

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**ESCOLA DE ENGENHARIA**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS - PPGE3M**

**COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA FORÇA E  
ENERGIA EM PROCESSO DE FORJAMENTO A QUENTE DA  
LIGA DE ALUMÍNIO AA 7075**

**LEONARDO HARTMANN**

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**ESCOLA DE ENGENHARIA**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS - PPGE3M**

**COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA FORÇA E  
ENERGIA EM PROCESSO DE FORJAMENTO A QUENTE DA  
LIGA DE ALUMÍNIO AA 7075**

Dissertação realizada no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre

2019

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia em Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo programa de Pós Graduação em Processos de Fabricação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. -Ing. Lírio Schaeffer - PPGE3M / UFRGS

Coordenador do PPGE3M: Prof. Dr. Afonso Reguly

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Eng. Jorge Luis Braz Medeiros - FURG

---

Prof. Dr. Eng. Diego Rodolfo Simões de Lima - IFC

---

Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito - UFRGS

## **AGRADECIMENTOS**

Inicialmente a Deus, por me proporcionar mais esta vitória, pelas oportunidades colocadas em minha vida e por sua presença constante.

A minha família, pelo apoio, paciência, alegria, fazendo parte da minha história. Em especial minha esposa Irina e aos meus pais João e Eliana.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer, pelos conselhos, ensinamentos, incentivos e oportunidades.

Ao Prof. Dr. Eng. Jorge Luis Braz Medeiros pela confiança depositada, incentivando e aconselhando, tornando possível a execução deste estudo.

A todos os colegas do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial, ao Eng. Jerry Adriani Mendelski, Eng. João Maldonado, Eng. Anderson Assis.

A todos os amigos e professores que participaram e auxiliaram nestes anos de pesquisa.

## RESUMO

Neste trabalho é realizado um estudo comparativo entre diferentes métodos de determinação de força e energia no processo de forjamento de um componente com a liga AA7075, observando a eficiência dos resultados quando comparados com resultados teórico/experimentais. Neste estudo são analisados resultados obtidos através do Método da Energia Uniforme, Método das Tiras (TEP), Método Simplificado (TEP) e Método de Elementos Finitos (FEM), através do software FORGE NxT 3.0. Para a realização deste trabalho, foi levado em consideração o processo de forjamento a quente, em matriz fechada da liga AA7075 na sua condição de fabricação (F), utilizada pela indústria bélica para a obtenção de componentes. Foram expostas as sequências de cálculos e as interações realizadas para a construção de modelos matemáticos. Com a conclusão dos experimentos foi possível verificar que, para valores de energia, o Método de Elementos Finitos é o que mais se aproxima dos resultados obtidos com o Método Teórico/Experimental, apresentando valores aproximadamente 17% menores. O segundo método que mais se aproximou dos valores de energia obtidos com o Método Teórico/Experimental foi o Método da Energia Uniforme, apresentando resultados aproximadamente 17% maiores. Os outros métodos, Método das Tiras e o Método Simplificado, apresentaram valores aproximados de 23% menores e 59% menores, respectivamente. Levando em consideração os resultados de força, o Método de Elementos Finitos é o que mais se aproximou dos valores obtidos com o Método Teórico/Experimental, apresentando resultados aproximadamente 27% menores. O segundo método que mais se aproximou dos valores de força obtidos com o Método Teórico/Experimental foi o Método da Energia Uniforme, apresentando resultados aproximadamente 55% menores. Os outros métodos, Método das Tiras e Método Simplificado, apresentaram valores de aproximadamente 75% menores e 62% menores, respectivamente. Desta forma, levando em consideração a geometria estudada, é possível afirmar que no processo de forjamento a quente em matriz fechada, o Método de Elementos Finitos pode ser empregado como ferramenta de simulação mais eficiente. Já os métodos baseados na Teoria Elementar da Plasticidade apresentam aproximações mais grosseiras dos resultados, podendo ser aplicados na etapa de pré-projeto.

**Palavras-chave:** Método da Energia Uniforme, Teoria Elementar da Plasticidade (TEP), Modelo Simplificado, forjamento a quente, forjamento em matriz fechada, Método de Elementos Finitos (FEM), força de forjamento, energia de forjamento, liga AA 7075.

## ABSTRACT

In this work a comparative study is carried out between different methods of determination of force and energy in the forging process of a component with the AA7075 alloy, observing the efficiency of the results when compared with the theoretical / experimental results. This study analyzes the results obtained through the Uniform Energy Method, Strip Method (TEP), Simplified Method (TEP) and Finite Element Method (FEM), using the FORGE NxT 3.0 software. To carry out this work, the AA7075 alloy closed die forging process in its fabrication condition (F), used by the war industry to obtain components, was taken into consideration. The sequences of calculations and the interactions performed for the construction of mathematical models were exposed. With the conclusion of the experiments it was possible to verify that, for energy values, the Finite Element Method is the closest to the results obtained with the Theoretical / Experimental Method, presenting values approximately 17% smaller. The second method that most closely approximated the energy values obtained with the Theoretical / Experimental Method was the Uniform Energy Method, with approximately 17% higher results. The other methods, Strip Method and Simplified Method, presented approximate values of 23% smaller and 59% smaller, respectively. Considering the strength results, the Finite Element Method is the closest to the values obtained with the Theoretical / Experimental Method, with approximately 27% lower results. The second method that most closely approximated the force values obtained with the Theoretical / Experimental Method was the Uniform Energy Method, with approximately 55% lower results. The other methods, Strip Method and Simplified Method, presented values of approximately 75% smaller and 62% smaller, respectively. Thus, considering the studied geometry, it is possible to state that in the closed die hot forging process, the Finite Element Method can be used as the most efficient simulation tool. The methods based on the Elemental Theory of Plasticity, on the other hand, present coarser approximations of the results and can be applied in the pre-project stage.

**Keywords:** Uniform Energy Method, Elemental Theory of Plasticity (TEP), Simplified Model, Hot Forging, Closed Die Forging, Finite Element Method (FEM), Forging Force, Forging Energy, AA 7075 Alloy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma demonstrando as etapas deste trabalho. ....	14
Figura 2 – Forjabilidade comparada das ligas de alumínio [9]. ....	17
Figura 3 – Deformação com atrito [17]. ....	19
Figura 4 - Representação esquemática da variação da geometria de um anel durante a compressão; a) para boas condições de lubrificação e b) para condições deficientes de lubrificação [3]. ....	22
Figura 5 - Gráficos de calibração do ensaio de anel para obtenção do coeficiente de atrito, $\mu$ , e do fator de atrito, $m$ [22]. ....	23
Figura 6 – Direções principais na conformação em simetria plana ....	25
Figura 7 – Curvas de escoamento do alumínio AA7075 para diferentes velocidades de deformação ....	28
Figura 8 - Martelos de queda; a) martelo de queda por gravidade, b) martelo de queda motorizado por atuação pneumática e c) representação esquemática do gráfico de variação carga-deslocamento. ....	29
Figura 9 – Representação esquemática do gráfico da variação força-deslocamento durante uma operação de deformação plástica realizada através da aplicação de golpes sucessivos (pancadas múltiplas). ....	32
Figura 10 – Representação de um elemento infinitesimal em uma peça de simetria plana conformada (Método das Tiras), (A). Representação de um elemento infinitesimal em uma peça de simetria de revolução extrudada ou trefilada (Método dos Discos), (B). Representação de um elemento infinitesimal em uma peça de simetria de axial conformada em matriz fechada (Método dos Tubos),(C).....	38
Figura 11 - Decomposição das tensões de uma tira infinitesimal.....	39
Figura 12 – Representação de peça com simetria planar ....	41
Figura 13 – Representação de corpo de prova utilizado no ensaio do anel, dimensões em milímetros.....	46

Figura 14 – Prensa FKL utilizada nos ensaios de determinação do coeficiente de atrito. .....	47
Figura 15 – Representação esquemática do ferramental utilizado na execução dos ensaios de compressão. ....	48
Figura 16 – Desenho esquemático da sequência de operações desenvolvidas durante os ensaios. ....	48
Figura 17 – Forno Sanchis. ....	49
Figura 18 – Corpos de prova após o ensaio do anel.....	49
Figura 19 – Demonstrativo dos coeficientes de atrito ( $\mu$ ) para cada tipo de lubrificação .....	50
Figura 20 – Representação de corpo de prova utilizado no ensaio da tensão de escoamento, dimensões em milímetros.....	50
Figura 21 – Prensa hidráulica marca EKA modelo PKL40.....	51
Figura 22 – Comparativo entre curvas de escoamento.....	52
Figura 23 – Representação 3D da geometria da peça analisada.....	53
Figura 24 – Representação das principais cotas da peça, em milímetros. ....	53
Figura 25 – Representação das principais medidas de largura das rebarbas, em milímetros.....	54
Figura 26 – Forno resistivo utilizado para aquecimento da geratriz no processo.....	55
Figura 27 – Equipamento Martelo de queda utilizado no processo de forjamento da peça em estudo.....	55
Figura 28 – Demonstração da ferramenta utilizada.....	56
Figura 29 – Representação 3D da matriz de forjamento, (A) cavidade de pré-forma e (B) cavidade de acabamento.....	56
Figura 30 – Representação dos golpes nas cavidades da matriz.....	57
Figura 31 – Representação das principais medidas demonstradas na Tabela 6.....	58
Figura 32 – Representação 3D da área projetada, em milímetros.....	60
Figura 33 – Comparativo entre perfil original e perfil adaptado para aplicação do Método das Tiras.....	62

Figura 34 – Representação das seções (A-A; B-B e C-C). .....	63
Figura 35 – Representação das tiras nas seções do perfil originado após o primeiro golpe do martelo.....	64
Figura 36 – Representação das tiras nas seções do perfil originado após o segundo golpe do martelo.....	65
Figura 37 - Representação das tiras nas seções do perfil originado após o terceiro golpe do martelo.....	67
Figura 38 – Representação das tiras nas seções do perfil originado após o quarto golpe do martelo .....	68
Figura 39 – Representação das tiras nas seções do perfil originado após o quinto golpe do martelo .....	69
Figura 40 – Representação das tiras nas seções do perfil originado após o sexto golpe do martelo .....	70
Figura 41 – Representação das tiras em cada seção. ....	72
Figura 42 – Demonstrativo de dados utilizados para realizar a simulação de Elementos Finitos.....	75
Figura 43 – Posicionamento da geratriz nas matrizes superior e inferior, para a realização dos três primeiros golpes do martelo de queda. ....	76
Figura 44 – Posicionamento da geratriz nas matrizes superior e inferior, para a realização dos três últimos golpes do martelo de queda.....	76
Figura 45 – Representação da malha gerada na análise de Elementos Finitos .....	77
Figura 46 – (A) Demonstrativo de tensão efetiva e (B) deformação efetiva, para o <u>primeiro golpe</u> . ....	77
Figura 47 – Demonstrativo de energia e força desenvolvidos no <u>primeiro golpe do martelo</u> .....	78
Figura 48 – (A) Demonstrativo de tensão efetiva e (B) deformação efetiva, para o <u>segundo golpe</u> .....	78
Figura 49 – Demonstrativo de energia e força desenvolvidos no <u>segundo golpe do martelo</u> .....	78

Figura 50 – (A) Demonstrativo de tensão efetiva e (B) deformação efetiva, para o <u>terceiro golpe</u> . .....	79
Figura 51 – Demonstrativo de energia e força desenvolvidos no <u>terceiro golpe do martelo</u> .....	79
Figura 52 – (A) Demonstrativo de tensão efetiva e (B) deformação efetiva, para o <u>quarto golpe</u> . .....	80
Figura 53 – Demonstrativo de energia e força desenvolvidos no <u>quarto golpe do martelo</u> .....	80
Figura 54 – (A) Demonstrativo de tensão efetiva e (B) deformação efetiva, para o <u>quinto golpe</u> .....	80
Figura 55 – Demonstrativo de energia e força desenvolvidos no <u>quinto golpe do martelo</u> .....	81
Figura 56 – (A) Demonstrativo de tensão efetiva e (B) deformação efetiva, para o <u>sexto golpe</u> . .....	81
Figura 57 – Demonstrativo de energia e força desenvolvidos no <u>sexto golpe do martelo</u> .....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química para a liga de alumínio AA7075 (AlZnMgCu1,5)...	17
Tabela 2 – Valores indicativos para o fator de atrito, m, para diferentes tipos de operação de deformação plástica na massa.....	21
Tabela 3 – Coeficientes da curva de escoamento do AA7075.....	27
Tabela 4 – Principais características de prensas e martelos de queda.....	33
Tabela 5 – Coeficientes de correção utilizados no cálculo da pressão e da energia para operações de forjamento em matriz fechada. ....	37
Tabela 6 – Dimensões da peça após cada golpe do martelo.....	58
Tabela 7 – Representação dos valores utilizados em cada golpe do martelo, através do Método da Energia Uniforme.....	62
Tabela 8 – Posicionamento das seções, conforme Figura 35.....	63
Tabela 9 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o primeiro golpe. ..	64
Tabela 10 - Análise da seção B-B na forma obtida após o primeiro golpe.....	65
Tabela 11 - Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o segundo golpe. ..	66
Tabela 12 – Análise da seção B-B na forma obtida após o segundo golpe. ....	66
Tabela 13 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o terceiro golpe ..	67
Tabela 14 – Análise da seção B-B na forma obtida após o terceiro golpe .....	67
Tabela 15 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o quarto golpe ....	68
Tabela 16 – Análise da seção B-B na forma obtida após o quarto golpe .....	68
Tabela 17 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o quinto golpe ....	69
Tabela 18 – Análise da seção B-B na forma obtida após o quinto golpe .....	69
Tabela 19 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o sexto golpe ....	70
Tabela 20 – Análise da seção B-B na forma obtida após o sexto golpe .....	70
Tabela 21 – Demonstração de cotas consideradas de acordo com o golpe do martelo, Figura 42. ....	72

Tabela 22 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o primeiro golpe do martelo. ....	72
Tabela 23 – Análise da seção B-B na forma obtida após o primeiro golpe do martelo .....	72
Tabela 24 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o segundo golpe do martelo. ....	73
Tabela 25 – Análise da seção B-B na forma obtida após o segundo golpe do martelo .....	73
Tabela 26 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o terceiro golpe do martelo. ....	73
Tabela 27 – Análise da seção B-B na forma obtida após o terceiro golpe do martelo .....	73
Tabela 28 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o quarto golpe do martelo. ....	74
Tabela 29 – Análise da seção B-B na forma obtida após o quarto golpe do martelo	74
Tabela 30 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o quinto golpe do martelo. ....	74
Tabela 31 – Análise da seção B-B na forma obtida após o quinto golpe do martelo	74
Tabela 32 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o sexto golpe do martelo. ....	74
Tabela 33 – Análise da seção B-B na forma obtida após o sexto golpe do martelo..	75
Tabela 34 – Comparativo entre métodos para os resultados de Energia Útil (Wu)...	82
Tabela 35 - Comparativo entre métodos para os resultados de Força Útil (Fu).....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABAL	Associação Brasileira Do Alumínio
FEM	finite element method
LdTM	Laboratório de Transformação Macânica
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
TEP	Teoria Elementar Da Plasticidade

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_p$	Área projetada	$[mm^2]$
$A_{pi}$	Área projetada instantânea	$[mm^2]$
$A_1$	Constante empírica do material, relacionado a influência da temperatura	$[-]$
$A_2$	Constante empírica do material, relacionado a influência da deformação	$[-]$
$A_3$	Constante empírica do material, relacionado a influência da velocidade de deformação	$[-]$
$b$	Profundidade	$[mm]$
$b_0$	Profundidade inicial	$[mm]$
$d_e$	Diâmetro externo	$[mm]$
$d_i$	Diâmetro interno	$[mm]$
$d_0$	Diâmetro inicial	$[mm]$
$F$	Força normal	$[N]$
$F_i$	Força instantânea	$[N]$
$F_u$	Força útil (considerando eficiência do equipamento)	$[N]$
$g$	Gravidade	$[m/s^2]$
$h$	Altura	$[mm]$
$h_0$	Altura inicial	$[mm]$
$h_m$	Altura média	$[mm]$
$K$	Tensão limite de elasticidade em cisalhamento puro	$[MPa]$
$kf$	Tensão de escoamento	$[MPa]$
$kf_i$	Tensão de escoamento instantânea	$[MPa]$
$kf_0$	Tensão de escoamento inicial	$[MPa]$
$kf_m$	Tensão de escoamento média	$[MPa]$
$l$	Largura	$[mm]$
$l_0$	Largura inicial	$[mm]$
$M$	Massa	$[kg]$
$m$	Fator de atrito interfacial	$[-]$
$m_1$	Constante empírica do material, relacionado a influência da temperatura	$[-]$
$m_2$	Constante empírica do material, relacionado a influência da deformação	$[-]$
$m_3$	Constante empírica do material, relacionado a influência da velocidade	$[-]$
$P$	Força tangencial	$[N]$
$Q_e$	Coeficiente de correção de energia	$[-]$

$Q_p$	Coeficiente de complexidade de forma	[ – ]
$s$	Deslocamento	[mm]
$T$	Temperatura	[°C]
$V$	Volume	[mm <sup>3</sup> ]
$V_f$	Velocidade da ferramenta	[m/s]
$W$	Energia necessária para o forjamento	[N.m]
$W_u$	Energia útil (considerando eficiência do equipamento)	[N.m]

#### SÍMBOLOS GREGOS

$\alpha$	Ângulo da superfície de contato	[°]
$\rho$	Ângulo de atrito	[rad]
$\mu$	Coeficiente de atrito	[ – ]
$\tau$	Tensão de cisalhamento	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\dot{\varphi}$	Velocidade de deformação verdadeira	[s <sup>-1</sup> ]
$\dot{\varphi}_m$	Velocidade de deformação verdadeira média	[s <sup>-1</sup> ]
$\varphi$	Deformação verdadeira	[ – ]
$\varphi_h$	Deformação verdadeira em altura	[ – ]
$\varphi_b$	Deformação verdadeira em profundidade	[ – ]
$\varphi_l$	Deformação verdadeira em largura	[ – ]
$\varphi_m$	Deformação verdadeira média	[ – ]
$\eta$	Eficiência do golpe – Martelo de queda	[ – ]
$\sigma_{unif}$	Tensão média associada ao trabalho plástico	[N/mm <sup>2</sup> ]

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	HISTÓRICO DO PROCESSO DE FORJAMENTO DO ALUMÍNIO .....	15
2.2	ASPECTOS RELEVANTES SOBRE O PROCESSO DE FORJAMENTO DE LIGAS DE ALUMÍNIO....	16
2.2.1	Atrito no forjamento.....	18
2.2.2	Coeficiente de atrito e fator de atrito.....	19
2.2.3	Ensaio do anel – Caracterização experimental do atrito a quente .....	21
2.2.4	Velocidade de Deformação.....	24
2.2.5	Deformação Verdadeira.....	24
2.2.6	Geometria da geratriz.....	25
2.2.7	Temperatura .....	26
2.2.8	Tensão de Escoamento e Curvas de Escoamento .....	26
2.2.9	Máquinas Para Deformação Plástica – Martelos de queda.....	28
2.3	CONCEITOS BÁSICOS - CÁLCULO DO PROCESSO DE FORJAMENTO .....	33
2.3.1	Método da Energia Uniforme .....	34
2.3.2	Teoria Elementar da Plasticidade (TEP).....	37
	Método das Tiras .....	38
2.3.3	Método Simplificado.....	40
2.3.4	Metodologia de Elementos Finitos (FEM) .....	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO .....	46
3.2	DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE ESCOAMENTO .....	50
4	ANÁLISE TEÓRICO/EXPERIMENTAL .....	53
4.1	GEOMETRIA DA PEÇA EM ESTUDO .....	53
4.2	PROCESSO DE FORJAMENTO .....	54
4.3	DETERMINAÇÃO DE FORÇA E ENERGIA DE FORJAMENTO.....	56
5	MÉTODOS DE CÁLCULO .....	59
5.1	MÉTODO DA ENERGIA UNIFORME.....	59
5.2	MÉTODO DA TIRAS (TEP).....	62
5.3	MÉTODO SIMPLIFICADO .....	71
5.4	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM) .....	75
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	82
7	CONCLUSÕES.....	88
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	90
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91

## 1 INTRODUÇÃO

Com o passar do tempo, a indústria de manufatura tende a absorver novas tecnologias, com a finalidade de produzir componentes de qualidade adequada, com custo o mais baixo possível. O forjamento em matriz fechada oferece várias vantagens para se obter uma peça com alta resistência mecânica, com reduzida usinagem, através da deformação plástica de uma geratriz, dentro de uma cavidade apropriada.

Historicamente o processo de forjamento é realizado de forma empírica, ou seja, as variáveis do processo como temperatura, força de compressão, velocidade, etc., são determinados por tentativa e erro o que acaba agregando custos no desenvolvimento de componentes forjados.

Na tentativa de reduzir custos, a busca de metodologias de cálculo na área de conformação mecânica tem sido alvo de inúmeras pesquisas nas últimas décadas. Todavia, para que estas metodologias se consolidem no ambiente industrial, principalmente tratando-se de forjarias, ainda fazem-se necessárias algumas comprovações, pois a maioria delas continua trabalhando de forma empírica. Para solucionar este problema é preciso intensificar as pesquisas e mostrar os benefícios que cada método apresenta.

Vários pesquisadores trazem exemplos de processos e/ou produtos que poderiam ser otimizados e melhorados. ADDONA[1], demonstra a aplicação do método de Elementos Finitos (FEM) para prever a vida útil das ferramentas de forjamento. Outro estudo, realizado por SANTOS[2] compara o Método da Energia Uniforme com o Método de Elementos Finitos (FEM) e o Método das tiras (TEP), para prever a força necessária para o forjamento de um componente.

Dentro deste contexto, este estudo pretende comparar métodos analíticos, baseados no Método da Energia Uniforme, na Teoria Elementar da Plasticidade (TEP) e no Método de Elementos Finitos (FEM), para a determinação da força e energia de forjamento de um componente utilizado na indústria bélica. Para a aplicação do Método de Elementos Finitos será utilizado o software simulação numérica FORGE®. Os resultados de força e energia obtidos através das aplicações dos métodos serão comparados com os resultados obtidos através do Método Teórico/Experimental.

A Figura 1, demonstra o fluxograma das atividades realizadas neste trabalho.

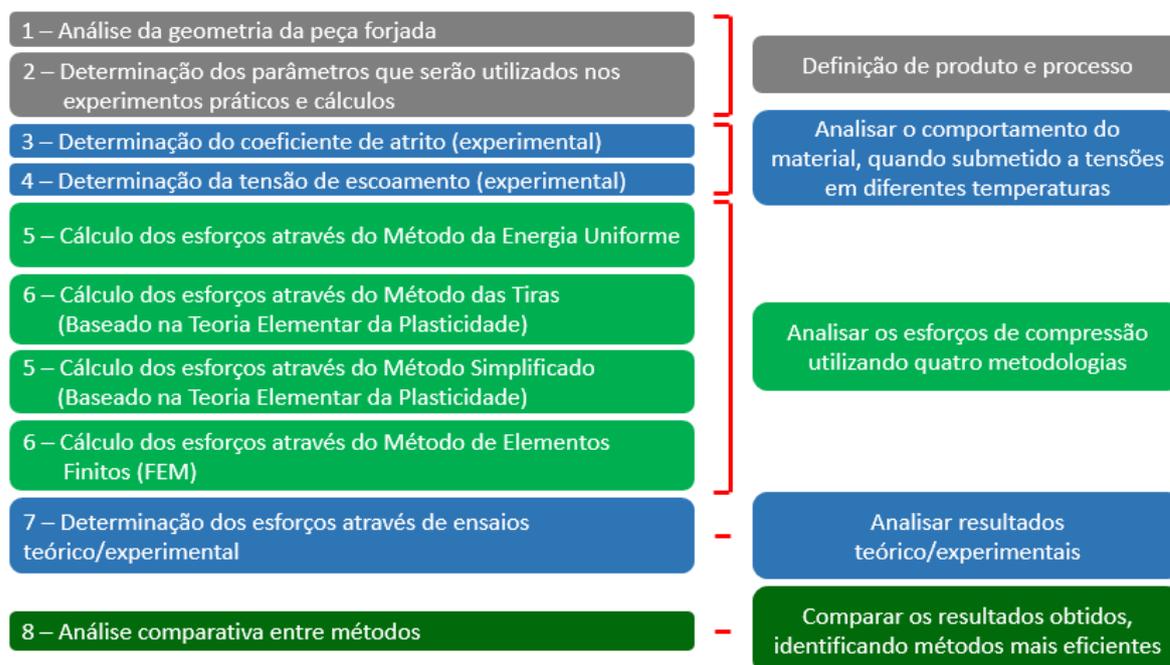


Figura 1 – Fluxograma demonstrando as etapas deste trabalho.

Desta forma os objetivos específicos deste trabalho são:

- Determinar através de experimentos o coeficiente de atrito do lubrificante utilizado pela empresa que atualmente realiza o processo de forjamento do componente analisado;
- Comparar a curva de escoamento obtida com parâmetros recomendados pela literatura, com a curva de escoamento resultante de experimentos na temperatura de 450°C;
- Realizar análise utilizando o Método da Energia Uniforme para prever as forças e energias necessárias para cada golpe do martelo de queda;
- Determinar através do Método das Tiras e do Método Simplificado, baseados na Teoria Elementar da Plasticidade (TEP), as forças e energias necessárias para o processo de forjamento;
- Através do Método Elementos Finitos (FEM), utilizando o Software FORGE®, prever as forças e energias necessárias para o processo de forjamento;
- Comparar resultados encontrados com os diferentes métodos de análise, identificando etapas onde possam apresentar possíveis variações dos resultados de acordo com a aplicação dos métodos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão descritos os fundamentos teóricos utilizados para a realização deste estudo, contemplando breve histórico e aspectos relevantes sobre o processo de forjamento do alumínio, bem como, as metodologias de cálculo utilizadas. Serão comentados também estudos e experimentos realizados por outros autores relacionados a liga AA7075.

