

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

BRUNA CRISTINA OLIVEIRA LOPES

Estudo da influência do formato das ferramentas de forjamento no fechamento de vazios  
internos em cilindros de trabalho para laminação à frio

Lorena

2022



BRUNA CRISTINA OLIVEIRA LOPES

**Estudo da influência do formato das ferramentas de forjamento no fechamento de vazios internos em cilindros de trabalho para laminação à frio**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais na área de concentração de Materiais Convencionais e Avançados.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Angelo Nunes

Versão original

Lorena  
2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado  
da Escola de Engenharia de Lorena,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Lopes, Bruna Cristina Oliveira  
Estudo da influência do formato das ferramentas  
de forjamento no fechamento de vazios internos em  
cilindros de trabalho para laminação à frio / Bruna  
Cristina Oliveira Lopes; orientador Carlos Angelo  
Nunes - Versão Original. - Lorena, 2022.  
76 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências - Programa de Pós  
Graduação em Engenharia de Materiais na Área de  
Materiais Convencionais e Avançados) - Escola de  
Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo.  
2022

1. Matriz de forjamento. 2. Forjamento. 3. Vazio  
de forjamento. 4. Microporosidade. 5.  
Macroporosidade. I. Título. II. Nunes, Carlos Angelo,  
orient.

## RESUMO

LOPES, B. C. O. **Estudo da influência do formato das ferramentas de forjamento no fechamento de vazios internos em cilindros de trabalho para laminação à frio.** 2022. 76 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2022.

O uso de grandes lingotes na fabricação de peças forjadas vem aumentando consideravelmente nas últimas décadas, sendo que as exigências de qualidade das peças produzidas também vem se tornando maiores e mais rígidas, principalmente em peças com aplicações críticas para a segurança (setor aeroespacial, setor de energia eólica, etc). Quanto maior o tamanho do lingote, mais lento o resfriamento e maior a probabilidade de geração de heterogeneidades físicas e químicas no lingote solidificado. As heterogeneidades químicas são as macro e microsegregações, enquanto as heterogeneidades físicas são as macro e microporosidades. Todas elas são malélicas às propriedades mecânicas e devem ser reduzidas ao máximo nas peças produzidas. Várias etapas do processo produtivo de uma peça forjada tem como objetivo diminuir consideravelmente a ocorrência dessas heterogeneidades, entretanto, sabe-se que elas não são completamente eliminadas e por vezes permanecem na peça, sendo detectadas durante inspeções que ocorrem na linha de produção. Portanto, o presente projeto tem como objetivo estudar os tipos dessas microsegregações e vazios (porosidades) nos cilindros de laminação forjados e associar variáveis do processo de forjamento, especialmente o formato das matrizes, ao fechamento das microporosidades. O estudo se dará a partir do forjamento e análise de um cilindro de laminação contendo vazios e forjado com duas matrizes de formatos diferentes (matriz plana-V e matriz VV), identificando assim, a efetividade de ambas no fechamento de porosidades.

Palavras-chave: Macrosegregação. Microsegregação. Macroporosidade. Microporosidade. Forjamento. Solidificação de metais. Matriz de forjamento.

## ABSTRACT

LOPES, B. C. O. **Study of forging tools influence in closing voids in working rolls used in cold rolling.** 2022. 76 p. Dissertation (Master of Science) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2022.

The use of large ingots in the manufacture of forged parts has increased considerably in recent decades, and the quality requirements of the parts produced have also become greater and more rigid, especially in parts with critical applications for safety (aerospace, wind energy, etc.). The larger the size of the ingot, the slower the cooling and the greater the probability of generating physical and chemical heterogeneities in the solidified ingot. Chemical heterogeneities are macro and microsegregations, while physical heterogeneities are macro and microporosities. All of them are harmful to the mechanical properties and must be reduced as much as possible in the parts produced. Several stages of the production process of a forged part aim to considerably reduce the occurrence of these heterogeneities, however, it is known that they are not completely eliminated and sometimes remain in the part, being detected during inspections that occur in the production line. Therefore, the present project aims to study the types of these microsegregations and voids (porosities) in the forged rolling mill rolls and to associate variables of the forging process, especially dies shape, to the closing of the macroporosities. The study will be based on the forging and analysis of a rolling mill cylinder containing voids and forged with two different dies (planar-V and VV die), thus identifying the effectiveness of both in closing porosities.

Keywords: Macrosegregation. Microsegregation. Macroporosity. Microporosity. Forging. Metal solidification. Forging matrix.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vazio encontrado na superfície de cilindro de laminação usinado .....	12
Figura 2 – a) Se o líquido for sub-resfriado, uma protuberância na interface sólido-líquido pode crescer rapidamente como um dendrito. O calor latente de fusão é removido elevando a temperatura do líquido de volta à temperatura de congelamento e b) Micrografia eletrônica de varredura de dendritos em aço. ....	14
Figura 3 – Efeito do intervalo de solidificação na contração .....	15
Figura 4 – Tipos de Macroporosidades.....	16
Figura 5 – a) contração entre braços da dendrita e b) distribuição mais uniforme de porosidade entre braços secundários menores .....	16
Figura 6 - Simulação da solidificação em lingoteira convencional .....	17
Figura 7 – Lingote e vazio interno.....	17
Figura 8 – Solubilidade do hidrogênio no ferro em função da temperatura, pressão e as diferentes fases do ferro, alfa ( $\alpha$ ), gama ( $\gamma$ ), delta ( $\delta$ ) e líquido (L) .....	19
Figura 9 – Resultado de simulação computacional de solidificação de um lingote de 100 toneladas pelo critério de Niyama, onde há maior probabilidade de ocorrência de valores menores de porosidade.....	19
Figura 10 – Comparação do limite de resistência em tração entre uma amostra sem vazio e uma amostra com um vazio .....	20
Figura 11 – Forjamento em matriz aberta.....	21
Figura 12 - Etapas de forjamento de uma barra redonda a partir de um quadrado.....	23
Figura 13 – Modelos típicos de ferramentas de forjamento em matriz aberta. a) e b) exemplos de montagens diferentes de bigornas planas, c) ferramentas curvas para forjamento de barras redondas/hexagonais, d) ferramenta em V e e) ferramenta curva e plana associadas para forjamento de barras hexagonais/redondas.....	24
Figura 14 – Curva tensão versus deformação do aço W.NR. 1.2714 para diferentes temperaturas.....	26
Figura 15 – Curva tensão máxima versus temperatura do aço W.NR. 1.2714.....	26
Figura 16 – Caso 1 e Caso 2 utilizados na simulação.....	27
Figura 17 – Efeito do fechamento de vazio com 20mm com os passes do Caso 1 e Caso 2 .....	28
Figura 18 - Resultado experimental de corpos de prova de chumbo com furo inicial de 10mm forjados no Caso 1 e no Caso 2.....	28

Figura 19 – Sistemática do forjamento em matriz aberta .....	29
Figura 20 – Distribuições de deformações com diferentes razões de mordida .....	30
Figura 21– Somatório de deformações para diferentes avanços – a) grande avanço da matriz após cada mordida e b) avanços ajustados para valores menores.....	31
Figura 22 - Lingote octagonal no processo de recalque e os diferentes formatos iniciais de vazios .....	31
Figura 23 – Volume relativo dos vazios no lingote após o recalque com 20% de redução na altura (a) $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 1$ , (b) $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 2$ e (c) $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 5$ .	32
Figura 24 - a) tensão triaxial e b) tensão efetiva no lingote após o recalque com redução de 20% na altura .....	32
Figura 25 – (a) as posições assumidas para cada vazio com diferentes formatos iniciais: (b) $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 1$ , (c) $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 2$ e (c) $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 5$ .....	33
Figura 26– Lingote octagonal no forjamento de estiramento com ferramentas planas e os diferentes formatos iniciais assumidos para os vazios do lingote .....	34
Figura 27 – O volume relativo dos vazios do lingote com 20% de redução na altura para os diferentes formatos iniciais: (a) $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 1$ , (b) $R_x : R_y : R_z = 1 : 2 : 1$ e (c) $R_x : R_y : R_z = 1 : 5 : 1$ .....	34
Figura 28 – (a) Tensões triaxiais e (b) tensão efetiva no lingote após o forjamento de estiramento com 20% de redução na altura .....	34
Figura 29 – A posição assumida para cada vazio; o volume relativo para os vazios com diferentes formatos iniciais (b) $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 1$ , (c) $R_x : R_y : R_z = 1 : 2 : 1$ e (d) $R_x : R_y : R_z = 1 : 5 : 1$ .....	35
Figura 30 – Volume relativo de vazios ( $R_v$ ) - a) bigorna V de $135^\circ$ , b) bigorna plana e c) bigorna plana após rotação de $90^\circ$ .....	36
Figura 31 – Comparação dos níveis de deformação entre matrizes planas e com formato V .....	37
Figura 32 – Comparação da configuração da malha e a deformação efetiva entre a) matrizes planas e b) matriz superior em V + matriz inferior plana .....	37
Figura 33 – Resultados de deformação equivalente para o primeiro recalque - a) modelos de matrizes planas e b) modelo com matriz inferior em V .....	38
Figura 34 – Resultados de deformação equivalente para o segundo recalque (a) modelos de matrizes planas; (b) modelo com matriz inferior em V .....	38
Figura 35 – Representação do método utilizado por Kakimoto .....	39

Figura 36 – Malhas para os três diferentes tipos de ferramenta a) planas; b) formato em V e c) FML (Free of Mannesmann effect at Lower press loads) .....	40
Figura 37 – Efeito da geometria da ferramenta na tensão efetiva calculada no centro da peça forjada .....	40
Figura 38 - Efeito da geometria da ferramenta na tensão hidrostática calculada no centro da peça forjada.....	41
Figura 39 – Carga da prensa para os diferentes tipos de ferramenta com 30% de redução	41
Figura 40 – $s_z$ (curvas vermelhas) e $s_x$ (curvas verdes) ao longo do eixo Z do cilindro. Bigornas planas (esquerda) e bigornas em V (direita) [Mpa].....	42
Figura 41– Comparação das deformações equivalentes para os dois tipos de ferramentas. Bigornas planas (esquerda) e bigornas em V (direita).....	42
Figura 42 – Configuração da face dos cilindros confeccionados em plasticina (a) bigornas planas (trincas no centro da peça) e (b) bigornas em V .....	43
Figura 43 - Fluxo de produção dos cilindros de laminação .....	44
Figura 44 – Esquema da seção transversal do lingote utilizado na fabricação do cilindro de laminação .....	45
Figura 45 – Lingote bruto de solidificação posicionado sobre calços para posterior enformamento .....	45
Figura 46 – Forjamento de cilindro de laminação de trabalho a frio.....	46
Figura 47 – Cilindro de laminação bruto (após forjamento) utilizado no presente trabalho	46
Figura 48 - Enformamento de cilindro forjado para o tratamento de Normalização .....	46
Figura 49 - Dimensões reais da peça a quente logo após o forjamento.....	47
Figura 50 – Posição, profundidade e diâmetro de cada furo confeccionado na mesa do cilindro .....	47
Figura 51 – Batoques metálicos cônicos.....	48
Figura 52 – Destaque de um dos furos da mesa do cilindro fechado com batoque.....	48
Figura 53 – Identificação dos furos ilustrados na Figura 50 com os números da Tabela 2.	49
Figura 54 - Ciclos de aquecimento – a) pré aquecimento a 900°C em forno de tratamento térmico e b) aquecimento para forjamento em forno de reaquecimento de lingote .....	49
Figura 55 – Ferramentas de forjamento utilizadas em cada metade da peça.....	50
Figura 56 – Cilindro sendo retirado do forno de aquecimento para forjamento da 1ª metade .....	51
Figura 57 – Cilindro logo após forjamento da 1ª metade com par de bigornas V-V.....	51
Figura 58- Cilindro logo após forjamento da 2ª metade com par de bigornas Plana-V .....	51

Figura 59 – Sequência de forjamento utilizada para cada metade do cilindro .....	53
Figura 60 – Cilindro após ciclo de Normalização e Alívio de tensões .....	54
Figura 61 – Croqui utilizado para confecção das bigornas Plana e V em madeira .....	55
Figura 62 – Configuração de forjamento com ferramentas V-V .....	56
Figura 63 - Configuração de forjamento com ferramentas Superior Plana e Inferior V .....	56
Figura 64 - Configuração de forjamento com ferramentas Plana-Plana.....	56
Figura 65 – Corpo de prova de plasticina com 47mm de diâmetro e 50mm de comprimento .....	57
Figura 66 - Régua utilizada com as matrizes para controlar a profundidade da deformação .....	57
Figura 67 – Furos preenchidos por óxidos e aparentemente sem os batoques .....	58
Figura 68 – Furos com batoque e sem fechamento próximo à superfície .....	58
Figura 69 – Furos com aparente fusão do batoque com óxidos ao redor do furo.....	58
Figura 70 - Seção transversal do cilindro forjado.....	59
Figura 71 – a) Ilustração de como as seções menores foram cortadas e b) duas seções menores já cortadas.....	59
Figura 72 – Desenho esquemático indicando os sentidos de cortes dos furos .....	59
Figura 73 – Furos da metade que foi conformada utilizando ferramentas Plana-V .....	60
Figura 74 – Furos da metade que foi conformada utilizando ferramentas V-V .....	60
Figura 75 – Tamanho de grão na superfície da peça (plana-V).....	61
Figura 76 – Tamanho de grão no meio-raio da peça (plana-V).....	62
Figura 77 – Tamanho de grão no centro da peça (plana-V) .....	62
Figura 78 - Tamanho de grão na superfície da peça (V-V) .....	63
Figura 79 – Tamanho de grão no meio-raio da peça (V-V).....	63
Figura 80 – Tamanho de grão no centro da peça (V-V) .....	64
Figura 81 – Corpo de prova de 47mm de diâmetro – a) sem nenhuma deformação; b) com 2 passes de deformação de 10mm e c) com 6 passes de deformação de 10mm .....	64
Figura 82 – Corpos de prova de 57mm de diâmetro forjados até o fechamento do furo com matrizes – a) V-V; b) Plana-V e c) Plana-Plana .....	65
Figura 83 - Razão "Largura final/Largura inicial" para os doze furos da peça .....	67
Figura 84 - Razão "Área final/Área inicial" para os doze furos da peça .....	67
Figura 85 – Vista frontal do furo 6 forjado com bigorna V-V: não foi serrado no centro ..	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço que será utilizado neste trabalho (% peso) .....	44
Tabela 2 - Dimensões dos furos e batoques.....	48
Tabela 3 - Tempo decorrido, temperatura das ferramentas e peça antes do forjamento .....	52
Tabela 4 - Largura e área superficial inicial e final de cada furo .....	66

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 SOLIDIFICAÇÃO DE METAIS .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.1 Mecanismos de crescimento .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.2 Crescimento dendrítico .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 MICRO E MACRO POROSIDADE .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1 Macroporosidade .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.2 Microporosidade .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3 POROSIDADES EM LINGOTES .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.1 Evolução dos gases durante a solidificação .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.2 Redução de volume metálico durante a solidificação .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.3 Influência da porosidade no produto final .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4 FORJAMENTO DE METAIS.....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.1 Forjamento em matriz aberta.....</b>	<b>21</b>
<b>2.5 FECHAMENTO DE VAZIOS INTERNOS.....</b>	<b>24</b>
<b>2.5.1 Fechamento mecânico do defeito.....</b>	<b>25</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>44</b>
<b>3.1 MATERIAL .....</b>	<b>44</b>
<b>3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>47</b>
<b>3.3 SIMULAÇÃO EM PLASTICINA .....</b>	<b>54</b>
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>58</b>
<b>4.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>58</b>
<b>4.2 ANÁLISES MICROESTRUTURAIS.....</b>	<b>61</b>
<b>4.3 SIMULAÇÃO EM PLASTICINA .....</b>	<b>64</b>
<b>5 DISCUSSÕES.....</b>	<b>66</b>
<b>5.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>66</b>
<b>5.2 ANÁLISES MICROESTRUTURAIS.....</b>	<b>70</b>
<b>5.3 SIMULAÇÃO EM PLASTICINA .....</b>	<b>71</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>74</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas as indústrias de aço forjado vivenciaram um crescimento significativo, conduzindo à fabricação de lingotes cada vez maiores para componentes metálicos críticos, utilizados na produção de peças para os setores aeroespacial, de transporte, siderurgia e energia. Lingotes de grandes dimensões são propensos a mais defeitos, que são desenvolvidos durante a solidificação. Essas heterogeneidades de material devem ser eliminadas ou reduzidas ao máximo para melhorar a qualidade da peça.<sup>1</sup>

A primeira etapa do processo de fabricação da grande maioria dos produtos metálicos é caracterizada pela colocação do metal na forma líquida, sendo seguida por uma etapa de solidificação. Durante a solidificação ocorrem diversos fenômenos físico-químicos, que levam a heterogeneidades no metal sólido.<sup>2</sup> Dentre estas, a porosidade é uma heterogeneidade física comum: durante a transformação do estado líquido para o sólido ocorre um agrupamento (empacotamento) dos átomos, formando estruturas ordenadas. Na absoluta maioria dos casos esta transformação é acompanhada por um aumento da densidade e, conseqüentemente, por uma contração. Como resultado da contração de solidificação, surgem porosidades no material, que podem ser macroporosidades ou microporosidades. O fator de dependência mais determinante no tipo de porosidade é o intervalo de solidificação.<sup>3</sup>

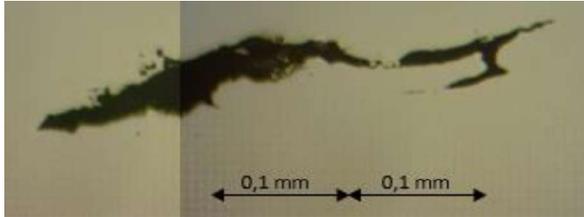
Do ponto de vista da qualidade do produto final, as heterogeneidades físicas são classificadas como defeitos, podendo levar à rejeição da peça caso não atinjam níveis satisfatórios, já que reduzem as propriedades mecânicas do material e podem levar à falhas catastróficas durante a aplicação do produto.

Dentre as principais funções do processo de forjamento de grandes lingotes estão o fechamento de vazios provenientes do estado bruto de fusão e a homogeneização microestrutural<sup>32</sup>. Kakimoto<sup>(30)</sup> afirma que 75% do fechamento de vazios ocorre através de processos de compressão, evidenciando a importância do controle da deformação no forjamento. Entretanto, é de extrema importância a escolha certa dos parâmetros do processo, como a configuração das matrizes, o comprimento das mesmas, a redução aplicada a cada passe, o avanço e o gradiente de temperatura.<sup>32</sup>

Mesmo para materiais solidificados que são posteriormente forjados, essas heterogeneidades físicas podem não ser totalmente eliminadas. A Figura 1 apresenta um defeito encontrado em um cilindro de laminação de tiras à frio com mesma composição química dos materiais que serão trabalhadas neste estudo. Esse defeito é caracterizado como

vazio e foi identificado na superfície da peça durante as inspeções realizadas após finalização do processo produtivo e anterior ao envio da peça ao cliente.

