,78	40,19	25,52	45443,27	1541,14

A figura 6.10 expressa a força axial pela altura da tira. Esta tira é calculada nas tabelas 6.1 e 6.2. Já na figura 6.11 observa-se a força aplicada em relação ao aumento do raio do punção em relação a sua penetração.

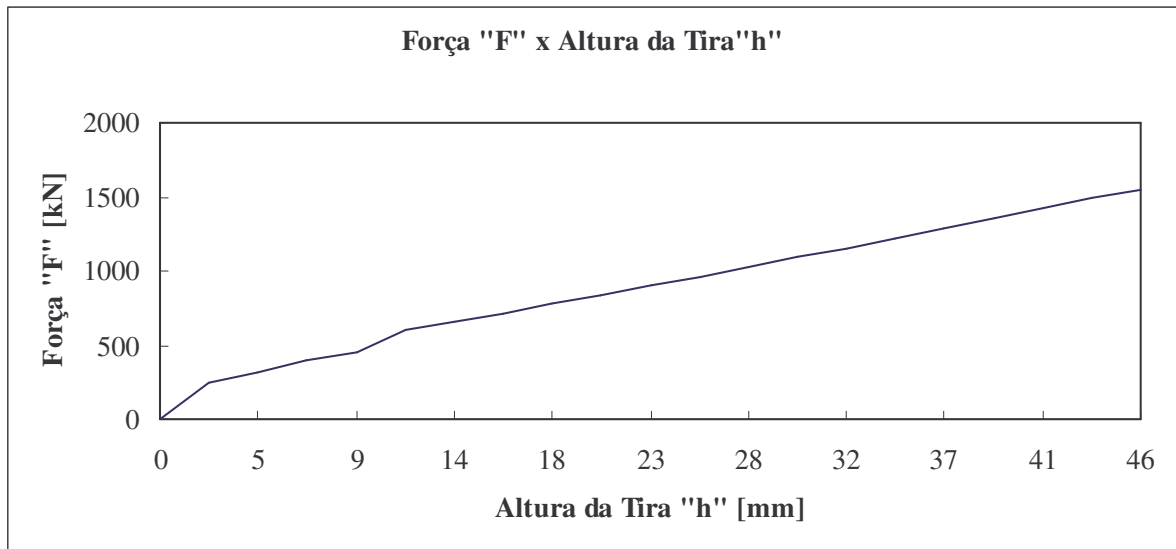


Figura 6.10 – Curva da força axial necessária em relação à altura da tira.

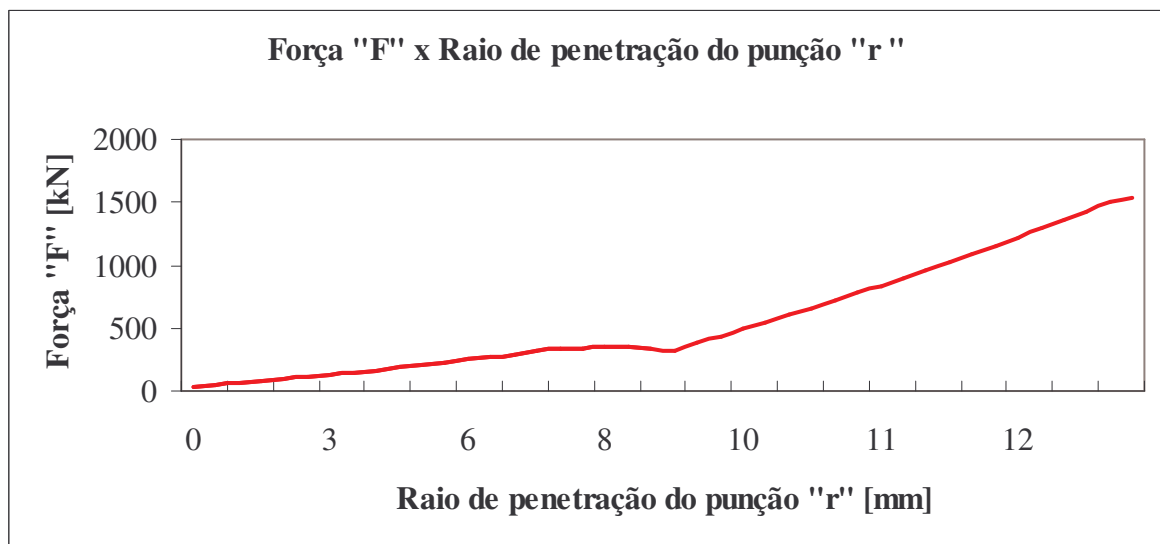


Figura 6.11 – Força aplicada vs. raio de penetração do punção desde seu contato com a peça até o final de seu curso.

6.2 Aplicação para o Aço AISI 8640

6.2.1 Curva de Escoamento

Através das curvas de escoamento dos aços, podemos estimar a resistência que esses materiais oferecem ao escoamento e, com isso, levantar as curvas para uma dada temperatura, deformação e velocidade de deformação. Uma formulação matemática para a curva de escoamento é dada pela equação de Spittel (equação 16).

$$k_f = A \cdot e^{m_1 T} \cdot \varphi^{m_2} \cdot e^{\frac{m_4}{\varphi}} \cdot \dot{\varphi}^{m_3} \quad (16)$$

Onde A, m1, m2, m3 e m4 são constantes relacionadas a cada material, φ a deformação, T a temperatura em °C e $\dot{\varphi}$ a velocidade de deformação do material em s⁻¹. Pela curva de escoamento do material, vista na figura 6.12, adquirem-se as constantes para a formulação acima.