### 2.1 HISTÓRICO DO PROCESSO DE FORJAMENTO DO ALUMÍNIO

As primeiras referências à tecnologia da deformação plástica encontram-se no Oriente Médio, no final da Idade da Pedra, e referem-se à fabricação por martelamento de objetos forjados em ouro, prata e cobre, destinados a fins artísticos, religiosos e ferramentas mais duradouras do que as de pedra. Estes materiais eram recolhidos e trabalhados no estado em que eram encontrados na natureza, por intermédio da aplicação de golpes, uma vez que ainda não se conheciam as técnicas de transformação e processamento do minério – a esta técnica deu-se o nome de forjamento [3].

Em 1971, no Japão, impulsionados pelo crescimento da indústria automotiva, pesquisadores desenvolvem estudos para identificar a viabilidade de produzir forjados a partir de ligas leves em matriz fechada, com apenas uma etapa de processo. A busca por economia de material e energia fez com que eles procurassem alternativas ao processo de usinagem, onde há grande desperdício de matéria-prima. Também são feitos estudos para fabricação de peças para indústria aeronáutica utilizando forjamento de precisão com o alumínio [4].

Conforme BARBOSA[5], a utilização industrial do alumínio é relativamente recente: foi descoberto e isolado nas primeiras décadas do século XIX, mas somente com a criação do processo de refino, desenvolvido por Bayer para a obtenção da alumina ( $Al_2O_3$ ) a partir da bauxita, o de Hall-Heroult, de obtenção do alumínio metálico a partir da alumina por eletrólise, ambos em 1886, foi possível produzir o alumínio em escala comercial, permitindo grande redução de custos de fabricação e consequente aumento na utilização deste metal não ferroso. Com a descoberta do

duralumínio por Alfred Wilm em 1906, ao verificar que ligas de alumínio com cobre endureciam consideravelmente mediante tratamentos térmicos, generalizou-se o uso das ligas de alumínio nas mais diversas aplicações industriais, até que na segunda metade do século XX o alumínio ultrapassou o cobre em volume de produção mundial, até então historicamente o metal não ferroso mais utilizado. A recuperação do alumínio a partir da reciclagem é uma prática conhecida desde o início do século XX, mas foi a partir dos anos 1960 que o processo se generalizou, mais por razões ambientais do que econômicas, no hemisfério Norte, mas no Brasil foi forte a motivação econômica [5].

## 2.2 ASPECTOS RELEVANTES SOBRE O PROCESSO DE FORJAMENTO DE LIGAS DE ALUMÍNIO

Os hábitos dos consumidores mudam com o tempo e o alumínio sempre acompanhou essas mudanças, atendendo, graças às características próprias do metal, as novas exigências da vida moderna. Isso explica a permanência do alumínio como componente ou principal matéria-prima de uma extensa relação de bens de consumo [6].

Peças forjadas em alumínio possuem uma vasta aplicação na indústria automotiva. O potencial do alumínio como material de redução de massa torna-se óbvio quando se observa seu peso específico ( $2700 \text{ kg/m}^3$ ), que é menos da metade do ferro ( $7800 \text{ kg/m}^3$ ) e cobre ( $8900 \text{ kg/m}^3$ ) [7].

Raramente utiliza-se alumínio puro para a fabricação de uma peça forjada. Alguns elementos de liga são adicionados ao material para melhorar suas propriedades. Dentre eles destacam-se: Mg, Si, Cu, Zn e Mn [8].

A forjabilidade relativa é baseada na deformação por unidade de energia absorvida na faixa de temperatura de forjamento de cada liga. A Figura 2, apresenta um comparativo da “Forjabilidade Relativa” entre algumas das ligas de alumínio mais conhecidas em função das respectivas temperaturas de forjamento [9].

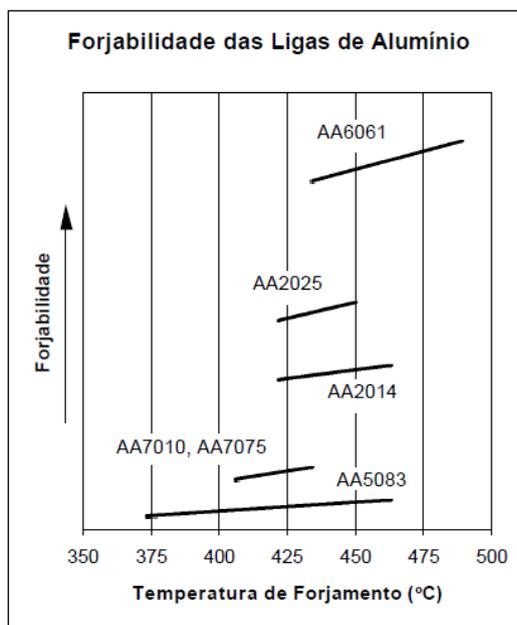


Figura 2 – Forjabilidade comparada das ligas de alumínio [9].

A liga de alumínio utilizada neste estudo é a **AlZnMgCu1,5**, também conhecida como AA7075, sua composição química é dada na Tabela 1 [10]. Esta liga possui valores de resistência a tração relativamente mais elevados em relação a outras ligas de alumínio, podendo alcançar 570MPa de resistência após tratamento térmico T6 [11].

Tabela 1 – Composição química para a liga de alumínio AA7075 (AlZnMgCu1,5).

Elemento	(%)
Zinco	5,1 – 6,1
Magnésio	2,1 – 2,9
Cobre	1,2 – 2,0
Cromo	0,18 – 0,28
Manganês	Máx. 0,30
Ferro	Máx. 0,50
Silício	Máx. 0,40
Titânio	Máx. 0,20
Outros, individual	Máx. 0,05
Outros, total	Máx. 0,15
Alumínio	Remanescente

Fonte: NORMA NBR 6834 [10].

As ligas Al-Zn-Mg-Cu são ligas tratáveis termicamente e endurecidas por precipitação, devido à interação dos elementos de liga Zn, Mg, Cu na matriz de alumínio. Inicialmente essas ligas foram desenvolvidas por Sander e Meissner em

1923, na forma de uma liga ternária de Al-Zn-Mg. Essa liga apresentava excelente resposta ao envelhecimento por precipitação quando comparada a outras ligas investigadas na época, passando a ser reconhecida rapidamente pelo seu grande potencial de aplicação em aeronaves. Contudo, teve pouca aceitação por apresentar baixa resistência à corrosão sob tensão. Foi na segunda Guerra Mundial que os países que compunham o lado dos aliados tomaram conhecimento de uma liga de alumínio desenvolvida pelos japoneses, ao analisar destroços de aeronaves, e a partir de então se passou a adotar o uso de cobre na liga Al-Zn-Mg, o que provocou a melhora na resistência à corrosão sob tensão nessas ligas. Desde essa época essas ligas são de amplo interesse do setor aeroespacial [12];[13].

As aplicações da liga AA7075 incluem engrenagens e eixos, componentes de mísseis, componentes de válvula reguladora de pressão, engrenagem helicoidal, chaves e vários outros componentes aeronáuticos, aeroespaciais e de defesa. Oferece boa usinabilidade quando usinada usando ferramentas de carbetto em tornos mono-fuso ou multi-fuso. É recomendado o uso de quebradores de cavaco. A liga recebe classificação “B” segundo o sistema de classificação da Aluminium Association, gerando cavacos curvos ou de fácil quebra com bom a excelente acabamento superficial.

A liga AA7075 apresenta moderada resistência à corrosão e boa resposta a anodização quando utilizados métodos comercialmente disponíveis, podendo receber tanto anodização dura quanto decorativa [14].

### **2.2.1 Atrito no forjamento**

O atrito interfacial peça-matriz durante o forjamento a quente interfere diretamente na vida das matrizes, qualidade do produto e capacidade dos equipamentos empregados no processo. Para amenizar os efeitos do atrito são adicionadas finas películas de lubrificantes, os quais apresentam baixa tensão de cisalhamento na interface peça-matriz visando reduzir as tensões que se opõe ao escoamento do material [15].

O atrito dificulta o escoamento do material e provoca um efeito de “barril” na peça forjada [16]. A Figura 3 exemplifica o efeito de “barril” [17].

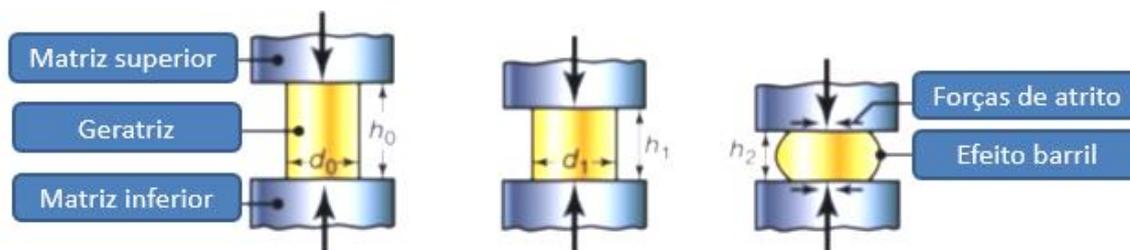


Figura 3 – Deformação com atrito [17].

Uma forma de reduzir o atrito é a utilização de lubrificantes. Estes devem obedecer alguns critérios, como agir na prevenção da aderência e soldagem da peça na matriz, ser isolante térmico para reduzir perdas de calor, ser inerte com os materiais da peça e das matrizes, não ser abrasivo, possuir fácil aplicação e remoção e custo acessível. O trabalho desenvolvido por SAIKI[18], discute alguns destes critérios.

Existem três tipos de lubrificação que governam as condições de atrito em conformação de metais [19]:

- CONDIÇÕES A SECO: não existe lubrificação na interface, apenas contato entre duas superfícies;
- CONDIÇÕES HIDRODINÂMICAS: quando uma espessa camada de lubrificante está presente entre as superfícies da peça e das matrizes;
- LUBRIFICAÇÃO DE CONTORNO: condição de lubrificação intermediária entre atrito seco e lubrificação hidrodinâmica.

Os lubrificantes utilizados para o forjamento de alumínio possuem como principal elemento o grafite que junto com outros elementos se encontram em suspensão coloidal que é caracterizada por conter partículas microscópicas em suspensão que não sedimentam, mesmo aquelas onde o colóide é um metal pesado.

### 2.2.2 Coeficiente de atrito e fator de atrito

O atrito pode ter duas definições básicas em função da tensão de cisalhamento interfacial:

A teoria de Amonton-Coulomb, relativa à mecânica de contato entre corpos sólidos, define o coeficiente de atrito,  $\mu$ , como sendo o quociente entre a força

tangencial,  $P$ , necessária para realizar o movimento relativo entre as superfícies, e a força normal,  $F$ , aplicada entre as mesmas, conforme Equação (1).

$$\mu = \frac{P}{F} \quad \text{Eq. (1)}$$

O aspecto mais relevante da Teoria de Amonton-Coulomb prende-se ao fato do coeficiente de atrito ser independente da área real,  $A_r$ , e aparente,  $A_a$ , de contato, sendo única e exclusivamente proporcional às forças aplicadas ou, conseqüentemente, às tensões desenvolvidas entre as duas superfícies [20].

Outra forma de descrever o atrito é pela lei de Prandtl. Neste caso calcula-se o fator de atrito interfacial  $m$  conforme a Equação (2) [21]:

$$m = \frac{\tau}{K} \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde,  $\tau$  é a tensão de cisalhamento na interface material/ferramenta e  $K$  é a tensão limite de elasticidade em cisalhamento puro.

A Lei de Prandtl determina que a tensão de cisalhamento devido ao atrito é independente da tensão de contato entre as duas superfícies. Os valores limites para o fator de atrito são  $m = 0$  quando não existe atrito e  $m = 1$  para condições de aderência. Esta lei deve ser aplicada sempre que as tensões de contato forem muito elevadas, quando o coeficiente de atrito,  $\mu$ , deixa de ter significado. Por outro lado, a utilização da lei de Prandtl em situações com tensões de contato reduzidas pode levar a estimativas exageradas do valor da tensão de cisalhamento devido ao atrito [21].

Na Tabela 2 são apresentados valores indicativos para o fator de atrito, para diferentes operações de deformação plástica na massa.

Tabela 2 – Valores indicativos para o fator de atrito,  $m$ , para diferentes tipos de operação de deformação plástica na massa.

Fator de atrito $m$	Tipo de operação de deformação plástica na massa
0,05 – 0,15	Deformação a frio dos aços, ligas de alumínio e cobre utilizando lubrificantes.
0,15 – 0,4	Deformação a quente dos aços, <b>ligas de alumínio e cobre</b> utilizando lubrificantes de base grafitada
0,6 – 1,0	Quando não se utilizam lubrificantes

Fonte: MARTINS[3].

### 2.2.3 Ensaio do anel – Caracterização experimental do atrito a quente

O coeficiente de atrito é um dado importante para qualquer cálculo ou simulação do processo com o uso do computador. O Teste do Anel é o método mais simples de se determinar o coeficiente de atrito.

Durante a compressão axial de um anel a variação do seu diâmetro interno,  $d_i$ , é sensível ao atrito que existe na interface de contato entre o material e as matrizes de compressão. Em condições ideais de lubrificação, isto é, quando não existe atrito, o anel expande-se uniformemente e o material movimenta-se radialmente, com uma velocidade que é proporcionalmente à distância ao centro.

À medida que o atrito aumenta, para uma mesma redução de altura, a velocidade de expansão do diâmetro interno vai reduzindo-se até que, para valores mais elevados de atrito, se torna energeticamente mais favorável que parte do material do anel se movimente para o exterior e que outra parte se movimente para o interior, originando uma diminuição do diâmetro interior do anel conforme demonstrado na Figura 4 [3].

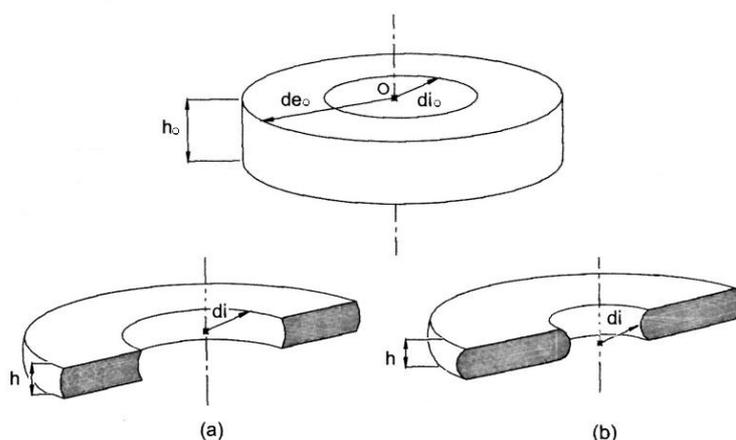


Figura 4 - Representação esquemática da variação da geometria de um anel durante a compressão; a) para boas condições de lubrificação e b) para condições deficientes de lubrificação [3].

Com o aumento do atrito entre as superfícies de contato, o ponto e a linha neutra que definem a inversão do sentido do movimento radial do material, vão se deslocando progressivamente para a periferia do anel, enquanto que as superfícies laterais do anel vão se tornando curvilíneas (devido a um efeito semelhante ao efeito de barril que se observa na compressão uniaxial de cilindros com atrito) e as superfícies de contato com as matrizes compressoras vão sendo, cada vez mais, formadas com material proveniente da superfície lateral do anel.

Os anéis geralmente utilizados nestes ensaios possuem relação geométrica entre o diâmetro externo, o diâmetro interno e a altura igual a 6:3:2. O ensaio consiste em deformar os anéis para diferentes deslocamentos do prato compressor e medir o diâmetro interno,  $d_i$ , e a altura  $h$ , do anel em cada paragem. Com esses valores é possível então determinar o coeficiente/fator de atrito característico do conjunto material-ferramenta, bastando para o tal plotar os valores nas curvas de calibração teóricas. As curvas de calibração teóricas, são obtidas através de simulação computacional utilizando software de elementos finitos. Deve-se levar em consideração características específicas do processo analisado, como a temperatura e tipo de material a ser conformado, temperatura da ferramenta de compressão, etc.

A Figura 5 demonstra exemplos de curvas de calibração para a liga AA6351, sendo plotados resultados obtidos através do ensaio do anel a frio, para diferentes lubrificantes [22].

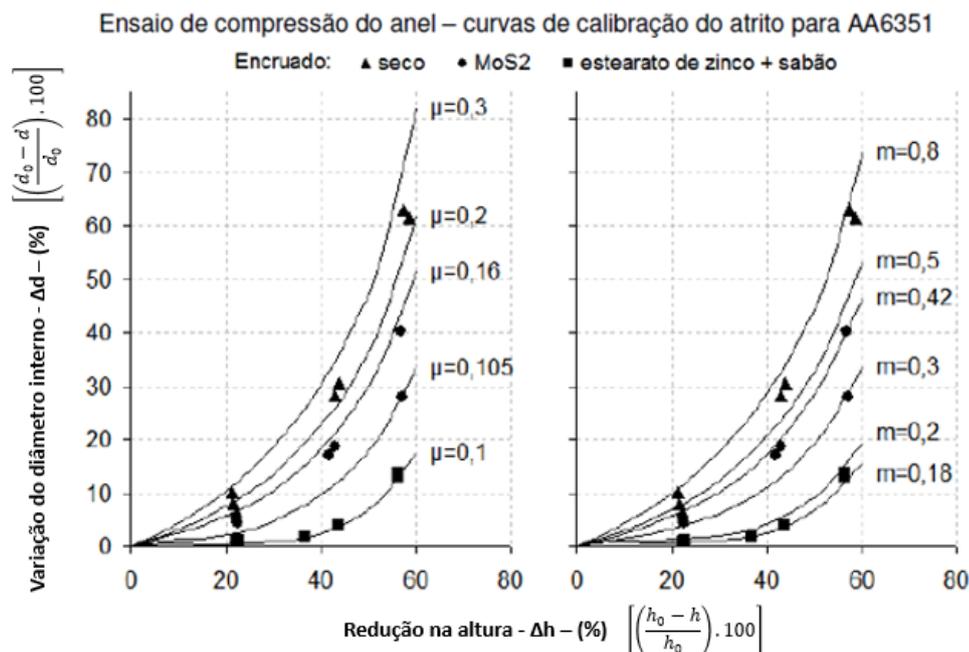


Figura 5 - Gráficos de calibração do ensaio de anel para obtenção do coeficiente de atrito,  $\mu$ , e do fator de atrito,  $m$  [22].

O encruamento do material influencia o valor do fator de atrito, provocando um abaixamento nas curvas de calibração da Figura 5. Este efeito deve-se ao aumento da taxa de movimentação de material para o exterior e explica-se pelo fato da existência de um encruamento provocar uma maior uniformidade no escoamento do material do anel. Este efeito é sobretudo importante para níveis elevados de atrito, podendo ser desprezado para valores do fator de atrito  $m < 0.2$ .

O ensaio de anel caracteriza-se pela simplicidade de execução e pela facilidade com que se pode determinar o valor do coeficiente/fator de atrito, seja como no caso deste estudo a quente, ou a frio, não exigindo nem a determinação experimental das cargas, nem das extensões, podendo ser realizado em prensas convencionais com diferentes condições de lubrificação, de velocidade ou de temperatura.

A desvantagem principal do ensaio do anel é o fato do coeficiente/fator de atrito poder ser sobrestimado em processos tecnológicos que envolvam simultaneamente, pressões de contato elevadas e movimentos relativos significativos entre a peça e a ferramenta.

### 2.2.4 Velocidade de Deformação

A velocidade de deformação ( $\dot{\varphi}$ ) é um dos fatores utilizados para determinar a tensão de escoamento durante o forjamento, uma vez que há uma relação direta, ou seja, o aumento da velocidade de deformação provoca um aumento da tensão de escoamento. Normalmente, equipamentos mecânicos usam maiores velocidades da ferramenta, alcançando velocidades de deformação médias maiores. Por outro lado, prensas hidráulicas usam baixas velocidades de ferramenta, atingindo velocidades de deformação médias consideravelmente baixas.

A velocidade de deformação ( $\dot{\varphi}$ ), em particular no forjamento, pode ser definida como a relação entre a velocidade da ferramenta  $V_f$  e a altura instantânea  $h$ , conforme Equação (3).

$$\dot{\varphi} = \frac{V_f}{h} [s^{-1}] \quad \text{Eq. (3)}$$

No caso de processos de forjamento de ligas de alumínio a velocidade de deformação é um parâmetro extremamente importante. Para CAPAROLLI[23], caso o forjamento ocorra em velocidades de deformação verdadeira altas, pode-se originar um excessivo aumento de temperatura em determinados locais da peça. Neste caso, pode ocorrer fusão e, ao resfriar a peça, tem-se nestes locais estrutura bruta de fusão. Por isso deve-se observar que em nenhum local da peça sejam alcançadas fases líquidas.

### 2.2.5 Deformação Verdadeira

Nos processos de conformação, a deformação global ou localizada em uma determinada região na peça deve ser calculada pela deformação verdadeira  $\varphi$  e não pela deformação relativa, ou de engenharia, como é comum na mecânica técnica convencional [8].

Grandes deformações, como as que ocorrem no forjamento, com simetria plana, devem ser calculadas conforme Equação (4), Equação (5) e Equação (6).

- Deformações em altura:  $\varphi_h = \ln \frac{h}{h_0}$  Eq. (4)

- Deformação em profundidade:  $\varphi_b = \ln \frac{b}{b_0}$  Eq. (5)

- Deformação em largura:  $\varphi_l = \ln \frac{l}{l_0}$  Eq. (6)

As deformações  $\varphi_h$ ,  $\varphi_b$  e  $\varphi_l$ , são as três deformações principais quando reportadas a um sistema de eixos cartesianos (direções h, b e l), conforme Figura 6.

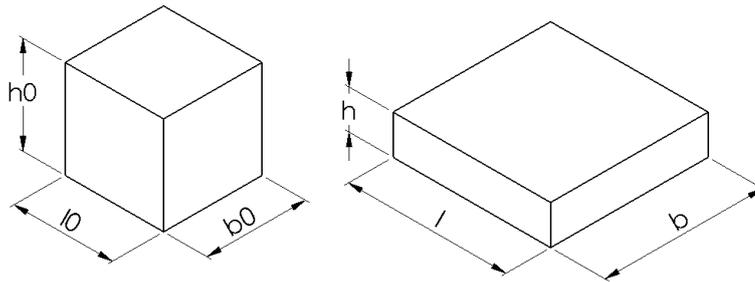


Figura 6 – Direções principais na conformação em simetria plana

É importante observar que nos processos de conformação mecânica o volume do corpo durante o processo de deformação não se altera. Esta particularidade denomina-se Lei da Constância de Volume.

### 2.2.6 Geometria da geratriz

Uma operação de forjamento em matriz fechada deve garantir o preenchimento completo das cavidades das matrizes, sem que, por deficiências no escoamento do material, apareçam defeitos na peça forjada. Nestas condições, é sempre muito pouco provável que uma peça de geometria complexa possa ser fabricada numa única operação de forjamento a partir de uma matéria-prima cilíndrica. Estes casos exigem, quase sempre, a realização de operações intermediárias, durante as quais a geometria e as dimensões do componente vão sendo progressivamente aproximadas à forma final desejada [24].

CAPAROLLI[23], salienta que a escolha da geometria adequada da geratriz não é uma tarefa fácil. Ela é uma das etapas que mais dificuldades apresenta na especificação de um processo industrial de forjamento a quente. Isso se deve porque,

no decorrer da operação de forjamento em matriz fechada, o material deve distribuir-se no interior das matrizes de modo a satisfazer os seguintes requisitos:

- Garantir o escoamento do material sem que ocorram defeitos internos e sobreposições;
- Assegurar o preenchimento completo das cavidades das matrizes;
- Minimizar as perdas de material para rebarba;
- Diminuir o desgaste da matriz de acabamento, reduzindo ou evitando o movimento relativo do material nas interfaces de contato com a matriz;
- Assegurar as propriedades metalúrgicas e as características mecânicas especificadas para a peça final.

### **2.2.7 Temperatura**

Nos processos de conformação mecânica, o atrito e a deformação plástica contribuem para a geração de calor. A maior parte da energia mecânica envolvida é transformada em calor. As temperaturas desenvolvidas no processo influenciam as condições de lubrificação, a vida da ferramenta e as propriedades do produto final, e, mais significativamente, determinam a velocidade máxima de deformação, a qual pode ser usada para produzir bons componentes sem danificar as ferramentas. Em virtude disso, é importante analisar e escolher a temperatura ideal para o forjamento da peça, pois ela influencia de forma significativa a produtividade do processo [19].

A faixa de temperatura de forjamento recomendado para a liga AA7075 é de 380 a 440°C e a faixa de temperatura recomendado para a matriz, na condição de forjamento em matriz fechada, utilizando martelo mecânico, é de 95 a 150°C [9].

### **2.2.8 Tensão de Escoamento e Curvas de Escoamento**

Nos processos de forjamento as características de deformação dos materiais e suas leis constitutivas determinam como os mesmos escoam. A tensão de escoamento pode ser descrita em função de algumas variáveis através da curva de

escoamento, que é definida como sendo a variação da tensão de escoamento  $k_f$  em função da temperatura  $T$ , da deformação verdadeira  $\varphi$ , e da velocidade de deformação  $\dot{\varphi}$ , para condições de deformação a quente [25].

A tensão de escoamento utilizada neste estudo foi estimada através da Equação (7), apresentada por HENSEL e SPITEL[26], desenvolvida através formulações matemáticas empíricas para a curva de escoamento em deformação a altas temperaturas. A Tabela 3, relaciona as variáveis indicadas, para o alumínio AA7075.

$$k_f = k_{f0} \cdot A_1 \cdot e^{-m1 \cdot T} \cdot A_2 \cdot \varphi^{m2} \cdot A_3 \cdot \dot{\varphi}^{m3} \quad \text{Eq. (7)}$$

Tabela 3 – Coeficientes da curva de escoamento do AA7075

Parâmetro	Valor
$k_{f0}$	169,7 MPa
$A_1$	6,504
m1	0,00468
$A_2$	1,425
m2	0,154
$A_3$	0,764
m3	0,117
T	450°C

Fonte: Hensel,1978 [26].

Onde,  $k_f$  é a tensão de escoamento, os coeficientes  $A_1$ ,  $m1$ ,  $A_2$ ,  $m2$ ,  $A_3$  e  $m3$  são constantes empíricas do material que representam a influência da temperatura, da deformação e da velocidade de deformação.