Figura 1 – Vazio encontrado na superfície de cilindro de laminação usinado



Fonte: Leite (2019)

Portanto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a influência do formato das ferramentas de forjamento no fechamento de vazios internos em cilindro de laminação de tiras a frio. O estudo possui grande importância por apresentar resultados de experimentos realizados em escala industrial, o que não é comumente encontrado na literatura. Dessa forma, há uma contribuição significativa para o meio acadêmico e industrial, permitindo a comparação de resultados experimentais teóricos (simulações) com resultados práticos reais.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SOLIDIFICAÇÃO DE METAIS

Todos os materiais metálicos, bem como muitas cerâmicas, vidros inorgânicos e polímeros termoplásticos, são líquidos ou fundidos em algum momento de seu processamento. Vários milhões de toneladas de aço, ligas de alumínio, cobre e zinco são produzidos através do processo de fundição, já que a indústria utiliza largamente o processo de solidificação como uma etapa primária de processamento para produzir placas ou lingotes metálicos.<sup>8</sup>

A solidificação de materiais cristalinos, como os metais, requer dois passos. Na primeira etapa, os cristalitos ultrafinos, conhecidos como os núcleos de uma fase sólida, formam-se a partir do líquido. Na segunda etapa, que pode se sobrepor à primeira, os cristalitos sólidos ultrafinos começam a crescer à medida que os átomos do líquido são presos aos núcleos até que não haja mais líquido.<sup>8</sup>

#### 2.1.1 Mecanismos de crescimento

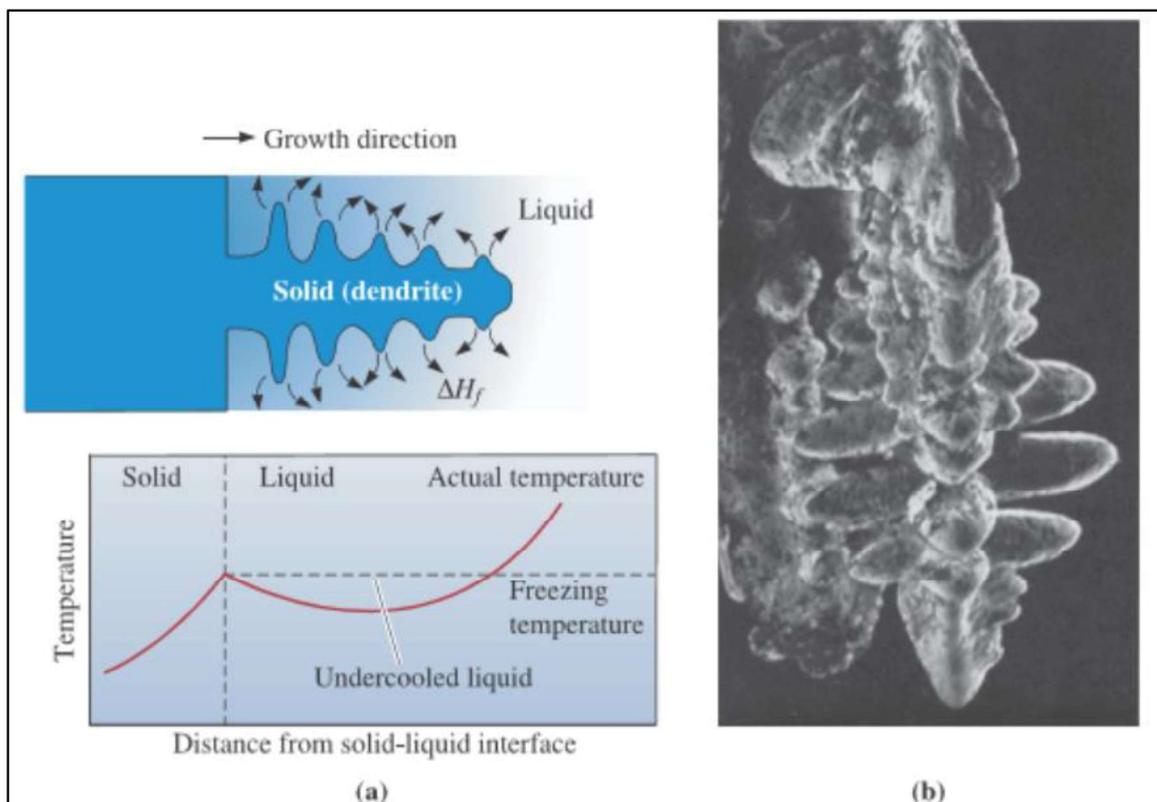
Uma vez que os núcleos sólidos de uma fase se formam (em um líquido ou outra fase sólida), o crescimento começa a ocorrer à medida que mais átomos se ligam à superfície sólida. A natureza do crescimento dos núcleos sólidos depende de como o calor é removido do material fundido. Considerando a fundição de um metal em um molde, por exemplo, no processo de solidificação, dois tipos de calor devem ser removidos: o calor específico do líquido e o calor latente da fusão. O calor específico é o calor necessário para alterar a temperatura de um peso unitário do material em um grau. O calor específico deve ser removido primeiro, seja por radiação na atmosfera circunvizinha ou por condução no molde circundante, até que o líquido esfrie até sua temperatura de solidificação. Isso é simplesmente um resfriamento do líquido de uma temperatura a outra temperatura na qual a nucleação começa.<sup>8</sup>

Sabe-se que, para fundir um sólido, é preciso fornecer calor. Portanto, quando sólidos se formam a partir de um líquido, o calor é gerado. Esse tipo de calor é chamado de calor latente de fusão (AH). O calor latente de fusão deve ser removido da interface sólido-líquido antes que a solidificação seja concluída. A maneira pela qual removemos o calor latente de fusão determina o mecanismo de crescimento do material e a estrutura final de uma fundição.<sup>8</sup>

### 2.1.2 Crescimento dendrítico

Quando o líquido não é inoculado e a nucleação é fraca, o líquido deve ser sub-resfriado antes que o sólido se forme (Figura 2). Sob essas condições, uma pequena protuberância sólida chamada dendrita, que se forma na interface, é estimulada a crescer, já que o líquido à frente da frente de solidificação é sub-resfriado. A palavra dendrita vem da palavra grega *dendron* que significa árvore. À medida que a dendrita sólida cresce, o calor latente de fusão é conduzido para o líquido sub-resfriado, elevando a temperatura do líquido em direção à temperatura de solidificação. Braços dendríticos secundários e terciários também podem se formar nos caules primários para acelerar a evolução do calor latente. O crescimento dendrítico continua até que o líquido sub-resfriado aqueça até a temperatura de solidificação. Qualquer líquido restante, em seguida, solidifica por crescimento planar. O molde deve absorver o calor em crescimento planar, mas o líquido sub-resfriado absorve o calor no crescimento dendrítico.<sup>8</sup>

Figura 2 – a) Se o líquido for sub-resfriado, uma protuberância na interface sólido-líquido pode crescer rapidamente como um dendrito. O calor latente de fusão é removido elevando a temperatura do líquido de volta à temperatura de congelamento e b) Micrografia eletrônica de varredura de dendritos em aço.

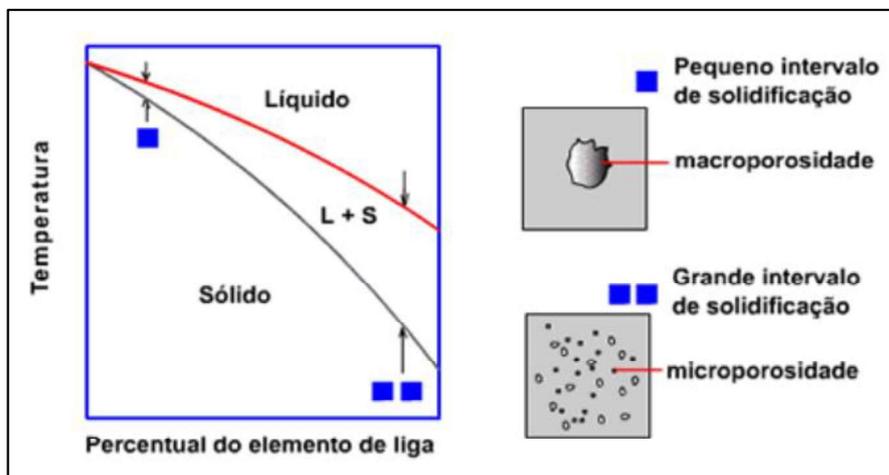


Fonte: Askeland, Fulay e Wright (2006)

## 2.2 MICRO E MACRO POROSIDADE

Porosidades surgem no material como resultado do processo de solidificação, sendo possível a ocorrência das mesmas em dois tipos: macro e microporosidade. Ligas metálicas com pequeno intervalo de solidificação (caso também de metais comercialmente puros) possuem dendritas pequenas na interface Líquido-Sólido (L-S) e tendem a gerar macroporosidades. Ligas metálicas com grande intervalo de solidificação (caso de alguns latões) apresentam dendritas grandes na interface L-S e tendem a gerar microporosidades.<sup>3</sup> A Figura 3 exemplifica o efeito do intervalo de solidificação na contração do material.

Figura 3 – Efeito do intervalo de solidificação na contração



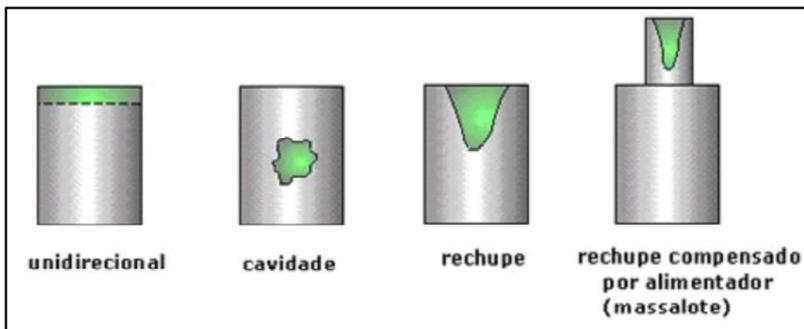
Fonte: CIMM (2010)

### 2.2.1 Macroporosidade

A macroporosidade é um defeito que se caracteriza por contrações concentradas em um único ponto da peça (na última região a se solidificar), resultando em um espaço vazio e com superfície interna rugosa (formada pelas dendritas). A forma e a localização da macroporosidade (Figura 4) depende do tipo de extração de calor sofrido pelo molde. Podem ser citados alguns casos típicos: (a) Em peças solidificadas unidirecionalmente, há redução das dimensões da peça em apenas uma direção. Neste caso não se forma propriamente uma porosidade (ou cavidade), mas um rebaixo na superfície da peça; (b) No caso da extração de calor ocorrer igualmente nas três direções, forma-se uma cavidade no centro da peça; (c) Quando uma superfície extrai calor mais lentamente que as demais, forma-se um rechupe na região que se solidificou por último.<sup>3</sup>

Uma técnica comum de se controlar o rechupe resultante das contrações de solidificação é a utilização de alimentadores (reservatórios de metal posicionados próximos da última região a se solidificar, denominados de massalotes). Os reservatórios tem a função de fornecer líquido para a frente de solidificação de modo que o rechupe se desloque para o massalote. Após a solidificação, o massalote é cortado da peça e descartado.<sup>3</sup>

Figura 4 – Tipos de Macroporosidades



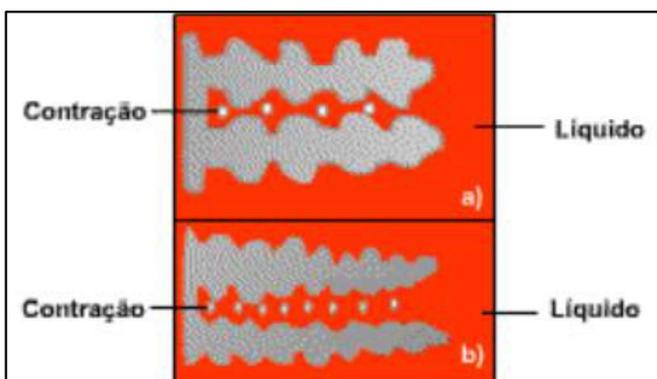
Fonte: CIMM (2010)

### 2.2.2 Microporosidade

A microporosidade é um defeito que se caracteriza por suas pequenas dimensões e pela distribuição ao longo da peça. Forma-se quando as dendritas presentes na frente de solidificação (interface L-S) são de grande tamanho.<sup>3</sup>

Este defeito se forma por causa da dificuldade do metal líquido em penetrar entre as dendritas na interface L-S, ocorrendo a perda de carga. Com isto não são compensadas as contrações locais, aparecendo porosidades entre os braços das dendritas.<sup>3</sup> A Figura 5 apresenta um exemplo esquemático de formação das microporosidades.

Figura 5 – a) contração entre braços da dendrita e b) distribuição mais uniforme de porosidade entre braços secundários menores

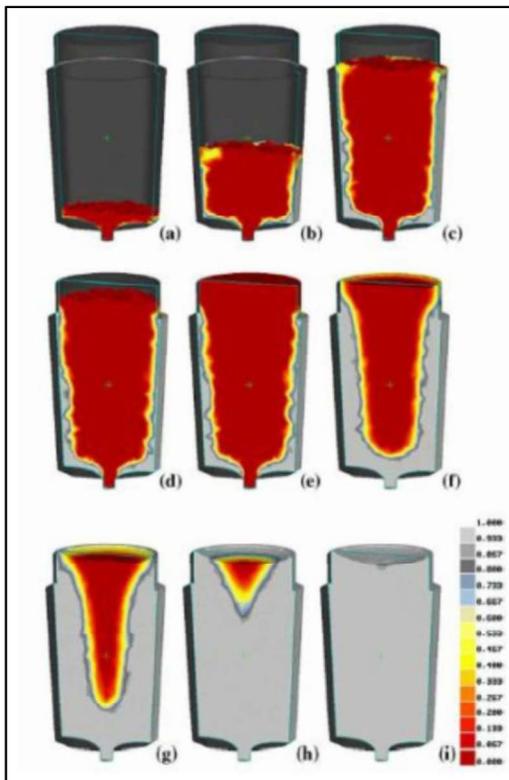


Fonte: CIMM (2010)

### 2.3 POROSIDADES EM LINGOTES

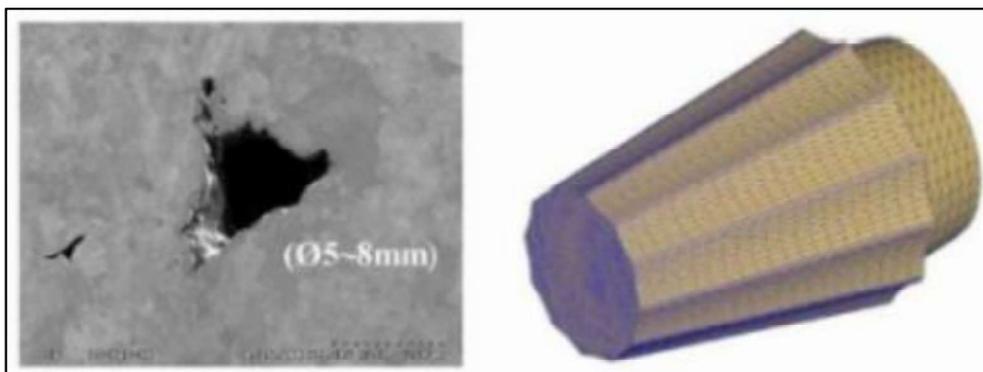
A Figura 6 apresenta a simulação da solidificação de um lingote convencional de seis toneladas. É possível observar a formação da casca de aço (cinza) na parede da lingoteira e seu crescimento com o passar do tempo.<sup>24</sup> Já na figura 7 está exemplificado um vazio interno de cinco a oito milímetros de diâmetro encontrado em um lingote após a simulação de completa solidificação.<sup>25</sup>

Figura 6 - Simulação da solidificação em lingoteira convencional



Fonte: Kermanpur, Eskandari, Purmohamad, Soltani e Shater (2010)

Figura 7 – Lingote e vazio interno



Fonte: Lee, Y.S, Lee, S.U, Tyne, Joo e Moon (2011)

Os processos físicos e químicos que atuam na solidificação o fazem predominantemente em um sentido de obter um lingote heterogêneo e com a presença de vazios internos, o que é ainda mais acentuado em grandes lingotes devido ao tamanho da peça em solidificação. A influência das variáveis de processos na criação de porosidades pode ser alterada, mas não eliminada.<sup>19</sup>

São dois os principais motivos que causam as porosidades em lingotes: a evolução do gás durante a solidificação e a redução de volume que acontece na solidificação de quase todos os metais.<sup>19</sup>

### 2.3.1 Evolução dos gases durante a solidificação

A solubilidade dos gases, como O, H e N, diminui muito com a solidificação do metal líquido. Conforme podemos ver na Figura 8, o hidrogênio tem sua solubilidade no ferro reduzida para cerca de um quarto durante a solidificação, à pressão de 1 atm.<sup>19</sup>

Esses gases acabam se acumulando como se fossem um tipo de segregação, o que significa aumentos locais na concentração do gás no líquido que podem vir a formar bolhas, as quais terão a tendência de nuclear na interface líquido-sólido.<sup>19</sup>