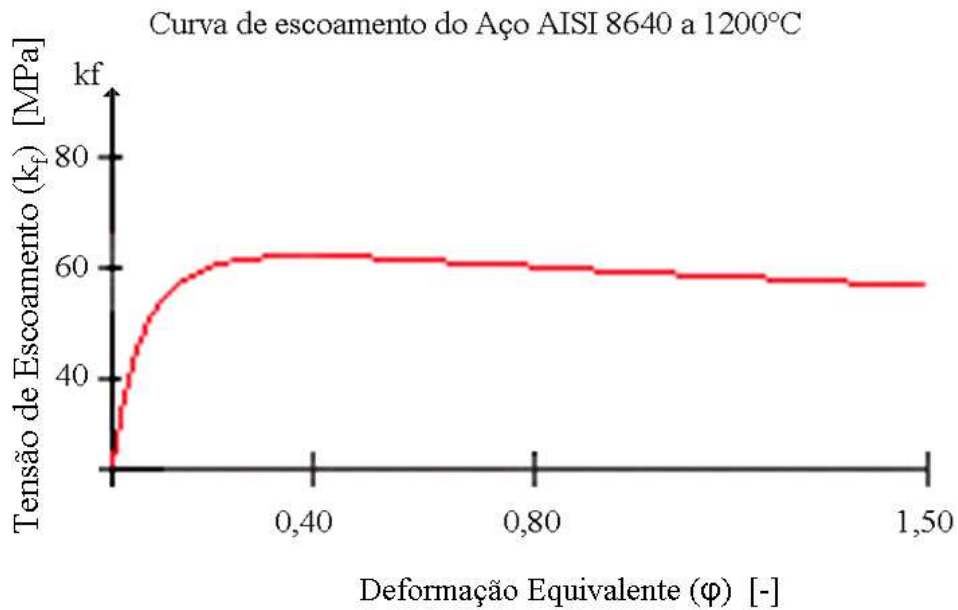


Figura 6.12 – Curva de escoamento para o aço AISI 8640 à 1200°C. [42].

Os coeficientes utilizados na equação de Spittel para o material aço AISI 8640 são os seguintes:

$$A = 1431,15 \text{ MPa}$$

$$m_1 = -0,002$$

$$m_2 = -0,1461$$

$$m_3 = 0,14$$

$$m_4 = -0,05$$

$$T = 1200^\circ\text{C}$$

Inserindo os valores das constantes para o aço AISI 8640 na equação de Spittel, equação 16, tem-se:

$$k_f = 1431,15 \cdot e^{-0,0021 \cdot 1200} \cdot \varphi^{-0,14} \cdot e^{\frac{-0,05}{\varphi}} \cdot \dot{\varphi}^{0,14}$$

6.2.2 Desenvolvimento da TEP

Cada região, como ocorreu com o cobre, também foi dividida em 20 (vinte) tiras para a discriminação dos cálculos, sendo que alguns parâmetros de entrada para os cálculos podem ser vistos abaixo:

k_f = tensão de escoamento – [MPa]

φ = deformação verdadeira = $\ln(H_{\text{billet}}/L)$

$\dot{\varphi}$ = velocidade de deformação [s^{-1}]

H_{billet} = altura do billet = 58 mm

L = comprimento do forjado – [mm]

T = temperatura de forjamento = 1200°C

μ_i = coeficiente de atrito entre broca e punção = 0,4

μ_b = coeficiente de atrito entre broca e matriz = 0,4

α = ângulo do punção = 5,5° = 0,0956 rad

β = ângulo de saída da matriz = 5° = 0,0872 rad

R = raio da ponta esférica do punção = 9,17 mm

r = variação do raio do punção na tira [mm]

R_{billet} = raio do billet = 38,1 mm

σ_R = tensão radial – [MPa]

h = altura da tira, [mm]

I_r = incremento no raio = 0,359 mm

I_h = incremento na altura = 2,3 mm

Na figura 6.13 é possível observar o ângulo de saída de 5° da cavidade da matriz em que a peça é colocada para a penetração do punção e a conseqüente demonstração dos valores utilizados nos cálculos da TEP para o aço neste trabalho.

A tabela 6.3 é referente à região 1, onde a área, sob o punção que o material está sendo forjado, foi dividida em cinco colunas, para mostrar as 5 variáveis dessa etapa: tira (tira que esta sendo calculada), r [mm] (raio do punção na tira), h [mm] (altura da tira), L [mm] (comprimento do forjado), φ (deformação da tira), $\dot{\varphi}$ (velocidade de deformação) [s^{-1}], k_f [MPa] (tensão equivalente na tira), σ_r (σ_1) [MPa] (tensão radial na tira), σ_z (σ_3) [MPa] (tensão axial na tira) e F_z [kN] (força axial sendo aplicada na tira). A formulação para

preenchimento da tabela 6.3 foi a mesma utilizada para o cobre, conforme aparece na tabela 6.1.

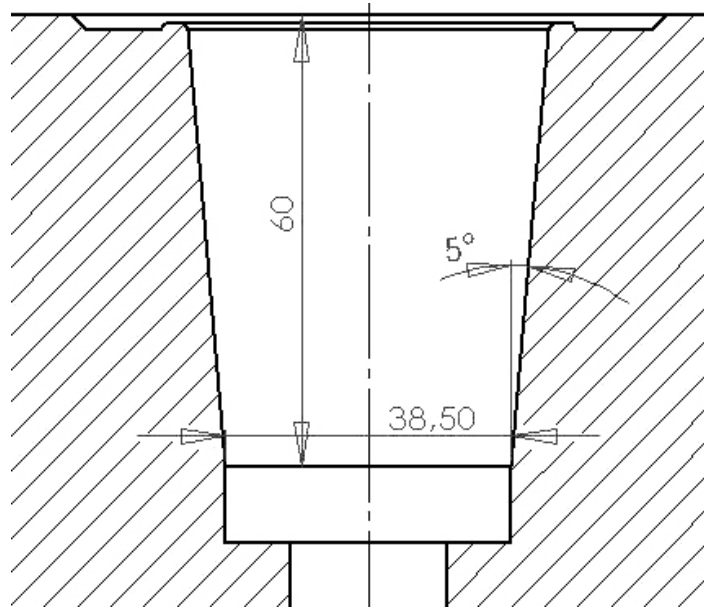


Figura 6.13 – Demonstração do ângulo de saída de 5° da cavidade da matriz para a extrusão do aço.