A variável “T” equivale a temperatura (°C),  $\varphi$  é a deformação verdadeira e  $\dot{\varphi}$  equivale a velocidade de deformação [8].

Aplicando-se os coeficientes da

Tabela 3 na Equação (7) foi traçado o gráfico das curvas de escoamento, demonstrado na Figura 7, para as velocidades de deformação,  $0,01 \text{ s}^{-1}$ ,  $0,1 \text{ s}^{-1}$ ,  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $10 \text{ s}^{-1}$ , na temperatura de 450°C.

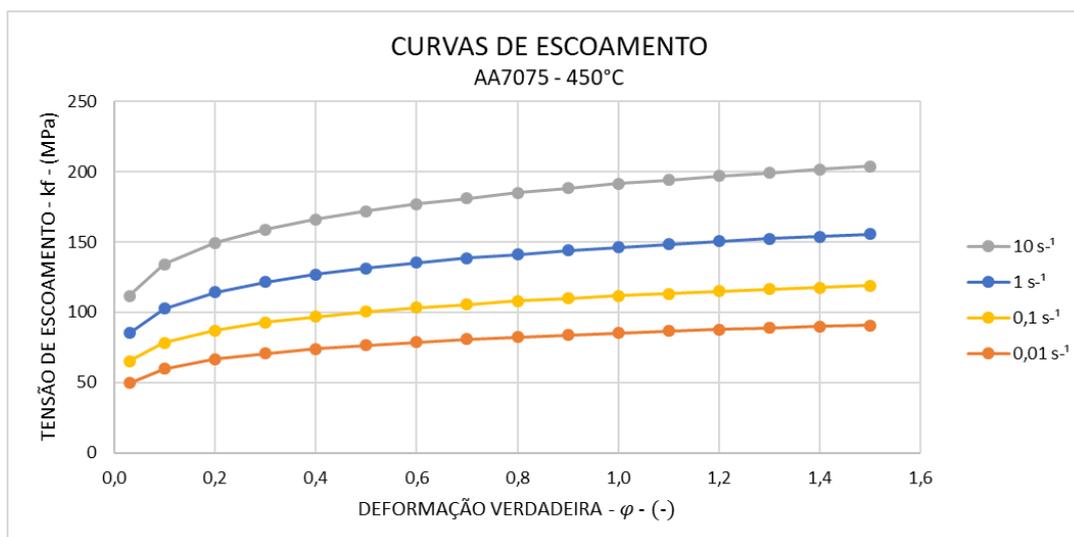


Figura 7 – Curvas de escoamento do alumínio AA7075 para diferentes velocidades de deformação

### 2.2.9 Máquinas Para Deformação Plástica – Martelos de queda

A aquisição de uma prensa ou de um martelo de queda representa um grande investimento em capital, sendo a sua recuperação determinada pelo grau de acerto da escolha efetuada. Para se atingir este objetivo é necessário compatibilizar as características dos equipamentos às exigências tecnológicas do processo de fabricação. Este fato conduz a que se deva conhecer com alguma profundidade não só as especificações do processo tecnológico, como também as principais características das máquinas-ferramenta disponíveis no mercado.

Conforme MARTINS[3], martelo de queda é o equipamento mais versátil e barato, capaz de fornecer a força e a energia necessárias a uma operação de deformação plástica. A energia é fornecida pela queda livre ou impulsionada de uma massa (variando entre 200 a 3500kg) a partir de uma altura que pode oscilar entre 1m a 3,5m. A Figura 8 demonstra o princípio de funcionamento dos martelos de queda.

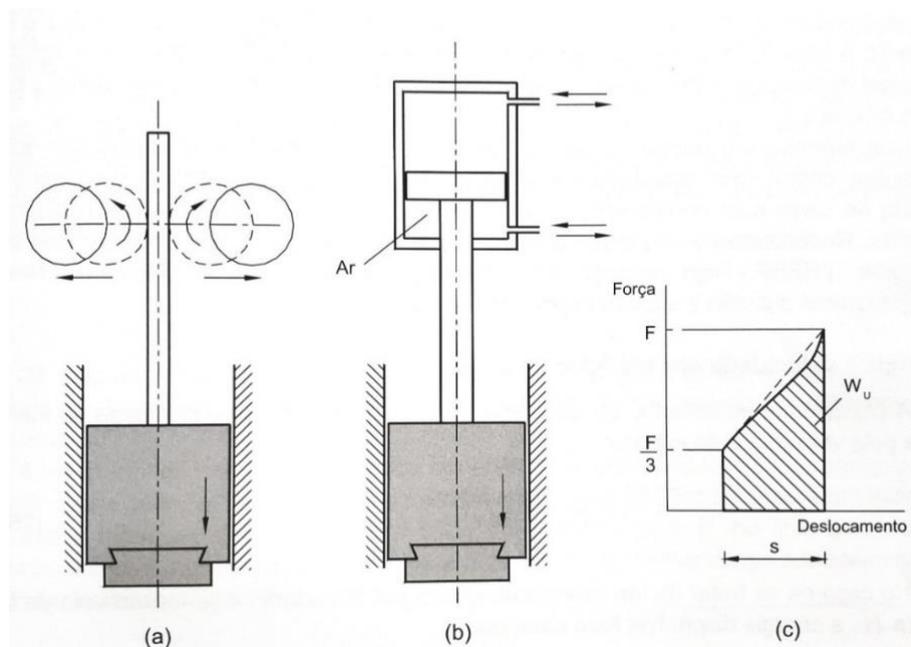


Figura 8 - Martelos de queda; a) martelo de queda por gravidade, b) martelo de queda motorizado por atuação pneumática e c) representação esquemática do gráfico de variação carga-deslocamento.

Durante o curso de trabalho a deformação vai progredindo até que a totalidade da energia cinética, que havia sido acumulada pelo carro, seja consumida na deformação plástica da peça e na deformação elástica do carro e da base do equipamento. A capacidade nominal destes equipamentos é habitualmente fornecida em termos da energia máxima que pode ser disponibilizada.

Existem basicamente dois tipos de martelos; martelos de queda por gravidade e martelos de queda motorizados. Nos martelos de queda por gravidade o carro está rigidamente ligado a uma prancha, a uma correia, a uma cadeia ou a um cilindro pneumático ou hidráulico (Figura 8). O carro é içado até uma certa altura e depois é deixado cair livremente sendo a aceleração exclusivamente resultante da queda por ação da gravidade. O mecanismo de subida atua imediatamente após estar concluída a queda e o seu acionamento pode ser através de rolos de atrito ou de ar comprimido.

Os martelos de queda motorizados são similares aos martelos de queda por gravidade com a diferença que durante a queda o carro é acelerado não só por ação da gravidade mas também por ação pneumática ou eletrohidráulica (Figura 8). A energia fornecida por este tipo de martelo é muito superior à dos martelos de queda por gravidade e o seu controle é mais fácil na medida em que o operador pode

controlar o impulso inicial. A principal desvantagem deste tipo de equipamento reside no fato de exigirem estruturas mais robustas.

Nos martelos de queda de ação eletrohidráulica o carro é levantado por ação hidráulica contra uma pressão pneumática, diminuindo desta forma a velocidade de subida do carro mas contribuindo para aumentar a sua aceleração durante o curso de descida.

### **2.2.9.1 Energia e velocidade nos martelos de queda**

A capacidade de trabalho, de um martelo de queda por gravidade será dada pela Equação (8), cuja massa  $M$  caia de uma altura  $h$ , sob efeito da gravidade  $g$ .

$$W = M \cdot g \cdot h \quad \text{Eq. (8)}$$

Desta energia somente 10 a 30% é utilizada na deformação da peça, uma vez que existem perdas para a estrutura do martelo, para as ferramentas, para as fundações e para o solo.

A capacidade nominal destes equipamentos deve ser estabelecida em termos de energia disponível no início do processo de fabricação, não sendo significativo especifica-los em função da altura de queda do martelo. A energia disponível no início  $W$  não se transforma totalmente em energia útil  $W_u$  na medida em que ocorrem perdas de energia para o ambiente sob forma de vibrações e ruído. Define-se eficiência do golpe  $\eta$  como sendo a razão entre a energia útil e a energia disponível no início do processo, conforme Equação (9).

$$\eta = \frac{W_u}{W} \quad \text{Eq. (9)}$$

Os valores típicos de eficiência são 0,8 – 0,9 para golpes suaves (pequena carga e grande deslocamento) e 0,2 – 0,5 para golpes fortes (carga elevada e deslocamento reduzido).

A transformação de energia cinética em energia de deformação durante um golpe do martelo pode desenvolver uma força considerável. A Figura 8 apresenta um

exemplo em que a força aumenta de  $F/3$  no início do processo para  $F$  no final do curso. A energia útil encontra-se representada pela área abaixo da curva carga-deslocamento, e pode ser estimada de forma aproximada através da Equação (10).

$$W_u \cong \frac{\frac{F}{3} + F}{2} s = \frac{4Fs}{6} \quad \text{Eq. (10)}$$

Uma das principais características dos martelos de queda é a elevada velocidade de atuação. Este fato faz aumentar a velocidade de deformação do material e tem consequências diretas no valor da tensão de escoamento, em particular nas operações de fabricação realizadas a quente. Porém, como o tempo total despendido na operação é mais baixo, o arrefecimento provocado na peça é menos acentuado, e compensa o efeito decorrente do aumento da velocidade de deformação. Consequentemente, estima-se que a força necessária para a deformação a quente de uma peça num martelo de queda seja apenas cerca de 25% superior à que é necessária para realizar a mesma operação numa prensa.

O tempo de contato entre a matriz e a peça é extremamente curto (de 1 a 10ms) devido à elevada velocidade que o martelo possui no instante do impacto e a rápida capacidade de inversão de velocidade. Devido a este tempo de dissipação de energia ser muito reduzido podem produzir-se forças muito elevadas.

O excesso de energia que não é utilizado para realizar o processo de fabricação é transmitido para as matrizes e para a estrutura do martelo, as quais devem ser capazes de suportar este tipo de choque e de sobrecarga.

### **2.2.9.2 Energia e força nos martelos de queda**

A Figura 9 contém uma representação esquemática da curva de variação de carga  $F$  com o deslocamento  $s$  da matriz durante uma operação de deformação plástica realizada através da aplicação de golpes sucessivos (pancadas múltiplas) [3].

Admitindo-se que a energia disponível no início de cada golpe  $W$  é constante e tendo em consideração que a força  $F$  aplicada pelo martelo é inversamente

proporcional ao deslocamento  $s$  da matriz conforme Equação (7), pode concluir-se que durante os golpes finais utilizados fundamentalmente com o propósito de calibrar geometricamente as peças e caracterizados por deslocamentos das matrizes muito reduzidos, (geralmente inferiores a 0,5mm), se verificam aumentos muito significativos da força. Este aumento de força provoca acréscimo de ruído e nas vibrações transmitidas à estrutura e as fundações do martelo, diminuindo a eficiência do golpe  $\eta$ . É esta a principal razão pela qual a eficiência dos golpes fortes característicos das seqüências finais de fabricação deve ser habitualmente inferior à dos golpes suaves que se aplicam no início.

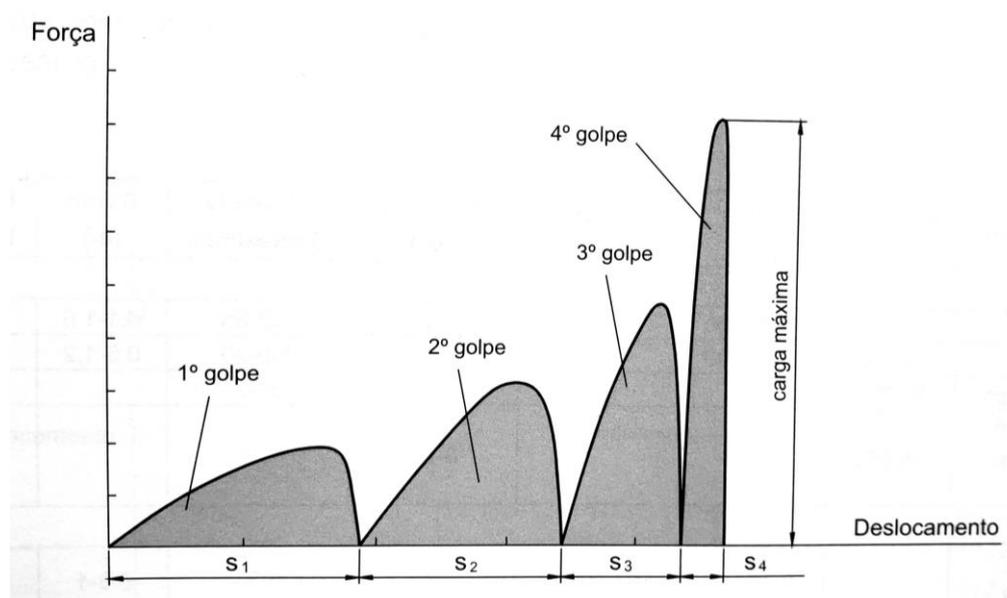


Figura 9 – Representação esquemática do gráfico da variação força-deslocamento durante uma operação de deformação plástica realizada através da aplicação de golpes sucessivos (pancadas múltiplas).

A Tabela 4 apresenta um resumo das principais características mecânicas dos martelos de queda e das prensas que são habitualmente utilizados em processos de fabricação por deformação plástica.

Tabela 4 – Principais características de prensas e martelos de queda.

Equipamento	Energia (kN m)	Massa (kg)	Força (kN)	Velocidade (m/s)	Cadência Golpes/min	Curso (m)	Eficiência Mecânica
<b>MARTELOS</b>							
Mecânicos	0,5-40	30-5000		4-5	350-35	0,1-1,6	0,2-0,5
Vapor e ar	20-600	75-17000		3-8	300-20	0,5-1,2	0,05-0,3
Contra Golpe	5-1200			3-5	60-7		0,2-0,7
HERF (High Energy Rate Forming)	15-750			8-20	< 2		0,2-0,6
<b>PRENSAS</b>							
Hidráulica, forjamento			100-80000	< 0,5	5-30	0,3-1	0,1-0,6
Hidráulica, estampagem			10-40000	< 0,5	20-130	0,1-1	0,5-0,7
Hidráulica, extrusão			1000-50000	< 0,5	< 2	0,8-5	0,5-0,7
Mecânica, forjamento			10-80000	< 0,5	10-130	0,1-1	0,2-0,7
Prensa horizontal			500-30000	< 1	15-90	0,05-0,4	0,2-0,7
Mecânica, estampagem			10-20000	< 1	10-180	0,1-0,8	0,3-0,7
Fuso			100-80000	< 1	6-35	0,2-0,8	0,2-0,7

Fonte: MARTINS[3].

### 2.3 CONCEITOS BÁSICOS - CÁLCULO DO PROCESSO DE FORJAMENTO

Existem vários métodos aproximados, analíticos e numéricos, para analisar processos de forjamento. Conforme ALTAN[19], nenhum desses métodos é perfeito por causa das suposições feitas no desenvolvimento da abordagem matemática. Além do mais, cada método de análise requer como entrada:

- Uma descrição do comportamento do material sob as condições do processo, ou seja, os dados de tensão de escoamento.
- Um valor quantitativo para descrever o atrito, ou seja, o fator de atrito,  $m$  ou o coeficiente de atrito,  $\mu$ .

Estas duas variáveis (tensão de escoamento e atrito) devem ser determinadas pela experiência e são difíceis de obter com precisão. Assim, espera-se que quaisquer erros na medição da tensão de escoamento ou incertezas no valor do fator de atrito influenciem a precisão dos resultados da análise.

Os processos de forjamento podem ser analisados por vários métodos, neste estudo serão desenvolvidos o Método da Energia Uniforme, o Método das Tiras (TEP), o Método Simplificado (TEP) e o Método de Elementos Finitos (FEM).

### 2.3.1 Método da Energia Uniforme

Conforme MARTINS[24], o Método da Energia Uniforme exige que a geometria final da peça forjada seja aproximada por intermédio de uma forma elementar (cilindro, esfera, prisma, etc.), equivalente. O procedimento de cálculo intrínseco ao Método da Energia Uniforme não permite contabilizar os gradientes de deformação e tensão que existem no interior da peça forjada na medida em que apenas se utilizam os valores médios calculados com base na deformação da geometria elementar equivalente a geometria final da peça. Este fato, conjugado com a utilização de estados de tensão e deformação uniaxiais e com o recurso a coeficientes corretivos de natureza empírica ou semi-empírica, contribuem para que o método da energia uniforme tenha características aproximadas e uma aplicabilidade que deverá estar limitada à fase de pré-projeto de peças forjadas.

A metodologia de cálculo baseada na aplicação do Método da Energia Uniforme consiste nos seguintes procedimentos:

- a. Determinação da geometria equivalente (forma elementar cilíndrica por exemplo).

O cálculo da altura média  $h_m$  da geometria elementar equivalente, a partir do volume  $V$  e da área total projetada  $A_P$  da peça forjada (que inclui a rebarba) é efetuado através da Equação (11).

$$h_m = \frac{V}{A_P} \quad \text{Eq. (11)}$$

- b. Determinação dos valores médios da deformação verdadeira e de velocidade de deformação verdadeira na peça forjada.

O valor médio da deformação verdadeira,  $\varphi_m$  no interior da peça forjada calcula-se através do quociente entre a altura inicial  $h_0$  e a altura média final  $h_m$  da geometria elementar equivalente, conforme Equação (12).

$$\varphi_m = \ln \frac{h_0}{h_m} \quad \text{Eq. (12)}$$

A velocidade de deformação média  $\dot{\varphi}_m$  durante a operação de forjamento é calculada através da Equação (13), em que  $V_f$  é a velocidade de atuação da ferramenta.

$$\dot{\varphi}_m = \frac{V_f}{h_m} \quad \text{Eq. (13)}$$

- c. Determinação da tensão equivalente no interior da peça forjada.

O método da energia uniforme considera que o estado de tensão no interior das peças forjadas é uniforme e que pode ser reduzido a um estado de tensão uniaxial equivalente. A tensão de escoamento  $k_f$  no interior da peça forjada pode ser determinada com base nos valores médios de deformação verdadeira  $\varphi_m$  e velocidade de deformação verdadeira  $\dot{\varphi}_m$ , conforme Equação (7).

$$k_f = k_{f0} \cdot A_1 \cdot e^{-m_1 \cdot T} \cdot A_2 \cdot \varphi^{m_2} \cdot A_3 \cdot \dot{\varphi}^{m_3} \quad \text{Eq. (7)}$$

- d. Determinação da força de forjamento.

O valor da força de forjamento  $F$  pode ser calculada corrigindo o valor da tensão de escoamento  $k_f$  da peça forjada por intermédio de um coeficiente  $Q_p$  que é definido de acordo com a complexidade de forma, conforme Equação (14).

$$F = kf_m \cdot A_p \cdot Q_p \quad \text{Eq. (14)}$$

A

Tabela 5 apresenta os valores recomendados para o coeficiente de correção de pressão  $Q_p$ .

e. Determinação da energia de forjamento.

Tendo por base o conceito de trabalho, pode-se determinar a energia total necessária ao forjamento da peça, através da Equação (15).

$$W = \sigma_{unif} \cdot \varphi_m \cdot V \cdot Q_e \quad \text{Eq. (15)}$$

O símbolo  $Q_e$  designa o coeficiente de correção de energia (

Tabela 5),  $\varphi_m$  é o valor médio da deformação verdadeira no instante final do forjamento, e  $\sigma_{unif}$  representa o valor médio da tensão associada ao trabalho plástico (ou ideal) por unidade de volume conforme Equação (16).

$$\sigma_{unif} = \int_0^{\varphi} kf \cdot d\varphi \quad \text{Eq. (16)}$$

f. Foi seguida a recomendação de ajuste de eficiência em função da utilização de martelo de queda por gravidade para a realização do forjamento. Desta forma, assim como nos outros métodos foi considerada eficiência  $\eta = 0,8$  para os três primeiros golpes do martelo e  $\eta = 0,4$  para os três últimos golpes, conforme Equação (9) e Equação (17).

$$\eta = \frac{W_u}{W} \quad \text{Eq. (9)}$$

$$\eta = \frac{F_u}{F} \quad \text{Eq. (17)}$$

Tabela 5 – Coeficientes de correção utilizados no cálculo da pressão e da energia para operações de forjamento em matriz fechada.

<b>Forma geométrica</b>	$Q_p$	$Q_e$
Forma simples, pouco conformada lateralmente	1,5 – 2,5	1,2 – 1,5
Forma simples, conformada lateralmente e com uma pequena formação de rebarba	3 – 5	2 – 2,5
Forma simples, conformada lateralmente e com apreciável formação de rebarba	5 – 8	3
Forma complexa, envolvendo nervuras elevadas e paredes finas, com apreciável formação de rebarba	8 – 12	4

Fonte: Martins, 2010 [24].

### 2.3.2 Teoria Elementar da Plasticidade (TEP)

As noções básicas da TEP surgiram no ano de 1925, com os trabalhos de Siebel (1923) e Karman (1925) para solucionar problemas de laminação. Nos anos seguintes, Sachs (1927) usou a teoria para os processos de trefilação e extrusão, enquanto que Siebel (1927) e Pomp (1927) usaram para o forjamento [3].

Nos últimos anos, muitas equações empíricas foram desenvolvidas para estimar a força necessária para forjar metais. Estas equações foram sendo otimizadas com base em procedimentos práticos, as quais deram origem a inúmeras outras. A Teoria Elementar da Plasticidade é uma delas, porém para cada caso, de acordo com as simplificações e adaptações realizadas pode-se obter resultados com maior ou menor grau de confiabilidade. Desta forma, os resultados obtidos devem ser considerados apenas uma aproximação da força real necessária e devem ser confrontados com os resultados obtidos experimentalmente [30].

De uma forma simplificada, é possível calcular a força de forjamento utilizando os parâmetros integrais ou os parâmetros localizados. A utilização dos parâmetros integrais permite calcular a deformação média  $\varphi_m$ , velocidade de deformação média  $\dot{\varphi}_m$  e a tensão de escoamento média  $k_{fm}$ , possibilitando encontrar, de forma aproximada, a força de forjamento  $F$ . À medida que mais informações são necessárias

como as deformações  $\varphi$  e as tensões nas ferramentas  $\sigma$  ou a distribuição de temperatura  $\vartheta$  nas principais regiões da peça deformada, deve-se usar a Teoria Elementar da Plasticidade [31].

A Teoria Elementar da Plasticidade (TEP) pode ser empregada para três métodos conhecidos como mostra a Figura 10, destacando-se os elementos infinitesimais em uma peça forjada para cada caso [32].

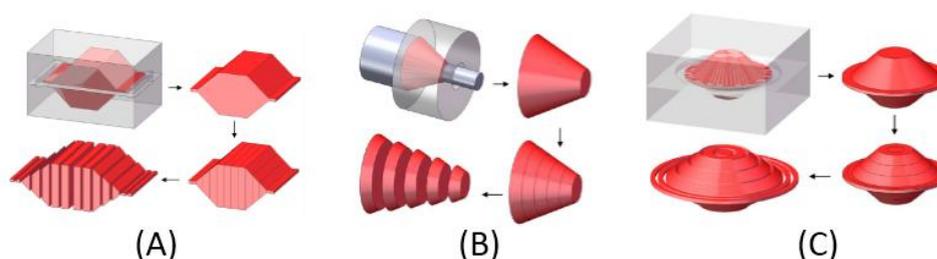


Figura 10 – Representação de um elemento infinitesimal em uma peça de simetria plana conformada (Método das Tiras), (A). Representação de um elemento infinitesimal em uma peça de simetria de revolução extrudada ou trefilada (Método dos Discos), (B). Representação de um elemento infinitesimal em uma peça de simetria de axial conformada em matriz fechada (Método dos Tubos), (C).

Dependendo da geometria do componente a ser forjado, podendo apresentar simetria plana ou axial, utiliza-se o método mais adequado. Nesta lógica, faz-se a discretização em elementos na forma de tiras, discos ou tubos. A partir da análise do equilíbrio de forças numa zona de qualquer geometria, chega-se a uma equação diferencial ordinária de 1ª ordem. Para as geometrias planas, usa-se o Método das Tiras (Figura 10 A) e, para a simetria axial, usa-se o Método dos Discos (Figura 10 B) ou dos Tubos (Figura 10 C). Para cada método há uma equação adequada.

Neste estudo, devido a geometria da peça forjada, foi utilizado o Método das Tiras.

### **Método das Tiras**

A partir da análise do equilíbrio de forças em uma zona qualquer da peça, Figura 11, e utilizando-se o critério de escoamento da máxima tensão cisalhante (Tresca), chega-se a uma equação diferencial ordinária de primeira ordem, que, para o Método das Tiras, pode ser escrita na forma da Equação (18) [24].

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2}{h} \cdot \sigma_x \cdot [\operatorname{tg}(\alpha + \rho) - \operatorname{tg}(\alpha)] - \frac{2}{h} \cdot k_f \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \rho) = 0 \quad \text{Eq. (18)}$$

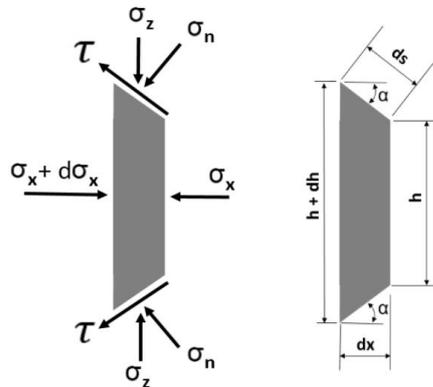


Figura 11 - Decomposição das tensões de uma tira infinitesimal.

Onde  $\sigma_x$ , é a tensão normal na superfície lateral da fatia elementar considerada e  $d\sigma_x/dx$  é a variação dessa tensão entre um lado e outro da fatia. O ângulo formado entre uma superfície perpendicular à direção da aplicação da força e a superfície da peça é  $\alpha$ , e  $\rho$  é o ângulo de atrito, calculado com o auxílio da Equação (19), a partir do coeficiente de atrito de Coulomb  $\mu$ .

$$\rho = \operatorname{atg} \mu \quad \text{Eq. (19)}$$

Os valores da tensão de escoamento para cada seção,  $k_{fi}$ , são calculados utilizando a deformação verdadeira de cada seção, através da Equação (7), proposta por HENSEL[26], sendo considerada a altura média de cada seção  $h_{mi}$ .