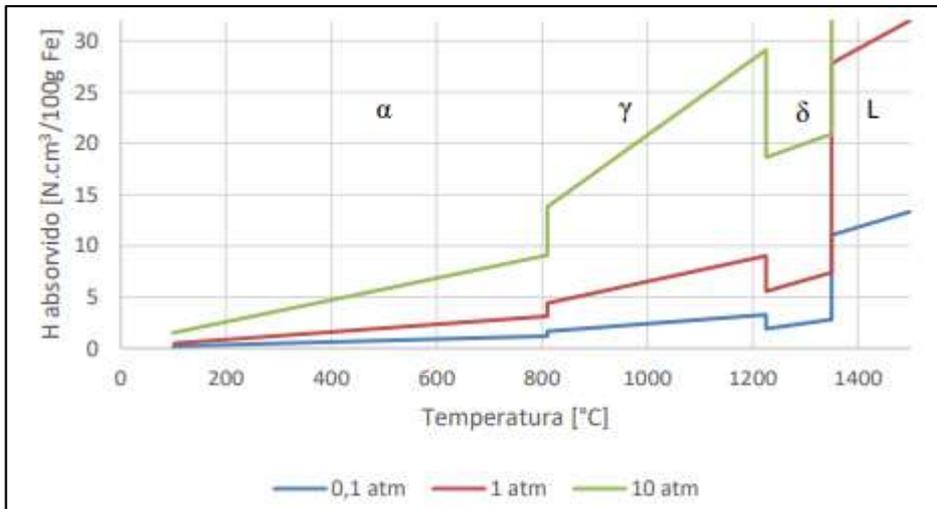
Sabendo que a solubilidade dos gases nos metais é pequena, é possível expressar a relação entre a solubilidade de gases diatômicos e a pressão conforme a equação (1), a lei de Sievert:<sup>19</sup>

$$C_g = k \sqrt{p} \quad (1)$$

em que  $C_g$  é a solubilidade do gás dissolvido,  $k$  é uma constante e  $p$  é a pressão do gás.<sup>19</sup>

Logo, se há solidificação em pressões suficientemente baixas, como a atmosférica, a formação de gases livres é estimulada. Bolhas que crescem rapidamente terão a tendência de escaparem da interface e saírem pelo topo do lingote, mas se o mesmo já estiver solidificado haverá um acúmulo de gases e a formação de uma grande cavidade na posição em que as bolhas ficarem presas.<sup>19</sup>

Figura 8 – Solubilidade do hidrogênio no ferro em função da temperatura, pressão e as diferentes fases do ferro, alfa ( $\alpha$ ), gama ( $\gamma$ ), delta ( $\delta$ ) e líquido (L)

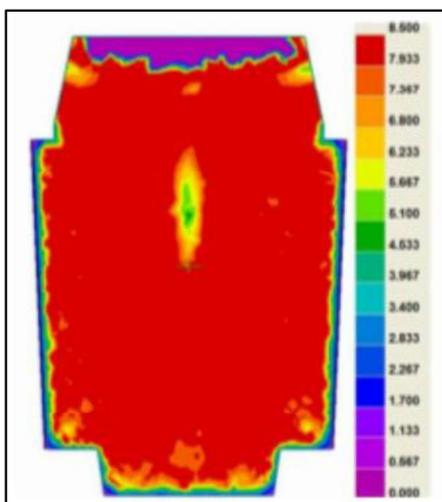


Fonte: Campos (2018)

### 2.3.2 Redução de volume metálico durante a solidificação

O outro fator que também gera vazios internos é a redução de volume que ocorre devido a solidificação do metal. O lingote começa a se solidificar da superfície da lingoteira (molde) em direção ao núcleo do lingote. Quando a solidificação chega próxima ao núcleo, há regiões onde são formadas “pontes” com mesmo tempo de solidificação, em que não há mais contato com canais de alimentação de metal líquido para preencher o vazio deixado, resultando em vazios internos nessas regiões, conforme mostrado na Figura 9.<sup>19</sup>

Figura 9 – Resultado de simulação computacional de solidificação de um lingote de 100 toneladas pelo critério de Niyama, onde há maior probabilidade de ocorrência de valores menores de porosidade



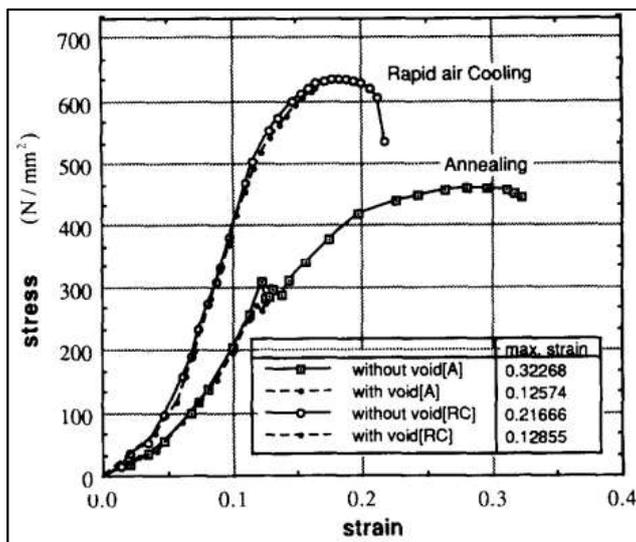
Fonte: Campos (2018)

### 2.3.3 Influência da porosidade no produto final

Caso a porosidade seja formada no processo de solidificação e não seja eliminada no processo de conformação (laminação a quente ou forjamento, por exemplo), ela terá um efeito prejudicial no desempenho do material em serviço. O problema torna-se mais crítico quando o aço contém altos teores de hidrogênio ( $>1\text{ppm}$ ), que favorece a iniciação de trincas nos defeitos já presentes<sup>22</sup>.

Park<sup>(29)</sup> realizou testes em amostras de aço AISI 4118 com e sem vazio interno. As amostras foram forjadas a quente para ligação das superfícies internas dos furos das amostras com furo e conformação das sem furo. As amostras foram ensaiadas em tração após tratamento térmico de recozimento e o resultado é mostrado na curva “Annealing” da Figura 10. Verificou-se que a resistência da amostra com vazio não foi além do seu limite de escoamento. Além disso, uma amostra com vazio foi rompida instantaneamente na seção transversal perpendicular ao eixo de tração. Isto é devido à área de superfície de ligação do vazio possuir um filme antiligante, incluindo um filme de óxido e materiais estranhos, que iniciam as trincas. Este fenômeno só foi eliminado após o uso de temperaturas de forjamento maiores ou igual a  $1100^{\circ}\text{C}$  e redução de área superior a 20%.

Figura 10 – Comparação do limite de resistência em tração entre uma amostra sem vazio e uma amostra com um vazio



Fonte: Park e Yang (1996)

## 2.4 FORJAMENTO DE METAIS

Forjamento é o nome genérico de operações de conformação mecânica efetuadas com esforço de compressão sobre um material dúctil, de tal modo que ele tende a assumir o

contorno ou perfil da ferramenta de trabalho.<sup>15</sup> É o modo de conformação mecânica a quente mais antigo conhecido pelo homem, podendo ter diversos modos de forjamento que variam com o princípio de operação, que são: por martelo (maior taxa de deformação e limitada pela quantidade de energia cinética) ou por prensagem (menor taxa de deformação e limitada pela intensidade de força)<sup>19</sup>.

Durante o forjamento por prensagem, uma peça de formato simples, um lingote como o da Figura 9 por exemplo, é plasticamente deformado entre duas ferramentas (ou bigornas) para obter a configuração final desejada.

Existe um grande número de tipos de processos de forjamento, sendo que alguns deles são: forjamento em matriz fechada; extrusão direta; forjamento radial; fricção; forjamento orbital; forjamento isotérmico e forjamento em matriz aberta<sup>15</sup>.

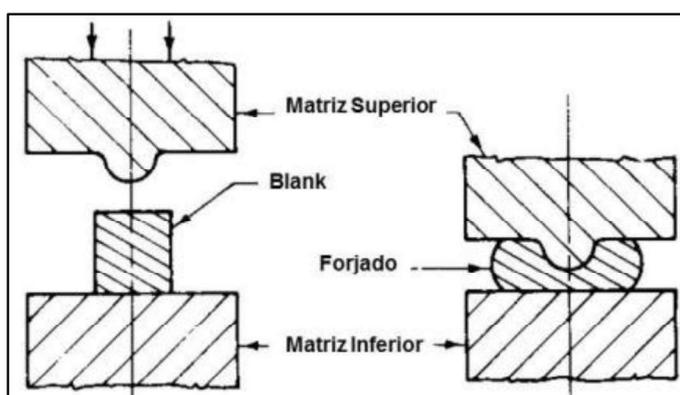
Há nos últimos anos uma crescente necessidade de produzir grandes componentes forjados para aplicações aeroespaciais, navais, de energia e outras. O forjamento em matriz aberta de grandes lingotes é o processo primário utilizado para produzir grandes componentes forjados de alta qualidade<sup>15</sup>.

#### 2.4.1 Forjamento em matriz aberta

O forjamento em matriz aberta é um processo de forjamento a quente no qual a forma do metal é obtida através da deformação do material por pressionamento de ferramentas planas ou de geometria simples, em uma série de golpes nos quais o material é deslocado após cada um deles e rotacionado entre eles<sup>19</sup>.

Nesse processo há quebra da estrutura bruta de fusão, redistribuição da segregação e caldeamento de pequenos defeitos existentes no lingote (vazios e porosidades)<sup>22</sup>. A Figura 11 apresenta um desenho esquemático do forjamento em matriz aberta.

Figura 11 – Forjamento em matriz aberta



Fonte: Coelho (2022)

No forjamento em matriz aberta, a deformação produzida resulta num certo grau de direcionalidade da microestrutura na qual segundas fases e inclusões são orientadas paralelamente à direção de maior deformação. Quando se observa a microestrutura macroscopicamente, ela aparece como linhas de escoamento ou estrutura fibrosa. A existência de uma estrutura fibrosa é característica de todas as peças forjadas e isso não é considerado como um defeito de forja, entretanto, a estrutura fibrosa resulta numa ductilidade em tração menor no sentido transversal às fibras.<sup>35</sup>

O forjamento, a princípio, elimina a estrutura bruta de fusão proveniente do lingote. Esta “quebra” da estrutura dendrítica ocorre devido a uma compressão dos braços das dendritas provocada pela deformação a quente, causando uma redução do espaçamento interdendrítico e reduzindo as distâncias necessárias para a difusão dos elementos que segregam, o que favorece a homogeneização por efeito da temperatura.<sup>35</sup>

Todavia, as segregações, visto que os elementos em uma liga solidificada tem probabilidade mínima de estarem distribuídos de maneira uniforme, geram dificuldades no processo de forjamento, pois a resposta não uniforme das diferentes regiões segregadas às forças de forjamento geram deformações, recristalizações, crescimento de grão e texturas não uniformes. Desta forma, as regiões segregadas podem persistir mesmo após a conformação a quente do componente, na forma de bandas de composição química diferenciada.<sup>35</sup>

A homogeneização do tamanho de grão austenítico também é uma característica obtida no forjamento, quando a peça é submetida a um grau de deformação suficiente, podendo atingir uma situação onde não seja necessário o tratamento de normalização. Esse comportamento geralmente ocorre para barras de diâmetro pequeno ou material com uma razão de redução no forjamento de pelo menos 4:1.<sup>35</sup>

As prensas que executam o forjamento em matriz aberta podem ter acionamento mecânico ou hidráulico, que possuem capacidades de 100 a 8000t e 300 a 50000t respectivamente, que forjam produtos de poucos quilos até peças acima de 600 toneladas.<sup>19</sup>

O processo de forjamento para peças de grandes dimensões pode ser dividido em três principais etapas: recalque, forjamento em alta temperatura e em baixa temperatura (conhecido como refino de grão).<sup>19</sup>

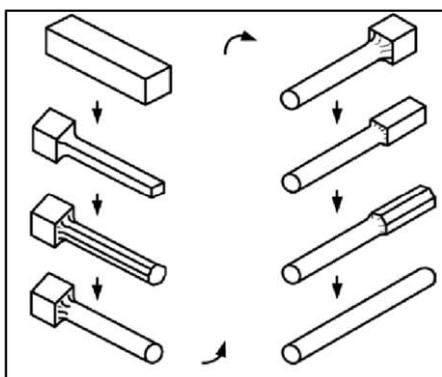
O recalque é um processo no qual a peça é forjada com o objetivo de aumentar sua secção transversal através da redução de sua altura, de maneira a possibilitar o forjamento de dimensões maiores que a dimensão inicial do lingote. Nesta etapa é visada a utilização de temperaturas elevadas, de maneira a reduzir a resistência do material à deformação, pois este

produto intermediário possui a maior área de contato entre o produto e o ferramental de todo o processo de forjamento, o que demanda valores elevados de força a ser aplicada pelas prensas de forjamento.<sup>19</sup>

Logo após o recalque se inicia o forjamento em alta temperatura, através do qual se pode chegar ao forjamento final. Devido ao gradiente térmico presente no produto intermediário, o núcleo ainda está com alta temperatura, diferentemente da superfície, sendo que esta última pode impedir o prosseguimento do processo, já que se estiver muito baixa, impedirá a conformação do material pelo aumento da sua resistência à deformação.<sup>19</sup>

Choi<sup>(23)</sup> mostrou através de simulações FEM (Finite Elements Method) a sequência de passes utilizada para obter uma barra redonda. Parte-se de uma peça quadrada obtida a partir de um lingote e forja-se um retângulo. Após um giro de 90°C com a mesma redução transforma-se o retângulo em um quadrado de menor seção. O quadrado tem os seus cantos quebrados a fim de formar uma peça oitavada, aproximando-se de um redondo. Com uma matriz com formato de meia lua, realiza-se o acabamento do redondo. A Figura 12 mostra um esquema tridimensional das etapas descritas acima até obter uma barra redonda.

Figura 12 - Etapas de forjamento de uma barra redonda a partir de um quadrado



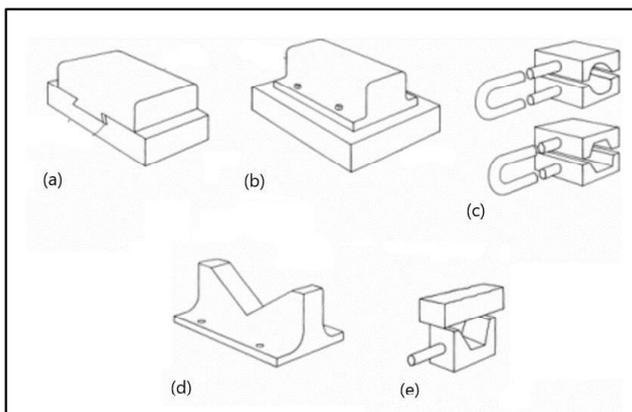
Fonte: Choi, Chun, Van Tyne e Moon (2006)

O forjamento em matriz aberta pode ser distinguido dos demais por fornecer fluxo descontínuo de material em lugar de fluxo contínuo. Esse processo de deformação geralmente é utilizado quando: (a) o lingote é muito grande para ser produzido em matrizes fechadas; (b) as propriedades mecânicas requeridas para a peça que podem ser obtidas pelo processo de deformação no forjamento em matriz aberta não podem ser obtidas pela deformação em outros processos; (c) a quantidade necessária de peças é muito pequena para justificar o custo de matrizes fechadas; (d) a data de entrega está muito próxima para permitir a fabricação de matrizes para forjamento em matriz fechada.<sup>16</sup>

Todos os metais forjáveis podem ser forjados em matrizes abertas, sendo que o tamanho e peso de uma peça que pode ser produzida em matriz aberta é limitado apenas à capacidade dos equipamentos de aquecimento, manuseio e forjamento das peças.<sup>16</sup>

Muitos produtos forjados em matriz aberta são produzidos em pares de matrizes planas - uma presa ao martelo ou à prensa e a outra à bigorna. Ferramentas planas, curvas, em V, ou uma combinação delas podem ser utilizadas.<sup>16</sup> A Figura 13 apresenta alguns exemplos de ferramentas que podem ser utilizadas no processo de forjamento em matriz aberta.

Figura 13 – Modelos típicos de ferramentas de forjamento em matriz aberta. a) e b) exemplos de montagens diferentes de bigornas planas, c) ferramentas curvas para forjamento de barras redondas/hexagonais, d) ferramenta em V e e) ferramenta curva e plana associadas para forjamento de barras hexagonais/redondas



Fonte: Altan, Ngaile e Shen (2004) – adaptada

## 2.5 FECHAMENTO DE VAZIOS INTERNOS

Vazios ou poros devem ser eliminados por deformação compressiva durante o processo de conformação. O fechamento dos vazios internos é executado em duas etapas: fechamento mecânico do defeito e o processo de consolidação de duas superfícies do vazio.<sup>19</sup> Se apenas o primeiro passo ocorre, poros não soldados podem comportar-se como trincas agudas, podendo tornar-se prejudiciais ao desempenho do material. O processo de fechamento consiste no contato das duas superfícies internas através da deformação dos poros internos, enquanto o processo de ligação consiste na coesão das duas superfícies em contato. Parâmetros tais como temperatura do material durante a deformação, o gradiente de temperatura, a tensão compressiva máxima e a taxa de deformação ao redor do vazio, têm um efeito no processo de fechamento desses<sup>22</sup>.

Duas superfícies de um vazio fechado tem que ser completamente ligadas para eliminar alguma descontinuidade e, além disso, obter um produto isento de defeito. Neste processo de ligação é necessário aplicar alta pressão e alta temperatura. A força motriz para produzir a força coesiva é a temperatura de trabalho e a pressão normal interfacial. Mesmo que a força motriz também inclua difusão, isto tem pouca influência na força coesiva devido ao curto tempo de deformação<sup>22</sup>.

Resultados de experimentos laboratoriais realizados por Wang<sup>(27)</sup>, em amostras com furos usinados no centro e a  $\frac{1}{4}$  da superfície, mostraram que a superfície interna de alguns poros foi parcialmente soldada, e a superfície interna não soldada se encontrava sempre na parte central. Isto mostrava que o poro começa a fechar e soldar progressivamente das extremidades em direção ao centro.