Tabela 6.3 – Etapa de forjamento da pré-forma da broca de aço.

tira	r [mm]	h [mm]	L [mm]	φ	$\dot{\varphi}$	k_f [MPa]	σ_r [MPa]	σ_z [MPa]	F_z [kN]
0	0,00	0,00	58,00	0	0,52	0	0	0	0
1	0,46	2,86	57,54	0,01	0,52	0,08	85,79	35,11	1,37
2	0,92	4,00	57,08	0,02	0,53	2,78	84,99	31,53	1,73
3	1,38	4,83	56,62	0,02	0,53	8,87	83,83	28,67	2,21
4	1,83	5,50	56,17	0,03	0,53	15,65	82,66	26,26	2,83
5	2,29	6,07	55,71	0,04	0,54	21,85	81,64	24,24	3,65
6	2,75	6,55	55,25	0,05	0,54	27,16	80,77	22,55	4,71
7	3,21	6,97	54,79	0,06	0,55	31,62	80,05	21,12	6,09
8	3,67	7,34	54,33	0,07	0,55	35,36	79,44	19,89	7,86
9	4,13	7,66	53,87	0,07	0,56	38,49	78,93	18,82	10,12
10	4,59	7,94	53,42	0,08	0,56	41,14	78,49	17,88	13,00
11	5,04	8,19	52,96	0,09	0,57	43,38	78,11	17,03	16,65
12	5,50	8,40	52,50	0,10	0,57	45,30	77,78	16,27	21,28
13	5,96	8,59	52,04	0,11	0,58	46,95	77,48	15,58	27,12
14	6,42	8,75	51,58	0,12	0,58	48,38	77,22	14,94	34,49
15	6,88	8,88	51,12	0,13	0,59	49,62	76,98	14,35	43,76
16	7,34	8,98	50,66	0,14	0,59	50,71	76,76	13,80	55,42
17	7,79	9,07	50,21	0,14	0,60	51,67	76,55	13,28	70,04
18	8,25	9,12	49,75	0,15	0,60	52,51	76,36	12,79	88,40
19	8,71	9,16	49,29	0,16	0,61	53,26	76,18	12,32	111,40
20	9,17	9,17	48,83	0,17	0,61	53,93	76,01	11,88	140,21

A tabela 6.4 refere-se à região 2, representando a etapa da extrusão. Esta tabela foi dividida em sete colunas: tira (tira que esta sendo calculada), r [mm] (raio do punção na tira), h [mm] (altura da tira), L [mm] (comprimento do forjado), φ (deformação da tira), $\dot{\varphi}$ (velocidade de deformação) [s^{-1}], k_f [MPa] (tensão equivalente na tira), D_b [mm] (diâmetro da cavidade na matriz), D_i [mm] (diâmetro do punção na tira), V [mm^3] (volume) e F_z [kN] (força axial sendo aplicada na tira). A formulação para preenchimento da tabela 6.4, foi a mesma utilizada para o cobre, conforme aparece na tabela 6.2.

Tabela 6.4 – Etapa de extrusão da pré-forma da broca de aço.

tira	r [mm]	h [mm]	L [mm]	φ	$\dot{\varphi}$	k_f [MPa]	D_b [MPa]	D_i [MPa]	Volume [mm^3]	F_z [kN]
0	9,17	9,17	48,83	0,17	0,61	53,93	42,15	18,34	35228,99	176,25
1	9,35	11,01	47,09	0,21	0,64	55,88	40,95	18,70	31123,89	173,56
2	9,53	12,85	45,35	0,25	0,66	57,20	41,35	19,06	33829,84	192,94
3	9,71	14,69	43,61	0,29	0,69	58,13	41,76	19,42	36579,38	211,80
4	9,89	16,54	41,86	0,33	0,72	58,81	42,16	19,78	39371,82	230,37
5	10,07	18,38	40,12	0,37	0,75	59,31	42,56	20,14	42206,46	248,80
6	10,25	20,22	38,38	0,41	0,78	59,69	42,96	20,49	45082,59	267,19
7	10,43	22,06	36,64	0,46	0,82	59,99	43,37	20,85	47999,52	285,62
8	10,61	23,90	34,90	0,51	0,86	60,24	43,77	21,21	50956,55	304,14
9	10,79	25,74	33,16	0,56	0,90	60,45	44,17	21,57	53952,98	322,81
10	10,97	27,59	31,42	0,61	0,95	60,64	44,57	21,93	56988,11	341,67
11	11,14	29,43	29,67	0,67	1,01	60,83	44,98	22,29	60061,25	360,77
12	11,32	31,27	27,93	0,73	1,07	61,01	45,38	22,65	63171,69	380,14
13	11,50	33,11	26,19	0,80	1,15	61,19	45,78	23,01	66318,73	399,84
14	11,68	34,95	24,45	0,86	1,23	61,39	46,18	23,37	69501,67	419,91
15	11,86	36,79	22,71	0,94	1,32	61,61	46,59	23,73	72719,82	440,41
16	12,04	38,63	20,97	1,02	1,43	61,86	46,99	24,08	75972,48	461,42
17	12,22	40,48	19,22	1,10	1,56	62,15	47,39	24,44	79258,95	483,02
18	12,40	42,32	17,48	1,20	1,72	62,48	47,79	24,80	82578,52	505,33
19	12,58	44,16	15,74	1,30	1,91	62,87	48,20	25,16	85930,50	528,50
20	12,76	46,00	14,00	1,42	2,14	63,34	48,60	25,52	87769,21	543,16

A figura 6.14 expressa a força axial pela altura da tira, calculada nas tabelas 6.3 e 6.4. Já na figura 6.15 observa-se a força aplicada em relação ao aumento do raio do punção em relação à sua penetração.