Determinada a tensão no eixo “X” para cada seção, a tensão no sentido de aplicação da força, é calculada por Tresca pela Equação (20).

$$\sigma_{zi} = \sigma_{xi} - k_{fi} \quad \text{Eq. (20)}$$

A área projetada perpendicular a “Z” é obtida multiplicando a profundidade de cada elemento,  $b_i$ , pela sua espessura,  $\Delta x_i$ , conforme Equação (21).

$$A_{pi} = b_i \cdot \Delta x_i \quad \text{Eq. (21)}$$

Multiplicando a área projetada,  $A_{pi}$ , pela média das tensões normais em “Z”, nas duas seções que delimitam o elemento, obtém-se, da Equação (22), o valor da força aplicada em cada elemento  $F_i$ .

$$F_i = \frac{(\sigma_{zi} - 1 + \sigma_{zi})}{2} \cdot A_{pi} \quad \text{Eq. (22)}$$

Para a obtenção da força total de conformação,  $F$ , realiza-se o somatório das forças em todos os elementos que compõem a peça Equação (23).

$$F = \sum_{i=0}^n F_i \quad \text{Eq. (23)}$$

A energia de conformação será calculada pela Equação (24). Sendo  $V$  o volume do material deformado.

$$W = k_{f0} \cdot V \cdot \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right) \quad \text{Eq. (24)}$$

Foi seguida a recomendação de ajuste de eficiência em função da utilização de martelo de queda por gravidade para a realização do forjamento. Desta forma, assim como nos outros métodos foi considerada eficiência  $\eta = 0,8$  para os três primeiros golpes do martelo e  $\eta = 0,4$  para os três últimos golpes, conforme Equação (9) e Equação (17).

$$\eta = \frac{W_u}{W} \quad \text{Eq. (9)}$$

$$\eta = \frac{F_u}{F} \quad \text{Eq. (17)}$$

### 2.3.3 Método Simplificado

O cálculo da força e energia de conformação são parâmetros de relativa facilidade a serem determinados. Se o interesse recai na determinação destes parâmetros, nem sempre são necessários sofisticados programas computacionais de alto custo e algumas vezes com elevado tempo computacional para se chegar ao resultado. É possível determinar a força de forjamento de forma simplificada. Utilizando equações oriundas da Teoria Elementar da Plasticidade, o Modelo das Tiras, dos Discos ou dos Tubos mostra que a tensão que a ferramenta exerce sobre uma peça com simetria planar (Figura 12), no instante da conformação pode ser calculada através da Equação (25) [8].

$$\sigma_z = k_f \cdot e^{\frac{2 \cdot \mu}{h} \cdot (\Delta x)} \quad \text{Eq. (25)}$$

Onde  $\sigma_z$  representa a tensão na direção da aplicação da força na superfície da peça,  $k_f$  é a tensão de escoamento do material,  $\mu$  representa o coeficiente de atrito,  $h$  é a altura inicial da peça e  $(\Delta x)$  representa a variação planar a ser analisada [8].

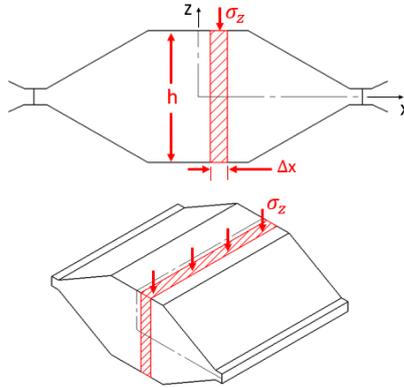


Figura 12 – Representação de peça com simetria planar

A energia de conformação será calculada pela Equação (24). Sendo  $V$  o volume do material deformado.

$$W = k_{f0} \cdot V \cdot \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right) \quad \text{Eq. (24)}$$

A aplicação do Método Simplificado neste trabalho, foi realizada seguindo as seguintes etapas:

- Divisão de cada peça resultante dos golpes do martelo, em seções. Cada seção foi dividida em tiras, semelhante ao Método das Tiras (item 2.3.2)
- Utilizando a Equação (3) foi determinada a velocidade de deformação verdadeira, considerando  $h$  como a altura média de cada tira.

$$\dot{\varphi} = \frac{V_f}{h} [S^{-1}] \quad \text{Eq. (3)}$$

- Determinação da deformação verdadeira, utilizando a Equação (4). Onde  $h$  equivale a altura média de cada tira e  $h_0$  a altura inicial da peça.

$$\varphi_h = \ln \frac{h}{h_0} \quad \text{Eq. (4)}$$

- d. Determinação da tensão de escoamento, aplicando a Equação (7) utilizando dados da Tabela 3.

$$k_f = kf_0 \cdot A_1 \cdot e^{-m_1 \cdot T} \cdot A_2 \cdot \varphi^{m_2} \cdot A_3 \cdot \dot{\varphi}^{m_3} \quad \text{Eq. (7)}$$

- e. Utilizando a Equação (25), foi calculada a Tensão no sentido de conformação em cada tira analisada conforme Figura 12.

$$\sigma_z = k_f \cdot e^{\frac{2 \cdot \mu}{h} \cdot (\Delta x)} \quad \text{Eq. (25)}$$

Onde:

$\mu = \text{coeficiente de atrito (0,093)}$

$h = \text{altura média de cada tira}$

$\Delta x = \text{largura de cada tira}$

- f. Determinação da força de forjamento em cada tira, utilizando a Equação (22).

$$F_i = \frac{(\sigma_{zi} - 1 + \sigma_{zi})}{2} \cdot A_{pi} \quad \text{Eq. (22)}$$

- g. Somatório das forças resultantes em cada tira e em cada seção, conforme Equação (23).

$$F = \sum_{i=0}^n F_i \quad \text{Eq. (23)}$$

- h. Determinação da velocidade de deformação verdadeira, no momento em que a ferramenta toca a peça, utilizando a Equação (3).

$$\dot{\varphi} = \frac{V_f}{h} [s^{-1}] \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

$h = \text{altura total da peça}$

- i. Cálculo da tensão de escoamento no início da deformação utilizando a Equação (7) e os dados da Tabela 3.

$$k_f = kf_0 \cdot A_1 \cdot e^{-m_1 \cdot T} \cdot A_2 \cdot \varphi^{m_2} \cdot A_3 \cdot \dot{\varphi}^{m_3} \quad \text{Eq. (7)}$$

- j. Utilizando a Equação (26) foi determinada a energia necessária para cada tira analisada. O somatório das energias resulta na energia total necessária para a deformação da forma analisada.

$$W = k_f \cdot V \cdot \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right) \quad \text{Eq. (26)}$$

Onde:

$V = \text{Volume da tira}$

$h_0 = \text{Altura de início de deformação}$

$h_1 = h_m$

- k. Foi seguida a recomendação de ajuste de eficiência em função da utilização de martelo de queda por gravidade para a realização do forjamento. Desta forma, assim como nos outros métodos foi considerada eficiência  $\eta = 0,8$  para os três primeiros golpes do martelo e  $\eta = 0,4$  para os três últimos golpes, conforme Equação (9) e Equação (17).

$$\eta = \frac{W_u}{W} \quad \text{Eq. (9)}$$

$$\eta = \frac{F_u}{F} \quad \text{Eq. (17)}$$

#### 2.3.4 Metodologia de Elementos Finitos (FEM)

Os métodos analíticos e experimentais são empregados para a análise da distribuição de deformações e tensões em uma operação de forjamento. Como os resultados usando esses métodos são limitados, usa-se o Método dos Elementos Finitos (FEM). A utilização do FEM é uma boa alternativa para a obtenção de informações mais detalhadas na análise do processo de forjamento, como a distribuição de deformações e tensões [9].

A primeira pessoa de que se tem registro a usar o termo “elemento finito” foi Clough (CLOUGH, 1960), sendo que os primeiros desenvolvimentos do método de elementos finitos ocorrem na década de 1950. Em 1960 iniciaram-se as primeiras aplicações do método, efetuadas na resolução de problemas de análise estrutural com

utilizações de domínio das tecnologias de fabricação. Já na década de 1970 desenvolveu-se uma formulação alternativa, chamada de formulação do escoamento plástico ou “*flow formulation*”. Essa formulação caracteriza o escoamento dos materiais metálicos em deformação plástica de uma forma análoga ao escoamento dos fluidos viscosos incompressíveis, a qual serve de base para vários programas de elementos finitos [21].

A simulação numérica tem aparecido nas indústrias com o propósito de substituir o método de tentativa e erro, reduzindo os custos relacionados, tornando-se um método aceitável como ferramenta de trabalho na escolha de parâmetros adequados (atrito, temperatura) e no desenvolvimento de projetos de ferramentas [33].

O conceito de elementos finitos, segundo Kobayashi, 1989, identifica o domínio a ser trabalhado e dentro dele um número finito de pontos são gerados. Através desses pontos, chamados de nós, são construídas as malhas. Os cálculos do sistema são realizados em cada elemento delimitado pelas malhas e se repetem a cada incremento. Para cada solução através do método de elementos finitos, são necessários cinco passos gerais: a identificação do problema, a definição do elemento, a escolha das equações utilizadas, a aplicação dessas equações e a solução numérica. Através das equações constitutivas, o método de variáveis é o mais utilizado para resolver os problemas de conformação de metais [34].

Entre as principais vantagens do FEM estão: a capacidade de obter resultados detalhados das deformações do corpo, velocidades, formas, tensões e temperaturas, sendo que o código computacional, depois de escrito, pode ser usado para várias simulações, como é o caso dos softwares comerciais.

Há diferentes programas de simulação disponíveis baseados em diferentes métodos de execução e resolução. Dependendo dos resultados desejados, a escolha do programa adequado, dentre os disponíveis no mercado, é determinada de acordo com as necessidades específicas requisitadas [35].

O FORGE® é atualmente o software líder mundial de simulação de conformação de metais, podendo simular qualquer processo de forjamento a quente,

morno e frio, incluindo forjamento de matriz fechada, processos de forjamento de matriz aberta, laminação para produtos longos, extrusão, entre outros.

O FORGE® por padrão vem com um banco de dados de mais de 800 materiais caracterizados para forjamento a quente e mais de 200 materiais para forjamento a frio. Algumas das ligas têm múltiplas variações baseadas no estado inicial. Ainda é possível acrescentar materiais utilizando informações resultantes de ensaios práticos.

O programa permite a elaboração de projetos complexos, simulando o movimento das prensas e possibilitando o estudo do comportamento dos materiais visando prever os resultados obtidos experimentalmente.

Para a obtenção de resultados confiáveis, as variáveis do material e das ferramentas utilizadas devem condizer com a realidade. Para um dado material, deve-se informar sua composição e seu histórico de deformações ou tratamentos térmicos, ou seja, sua microestrutura, sua tensão de escoamento, sua anisotropia e sua curva de escoamento. A microestrutura é expressa como função da deformação aplicada, da velocidade de deformação e da temperatura. Por este motivo, ensaios de caracterização são necessários para a exata configuração do ensaio computacional. Para as ferramentas, é necessária a noção de velocidade e força do maquinário, assim como o design das ferramentas, o acabamento superficial, que acarreta diretamente no atrito, e as propriedades térmicas e mecânicas [34].

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi escolhido um componente e seu processo de forjamento para análise e determinação Teórico/Experimental da energia e força de forjamento. O componente forjado possui perfil específico utilizado na indústria bélica, sendo forjado a quente em matriz fechada por martelo de queda por gravidade. Utilizou-se o software SolidWorks, tanto para o desenvolvimento do projeto 3D quanto para o detalhamento.

Foram realizados ensaios para determinação do coeficiente de atrito e tensão de escoamento, sendo utilizado prensa hidráulica da marca FKL com capacidade de força de 6 MN, uma prensa hidráulica de simples efeito marca EKA modelo PKL40, com capacidade de 400 kN e o software de simulação por elementos finitos FORGE®.

#### 3.1 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO

Utilizando a liga de alumínio AA7075-F, foram confeccionados corpos de prova em formato anelar com dimensões conforme mostra a Figura 13.

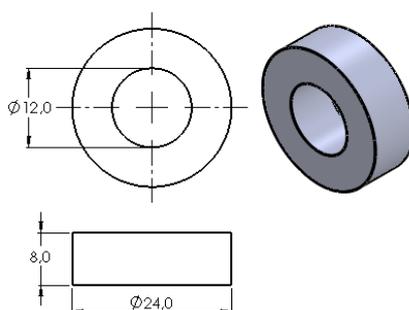


Figura 13 – Representação de corpo de prova utilizado no ensaio do anel, dimensões em milímetros.

Estabeleceu-se a relação diâmetro externo x diâmetro interno x altura em 6:3:2, em quantidade suficiente para ensaiar três vezes as seguintes condições de contato:

- Condição a seco
- Lubrificante Vicast 2020E – Produzido a base de óleo de alta diluição, utilizado pela empresa que fabrica a peça analisada, em mistura de 80% água e 20% lubrificante.
- Lubrificante Lubrodal AT 737 F, marca Fuchs. Produzido a base de suspensão de grafite.

d. Lubrificante Forge Ease 956 BR, marca Fuchs. Produzido a base de suspensão de grafite.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM)/UFRGS, utilizando-se uma prensa hidráulica da marca FKL (Figura 14), a qual possui capacidade de força de 6 MN e velocidade de compressão de 3,4 mm/s, a temperatura de 450°C.



Figura 14 – Prensa FKL utilizada nos ensaios de determinação do coeficiente de atrito.

A prensa foi controlada por um limitador de altura por fim de curso e com calibre de deformação no valor de 60% (40% de deformação). A temperatura durante o ensaio foi mantida aproximadamente constante através da utilização de ferramenta, denominada “copo quente” sendo aquecida juntamente com o corpo de prova. O “copo quente”, conforme descrito por ROSIAK[36], nada mais é do que uma estrutura cilíndrica, produzida no aço ferramenta para trabalho a quente H13, que reduz a perda de calor para o exterior após a retirada da estrutura do forno de aquecimento.

Durante o aquecimento o corpo de prova é posicionado no interior do “copo quente” juntamente com as matrizes de compressão, superior e inferior, que fecham as aberturas do cilindro. A Figura 15 demonstra esquema de ferramental “copo quente” utilizado para execução dos ensaios.

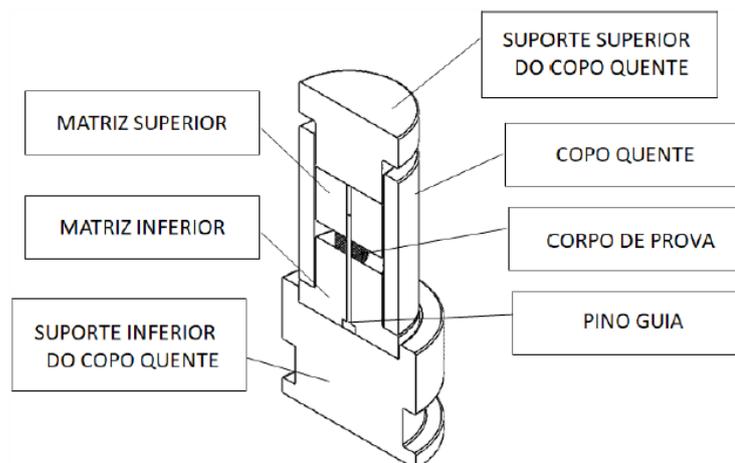


Figura 15 – Representação esquemática do ferramental utilizado na execução dos ensaios de compressão.

Os ensaios com a ferramenta “copo quente” são ilustrados na Figura 16 e ocorreram da seguinte forma: (1) montagem do ferramental (ferramental + corpo de prova); (2) aquecimento do conjunto por 20 minutos a 450°C; (3) ensaio de compressão; (4) remoção do corpo de prova do ferramental e resfriamento ao ar. A compressão ocorreu reduzindo até 40% (3,2mm) em altura os corpos de prova para todos os lubrificantes analisados. A lubrificação foi realizada entre as matrizes e na superfície dos corpos de prova.

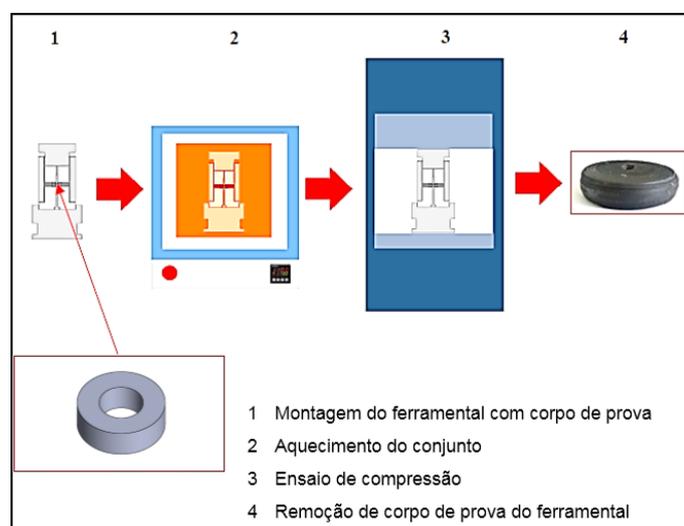


Figura 16 – Desenho esquemático da sequência de operações desenvolvidas durante os ensaios.

Para o processo de aquecimento foi utilizado um forno resistivo fabricado pela empresa Sanchis sem recirculação e sem termopar de arraste, com temperatura máxima de trabalho ajustada em 450°C.

O monitoramento da temperatura interna do forno foi realizado utilizando indicação de temperatura do painel do forno. O forno utilizado nos experimentos é mostrado na Figura 17.



Figura 17 – Forno Sanchis.

Os corpos de prova conformados foram medidos em duas direções: uma perpendicular à outra no diâmetro interno e de igual forma na altura para minimizar a possibilidade de erro.

A Figura 18 demonstra os corpos de prova após os ensaios de conformação.



Figura 18 – Corpos de prova após o ensaio do anel

Utilizando o Software FORGE® foi possível estabelecer curvas de calibração, simulando diferentes coeficientes de atrito, com estas curvas foi possível plotar os valores obtidos com os experimentos, conforme Figura 19.

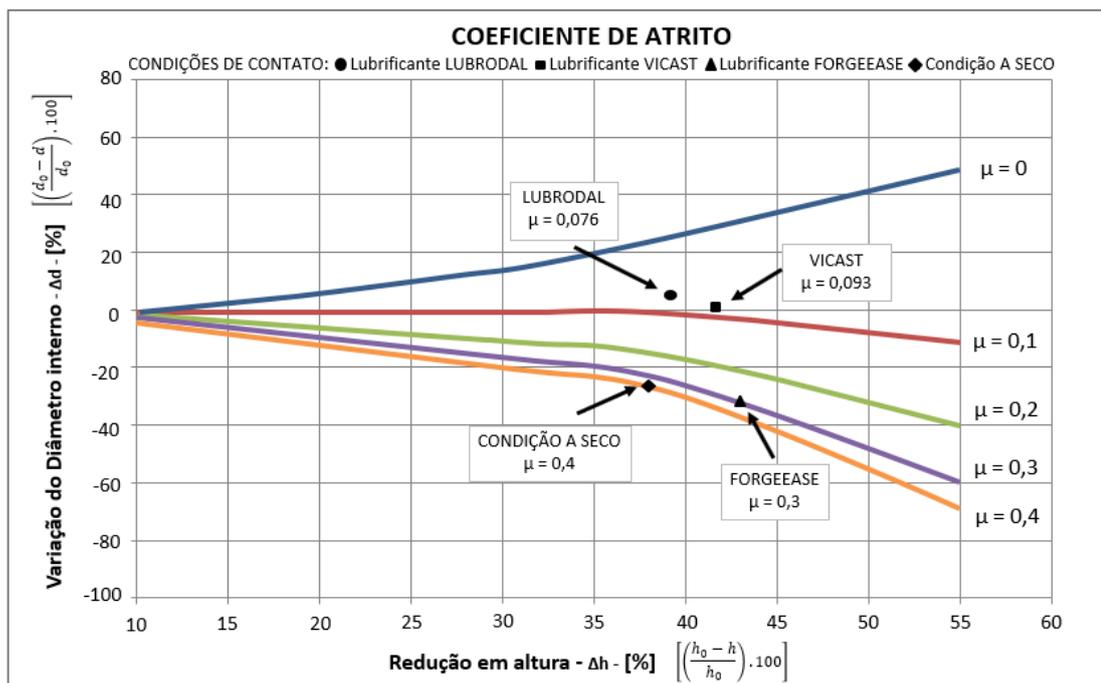


Figura 19 – Demonstrativo dos coeficientes de atrito ( $\mu$ ) para cada tipo de lubrificação

### 3.2 DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE ESCOAMENTO

Utilizando a liga de alumínio AA7075, foram confeccionados corpos de prova em formato cilíndrico com dimensões conforme mostra a Figura 20.

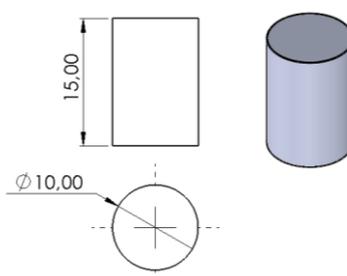


Figura 20 – Representação de corpo de prova utilizado no ensaio da tensão de escoamento, dimensões em milímetros

A quantidade de amostras foi suficiente para realizar três ensaios utilizando temperatura de conformação de 450°C.

A prensa utilizada para os ensaios é uma prensa hidráulica marca EKA modelo PKL40, com capacidade de 400 kN e velocidade de prensagem igual a 2 mm/s, apresentada na Figura 21.

Os dados de força durante o experimento foram medidos com a utilização de uma célula de carga com capacidade para 400 kN.

Já os dados de deslocamento da mesa superior foram obtidos utilizando um sensor de deslocamento do tipo LVDT. Os dados foram registrados em um sistema de aquisição de dados marca HBM, modelo Spider 8, ligado a um computador com o software Catman 4.0. O Catman 4.0 permite controlar a gravação e o pós processamento dos dados adquiridos.



Figura 21 – Prensa hidráulica marca EKA modelo PKL40

Para o processo de aquecimento foi utilizado o mesmo forno resistivo utilizado no ensaio do anel, fabricado pela empresa Sanchis com temperatura máxima ajustada em 450°C.

Os corpos de prova conformados foram medidos em duas direções: uma perpendicular à outra no diâmetro e de igual forma na altura para minimizar a possibilidade de erro.

Os ensaios realizados tiveram a intenção de simular o processo de aquecimento utilizado pela indústria que atualmente fabrica o componente analisado. Em função disso, a ferramenta “copo quente” utilizada no ensaio do anel, não foi utilizada nestes ensaios, de forma a possibilitar análise da variação da tensão de escoamento com a perda de temperatura.

A Figura 22 demonstra o comparativo entre a curva de escoamento resultante dos experimentos realizados e a curva utilizando os parâmetros descritos por HENSEL[26] na Tabela 3. A temperatura utilizada nesta análise foi de 450°C e a velocidade de deformação verdadeira média de 0,15s<sup>-1</sup>.

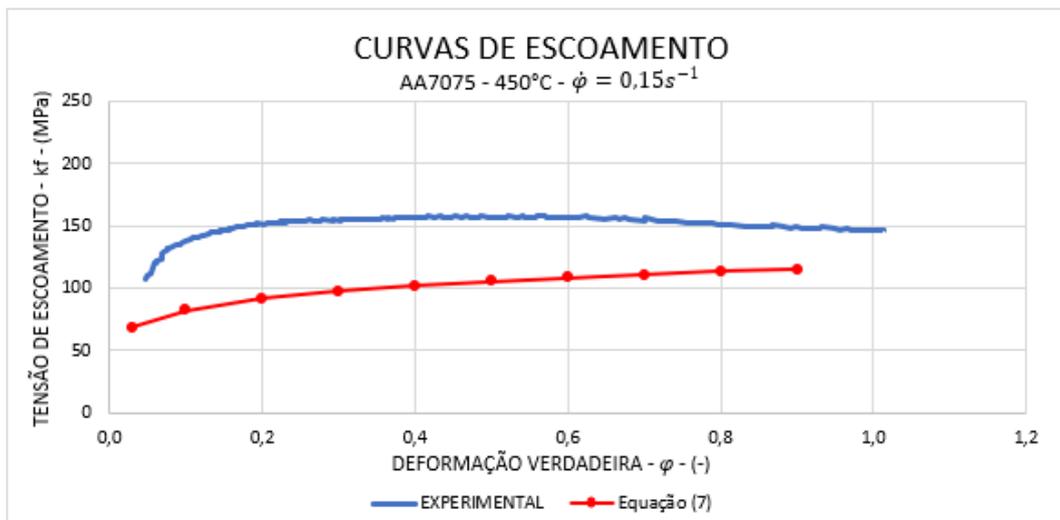


Figura 22 – Comparativo entre curvas de escoamento

Foi considerado aceitável a variação entre as curvas devido ao fato de que os experimentos não foram realizados com temperatura constante. Em função disso, a realização dos estudos para a estimativa de força e energia de compressão levaram em consideração a tensão de escoamento obtida pela Equação (7) e parâmetros da Tabela 3 [26].

## 4 ANÁLISE TEÓRICO/EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentadas as etapas desenvolvidas para a determinação da energia e força de forjamento de um componente utilizando a liga de alumínio AA7075-F.

### 4.1 GEOMETRIA DA PEÇA EM ESTUDO

Inicialmente definiu-se a geometria da peça conforme apresentada na Figura 23 que mostra a modelagem em 3D desenvolvida no *software* SolidWorks. A utilização deste sistema permitiu uma série de automatizações simplificadas com relação à modelagem da peça, da geratriz e das matrizes.