### **2.5.1 Fechamento mecânico do defeito**

São duas as principais abordagens da literatura em relação ao fechamento mecânico de defeitos: a explicitamente macroscópica e a microscópica. A abordagem macroscópica estuda todo o processo em uma peça de trabalho no qual o vazio é claramente definido, em que o fechamento de defeito é analisado se utilizando dados experimentais ou simulações por elementos finitos. Já a abordagem microscópica considera o vazio em uma matriz infinita em que a evolução de seu tamanho é analiticamente prevista de acordo com algumas considerações.<sup>19</sup>

A abordagem macroscópica permite o estudo do fechamento do defeito em condições precisas de processo e possui duas principais famílias de processo: laminação a quente e forjamento. De uma maneira geral, algumas condições que favorecem o fechamento do defeito no forjamento a quente serão apresentadas a seguir.<sup>19</sup>

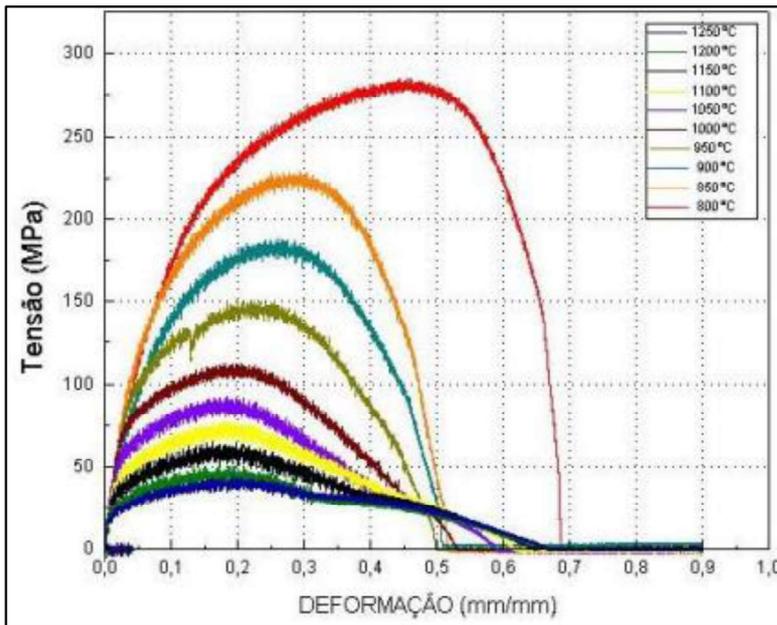
#### **2.5.1.1 Temperatura de forjamento**

A temperatura da peça ou do tarugo a ser conformado é, provavelmente, a mais importante variável do processo de forjamento. Tem grande influência na resistência à deformação do material a ser forjado e conseqüentemente sobre a força e energia de conformação.<sup>34</sup>

O forjamento é planejado a partir de curvas tensão versus deformação e tensão máxima versus temperatura. Estas curvas são obtidas através de ensaios de tração realizados

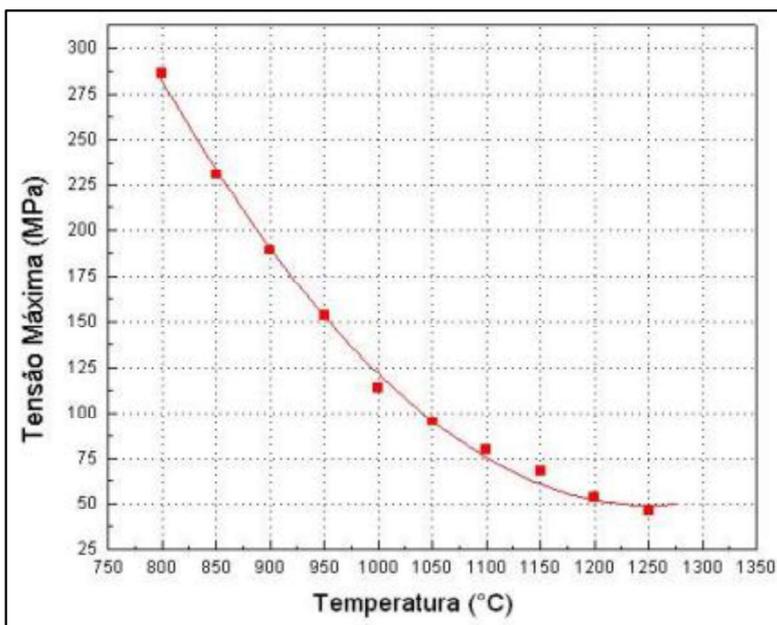
em simulador termomecânico com taxas de deformação calculadas a partir das condições industriais. A Figura 14 mostra a curva tensão versus deformação obtida através de amostras do aço W.NR. 1.2714 ensaiados em simulador termomecânico à taxa de deformação de  $5s^{-1}$ . A Figura 15 apresenta a curva tensão máxima versus temperatura ensaiada no mesmo equipamento e mesma taxa de deformação da curva anterior.<sup>22</sup>

Figura 14 – Curva tensão versus deformação do aço W.NR. 1.2714 para diferentes temperaturas



Fonte: Queji (2012)

Figura 15 – Curva tensão máxima versus temperatura do aço W.NR. 1.2714



Fonte: Queji (2012)

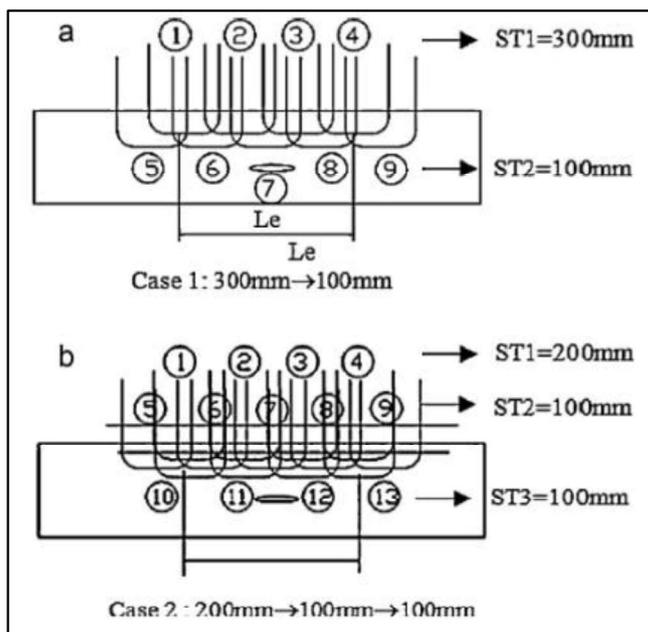
Observa-se nas curvas apresentadas nas Figuras 14 e 15 que com o aumento da temperatura, as tensões necessárias para a deformação plástica do material decrescem.<sup>22</sup>

### 2.5.1.2 Passos de forjamento

Para o forjamento em matriz aberta, maiores valores de redução por passo de forjamento são melhores para o fechamento de defeitos. No caso de um processo com vários passos, a redução no primeiro passo geralmente é o fator que mais contribui para o fechamento de defeitos e as contribuições dos passos seguintes são menos significativas.<sup>19</sup>

Kin<sup>(28)</sup> simulou em um modelo assimétrico bi-dimensional uma redução de 400mm aplicadas de duas formas, as quais ele chamou de “Caso 1” e “Caso 2”. No “Caso 1” foi aplicado um primeiro passe de 300mm e um segundo passe de 100mm. Para o “Caso 2” foi simulado um passe de 200mm com dois passos subsequentes de 100mm. A Figura 16 ilustra as duas condições.

Figura 16 – Caso 1 e Caso 2 utilizados na simulação

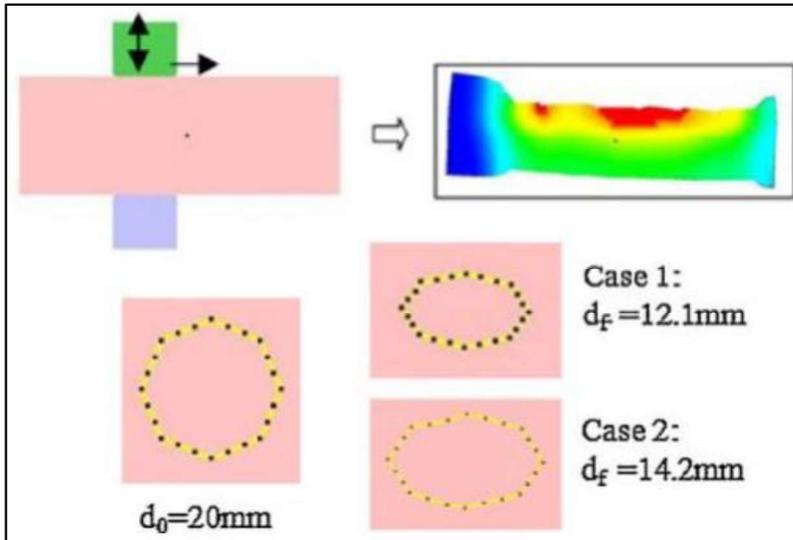


Fonte: Kin, Cho e Bae (2011)

Utilizando um defeito com raio inicial de 20mm para os dois casos, a redução do defeito inicial foi de 39,5% para o “Caso 1” e de 29% para o “Caso 2”. A Figura 17 mostra o resultado da simulação do “Caso 1” e “Caso 2”. Para validar o modelo, Kin<sup>(28)</sup> realizou experimento com corpos de prova de uma liga de chumbo com furos de 10mm. O resultado

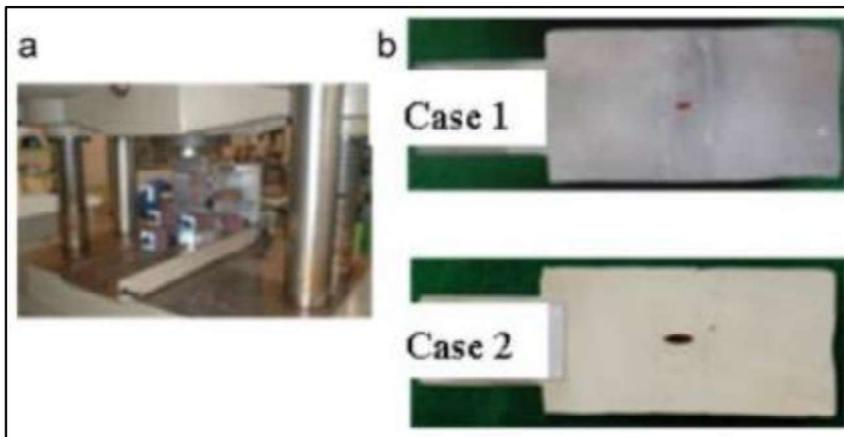
do experimento é apresentado na Figura 18 e comprova que maior redução é mais eficaz no fechamento de vazios internos.

Figura 17 – Efeito do fechamento de vazio com 20mm com os passes do Caso 1 e Caso 2



Fonte: Kin, Cho e Bae (2011)

Figura 18 - Resultado experimental de corpos de prova de chumbo com furo inicial de 10mm forjados no Caso 1 e no Caso 2



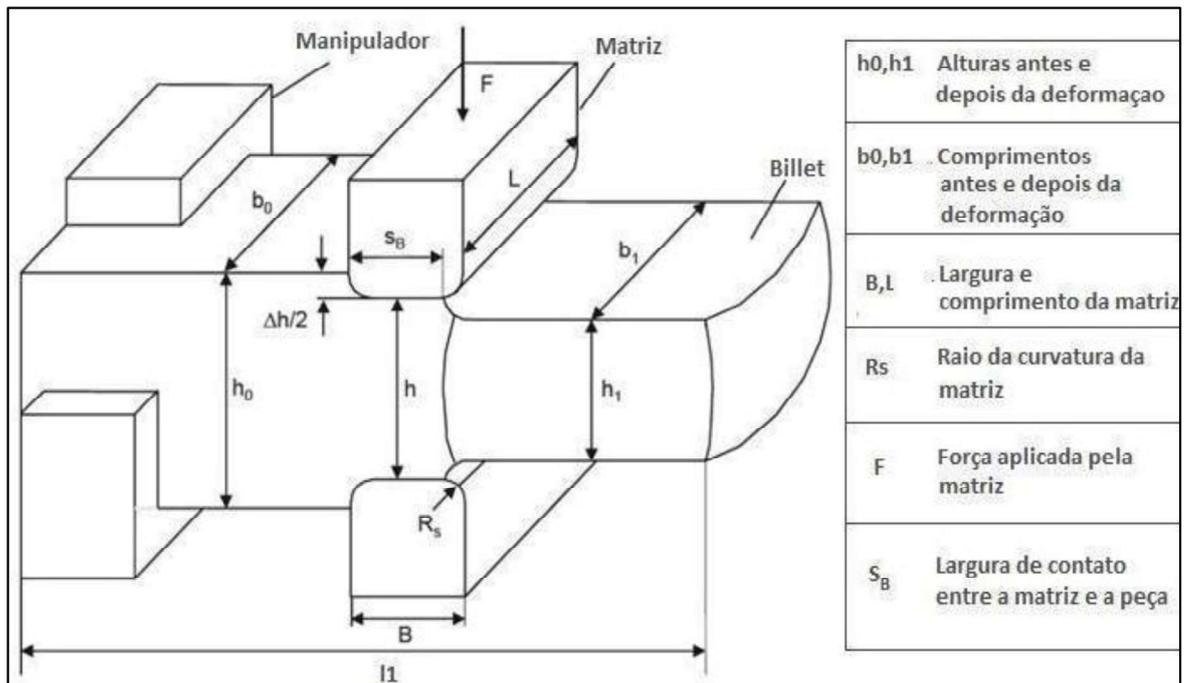
Fonte: Kin, Cho e Bae (2011) - adaptada

### 2.5.1.3 Razão de mordida e avanço

No forjamento em matriz aberta, o avanço é o quanto se movimentam longitudinalmente a ferramenta em relação à peça após uma mordida, ou uma série delas na mesma região, caso haja rotação da peça. A mordida é o movimento que a prensa realiza para conformar o material.<sup>32</sup>

A razão de mordida ( $S_B/h_0$ ) é o parâmetro que relaciona a largura de contato ferramenta-peça ( $S_B$ ) com a altura inicial da peça ( $h_0$ ). Essa relação guia o forjamento de peças maciças em relação às distribuições de deformações no seu interior. A Figura 19 apresenta os principais componentes e parâmetros de forjamento em matriz aberta, incluindo  $S_B$  e  $h_0$ .<sup>32</sup>

Figura 19 – Sistemática do forjamento em matriz aberta



Fonte: Cardoso, Peteffi, Limberger, Costa e Schaeffer (2015)

Em relação às deformações, pode-se considerar que, quando baixas, atingem a peça apenas superficialmente e demandam mais tempo de processo. Enquanto grandes deformações, além de exigirem forças de forjamento maiores, podem alterar a geometria da peça irreversivelmente.<sup>32</sup>

Chen *et al.*<sup>(33)</sup>, citam que faixas de deformação entre 20 e 25% são ideais para o fechamento de vazios, e que dificuldades de deformações uniformes na zona próxima ao eixo de peças maciças podem ser sanadas quando conformadas com a utilização de rotações de 90° entre sucessivas mordidas.

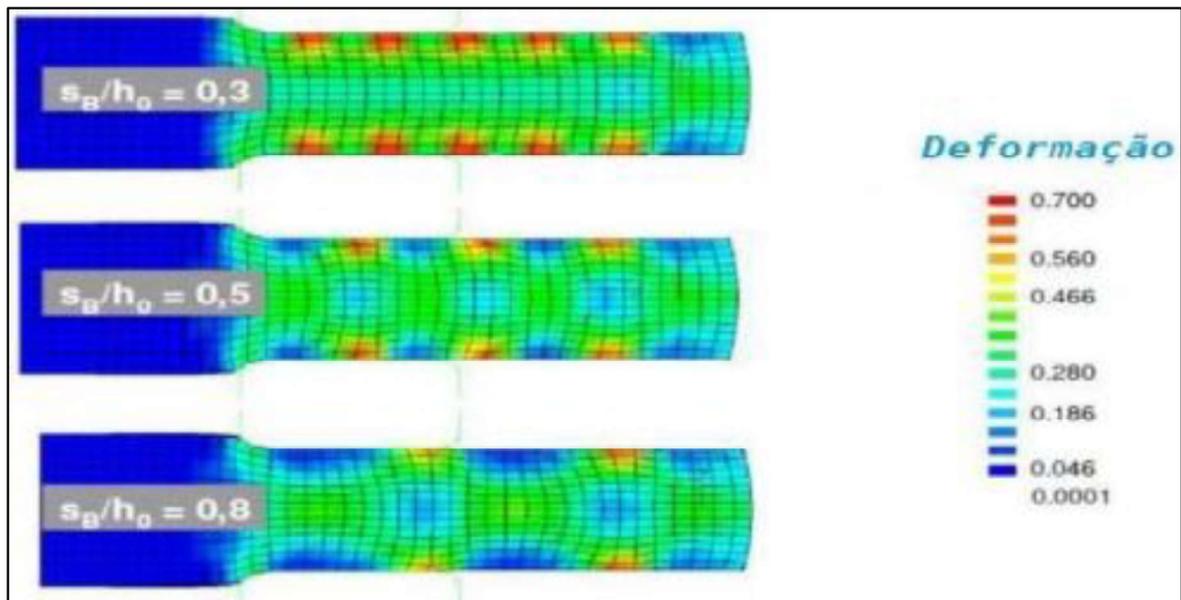
Relações de mordida ( $S_B/h_0$ ) pequenas, na ordem de 0,2, aumentam o tempo de processo devido a necessidade do maior número de mordidas, ocasionando perdas térmicas significativas. Com essa relação, ocorrem mudanças puramente geométricas da peça, pois as deformações atingem apenas sua superfície, enquanto o núcleo permanece inalterado.