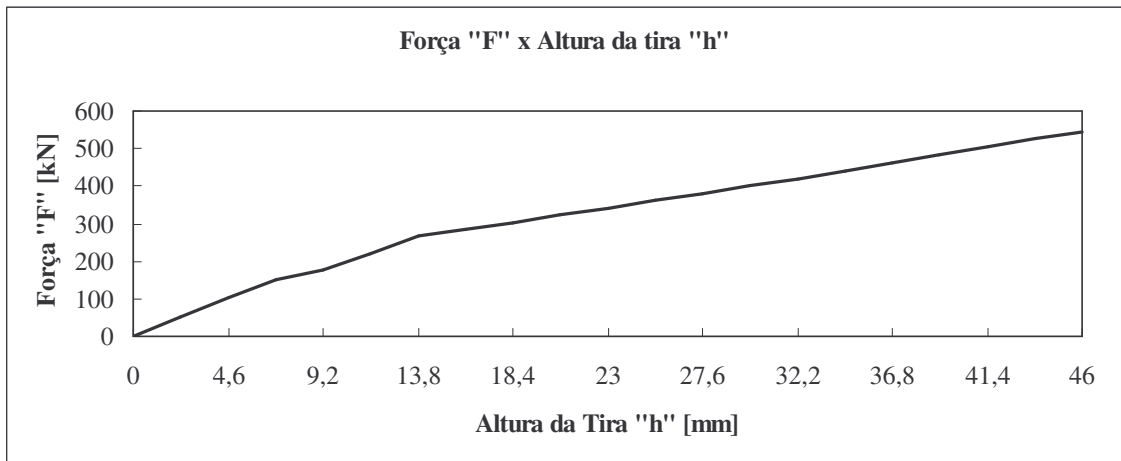


Figura 6.14 – Curva da força axial em relação à altura da tira.

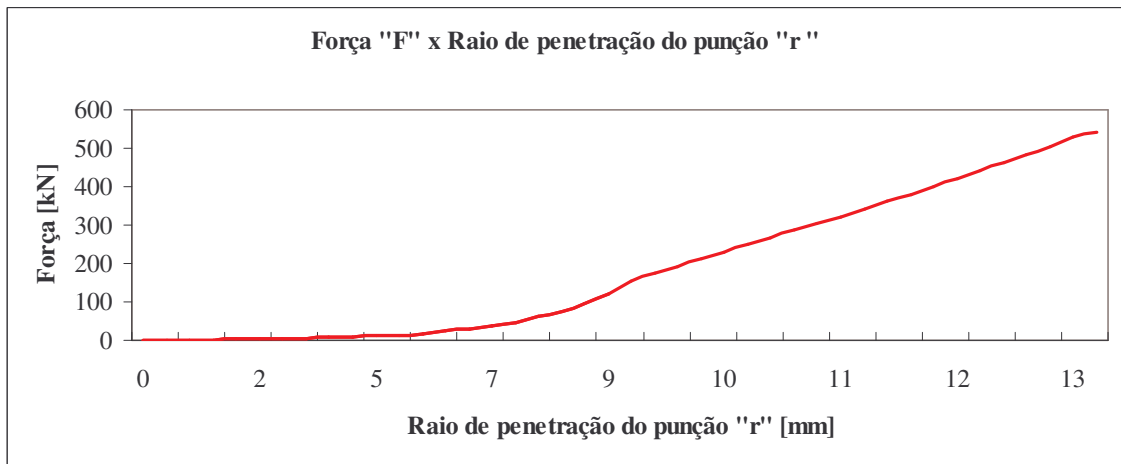


Figura 6.15 – Força aplicada vs. raio de penetração do punção desde seu contato com a peça até o final de seu curso.

7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1 Comparação de Processos para o Ganho de Volume na Produção de Peças

A empresa fabricante de brocas tem uma produção média mensal de 15000 brocas, que são fabricadas pelo processo de usinagem de forma completa (parte externa e interna). Na proposição deste trabalho, foi feita uma comparação de um novo processo para a fabricação da cavidade (ver a cavidade objetivada nas figuras 3.2 e 4.1) através do processo de forjamento, dando a possibilidade de substituição do atual processo de usinagem.

Fazendo uma comparação da relação dos pesos e volumes em relação aos ganhos na produção de peças, (considerando o corpo de prova no início do processo para a obtenção da mesma pré-forma através dos processos de usinagem e forjamento) é possível fazer a seguinte estimativa de ganho financeiro da empresa fabricante para a fabricação da mesma pré-forma com a cavidade interna, conforme mostrado na tabela 7.1:

Tabela 7.1 – Comparação entre os dois processos para a obtenção da mesma pré-forma.

Processo de fabricação da pré-forma	Relação da altura H (mm) / diâmetro D (mm)	Volume (mm ³)	Peso por peça bruta (kg)	Valor por peça bruta (R\$)
Usinagem	62 / 38,1	70685	0,554	2,96
Forjamento	60 / 38,1	68405	0,536	2,87

Considerando o valor de R\$ 5,35 por quilograma da matéria-prima de aço AISI 8640 e um diâmetro de 38,1mm da barra utilizada para cortar os *billets*, é possível observar na tabela algumas vantagens em relação à troca de processo no que diz respeito ao ganho no volume, no peso e no financeiro para a fabricação da mesma pré-forma pelo processo de forjamento.

7.2 Comparação Entre a Utilização da TEP e Ensaio Experimentais

Foram utilizados materiais de fácil modelamento como a plasticina e o gesso. Com estes resultados, verificou-se o preenchimento da matriz na fabricação da pré-forma da broca com relação ao volume e à geometria da peça a ser obtida (ver figuras 4.9, 4.10 e 4.11). A partir deste ponto do trabalho, pode-se obter uma proximidade de utilização de matéria-prima na

fabricação da pré-forma através de comparações de um material de boa maleabilidade, como o cobre, para verificar o que ocorreria com o aço, quando forjado a quente.

Com esse aproveitamento de resultados obtidos, utilizou-se uma comparação entre os ensaios experimentais do cobre e do aço com a teoria elementar da plasticidade, aplicada para esses materiais, para comprovar a viabilidade da utilização de métodos e modelos matemáticos da conformação mecânica na verificação de forças utilizadas no processo, assim prevendo uma aproximação do que ocorrerá na prática, ou seja, no ensaio experimental, buscando eliminar o método de tentativa e erro.

