



TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

**ANÁLISE DO REAPROVEITAMENTO DE SUCATA COMO MATERIAL DE  
TRABALHO DO PROCESSO DE FORJAMENTO A QUENTE EM MATRIZ  
FECHADA DA LIGA DE ALUMÍNIO AA 6351**

Silmar do Nascimento Castro

00209952

Orientador: Prof. Dr. -Ing LirioSchaeffer  
Coorientador: Prof. MSc. André Rosiak

Setembro, 2022

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, Celi do Nascimento e Wilmar Jardim Castro (*in memoriam*) com muito amor, carinho e saudades, por todo sacrifício e exemplo. A minha esposa Suzana Alves Machado pelo amor, companheirismo e paciência. Ao meu filho Joaquim Alves Castro pelo amor incondicional, pela amizade, e por tudo o que representa em nossa família. Ao meu irmão Milton Junior Barros dos Santos por nossa infância e pela amizade. Os méritos desta conquista são todos seus.

Ao meu orientador, Prof<sup>o</sup>. Dr. -Ing. Lirio Schaeffer, e ao meu coorientador, Prof. MSc. André Rosiak pela grande oportunidade, auxílio e confiança.

Ao Prof. Dr Diego Pacheco Wermuth por todo seu auxílio e conselhos durante todo meu tempo de graduação.

A MSc. Eng<sup>a</sup>. Thomas Gomes dos Santos pela imensurável ajuda.

Ao “Bonde da Metal sem Freio” e a todos irmãos que fiz durante a graduação.

A Guarda Municipal de Viamão, a qual abriu as portas e me mostrou um mundo novo, e a oportunidade de recomeçar.

A todos os colegas do Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica (CBCM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A todos os amigos, colegas e professores que auxiliaram nestes anos de graduação.

## RESUMO

Os processos de conformação mecânica geram volume significativo de material descartado na forma de sucata. Muitos processos rendem sucatas com seção circular e espessura limitada. Este material tradicionalmente retorna como sucata para o setor de produção de matéria prima. Este estudo se propõe a avaliar o reaproveitamento de sucatas da liga de alumínio AA6351 disponíveis na forma de discos no processo de forjamento a quente em matriz fechada. No processo, as sucatas são empilhadas para formar a geratriz que é forjada a 500°C para produzir um flange. A peça obtida é analisada e comparada com uma peça obtida no processo convencional de forjamento com geratriz cilíndrica. Ambos os processos são investigados via simulação numérica.

Palavras chave: Forjamento em matriz fechada, Soldagem por Forjamento, Simulação Numérica, AA6351.

## ABSTRACT

The forming processes generate a significant volume of material discarded in the form of flash. Many processes yield burrs with a circular section and limited thickness. This material traditionally returns as scrap to the raw material production sector. This study proposes to evaluate the reuse of AA6351 aluminum alloy flash available in the form of discs in the closed die hot forging process. In the process, the flashes are stacked to form the billet which is forged at 500°C to produce a flange. The obtained part is analyzed and compared with a part obtained in the conventional forging process with a cylindrical billet. Both processes are investigated through numerical simulation.

Keywords: Closed die forging, Forge welding, Numerical Simulation, AA6351.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Classificação dos processos de conformação mecânica quanto ao tipo de esforço aplicado: (a) compressão; (b) compressão e tração; (c) tração; (d) flexão; (e) cisalhamento [5,6].	16
Figura 2 - Mudanças dimensionais no recalque sem atrito de um cubo [9].	17
Figura 3 - Forjamento em Matriz fechada.	20
Figura 4 - Exemplos de juntas produzidas por (a) soldagem a frio [2] e (b) soldagem por fricção [8].	21
Figura 5 - Exemplos de aplicações históricas da tecnologia de soldagem por forjamento: (a) lâminas de aço damasco [18] e (b) Pilar de Ferro de Déli [19].	23
Figura 6 - (a) Pré-forma bimetálica aquecidas antes do forjamento, (b) após o forjamento, (c) anel soldado por forjamento após resfriamento a ar, (d) peça final usinada [23].	24
Figura 7- Curvas de escoamento da liga AA 6351 [40].	32
Figura 8- Diagrama de fase esquemático da liga Al-Mg-Si [42].	33
Figura 9 - Zonas GP: (a) Zonas GP-I na liga AA 6082 envelhecida a 150°C durante 11h. (b) Zonas GP-II na liga AA 6082 envelhecida a 150°C durante 2 dias [46].	35
Figura 10 - Fluxograma das etapas desenvolvidas neste trabalho.	36
Figura 11 - Modelo numérico 2D do processo de forjamento com reaproveitamento de sucatas.	38
Figura 12 - Detalhamento da peça forjada neste trabalho.	39
Figura 13 - Ferramentas utilizadas no forjamento.	40
Figura 14 - Processo de forjamento com reaproveitamento de sucatas.	41
Figura 15 - Geratrizes utilizadas no processo de forjamento com reaproveitamento de sucata (esquerda) e forjamento convencional (direita).	42
Figura 16 – Configuração experimental para a realização do forjamento.	43
Figura 17 – Perfiz de microdureza das peças forjadas.	44
Figura 18 - Micrografia da seção transversal da liga AA6351 na condição laminada com aumento de 100x (esquerda) e 200x (direita).	46

Figura 19 - Resultado numérico referente ao contato para (a) o forjamento de sucata e (b) forjamento convencional. ....	47
Figura 20 - Resultado numérico referente a distribuição da temperatura para (a) o forjamento de sucata e (b) forjamento convencional. ....	48
Figura 21 - Resultado numérico referente a distribuição da deformação equivalente para (a) o forjamento de sucata e (b) forjamento convencional. ....	49
Figura 22 - Resultado numérico referente a distribuição da tensão equivalente para (a) o forjamento de sucata e (b) forjamento convencional. ....	50
Figura 23 - Resultado numérico referente a distribuição da velocidade de deformação para (a) o forjamento de sucata e (b) forjamento convencional. ....	51
Figura 24 - Evolução da força de forjamento com o deslocamento da matriz superior para os dois processos analisados (forjamento de sucata e forjamento convencional). ....	52
Figura 25 – Peças produzidas pelos processos de (a) forjamento de sucatas e (b) forjamento convencional. ....	53
Figura 26 - Peças sucatadas produzidas pelos processos de (a) forjamento de sucatas e (b) forjamento convencional. ....	54
Figura 27 – Análise macroscópica das peças produzidas pelos processos de (a) forjamento de sucatas e (b) forjamento convencional. ....	55
Figura 28 - Análise microscópica das peças produzidas pelos processos de (a) forjamento de sucatas e (b) forjamento convencional. ....	56
Figura 29 – Resultados experimentais e numéricos da evolução da força de forjamento com o deslocamento da matriz superior para os dois processos analisados (forjamento de sucata e forjamento convencional). ....	57
Figura 30 - Microestrutura das peças produzidas pelos processos de (a) forjamento de sucatas e (b) forjamento convencional. ....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Sistema de designação de ligas de alumínio fundidas. ....	25
Tabela 2- Sistema de designação de ligas de alumínio forjadas. ....	26
Tabela 3 - Sistema de designação dos processamentos para as ligas de alumínio [29,30]. ....	27
Tabela 4 - Sistema de designação dos tratamentos térmicos para as ligas de alumínio [29,30]. ....	28
Tabela 5 - Propriedades mecânicas de algumas ligas AA6xxx na condição recozida e T6 [36]. ....	30
Tabela 6 - Composição química nominal da liga de alumínio AA 6351 [38]. ....	31
Tabela 7 - Propriedades físicas típicas da liga de alumínio AA 6351 [38]. ....	31
Tabela 8 - Propriedades mecânicas típicas da liga de alumínio AA 6351 [39]. ....	31
Tabela 9 - Parâmetros da Equação de Hensel-Spittel para a liga AA 6351 [41]. ....	32
Tabela 10 - Parâmetros térmicos, mecânicos e operacionais utilizados na simulação numérica do processo de forjamento a quente da liga AA 6351. ....	38
Tabela 12- Resultado da análise química da liga AA 6351. ....	45

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$  – Parâmetro de Hansel-Spittel [ $\text{N/mm}^2$ ]

$b_0$  – Profundidade Inicial [mm]

$b_1$  - Profundidade Final [mm]

$C$  – Coeficiente de Resistência [ $\text{N/mm}^2$ ]

$F$  – Força [N]

$h$  - Altura Instantânea [mm]

$h_0$  - Altura Inicial [mm]

$h_1$  - Altura Final [mm]

$h_r$  - Altura de Sucata [mm]

$k_f$ - Tensão de Escoamento [ $\text{N/mm}^2$ ]

$l_0$  - Largura Inicial [mm]

$l_1$  - Largura Final [mm]

$m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7, m_8, m_9$  - Parâmetros de Hansel-Spittel [ $\text{N/mm}^2$ ]

$n$  – Coeficiente de Encruamento [-]

$S$  – Área [ $\text{mm}^2$ ]

$t$  - Tempo [s]

$V_0$  – Volume Inicial [ $\text{mm}^3$ ]

$V_1$ – Volume Final [ $\text{mm}^3$ ]

$V_F$  – Velocidade da Ferramenta [mm/s]

$w_r$  - Comprimento de Sucata [mm]



## SÍMBOLOS GREGOS

$\sigma$  – Tensão Normal [N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_{eq}$  – Tensão Equivalente [N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – Tensões Normais Principais [N/mm<sup>2</sup>]

$\varphi$  – Deformação Verdadeira [-]

$\varepsilon$  – Deformação Relativa [%]

$\Delta h$  - Variação de Altura [mm]

$\dot{\varphi}$  – Velocidade de Deformação [1/s]

$\tau$  – Tensão de Cisalhamento [N/mm<sup>2</sup>]

$\mu$  – Coeficiente de Atrito

$\vartheta$  – Temperatura [°C]

## ABREVIATURAS

AA - Aluminium Association

AISI - American Iron and Steel Institute

CBCM – Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica

GP - Guinier e Preston

LAFUN - Laboratório de Fundição

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
3.1 Conformação Mecânica .....	15
3.1.1 Parâmetros Fundamentais da Conformação Mecânica.....	16
3.1.2 Comportamento Mecânico dos Materiais .....	19
3.2 Forjamento em Matriz Fechada.....	20
3.3 Soldagem por Forjamento.....	21
3.4 Ligas de Alumínio.....	25
3.4.1 Processamento das Ligas de Alumínio.....	26
3.4.2 Ligas de Alumínio da Série AA6xxx.....	29
3.4.3 Liga de Alumínio AA6351 .....	30
3.4.4 Endurecimento por Precipitação.....	32
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	36
4.1 Caracterização Inicial do Material de Trabalho .....	37
4.2 Simulação Numérica do Processo de Forjamento .....	38
4.3 Forjamento .....	39
4.3.1 Peça Forjada .....	39
4.3.2 Ferramentas de Forjamento .....	40
4.3.3 Forjamento com Reaproveitamento de Sucata .....	40
4.3.4 Forjamento Convencional.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.4 Tratamento Térmico .....	44
4.5 Caracterização Final das Peças.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	45

5.1 Caracterização Inicial do Material de Trabalho .....	45
5.2 Simulação Numérica .....	46
5.3 Processos de Forjamento .....	53
5.4 Tratamento Térmico .....	58
6. CONCLUSÕES.....	59
7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	60
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

## 1. INTRODUÇÃO

Os processos de conformação mecânica oferecem diversas vantagens tecnológicas, construtivas, produtivas e econômicas em relação a outros processos de fabricação. Do ponto de vista técnico, as tecnologias de conformação são capazes de aprimorar as propriedades mecânicas dos produtos, tornando-os adequados para aplicações que envolvem altas cargas estáticas e dinâmicas [1].

Nos processos de forjamento, em especial no forjamento em matriz fechada, uma quantidade considerável de material é perdida na forma de sucata. Estas perdas são extremamente relevantes, uma vez que o consumo de matéria prima tem efeito significativo sobre o balanço energético do processo. HERBERTZ et al. (2011) [2] estimam que até dois terços da energia requerida para a produção de componentes conformados é utilizada na produção da matéria-prima. Segundo TEKKAYA et al. (2009) [3], este número é ainda mais expressivo. Até 90% da energia total necessária para fabricar componentes conformados a quente é usada no processo básico de produção da matéria-prima.

Em tempos de escassez global de energia e demandas sociopolíticas pelo uso econômico dos recursos naturais, esforços significativos têm sido realizados para reduzir estas perdas. A otimização do projeto das ferramentas e o uso de etapas de pré-conformação são tradicionalmente aplicados para diminuir o volume da sucata em processos de forjamento. Contudo, uma porção do material invariavelmente é perdida. A possibilidade de reaproveitamento deste material, no próprio processo de forjamento é uma alternativa atrativa.

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a aplicabilidade do reaproveitamento de sucatas com seção circular no forjamento de um componente axissimétrico. A geratriz empregada no processo de forjamento a quente em matriz fechada é formada por discos empilhados. O material de trabalho é a liga de alumínio AA 6351. O aquecimento a 500°C e a deformação plástica envolvidos no processo gera a união dos discos e dão origem a uma peça maciça.

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar metalurgicamente a liga AA 6351;
- Analisar numericamente via elementos finitos, o processo de forjamento com uma geratriz formada por discos empilhados;
- Avaliar a união metalúrgica dos discos, gerada pela soldagem por forjamento que ocorre durante o forjamento em matriz fechada;
- Comparar a peça produzida através do reaproveitamento da sucata com uma peça produzida a partir de uma geratriz cilíndrica.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais para a melhor compreensão do tema abordado neste trabalho. Inicialmente são expostos os fundamentos básicos da conformação mecânica, seguidos da apresentação do processo de forjamento em matriz fechada. Em seguida, é abordado o processo de soldagem por forjamento. Esta tecnologia será a responsável por garantir a união dos discos (sucatas) que formam a geratriz utilizada no processo de forjamento em matriz fechada. Por fim, as características mecânicas e metalúrgicas do material de trabalho são expostas.

#### 3.1 Conformação Mecânica

A conformação mecânica é definida pela DIN 8580 como a fabricação através da modificação tridimensional ou plástica de uma forma, mantendo sua massa e coesão [4]. As técnicas de conformação são classificadas dependendo da direção principal da tensão aplicada (Figura 1):

- Conformação sob condições de compressão;
- Conformação sob condições combinadas de tração e compressão;
- Conformação sob condições de tração;
- Conformação por flexão;
- Conformação sob condições de cisalhamento.

Os processos de conformação também podem ser classificados em função da temperatura em que os mesmos são realizados. Na conformação a frio, quando a peça não é aquecida, uma parte da energia que é dispendida na realização do processo é armazenada no material gerando o encruamento. Este fenômeno é responsável pelo aumento da resistência mecânica e da dureza, e pela diminuição da ductilidade e da tenacidade do material [7].

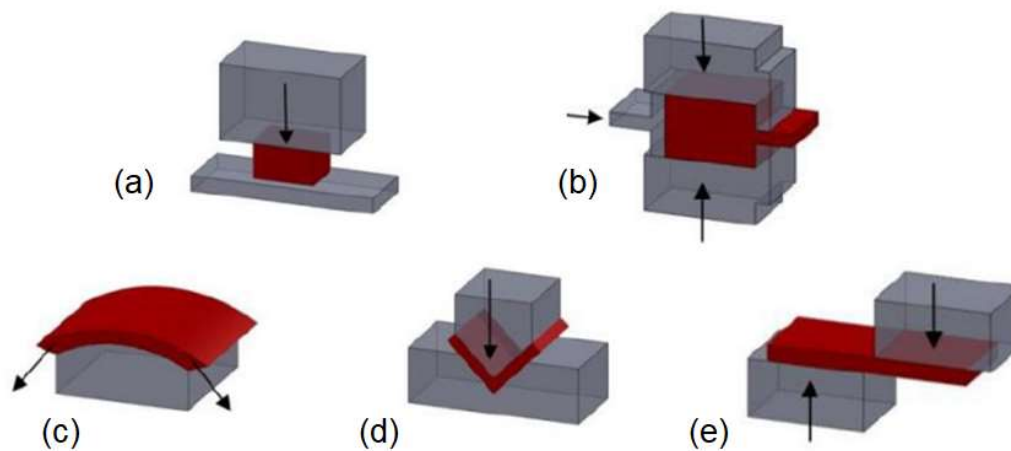


Figura 1- Classificação dos processos de conformação mecânica quanto ao tipo de esforço aplicado: (a) compressão; (b) compressão e tração; (c) tração; (d) flexão; (e) cisalhamento [5,6].