Também são vistas tensões trativas no núcleo, o que pode gerar o aumento dos vazios provenientes do estado bruto da peça.<sup>32</sup>

Quando essa relação ( $S_B/h_0$ ) é elevada a ordem de 1, têm-se mordidas de grandes superfícies de contato, aumentando a força necessária no processo, assim como o atrito entre peça e ferramenta. A força disponível na prensa de forjamento pode se tornar limitante neste caso. Além dos dois fatores citados, uma razão de mordida grande causa distribuições heterogêneas de deformações, gerando zonas não deformadas, que continuam passíveis de defeitos metalúrgicos.<sup>32</sup>

A Figura 20 apresenta três distintas razões de mordida (0,3, 0,5 e 0,8) para uma peça maciça. É possível verificar a influência desse parâmetro como descrito anteriormente.<sup>32</sup>

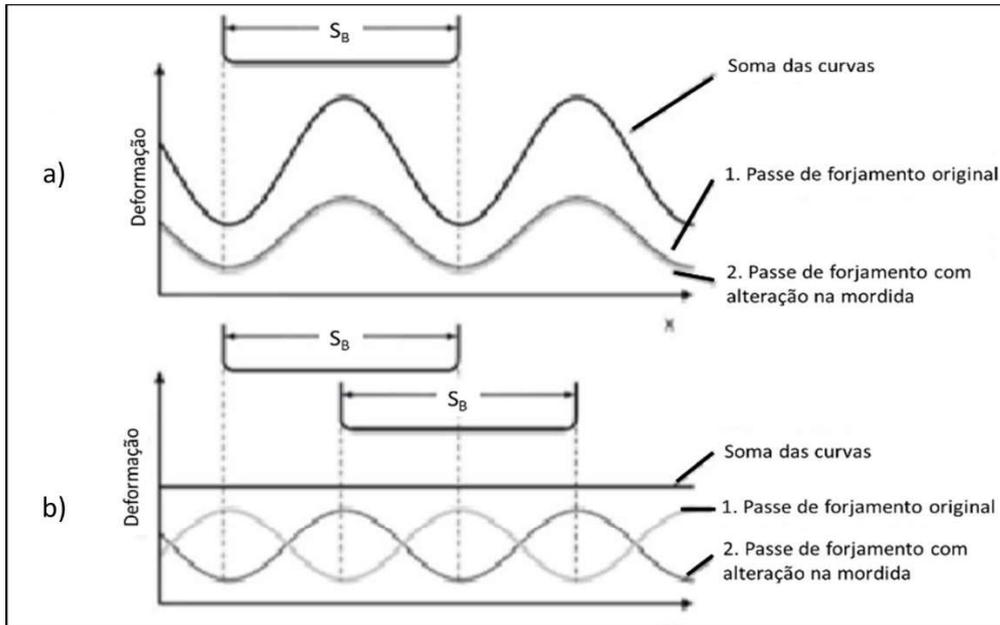
Figura 20 – Distribuições de deformações com diferentes razões de mordida



Fonte: Cardoso, Peteffi, Limberger, Costa e Schaeffer (2015)

A Figura 21 apresenta as deformações resultantes quando utilizados diferentes avanços da ferramenta ao longo do processo. No gráfico da Figura 21-a, pode-se observar as zonas não afetadas pelo forjamento devido ao grande avanço da matriz após cada mordida. Na Figura 21-b, é possível verificar que todas as zonas são deformadas quando o avanço é ajustado.<sup>32</sup>

Figura 21– Somatório de deformações para diferentes avanços – a) grande avanço da matriz após cada mordida e b) avanços ajustados para valores menores

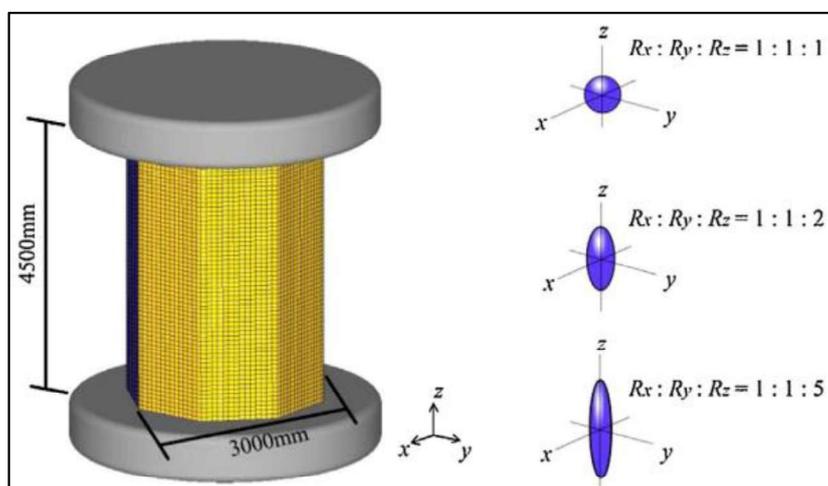


Fonte: Cardoso, Peteffi, Limberger, Costa e Schaeffer (2015)

#### 2.5.1.4 Processos de forjamento e formato dos vazios

Feng *et al.*<sup>(38)</sup> fizeram algumas simulações (Figura 22) em elementos finitos sobre a eficiência do fechamento de vazios nas operações de recalque e estiramento (forjamento no sentido longitudinal). Para o forjamento de recalque, foi simulado um lingote octagonal com diâmetro de 3000mm e 4500mm de altura, com vazios de diferentes formatos iniciais ( $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 1$ ,  $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 2$  e  $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 5$ ).

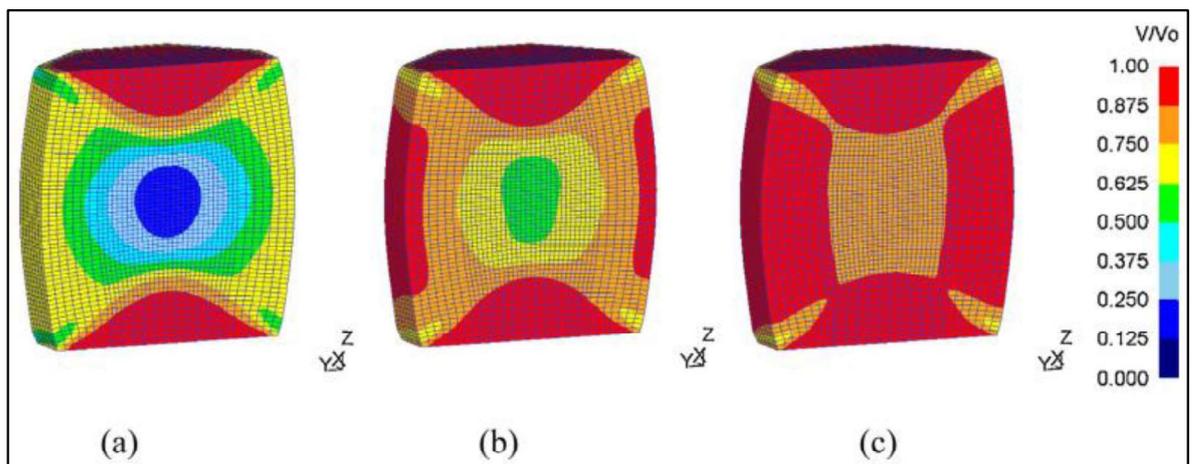
Figura 22 - Lingote octagonal no processo de recalque e os diferentes formatos iniciais de vazios



Fonte: Feng, Cui, Liu, Shang, Sui e Liu (2016)

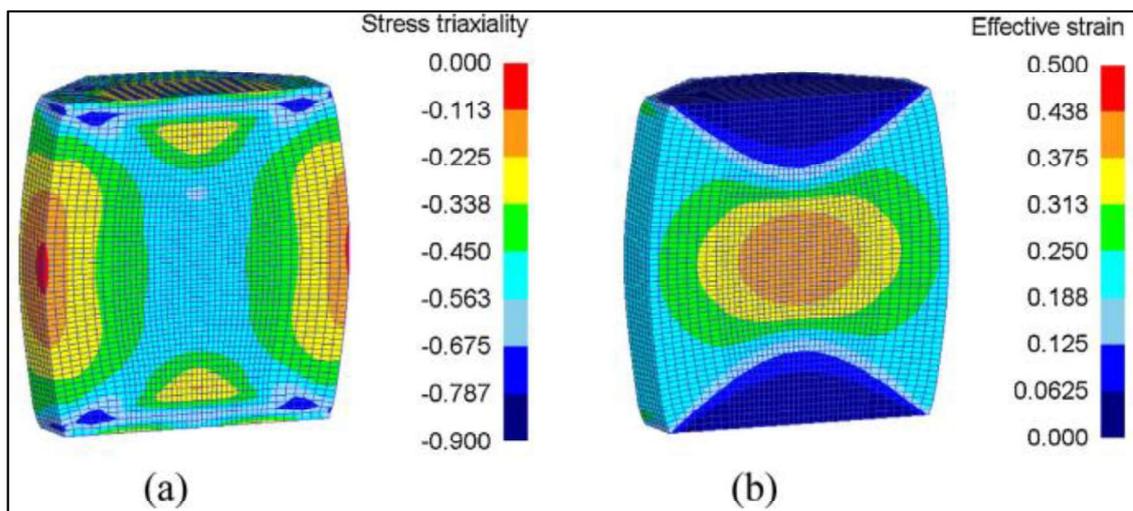
A Figura 23 apresenta os resultados do volume relativo  $V/V_0$  dos vazios após o processo de recalque com 20% de redução na altura. As tensões triaxiais e a tensão efetiva são mostradas na Figura 24. De acordo com os resultados, o fechamento de vazios nas regiões centrais é muito mais fácil que dos vazios nas extremidades do lingote. Também foi descoberto que os vazios com formatos elípticos são mais difíceis de serem fechados que os vazios esféricos.<sup>38</sup>

Figura 23 – Volume relativo dos vazios no lingote após o recalque com 20% de redução na altura (a)  $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 1$ , (b)  $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 2$  e (c)  $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 5$



Fonte: Feng, Cui, Liu, Shang, Sui e Liu (2016)

Figura 24 - a) tensão triaxial e b) tensão efetiva no lingote após o recalque com redução de 20% na altura

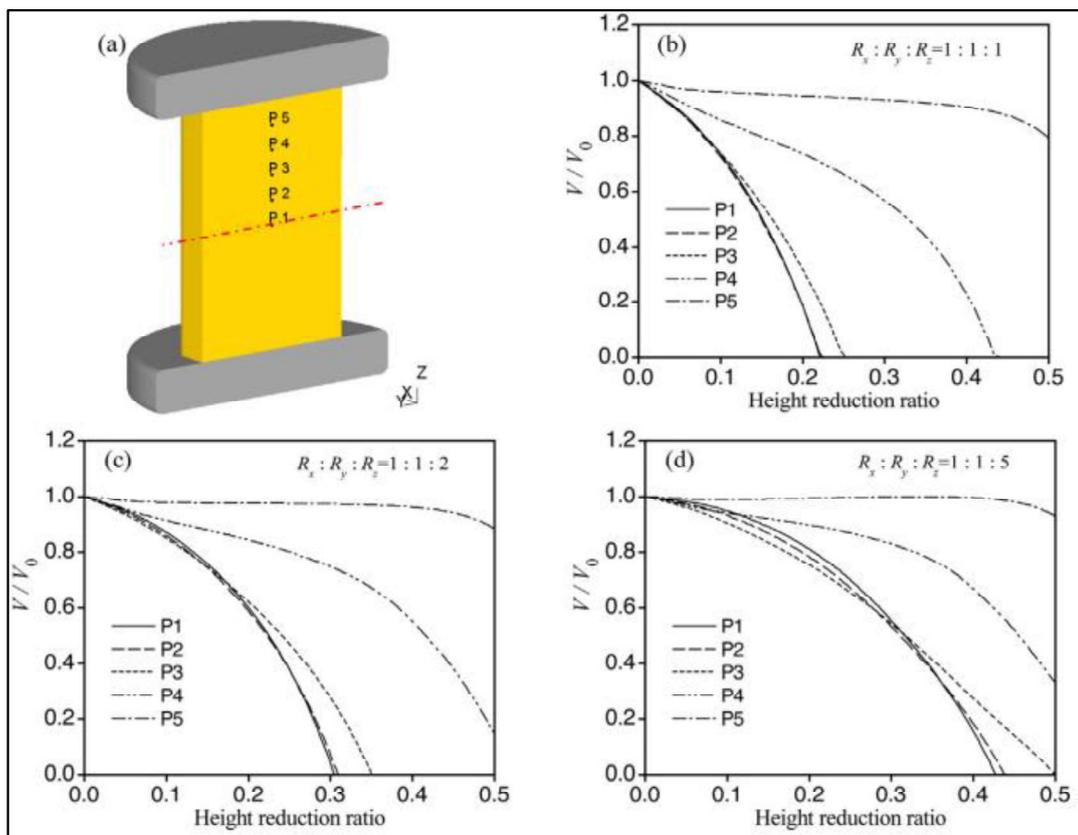


Fonte: Feng, Cui, Liu, Shang, Sui e Liu (2016)

A Figura 25 ilustra a evolução do volume dos vazios localizados nos pontos P1 a P5 e mostra que, com o aumento da distância da posição do vazio em relação ao centro do lingote, uma maior redução na altura torna-se necessária para fechar o vazio. De acordo com

os resultados da simulação, a possibilidade de fechar os vazios próximos às extremidades do lingote durante o recalque é pequena. Também é possível observar na figura que um vazio esférico no centro do lingote é fechado após um recalque com 22% de redução na altura, enquanto o dobro de redução é necessária para fechar um vazio elíptico prolongado ( $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 5$ ) na mesma posição. Os resultados mostram que quanto maior a relação  $R_z/R_x$ , mais difícil o fechamento do vazio.<sup>38</sup>

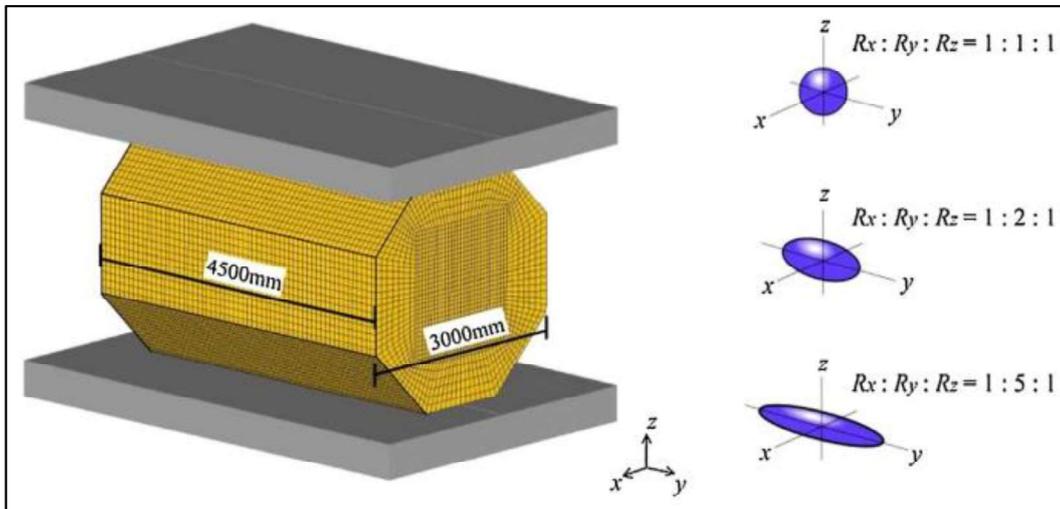
Figura 25 – (a) as posições assumidas para cada vazio com diferentes formatos iniciais: (b)  $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 1$ , (c)  $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 2$  e (d)  $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 5$



Fonte: Feng, Cui, Liu, Shang, Sui e Liu (2016)

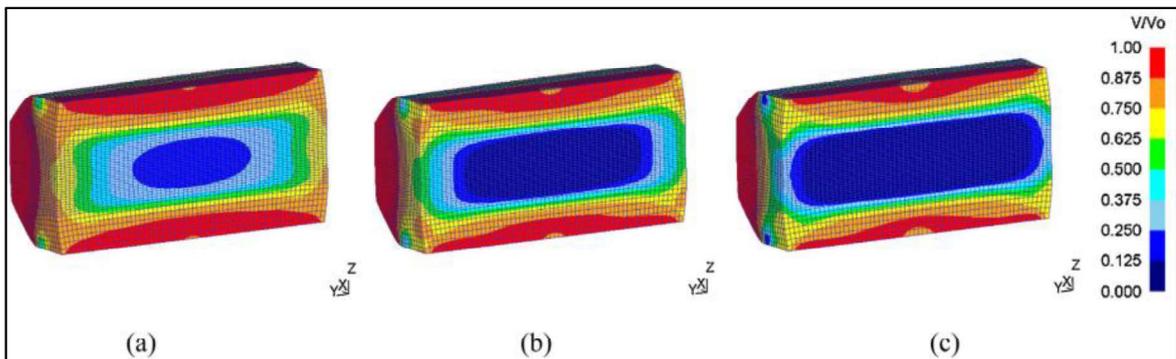
Nas simulações do forjamento de estiramento, Feng *et al.*<sup>(38)</sup> utilizaram ferramentas planas largas, e as posições assumidas para os vazios com diferentes formatos iniciais podem ser mostradas na Figura 26. A Figura 27 ilustra o volume relativo  $V/V_0$  dos vazios após o processo de forjamento com 20% de redução na altura, enquanto a Figura 28 mostra a distribuição das tensões triaxiais e da tensão efetiva. Pode ser observado que os vazios próximos à linha central axial do lingote são mais fáceis de serem fechados devido a alta pressão hidrostática e as grandes deformações. Após o forjamento de estiramento, o volume do vazio elíptico prolongado é bem menor que do vazio esférico.

Figura 26– Lingote octogonal no forjamento de estiramento com ferramentas planas e os diferentes formatos iniciais assumidos para os vazios do lingote



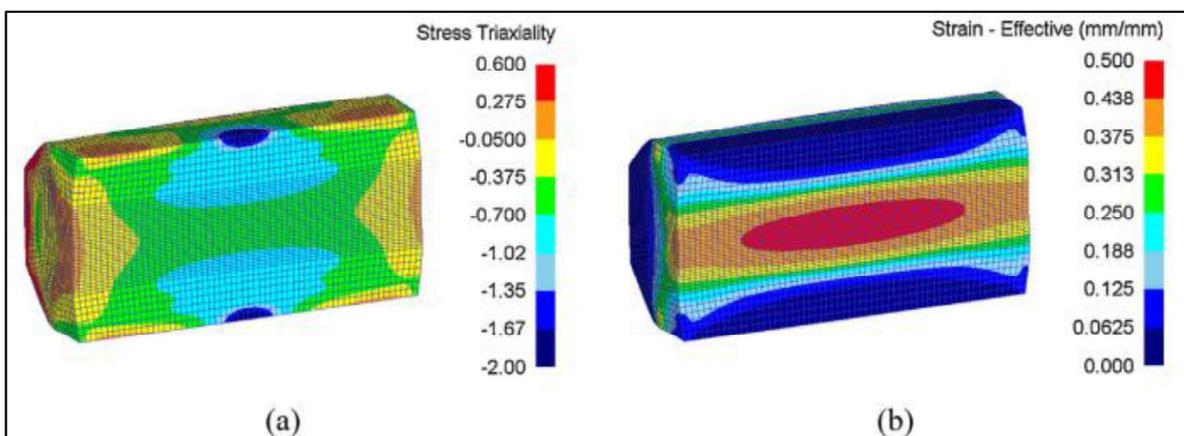
Fonte: Feng, Cui, Liu, Shang, Sui e Liu (2016)

Figura 27 – O volume relativo dos vazios do lingote com 20% de redução na altura para os diferentes formatos iniciais: (a)  $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 1$ , (b)  $R_x : R_y : R_z = 1 : 2 : 1$  e (c)  $R_x : R_y : R_z = 1 : 5 : 1$



Fonte: Feng, Cui, Liu, Shang, Sui e Liu (2016)