7.2.1 Comparação Entre a Utilização da TEP e Ensaios Experimentais Aplicado ao Cobre

Para verificar o preenchimento da matriz e a penetração total do punção cônico que formará a cavidade da pré-forma, utilizou-se cobre eletrolítico com altura inicial de 56mm e diâmetro de 38,1mm (ver figura 4.12) devido à sua boa maleabilidade. Conforme o procedimento de forjamento utilizado para o cobre, que foi citado no capítulo 4, observou-se que com um ângulo de saída de 1°, foi necessária uma força aplicada de 1670kN para a fabricação da cavidade (ver figuras 4.14 e 4.15).

Na utilização da teoria elementar da plasticidade (ver tabelas 6.1 e 6.2), nota-se que há uma boa aproximação entre o resultado obtido através do cálculo matemático e o resultado citado no parágrafo anterior obtido pelo ensaio experimental. Foi feita uma divisão de vinte tiras para a aplicação do método. Como resultado, obteve-se o valor da força de aproximadamente 1510kN para a obtenção da cavidade da pré-forma.

Na figura 7.1, é observada uma superposição entre as curvas de força vs. penetração do punção desde o primeiro contato com a peça. Há um comparativo do desenvolvimento da curva obtida pela teoria elementar da plasticidade e do ensaio experimental do cobre, mostrando uma diferença no resultado final da força aplicada de aproximadamente 9,4%.

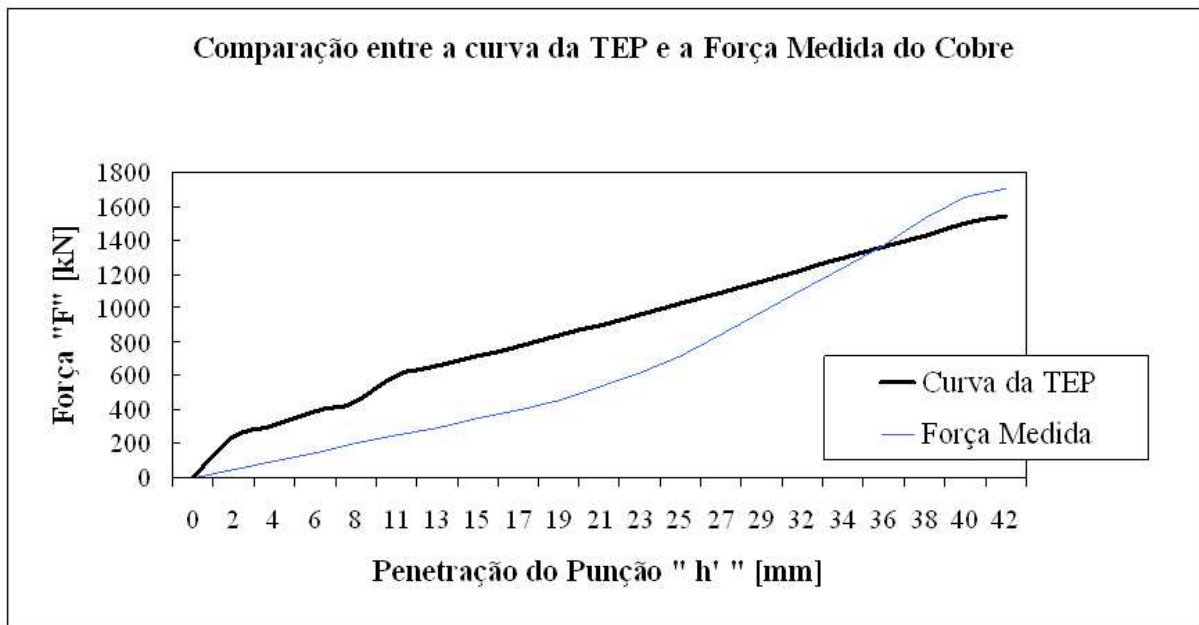


Figura 7.1 – Comparação do desenvolvimento da força em relação a penetração do punção desde o primeiro contato com o *billet*.

7.2.2 Comparação Entre a Utilização da TEP e Ensaios Experimentais Aplicado ao Aço AISI 8640

Seguindo o mesmo procedimento do cobre, com a utilização de um sistema de matrizes e punção cônico para a fabricação da cavidade e obtenção da pré-forma com busca de preenchimento de matriz quase sem rebarba (ver figuras 5.12 e 5.13), foram realizados ensaios experimentais com o aço AISI 8640. E os cálculos da TEP foram aplicados ao aço AISI 8640 de acordo com a curva de escoamento apresentada (ver figura 2.26) à temperatura de forjamento de 1200°C.

Na utilização da teoria elementar da plasticidade, comparada com o ensaio experimental com um *billet* de dimensões iniciais de 58mm de altura, 38,1mm de diâmetro e, neste caso, com ângulo de saída de 5° para facilitar a extração da peça após o processo, nota-se que há uma boa aproximação entre os dois resultados, conforme o que ocorreu com o cobre. Da mesma forma, foi feita uma divisão de vinte tiras para a aplicação do método (ver tabelas 6.3 e 6.4).

Na figura 7.2, é observada uma superposição entre as curvas de força vs penetração do punção, onde há um comparativo do desenvolvimento da curva obtida pela teoria elementar da plasticidade aplicada ao aço AISI 8640, e o ensaio de forjamento para obtenção da pré-

forma com o aço AISI 8640. Pela utilização da teoria elementar da plasticidade, a curva foi obtida através dos cálculos mostrados na formulação do sub-capítulo 6.2, com uma força resultante aplicada de aproximadamente 530kN. Já, no ensaio experimental de forjamento a quente, com a peça sendo conformada a uma temperatura de 1200° C. A força aplicada foi de 605kN.