No trabalho a quente os mecanismos de recuperação (recuperação e recristalização dinâmica) ocorrem simultaneamente à deformação [5]. Nesta condição o material se torna mais dúctil, assegurando maior capacidade de deformação plástica sem a ocorrência de fratura. Além disso, a exigência de força e a potência é menor, pois quando aquecidos os materiais apresentam uma diminuição da tensão de escoamento. O trabalho a quente apresenta desvantagens importantes como o elevado consumo energético, a dificuldade de controle dimensional e a formação de óxidos superficiais, responsáveis pelo mau acabamento das peças e desgaste acentuado das ferramentas [4].

Quando os processos são executados em faixas de temperaturas intermediárias são denominados a morno. Nesta condição, o endurecimento induzido por deformação é consideravelmente reduzido devido à recuperação do material [8].

### 3.1.1 Parâmetros Fundamentais da Conformação Mecânica

O escoamento começa no momento em que a combinação das tensões atuantes em um corpo atinge o valor da tensão de escoamento ( $k_f$ ) do material. A combinação das tensões atuantes em um corpo pode ser expressa por um único



valor, denominado tensão equivalente ( $\sigma_{eq}$ ), e definida pela Teoria de Escoamento de Von Mises como:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  correspondem às tensões normais principais atuantes no corpo. Por convenção,  $\sigma_1$  é a tensão normal principal, algebricamente maior,  $\sigma_3$  é a tensão normal principal, algebricamente menor e  $\sigma_2$  é a tensão normal principal, algebricamente intermediária entre  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ .

Quando um corpo é submetido a um estado uniaxial de tensões, como por exemplo, no ensaio de tração, a tensão pode ser definida pela razão entre a força aplicada ( $F$ ) e a área ( $S$ ) onde esta força atua:

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 = \frac{F}{S} \quad (\text{Equação 2})$$

Iniciado o escoamento plástico do material, as modificações no corpo podem ser quantificadas através da deformação verdadeira ( $\varphi$ ), também chamada de deformação logarítmica, e expressa matematicamente por:

$$\varphi = \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} \quad (\text{Equação 3})$$

Esta equação permite quantificar, por exemplo, a compressão de um corpo com altura  $h$  (Figura 2). Onde  $h_0$  representa a altura do corpo antes da compressão e  $h_1$  a altura final do corpo após a compressão.

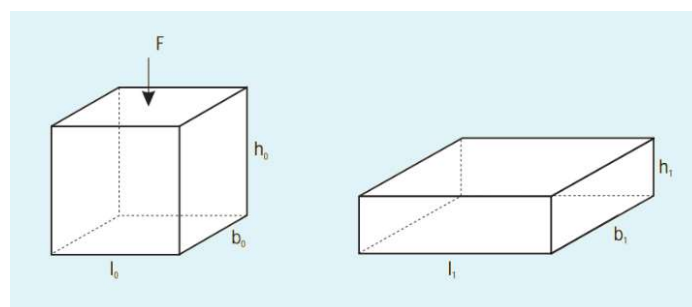


Figura 2 - Mudanças dimensionais no recalque sem atrito de um cubo [9].

A deformação verdadeira também pode ser calculada a partir da deformação relativa ( $\varepsilon$ ).

$$\varphi = \ln (1 + \varepsilon) \quad (\text{Equação 4})$$

A deformação relativa ( $\varepsilon$ ) é definida por:

$$\varepsilon = \frac{h_1 - h_0}{h_0} = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (\text{Equação 5})$$

De acordo com a lei da constância do volume, segundo a qual o volume não é alterado pelo processo de deformação (Equação 6), a soma de todos os valores de deformação é sempre igual a zero:

$$V_0 = l_0 \cdot b_0 \cdot h_0 = V_1 = l_1 \cdot b_1 \cdot h_1 \quad (\text{Equação 6})$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (\text{Equação 7})$$

A variação da deformação verdadeira ( $\varphi$ ) em função do tempo ( $t$ ) é denominada velocidade de deformação ( $\dot{\varphi}$ ). Este parâmetro importante dos processos de conformação mecânica pode ser expresso matematicamente por:

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{V_F}{h} \quad (\text{Equação 8})$$

Outro fator de fundamental importância nos processos de conformação mecânica é atrito desenvolvido na interface peça-ferramenta. A mecânica do atrito de interface é muito complexa e uma maneira de expressar quantitativamente o atrito é através do coeficiente de atrito ( $\mu$ ). O valor de  $\mu$  pode ser estimado experimentalmente de diversas formas. No forjamento, o ensaio do anel é amplamente utilizado para este fim. Com a definição do coeficiente de atrito e conhecendo a tensão normal na interface ( $\sigma$ ), a tensão de cisalhamento devido ao atrito ( $\tau$ ) pode ser expressa por:

$$\tau = \mu \cdot \sigma \quad (\text{Equação 9})$$

### 3.1.2 Comportamento Mecânico dos Materiais

Na análise de um processo conformação mecânica, a tensão de escoamento ( $k_f$ ) é a variável do material mais importante. A tensão de escoamento é muito importante porque, nos processos de conformação, as cargas e tensões são dependentes da geometria da peça, do atrito e da tensão de escoamento do material. Para uma dada microestrutura, a tensão de escoamento é expressa em função da deformação ( $\varphi$ ), velocidade de deformação ( $\dot{\varphi}$ ) e temperatura ( $\vartheta$ ) [10]:

$$k_f = (\varphi, \dot{\varphi}, \vartheta, material) \quad (\text{Equação 10})$$

As tensões de escoamento devem ser determinadas experimentalmente para as condições de deformação, velocidade de deformação e temperatura que existem durante os processos de deformação. O método comumente utilizado é o ensaio de tração uniaxial. Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos podem ser expressos matematicamente por equações que buscam representar o comportamento mecânico do material em determinada condição.

Na conformação a frio, devido ao endurecimento por encruamento pronunciado, a tensão de escoamento é frequentemente expressa por uma equação exponencial. A equação de Hollomon define a tensão de escoamento ( $k_f$ ) em função da deformação verdadeira ( $\varphi$ ):

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad (\text{Equação 11})$$

Onde  $C$  e  $n$  são, respectivamente, os coeficientes de resistência e de encruamento do material.

Na conformação a quente, o efeito da deformação na tensão de escoamento é insignificante e a influência da velocidade de deformação torna-se cada vez mais importante [7]. A expressão matemática que define a tensão de escoamento considera estes aspectos e torna-se mais complexa:

(E quação 12)

$$k_f = A \cdot e^{m_1 \cdot \vartheta} \cdot \varphi^{m_2} \cdot \dot{\varphi}^{m_3} \cdot e^{\frac{m_4}{\varphi}} \cdot (1 + \varphi)^{m_5 \cdot \vartheta} \cdot e^{m_7 \cdot \varphi} \cdot \dot{\varphi}^{m_8 \cdot \vartheta} \cdot \vartheta^{m_9}$$

Onde  $A$ ,  $m_1$  a  $m_9$  são constantes do material e devem ser determinadas experimentalmente [11].

### 3.2 Forjamento em Matriz Fechada

O forjamento é um processo de conformação mecânica, caracterizado pela deformação plástica de uma geratriz mediante a aplicação de altas forças compressivas [12]. Este processo é amplamente utilizado na fabricação de virabrequins, bielas, engrenagens, pás de turbinas, discos e outros componentes para a indústria mecânica.

No processo de forjamento em matriz fechada (Figura 3), a geratriz assume a forma das cavidades das matrizes, devido às tensões de compressão atuantes no material durante o fechamento das ferramentas. Ao final do processo, as matrizes não atingem o contato mutuo, consequentemente, parte do material pode fluir radialmente para fora da cavidade, formando a sucata [13].

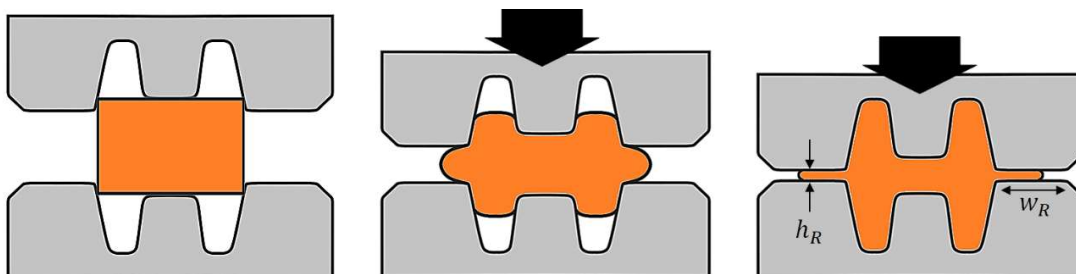


Figura 3 - Forjamento em Matriz fechada.

O processo visa à produção de componentes com formas geométricas complexas. Para garantir o preenchimento completo das matrizes e obter a forma desejada o fluxo radial para a sucata deve ser dificultado. Consequentemente, no

projeto das matrizes, geralmente a altura ( $h_R$ ) da sucata é limitada em 3% da espessura máxima da peça, enquanto o comprimento ( $w_R$ ) é cinco vezes maior do que a espessura [14]. A otimização destas dimensões são fundamentais para minimizar o desperdício de material perdido para a sucata e, conseqüentemente, o consumo de energia.

### 3.3 Soldagem por Forjamento

A soldagem em estado sólido abrange um amplo espectro de processos, incluindo soldagem a frio, soldagem por forjamento, soldagem ultrassônica, soldagem por fricção, soldagem por resistência, soldagem por difusão e soldagem por explosão. Os processos se distinguem em termos de princípios e aplicações. A Figura 4 mostra exemplos de juntas unidas em estado sólido através dos processos de soldagem a frio (Figura 1 (a)) e soldagem por fricção (Figura 1 (b)).

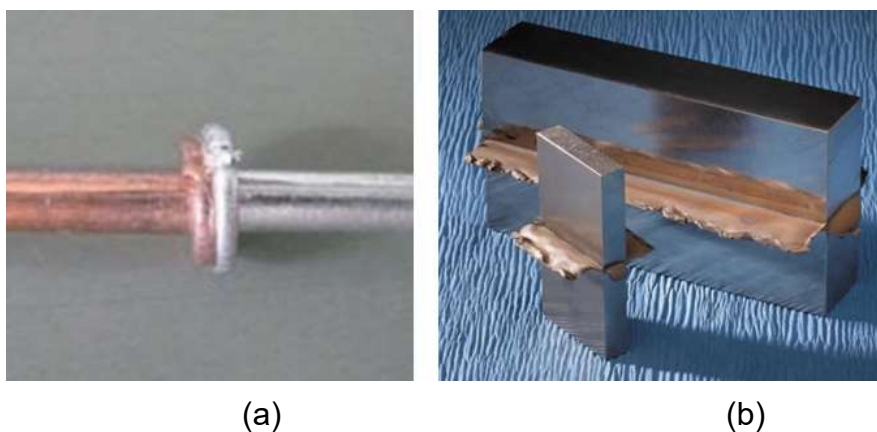


Figura 4 - Exemplos de juntas produzidas por (a) soldagem a frio [2] e (b) soldagem por fricção [8].

A ligação em estado sólido produz juntas sólidas a temperaturas essencialmente abaixo do ponto de fusão dos materiais base. Nestes processos, a ligação obtida através da combinação de deformação e difusão em determinadas pressões e temperaturas utilizando energia mecânica, elétrica ou térmica. O tempo

requerido para a união pode variar de menos de um décimo de segundo na soldagem explosiva há algumas horas na soldagem por difusão, dependendo das pressões e temperaturas aplicadas [15].

A história da soldagem em estado sólido tem início antes de 1000 a.C. Neste período, os antigos uniam metais simplesmente martelando-os, através do processo hoje conhecido como soldagem por forjamento. Apesar de antiga, a soldagem em estado sólido só foi amplamente aceita na indústria após a segunda metade do século XX. O aumento significativo da aplicação está atrelado à digitalização da fabricação, proposta a partir da terceira revolução industrial e que possibilitou o controle preciso de vários parâmetros dos processos [16].

As juntas de estado sólido geralmente estão livres de vários defeitos de solidificação que podem ocorrer durante os processos de soldagem por fusão, como porosidade, trincas a quente e inclusões não metálicas. Devido à ausência de defeitos e da zona termicamente afetada, a junta pode alcançar propriedades mecânicas semelhantes às dos metais originais. Além disso, nenhum metal de adição, fluxo ou gás de proteção é necessário durante o processo de soldagem em estado sólido [16].

Em comparação com as soldas por fusão, as soldas em estado sólido são geralmente caracterizadas por uma microestrutura mais refinada, resultando em um efeito deletério menor nas propriedades mecânicas.

Os processos de soldagem em estado sólido também são muito adequados para unir materiais diferentes, pois a compatibilidade química, expansão térmica e condutividade não são aspectos críticos [16]. Assim, a união em estado sólido torna-se uma solução robusta e mais simples que a soldagem a arco convencional que exige rotinas complexas de múltiplas soldas com enchimentos múltiplos e cuidadosamente selecionadas [17].

A soldagem por forjamento é um dos métodos de união mais simples e mais antigos, capaz de produzir juntas de estado sólido de alta qualidade. O processo consiste na união de materiais mediante o aquecimento a temperaturas típicas do forjamento a quente e posterior conformação, até a formação de uma estrutura sólida.

Além de serem unidas por golpes de martelo, as peças também podem ser soldadas por laminação, estiramento ou compressão. O processo possui importância histórica no desenvolvimento da tecnologia de fabricação, contudo atualmente é de menor importância comercial [20]. Uma das aplicações mais populares da soldagem por forjamento é a produção de lâminas de aço damasco [9]. Outro exemplo de aplicação histórica da soldagem por forjamento é o Pilar de Ferro de Déli. O monumento de mais de 7 metros e com mais de 1600 anos foi produzido pela sobreposição de peças de aço unidas em estado sólido [19].



(a)



(b)

Figura 5 - Exemplos de aplicações históricas da tecnologia de soldagem por forjamento: (a) lâminas de aço damasco [18] e (b) Pilar de Ferro de Déli [19].

O processo envolve o forjamento de metais semelhantes ou diferentes para produzir uma ligação de difusão instantânea [3]. Esta é a principal vantagem em relação à ligação por difusão convencional. Enquanto o forjamento a quente produz uma ligação instantânea, a soldagem por difusão convencional leva várias horas para produzir uma junta sólida. No entanto, a utilização deste processo na fabricação tem sido escassa, possivelmente devido aos equipamentos caros em relação aos equipamentos convencionais de união [17].

A soldagem por forjamento também permite que ligas de composições diferentes e metalurgicamente compatíveis sejam combinadas com menor exigência de montagem e com ótimo desempenho. Peças de metal diferentes são comumente

produzidas utilizando soldagem por fricção, contudo esse processo é limitado em relação às geometrias que podem ser obtidas, na distribuição do material e quanto às propriedades mecânicas obtidas [21].

LALVANI et al. (2022) comparou a qualidade da união das ligas SS 316L e AA6063 por forjamento, fricção e difusão. Os autores relataram um desempenho superior das peças produzidas por forjamento (Figura 6). A operação de forjamento criou uma ligação instantânea por difusão na interface entre os dois materiais. A inspeção por ultrassom não revelou defeitos na interface soldada por forjamento. Todas as juntas exibiram melhores propriedades mecânicas do que os materiais originais. Isso foi confirmado em ensaios de tração em que a falha ocorreu longe da linha de solda.