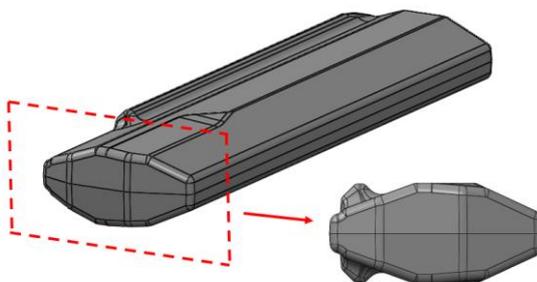


Figura 23 – Representação 3D da geometria da peça analisada

A peça analisada denominada “CAPA” foi desenvolvida em alumínio AA7075 que chega para o forjamento na sua condição de fabricação, (F), com volume final (sem rebarba) de 204735,20 mm<sup>3</sup>. A Figura 24 ilustra as principais medidas da peça analisada.

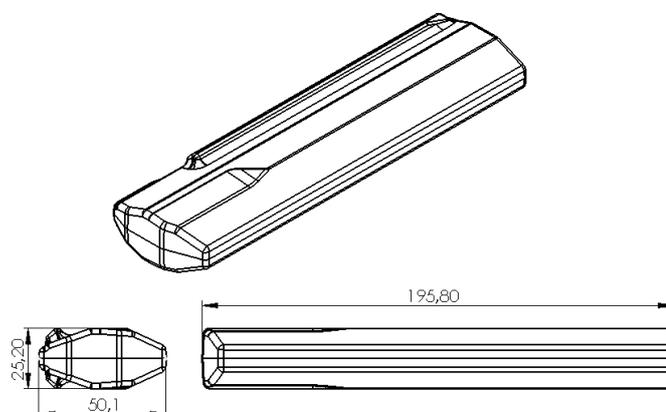


Figura 24 – Representação das principais cotas da peça, em milímetros.

A geratriz utilizada possui volume total de  $262570,6\text{mm}^3$ , sendo diâmetro de  $41,3\text{mm}$  e comprimento de  $196\text{mm}$ . A Figura 25 demonstra imagem da peça forjada com as principais medidas de largura das rebarbas.

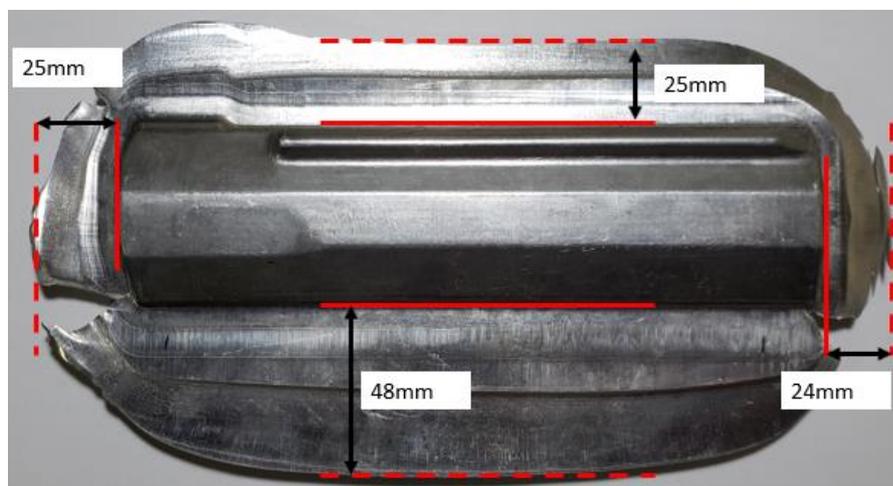


Figura 25 – Representação das principais medidas de largura das rebarbas, em milímetros.

## 4.2 PROCESSO DE FORJAMENTO

Inicialmente a geratriz é aquecida em forno resistivo de esteira, este equipamento não possui identificação de marca ou modelo. Seu princípio de funcionamento consiste basicamente em três zonas de aquecimento ao longo do seu comprimento, possibilitando ajustes de temperatura em cada zona e ajuste da velocidade da esteira.

No processo analisado, a geratriz é aquecida no forno na faixa de temperatura entre  $400$  e  $420^{\circ}\text{C}$ , sendo comprimida com as ferramentas aquecidas a  $150^{\circ}\text{C}$ . Devido ao aquecimento da ferramenta e aos múltiplos golpes do martelo para a total conformação da geratriz, foi considerado neste estudo temperatura da geratriz de  $450^{\circ}\text{C}$ .

A Figura 26 demonstra imagem do forno utilizado, ressaltando início e fim do processo de aquecimento.



Figura 26 – Forno resistivo utilizado para aquecimento da geratriz no processo.

Após aquecimento, o forjamento ocorre em máquina do tipo martelo de queda por gravidade da marca Lasco, modelo KGK250. Este equipamento possui massa do pilão de 2500kg, velocidade da ferramenta de 4m/s e vão máximo entre matrizes de 807mm. A Figura 27 demonstra o equipamento Martelo de queda utilizado.



Figura 27 – Equipamento Martelo de queda utilizado no processo de forjamento da peça em estudo.

O forjamento ocorre em um total de seis golpes do martelo, utilizando para isso matriz fechada de duas cavidades com massa de 560kg. A Figura 28 demonstra a ferramenta utilizada.

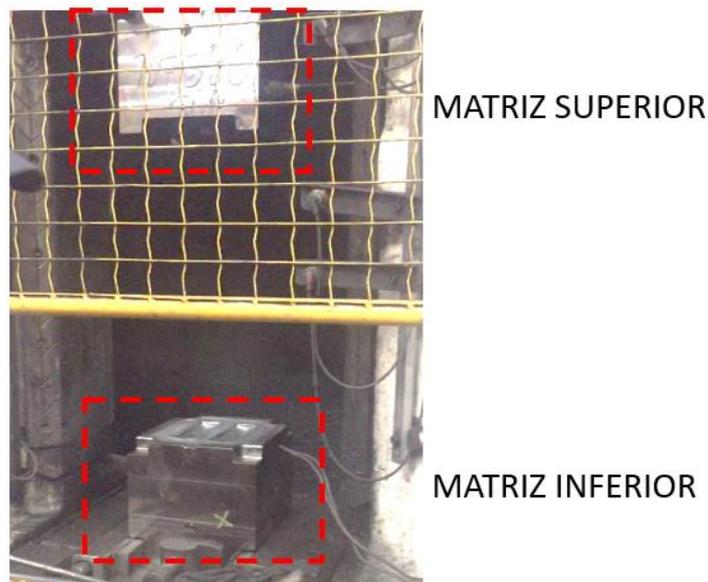


Figura 28 – Demonstração da ferramenta utilizada.

A matriz de forjamento possui duas cavidades conforme Figura 29, sendo a cavidade A responsável por gerar a “pré-forma” da peça forjada e a cavidade B o acabamento, onde a peça adquire sua forma final.

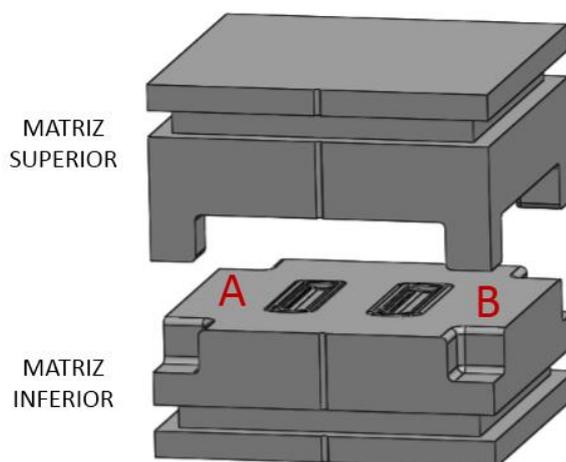


Figura 29 – Representação 3D da matriz de forjamento, (A) cavidade de pré-forma e (B) cavidade de acabamento

#### 4.3 DETERMINAÇÃO DE FORÇA E ENERGIA DE FORJAMENTO

Aplicando-se a Equação (8), foi possível determinar a energia total realizada pelo martelo. Abaixo exemplificado os cálculos para o primeiro golpe do martelo.

$$W = M \cdot g \cdot h \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

$$M = 3060 \text{ kg}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$h = 0,792 \text{ m}$$

$$W = 3060 \cdot 9,8 \cdot 0,792$$

Adicionalmente, foi considerada a eficiência do golpe (ou eficiência mecânica) do martelo  $\eta$  através do produto da eficiência energética devida às perdas por atrito nas corredeiras  $\eta_a = 0,5$  pela eficiência energética derivada das perdas de energia para as fundações e para o solo,  $\eta_{ch\tilde{a}o} = 0,8$  podendo assim, com a Equação (9) determinar a energia útil efetuada pelo martelo.

Para os três primeiros golpes do martelo de queda, foi considerado eficiência  $\eta = 0,8$  e para os três últimos golpes, considerado  $\eta = 0,4$

$$\eta = \frac{W_u}{W} \quad \text{Eq. (9)}$$

$$W_u = 23,7 \cdot 0,8$$

Para o processo de análise da força aplicada, foi feita estimativa de deformação para cada golpe efetuado na geratriz. A Figura 30 demonstra a posição da sequência de golpes nas matrizes, sendo 0 a representação da geratriz, 1 o dimensional após o primeiro golpe, 2 o dimensional após o segundo golpe e assim sucessivamente. A Tabela 6 demonstra as principais medidas após cada golpe, conforme Figura 31.

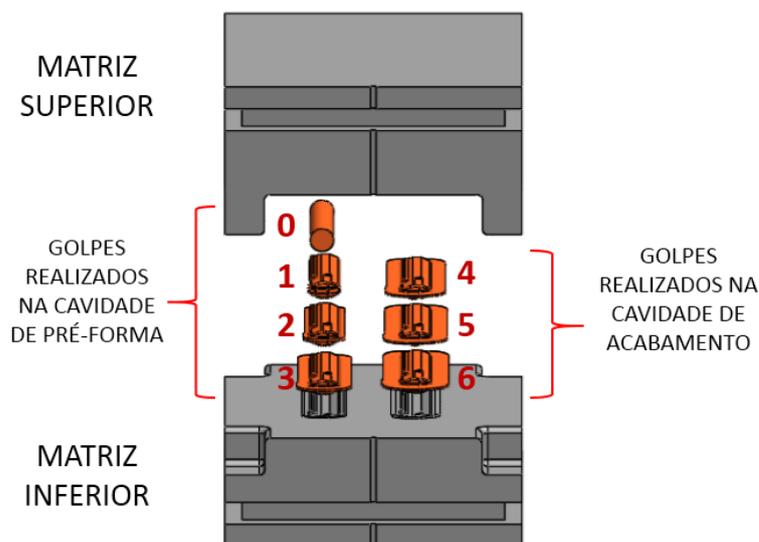


Figura 30 – Representação dos golpes nas cavidades da matriz

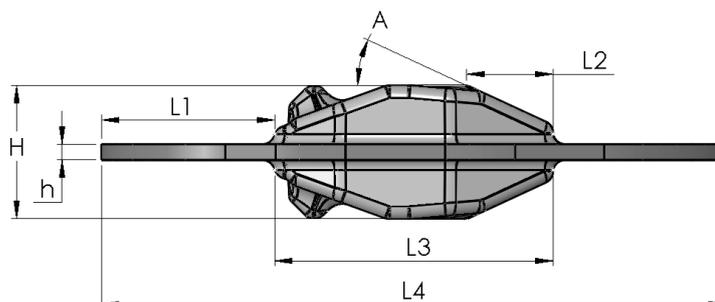


Figura 31 – Representação das principais medidas demonstradas na Tabela 6

Tabela 6 – Dimensões da peça após cada golpe do martelo.

GOLPE DO MARTELO		H	h	A	L1	L2	L3	L4	Deslocamento da ferramenta (s)
		(mm)	(mm)	(°)	(mm)				(mm)
	0	41,3	-	-	-	-	-	-	-
	1	30,2	8	24,9	2	18,2	50,1	54,3	11,1
	2	28	5,8		10			70,3	2,22
	3	26,2	4		21,4			93,0	1,78
	4	25,7	3,5		26,2			102,8	0,5
	5	25,4	3,2		29,8			109,9	0,3
	6	25,2	3		32,4			115,2	0,2

Com a análise das deformações demonstradas na Tabela 6 e as características da máquina utilizada para o forjamento, foi possível determinar através da Equação(10), a força desenvolvida pelo equipamento em cada golpe.

$$W_u \cong \frac{F}{3} + F s = \frac{4Fs}{6} \quad \text{Eq. (10)}$$

O cálculo de força utilizando a Equação (10), já considera a perda de eficiência vinculada ao equipamento pois utiliza relação com a energia útil disponível  $W_u$ . Desta forma, neste caso, é possível considerar  $F = F_u$ .

## 5 MÉTODOS DE CÁLCULO

A partir dos resultados Teórico/Experimentais da energia e força de forjamento, utilizando os parâmetros do processo atual de fabricação do componente analisado, foram aplicados diferentes métodos para a determinação da força e energia de forjamento, sendo o Método da Energia Uniforme, Método simplificado, Método das Tiras (TEP) e o Método de Elementos Finitos (FEM).

Para a realização das análises através do Método de Elementos Finitos (FEM), foi utilizado o software de simulação FORGE®, onde foram realizadas as análises posteriores.

Para efeito comparativo, com exceção do Método de Elementos Finitos, cada método analisado neste estudo sofreu ajustes de eficiência, sendo considerado para os três primeiros golpes  $\eta = 0,8$  e três últimos golpes  $\eta = 0,4$ .

Para a aplicação dos métodos de cálculo, foi considerado aquecimento da geratriz na temperatura de 450°C.

### 5.1 MÉTODO DA ENERGIA UNIFORME

A aplicação do Método da Energia Uniforme foi realizada considerando o resultado de cada golpe do martelo como geratriz para o golpe subsequente, de acordo com as etapas a seguir:

a. Determinação da área projetada:

O Método da Energia Uniforme é baseado na área projetada da peça forjada, considerando a rebarba. A literatura indica que esta metodologia exige a escolha de uma forma geométrica elementar (quadrado, esfera, prisma, etc.), equivalente para a determinação da área projetada.

Considerando a deformação realizada pelo primeiro golpe do martelo, a Figura 32 representa a área projetada da peça utilizando o software SolidWorks.

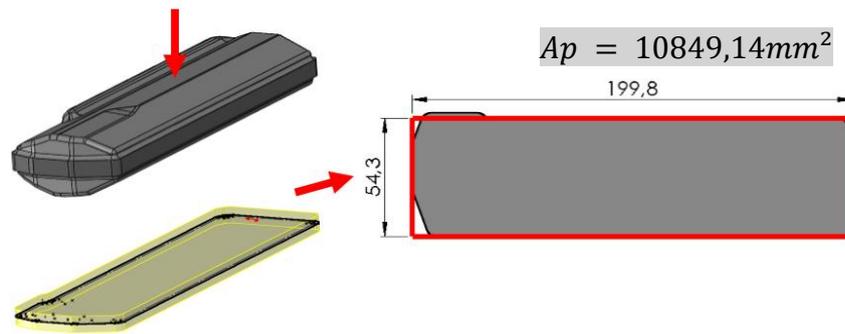


Figura 32 – representação 3D da área projetada, em milímetros

- b. Determinação da altura média através da Equação (11).

$$h_m = \frac{V}{A_P} \quad \text{Eq. (11)}$$

Sendo:

$$V = 262570,6 \text{ mm}^3$$

$$A_{pr} = 10849,14 \text{ mm}^2$$

$$h_m = \frac{262570,6}{10849,14} \quad h_m = 24,2 \text{ mm}$$

- c. Cálculo da deformação verdadeira média através da Equação (12).

$$\varphi_m = \ln \frac{h_0}{h_m} \quad \text{Eq. (12)}$$

Sendo:

$$h_0 = 41,3 \text{ mm}$$

$$\varphi_m = \ln \frac{41,3}{24,2} \quad \varphi_m = 0,53$$

- d. Determinação da velocidade de deformação média, através da Equação (13).

$$\dot{\varphi}_m = \frac{V_f}{h_m} \quad \text{Eq. (13)}$$

Sendo:

$$V_f = 4 \text{ m/s}$$

$$\dot{\varphi}_m = \frac{4000}{24,2} \quad \dot{\varphi}_m = 165,3 \text{ s}^{-1}$$

- e. Determinação da tensão de escoamento, através da Equação (7) e Tabela 3

$$k_f = kf_0 \cdot A_1 \cdot e^{-m_1 \cdot T} \cdot A_2 \cdot \varphi^{m_2} \cdot A_3 \cdot \dot{\varphi}^{m_3} \quad \text{Eq. (7)}$$

$$k_f = 169,7 \cdot 6,504 \cdot e^{-0,00468 \cdot 450} \cdot 1,425 \cdot 0,53^{0,154} \cdot 0,764 \cdot 165,3^{0,117}$$

$$k_{f_m} = 241,4 \text{ MPa}$$

- f. Determinação da força de forjamento, através da Equação (14).

$$F = k_{f_m} \cdot A_p \cdot Q_p \quad \text{Eq. (14)}$$

Onde:

$$Q_p = 4$$

$$F = 241,4 \cdot 10849,14 \cdot 4$$

- g. Determinação da energia necessária para o forjamento de cada forma gerada pelos golpes do martelo de queda, através da Equação (15).

$$W = \sigma_{unif} \cdot \varphi_m \cdot V \cdot Q_e \quad \text{Eq. (15)}$$

Onde:

$$\sigma_{unif} = \int_0^{\varphi} k_f \cdot d\varphi$$

$$Q_e = 2$$

$$W = \frac{241,4 \cdot 0,53^{0,154}}{1,154} \cdot 0,53 \cdot 262570,6 \cdot 2$$

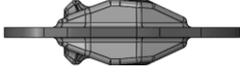
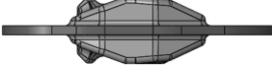
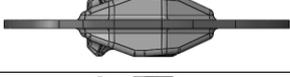
$$W = \frac{241,4 \cdot 0,53^{0,154}}{1,154} \cdot 0,53 \cdot 262570,6 \cdot 2$$

- h. Considerando a indicação de eficiência  $\eta$  do equipamento de 0,8 para os três primeiros golpes e 0,4 para os três últimos golpes do martelo de queda, foi possível determinar através da Equação (9) a energia útil disponível e através da Equação (17) a força útil disponível para cada golpe. A Tabela 7 demonstra os valores utilizados nos cálculos, para cada golpe do martelo.

$$\eta = \frac{W_u}{W} \quad \text{Eq. (9)}$$

$$\eta = \frac{F_u}{F} \quad \text{Eq. (17)}$$

Tabela 7 – Representação dos valores utilizados em cada golpe do martelo, através do Método da Energia Uniforme.

GOLPE DO MARTELO		$A_{pr}$	$h_m$	$\varphi_m$	$\dot{\varphi}_m$	$k_{f_m}$
		( $mm^2$ )	( $mm$ )	( $-$ )	( $s^{-1}$ )	( $MPa$ )
	1	10849,1	24,2	0,53	165,3	241,4
	2	15162,1	17,3	0,55	231	252,6
	3	22204,1	11,8	0,86	338,3	282,6
	4	25515,3	10,3	0,93	388,7	290,8
	5	28058,2	9,3	1,01	427,4	297,6
	6	30022,2	8,8	1,06	457,4	302,5

## 5.2 MÉTODO DA TIRAS (TEP)

Conforme mencionado no Capítulo 2, o método utilizado para desenvolvimento do procedimento matemático baseado na Teoria Elementar da Plasticidade é o Método das Tiras, visto que este é o mais adequado ao forjamento deste componente por tratar-se de uma geometria plana em matriz fechada.

Para a aplicação deste método, é necessário que a peça em análise possua simetria plana. Em função disso, foram necessárias algumas adaptações no perfil analisado, respeitando os principais ângulos e alturas descritos na Tabela 6.

A Figura 33 demonstra comparativo entre a forma original e as adaptações realizadas para a aplicação do Método da Tiras.

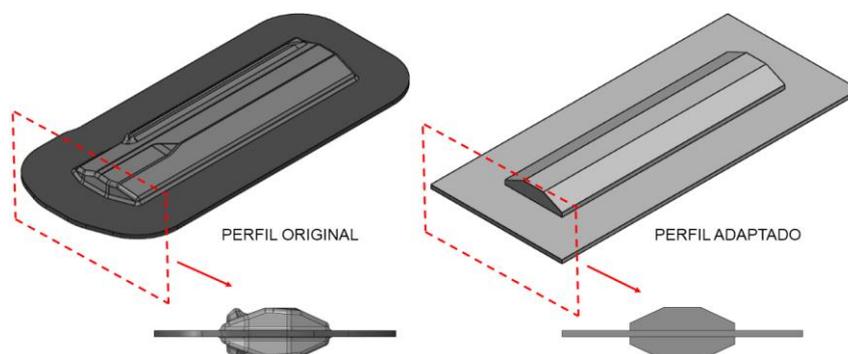


Figura 33 – Comparativo entre perfil original e perfil adaptado para aplicação do Método das Tiras

Para avaliar as tensões atuantes e, conseqüentemente, a força de forjamento, foram analisadas separadamente as geometrias resultantes após cada golpe do martelo, sendo cada golpe considerado como uma nova geometria de análise, se tornando referência dimensional para o golpe subsequente.

Cada geometria resultante foi dividida em três seções (cortes), sendo estas representadas na Figura 34 e Tabela 8.

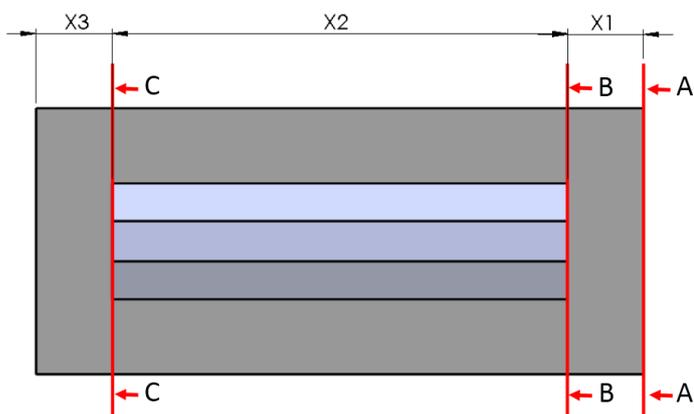


Figura 34 – Representação das seções (A-A; B-B e C-C).

Tabela 8 – Posicionamento das seções, conforme Figura 34.

GOLPE DO MARTELO		X1	X2	X3
		(mm)	(mm)	(mm)
	1	2,08	195,65	2,08
	2	10,1		10,1
	3	21,5		21,5
	4	26,4		26,4
	5	29,9		29,9
	6	32,5		32,5

Foram analisadas separadamente cada perfil, seção e tira conforme descrito no capítulo 2. A Figura 35 demonstra a divisão de tiras realizada nas três seções do perfil

gerado após o primeiro golpe do martelo, e os valores obtidos através da aplicação do método são demonstrados na Tabela 9 e na Tabela 10.

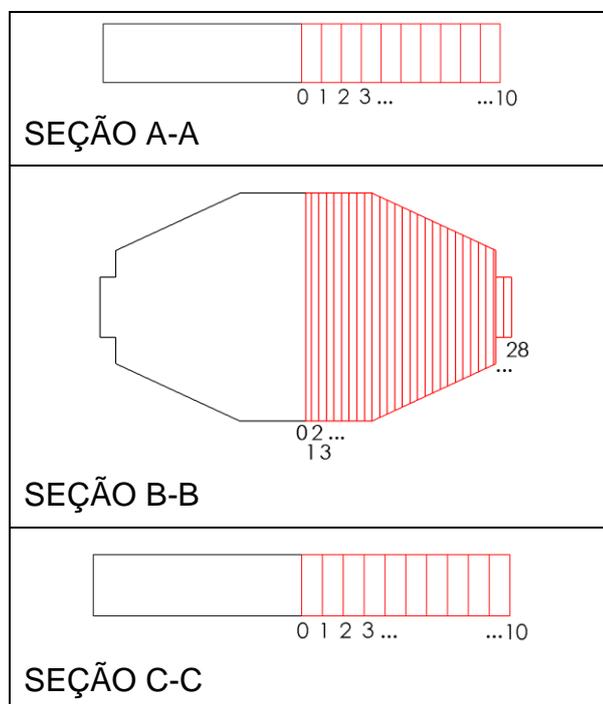


Figura 35 – Representação das tiras nas seções do perfil originado após o primeiro golpe do martelo

A Tabela 9 mostra os valores utilizados na aplicação do método na análise das seções A-A e C-C, (Figura 35).

Tabela 9 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o primeiro golpe.

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$\alpha_i$	$\alpha_i$	$\rho$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma_{x_i}$	$\Delta\sigma_{x_i}$	$\sigma_{z_i}$	$\sigma_{z_i(média)}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$	
$i$	[mm]	[mm]	[°]	[rad]	[rad]	[mm]	[-]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]	
0	0	0	0	0	0,09	8	1,64	500	326,6	-275,5	0,0	-602,2	-	-	-	0	
1	2,7	2,7	0	0	0,09	8	1,64	500	326,6	-239,8	-35,7	-566,4	-584,3	5,4	-3,2	19207	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	27,1	2,7	0	0	0,09	8	1,64	500	326,6	0,0	-20,6	-326,6	-336,9	5,4	-1,8	19207	
															Força Total [kN]		24
															Energia Total [N.m]		192

A Tabela 10 mostra os valores utilizados na aplicação do método na análise da seção B-B, (Figura 35).

Tabela 10 - Análise da seção B-B na forma obtida após o primeiro golpe.