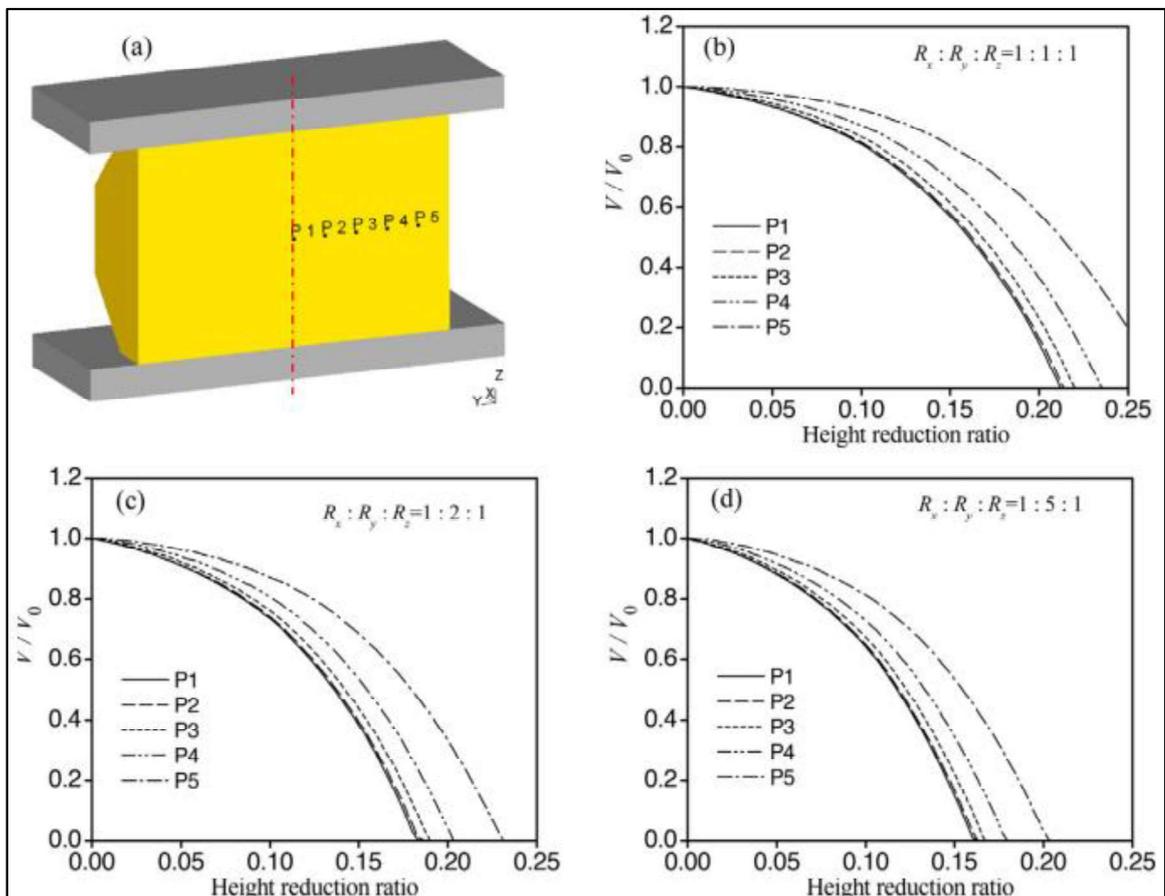
Figura 28 – (a) Tensões triaxiais e (b) tensão efetiva no lingote após o forjamento de estiramento com 20% de redução na altura



Fonte: Feng, Cui, Liu, Shang, Sui e Liu (2016)

O volume relativo dos vazios nas posições P1 a P5 durante o forjamento de estiramento pode ser visualizado na Figura 29. De acordo com os resultados exibidos, embora o vazio próximo ao centro é mais fácil de ser fechado que os vazios próximos às extremidades do lingote, todos os vazios (P1 a P5) podem ser completamente fechados sob a uma redução moderada na altura. Comparado ao vazio esférico, no forjamento por estiramento a eficiência do fechamento do vazio elíptico prolongado é muito maior.<sup>38</sup>

Figura 29 – A posição assumida para cada vazio; o volume relativo para os vazios com diferentes formatos iniciais (b)  $R_x : R_y : R_z = 1 : 1 : 1$ , (c)  $R_x : R_y : R_z = 1 : 2 : 1$  e (d)  $R_x : R_y : R_z = 1 : 5 : 1$



Fonte: Feng, Cui, Liu, Shang, Sui e Liu (2016)

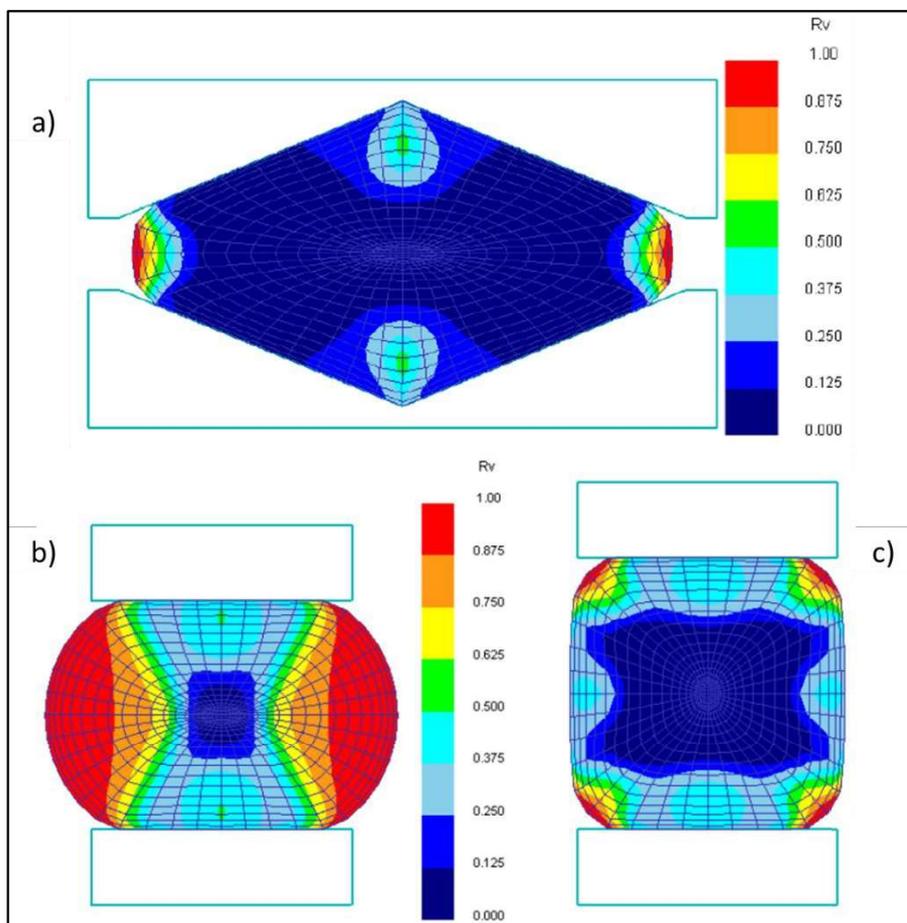
De acordo com a comparação dos dois processos (recalque e forjamento por estiramento), ambos possuem efetividade semelhante para fechar vazio esférico no centro do lingote. Entretanto, para fechar vazios próximos às extremidades do lingote e vazios elípticos prolongados com o eixo principal alinhado na direção axial do lingote, o recalque é menos efetivo, enquanto o forjamento de estiramento é mais eficiente. Em processos reais, frequentemente existem mais vazios próximos às extremidades do lingote e eles geralmente possuem formato elíptico prolongado, portanto, quando o recalque é aplicado como primeiro

passo de forjamento, é provável que muitos vazios mantenham-se abertos para as etapas subsequentes.<sup>38</sup>

#### 2.5.1.5 Geometria das ferramentas

Conforme simulado por Zhang<sup>(20)</sup> e Dyja<sup>(21)</sup> e mostrado na Figura 30, a geometria côncava de bigorna provê um melhor fechamento dos defeitos internos, pois confere maiores tensões em estado triaxial no centro dos tarugos e uma distribuição mais uniforme das deformações no volume do tarugo forjado.<sup>19</sup>

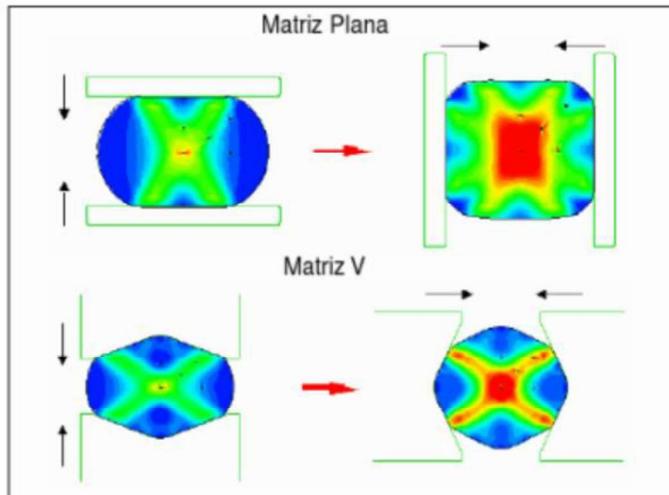
Figura 30 – Volume relativo de vazios (Rv) - a) bigorna V de 135°, b) bigorna plana e c) bigorna plana após rotação de 90°



Fonte: Zhang (2012)

Wang<sup>(27)</sup> mostrou a influência do formato da matriz no fechamento de vazios (Figura 31) e apresentou resultados semelhantes aos de Zhang<sup>(20)</sup> e Dyja<sup>(21)</sup>. Simulações por elementos finitos mostraram que matriz plana deforma áreas globais, e matriz com formato em V deforma áreas centrais. Além disso, a matriz em V proporciona um rápido fechamento do vazio com uma menor redução em relação à matriz plana.

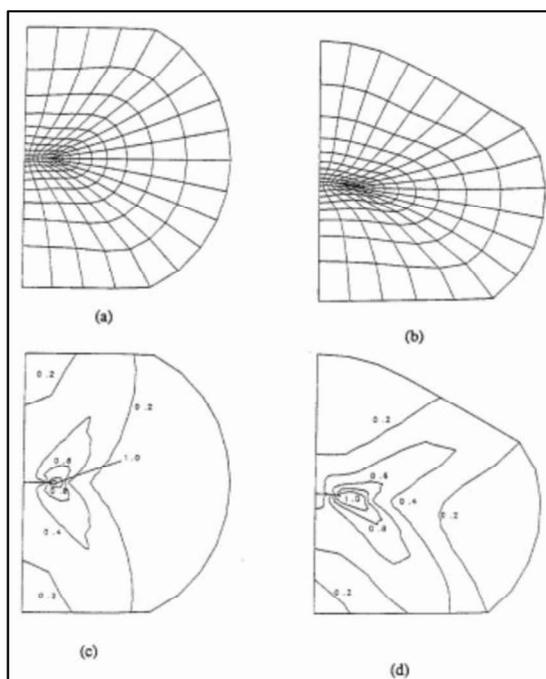
Figura 31 – Comparação dos níveis de deformação entre matrizes planas e com formato V



Fonte: Wang, Thomson e Hodgson (2007)

Experimentos realizados por Park e Tanaka<sup>(29)</sup> compararam a utilização de um par de bigornas planas com um par de bigorna plana inferior e bigorna superior em V. Com o uso da ferramenta em V a velocidade de ligação das superfícies do vazio assim como a eficiência de ligação foram melhores do que em forjamentos apenas com matrizes planas. A Figura 32 mostra a configuração das malhas da simulação em elementos finitos para os dois formatos das matrizes e a distribuição da deformação equivalente no centro do material.

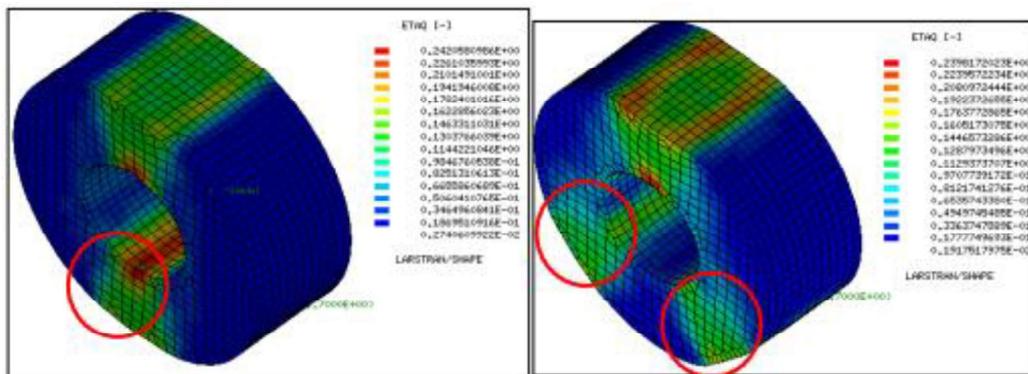
Figura 32 – Comparação da configuração da malha e a deformação efetiva entre a) matrizes planas e b) matriz superior em V + matriz inferior plana



Fonte: Park e Yang (1997)

Já Medeiros<sup>(34)</sup> realizou simulações que compararam as deformações no forjamento de um eixo vazado utilizando bigornas inferior e superior planas e conjunto de bigorna plana superior e V inferior. A Figura 33 mostra os resultados da deformação equivalente para cada um dos casos. Como pode ser visto, para o modelo de matriz inferior em V a deformação no seu diâmetro interno é menor do que no modelo com matrizes planas. Isto sugere que as deformações serão menos irregulares no diâmetro interno.

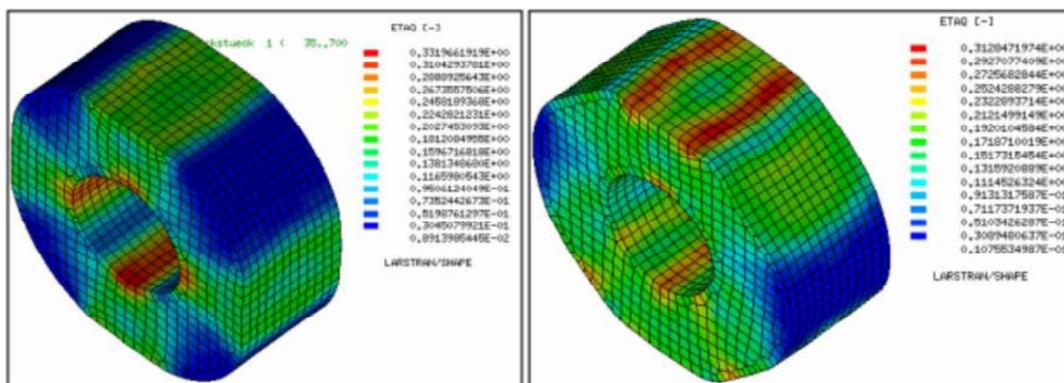
Figura 33 – Resultados de deformação equivalente para o primeiro recalque - a) modelos de matrizes planas e b) modelo com matriz inferior em V



Fonte: Costa, Limberger, Brito e Schaeffer (2014)

A Figura 34 mostra os resultados da deformação equivalente para o segundo recalque. A condição de menor deformação no diâmetro interno permanece e os valores para deformação equivalente são mais homogêneos para o modelo com matriz inferior em V.<sup>34</sup>

Figura 34 – Resultados de deformação equivalente para o segundo recalque (a) modelos de matrizes planas; (b) modelo com matriz inferior em V

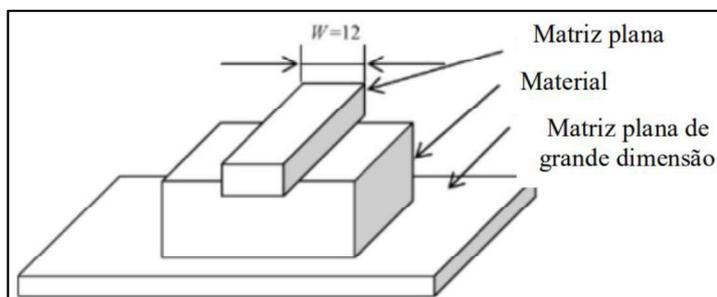


Fonte: Costa, Limberger, Brito e Schaeffer (2014)

Kakimoto<sup>(30)</sup> utilizou simulação de deformações em modelos 2D e 3D para avaliar o fechamento de vazios internos. No que diz respeito a matrizes, foram utilizados matrizes

planas na parte superior e matrizes planas e de grande largura e comprimento na parte inferior (conforme Figura 35).

Figura 35 – Representação do método utilizado por Kakimoto



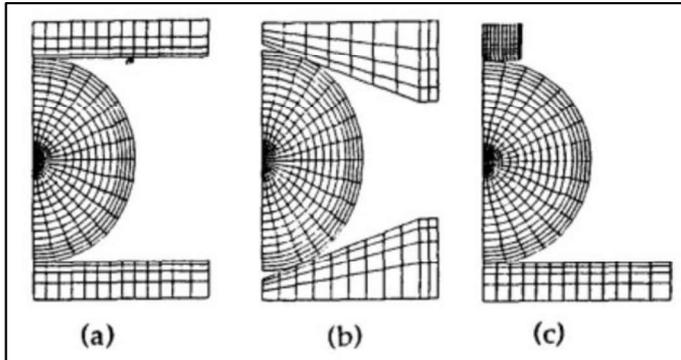
Fonte: Queji (2012)

Combinações de matrizes superiores e inferiores assimétricas são mais eficazes para o fechamento de vazios internos do que matrizes iguais na parte superior e inferior. Em geral, a tensão interna equivalente e a tensão hidrostática no material aumentam porque o material chega mais perto ao estado de deformação plana com matrizes com área superficial maiores. Além disso, quando matrizes assimétricas são usadas, ocorre deformação assimétrica que aumenta a tensão equivalente devido à diferença na área de contato entre as matrizes e o material. Espera-se considerável mudança se o comprimento das matrizes é alterado.<sup>22</sup>

Feng *et al.*<sup>(38)</sup> simularam a mesma configuração de ferramentas da Figura 35 e compararam com um processo comum de forjamento utilizando ferramentas superior e inferior planas com mesma largura. A eficiência do fechamento do vazio aumenta com o aumento da largura da ferramenta durante o processo comum de forjamento. Já com larguras pequenas de ferramenta, o forjamento ilustrado na Figura 35 pode fornecer uma pressão hidrostática mais alta e promover melhor o comportamento de fechamento do vazio. Entretanto, com o aumento da largura da ferramenta, a diferença da eficiência do fechamento de vazios nos dois processos se torna imperceptível. Além disso, a vantagem do forjamento com ferramentas de largura maior utilizando o processo da Figura 35 pode diminuir devido à exigência de cargas maiores na prensa.

Dudra<sup>(37)</sup> estudou a influência de três formatos de matriz (Figura 36) no fechamento de vazios durante o forjamento: ferramentas superior e inferior planas, ferramentas superior e inferior em V e ferramentas FML (mesma configuração apresentada na Figura 35). A ferramenta em V apresenta ângulo de  $135^\circ$  e a FML (Free of Mannesamn effect at Lower press loads) possui uma ferramenta superior de 98 cm de largura.