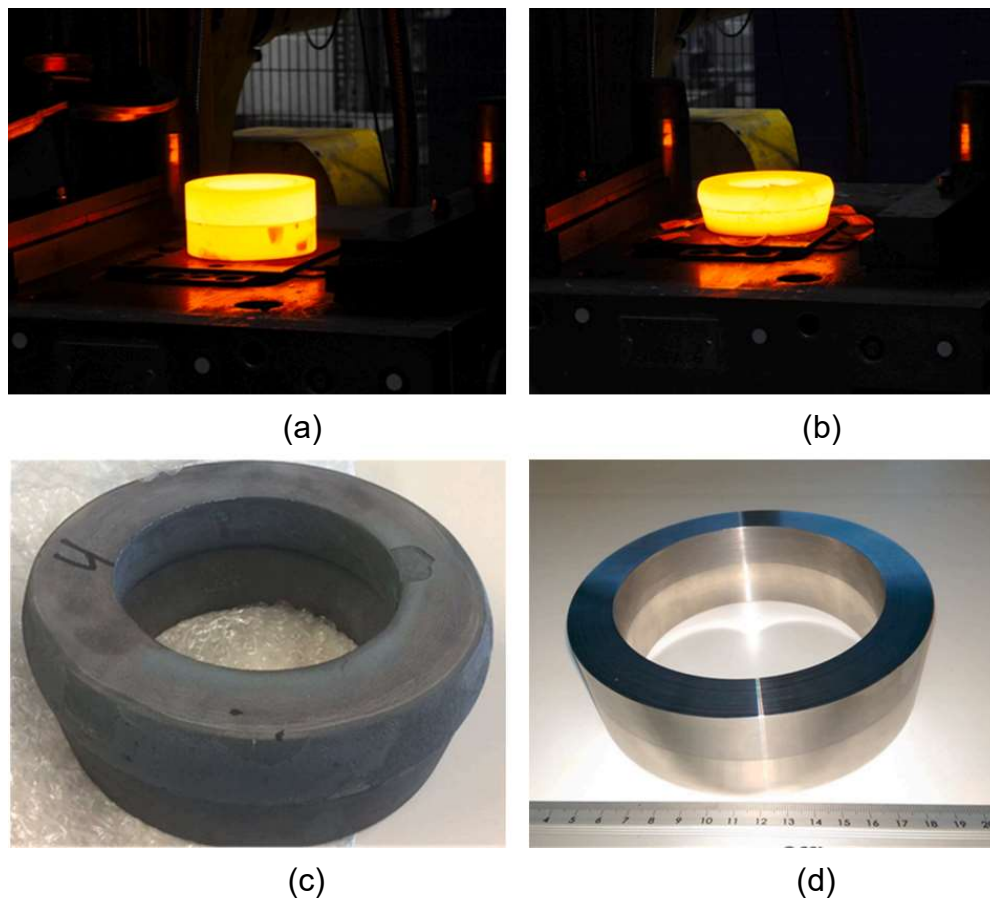


Figura 6 - (a) Pré-forma bimetalica aquecidas antes do forjamento, (b) após o forjamento, (c) anel soldado por forjamento após resfriamento a ar, (d) peça final usinada [23].



### 3.4 Ligas de Alumínio

O alumínio se destaca devido a melhor resistência à corrosão em comparação com muitos outros materiais. A proteção contra a corrosão é garantida por um filme de óxido que se forma na superfície do alumínio em atmosferas oxidantes [24]. Contudo, o alumínio puro apresenta resistência limitada. Por esta razão, elementos de liga são adicionados ao alumínio para garantir propriedades mecânicas atrativas. Os elementos de liga melhoram diversas propriedades mecânicas, como resistência ao escoamento, dureza, soldabilidade, mas reduzem o ponto de fusão do material [25].

As ligas de alumínio são classificadas em ligas forjadas e fundidas. Estas ligas são classificadas em diferentes graus, dependendo dos elementos de liga. De acordo com a *Aluminium Association Inc.*, as ligas de alumínio forjado são designadas por quatro dígitos como Xxxx (como 1xxx, 2xxx, etc.). Por outro lado, as ligas de alumínio fundido são designadas por Xxx.x (como 1xx.x, 2xx.x, etc.) [26]. Os sistemas de designação das ligas de alumínio fundido e forjado são apresentados nas Tabela 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1- Sistema de designação de ligas de alumínio fundidas.

Liga	Designação
Alumínio puro (Al>99,00%)	1xx.x
Ligas Al-Cu	2xx.x
Ligas Al-Si com adições de Cu e Mg	3xx.x
Ligas Al-Si	4xx.x
Ligas Al-Mg	5xx.x
Ligas Al-Zn	7xx.x
Ligas Al-Sn	8xx.x
Ligas com outros elementos	9xx.x

As ligas de fundição contêm proporções comparativamente maiores de elementos de liga, o que resulta em uma estrutura heterogênea (partículas de segunda fase) [27]. Assim, o alongamento e a resistência, especialmente em fadiga,

da maioria dos produtos fundidos são considerados ruins, enquanto as ligas de alumínio forjado exibem uma resistência comparativamente maior [28]. As ligas forjadas são temperadas para melhorar a resistência.

Tabela 2- Sistema de designação de ligas de alumínio forjadas.

Liga	Designação
Alumínio puro (Al>99,00%)	1xxx
Ligas Al-Cu	2xxx
Ligas Al-Mn	3xxx
Ligas Al-Si	4xxx
Ligas Al-Mg	5xxx
Ligas Al-Mg-Si	6xxx
Ligas Al-Zn	7xxx
Ligas com outros elementos	8xxx

### 3.4.1 Processamento das Ligas de Alumínio

O processamento das ligas de alumínio tem efeito crucial nas propriedades finais. As Tabelas 3 e 4 apresentam, respectivamente, o sistema de designação dos processamentos e dos tratamentos térmicos para as ligas de alumínio.

As ligas das classes 2xxx, 6xxx e 7xxx são tratáveis termicamente. A série 2xxx possui um conteúdo de cobre variando entre 2,5 e 5,0% e outros elementos de liga. Estes materiais são tratados termicamente por solubilização e envelhecimento artificial dando origem a fase S ( $Al_2CuMg$ ) e a fase  $\theta'$  ( $CuAl_2$ ). Esta condição aumenta o limite de escoamento do material, as custas de uma redução do alongamento [31].

A série 6xxx possui como elementos de liga principais o magnésio e silício que formam precipitados metaestáveis ( $Mg_5Si_6$ ) e precipitados estáveis ( $Mg_2Si$ ). Estas ligas podem ser endurecidas por solução sólida, por precipitação, pela redução do tamanho de grão, por encruamento e por tratamento térmico [32]. As ligas 6xxx possuem resistência inferior as ligas das séries 2xxx e 7xxx, contudo são materiais

versáteis. Apresentam excelente resistência à corrosão e são altamente moldáveis. São geralmente empregadas em aplicações estruturais, automotivas e marítimas [31].

Tabela 3 - Sistema de designação dos processamentos para as ligas de alumínio [29,30].

Designação	Processamento	Características
F	Como fabricada	Produtos fabricados por fundição, trabalho a quente ou trabalho a frio sem controle térmico ou encruamento.
O	Recozida	Produtos recozidos para aumentar a ductilidade e a estabilidade dimensional.
H	Encruado	Produtos endurecidos por trabalho a frio com ou sem tratamentos complementares para aumentar a ductilidade. O H é sempre seguido por dois ou mais dígitos.
H1	Somente Encruado	Produtos endurecidos sem tratamento térmico posterior. O H1 é seguido por dígitos, que mostram o grau de encruamento.
H2	Encruado e parcialmente recozido	Produtos endurecidos por trabalho a frio e posteriormente parcialmente recozidos, visando a redução da resistência. O H2 é seguido por dígitos, que mostram o encruamento residual após o recozimento parcial.
H3	Encruado e estabilizado	Produtos endurecidos por trabalho a frio e estabilizado por recozimento a baixa temperatura ou por aquecimento durante o encruamento. O H3 é seguido por dígitos, que mostram o encruamento restante após a estabilização.
W	Solubilizado	Tratamento que gera condição instável, aplicado apenas para ligas que são envelhecidas naturalmente. Esta designação é adequada apenas quando o tempo de envelhecimento é indicado.
T	Tratado termicamente	Produtos que são estabilizados por tratamento térmico com ou sem encruamento posterior. O T é sempre seguido por um ou vários dígitos.

A série 7xxx contém zinco como elemento de liga principal juntamente com outros elementos de liga (Mg, Cr e Cu). Estas ligas atingem uma boa combinação de tenacidade e alta resistência pelo endurecimento por envelhecimento sendo comumente aplicadas em setores aeronáuticos [33].

Tabela 4 - Sistema de designação dos tratamentos térmicos para as ligas de alumínio [29,30].

Designação	Processamento	Características
T1	Resfriado após o trabalho a quente e envelhecido naturalmente a condição substancialmente estável	Produtos não trabalhados a frio após o trabalho a quente. As propriedades do produto não são afetadas pelo endireitamento a frio.
T2	Resfriado após o trabalho a quente, trabalhado a frio e envelhecido naturalmente a condição substancialmente estável	Produtos que tem a resistência aprimorada pelo trabalho a frio após o trabalho a quente.
T3	Solubilizado, temperado, trabalhado a frio e envelhecido naturalmente até uma condição estável	Produtos que tem a resistência aprimorada pelo trabalho a frio anterior ao envelhecimento.
T4	Solubilizado, temperado e envelhecido naturalmente até uma condição estável	Produtos não submetidos a deformação a frio após o tratamento térmico.
T5	Temperado a partir do forjamento a quente e envelhecido artificialmente	Produtos não submetidos a deformação a frio após trabalho a quente. As propriedades do produto não são afetadas pelo endireitamento a frio.
T6	Solubilizado, temperado e envelhecido artificialmente	Produtos não submetidos a deformação a frio após solubilização.
T7	Solubilizado, temperado e super envelhecido / estabilizado	Produto super envelhecido artificialmente visando o aprimoramento de alguma propriedade específica.
T8	Solubilizado, temperado, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente	Produtos que tem a resistência aprimorada pelo trabalho a frio seguido de tratamento de solubilização.
T9	Solubilizado, temperado, envelhecido artificialmente e trabalhado a frio.	Produtos que tem a resistência aprimorada pelo trabalho a frio após o envelhecimento artificial.
T10	Resfriado após o trabalho a quente, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente	Produtos que são trabalhados a frio para melhorar a resistência após o trabalho a quente.

### 3.4.2 Ligas de Alumínio da Série AA6xxx

Nas ligas AA6xxx, a adição de Si e Mg é feita na proporção adequada para formar o silicato de magnésio ( $Mg_2Si$ ). Uma razão Mg/Si de 1,73 é necessária para a formação do  $Mg_2Si$ . A precipitação deste composto é a maior responsável pelo endurecimento destas ligas. A presença de excesso de Si produz maior resistência e maior conformabilidade, mas incorpora a tendência à corrosão intergranular. O excesso de Mg aumenta a resistência à corrosão, mas reduz a conformabilidade e a resistência mecânica.

A formação de precipitados de  $Mg_2Si$  dá origem ao sistema eutético simples com alumínio [35]. Em temperatura elevada, os elementos de liga se dissolvem na solução sólida, mas em temperaturas mais baixas a solubilidade é limitada e ocorre a formação de precipitados de  $Mg_2Si$  endurecíveis por envelhecimento [34]. Após o tratamento térmico, o material é composto por uma solução sólida rica em alumínio, grandes partículas de Mg e Si em dispersão grosseira e pequenas partículas de Mg e Si em dispersão refinada.

A adição de cobre, em concentrações variáveis, produz endurecimento substancial por solução sólida e precipitação. Na presença de magnésio e silício, o cobre produz efeitos de envelhecimento à temperatura ambiente. Contudo, a soldabilidade e a resistência à corrosão são diminuídas e o peso da liga é aumentado com a adição de cobre.

O ferro é uma das impurezas das ligas 6xxx. A presença de compostos de ferro como  $FeAl_3$ ,  $Fe_2SiAl_8$ ,  $FeMg_3Si_6Al_8$  e  $FeAl_6$ , pode ser prejudicial para as propriedades dessas ligas. O ferro prejudica a ductilidade e a tenacidade pela formação de partículas grosseiras. O ferro reduz a resistência e diminui a resistência à corrosão e à fadiga. Adições de elementos de liga como Cr e Mn são feitas para corrigir a forma e o tamanho dos precipitados contendo ferro [34].

A presença de manganês aumenta a temperatura de recristalização, a resistência a corrosão e também o endurecimento por dispersão gerado no

envelhecimento. Boro e titânio favorecem o controle do tamanho de grão. A usinabilidade pode ser aprimorada pela adição de Bi e Pb [34].

As propriedades mecânicas de algumas ligas AA6xxx no estado recozido e T6 são mostrados na Tabela 5 [36]. É possível observar que um aumento significativo na resistência ao escoamento, no limite de resistência e na dureza pode ser obtido com o emprego do tratamento T6. As ligas tratadas com T6 apresentam limite de escoamento variando de 210 e 360 MPa e limite de resistência entre 240 e 385 MPa. No entanto, a ductilidade é reduzida após T6 em comparação com o estado recozido [36].

Tabela 5 - Propriedades mecânicas de algumas ligas AA6xxx na condição recozida e T6 [36].

Liga	Limite de Escoamento [Mpa]		Limite de Resistência [Mpa]		Alongamento [%]		Dureza [HB]	
	Recoz.	T6	Recoz.	T6	Recoz.	T6	Recoz.	T6
AA6053	55	220	110	255	35	13	26	80
AA6061	55	276	124	310	25	12	30	94
AA6063	48	214	88	235	25	11	25	73
AA6066	83	360	152	388	18	12	43	120
AA6070	70	352	145	378	20	10	35	120
AA6463	50	214	88	241	23	12	25	74

### 3.4.3 Liga de Alumínio AA6351

A liga AA 6351 foi introduzida em 1958 como uma versão melhorada da liga AA 6061. A Tabela 6 mostra a composição química nominal da liga. Este material possui teor maior de Silício (1,0% nominal) e um teor de Mn de 0,65%. A liga foi promovida como uma alternativa de maior tenacidade à liga 6061 para uso em aplicações que exigem boa resistência ao impacto [37]. A tenacidade da liga é muito menos sensível a taxa de têmpera do que outras ligas da série 6xxx, como 6061 e 6005. As propriedades físicas e mecânicas desta liga são mostradas nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

Tabela 6 - Composição química nominal da liga de alumínio AA 6351 [38].

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn	Al
0,7-1,3	<0,5	<0,1	0,4-0,8	0,4-0,8	<0,2	<0,2	Restante

Tabela 7 - Propriedades físicas típicas da liga de alumínio AA 6351 [38].

Propriedade	Valor
Módulo de elasticidade a 20°C [GPa]	68,9
Densidade a 20°C [g/cm <sup>3</sup> ]	2,71
Temperatura do líquido [°C]	650
Temperatura solidus [°C]	555
Condutividade térmica a 25°C, [W/m.K]	176
Resistividade elétrica a 20°C [nΩ.m]	38
Coefficiente médio de expansão térmica linear [μm/m°C]	20 a 80°C, 23,4

Tabela 8 - Propriedades mecânicas típicas da liga de alumínio AA 6351 [39].

Propriedade	T4	T6
Resistência à tração [MPa]	248 MPa	310 MPa
Limite de escoamento [MPa]	152	283
Alongamento (em 50 mm) [%]	20	14
Dureza Brinell (carga de 500 kg, esfera de 10 mm) [HB]	...	95
Resistência ao cisalhamento [MPa]	...	200
Resistência à fadiga em 5.10 <sup>8</sup> ciclos (teste RR Moore) [MPa]	...	90

Os tratamentos térmicos desta liga incluem [38]:

- Recozimento: Aquecer a uma temperatura de 350°C e manter na temperatura por cerca de 4h;
- Tratamento de solubilização: Aquecer a uma temperatura de 505°C;
- Envelhecimento: Aquecer a uma temperatura de 170°C e manter a temperatura por 6h.

A liga AA 6351 em todas as têmperas geralmente   soldável usando todos os procedimentos e métodos comerciais de soldagem a arco elétrico. A soldagem por pontos e costuras de resistência   melhor nas têmperas T5 e T6 [38].

A Figura 9 mostra as curvas de escoamento do material [40]. Em temperaturas elevadas a tensão de escoamento da liga depende não apenas da deform o, mas também   fortemente influenciada pela velocidade de deform o. A tensão de escoamento aumenta   medida que a temperatura diminui e a velocidade de deform o aumenta. A Tabela 6 apresenta os parâmetros de Hensel-Spittel do material [41].

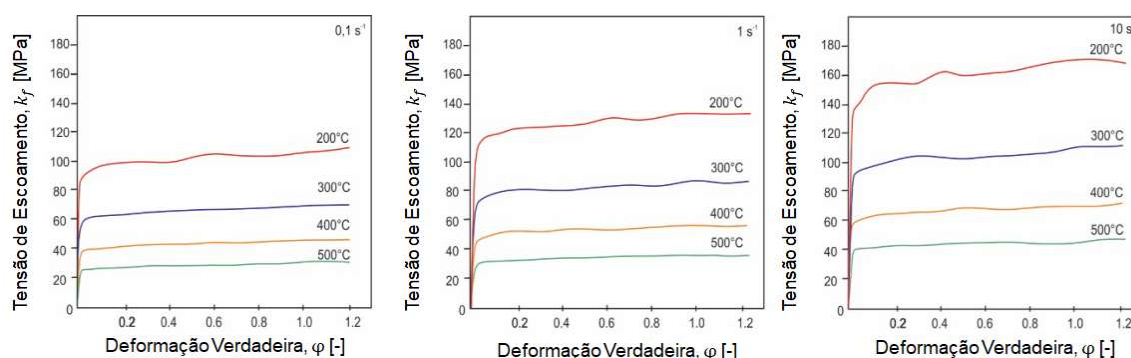


Figura 9 - Curvas de escoamento da liga AA 6351 [40].

Tabela 6 - Parâmetros da Equa o de Hensel-Spittel para a liga AA 6351 [41].