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$\alpha_i$	$\alpha_i$	$\rho$	$A_i$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\Delta\sigma x_i$	$\sigma_{zi}$	$\sigma_{zi(média)}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[°]	[rad]	[rad]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[-]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	0	0	0,09	5908,62	30,0	0,32	133,1	217,3	0,0	-516,5	-	-	-	0
1	0,7	0,7	0	0	0,09	5908,62	30,0	0,32	133,1	217,3	-2,2	-514,3	-515,4	137,66	-70,9	275484
2	1,7	1,0	0	0	0,09	5908,62	30,0	0,32	133,1	217,3	-3,2	-511,1	-512,7	196,65	-100,8	393548
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	8,7	1,0	0	0	0,09	5908,62	30,0	0,32	133,1	217,3	-3,0	-489,5	-491,0	196,65	-96,6	393548
10	9,7	1,0	25	0,44	0,09	5729,34	29,1	0,35	137,3	221,2	-11,0	-482,4	-486,0	196,65	-95,6	424570
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	24,7	1,0	25	0,44	0,09	2362,46	12,0	1,23	333,0	298,1	-29,3	-315,9	-319,5	196,65	-62,8	752662
26	25,1	0,4	0	0	0,09	2361,80	12,0	1,24	333,1	298,1	-1,7	-314,2	-315,1	68,828	-21,7	263427
27	26,1	1,0	0	0	0,09	1565,20	8,0	1,65	502,6	327,0	-8,1	-334,9	-324,6	204,52	-66,4	722841
28	27,1	1,0	0	0	0,09	1565,20	8,0	1,65	502,6	327,0	-7,9	-327,0	-331,0	204,52	-67,7	722841
															Força Total [kN]	2327
															Energia Total [N.m]	14942

A Figura 36 demonstra a divisão de tiras realizada nas três seções do perfil gerado após o segundo golpe do martelo, e os valores obtidos através da aplicação do método são demonstrados na Tabela 11 e na Tabela 12.

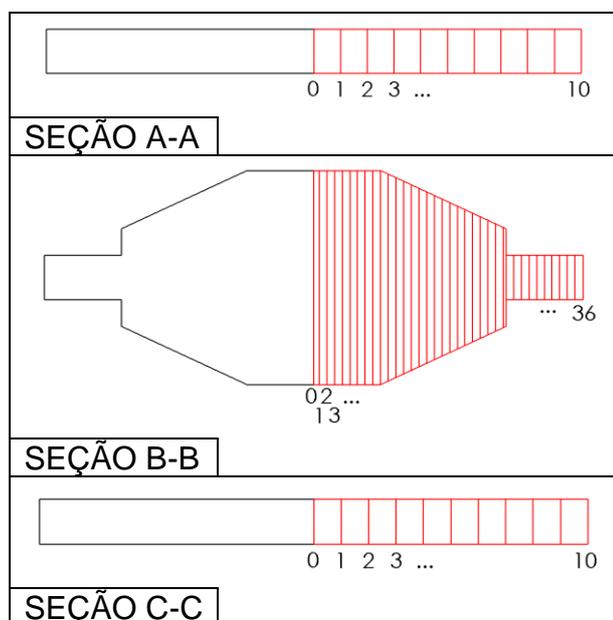


Figura 36 – Representação das tiras nas seções do perfil originado após o segundo golpe do martelo

A Tabela 11 mostra os valores utilizados na aplicação do método na análise das seções A-A e C-C, (Figura 36).

Tabela 11 - Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o segundo golpe.

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$\alpha_i$	$\alpha_i$	$\rho$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma_{X_i}$	$\Delta\sigma_{X_i}$	$\sigma_{z_i}$	$\sigma_{z_i(média)}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[°]	[rad]	[rad]	[mm]	[-]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0	0	0	0	0,09	5,28	1,74	757,6	346,1	-765,5	0,0	-1111,6	-	-	-	0
1	3,5	3,5	0	0	0,09	5,28	1,74	757,6	346,1	-643,0	-122,4	-989,2	-1050,4	35,4	-37,2	91982
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	35,1	3,5	0	0	0,09	5,28	1,74	757,6	346,1	0,0	-42,8	-346,1	-367,5	35,4	-13,0	91982
															Força Total [kN]	232
															Energia Total [N.m]	920

A Tabela 12 mostra os valores utilizados na aplicação do método na análise da seção B-B, (Figura 36).

Tabela 12 – Análise da seção B-B na forma obtida após o segundo golpe.

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$\alpha_i$	$\alpha_i$	$\rho$	$A_i$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma_{X_i}$	$\Delta\sigma_{X_i}$	$\sigma_{z_i}$	$\sigma_{z_i(média)}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[°]	[rad]	[rad]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[-]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	0	0	0,09	5478,2	27,9	0,1	143,6	177,5	-471,5	0,0	-649,0	-	-	-	0
1	0,7	0,7	0	0	0,09	5478,2	27,9	0,1	143,6	177,5	-468,5	-3,0	-646,0	-647,5	137,66	-89,1	54441
2	1,7	1,0	0	0	0,09	5478,2	27,9	0,1	143,6	177,5	-464,2	-4,3	-641,7	-643,8	196,65	-126,6	77773
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	8,7	1,0	0	0	0,09	5478,2	27,9	0,1	143,6	177,5	-435,0	-4,1	-612,5	-614,5	196,65	-120,8	77773
10	9,7	1,0	24,95	0,44	0,09	5298,9	26,9	0,1	148,4	187,9	-423,1	-11,9	-611,1	-611,8	196,65	-120,3	112029
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	24,7	1,0	24,95	0,44	0,09	1932,0	9,8	1,1	407,1	300,8	-130,9	-38,9	-431,6	-436,8	196,65	-85,9	572206
26	25,1	0,35	0	0	0,09	1931,4	9,8	1,1	407,3	300,8	-128,0	-2,8	-428,8	-430,2	68,828	-29,6	200274
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	35,1	1,1	0	0	0,09	1134,8	5,8	1,7	693,2	339,8	0,0	-11,8	-339,8	-345,7	212,38	-73,4	567905
															Força Total [kN]	3621	
															Energia Total [N.m]	11832	

A Figura 37 demonstra a divisão de tiras realizada nas três seções do perfil gerado após o terceiro golpe do martelo, e os valores obtidos através da aplicação do método são demonstrados na Tabela 13 e na Tabela 14.

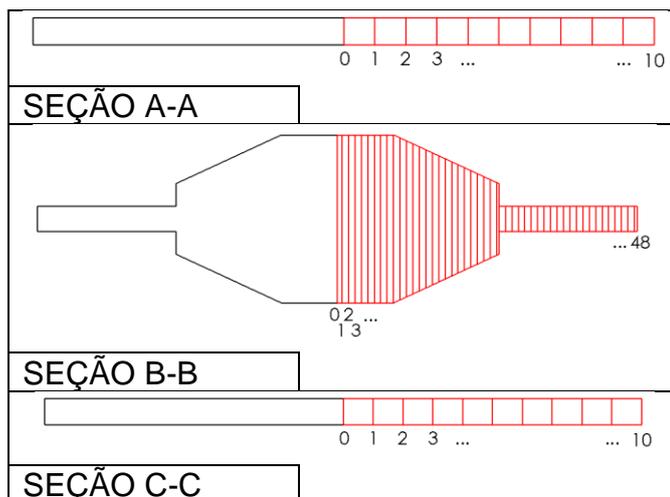


Figura 37 - Representação das tiras nas seções do perfil originado após o terceiro golpe do martelo

A Tabela 13 mostra os valores utilizados na aplicação do método na análise das seções A-A e C-C, (Figura 37).

Tabela 13 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o terceiro golpe

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$\alpha_i$	$\alpha_i$	$\rho$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma x_i$	$\Delta \sigma x_i$	$\sigma_{zi}$	$\sigma_{zi(média)}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[°]	[rad]	[rad]	[mm]	[-]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0	0	0	0	0,09	4	1,95	1000	363,6	-2214,5	0,0	-2578,2	-	-	-	0
1	4,7	4,7	0	0	0,09	4	1,95	1000	363,6	-1755,9	-458,6	-2119,6	-2348,9	97,597	-229,2	219995
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	46,5	4,7	0	0	0,09	4	1,95	1000	363,6	0,0	-78,7	-363,6	-403,0	97,597	-39,3	219995
Força Total [kN]															<b>1107</b>	
Energia Total [N.m]															<b>2200</b>	

A Tabela 14 mostra os valores utilizados na aplicação do método na análise da seção B-B, (Figura 37).

Tabela 14 – Análise da seção B-B na forma obtida após o terceiro golpe

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$\alpha_i$	$\alpha_i$	$\rho$	$A_i$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma x_i$	$\Delta \sigma x_i$	$\sigma_{zi}$	$\sigma_{zi(média)}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[°]	[rad]	[rad]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[-]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	0	0	0,09	5126,02	26,1	0,07	153,5	175,6	-1172,0	0,0	-1347,5	-	-	-	0
1	0,7	0,7	0	0	0,09	5126,02	26,1	0,07	153,5	175,6	-1165,3	-6,7	-1340,9	-1344,2	137,66	-185,0	44703
2	1,7	1,0	0	0	0,09	5126,02	26,1	0,07	153,5	175,6	-1155,8	-9,5	-1331,4	-1336,1	196,65	-262,7	63861
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	8,7	1,0	0	0	0,09	5126,02	26,1	0,07	153,5	175,6	-1091,1	-9,0	-1266,7	-1271,2	196,65	-250,0	63861
10	9,7	1,0	25	0,44	0,09	4946,74	25,2	0,11	159,0	187,6	-1072,3	-18,8	-1260,0	-1263,3	196,65	-248,4	98216
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	24,7	1,0	25	0,44	0,09	1579,86	8,0	1,25	497,9	313,0	-614,7	-63,6	-927,7	-943,0	196,65	-185,4	533502
26	25,1	0,4	0	0	0,09	1579,20	8,0	1,25	498,1	313,0	-607,3	-7,5	-920,3	-924,0	68,828	-63,6	186720
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
47	46,1	1,0	0	0	0,09	782,60	4,0	1,95	1005,1	364,0	-8,2	-17,4	-372,2	-380,9	196,65	-74,9	442353
48	46,53	0,5	0	0	0,09	782,60	4,0	1,95	1005,1	364,0	0,0	-8,2	-364,0	-368,1	94,392	-34,7	212329
Força Total [kN]															<b>8501</b>		
Energia Total [N.m]															<b>15646</b>		

A Figura 38 demonstra a divisão de tiras realizada nas três seções do perfil gerado após o quarto golpe do martelo, e os valores obtidos através da aplicação do método são demonstrados na Tabela 15 e na Tabela 16.

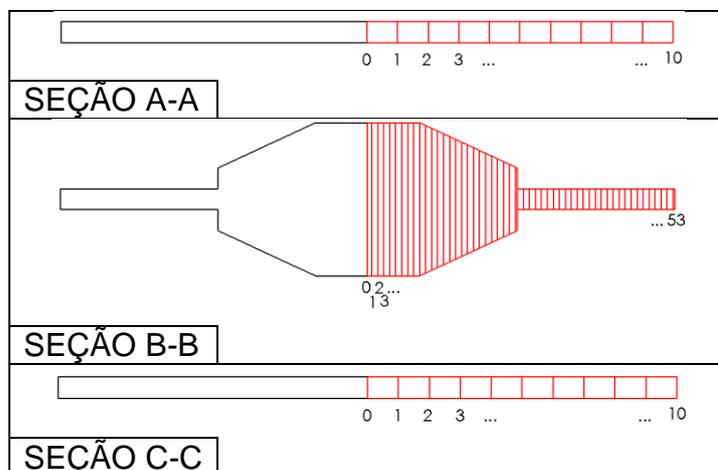


Figura 38 – Representação das tiras nas seções do perfil originado após o quarto golpe do martelo

A Tabela 15 mostra os valores utilizados na aplicação do método na análise das seções A-A e C-C, (Figura 38).

Tabela 15 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o quarto golpe

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$\alpha_i$	$\alpha_i$	$\rho$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma x_i$	$\Delta \sigma x_i$	$\sigma_{zi}$	$\sigma_{zi(média)}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[°]	[rad]	[rad]	[mm]	[-]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0	0	0	0	0,09	3,5	2,01	1142,9	371,3	-3779,9	0,0	-4151,2	-	-	-	0
1	5,1	5,1	0	0	0,09	3,5	2,01	1142,9	371,3	-2889,5	-890,4	-3260,8	-3706,0	132,66	-491,6	274220
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	51,4	5,1	0	0	0,09	3,5	2,01	1142,9	371,3	0,0	-101,4	-371,3	-422,0	132,66	-56,0	274220
Força Total [kN]															2087	
Energia Total [N.m]															2742	

A Tabela 16 mostra os valores utilizados na aplicação do método na análise da seção B-B, (Figura 38).

Tabela 16 – Análise da seção B-B na forma obtida após o quarto golpe

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$\alpha_i$	$\alpha_i$	$\rho$	$A_i$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma x_i$	$\Delta \sigma x_i$	$\sigma_{zi}$	$\sigma_{zi(média)}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[°]	[rad]	[rad]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[-]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	0	0	0,09	5028,2	25,6	0,02	156,4	149,09	-1847,5	0,0	-1996,6	-	-	-	0
1	0,7	0,7	0	0	0,09	5028,2	25,6	0,02	156,4	149,09	-1837,4	-10,1	-1986,5	-1991,6	137,7	-274,1	12751
2	1,7	1,0	0	0	0,09	5028,2	25,6	0,02	156,4	149,09	-1823,1	-14,3	-1972,1	-1979,3	196,7	-389,2	18216
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	8,7	1,0	0	0	0,09	5028,2	25,6	0,02	156,4	149,09	-1725,5	-13,6	-1874,6	-1881,4	196,7	-370,0	18216
10	9,7	1,0	24,95	0,44	0,09	4848,9	24,7	0,06	162,2	172,31	-1701,0	-24,5	-1873,3	-1874,0	196,7	-368,5	50336
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	24,7	1,0	24,95	0,44	0,09	1482,0	7,5	1,25	530,8	315,26	-1103,8	-83,5	-1419,0	-1443,1	196,7	-283,8	503197
26	25,1	0,35	0	0	0,09	1481,4	7,5	1,25	531,0	315,29	-1091,6	-12,2	-1406,9	-1413,0	68,8	-97,2	176113
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	51,1	1,0	0	0	0,09	684,8	3,5	2,02	1148,7	371,66	-6,6	-20,2	-378,2	-388,3	196,7	-76,4	405599
53	51,4	0,3	0	0	0,09	684,8	3,5	2,02	1148,7	371,66	0,0	-6,6	-371,7	-374,9	64,9	-24,3	133848
Força Total [kN]															12923		
Energia Total [N.m]															15747		

A Figura 39 demonstra a divisão de tiras realizada nas três seções do perfil gerado após o quinto golpe do martelo, e os valores obtidos através da aplicação do método são demonstrados na Tabela 17 e na Tabela 18.

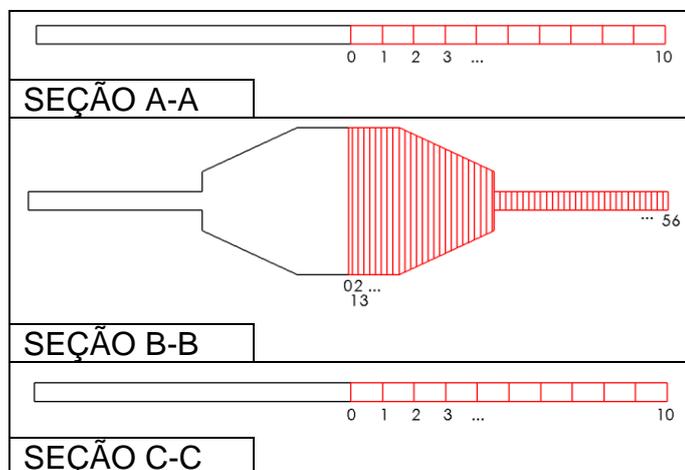


Figura 39 – Representação das tiras nas seções do perfil originado após o quinto golpe do martelo

A Tabela 17 mostra os valores utilizados na aplicação do método na análise das seções A-A e C-C, (Figura 39).

Tabela 17 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o quinto golpe

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$\alpha_i$	$\alpha_i$	$\rho$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma x_i$	$\Delta \sigma x_i$	$\sigma_{z_i}$	$\sigma_{z_i}(\text{média})$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[°]	[rad]	[rad]	[mm]	[-]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	0	0	0,1	3,2	2,1	1250,0	377,2	-5647,6	0,0	-6024,8	-	-	-	0
1	5,5	5,5	0	0	0,1	3,2	2,1	1250,0	377,2	-4189,6	-1458,1	-4566,8	-5295,8	161,3	-854,4	317935
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	54,9	5,5	0	0	0,1	3,2	2,1	1250,0	377,2	0,0	-120,4	-377,2	-437,4	161,3	-70,6	317935
Força Total [kN]															3309	
Energia Total [N.m]															3179	

A Tabela 18 mostra os valores utilizados na aplicação do método na análise da seção B-B, (Figura 39).

Tabela 18 – Análise da seção B-B na forma obtida após o quinto golpe

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$\alpha_i$	$\alpha_i$	$\rho$	$A_i$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma x_i$	$\Delta \sigma x_i$	$\sigma_{z_i}$	$\sigma_{z_i}(\text{média})$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[°]	[rad]	[rad]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[-]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,09	4969,50	25,27	0,02	158,29	141,04	-2674,1	0,0	-2815,2	-	-	-	0
1	0,7	0,7	0,00	0,00	0,09	4969,50	25,27	0,02	158,29	141,04	-2659,7	-14,4	-2800,7	-2807,95	137,66	-386,5	8247
2	1,7	1,0	0,00	0,00	0,09	4969,50	25,27	0,02	158,29	141,04	-2639,2	-20,5	-2780,3	-2790,51	196,65	-548,8	11781
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	24,7	1,0	24,95	0,44	0,09	1423,34	7,24	1,27	552,64	317,58	-1700,5	-106,8	-2018,1	-2053,27	196,65	-403,8	493855
26	25,1	0,4	0,00	0,00	0,09	1422,68	7,23	1,27	552,90	317,61	-1682,5	-18,0	-2000,1	-2009,07	68,83	-138,3	172842
27	26,1	1,0	0,00	0,00	0,09	626,08	3,18	2,09	1256,39	377,57	-1568,8	-113,7	-1946,3	-1973,21	196,65	-388,0	386660
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	54,1	1,0	0,00	0,00	0,09	626,08	3,18	2,09	1256,39	377,57	-19,4	-23,2	-397,0	-408,58	196,65	-80,3	386660
56	54,9	0,9	0,00	0,00	0,09	626,08	3,18	2,09	1256,39	377,57	0,0	-19,4	-377,6	-387,27	173,05	-67,0	340261
Força Total [kN]															18238		
Energia Total [N.m]															16450		

A Figura 40 demonstra a divisão de tiras realizada nas três seções do perfil gerado após o sexto golpe do martelo, e os valores obtidos através da aplicação do método são demonstrados na Tabela 19 e na Tabela 20.

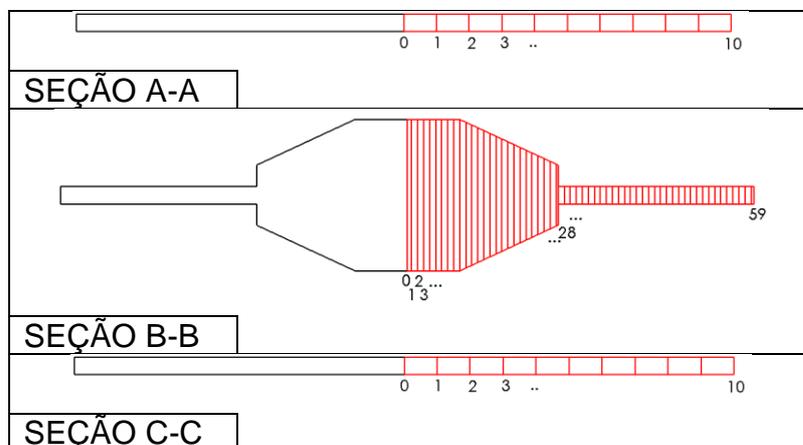


Figura 40 – Representação das tiras nas seções do perfil originado após o sexto golpe do martelo

A Tabela 19 mostra os valores utilizados na aplicação do método na análise das seções A-A e C-C, (Figura 40).

Tabela 19 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o sexto golpe

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$\alpha_i$	$\alpha_i$	$\rho$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma_{xi}$	$\Delta\sigma_{xi}$	$\sigma_{zi}$	$\sigma_{zi(média)}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[°]	[rad]	[rad]	[mm]	[-]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	0	0	0,09	3	2,14	1333,3	381,53	-7696,6	0,0	-8078,2	-	-	-	0
1	5,8	5,8	0	0	0,09	3	2,14	1333,3	381,53	-5571,4	-2125,2	-5953,0	-7015,6	184,4	-1293,5	351098
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	57,6	5,8	0	0	0,09	3	2,14	1333,3	381,53	0,0	-136,2	-381,5	-449,6	184,4	-82,9	351098
Força Total [kN]															4684	
Energia Total [N.m]															3511	

A Tabela 20 mostra os valores utilizados na aplicação do método na análise da seção B-B, (Figura 40).

Tabela 20 – Análise da seção B-B na forma obtida após o sexto golpe

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$\alpha_i$	$\alpha_i$	$\rho$	$A_i$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma_{xi}$	$\Delta\sigma_{xi}$	$\sigma_{zi}$	$\sigma_{zi(média)}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[°]	[rad]	[rad]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[-]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,09	4930,4	25,1	0,0	159,5	135,7	-3605,0	0,0	-3740,7	-	-	-	0
1	0,7	0,7	0,00	0,00	0,09	4930,4	25,1	0,0	159,5	135,7	-3585,7	-19,3	-3721,4	-3731,0	137,7	-513,6	6080
2	1,7	1,0	0,00	0,00	0,09	4930,4	25,1	0,0	159,5	135,7	-3558,3	-27,4	-3693,9	-3707,7	196,7	-729,1	8686
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	8,7	1,0	0,00	0,00	0,09	4930,4	25,1	0,0	159,5	135,7	-3372,0	-26,0	-3507,7	-3520,7	196,7	-692,3	8686
10	9,7	1,0	24,95	0,44	0,09	4751,1	24,2	0,1	165,6	167,7	-3331,3	-40,7	-3499,0	-3503,3	196,7	-688,9	39635
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	24,7	1,0	24,95	0,44	0,09	1384,2	7,0	1,3	568,3	319,2	-2372,9	-132,7	-2692,2	-2740,0	196,7	-538,8	488012
26	25,1	0,4	0,00	0,00	0,09	1383,6	7,0	1,3	568,5	319,3	-2348,3	-24,7	-2667,5	-2679,9	68,8	-184,4	170796
27	26,1	1,0	0,00	0,00	0,09	587,0	3,0	2,1	1340,1	381,9	-2188,1	-160,2	-2570,0	-2618,8	196,7	-515,0	373602
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	57,1	1,0	0,00	0,00	0,09	587,0	3,0	2,1	1340,1	381,9	-12,6	-24,6	-394,5	-406,8	196,7	-80,0	373602
59	57,6	0,5	0,00	0,00	0,09	587,0	3,0	2,1	1340,1	381,9	0,0	-12,6	-381,9	-388,2	104,2	-40,5	198009
Força Total [kN]															24124		
Energia Total [N.m]															16964		

### 5.3 MÉTODO SIMPLIFICADO

Para a aplicação do Método Simplificado, assim como no Método das Tiras, é necessário que a peça em análise possua simetria. Em função disso, para a aplicação deste método foram necessárias as mesmas adaptações de perfil demonstradas na Figura 33.

Para determinar a força e a energia necessária para a conformação foram analisadas separadamente as geometrias resultantes após cada golpe do martelo, sendo cada golpe considerado como uma nova geometria de análise, se tornando referência dimensional para o golpe subsequente.

Cada geometria resultante foi dividida em três seções (A-A; B-B e C-C), já demonstradas no Método das Tiras, conforme Figura 34 e Tabela 8.

O que diferencia o Método Simplificado do Método das Tiras é a possibilidade de determinar a tensão que a ferramenta exerce sobre a peça através da Equação(25), sem a necessidade de resolver a Equação (18) descrita no Método das Tiras.

$$\sigma_z = k_f \cdot e^{\frac{2 \cdot \mu}{h} \cdot (\Delta x)} \quad \text{Eq. (25)}$$

Desta forma, cada geometria resultante dos golpes do martelo foi dividida em três seções conforme Figura 34 e cada seção foi dividida em tiras de acordo com a Figura 41 com dimensionais representados na Tabela 21.

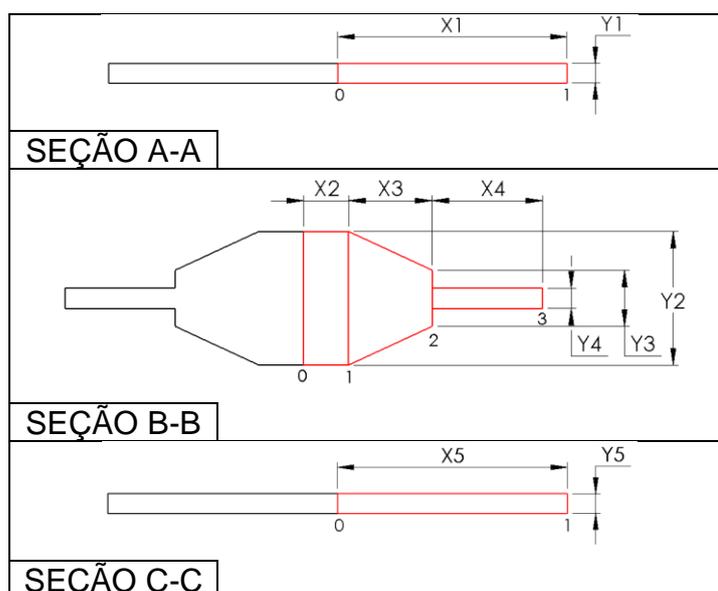


Figura 41 – Representação das tiras em cada seção.

Tabela 21 – Demonstração de cotas consideradas de acordo com o golpe do martelo, Figura 41.

GOLPE DO MARTELO		X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
		Medida em milímetros									
	1	27,1	8,7	16,3	2,1	27,1	8	30,2	15	8	8
	2	35,1			10,1	35,1	5,8	28	12,8	5,8	5,8
	3	46,5			21,5	46,5	4	26,2	11	4	4
	4	51,4			26,3	51,4	3,5	25,7	10,5	3,5	3,5
	5	54,9			29,9	54,9	3,2	25,4	10,2	3,2	3,2
	6	57,6			32,5	57,6	3	25,2	10	3	3

Cada tira foi analisada de acordo com as etapas descritas no item 2.3.3 possibilitando a determinação das forças e energias necessárias para a conformação de cada forma resultante dos seis golpes do martelo.