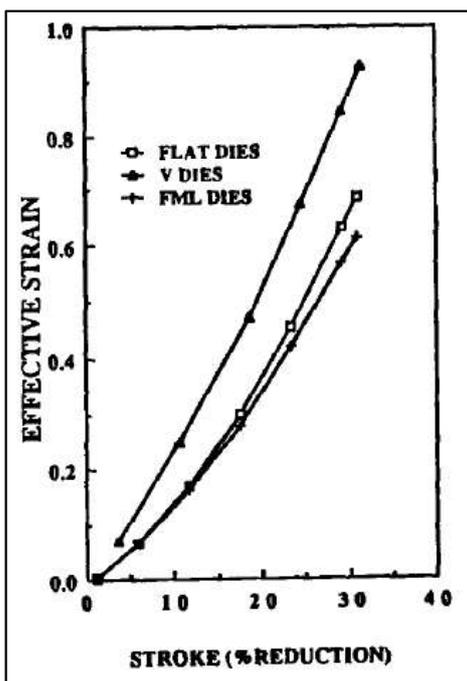
Figura 36 – Malhas para os três diferentes tipos de ferramenta a) planas; b) formato em V e c) FML (Free of Mannesamn effect at Lower press loads)



Fonte: Dudra e Taeklm (1990)

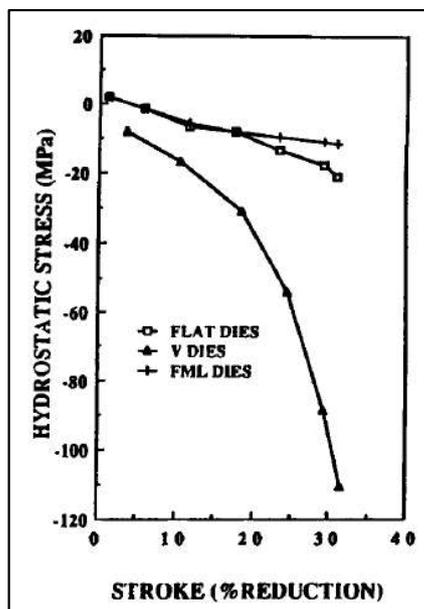
Como tensão efetiva e tensão hidrostática contribuem para o fechamento dos vazios, estes valores foram calculados para os três tipos de ferramenta no centro da peça em forjamento. Os maiores valores de tensão efetiva foram observadas para as ferramentas em V, como pode ser visto na Figura 37. Os valores para os outros dois tipos de bigornas foram semelhantes entre si. A tensão hidrostática no centro da peça forjada pode ser observada na Figura 38. Mais uma vez os valores são maiores para as ferramentas em formato de V, para os outros dois tipos de bigorna os valores são semelhantes até aproximadamente 20% de redução.<sup>37</sup>

Figura 37 – Efeito da geometria da ferramenta na tensão efetiva calculada no centro da peça forjada



Fonte: Dudra e Taeklm (1990)

Figura 38 - Efeito da geometria da ferramenta na tensão hidrostática calculada no centro da peça forjada



Fonte: Dudra e Taeklm (1990)

Como a força/capacidade da prensa utilizada é uma limitação no forjamento de grandes lingotes, Dudra<sup>(37)</sup> também calculou a carga da prensa para os três tipos de ferramenta. Os resultados estão apresentados na Figura 39. Pode-se observar que o par de bigornas V produz cargas de prensamento muito maiores que as demais. Conseqüentemente, para grandes lingotes a vantagem das ferramentas FML está em produzir grandes níveis de tensão com cargas pequenas.

Figura 39 – Carga da prensa para os diferentes tipos de ferramenta com 30% de redução

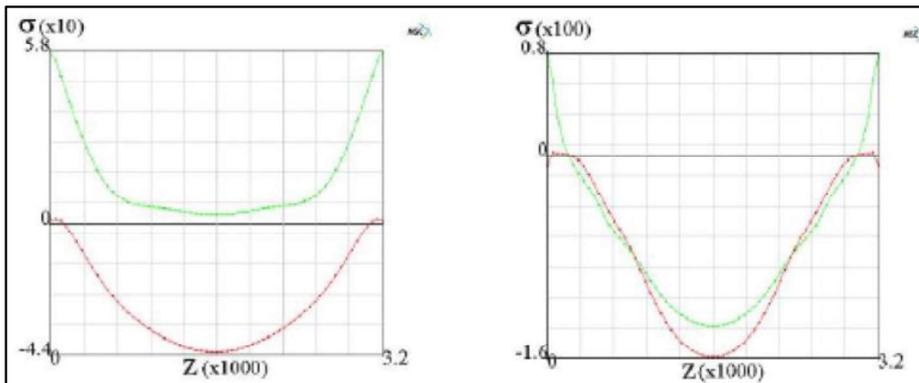
Die type	Press load (tons/cm)
135° V	215
Flat	36
FML	20

Fonte: Dudra e Taeklm (1990)

Diferente dos autores citados até o presente momento, Ramos<sup>(31)</sup> não somente fez simulações utilizando software específico, como também comparou esses resultados com testes de forjamento com plasticina realizados em laboratório. Ele considerou o aço ABNT 1045 para as simulações e fez uso de corpos de prova cilíndricos para os testes laboratoriais. Um dispositivo semelhante a uma “mini prensa” também foi confeccionado em madeira para executar as deformações, considerando dois tipos diferentes de bigornas: planas e em V.

Gráficos mostrando as tensões normais  $s_x$  (trativas) e  $s_z$  (compressivas) ao longo do eixo central do cilindro (eixo Z) estão mostradas na Figura 40. Os resultados das simulações mostram tensões trativas no cilindro ao se usarem bigornas planas, o que gera uma propensão ao surgimento de defeitos internos. Considerando-se as diferenças nas escalas dos gráficos da Figura 32, nota-se que nas faces ( $Z=0$ ),  $s_x$  tem maior magnitude no caso das bigornas em V, fato que indicaria uma maior probabilidade de trincas. Isso não foi confirmado pelos ensaios com plasticina. Por outro lado, o gráfico obtido com bigornas em V indica um decréscimo abrupto de  $s_x$  em função de Z, o que está mais de acordo com os resultados experimentais. As tensões  $s_z$  compressivas verificadas no interior do cilindro conformado com bigornas em V são superiores à tensão de escoamento do aço ABNT 1045 nesta temperatura, o que pode evidenciar a vantagem do uso deste tipo de bigornas para o fechamento de vazios no cilindro.<sup>31</sup>

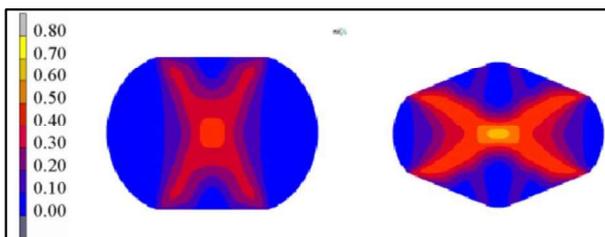
Figura 40 –  $s_z$  (curvas vermelhas) e  $s_x$  (curvas verdes) ao longo do eixo Z do cilindro. Bigornas planas (esquerda) e bigornas em V (direita) [Mpa]



Fonte: Buteler, Neves, Villabón, Souza e Sinatora (2005)

A Figura 41 mostra a distribuição das deformações equivalentes na seção transversal no meio do comprimento do cilindro simulado. Pode-se notar deformações equivalentes mais concentradas no centro da seção, para bigornas planas, e deformações mais intensas e mais homogeneamente distribuídas para bigornas em V.<sup>31</sup>

Figura 41– Comparação das deformações equivalentes para os dois tipos de ferramentas. Bigornas planas (esquerda) e bigornas em V (direita)



Fonte: Buteler, Neves, Villabón, Souza e Sinatora (2005)

A Figura 42 mostra os cilindros de plasticina após uma redução de 20%, usando os dois tipos de ferramenta. Pode-se perceber o aparecimento de trincas na face do cilindro no ensaio com bigornas planas. Estas trincas podem ser associadas à tensão  $s_x$  trativa de alta intensidade. Comparando com os resultados numéricos para bigornas planas (Figura 40), pode-se perceber que há picos de tensões trativas  $s_x$  na face do cilindro, o que explica as trincas verificadas no corpo-de-prova em plasticina.<sup>31</sup>

Para o ensaio com bigornas em V não foram verificadas trincas na face do cilindro. Os resultados numéricos também mostram picos de tensões trativas na face do cilindro, apesar das tensões serem predominantemente compressivas no interior do mesmo. Pode-se afirmar que os resultados do ensaio com plasticina não foram coerentes com os resultados numéricos, para a face do cilindro, no modelo com bigornas em V.<sup>31</sup>

Figura 42 – Configuração da face dos cilindros confeccionados em plasticina (a) bigornas planas (trincas no centro da peça) e (b) bigornas em V



Fonte: Buteler, Neves, Villabón, Souza e Sinatora (2005)

Diante de todos os trabalhos apresentados, pode-se observar que a literatura chega a divergir em alguns dos pontos analisados, apesar de na maioria das vezes encontrarem resultados semelhantes para simulações de mesmos processos. Além disso, também foi possível perceber que os resultados das simulações em softwares específicos nem sempre são completamente convergentes com resultados de testes laboratoriais. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar com testes em escala industrial a influência da geometria das ferramentas no fechamento de vazios internos, realizando experimentos em uma peça com dimensões reais de produção em uma Forjaria de grandes lingotes. O produto testado foi um cilindro de laminação de tiras a frio.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAL

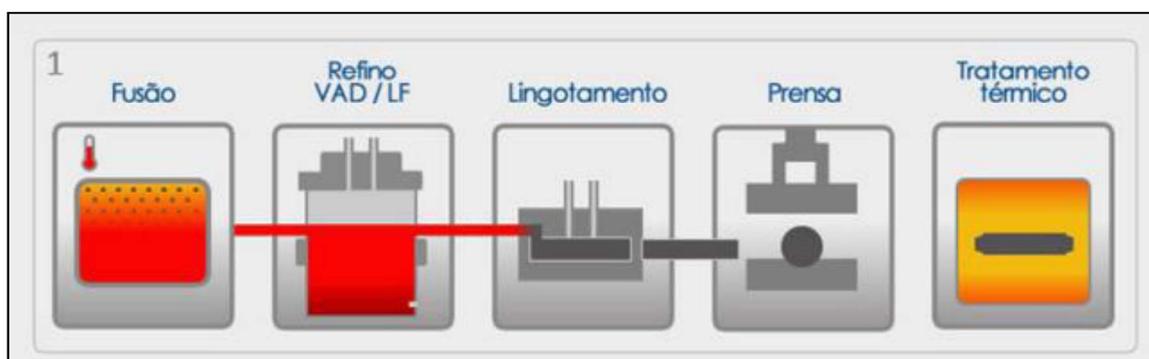
O material utilizado no desenvolvimento deste trabalho é um aço especial com composição química descrita na Tabela 1. Foi produzido um cilindro forjado para laminação de tiras a frio na empresa Gerdau Summit – Aços Forjados, unidade Pindamonhangaba, seguindo o fluxo de produção sintetizado na Figura 43.

Tabela 1 - Composição química do aço que será utilizado neste trabalho (% peso)

Composição Química							
Liga		C	Si	Mn	Cr	Mo	V
VC10	Mín.	0,76	0,1	0,5	4	0,18	0,04
	Máx	1,05	0,7	0,8	5	0,5	0,15

Fonte: Gerdau Summit (2019)

Figura 43 - Fluxo de produção dos cilindros de laminação



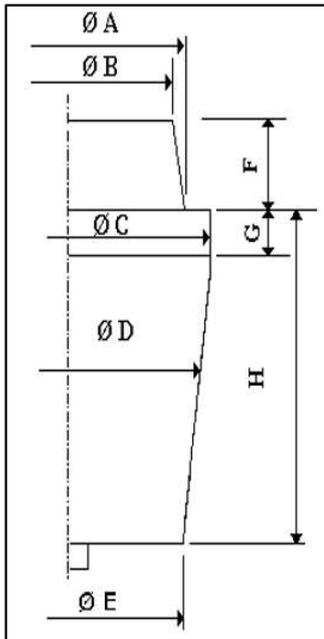
Fonte: Christovam (2015)

Os processos de Fusão, Refino e Lingotamento ocorrem na etapa de Aciaria do processo siderúrgico. A Fusão e o Refino são responsáveis pelo ajuste da composição química conforme especificado (Tabela 1), já na etapa de lingotamento, o metal líquido é solidificado na forma de lingotes.<sup>18</sup>

A Figura 44 apresenta um esboço da seção do lingote que foi utilizado e suas dimensões. O lingote tem diâmetro médio ( $\varnothing$ ) de 935mm, sendo que o peso do corpo (região com diâmetro médio " $\varnothing$ " e altura "H") tem 12220kg. O peso de metal do corpo do lingote compreende a quantidade de material que foi utilizada para fabricação do cilindro de laminação durante o forjamento. As regiões identificadas com "F" e "G" correspondem a

altura do massalote do lingote, “ $\varnothing A$ ”, “ $\varnothing B$ ” e “ $\varnothing C$ ” são, respectivamente, o menor, médio e maior diâmetro do massalote. “ $\varnothing E$ ” corresponde ao diâmetro do pé do lingote.

Figura 44 – Esquema da seção transversal do lingote utilizado na fabricação do cilindro de laminação



Fonte: Produção da autora

Esse lingote (Figura 45) foi posteriormente transferido para a área de Forjaria, onde foi enforado e reauecido até a temperatura de  $1200^{\circ}\text{C}$ . Uma vez que o lingote atingiu esta temperatura, deu-se início ao ciclo de homogeneização, conhecido como encharcamento (soaking).

Figura 45 – Lingote bruto de solidificação posicionado sobre calços para posterior enforamento



Fonte: Produção da autora

Durante o forjamento o lingote foi conformado (Figura 46) no formato bruto de um cilindro de laminação, apresentando o perfil mostrado na Figura 47.

Figura 46 – Forjamento de cilindro de laminação de trabalho a frio



Fonte: Christovam (2015)

Figura 47 – Cilindro de laminação bruto (após forjamento) utilizado no presente trabalho



Fonte: Produção da autora

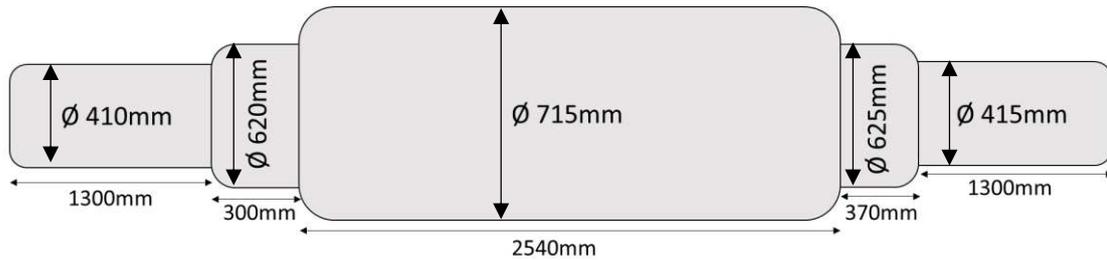
Após o forjamento a peça foi resfriada e enfiada (Figura 48) para um tratamento térmico de Normalização ao ar forçado. O objetivo deste processo é homogeneizar a microestrutura do material e previamente prepará-la para uma austenitização posterior durante o tratamento térmico de têmpera. A Figura 49 apresenta as dimensões reais da peça a quente logo após o Forjamento.

Figura 48 - Enfiamento de cilindro forjado para o tratamento de Normalização



Fonte: Produção da autora

Figura 49 - Dimensões reais da peça a quente logo após o forjamento

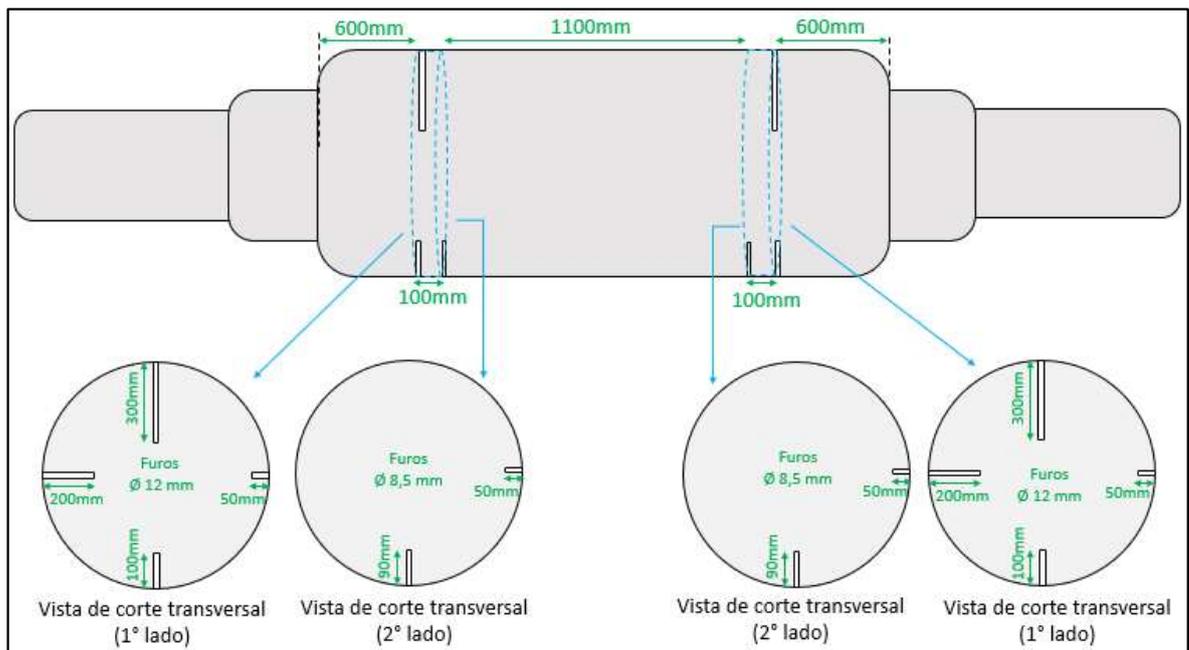


Fonte: produção da autora

### 3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A fim de simular vazios internos no cilindro de laminação de tiras a frio, foram confeccionados furos em diversas posições e profundidades na mesa do cilindro. A figura 50 apresenta uma ilustração da posição, profundidade e diâmetro de cada furo. Como pode ser observado, cada metade da mesa do cilindro possui a mesma configuração e quantidade de furos, permitindo a realização de testes diferentes em cada metade da peça para posterior comparação na efetividade do fechamento dos vazios inseridos.