A [Mpa]	303,5
$m_1$ [-]	-0,0043
$m_2$ [-]	0,103
$m_3$ [-]	0,057

### 3.4.4 Endurecimento por Precipita o

O endurecimento por precipita o (endurecimento por envelhecimento), ou endurecimento por envelhecimento,   um dos mecanismos mais utilizados em ligas metálicas. Este mecanismo gera o aumento de resistência e dureza mediante a



formação de finas partículas de segunda fase uniformemente dispersas dentro da matriz original. As partículas de precipitado atuam como obstáculos ao movimento das discordâncias e, assim, fortalecem a liga.

As ligas de alumínio mais resistentes (2xxx, 6xxx e 7xxx) são tratadas por envelhecimento. Para que uma liga possa ser endurecida por precipitação, deve haver uma solução sólida que apresente solubilidade decrescente à medida que a temperatura diminui. O diagrama de fases mostrado na Figura 8 mostra esse tipo de comportamento ao longo da linha solvus entre as regiões  $\alpha$  e  $\alpha + Mg_2Si$  para ligas 6xxx.

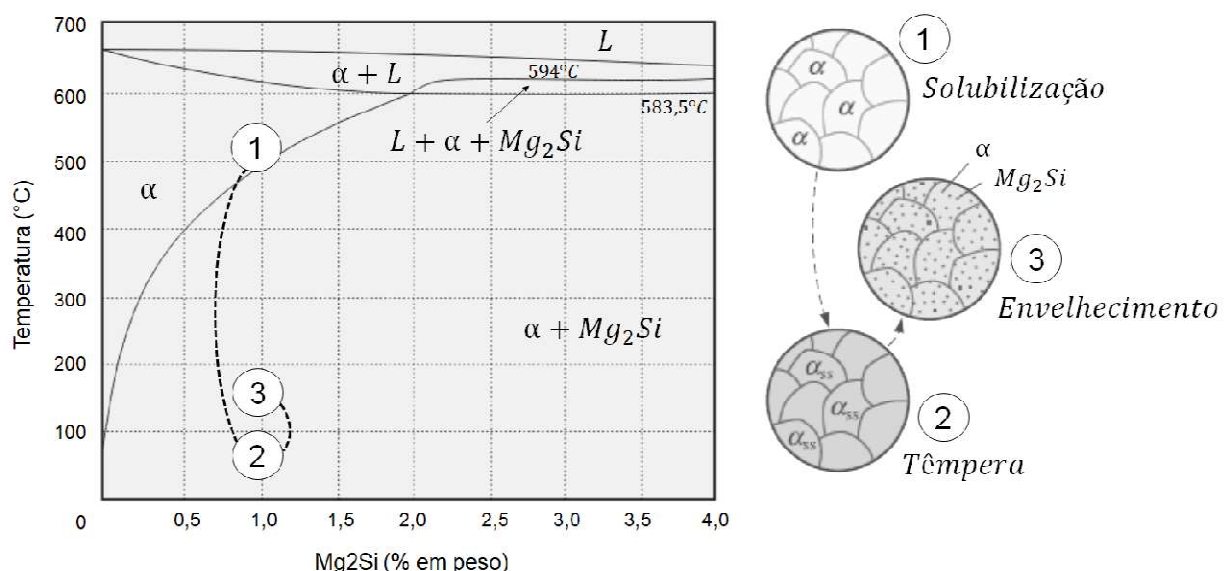


Figura 7- Diagrama de fase esquemático da liga Al-Mg-Si [42].

O tratamento térmico das ligas AA6xxx envolve a solução dos elementos de liga a temperatura elevada (solubilização), em torno de 520 a 550°C, seguida da têmpera à temperatura ambiente. Por fim, é realizado o envelhecimento a temperatura ambiente ou em temperaturas elevadas (envelhecimento artificial) na faixa de temperatura de 160 a 180°C [43].

No tratamento de solubilização, a liga é aquecida acima da temperatura solvus e enriquecida de elementos de liga até que uma solução sólida homogênea ( $\alpha$ ) seja produzida. Os precipitados de Mg e Si são dissolvidos nesta etapa e qualquer

segregação presente na liga original é reduzida. Na têmpera, o material é resfriado rapidamente formando uma solução sólida supersaturada (SSS) de  $\alpha$  que contém excesso de Mg e Si e não é uma estrutura de equilíbrio. Não há tempo para a difusão dos átomos para potenciais locais de nucleação e, portanto, precipitados não se formam.

No envelhecimento, é produzida uma precipitação finamente dispersa de partículas de segunda fase. No caso de um envelhecimento artificial, a solução sólida supersaturada é aquecida abaixo da temperatura solvus. Nessa temperatura, os átomos difundem apenas curtas distâncias. Como a solução supersaturada não é estável, os átomos se difundem para vários locais de nucleação e os precipitados crescem. A formação de um precipitado finamente disperso na liga é o objetivo do processo de endurecimento por precipitação. Os precipitados finos impedem o movimento das discordâncias, forçando as discordâncias a cortar as partículas precipitadas ou contorná-las. Ao restringir o movimento de discordâncias durante a deformação, a liga é endurecida.

O envelhecimento em temperatura ambiente ou em temperatura elevada gera a precipitação de fases metaestáveis ou de transição fora do equilíbrio. A sequência da precipitação em ligas AA6xxx é a seguinte [44]:



As reações de precipitação são bastante complexas. A fase de equilíbrio é de difícil nucleação e sua formação é precedida por uma série de precipitados metaestáveis. Guinier e Preston foram os primeiros a descobrir muitos dos fenômenos de envelhecimento. Os primeiros precipitados a se formar são, portanto, conhecidos como Zonas GP. Nas ligas Al-Mg-Si, existem pelo menos dois tipos de fases nas chamadas zonas GP, designadas por GP-I e GP-II [45]. Como mostra a Figura 9, as Zonas GP-II, também denominadas  $\beta''$ , apresentam menor coerência comparativamente com as Zonas GP-I [46].

As Zonas GP se desenvolvem em  $\beta'$  ( $Mg_2Si$ ), que é coerente com a matriz e gera o endurecimento máximo. A fase  $\beta'$  possui estrutura hexagonal compacta e é

constituída por precipitados de transição ricos em silício. A razão Mg/Si é menor do que a fase de equilíbrio  $\beta$  [47].

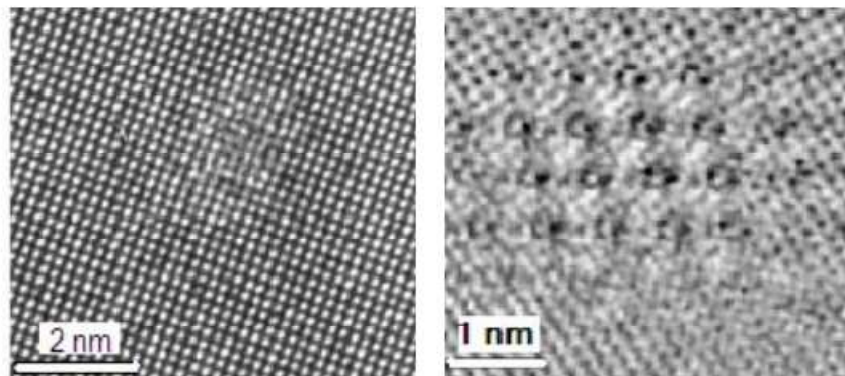


Figura 8 - Zonas GP: (a) Zonas GP-I na liga AA 6082 envelhecida a 150°C durante 11h. (b) Zonas GP-II na liga AA 6082 envelhecida a 150°C durante 2 dias [46].

A fase  $\beta$ , de estrutura cúbica de faces centrada, é a fase de equilíbrio do sistema. Os precipitados  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) são incoerentes com a matriz reduzindo o endurecimento do material após envelhecimento. A formação deste composto gera o estágio conhecido como superenvelhecimento, caracterizado pela diminuição da dureza.

#### 4. Procedimento Experimental

Este trabalho se propõe a produzir um flange da liga de alumínio AA 6351 a partir de materiais descartados de outros processos de conformação mecânica. A sucata utilizada está disposta na forma de discos. Estes discos são empilhados para formar a geratriz empregada no processo de forjamento a quente em matriz fechada. O aquecimento prévio e a deformação plástica são responsáveis por unir os discos dando origem a uma peça maciça. O produto gerado com o reaproveitamento de sucata é comparado com uma peça produzida a partir de uma geratriz cilíndrica submetida ao mesmo processamento.

A metodologia empregada neste trabalho é apresentada na Figura 10.

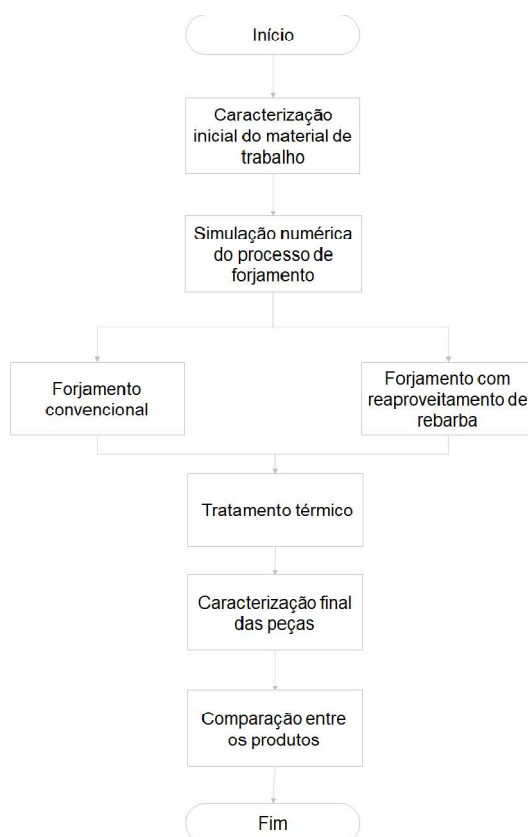


Figura 9 - Fluxograma das etapas desenvolvidas neste trabalho.

Cada uma das etapas destacadas no fluxograma da Figura 8 são apresentadas nos tópicos a seguir.

#### 4.1 Caracterização Inicial do Material de Trabalho

A liga de alumínio AA 6351 foi utilizada como material de trabalho no desenvolvimento desta pesquisa. O material está disposto na forma de barras cilíndricas com diâmetro de 41,5mm. Este material foi selecionado para ser analisado por se tratar de uma liga não ferrosa de elevada resistência a oxidação. Além disso, as ligas de alumínio representam uma das classes de materiais mais relevantes dentro da indústria de forjamento.

O material foi submetido a análise química para identificação da composição química. A análise química do percentual de massa dos elementos foi realizada no Laboratório de Fundição (LAFUN) desta Universidade. O equipamento utilizado foi um espectrômetro de emissão óptica Q2ION, marca BRUKER.

A partir da seção transversal das barras do material foram cortadas 3 amostras, posteriormente submetidas a análise metalográfica. Após o corte, as amostras foram embutidas e lixadas em lixas de granulação 200, 300, 400, 600 e 1200. Depois de lixadas, as amostras foram polidas com alumina em suspensão de 1,0 e 0,3  $\mu\text{m}$ , e o ataque foi realizado com reagente água régia (Depois de lixadas, as amostras foram polidas com alumina em suspensão de 1,0 e 0,3  $\mu\text{m}$ , e o ataque foi realizado com reagente água régia (mistura de ácido clorídrico (HCl) e ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) concentrado numa proporção de 3:1). As peças foram analisadas em um microscópio óptico da marca Olympus, modelo Gx51.

A dureza do material foi avaliada utilizando o microdurômetro Insize Hardness Tester ISH-TDV1000. Foram realizadas 10 medições em cada amostra. O valor médio foi tomado como o valor de dureza do material.

## 4.2 Simulação Numérica do Processo de Forjamento

Para avaliar a viabilidade do processo de forjamento centro deste trabalho, a análise numérica via elementos finitos foi realizada. O software QForm foi utilizado na investigação numérica. Devido a simetria da peça de trabalho, uma abordagem 2D foi empregada. Além disso, apenas as geratrizes foram consideradas como deformáveis, com comportamento elasto-plástico, sendo as ferramentas consideradas rígidas. Estas estratégias possibilitam refinar os cálculos e tornar o tempo de computação menor. A Figura 11 mostra a configuração inicial do modelo numérico do processo de forjamento com reaproveitamento de sucatas.

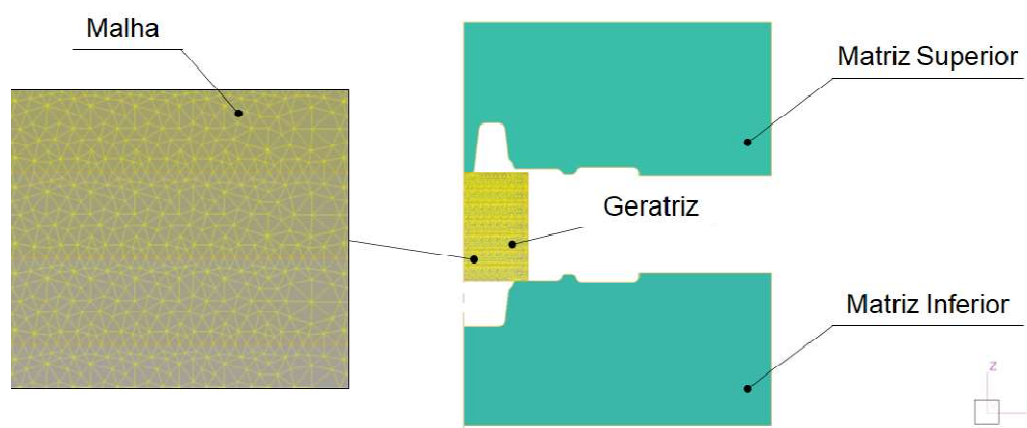


Figura 10 - Modelo numérico 2D do processo de forjamento com reaproveitamento de sucatas.

As informações referentes ao material de trabalho contidas nas Tabelas 6, 7 e 8 foram inseridas na biblioteca do software. A equação de Hensel-Spittel (Tabela 9) foi utilizada para caracterizar o comportamento mecânico do material quando deformado a quente. As informações referentes ao material das ferramentas são encontradas na biblioteca do software. A Tabela 10 lista os parâmetros térmicos, mecânicos e operacionais utilizados na simulação numérica.

Tabela 9 - Parâmetros térmicos, mecânicos e operacionais utilizados na simulação numérica do processo de forjamento a quente da liga AA 6351.

Tipo de Malha	Triangular
Material da geratriz	AA 6351
Tamanho da malha da geratriz	0,5 mm

Temperatura inicial da geratriz	500°C
Material das ferramentas	AISI H13
Temperatura inicial das ferramentas	100°C
Coefficiente de atrito	0,3
Velocidade da ferramenta	5mm/s

Na simulação numérica do forjamento com reaproveitamento de sucata são utilizadas várias geratrizes. O coeficiente de atrito entre as peças foi definido como sendo igual a 0,8. O coeficiente de atrito entre as geratrizes e as ferramentas é o mesmo do processo convencional ( $\mu=0,3$ ).

### 4.3 Forjamento

#### 4.3.1 Peça Forjada

Neste trabalho, é realizado o forjamento de um flange. Flanges são peças axissimétricas, comumente produzidas por forjamento, utilizadas em sistemas de suspensão, direção e transmissão, entre outros [48]. A Figura 12 mostra o detalhamento da peça forjada.

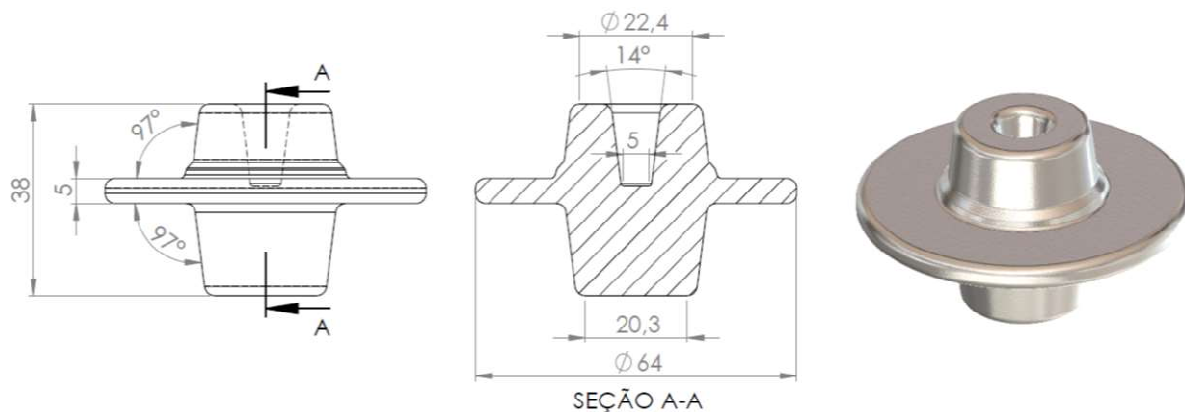


Figura 11 - Detalhamento da peça forjada neste trabalho.