A Tabela 22 e a Tabela 23 apresentam os valores utilizados na aplicação do Método Simplificado, na geometria resultante do primeiro golpe do martelo de queda.

Tabela 22 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o primeiro golpe do martelo.

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma_{zi}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	8,0	1,6	500,0	326,6	326,6	-	-	0
1	27,1	27,1	8,0	1,6	500,0	326,6	613,8	54,3	33,3	94587,5
Força Total [kN]									33,3	
Energia Total [N.m]										95

Tabela 23 – Análise da seção B-B na forma obtida após o primeiro golpe do martelo

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$h$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma_{zi}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	30,2	0,3	132,5	216,6	216,6	-	-	0,0
1	8,7	8,7	30,2	0,3	132,5	216,6	228,6	1710,9	391,0	2196796,8
2	25,0	16,3	22,6	0,6	177,0	247,9	283,6	3213,3	911,3	5893435,1
3	27,1	2,1	8,0	1,6	500,0	326,6	342,8	409,0	140,2	713035,9
Força Total [kN]									1443	
Energia Total [N.m]										8803

A Tabela 24 e a Tabela 25 apresentam os valores utilizados na aplicação do Método Simplificado, na geometria resultante do segundo golpe do martelo de queda.

Tabela 24 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o segundo golpe do martelo.

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma_{zi}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[mm]	[ - ]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	5,8	1,6	689,7	339,4	339,4	-	-	0,0
1	35,1	35,1	5,8	1,6	689,7	339,4	1047,2	353,9	370,6	463862,4
Força Total [kN]									371	
Energia Total [N.m]										464

Tabela 25 – Análise da seção B-B na forma obtida após o segundo golpe do martelo

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma_{zi}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[mm]	[ - ]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[ N.mm]
0	0,0	0,0	28,0	0,1	142,9	175,6	175,6	-	-	0,0
1	8,7	8,7	28,0	0,1	142,9	175,6	186,1	1710,9	318,4	517822,6
2	25,0	16,3	20,4	0,4	196,1	234,8	272,5	3205,4	873,4	3583636,5
3	35,1	10,1	5,8	1,6	689,7	339,4	469,0	1982,2	929,6	2597888,2
Força Total [kN]									2121	
Energia Total [N.m]										6699

A Tabela 26 e a Tabela 27 apresentam os valores utilizados na aplicação do Método Simplificado, na geometria resultante do terceiro golpe do martelo de queda.

Tabela 26 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o terceiro golpe do martelo.

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma_{zi}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[mm]	[ - ]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	4,0	1,9	1000,0	363,6	363,6	-	-	0,0
1	46,5	46,5	4,0	1,9	1000,0	363,6	3164,7	976,0	3088,6	1045823,3
Força Total [kN]									3089	
Energia Total [N.m]										1046

Tabela 27 – Análise da seção B-B na forma obtida após o terceiro golpe do martelo

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma_{zi}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[mm]	[ - ]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	26,2	0,1	152,7	173,5	173,5	-	-	0,0
1	0,7	8,7	26,2	0,1	152,7	173,5	184,6	1710,9	315,7	429637,2
2	1,7	16,3	18,6	0,4	215,1	238,9	281,2	3205,4	901,4	3430612,7
3	2,7	21,5	4,0	1,9	1000,0	363,6	987,3	4224,0	4170,4	4526385,1
Força Total [kN]									5388	
Energia Total [N.m]										8387

A Tabela 28 e a Tabela 29 apresentam os valores utilizados na aplicação do Método Simplificado, na geometria resultante do quarto golpe do martelo de queda.

Tabela 28 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o quarto golpe do martelo.

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma_{zi}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[mm]	[ - ]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	3,5	2,0	1142,9	371,3	371,3	-	-	0,0
1	51,4	51,4	3,5	2,0	1142,9	371,3	5695,8	1326,6	7556,2	1294713,2
Força Total [kN]									7556	
Energia Total [N.m]										1295

Tabela 29 – Análise da seção B-B na forma obtida após o quarto golpe do martelo

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma_{zi}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[mm]	[ - ]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	25,7	0,0	155,6	143,7	143,7	-	-	0,0
1	8,7	8,7	25,7	0,0	155,6	143,7	153,1	1710,9	261,8	125149,0
2	25,0	16,3	18,1	0,4	221,0	236,0	279,0	3205,4	894,4	3042785,8
3	51,3	26,3	3,5	2,0	1142,9	371,3	1504,6	5177,8	7790,3	5053218,3
Força Total [kN]									8947	
Energia Total [N.m]										8221

A Tabela 30 e a Tabela 31 apresentam os valores utilizados na aplicação do Método Simplificado, na geometria resultante do quinto golpe do martelo de queda.

Tabela 30 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o quinto golpe do martelo.

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma_{zi}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[mm]	[ - ]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	3,2	2,1	1250,0	377,2	377,2	-	-	0,0
1	54,9	54,9	3,2	2,1	1250,0	377,2	9187,4	1613,3	14822,0	1491981,4
Força Total [kN]									14822	
Energia Total [N.m]										1492

Tabela 31 – Análise da seção B-B na forma obtida após o quinto golpe do martelo

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma_{zi}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[mm]	[ - ]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	25,4	0,01	157,5	133,3	133,3	-	-	0,0
1	8,7	8,7	25,4	0,01	157,5	133,3	142,1	1710,9	243,1	76037,2
2	25,0	16,3	17,8	0,4	224,7	236,2	280,1	3205,4	897,7	2977677,8
3	54,9	29,9	3,2	2,1	1250,0	377,2	2144,6	5879,8	12610,0	5437697,1
Força Total [kN]									13751	
Energia Total [N.m]										8491

A Tabela 32 e a Tabela 33 apresentam os valores utilizados na aplicação do Método Simplificado, na geometria resultante do sexto golpe do martelo de queda.

Tabela 32 – Análise das seções A-A e C-C na forma obtida após o sexto golpe do martelo.

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$h_i$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma_{zi}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[mm]	[ - ]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	3,0	2,1	1333,3	381,5	381,5	-	-	0,0
1	57,6	57,6	3,0	2,1	1333,3	381,5	13550,1	1843,7	24982,4	1640366,2
Força Total [kN]									24982	
Energia Total [N.m]										1640

Tabela 33 – Análise da seção B-B na forma obtida após o sexto golpe do martelo

TIRA	$X_i$	$\Delta X_i$	$h$	$\varphi_i$	$\dot{\varphi}_i$	$k_{fi}$	$\sigma_{zi}$	$\Delta A_i$	$F_i$	$W$
$i$	[mm]	[mm]	[mm]	[ - ]	[s <sup>-1</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N.mm]
0	0,0	0,0	25,2	0,01	158,7	125,6	125,6	-	-	0,0
1	8,7	8,7	25,2	0,01	158,7	125,6	133,9	1710,9	229,1	51127,4
2	25,0	16,3	17,6	0,37	227,3	236,5	280,9	3205,4	900,5	2944167,0
3	57,5	32,5	3,0	2,14	1333,3	381,5	2867,1	6397,0	18340,7	5691488,2
Força Total [kN]									19470	
Energia Total [N.m]									8687	

#### 5.4 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)

A simulação do processo de forjamento é utilizada para avaliar o preenchimento do molde e a fabricação de peças dentro das especificações. Além disso, também são analisados parâmetros envolvidos no processo, tais como: geometria da geratriz, geometria da matriz e dos canais de rebarba, força de forjamento, temperatura, atrito, entre outros. Através dos resultados apresentados pela simulação pôde-se verificar se a peça forjada será obtida livre de defeitos.

A análise utilizando o Método de Elementos Finitos foi realizada utilizando o software FORGE Nxt 3.0, sendo acrescentado dados referentes ao processo de forjamento e material analisado. Os parâmetros utilizados são de grande importância para um resultado confiável da simulação. A Figura 42 demonstra os dados utilizados para a construção da simulação utilizando o programa.

Nesta etapa preliminar, são definidos o tipo de processo, por exemplo, se o forjamento será a quente ou a frio, o tipo de equipamento utilizado para o forjamento, o coeficiente de atrito e o material a ser analisado.



Figura 42 – Demonstrativo de dados utilizados para realizar a simulação de Elementos Finitos

Assim como nas análises realizadas com os outros métodos, a aplicação do método de Elementos Finitos foi dividida em seis golpes do martelo de queda. Cada geometria resultante de determinado golpe, serve de geometria inicial para o golpe subsequente.

A Figura 43 e a Figura 44 exibem o posicionamento da geratriz nas matrizes inferior e superior. Na simulação, assim como acontece na máquina, a matriz superior é a que se movimenta no sentido vertical para realizar a compressão da peça, sendo os três primeiros golpes do martelo efetuados na cavidade de “pré-forma” e os últimos três golpes efetuados na cavidade de “acabamento”.

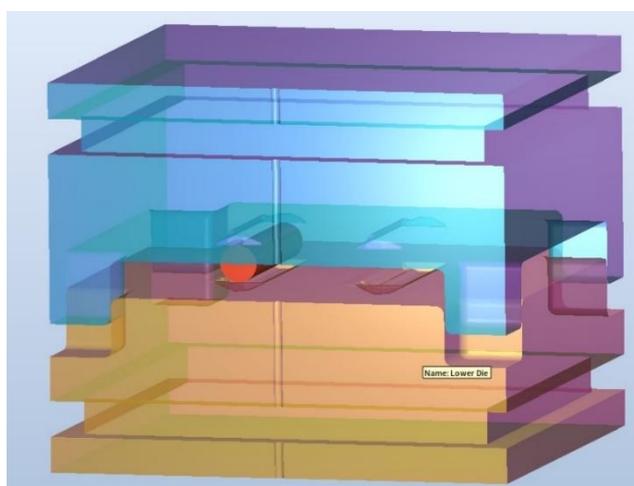


Figura 43 – Posicionamento da geratriz nas matrizes superior e inferior, para a realização dos três primeiros golpes do martelo de queda.

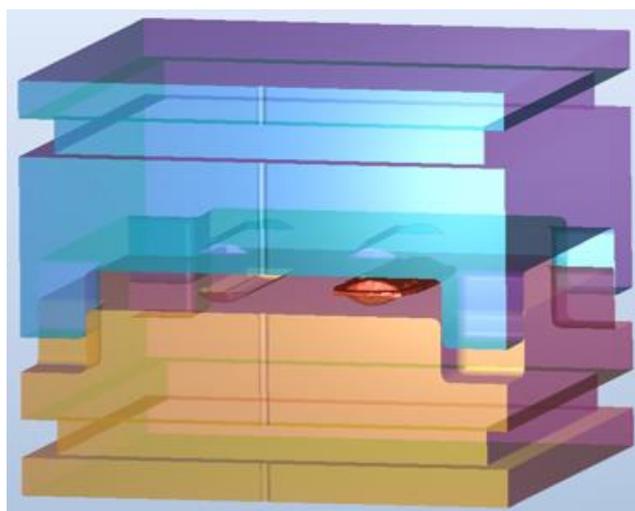


Figura 44 – Posicionamento da geratriz nas matrizes superior e inferior, para a realização dos três últimos golpes do martelo de queda.

O tamanho de malha, o tipo e o número de elementos gerados pelo *software*, influenciam diretamente nos resultados apresentados pela simulação. A malha mais refinada com maior quantidade de elementos resulta em um tempo maior para resolução dos cálculos. Por isso, é necessário que se encontre um equilíbrio entre estes fatores.

Utilizou-se nas simulações uma malha de 1mm, o tipo de elemento é o triangular e o número de elementos gerados foi de 34210. Com relação a malha não foi realizado um estudo aprofundado, já que o objetivo deste trabalho é somente a comparação da simulação, métodos analíticos e experimental. Na Figura 45 é possível identificar a malha gerada.

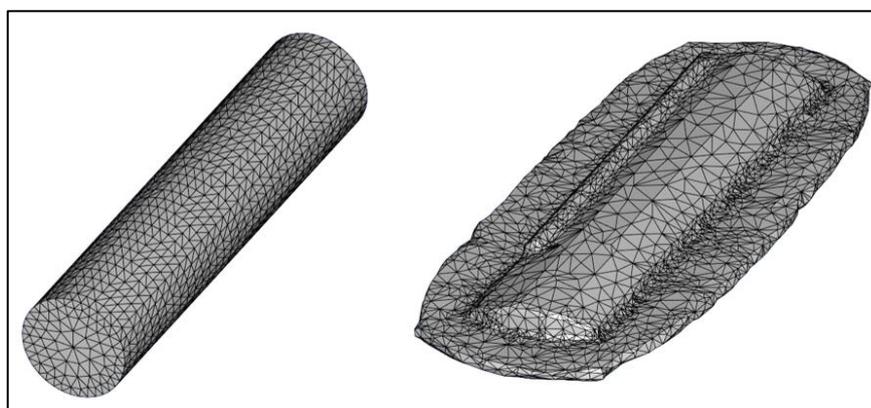


Figura 45 – Representação da malha gerada na análise de Elementos Finitos

A Figura 46 – (A) demonstra a quantidade de tensão que o material está submetido, e em qual ponto ocorrerá um maior impacto na ferramenta durante o primeiro golpe do martelo. Na mesma Figura 46 – (B) é possível observar os pontos onde ocorreu maior deformação ao longo do processo de conformação.

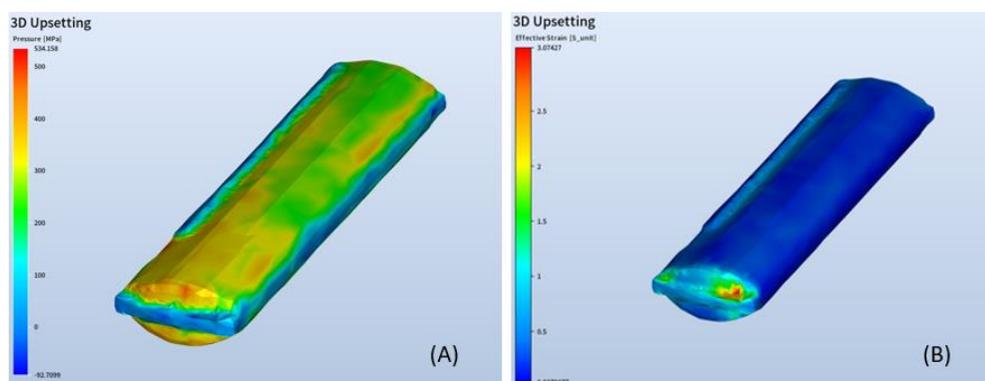


Figura 46 – (A) Demonstrativo de tensão efetiva e (B) deformação efetiva, para o primeiro golpe.

A Figura 47 demonstra os gráficos gerados pelo software relacionando os valores de força e energia resultantes do primeiro golpe do martelo de queda.

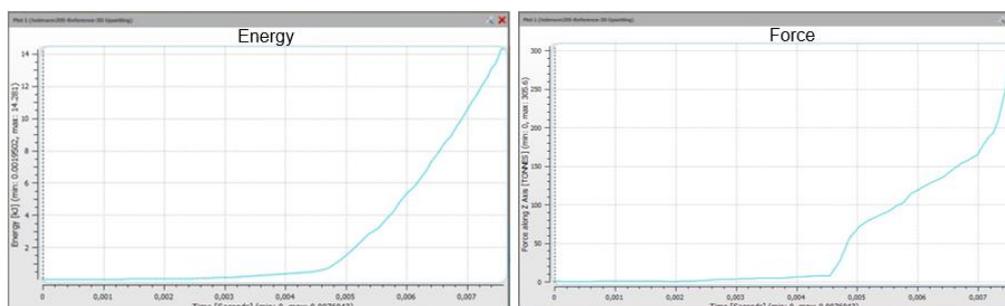


Figura 47 – Demonstrativo de energia e força desenvolvidos no primeiro golpe do martelo

A Figura 48 – (A) demonstra a quantidade de tensão que o material está submetido, e em qual ponto ocorrerá um maior impacto na ferramenta durante o segundo golpe do martelo. Na mesma Figura 48 – (B) é possível observar os pontos onde ocorreu maior deformação ao longo do processo de conformação.

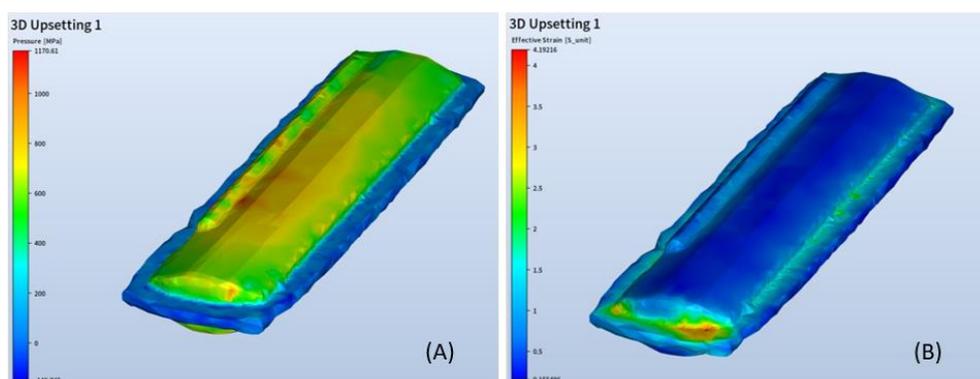


Figura 48 – (A) Demonstrativo de tensão efetiva e (B) deformação efetiva, para o segundo golpe.

A Figura 49 demonstra os gráficos gerados pelo software relacionando os valores de força e energia resultantes do segundo golpe do martelo de queda.

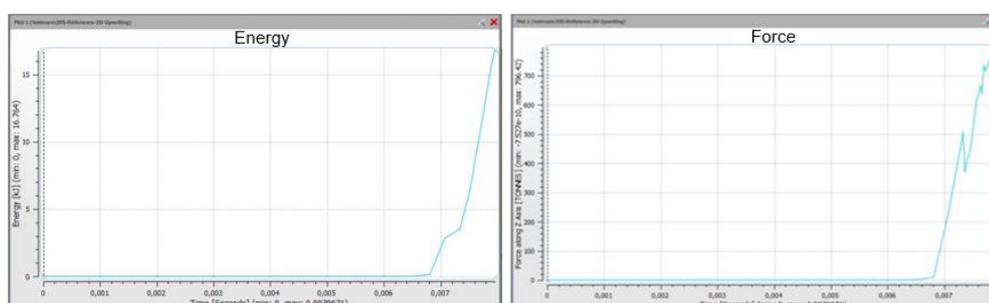


Figura 49 – Demonstrativo de energia e força desenvolvidos no segundo golpe do martelo

A Figura 50 – (A) demonstra a quantidade de tensão que o material está submetido, e em qual ponto ocorrerá um maior impacto na ferramenta durante o terceiro golpe do martelo. Na mesma Figura 50 – (B) é possível observar os pontos onde ocorreu maior deformação ao longo do processo de conformação.

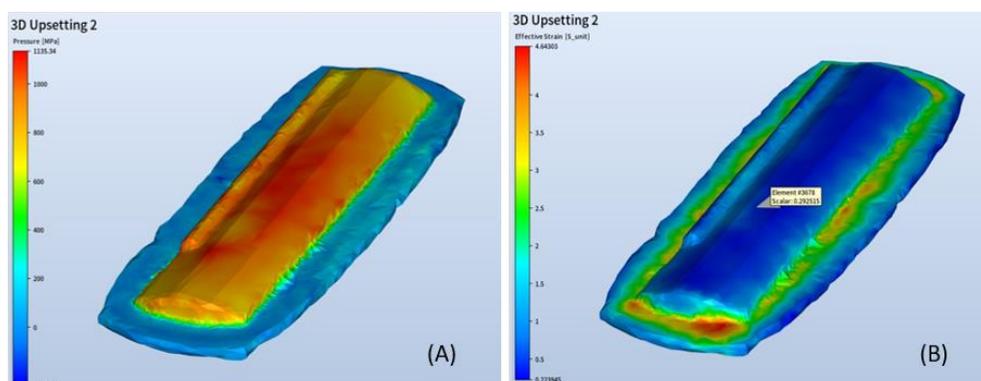


Figura 50 – (A) Demonstrativo de tensão efetiva e (B) deformação efetiva, para o terceiro golpe.

A Figura 51 demonstra os gráficos gerados pelo software relacionando os valores de força e energia resultantes do terceiro golpe do martelo de queda.

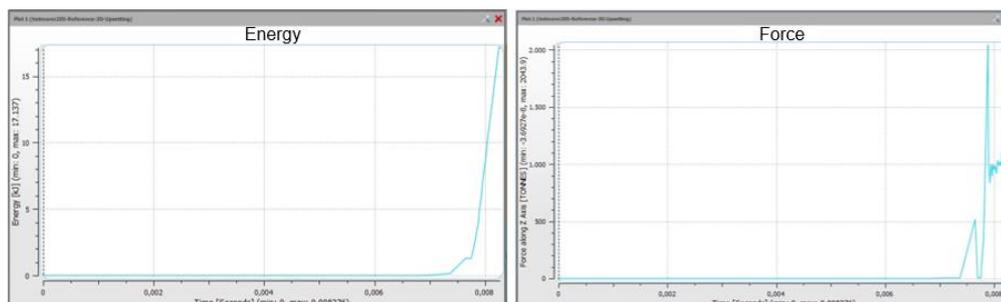


Figura 51 – Demonstrativo de energia e força desenvolvidos no terceiro golpe do martelo

A Figura 52 – (A) demonstra a quantidade de tensão que o material está submetido, e em qual ponto ocorrerá um maior impacto na ferramenta durante o quarto golpe do martelo. Na mesma Figura 52 – (B) é possível observar os pontos onde ocorreu maior deformação ao longo do processo de conformação.

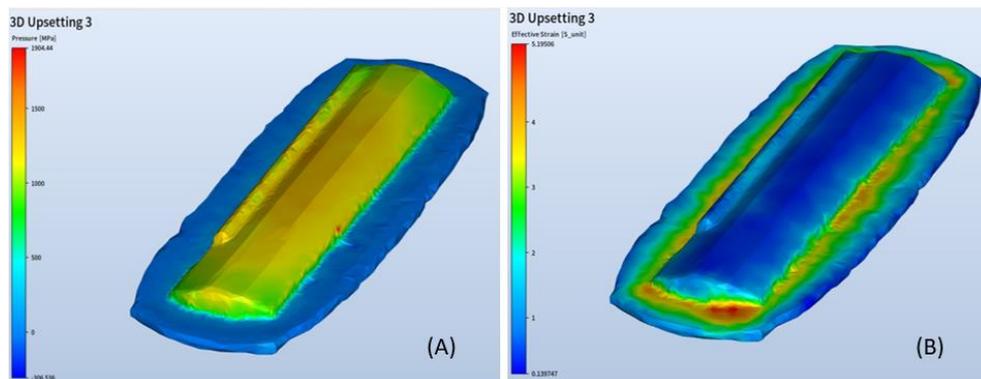


Figura 52 – (A) Demonstrativo de tensão efetiva e (B) deformação efetiva, para o quarto golpe.

A Figura 53 demonstra os gráficos gerados pelo software relacionando os valores de força e energia resultantes do quarto golpe do martelo de queda.

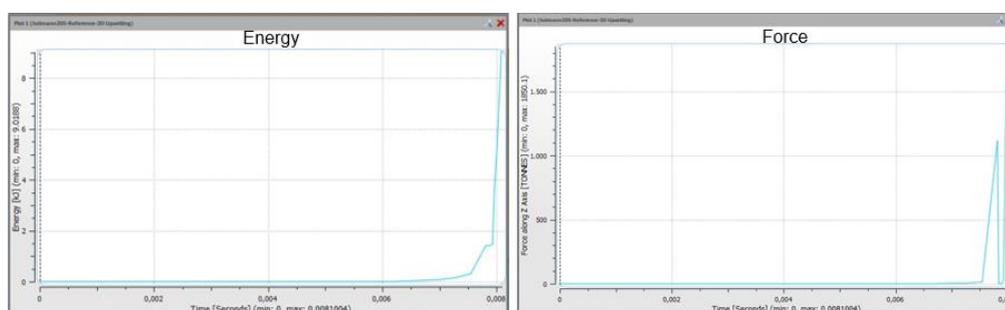


Figura 53 – Demonstrativo de energia e força desenvolvidos no quarto golpe do martelo

A Figura 54 – (A) demonstra a quantidade de tensão que o material está submetido, e em qual ponto ocorrerá um maior impacto na ferramenta durante o quinto golpe do martelo. Na mesma Figura 54 – (B) é possível observar os pontos onde ocorreu maior deformação ao longo do processo de conformação.

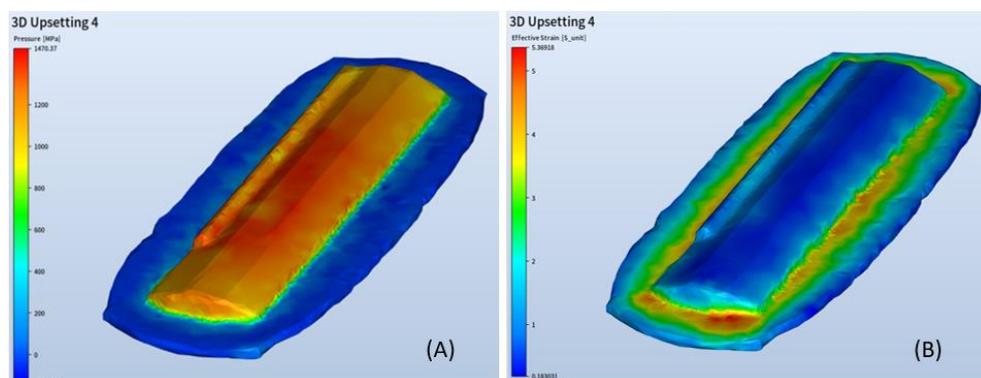


Figura 54 – (A) Demonstrativo de tensão efetiva e (B) deformação efetiva, para o quinto golpe.

A Figura 55 demonstra os gráficos gerados pelo software relacionando os valores de força e energia resultantes do quinto golpe do martelo de queda.