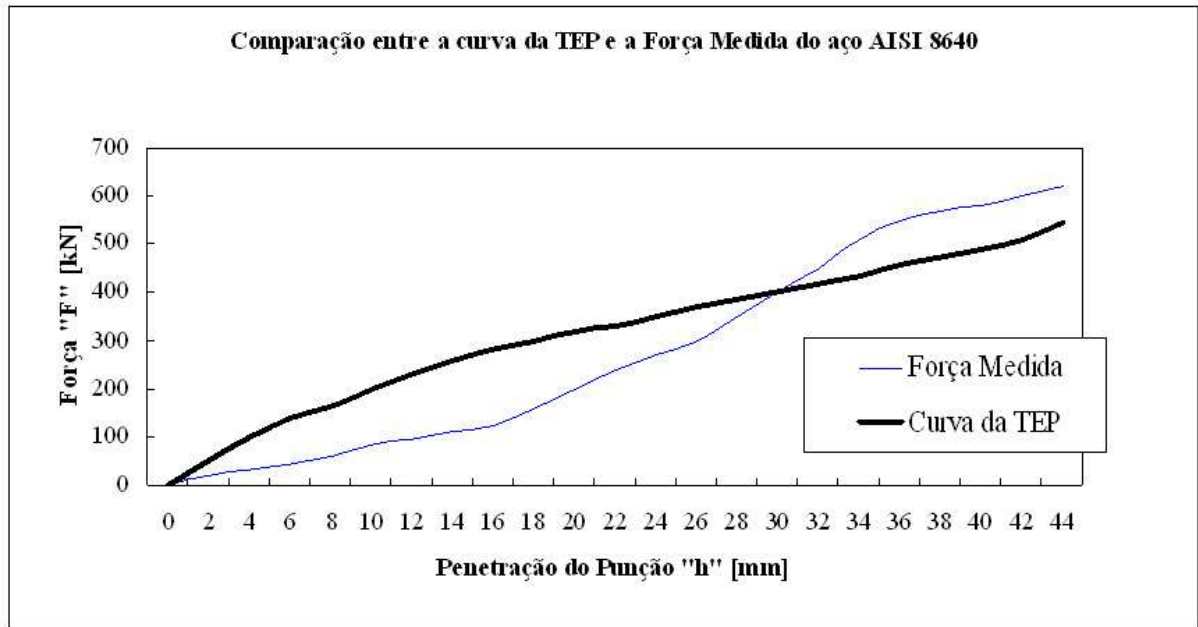


Figura 7.2 – Comparação do desenvolvimento da força em relação à penetração do punção para o aço desde o primeiro contato com o *billet*.

Através do resultado mostrado acima, observou-se uma diferença de aproximadamente 13% entre os dois resultados, mostrando a viabilidade da utilização dos modelos matemáticos da TEP, que permitem o cálculo da parte inicial de penetração do punção na peça, como: forjamento e a seqüência do processo de escoamento do material entre o punção e as paredes da matriz, como extrusão inversa (ver equação 1). Com estes resultados comparativos entre cálculos matemáticos e experimentais, demonstrou-se possibilidade de comparação para o processo de conformação como uma ferramenta importante, e também uma possibilidade de diminuição da utilização do método de tentativa e erro, buscando economia de tempo e matéria-prima na produção.

7.3 Força Aplicada para obtenção da Pré-forma de Aço AISI 8640

Com a utilização dos métodos experimentais e matemáticos citados anteriormente, partiu-se para a análise dos ensaios de forjamento a quente, com preenchimento suficiente para se obter a pré-forma final de aço AISI 8640.

No sub-capítulo 7.2.2, é discutido uma comparação do *billet* de altura de 58mm e volume de 66125mm³ em relação ao ensaio de forjamento e à TEP aplicada. Porém, conforme visto na figura 5.14, houve uma falta de preenchimento na borda da peça, mostrando a necessidade de utilização de um *billet* com maior volume. Através desse fato, foi realizado um ensaio de forjamento a quente com um *billet* de 60mm de altura e volume de 68405mm³. Neste caso, ocorreu o preenchimento completo da peça (ver figura 5.16), seguindo os procedimentos citados no sub-capítulo 5.2, não considerando o acabamento externo, já que a parte externa será usinada. Na tabela 7.2, observa-se um comparativo das peças em relação à formação completa da pré-forma objetivada neste trabalho.

Tabela 7.2 – Comparação de dimensões para a formação completa da cavidade da pré-forma.

Aço AISI 8640	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Volume (mm ³)	Formação da cavidade
<i>Billet 1</i>	58	38,1	66125	Incompleta
<i>Billet 2</i>	60	38,1	68405	Completa

Na formação da cavidade com o intuito de obtenção da pré-forma (ver figura 4.1) necessária para a fabricação final, por usinagem, da parte externa da broca de furação de rochas, observou-se que com a penetração do punção de dimensões e geometria, mostradas no capítulo 5 (ver figura 5.3), e um ângulo de saída de 5° na matriz inferior para o momento em que o material é extrudado de forma inversa na penetração do punção (com as dimensões do *billet 2* citado no tabela 7.2) obtém-se a pré-forma necessária para a fabricação da broca.

8. CONCLUSÕES

Com a utilização de materiais de fácil deformação, foi possível fazer algumas avaliações para, através do processo de forjamento, ser viável a fabricação da pré-forma (ver figura 4.1) com vantagens em relação à peça usinada. Estas vantagens foram observadas através da economia de matéria-prima, com o ganho em produtividade, para se obter a mesma pré-forma que se obtém com a peça usinada.

Tendo o conhecimento das dimensões do *billet* de aço AISI 8640 (ver figura 3.3), no início do processo de usinagem, utilizou-se *billets* cilíndricos de gesso com essas mesmas dimensões e mesmo volume (70685mm^3). Na utilização do ferramental projetado (ver figura 4.4), verificou-se o excesso de material do *billet* na penetração do punção, mostrando a possibilidade de diminuição de volume de matéria-prima para a fabricação da cavidade.

Na utilização de plasticina, partiu-se para a análise da quantidade de material necessário para a fabricação da pré-forma com alturas menores. Com a altura de 56mm do *billet* e mantendo a outra dimensão para a realização do ensaio, foi obtida a pré-forma sem formação de rebarba com um volume de 63845mm^3 , assim considerando uma diminuição no volume em relação à peça inicial do processo de usinagem na fabricação da cavidade (ver figura 4.11).