#### 4.3.2 Ferramentas de Forjamento

As ferramentas utilizadas no processo de forjamento são mostradas em corte na Figura 13 com destaque para a região da sucata. As matrizes foram cedidas pelo Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica (CBCM) para a realização deste trabalho.

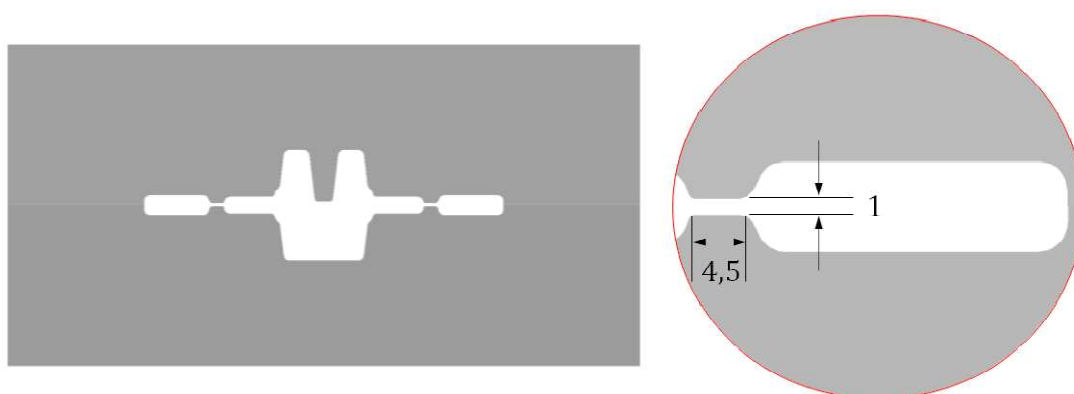


Figura 12 - Ferramentas utilizadas no forjamento.

As ferramentas são produzidas no aço ferramenta AISI H13. Para atingir os requisitos mecânicos impostos pelo processo, as ferramentas são temperadas e revenidas. Nesta condição, o material é capaz de manter uma combinação aprimorada de dureza e resistência a fratura em temperaturas elevadas [49]. Isso torna este aço adequado para o trabalho a quente, sendo comumente utilizado como material para ferramentas do processo de forjamento a quente.

#### 4.3.3 Forjamento com Reaproveitamento de Sucata

O processo proposto, com a reutilização de materiais descartados de outras operações de conformação mecânica, é mostrado esquematicamente na Figura 14.



O objetivo é reaproveitar sucatas circulares para produzir peças axissimétricas pelo processo de forjamento a quente. Sucatas circulares são comumente obtidas no processamento de peças tubulares, como em operações de extrusão. Após a conformação mecânica, a sucatação, geralmente realizada por puncionamento, dá origem a sucatas com baixa espessura e boas tolerâncias geométricas associadas ao processo de corte. Dessa forma, o emprego deste material na forma de discos para gerar um produto de valor agregado na própria linha de forjamento tem potencial para reduzir significativamente os custos de produção.

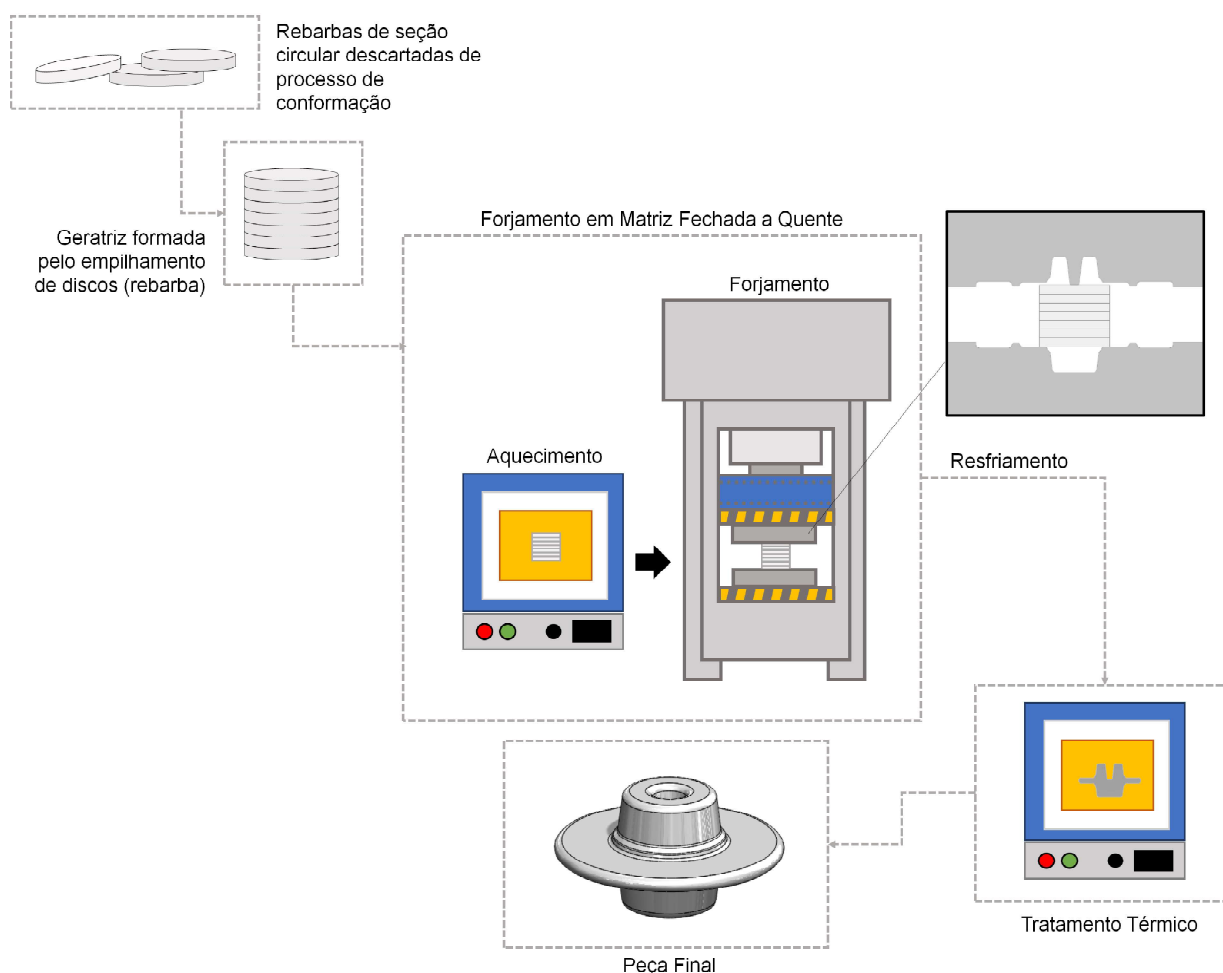


Figura 13 - Processo de forjamento com reaproveitamento de sucatas.

Devido a pequena espessura destas sucatas, a proposta é utilizar um conjunto de discos (sucatas) empilhados para gerar a geratriz do processo de forjamento a quente. A geratriz é formada pelo empilhamento de 7 discos de 5mm de

espessura e 41,5mm de diâmetro. A Figura 15 mostra a geratriz formada por discos empilhados e a geratriz utilizada no processo convencional de forjamento.

A união dos discos se dá como resultado do aquecimento e deformação plástica induzidos pelo forjamento a quente. Por esta razão, a geratriz foi aquecida a 500°C por 140min em forno resistivo marca SANCHIS. Após o aquecimento, o conjunto de discos foi cuidadosamente transferido para as ferramentas de forjamento montadas em uma prensa hidráulica marca FKL com capacidade de 600t e velocidade de 5mm/s.

As ferramentas foram pré aquecidas por contato com chapas de aço a 500°C. No momento do forjamento, a temperatura das superfícies das ferramentas era de aproximadamente 100°C. Para reduzir o atrito entre o material de trabalho e as ferramentas, as cavidades das matrizes pré aquecidas foram cobertas pelo lubrificante líquido a base de grafite Lubrodal marca Fuchs.



Figura 14 - Geratrizes utilizadas no processo de forjamento com reaproveitamento de sucata (esquerda) e forjamento convencional (direita).

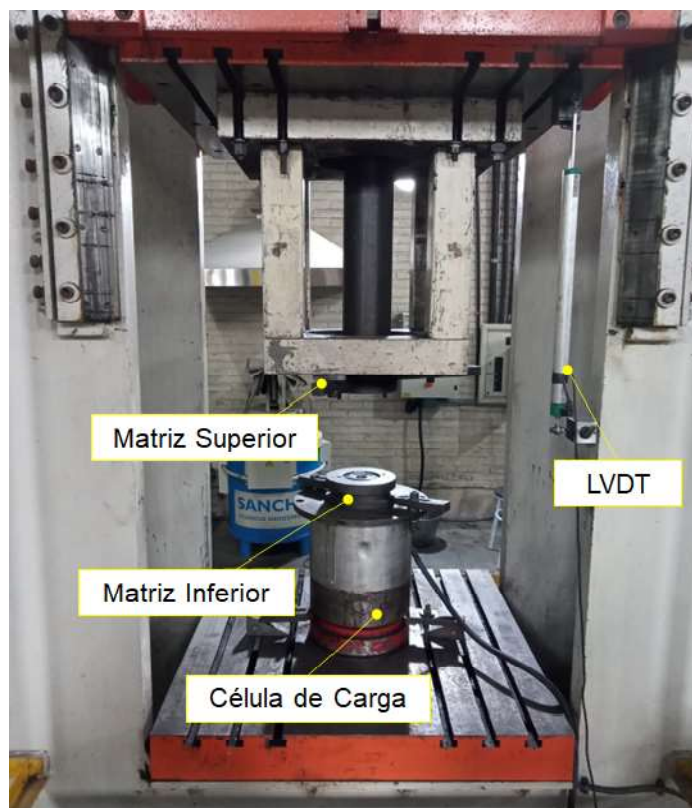


Figura 15 – Configuração experimental para a realização do forjamento.

Após o posicionamento da geratriz na matriz inferior, a prensa é acionada e a matriz superior movimentada-se até o fechamento completo das ferramentas. Em seguida, a mesa superior da prensa é elevada e a peça forjada é extraída.

Durante o processo, dados de força e deslocamento são obtidos. O deslocamento da prensa foi monitorado por um transdutor de deslocamento variável linear (*Linear Variable Differential Transformer-LVDT*) e a força por uma célula de carga montada na mesa inferior da prensa (Figura 16). Os sinais foram adquiridos pelo aparelho Spider 8 da marca HBM e tratados pelo software Catman Express.

#### 4.3.4 Forjamento Convencional

A peça obtida pelo procedimento apresentado na seção anterior foi comparada com uma peça produzida pelo processo convencional de forjamento. No forjamento convencional, a geratriz é cilíndrica com 35mm de comprimento e 41,5mm de diâmetro (Figura 15).

As ferramentas, a metodologia e os parâmetros empregados no forjamento convencional foram os mesmos utilizados no forjamento com reaproveitamento de sucata.

#### 4.4 Tratamento Térmico

As peças obtidas nos processos apresentados nas seções 4.3.3 e 4.3.4 foram submetidas ao tratamento térmico T6 para melhorar as propriedades mecânicas e a microestrutura da liga.

As peças foram aquecidas a 505°C por 6 horas para a solução dos elementos de liga e, em seguida, temperadas em água. Posteriormente foi realizado o tratamento de envelhecimento, com o aquecimento a uma temperatura de 170°C por 6 horas. O forno resistivo utilizado no tratamento térmico foi o mesmo empregado no aquecimento das geratrizes para a realização do forjamento a quente.

#### 4.5 Caracterização Final das Peças

Os flanges forjados e tratados termicamente foram cortados transversalmente para a realização de análise microestrutural e de dureza. A investigação microestrutural seguiu a mesma metodologia apresentada na seção 4.1. Foram obtidos os perfis de microdureza das peças seguindo as direções mostradas na Figura 17.

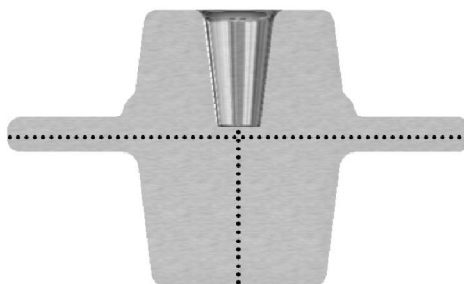


Figura 16 –Perfil de microdureza das peças forjadas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da metodologia apresentada anteriormente. Paralelamente, é realizada a discussão referente aos resultados alcançados.

### 5.1 Caracterização Inicial do Material de Trabalho

Os resultados em percentual de massa da análise química do material de trabalho são listados na Tabela 3-1. A composição está dentro da faixa nominal encontrada na literatura [38].

Tabela 10- Resultado da análise química da liga AA 6351.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn	Al
1,19	0,22	0,07	0,45	0,45	0,04	0,01	Restante

A microestrutura da liga AA6351 na condição recebida é mostrada na Figura 18. A microestrutura é formada por precipitados de Mg e Si distribuídos em uma matriz de alumínio (fase  $\alpha$ ). É possível observar a direcionalidade da microestrutura como resultado da conformação mecânica realizada na produção das barras do material. Os grãos da fase  $\alpha$  são alongados na direção da conformação mecânica.

Nesta condição, a dureza do material apresentou valores entre 78 e 86 HV, com uma dureza média igual a 82 HV. Este valor de dureza é atribuído ao endurecimento por precipitação e pela deformação plástica (encruamento) induzida pelo processo de conformação mecânica realizada na produção das barras do material.

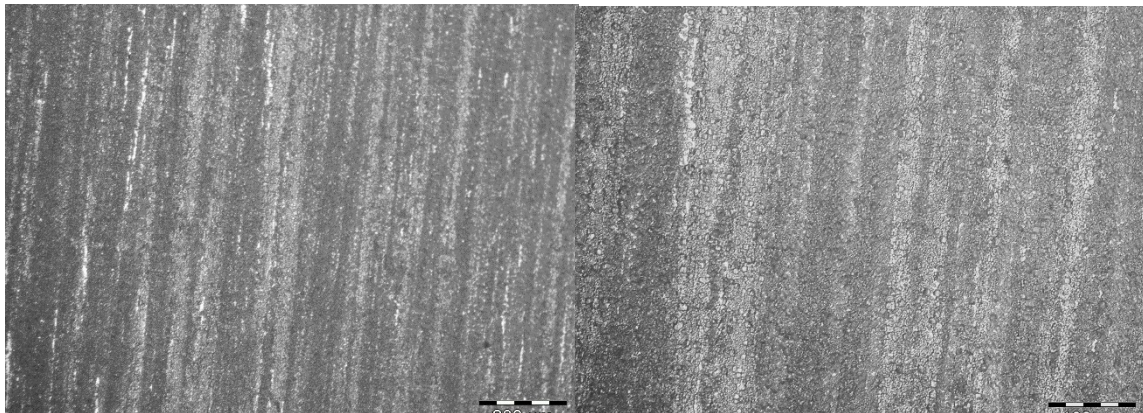


Figura 17 - Micrografia da seção transversal da liga AA6351 na condição laminada com aumento de 100x (esquerda) e 200x (direita).

## 5.2 Simulação Numérica

A simulação numérica é uma ferramenta fundamental no projeto de processos de conformação mecânica, possibilitando a otimização das operações e redução de custos. A partir da análise numérica é possível avaliar parâmetros importantes dos processos e, em caso de necessidade, alterá-los sem que testes práticos sejam realizados. Neste capítulo, as análises via simulação numérica dos processos investigados são apresentadas.

A Figura 19 mostra o resultado numérico referente ao contato das peças após o fechamento das matrizes para o forjamento de sucata (Figura 19 (a)) e forjamento convencional (Figura 19 (b)). Os pontos em azul escuro destacam as interfaces de contato entre a geratriz e as ferramentas. Os pontos em azul claro destacam as interfaces de contato entre as geratrizes. Observa-se que o fluxo de material durante o fechamento das matrizes foi capaz de garantir o preenchimento completo das cavidades das matrizes para ambos os processos.