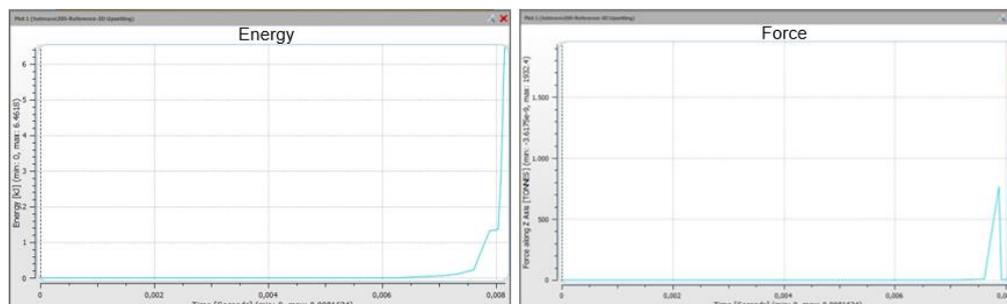


Figura 55 – Demonstrativo de energia e força desenvolvidos no quinto golpe do martelo

A Figura 56 – (A) demonstra a quantidade de tensão que o material está submetido, e em qual ponto ocorrerá um maior impacto na ferramenta durante o sexto golpe do martelo. Na mesma Figura 56 – (B) é possível observar os pontos onde ocorreu maior deformação ao longo do processo de conformação.

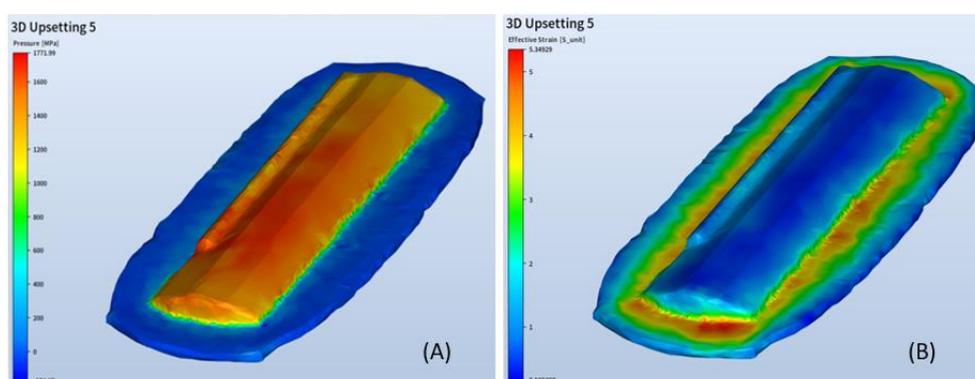


Figura 56 – (A) Demonstrativo de tensão efetiva e (B) deformação efetiva, para o sexto golpe.

A Figura 57 demonstra os gráficos gerados pelo software relacionando os valores de força e energia resultantes do sexto golpe do martelo de queda.

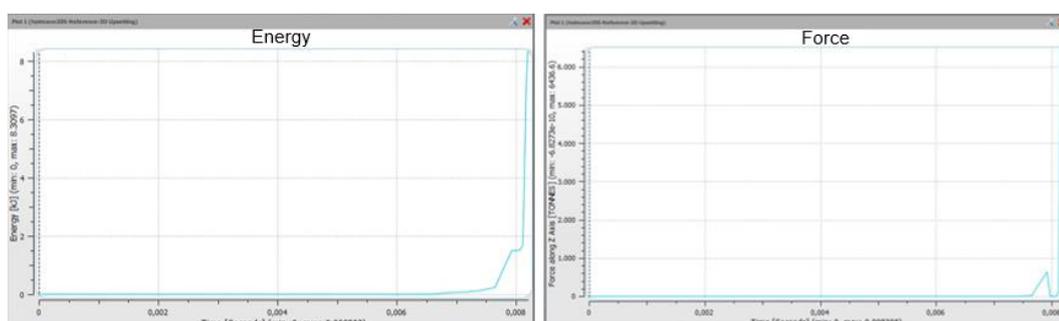


Figura 57 – Demonstrativo de energia e força desenvolvidos no sexto golpe do martelo

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Experimentos foram realizados determinando o coeficiente de atrito do lubrificante Vicast 2020E, utilizado pela empresa que fabrica a peça analisada. Foi determinado o coeficiente de atrito no valor de  $\mu = 0,093$ .

Utilizando o Método Teórico/Experimental como referência, percebe-se uma significativa diferença nos resultados obtidos com o Método de Elementos Finitos e os métodos analíticos.

A Tabela 34 demonstra os valores de Energia Útil ( $W_u$ ) obtidos em cada golpe do martelo de queda, comparando os diferentes métodos aplicados neste estudo com o resultado médio Teórico/Experimental.

Tabela 34 – Comparativo entre resultados de Energia Útil ( $W_u$ ).

MÉTODOS	GOLPES DO MARTELO DE QUEDA						COMPARATIVO COM TEÓRICO / EXPERIMENTAL
	1	2	3	4	5	6	
	RESULTADOS DE ENERGIA ÚTIL - $W_u$ - (N.m)						
TEÓRICO / EXPERIMENTAL	18998	19264	19318	9668	9674	9678	-
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	14281	16764	17137	9018	6461	8309	-17%
MÉTODO DA ENERGIA UNIFORME	15147	15752	25370	13837	15056	15959	17%
MÉTODO DAS TIRAS (TEP)	12261	10937	16037	8493	9124	9594	-23%
MÉTODO SIMPLIFICADO (TEP)	7194	6102	8383	4324	4590	4787	-59%

Avaliando os resultados demonstrados na Tabela 34 é possível verificar que o Método de Elementos Finitos é o que mais se aproxima dos resultados obtidos com o Método Teórico/Experimental, apresentando valores de energia aproximadamente 17% menores. O segundo método que mais se aproximou dos valores de energia obtidos com o Método Teórico/Experimental foi o Método da Energia Uniforme apresentando valores aproximadamente 17% maiores.

Os outros métodos, Método das Tiras e Método Simplificado, baseados na Teoria Elementar da Plasticidade, quando comparados ao Método

Teórico/Experimental apresentaram valores aproximados de 23% menor e 59% menor, respectivamente.

A Tabela 35 demonstra os valores de Força Útil ( $F_u$ ), obtidos em cada golpe do martelo de queda, comparando os diferentes métodos aplicados neste estudo com o resultado médio Teórico/Experimental.

Tabela 35 - Comparativo entre resultados de Força Útil ( $F_u$ ).

MÉTODOS	GOLPES DO MARTELO DE QUEDA						COMPARATIVO COM TEÓRICO / EXPERIMENTAL
	1	2	3	4	5	6	
	RESULTADOS DE FORÇA ÚTIL - $F_u$ - (kN)						
TEÓRICO / EXPERIMENTAL	2527	12811	16022	28546	47607	71437	-
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	2997	7810	20044	18143	18950	63121	-27%
MÉTODO DA ENERGIA UNIFORME	8381	12256	20078	11872	13360	14529	-55%
MÉTODO DAS TIRAS (TEP)	1901	3269	8572	6839	9943	13397	-75%
MÉTODO SIMPLIFICADO (TEP)	1207	2290	9252	9624	17358	27774	-62%

Avaliando os resultados demonstrados na Tabela 35 é possível verificar que o Método de Elementos Finitos é o método que mais se aproximou dos valores obtidos com o Método Teórico Experimental, apresentando valores de força aproximadamente 27% menores. O segundo método que mais se aproximou dos valores de força obtidos com o Método Teórico/Experimental foi o Método da Energia Uniforme, apresentando valores aproximadamente 55% menores.

Os outros métodos, Método das Tiras e Método Simplificado, quando comparados ao Método Teórico/Experimental apresentaram valores aproximados de 75% menor e 62% menor, respectivamente.

Avaliando a aplicação de cada método, foi possível identificar que as condições de contorno vão gerando erros que somados podem baixar a validade de algumas simulações:

- No caso do Método Teórico/Experimental, a força exercida pelo martelo de queda foi estimada utilizando informações do processo de forjamento atual da

peça analisada, juntamente com a curva demonstrada na Figura 8 – c), sendo obtidos os resultados através da aplicação da Equação (10), o que representa uma relação média entre energia e deslocamento. Para valores de energia, foi utilizada a Equação (8) e Equação (9) considerando os três primeiros golpes suaves com eficiência de 0,8 e os três últimos golpes fortes com eficiência de 0,4.

- Avaliando o Método de Elementos Finitos foi identificado possíveis variações na aplicação do método devido ao número de elementos gerados pelo software. A malha mais refinada com maior quantidade de elementos resulta em um tempo maior para resolução dos cálculos. Por isso, é necessário que se encontre um equilíbrio entre estes fatores. O correto posicionamento da geratriz em relação as matrizes, também pode gerar variações nas simulações como deslocamentos entre as aplicações dos golpes. É importante ressaltar a necessidade de se observar os parâmetros que definem o material analisado, sendo extremamente importante a utilização de dados oriundos de ensaios experimentais que descrevam de forma adequada o comportamento do material na temperatura desejada.
- O Método da Energia Uniforme é baseado na área projetada da peça forjada, considerando a rebarba. A escolha de uma forma geométrica elementar equivalente para a determinação da área projetada, gera simplificações médias. Além disso, o método possui seu resultado atrelado a um fator de forma, que é estabelecido de acordo com a interpretação de quem está calculando, como visto na Equação (14) e Equação (15) demonstrado na
- 
- Tabela 5.
- Já o Método das Tiras, assim como o Método Simplificado especificam a necessidade de simetria na peça analisada o que acabou gerando adaptações de perfil para a aplicação destes métodos, conforme Figura 33. Estas adaptações retiraram pontos críticos da peça analisada reduzindo a necessidade de força e energia para o preenchimento da cavidade da ferramenta durante a execução dos golpes. Isso explica a grande diferença dos

resultados quando comparamos ao Método de Elementos Finitos, onde não houve simplificações de perfil.

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS RELACIONADOS COM OS TRABALHOS DESENVOLVIDOS NO LDTM

O trabalho de MARQUES[37], analisa um processo de forjamento de peças vazadas em alumínio AA6351 e compara a utilização de geratriz tubular e maciça através de análises experimentais, analíticas e numéricas. Assim como neste estudo, o autor também verificou que os resultados de força de forjamento obtidos com o Método de Elementos Finitos se aproximaram mais dos valores Experimentais, obtendo diferença de força aproximada de 0,008%. Já os resultados de força obtidos com o Método da Teoria Elementar da Plasticidade divergiram do experimental em torno de 5%.

Quando comparado a este trabalho, nota-se que no estudo de MARQUES[37], os resultados de força de ambos os métodos são mais aproximados em relação aos resultados experimentais, isso se deve principalmente ao fato de que o autor utilizou como referência experimentos, e não análise Teórico/Experimental como neste estudo.

Outro comparativo é realizado com o estudo de SANTOS[2], que trata do cálculo da força necessária para o forjamento de pás de turbinas Pelton, utilizando três métodos distintos: Método da Energia Uniforme, Método das Tiras e Método de Elementos Finitos. No estudo, o autor utilizou como referência os resultados obtidos com o Método de Elementos Finitos e demonstra que o método que apresentou maior diferença dos resultados foi o Método da Energia Uniforme, com valor médio de força 126% maior do que a obtida por simulação computacional. O Método das Tiras, resultou em uma força apenas 27% maior do que a obtida por simulação.

Comparando com este estudo, utilizando o Método de Elementos Finitos como referência, assim como realizado no trabalho de SANTOS[2], o método que apresentou maior diferença foi o Método das Tiras, com valor médio de força 66% menor do que a obtida por simulação computacional. O segundo método que apresentou maior diferença dos resultados foi o Método Simplificado, com valor médio de força 48% menor do que a obtida por simulação. Já o Método da Energia Uniforme

é o que mais se aproximou do Método de Elementos Finitos, resultando em uma força média 39% menor do que a obtida por simulação.

A primeira grande diferença é o fato de que os processos analisados, assim como a matéria-prima, são diferentes. O trabalho de SANTOS[2], avalia o processo de forjamento a frio da liga de aço SAE1010. Além disso, o que explica a grande diferença nos resultados utilizando o Método da Energia Uniforme, é o fato de que este método possui seu resultado atrelado a um fator de forma, que varia de acordo com a interpretação de quem está aplicando o método. Neste estudo, por exemplo, se ao invés de utilizar o coeficiente de correção de pressão  $Q_p = 4$ , fosse utilizado  $Q_p = 6$ , o resultado médio obtido com o Método da Energia Uniforme passaria de 39% para 8% menor quando comparado ao resultado obtido com a simulação.

Outra análise é realizada por CORRÊA[32], que compara a aplicação da Teoria Elementar da Plasticidade e da Simulação Numérica para o forjamento em matriz aberta de eixo vazado, confeccionado a partir de aço AISI 4140. O estudo mostra que a diferença dos resultados de força, obtidos com o Método da Teoria Elementar da plasticidade em relação aos valores experimentais foram entre 12,5% e 13,7%. Já o Método de Elementos Finitos apresentou resultados variando entre 5,8% e 6,9% em relação aos resultados experimentais.

Outro estudo comparativo entre análise analítica, numérica e experimental é realizada por MORAES[38], para a predição de força de conformação de um flange utilizando a liga de titânio Ti-6Al-4V. O autor comenta que aplicando a Teoria Elementar da Plasticidade a força de forjamento foi 5,9 % superior à simulação numérica computacional, baseado no Método de Elementos Finitos, e 16,1% superior à força medida experimentalmente. Da mesma forma, a simulação numérica mostrou-se eficiente para a predição de força, conseguindo atingir um resultado mais exato do que o método analítico. A diferença dos resultados obtidos com o Método de Elementos Finitos em relação ao experimental foi de 9,7 %.

Comparando os resultados deste estudo com os trabalhos descritos, realizados no LDTM, é possível verificar que o Método de Elementos Finitos é o que apresentou menor variação em relação a referência. Quanto a aplicação do Método da Teoria Elementar da Plasticidade, neste estudo o resultado de força média foi de 66% menor

que o Método de Elementos Finitos e 76% menor que o Método Teórico/Experimental. Já nos trabalhos descritos, com exceção do estudo de SANTOS[2], que utilizou como referência o Método de Elementos Finitos, o método da Teoria Elementar da Plasticidade apresentou variação entre 5% e 16,1% em relação aos resultados experimentais.

O que explica a diferença dos resultados obtidos através do Método da Teoria Elementar da Plasticidade, é o fato de que o método exige que a peça analisada possua simetria de forma. A grande diferença é que neste estudo, houve a necessidade de simplificações de perfil para a aplicação do método, diferente dos estudos descritos onde a peça já possuía simetria.

## 7 CONCLUSÕES

Este trabalho assumiu como objetivo principal a comparação entre métodos distintos para obtenção da força e energia de conformação de um processo de forjamento a quente em matriz fechada da liga de alumínio AA7075-F, utilizando martelo de queda por gravidade.

Para tal, este estudo dividiu-se em cinco etapas: A primeira foi a revisão de literatura e análise do processo atual de fabricação do componente em estudo, que forneceram informações e dados referentes aos principais parâmetros do processo de forjamento utilizados na alimentação dos métodos aplicados; a segunda etapa caracterizou-se em analisar experimentalmente o comportamento do material quando conformado nas mesmas condições que o processo de fabricação da peça em estudo, sendo realizados ensaios para a determinação do coeficiente de atrito e tensão de escoamento; a terceira etapa foi a modelagem da peça e das matrizes em 2D e 3D no *software* SolidWorks e, também, a simulação através do Método de Elementos Finitos, utilizando o *software* FORGE NxT 3.0 determinando, entre outros, dados de força, energia e o comportamento do material. Ainda nesta etapa foram aplicados os métodos analíticos para cálculo da força e energia necessárias para o forjamento da peça em estudo; a quarta etapa caracteriza-se pela análise Teórica/Experimental da peça; enfim, a quinta etapa foi a comparação dos resultados obtidos através dos métodos analíticos e numérico, considerando como referência os resultados Teórico/Experimentais.

Uma das dificuldades encontradas foi a definição correta do coeficiente de atrito, devido à perda de calor do corpo de prova para o ambiente. Utilizando a teoria do Ensaio do Anel, experimentos foram realizados com a ferramenta “copo quente” para estimar o coeficiente de atrito do lubrificante Vicast 2020E, utilizado pela empresa que fabrica a peça analisada.

Também foram realizados experimentos para a determinação da tensão de escoamento da liga AA7075 na temperatura de 450°C, onde foram encontrados resultados muito próximos dos obtidos com a Equação (7) utilizando os parâmetros da Tabela 3 propostos por HENSEL[26]. Desta forma, a aplicação dos métodos para

a determinação de força e energia de forjamento utilizaram valores calculados de tensão de escoamento.

O Método de Elementos Finitos se mostrou eficaz para prever a força e energia necessárias para o forjamento da peça. Quando comparados os resultados obtidos de forma Teórica/Experimental com os da simulação numérica, percebe-se similaridade entre eles, ou seja, a simulação numérica apresentou resultados confiáveis e podem ser usados como guias no desenvolvimento de processos de forjamento, auxiliando na redução do tempo de produção.

O uso do Método das Tiras e Método Simplificado para estimar o valor da força e energia de forjamento mostrou maior distanciamento, se comparado ao valor Teórico/Experimental. A grande dificuldade de aplicação da Teoria Elementar da Plasticidade, foi a necessidade de ajuste de perfil da peça analisada para atender o critério de simetria.

O Método da Energia Uniforme foi o que apresentou resultados mais próximos do Método de Elementos Finitos. A dificuldade encontrada durante sua aplicação foi na determinação do fator de forma, ficando a critério de quem está realizando os cálculos. O Método da Energia Uniforme prevê coeficientes de ajuste que impactam diretamente nos resultados de força e energia de forjamento.

Com base nestes resultados, é possível concluir que os métodos analíticos apresentam uma aproximação relativamente grosseira, podendo representar uma indicação da força e energia de conformação, ao passo que o Método de Elementos Finitos, mesmo com todas as simplificações envolvidas, parece mais próximo da realidade.

## 8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Aplicando o Método das Tiras refinando as tiras, ou seja, aplicando a teoria com maior número de tiras, obtendo-se tiras mais finas. Com isso, poderíamos melhorar a exatidão dos resultados com a aplicação do método.

Com relação ao Método de Elementos Finitos, poderiam ser comparados diferentes softwares com resoluções analíticas, podendo assim identificar possíveis variáveis ou pontos de fragilidade.

Outra análise sugerida seria realizar experimentos mais aprofundados para a aquisição de dados em martelos de queda por gravidade como velocidade de deformação e curvas de escoamento.

Analisar outras geometrias de geratriz, bem como outras temperaturas de conformação, objetivando a redução dos esforços de compressão.

Analisar os resultados encontrados com o martelo de queda por gravidade e comparar com a possibilidade de utilização de prensa hidráulica.

Analisar possibilidade de desenvolvimento de ferramental para conformação de forma isotérmica, sem que ocorra a perda de calor do alumínio para o meio-ambiente.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ADDONA D.M.D., ANTONELLI D., **Application of numerical simulation for the estimation of die life after repeated hot forging work cycles**. Università di Napoli Federico II, Italy, 2018
- [2] SANTOS, H.L., SCHAEFFER, L., CÉZAR, L.J., **Fabricação de Pás de Turbina Pelton pelo Processo de Forjamento a Frio**. Porto Alegre. Artigo apresentado no 36º SENAFOR. 2016
- [3] MARTINS, P.; RODRIGUES, J., **Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica**. v. I, 2ª ed. Lisboa: Escolar, 2010.
- [4] YOSHIMURA, H., YOSHIMURA, H., **Precision forging of aluminum and steel**. Journal of Materials Processing Technology, v. 98, n. 2, pag. 196-204, 2000.
- [5] BARBOSA, C., **Metais não Ferrosos e suas Ligas – Microestrutura, Propriedades e Aplicações**. 1ª ed. - Rio de Janeiro: E-papers, 2014.
- [6] Disponível em: <http://abal.org.br/aplicacoes/bens-de-consumo/> Acessado em 22 de Abril de 2018.
- [7] Disponível em: <http://www.world-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/#map> Acessado em 08 de Fevereiro de 2018.
- [8] SCHAEFFER, L., **Forjamento - Introdução ao processo**. Imprensa Livre. Porto Alegre. 2006.
- [9] ASM Handbook, **Forming and Forging**. 9º Edição. ASM International, Vol. 14, 1996.
- [10] NORMA NBR 6834.
- [11] ASM Handbook, **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. Vol. 2, ASM International, 1990.
- [12] WENCHAO, Y., **Investigation of mechanical and corrosion properties of an Al-Zn-Mg-Cu alloy under various ageing conditions and interface analysis of precipitate**. *Materials and Design*, v. 85, p 752-761, 2015.
- [13] POLMEAR, I.J., **Aluminium Alloys – A Century of Age Hardening**. *Materials Forum*, v. 28, p. 1-14, 2004.
- [14] ALCOA, **Catalogo Ligas e Temperas de Extrusão**. Disponível em: [http://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo\\_ligas\\_temperas\\_2010.pdf](http://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo_ligas_temperas_2010.pdf) Acessado em: 03 Julho 2010.
- [15] MARTINS, V.; SCHAEFFER, L., **Comparação entre lubrificantes pela verificação do atrito em alumínio e aço**. *Revista Corte e Conformação de Metais*, p. 44-63, 2009.
- [16] MALAYAPPAN, S., **An experimental analysis of upset forging of aluminium cylindrical billets considering the dissimilar frictional conditions at flat die surfaces**. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 23, p. 636-643, 2004.

- [17] Disponível em: [http://meen282.et.byu.edu/sites/meen282.et.byu.edu/files/PPT/14-ForgingofMetals\\_files/frame.htm#slide0012.htm.%202013](http://meen282.et.byu.edu/sites/meen282.et.byu.edu/files/PPT/14-ForgingofMetals_files/frame.htm#slide0012.htm.%202013) Acessado em 22 de Abril de 2018.
- [18] SAIKI, H., ZHAN, Z.H., MARUMO, Y., **Evaluation of contact conditions in hot forging of pure aluminum using examination.** Journal of materials processing technology, n. 177, p. 243-246, 2006.
- [19] ALTAN, T., OH, S., GEGEL, H., **Conformação de metais: Fundamentos e aplicações**, São Carlos: EESC-USP, 1999.
- [20] ALVES, M. L., **Modelação Numérica e Análise Experimental de Operações de Forjamento.** Tese de doutorado. Universidade de Lisboa, Lisboa, 2004.
- [21] BRITO, A., **Análise teórico-experimental dos processos de expansão, redução e inversão de extremidades de tubos de parede fina em matriz.** Tese de doutorado. UFRGS – PPGE3M, Porto Alegre/RS, 2006.
- [22] GEIER, M., **Considerações sobre o Atrito para Processos de Forjamento a Frio através do Ensaio de Compressão do Anel.** Dissertação de Mestrado. UFRGS – PPGE3M, Porto Alegre/RS, 2007.
- [23] CAPAROLLI, A., GILENO, L. A., BUTTONS, S.T., **Expert system for hot forging design.** Journal of Materials Processing Technology, v. 80, p. 131-135, 1998.
- [24] MARTINS, P., RODRIGUES, J., **Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica.** 2ª. ed. Lisboa: Escolar, v. II, 2010.
- [25] SCHAEFFER, L., **Curvas de escoamento como parâmetro fundamental para a simulação do processo de forjamento.** Seminário Nacional De Forjamento, 7, Porto Alegre. XII Conferência internacional de forjamento/Brasil, n. 13, Porto Alegre, p. 167-176, 1992.
- [26] HENSEL, A., SPITTEL, T., **Kraft – und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren.** Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1978.
- [27] QUAN G., MAO Y., LI G., LV W., WANG Y., ZHOU J., **A characterization for the dynamic recrystallization kinetics of as-extruded 7075 aluminum alloy based on true stress–strain curves.** School of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China, 2011
- [28] ROKNI M.R., HANZAKI A. Z., ROOSTAEI A.A., ABEDI H.R., **An investigation into the hot deformation characteristics of 7075 aluminum alloy.** School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, 2010.
- [29] ALTAN T., NGAILE G., SHEN G., **Cold and Hot Forging-Fundamentals and Applications**, ASM International, Ohio, 2005.
- [30] CAPAN, L., & BARAN, O., **Calculation method of the press force in a round shaped closed-die.** Journal of Materials Processing Technology, v. 102, p. 230-233, 2000.
- [31] SCHAEFFER, L., ROCHA, A. S., **Conformação Mecânica: Cálculos Aplicados em Processos de Fabricação.** 1ª Ed. Porto Alegre – RS: Editora Imprensa Livre, 2007.

- [32] CORRÊA, F. J., **Aplicação Da Teoria Elementar Da Plasticidade E Da Simulação Numérica Para Forjamento Em Matriz Aberta De Eixo Vazado**. Dissertação de Mestrado. UFRGS – PPGE3M, Porto Alegre/RS, 2014.
- [33] CLEARY, P. W., PRAKASH, M., DAS, R., HA, J., **Modelling of metal forging using SPH**. *Applied Mathematical Modelling*, v. 36, Issue 8, p. 3836-3855, 2012.
- [34] KOBAYASCHI I.S., OH, S.I., ALTAN, T., **Metal forming and the finite element method**, Oxford University Press, Inglaterra, 1989.
- [35] ZUO, X., WEI, Y., CHEN, J., ZENG, L., RUAN, X., **3D FEM simulation of multi-stage forging process using solid modeling of forging tools**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 91, Issues 1-3, p. 191-195, 1999.
- [36] ROSIAK, A., **Obtenção da curva de escoamento a quente do aço 22MnB5 a partir do método do empilhamento de chapas finas**. Trabalho de conclusão de Graduação. UFRGS – Metalurgia, Porto Alegre/RS, 2018.
- [37] MARQUES, A.S., **Estudo do forjamento de peças vazadas a partir de geratriz tubular**. Dissertação de Mestrado. UFRGS – PPGE3M, Porto Alegre/RS, 2013.
- [38] MORAES, A., LIMA, D.R.S., SCHAEFFER, L., **Comparação da predição de força de conformação obtida através de análise analítica, numérica e experimental para o forjamento a quente de liga de titânio Ti-6Al-4V**, 30º SENAFOR – 14ª Conferência Internacional de Forjamento, Porto Alegre/RS, 2010.