Com os resultados citados anteriormente, conclui-se que é possível ter uma boa perspectiva do que seria necessário em relação à geometria dos corpos de prova para os ensaios de forjamento com o aço para obtenção da mesma pré-forma, que é obtida com a usinagem da cavidade, mas com economia de matéria prima na peça inicial.

No forjamento do cobre, com um *billet* de 56mm de altura e diâmetro de 38,1 (ver figura 4.12), conclui-se que seria possível fabricar uma cavidade completa, através da penetração do punção, e com um volume de 63845mm^3 , obtendo uma diminuição de 6840mm^3 em cada peça fabricada, quando comparada a uma peça que começa a ser usinada de altura de 62mm (ver figura 4.14).

Na utilização da TEP, foi realizado o calculo da força que será aplicada na fabricação da peça, para comparar com os procedimentos experimentais. Esta comparação foi utilizada para o cobre a frio e para o aço AISI 8640 a quente, obtendo-se as seguintes conclusões:

- No ensaio experimental do cobre com conseqüente obtenção da cavidade, a força total medida no ensaio de forjamento foi de 1670kN (ver figura 4.15), enquanto que na utilização da TEP (ver figura 6.2 e tabelas 6.1 e 6.2), calculou-se uma força total de penetração de 1510kN, aparecendo uma diferença de aproximadamente 9,4%, mostrando viabilidade da utilização desta comparação;
- No ensaio experimental do aço AISI 8640, foi utilizada a situação de obtenção da cavidade (ver figura 5.14) com o *billet* de altura inicial de 58mm de altura e diâmetro de 38,1mm (neste caso com ângulo de saída de 5° para facilidade de extração da peça). Nesta situação a força aplicada para a fabricação da cavidade foi de 605kN (ver figura 5.15) e, com a utilização dos cálculos matemáticos utilizados na TEP, obteve-se uma força calculada de 530kN. Com isto obtém-se uma diferença de 13% entre os dois resultados, o que concluiu-se viável para utilizar este comparativo como uma ferramenta para o processo a quente neste trabalho.

Na avaliação da situação de aplicação prática da troca de processo, conclui-se a viabilidade econômica com os seguintes resultados:

- Para fabricar a pré-forma objetivada neste trabalho (figura 4.1), no processo de usinagem parte-se de um *billet* de altura inicial de 62mm, enquanto que no forjado parte-se de um *billet* de 60mm de altura. Conseqüentemente a usinada tem um volume de 70685mm³, enquanto a forjada tem um volume de 68405mm³ para fabricação da mesma peça, confirmando a economia de volume em cada peça fabricada de 2280mm³ para a obtenção da mesma pré-forma;
- Em relação à economia de matéria-prima, considerando a situação em que a empresa fabrica 15000 peças por mês, e ainda considerando a tabela 7.1, é possível, através da redução de volume por peça, fazer uma estimativa de R\$ 1.350,00 (R\$ 0,09/peça) de economia de matéria-prima, por mês, na troca do processo de fabricação.

Conclui-se que com a utilização de gesso, plasticina e cobre foi possível avaliar a formação da pré-forma e auxiliar no projeto do ferramental para a conformação do aço AISI 8640, confirmando assim ferramentas importantes para evitar o método de tentativa e erro. Com o desenvolvimento deste trabalho tornou-se viável a produção de pré-formas de brocas de perfuração de rochas através do ferramental produzido.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Fazem-se algumas sugestões para possíveis trabalhos posteriores a este:

- propor uma nova situação de forjamento em que seja possível fabricar a parte externa da broca (cabeça), além da cavidade interna proposta por este trabalho;
- utilização de um método de simulação computacional para avaliar e verificar o processo de forjamento da broca, antes de realização do processo de conformação na prensa;
- realização da simulação numérica para simetria axial objetivada, através da teoria dos elementos finitos;
- projeto de matriz para forjamento de brocas com inserto no interior de metal duro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GENTILE, F.C.; NEVES, F.O.; REGONE, W.; BUTTON, S.T; Análise numérica e experimental da evolução microestrutural em forjamento a quente de um aço microligado ao V-Ti. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos materiais, 2002.
- [2] SCHAEFER, L. Forjamento – Introdução ao processo. Porto Alegre/RS: Imprensa Livre, 2001.202p.
- [3] ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H. Conformação de metais – fundamentos e aplicações. São Carlos/SP: EESC-USP, 1999. 350p.
- [4] SANIEE, F.F.; JAAFARI, M. Analytical, numerical and experimental analyses of the closed-die forging. v.125-126, 2002, p.334-340.
- [5] CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica – Processos de Fabricação. 2º ed. Vol. 2. São Paulo: McGraw. 380p.
- [6] WANG, J.; CHEN, J.; ZHAO, Z.; RUAN, X.Y.; Modeling of microstructural evolution in microalloyed steel during hot forging process. Acta Metallurgica Sinica. V.19, 2006, p.279-286.
- [7] Disponível em: <http://www.eramantino.com.br/Micro/ligas.html#8640>. Acessado em 18 de setembro de 2006.
- [8] Disponível em: http://www.acometal.com.br/tabelas/caract_aplicacoes_acoconst.pdf. Acessado em 18 de setembro de 2006.
- [9] Disponível em: http://www.acokraft.com.br/produtos/constrmec/ligados/sae_8640.html. Acessado em 12 de dezembro de 2006.
- [10] Disponível em:
http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy_steels/show_alloy.cfm?ID=AISI_8640&prop=all&Page_Title=AISI%208640. Acessado em 12 de dezembro de 2006.
- [11] Disponível em:
<http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=M864AA>. Acessado em 12 de dezembro de 2006.
- [12] METALS HANDBOOK. Vol.1 - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International 10th Ed. 1990. p. 430-439.
- [13] CHITKARA, N. R.; ALEEM, A.; Extrusion of axi-symmetric tubes from hollow and solid circular billets: a generalised slab method of analysis and some experiments. International Journal of Mechanical Sciences. V. 43, 2001, p.1661-1684.