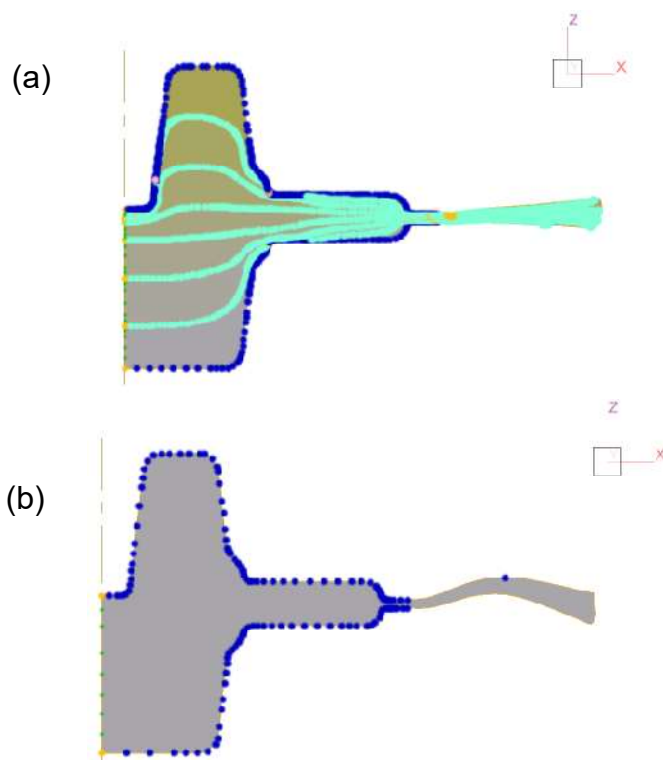


Figura 18 - Resultado numérico referente ao contato para (a) o forjamento de sucata e (b) forjamento convencional.

As distribuições de temperatura ao longo das peças ao final do forjamento de sucata (Figura 20 (a)) e forjamento convencional (Figura 20 (b)) são mostradas na Figura 20. Devido à baixa velocidade da prensa hidráulica, o tempo de contato entre as geratrizes e as ferramentas é prolongado gerando uma redução significativa da temperatura das peças. A queda térmica ainda é favorecida pela alta condutividade térmica característica de ligas de alumínio. Os valores mínimos são de 274,3°C e 279,8°C para a peça obtida a partir de discos empilhados e para a peça forjada a partir de geratriz cilíndrica, respectivamente. Os pontos mais frios estão localizados nas regiões que mantiveram maior tempo de contato com as matrizes em baixa temperatura.

As temperaturas máximas observadas são de 427,4°C para a peça obtida a partir de discos empilhados e 388,5°C para a peça forjada convencionalmente. Estes valores foram encontrados na região do flange para ambas as peças. Na peça forjada a partir de sucatas, o atrito gerado entre os discos durante a extrusão radial do

material é convertido em calor e tende a manter a temperatura mais elevada. Isso justifica a ocorrência de valores mais elevados de temperatura após a conformação.

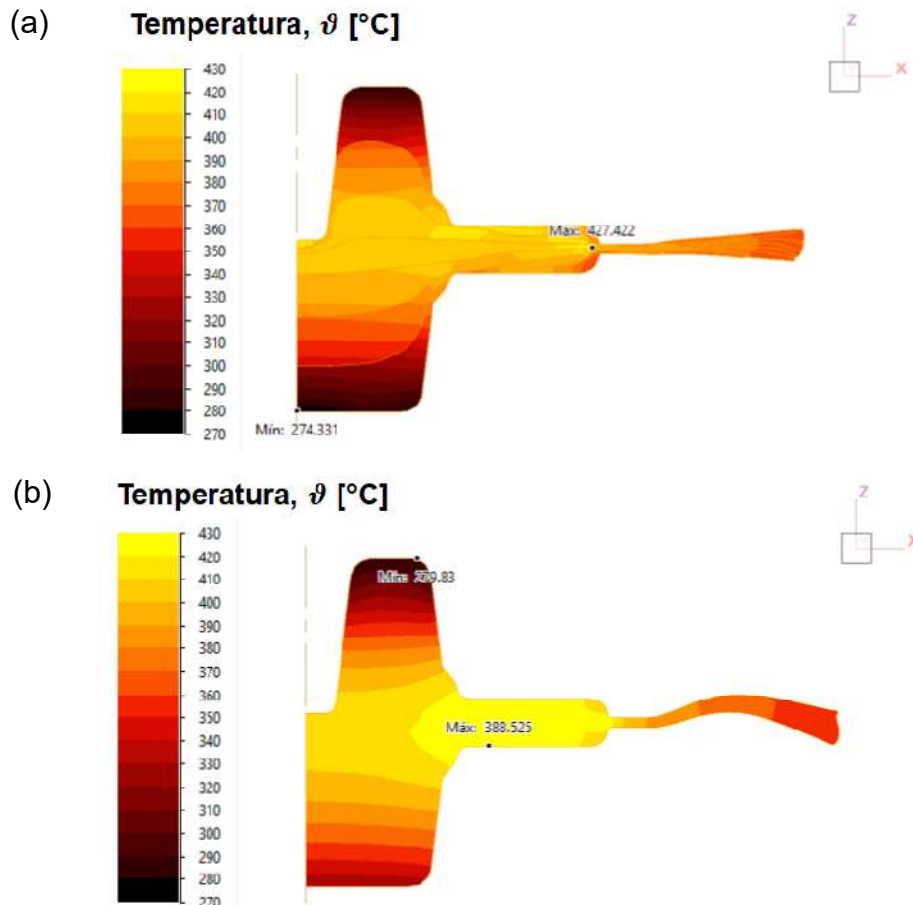


Figura 19 - Resultado numérico referente a distribuição da temperatura para (a) o forjamento de sucata e (b) forjamento convencional.

A Figura 21 mostra o resultado numérico referente a distribuição da deformação equivalente nas peças após o fechamento das matrizes para o forjamento de sucata (Figura 21 (a)) e forjamento convencional (Figura 21 (b)). A utilização de uma geratriz formada por discos empilhados não alterou significativamente a distribuição e a magnitude da deformação equivalente. Nas duas geometrias analisadas, os valores mais elevados de deformação estão na região do flange e no canal da sucata onde a redução em altura é mais severa. Os valores máximos encontrados são de 7,7 e 8,0 para a peça obtida a partir de discos empilhados e para a peça forjada a partir de geratriz cilíndrica, respectivamente. No corpo do flange os



níveis de deformação são baixos, com mais de 50% do volume da peça com deformações inferiores a 2.

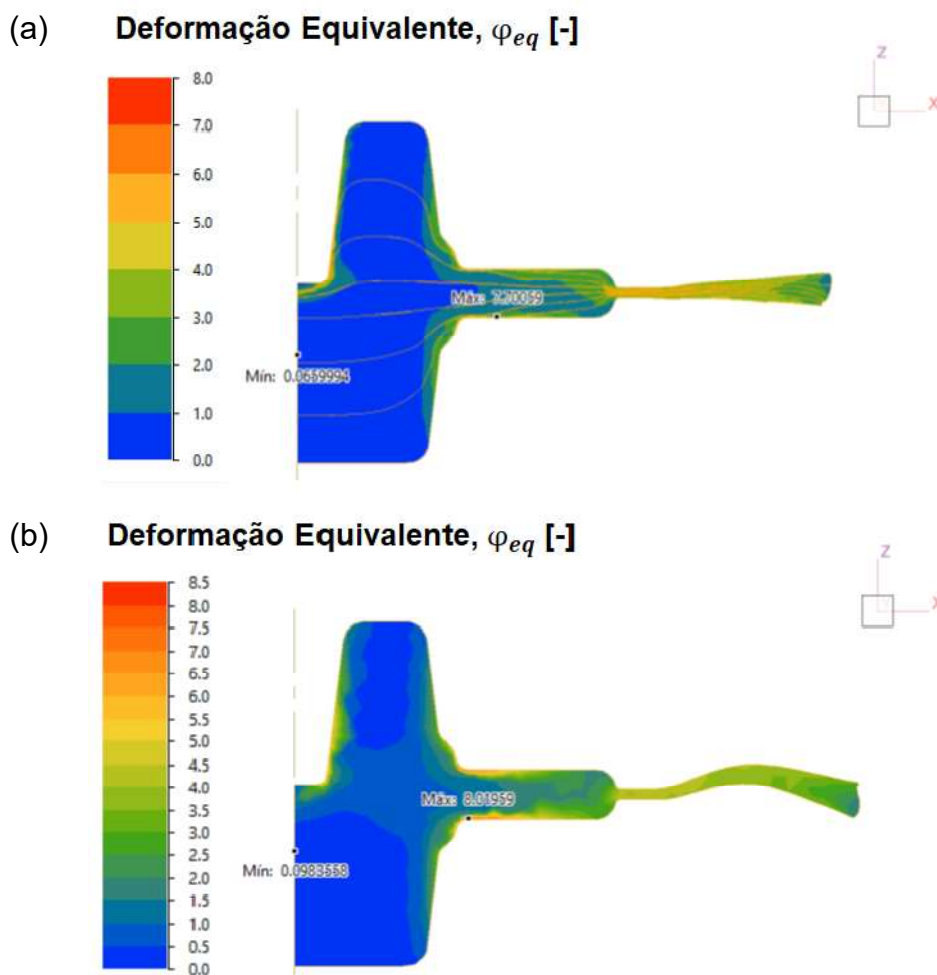


Figura 20 - Resultado numérico referente a distribuição da deformação equivalente para (a) o forjamento de sucata e (b) forjamento convencional.

As distribuições da tensão equivalente ao longo das peças ao final do forjamento de sucata (Figura 22 (a)) e forjamento convencional (Figura 22 (b)) são mostradas na Figura 22. A distribuição da tensão equivalente também não foi alterada expressivamente devido a utilização de uma geratriz formada por discos empilhados. Nas duas geometrias as tensões desenvolvidas são brandas com valores máximos de 104 MPa para a peça obtida a partir de discos empilhados e 107 MPa para a peça forjada convencionalmente. Estes valores são encontrados na entrada do canal de

sucata. Os valores moderados de tensão devem-se a baixa resistência mecânica da liga AA6351 em altas temperaturas.

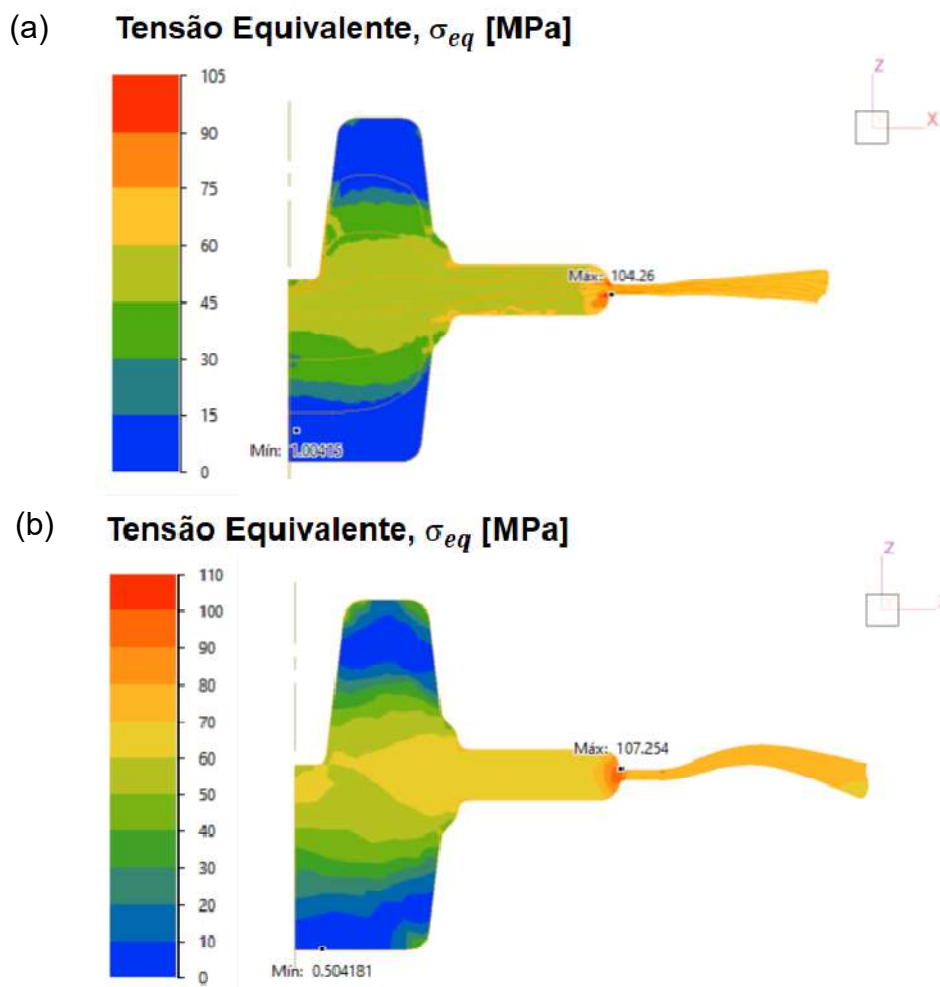


Figura 21 - Resultado numérico referente a distribuição da tensão equivalente para (a) o forjamento de sucata e (b) forjamento convencional.

A Figura 23 mostra o resultado numérico referente a distribuição da velocidade de deformação nas peças após o forjamento de sucata (Figura 23 (a)) e forjamento convencional (Figura 23 (b)). Devido à baixa velocidade da ferramenta os valores de velocidade de deformação se mantêm baixos ao longo de praticamente toda a geometria dos flanges forjados. Valores superiores a 5 1/s são observados apenas na entrada do canal de sucata. Nesta região os valores máximos de

velocidade de deformação são encontrados, com 69,6 1/s para a peça obtida a partir de discos empilhados e 97,9 1/s para a peça forjada convencionalmente.

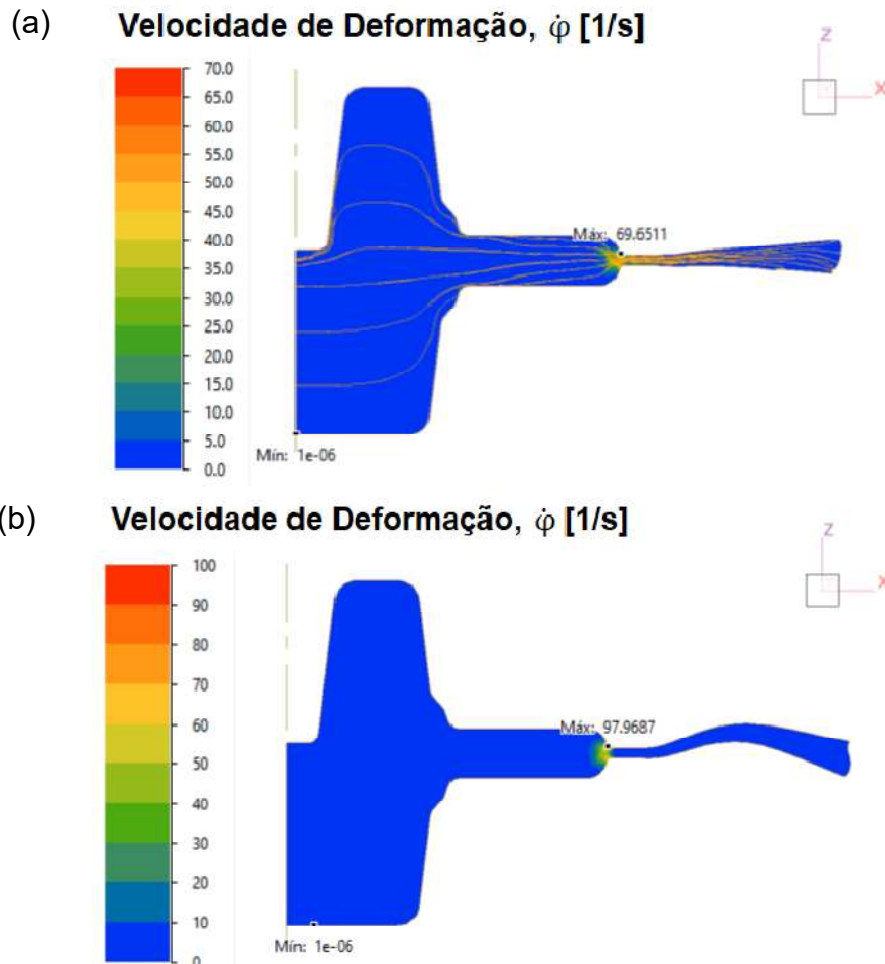


Figura 22 - Resultado numérico referente a distribuição da velocidade de deformação para (a) o forjamento de sucata e (b) forjamento convencional.

A Figura 24 mostra o avanço da força de forjamento com o deslocamento da matriz superior para os dois processos analisados. As duas curvas apresentam o mesmo comportamento. Inicialmente, a força aumenta gradualmente até um deslocamento de aproximadamente 25mm. Neste ponto, a curva inclina-se, com a força aumentando drasticamente devido ao preenchimento parcial das cavidades das matrizes e extrusão do material no canal da sucata. Ao final do processo a força aumenta radicalmente, com a curva tornando-se praticamente vertical. Isso é resultado do preenchimento dos detalhes das peças e fechamento das matrizes.

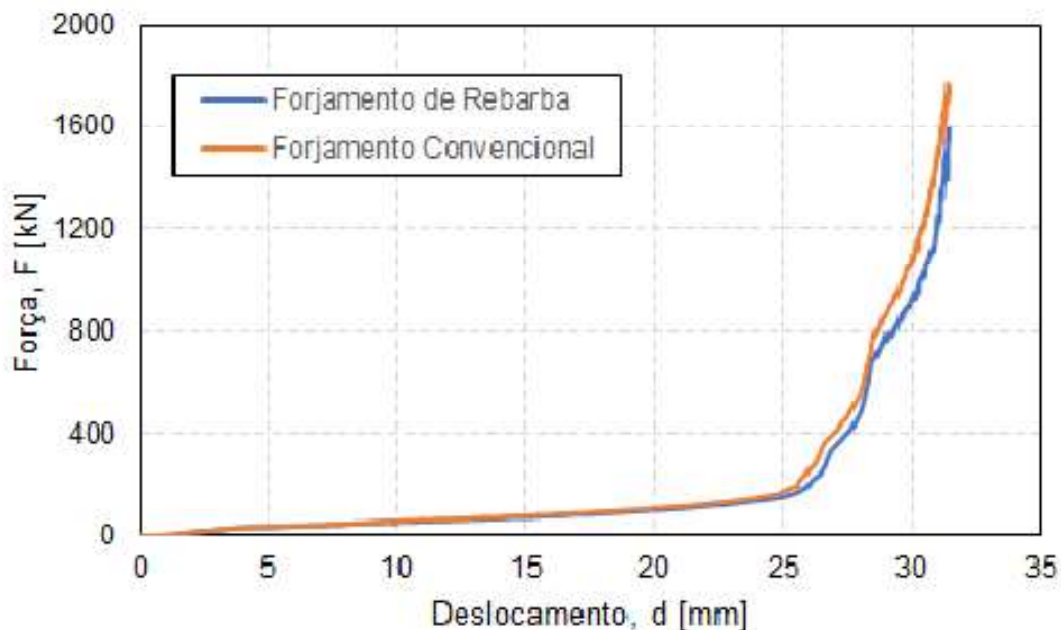


Figura 23 - Evolução da força de forjamento com o deslocamento da matriz superior para os dois processos analisados (forjamento de sucata e forjamento convencional).

Apesar da evolução da força dos processos apresentarem comportamento semelhante, os valores máximos atingidos foram distintos. A força requerida no processo convencional foi de 1750 kN, enquanto o forjamento de sucatas atingiu a força máxima de 1590 kN. O forjamento convencional requer 9% a mais de força para a conformação do flange. A força requerida reduzida do forjamento de sucatas está associado a influência do atrito. A conformação de uma pilha de discos resulta em uma influência menor do atrito, em comparação a geratriz cilíndrica utilizado no forjamento convencional. Em um corpo cilíndrico, o efeito do atrito se propaga através de toda a geometria, porém em um conjunto de discos, o efeito do atrito é reduzido consideravelmente de um disco para o outro [48].

A simulação numérica dos processos investigados demonstrou a viabilidade da realização do forjamento do flange seguindo o processamento convencional, com uma geratriz cilíndrica, e a partir de discos empilhados (sucatas). As tensões geradas nos processos são moderadas e as ferramentas disponíveis possuem resistência mecânica para suportá-las sem a ocorrência de danos. Além disso, as forças

requeridas nos processos são inferiores a capacidade da prensa disponível para a realização dos experimentos de forjamento.

A análise numérica permitiu a definição do número ótimo de discos para o forjamento com sucatas. Foram simulados processos com geratrizes formadas por 5, 6 e 7 discos. O preenchimento completo das matrizes só foi possível quando 7 discos foram utilizados. Nesta condição a conformação completa da peça ocorre, porém requer a formação de considerável sucata radial.

### 5.3 Processos de Forjamento

As peças produzidas pelos processos de forjamento de sucatas (Figura 25 (a)) e convencional (Figura 25 (b)) são mostradas na Figura 25. Como previu a simulação numérica, as peças foram forjadas com o preenchimento completo das matrizes e um volume considerável de sucata foi gerado. A peça produzida a partir de uma geratriz cilíndrica apresenta sucata relativamente simétrica, enquanto a sucata da peça produzida a partir de discos empilhados é assimétrica. Isso demonstra que durante o forjamento os discos não se mantiveram perfeitamente concêntricos e algum deslizamento entre os discos ocorreu. Este fato afetou a geometria da sucata, mas não gerou qualquer defeito geométrico na região de interesse da peça.

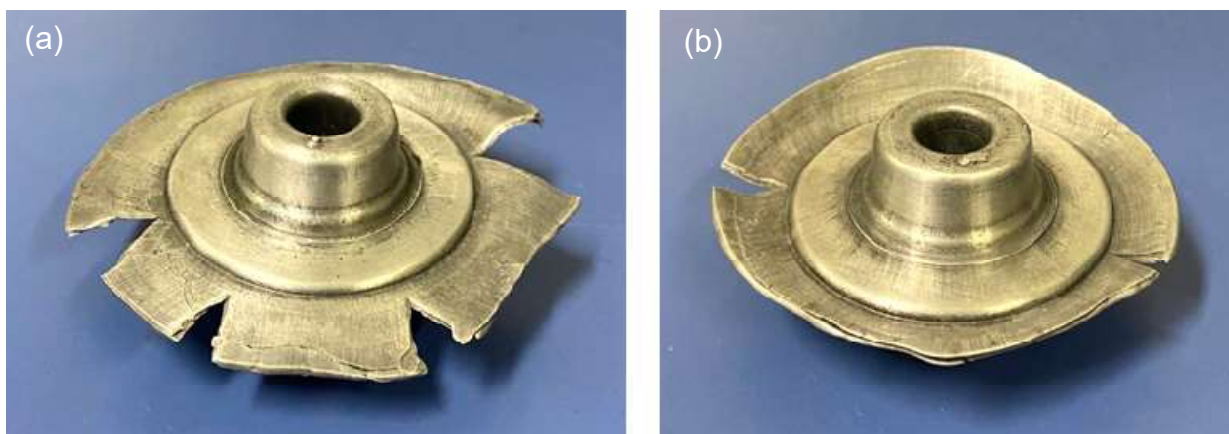


Figura 24 – Peças produzidas pelos processos de (a) forjamento de sucatas e (b) forjamento convencional.

O volume excessivo de material necessário para garantir o preenchimento completo das matrizes acarretou a formação de trincas a partir da borda da sucata em ambos os processos analisados. A fratura não se propagou até a região de interesse da peça (flange) e manteve-se apenas na região da rebara, não afetando a qualidade dos produtos finais dos processos.

As peças oriundas dos forjamentos foram sucataadas em torno mecânico e as peças finais produzidas são mostradas na Figura 26. Os flanges produzidos a partir de sucatas não apresentam trincas ou danos específicos na superfície são idênticos aqueles forjados a partir de geratrizes cilíndricas.

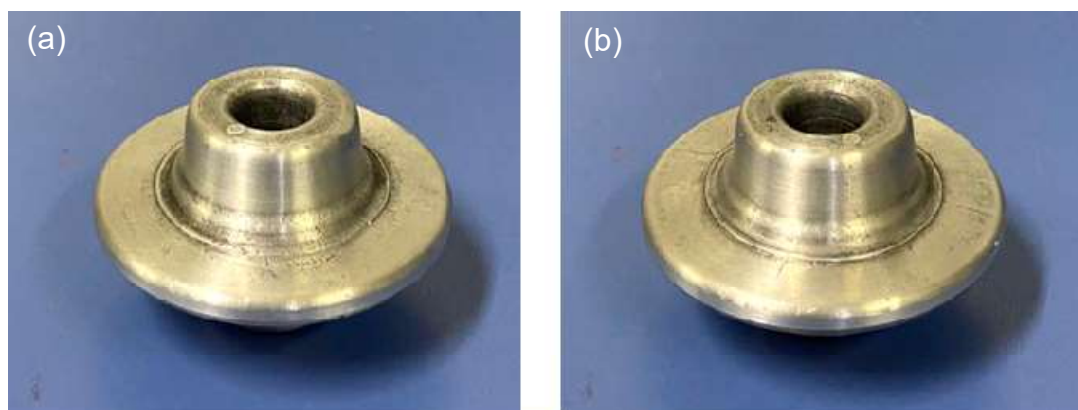


Figura 25 - Peças sucataadas produzidas pelos processos de (a) forjamento de sucatas e (b) forjamento convencional.

Para avaliar a integridade interna dos flanges, as peças foram cortadas transversalmente e analisadas macro e microscopicamente. A Figura 27 mostra a análise macroscópica da seção transversal das peças e a Figura 28 mostra a análise microscópica de três regiões distintas da peça forjada a partir de sucatas.

A peça forjada convencionalmente apresenta fibragem mecânica contínua como resultado da deformação mecânica. Esta é uma das vantagens técnicas do forjamento em matriz fechada em relação a outros processos de fabricação. Neste processo, a conformação mecânica induz a formação de uma fibra na estrutura do material que segue o contorno do componente sem interrupção, levando a um aumento da resistência à fadiga. Esta fibragem mecânica em combinação com o

refinamento do grão induzido pela deformação, influenciam os processos de transformação e/ou precipitação que ocorrem durante o tratamento térmico e contribuem para o aumento da resistência [49].

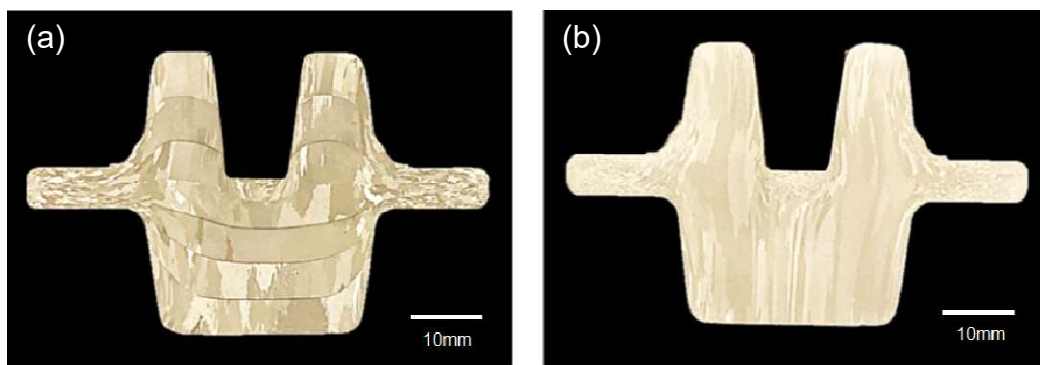


Figura 26 – Análise macroscópica das peças produzidas pelos processos de (a) forjamento de sucatas e (b) forjamento convencional.

A peça forjada a partir de discos empilhados apresenta fibragem mecânica, contudo, a estrutura da fibra não é contínua em toda a geometria. A fibra é interrompida em pontos em que a união metalúrgica entre os discos não ocorreu durante o processo de forjamento. Na região do flange, submetida a intensa deformação, a ligação foi perfeita e a fibragem é contínua. Por outro lado, no centro da peça, região de menor deformação, não houve ligação completa entre os discos. Percebe-se ainda, que na superfície a união é completa para todas as interfaces de contato entre discos. Porém, conforme se aproxima do centro da peça, a ligação vai sendo gradualmente enfraquecida.

Segundo KONG et al. (2009), no processo de soldagem por forjamento a temperatura é o parâmetro mais significativo e que pode influenciar fortemente a resistência à tração da junta. O aquecimento em conjunto com a pressão de forjamento elimina defeitos e micro-vazios na interface de ligação [50]. Portanto, é perceptível que a temperatura e a pressão não foram suficientes para garantir a união completa dos discos no forjamento do flange.

Para a obtenção de uma peça com união metalúrgica completa entre os discos que formam a geratriz seria necessário aumentar a temperatura e/ou a pressão

de forjamento. A temperatura utilizada no forjamento está no limite máximo indicado para esta liga, o que torna a alteração deste parâmetro inviável. Dessa forma, acredita-se que para a obtenção de um flange forjado a partir de discos empilhados seria necessária uma pressão de forjamento mais elevada e que se distribua de forma homogênea em toda a geometria da peça.

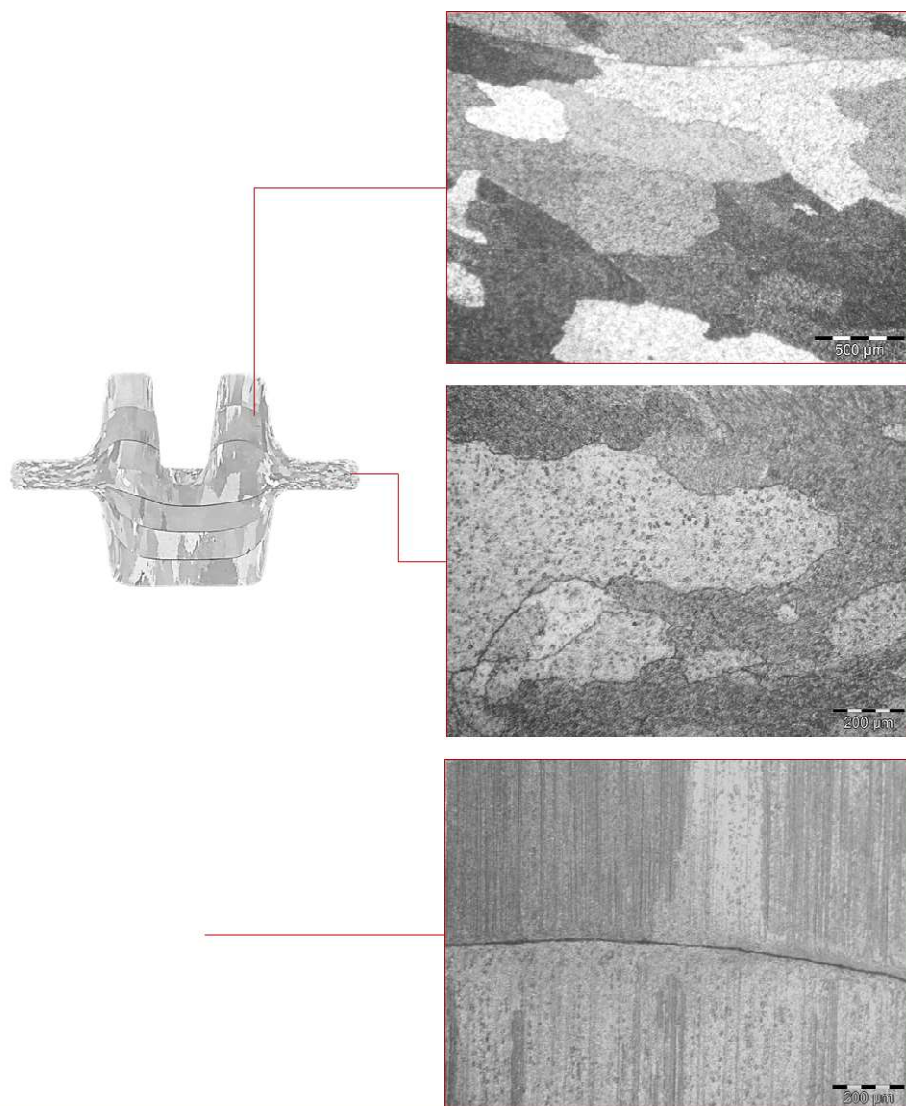


Figura 27 - Análise microscópica das peças produzidas pelos processos de (a) forjamento de sucatas e (b) forjamento convencional.

A Figura 29 mostra o resultado experimental (linha contínua) do avanço da força de forjamento com o deslocamento da matriz superior para os dois processos



analisados. No gráfico ainda estão plotados os dados obtidos numericamente (Figura 24). Como mostrou as simulações, o processo convencional requereu um nível superior de força para a o forjamento do flange. A força máxima requerida no forjamento convencional foi de 1660 kN e 1510 kN para o forjamento de sucata. Estes valores são muito próximos daqueles calculados numericamente. O desvio máximo entre os resultados experimentais e numéricos não ultrapassou 5% para os dois processos analisados. Além disso, o comportamento das curvas também convergiu satisfatoriamente. Estes resultados demonstram a capacidade da simulação numérica em prever a carga requerida para ambos os processos. Ainda, a correlação positiva dos resultados valida a análise numérica apresentada anteriormente.