- [14] CHITKARA, N. R.; ALEEM, A.; Extrusion of axi-symmetric bi-metallic tubes: some experiments using hollow billets and the application of a generalized slab method of analysis. V. 43, 2001, p.2857-2882.
- [15] SCHAEFER, L. Conformação Mecânica – Porto Alegre/RS: Imprensa Livre, 2ª Edição. 2004.167p.
- [16] CAPAN, L.; BARAN, M.; Calculation method of the press force in a round shaped closed-die forging based on similarities to indirect extrusion. Journal of Materials Processing Technology 102. 2000. p. 230 - 233.
- [17] CHU, E.; TAEK IM, Y.; KIM, N.; LEE, J.; Process sequence design of large axi-symmetric forging product of aisi 4130 in nozzle type. Journal of Materials Processing Technology, v. 48, 1995, p. 143-149.
- [18] MIN, D.K.; KIM, M.E.; A study on precision cold forging process improvements for the steering yoke of automobiles by the rigid-plastic finite-element method. Journal of Materials Processing Technology, v. 138, 2003, p. 339-342.
- [19] Disponível em: www.fem.unicamp.br/~sergio1/laboratorio/conem2000.pdf. Acessado em 20 de agosto de 2006.
- [20] BUTELER, D. I.; NEVES, P. C. U. ; RAMOS, L. V. ; SANTOS, C. E. R.; SOUZA, R. M.; SINATORA, A. Effect of anvil geometry on the stretching of cylinders. Journal of Materials Processing Technology, v.179, 2006, p. 50-55.
- [21] MOON, Y.H.; TYNE.C.J.V. Validation via FEM and plasticina modeling of upper bound criteria of a process-induced side-surface defect in forgings. Journal of Materials Processing Technology, v.99, 2000, p. 185-196.
- [22] PERTENCE, A. E. M.; CELTIN, P.R. Analysis of a new model material for the physical simulation of metal forming. Journal of Materials Processing Technology, v.84, 1998, p. 261-267.
- [23] CHO, H.Y.; MIN, G.S.; JO, C.Y.; KIM, M.H. Process design of the cold forging of a billet by forward and backward extrusion. Journal of Materials Processing Technology. v. 135, 2003, p. 375-381.
- [24] POURSINA, M.; PARVIZIAN, J.; ANTONIO, C.A.C. Optimum pre-form dies in two-stage forging Journal of Materials Processing Technology, v.174, 2006, p.325-333.
- [25] VIELLEDENT, D.; FOURMENT, L. Shape optimization of axisymmetric perform tools in forging using a differentiation method. International Journal of Numerical Methods in Engineering. V.52, 2001, p. 1301-1321.

- [26] SERAJZADEH, S.; MIRBAGHERI, S.M.H.; TAHERI, A.K. Modelling of metal flow during hot forging with regard to microstructural aspects. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, V. 44, 2004, p. 1537-1545.
- [27] JANG, D. Y.; LIOU, J. H. Study of stress development in axi-symmetric products processed by radial forging using a 3-D non-linear finite-element method *Journal of Materials Processing Technology*, v. 74, i. 1-3, February 1998, p. 74-82
- [28] SANTOS, A.S.; PERTENCE, A.E.M.; AGUILAR, M.T.P.; CELTIN, P.R; Avaliação computacional do desempenho do conjunto de matrizes utilizado no forjamento de componente. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE FORJAMENTO, I., 2004, Porto Alegre, RS. Anais... Porto Alegre: Grafica e Editora Brasul LTDA, 2004, v.1, p.75-83.
- [29] DOUGLAS, R.; KUHLMANN, D. Guidelines for precision hot forging with applications. *Journal of Materials Processing Technology*. V. 98, 2000, p.182-188.
- [30] RODRIGUES, A. L.; ARAÚJO, M. R. V.; MENEZES, M. A. Influência do atrito na análise teórica do forjamento livre. XI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica. I. 2004, Rio de Janeiro, RJ.
- [31] Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/laboratorio/sistfex.pdf> acessado em 05 de novembro de 2006.
- [32] YOSHIMURA, H.; TANAKA, K.; Precision forging of aluminum and steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v.98.
- [33] Disponível em: http://www.infomet.com.br/h_acos_ferramenta.php acessado em 01 de maio de 2006.
- [34] KIM, D. H.; LEE, H. C.; KIM, B.M.; KIM, K. H. Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging process. *Journal of Materials processing Technology*, v. 166, 2005, p. 372-380.
- [35] BIDÁ, A.G.; SILVA. I.B.; Melhoria de vida de ferramentas de forjamento a quente: Metodologia e análise de casos. In: CONFERENCIA INTERNACIONAL DE FORJAMENTO, I., 2004, Porto Alegre, RS. Anais... Porto Alegre: Gráfica e Editora Brasul LTDA, 2004. V.1., p.51-61.
- [36] KIM, D.H.; KIM, B.M.; KANG, C.G. Die life considering the deviation of the preheating billet temperature in hot forging process. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 41, i. 13, 2005, p. 1255-1269.
- [37] METALS HANDBOOK. Vol.1 - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International 10th Ed. 1990. p. 762-763.

- [38] Disponível em: <http://www.gerdau.com.br/gerdauacosespeciais> acessado em 08 de agosto de 2006.
- [39] MESQUITA, R.A.; FRANÇA, L.C.; BARBOSA, C.A. Estudo comparativo da vida útil de ferramentas de forjamento produzidas com os aços Vhsuper, Tenax 300 e AISI H13. In: CONFERENCIA INTERNACIONAL DE FORJAMENTO, I., 2004, Porto Alegre, RS. Anais... Porto Alegre: Editor Lírío Schaeffer, 2004. 1V., p. 29-36.
- [40] Disponível em: www.ufrgs.br/ldtm. Acessado em 11 de fevereiro 2007.
- [41] SCHAEFFER, L. Conformação dos Metais – Metalurgia e Mecânica. Porto Alegre/RS: Editora Rígel, 1995.108p.
- [42] Curva de escoamento do aço AISI 8640 segundo equação de Spittel. Banco de dados do software FORGE 3. França 2006.