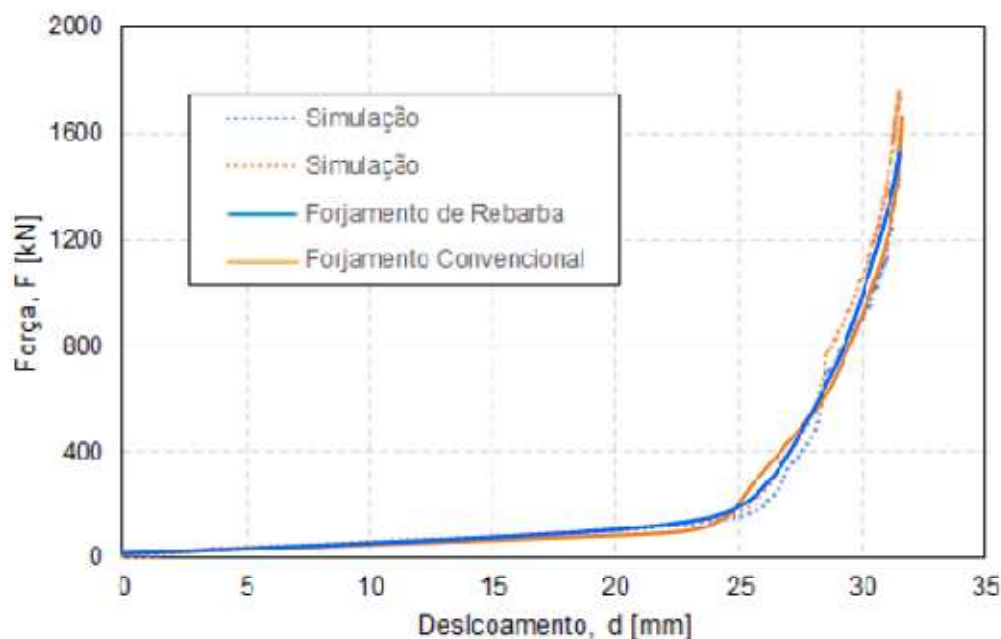


Figura 28– Resultados experimentais e numéricos da evolução da força de forjamento com o deslocamento da matriz superior para os dois processos analisados (forjamento de sucata e forjamento convencional).

A concordância entre os resultados de força numéricos e experimentais também legitimam os valores de coeficiente de atrito empregados nas simulações numéricas. Os valores de  $\mu=0,3$  e  $\mu=0,8$  para quantificar, respectivamente, o atrito desenvolvido na interface de contato entre geratriz/matrizes e geratriz/geratriz, mostraram-se adequados.

## 5.4 Tratamento Térmico

A Figura 30 mostra a microestrutura das peças após a realização do tratamento térmico para aprimoramento das propriedades mecânicas.

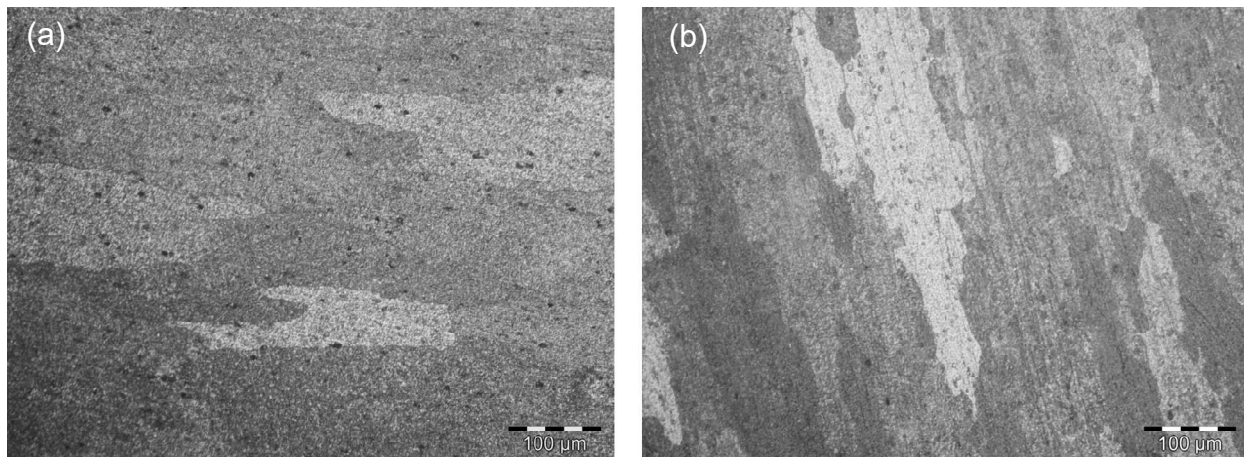


Figura 29 - Microestrutura das peças produzidas pelos processos de (a) forjamento de sucatas e (b) forjamento convencional.

É possível observar a distribuição de finos precipitados de Mg e Si dispersos na matriz de alumínio (fase  $\alpha$ ). Os grãos da fase  $\alpha$  são alongados na direção da deformação plástica induzida pelo forjamento.

Após o tratamento térmico, a peça forjada convencionalmente apresentou valores de dureza entre 96 e 101 HV, com dureza média de 97 HV. A peça forjada a partir de sucatas apresentou valores de dureza entre 98 e 109 HV, com dureza média de 100 HV. Estes valores estão de acordo com o esperado para a liga AA6351 na condição T6 [51].

O tratamento térmico produziu um acréscimo de dureza de 18% e 22%, em relação a condição inicial, para as peças forjadas convencionalmente e a partir de discos empilhados, respectivamente. O aumento de dureza deve-sea formação de partículas de segunda fase, que se formam durante o envelhecimento da liga de alumínio. Para essa liga, os precipitados mais importantes são de  $Mg_2Si$  [52].

## 6. CONCLUSÕES

Este estudo assumiu como objetivo principal avaliar a aplicabilidade do reaproveitamento de sucatas com seção circular no forjamento de um componente axissimétrico. A análise numérica e experimental do processo de forjamento a quente de um flange da liga de alumínio AA6351 possibilitou concluir que:

- A simulação numérica é capaz de prever com precisão satisfatória a força requerida no processo de forjamento a partir de sucatas empilhadas. O coeficiente de atrito entre os discos que formam a geratriz é 0,8.
- A liga de alumínio AA6351 forjada e submetida ao tratamento T6 atinge uma dureza média de 97 E 100 HV para as peças forjadas convencionalmente e até partir de discos empilhados, respectivamente. Estes valores são 18 e 22% superiores aquela do material na condição inicial. O aprimoramento da dureza é consequência da formação de finos precipitados de Mg e Si na matriz de alumínio.
- O forjamento de sucatas empilhadas da liga AA6351 a 500°C garante forjabilidade para o material, permitindo a obtenção de uma peça livre de trincas ou danos específicos na superfície.
- O processo proposto não propiciou a combinação adequada de pressão de forjamento e temperatura capaz de gerar a união interna contínua dos discos de sucata forjados. A união é perfeita na região do flange e em toda superfície da peça, mas é enfraquecida na direção do núcleo da peça.
- A soldagem por forjamento observada em diversas regiões da peça demonstra que para uma geometria diferente, que propicie a conformação com pressão mais elevada e distribuída de forma mais homogênea, o desenvolvimento de uma peça a partir de sucatas reaproveitadas é possível.

## 7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Alterar a geometria forjada, de forma a garantir níveis superiores de pressão em toda a peça e, dessa forma, favorecer a união metalúrgica das sucatas.
- Analisar diferentes tempos de aquecimento no forjamento de sucatas para avaliar o efeito deste parâmetro na soldagem por forjamento;
- Avaliar o forjamento de sucatas de outros materiais;
- Realizar ensaios mecânicos para avaliar as propriedades mecânicas de peças produzidas pelo empilhamento de sucatas.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BACH F., KERBER K., ProzesskettePräzisionsschmieden, Springer Vieweg, 2014.
- [2] HERBERTZ R, LICHT W, FUSS F (2011) Materialeffizienz in der Massivumformung. Schmiede J
- [3] TEKKAYA E., (2009) Innovation by formingtechnology – motivation for research. In: 12th International ESAFORM, Conference on Material Forming, University of Twente (NL), 27.04.09
- [4] DIN 8580, Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung, DeutschesInstitut für Normung, 2003.
- [5] CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica. Editora São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- [6] COSTA, L. L. (2014). Efeito de diferentes ciclos termomecânicos no comportamento microestrutural do aço AISI 4140. Porto Alegre, Brasil: Dissertação – UFRGS.
- [7] RODRIGUES, J., MARTINS, P., Tecnologia Mecânica: Tecnologia da deformação Plástica, Escolar Editora, 2010.
- [8] DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica, 2ª Ed. Editora Guanabara, 1981.
- [9] SCHULER, Metal Forming Handbook, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998.
- [10] ALTAN T., Cold and Hot Forging Fundamentals and Applications, ASM International Materials Park, 2005.
- [11] HENSEL, A., SPITTEL, T., Kraft – und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungverfahren, Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1978.
- [12] ALTAN T., Cold and hot forging: fundamentals and applications. ASM international, 2005.
- [13] CIANCIO C., CITREA T., AMBROGIO G., FILICE L., MUSMANNO R., Design of a high performance predictive tool for forging operation, Procedia CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 2015.

- [14] TOMOV B.I., GAVOV V.I., RADEV R.H., Numerical simulations of hot die forging processes using finite element method, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004.
- [15] WENYA LI, VIVEK PATEL, Solid State Welding for Fabricating Metallic Parts and Structures, *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys* Volume 4, 2022.
- [16] JUNFENG GUO, Solid State Welding Processes in Manufacturing, *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, Springer-Verlag, 2015.
- [17] HIMANSHU LALVANI, PARANJAYEE MANDAL, ANAS YAGHI, PEDRO SANTOS, BERND BAUFELD, A solid-state joining approach to manufacture of transition joints for high integrity applications, *Journal of Manufacturing Processes*, 2022.
- [18] GUNTHER LÖBACH, *Damascus Steel: Theory and Practice*, Schiffer Craft.
- [19] R. BALASUBRAMANIAM, On the corrosion resistance of the Delhi iron pillar, *Corrosion Science* 42, 2000.
- [20] KAILASH CHAUDHARY, A Review on Advance Welding Processes, *International Journal of Engineering and Techniques - Volume 3 Issue 6*, 2017.
- [21] JOSEPH DOMBLESKY, FRANK F. KRAFT, Metallographic evaluation of welded forging preforms, *Journal of Materials Processing Technology* 191 (2007) 82–86.
- [22] MOOG (2012) Thompson friction welding – the world’s largest friction welding machine. In: *Thompson friction welding*, vol 2012.
- [23] KONG TF, CHAN LC, LEE TC. Experimental study of effects of process parameters in forge-welding bimetallic materials: AISI 316L stainless steel and 6063 aluminium alloy. *Strain* 2009.
- [24] J.A. Fernie, P.L. Threadgil, M.N. Watson, “Welding Met Fabricat”., 1 (1991), pp. 179-184.
- [25] J.R. Kissell, R.L. Ferry, Working with aluminium, *Aluminium structures: A guide to their specification and design*, John Wiley & Sons Inc., New York, USA (2002)

- [26] S. Missori, A. Sili, Mechanical behaviour of 6082-T6 aluminium alloy welds *J MetallSciTechnol*, 18 (1) (2000), pp. 12-18
- [27] Howard, R., Bogh, N. and Mackenzie, S., "Heat treating processes and equipment", *Handbook of aluminium*, 1, Physical Metallurgy and Processes, (Edited by Totten, G.E. et al.), Marcel Dekkar, INC., New York, USA, 2003
- [28] VERMA R.P., LILA M.K., A short review on aluminium alloys and welding in structural applications, *Materials Today Proceedings*, 2021.
- [29] E. PAUL, J. T. BLACK, R. A. KOHSER, *Materials and Processes in Manufacturing*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2003.
- [30] R. E. SANDERS JR., "Technology innovation in aluminum products," *The Journal of Minerals*, vol. 53, no. 2, pp. 21–25, 2001.
- [31] KUMAR N.M., DHRUTHI , PRAMOD G.K., SAMRAT P., SADASHIVA M., Critical Review on Heat Treatment of Aluminium Alloys, *Materials Today Proceedings*, 2022.
- [32] N. AFZAL, T. SHAH, R. AHMAD, MICROSTRUCTURAL FEATURES AND MECHANICAL PROPERTIES. 45(6) (2013) 684–692.
- [33] P.A. ROMETSCH, Y. ZHANG, S. KNIGHT, Heat treatment of 7xxx series aluminium alloys - some recent developments, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Edition)*, 2014.
- [34] MUKHOPADHYAY P., Alloy Designation, Processing, and Use of AA6XXX Series Aluminium Alloys, *International Scholarly Research Network*, 2012
- [35] ZHU H., COUPER M.J., DAHLE A.K, Effect of process variables on Mg-Si particles and extrudability of 6xxx series aluminum extrusions, *JOM*, 2011
- [36] D. KOPELIOVICH, Wrought aluminum-magnesium-silicon alloys (6xxx), 2010.
- [37] WILLARD J.P., "Alcoa Green Letter: Four Extrusion Alloys: 6061, 6063, 6351, 6005," *Aluminum Co. of America*, 1971.
- [38] ANDERSON K., WERITZ, J., KAUFMAN G.J., *Properties and Selection of Aluminum Alloys*, ASM HANDBOOK, ASM International, 2019.

- [39] AA 6351: Aluminum-Silicon-Magnesium Heat Treatable Alloy, *Alloy Digest: Data on Worldwide Metals and Alloys*, Data Sheet Al-319, ASM International, 1991.
- [40] BRITO, A. M. G., PREDIGER, S. A. 1998. "Aspectos do Levantamento de Curvas de Escoamento." In Proceedings of the II Conferência Internacional de Forjamento.
- [41] MARQUES A.S., COSTA L.L, DALCIN R.L, BRITO A.M.G, SCHAEFFER L., ROCHA A.S., Optimizing Hot Forging Process Parameters of Hollow Parts Using Tubular and Cylindrical Workpiece: Numerical Analysis and Experimental Validation, *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 2018.
- [42] Voort GV, Suárez-Peña B, Asensio-Lozano J. Investigações microestruturais da formação de estrias em extrusões de alumínio 6063 por técnicas metalográficas ópticas. *Microscopia e Microanálise*. 2013;19:276-284.
- [43] S. J. Andersen, H. W. Zandbergen, J. Jansen, C. Træholt, U. Tundal, and O. Reiso, "The crystal structure of the  $\beta$  phase in Al–Mg–Si alloys," *Acta Materialia*, vol. 46, no. 9, pp. 3283– 3298, 1998.
- [44] J. Chakrabarti and D. E. Laughlin, "Phase relations and precipitation in Al–Mg–Si alloys with Cu additions," *Progress in Materials Science*, vol. 49, no. 3-4, pp. 389–410, 2004
- [45] Edwards, G.A., Stiller, K., Dunlop, G.L., Couper, M. J., The precipitation sequence in Al-Mg-Si Alloys, *Acta Materiali*, Vol. 46, (1998) 3893-3904
- [46] Marioara, C.D., Andersen, S.J., Jansen, J., Zandbergen, H.W., The influence of temperature and storage time at RT on nucleation of the  $\beta$  phase in a 6082 Al–Mg–Si alloy, *Acta Materialia* 51, (2003) 789-796
- [47] Andersen, S. J., et al, The crystal structure of the  $\beta$  phase in Al-Mg-Si alloys, *Acta Materiali*, Vol. 46, (1997) 3283-3298
- [48] MARTÍNEZ, A., MIGUEL V., COELLO, J., MANJABACAS, M.C., Determining stress distribution by tension and by compression applied to steel: Special analysis for TRIP steel sheets. *Materials & Design* Volume 125, p. 11-25, 2017.
- [49] LANGE, K. Umformtechnik – Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Bd 2, Massivumformung, 2. Aufl. Springer, 1993.



- [50] KONG T.F., CHAN L.C., LEE T.C., Experimental Study of Effects of Process Parameters in Forge-Welding Bimetallic Materials: AISI 316L Stainless Steel and 6063 Aluminium Alloy, Strain, Vol 45, 2009.
- [51] DAVIS, JR. ASM Specialty Handbook - Aluminum and Aluminum Alloys. 3rd edition, Ohio: ASM International; 1994.
- [52] LIMA D.R.S., YURGEL C.C., SCHAEFFER L., CARACTERIZAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA MICRODUREZA VICKERS NO PROCESSO DE FORJAMENTO DE ALUMÍNIO, 1º Seminário Baiano de Tecnologia de Fabricação, 2010.