Figura 50 – Posição, profundidade e diâmetro de cada furo confeccionado na mesa do cilindro



Fonte: Produção da autora

Batoques metálicos cônicos (Figura 51) e montados por interferência foram utilizados para tampar os furos (Figura 52), evitando contato da superfície interna dos

mesmos com o meio externo durante os processos de reaquecimento e forjamento. Além disso, esses tampões permitiram simular furos não superficiais na peça e com diferentes profundidades. Todos os batoques foram confeccionados considerando a composição química da Tabela 1, para assegurar mesma dilatação térmica no processo de reaquecimento do cilindro.

Figura 51 – Batoques metálicos cônicos



Fonte: Produção da autora

Figura 52 – Destaque de um dos furos da mesa do cilindro fechado com batoque



Fonte: Produção da autora

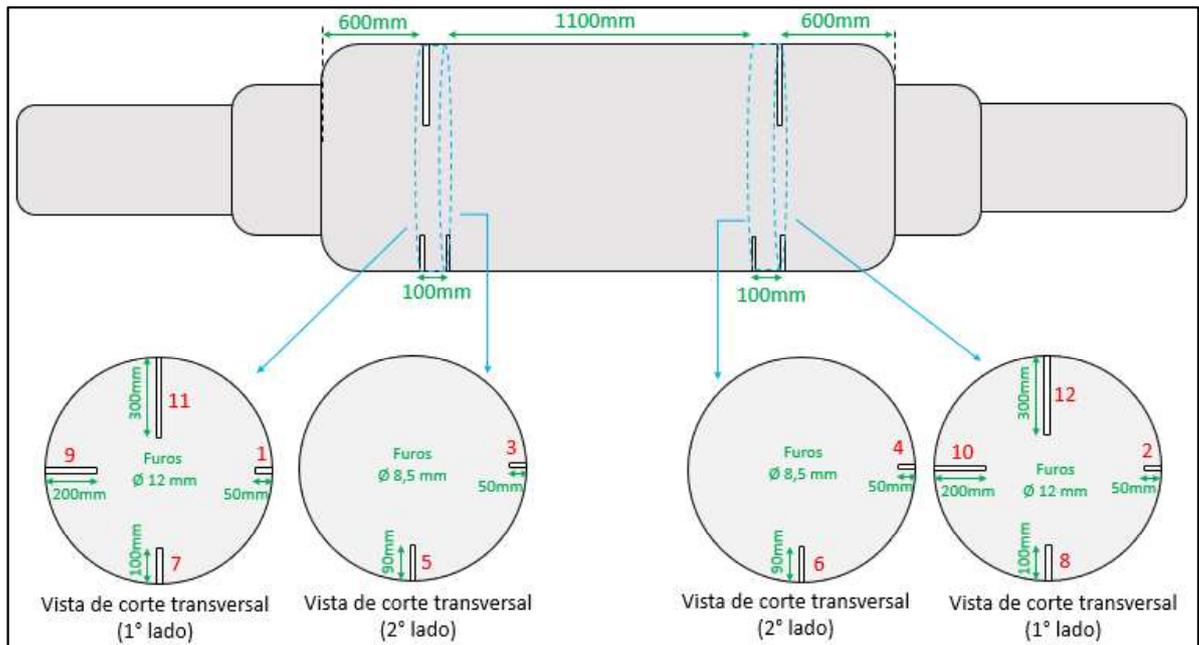
A Tabela 2 apresenta as dimensões iniciais de cada furo confeccionado na mesa do cilindro, o tamanho do batoque inserido e a dimensão e profundidade final que cada furo ficou na peça. Os batoques 5, 6, 8 e 9 quebraram durante a montagem, por isso o comprimento desses furos está maior que os demais. A Figura 53 correlaciona os furos ilustrados na Figura 50 com os furos numerados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dimensões dos furos e batoques

N° do furo	Dimensões iniciais dos furos (mm)		Dimensão do batoque (mm)	Posição e dimensões finais dos furos (mm)		
	Diâmetro	Profundidade	Comprimento	Diâmetro	Comprimento	Profundidade
3	8,5	50	25	8,5	25	25
5	8,5	80	41	8,5	39	41
1	12	50	25	12	25	25
7	12	110	85	12	25	85
9	12	200	154	12	46	154
11	12	300	275	12	25	275
4	8,5	50	25	8,5	25	25
6	8,5	90	47	8,5	43	47
2	12	50	25	12	25	25
8	12	110	77	12	33	67
10	12	200	175	12	25	175
12	12	300	275	12	25	275

Fonte: Produção da autora

Figura 53 – Identificação dos furos ilustrados na Figura 50 com os números da Tabela 2

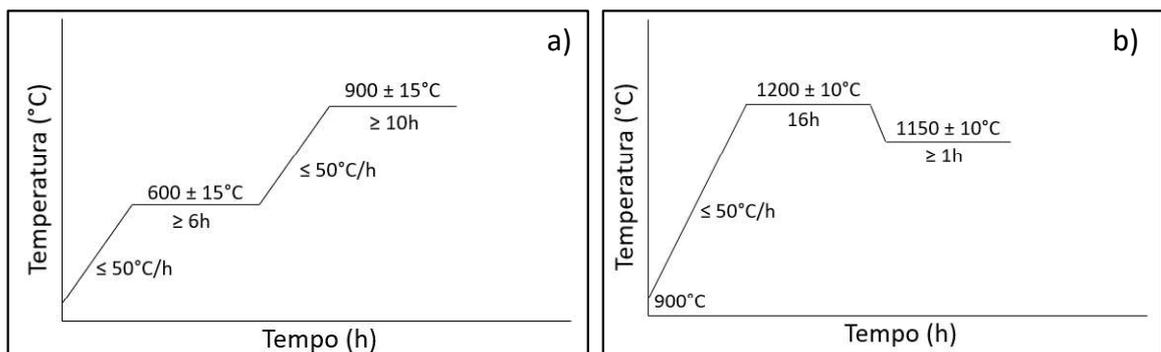


Fonte: Produção da autora

Como pode ser observado na Tabela 2, as dimensões finais dos furos inseridos não simulam a ocorrência de vazios internos esféricos. Feng *et al.*<sup>(38)</sup> descreveram que o formato dos vazios é geralmente irregular e difícil de ser obtido. Em vários estudos de evolução dos vazios durante o forjamento, o formato inicial dos vazios é simplificado como esférico. Entretanto, essa simplificação não é apropriada, desde que os vazios reais frequentemente apresentam um eixo principal alongado devido a não uniformidade da solidificação no processo de fundição de grandes lingotes.

Após colocação dos batoques o cilindro foi enforado em forno de tratamento térmico à gás para pré aquecimento e, na sequência, transferido para um forno à gás de rea aquecimento de lingotes para forjamento. Os ciclos seguidos estão descritos na Figura 54.

Figura 54 - Ciclos de aquecimento – a) pré aquecimento a 900°C em forno de tratamento térmico e b) aquecimento para forjamento em forno de rea aquecimento de lingotes



Fonte: Produção da autora

Na sequência o cilindro foi desenformado e transportado até a prensa hidráulica com capacidade máxima de 8000t, para realização do processo de forjamento. Para verificar a influência do formato das ferramentas de forjamento no fechamento de vazios internos, o cilindro foi dividido em duas metades. A primeira delas (furos com números pares) foi forjada com utilização de um par de bigornas V (Figura 55-a), com 800mm de largura, enquanto a segunda metade do cilindro (furos com números ímpares) foi forjada utilizando um par de bigorna plana superior e V inferior (Figura 55-b), ambas com 800mm de largura. A bigorna V utilizada nos dois casos possui ângulo de 125°.

Figura 55 – Ferramentas de forjamento utilizadas em cada metade da peça



Fonte: Produção da autora

Como a temperatura da peça é, provavelmente, a mais importante variável do processo de forjamento, tendo grande influência na resistência à deformação do material a ser forjado, objetivou-se eliminar ao máximo a influência dessa variável nos experimentos realizados. Portanto, após o forjamento da primeira metade e antes do forjamento da segunda metade, o cilindro foi reaquescido utilizando os mesmos ciclos descritos nas Figuras 54-a) e 54-b), para garantir a mesma condição de aquecimento e encharque para cada metade da peça. Vale ressaltar que foi mantido o mesmo forno de reaquescimento de lingote para cada metade da peça, a fim de também eliminar essa possível influência.

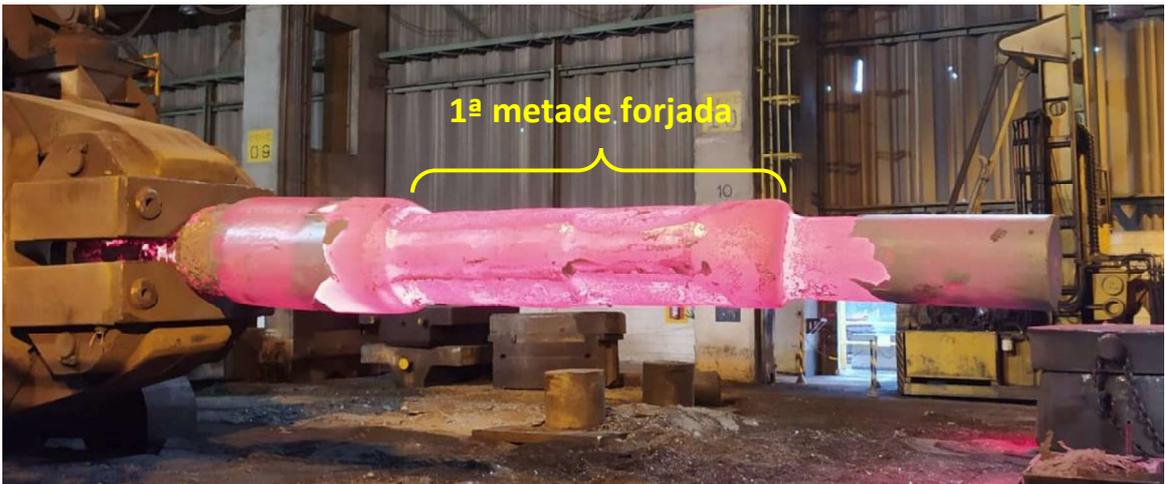
As Figuras 56, 57 e 58 apresentam, respectivamente, a retirada do cilindro do forno para forjamento da primeira metade, a primeira metade da peça forjada com bigornas V-V e a peça inteiramente forjada, sendo a segunda metade conformada utilizando um par de bigornas Plana-V.

Figura 56 – Cilindro sendo retirado do forno de aquecimento para forjamento da 1ª metade



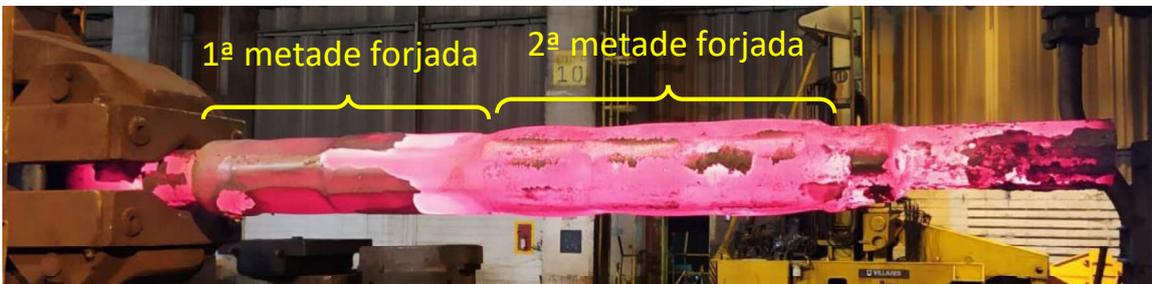
Fonte: Produção da autora

Figura 57 – Cilindro logo após forjamento da 1ª metade com par de bigornas V-V



Fonte: Produção da autora

Figura 58- Cilindro logo após forjamento da 2ª metade com par de bigornas Plana-V



Fonte: Produção da autora

Uma importante preocupação em todos os processos de conformação é o atrito entre a peça e as ferramentas. A existência do atrito aumenta a força de deformação e produz uma deformação menos homogênea.

Da mesma forma, o fenômeno da transferência de calor entre a peça quente e as ferramentas relativamente frias durante a conformação a quente dos metais provoca mudanças de temperatura das ferramentas e da peça. Esse comportamento leva a uma distribuição heterogênea de temperatura na peça durante o forjamento, o que também produz uma deformação menos homogênea e pode influenciar no fechamento dos vazios internos do material.<sup>36</sup>

Portanto, durante a execução dos testes experimentais objetivou-se aproximar o máximo possível o atrito e a transferência de calor ferramentas/peça nas duas metades do cilindro. Foi padronizada a ausência de lubrificação durante todo o forjamento, buscou-se aproximar ao máximo o tempo decorrido entre remover a peça do forno e iniciar o forjamento, a temperatura de início de forjamento da peça e a temperatura de início de conformação das ferramentas. A Tabela 3 apresenta os valores reais dessas variáveis no forjamento de cada metade do cilindro.

Tabela 3 - Tempo decorrido, temperatura das ferramentas e peça antes do forjamento

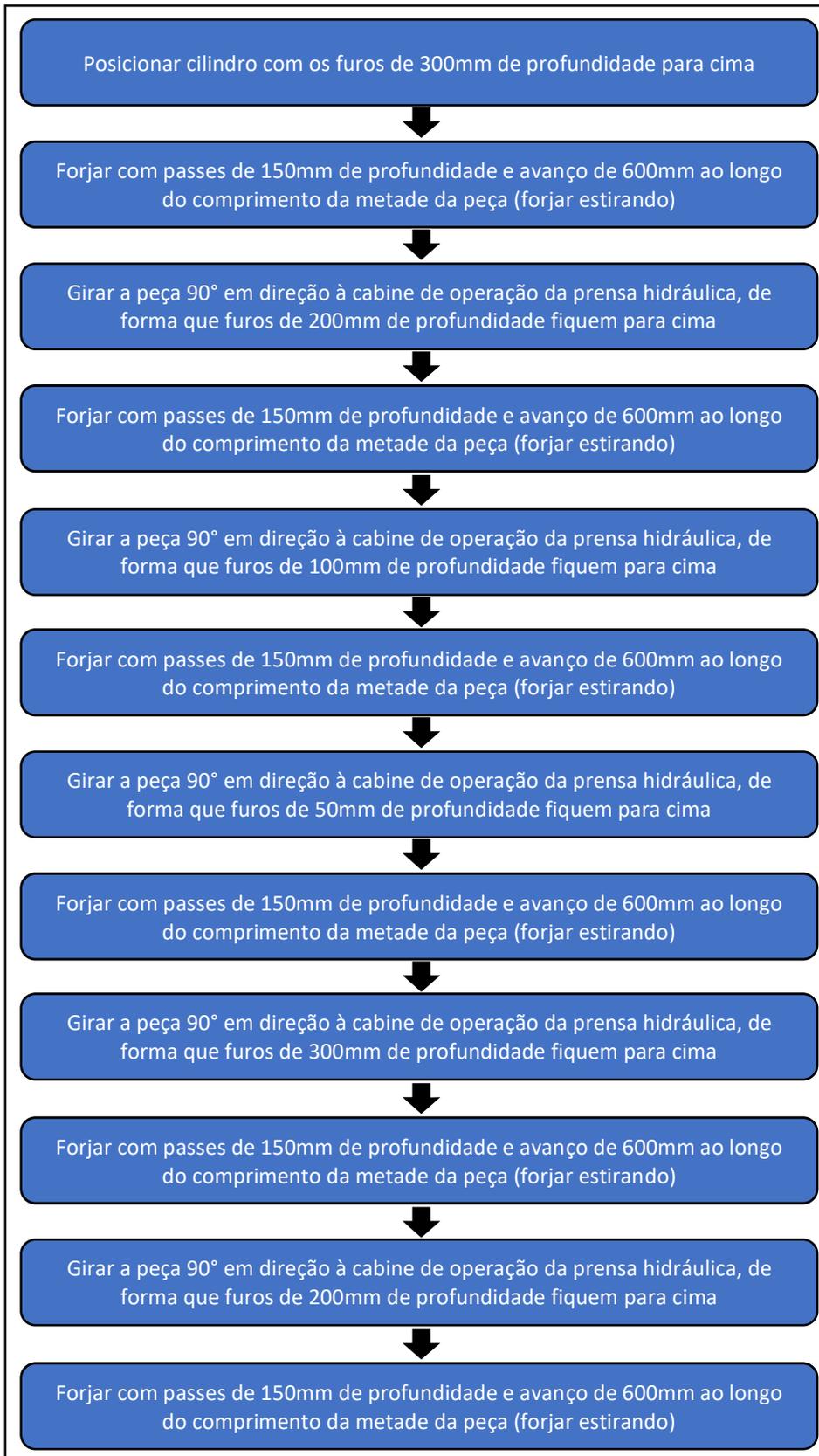
Tipo de ferramenta	Tempo entre retirar do forno e chegar na prensa	Tempo entre retirar do forno e iniciar forjamento	Temperatura da peça no início do forjamento	Temperatura da bigorna no início do forjamento
V-V	4min39s	11 minutos	754°C*	25 a 29°C
Plana-V	3min41s	11 minutos	749°C*	45°C (bigorna Plana) 120°C a 170°C (bigorna V)

\* Temperatura medida sobre a camada de óxidos formada na superfície da peça devido o aquecimento em alta temperatura

Fonte: Produção da autora

A fim de garantir que a razão de mordida ( $S_B/H_0$ ), avanço e passos de forjamento não fossem variáveis no fechamento dos vazios, criou-se uma sequência de forjamento que foi seguida em cada uma das metades do cilindro forjado. Essa sequência é descrita na Figura 59.

Figura 59 – Sequência de forjamento utilizada para cada metade do cilindro



Fonte: Produção da autora

A deformação verdadeira ( $e_x$ ) para cada metade pode ser calculada utilizando a Equação 2, sendo  $\Delta L$  a diferença dos diâmetros finais e iniciais e  $L$  o diâmetro inicial do cilindro. Este é um cálculo aproximado da deformação verdadeira, já que as duas metades não ficaram completamente cilíndricas após o forjamento.

$$e_x = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

A deformação verdadeira aproximada calculada é 59,36% para a metade da peça forjada com o par de ferramentas V-V e 58,04% para a outra metade do cilindro conformada com o par de ferramentas Plana-V.

Após o fim do forjamento do cilindro, realizou-se o tratamento de Normalização ao ar forçado, seguido de um ciclo de alívio de tensões. A Figura 60 apresenta o cilindro em temperatura ambiente após finalização do ciclo de alívio de tensões.

Figura 60 – Cilindro após ciclo de Normalização e Alívio de tensões



Fonte: Produção da autora

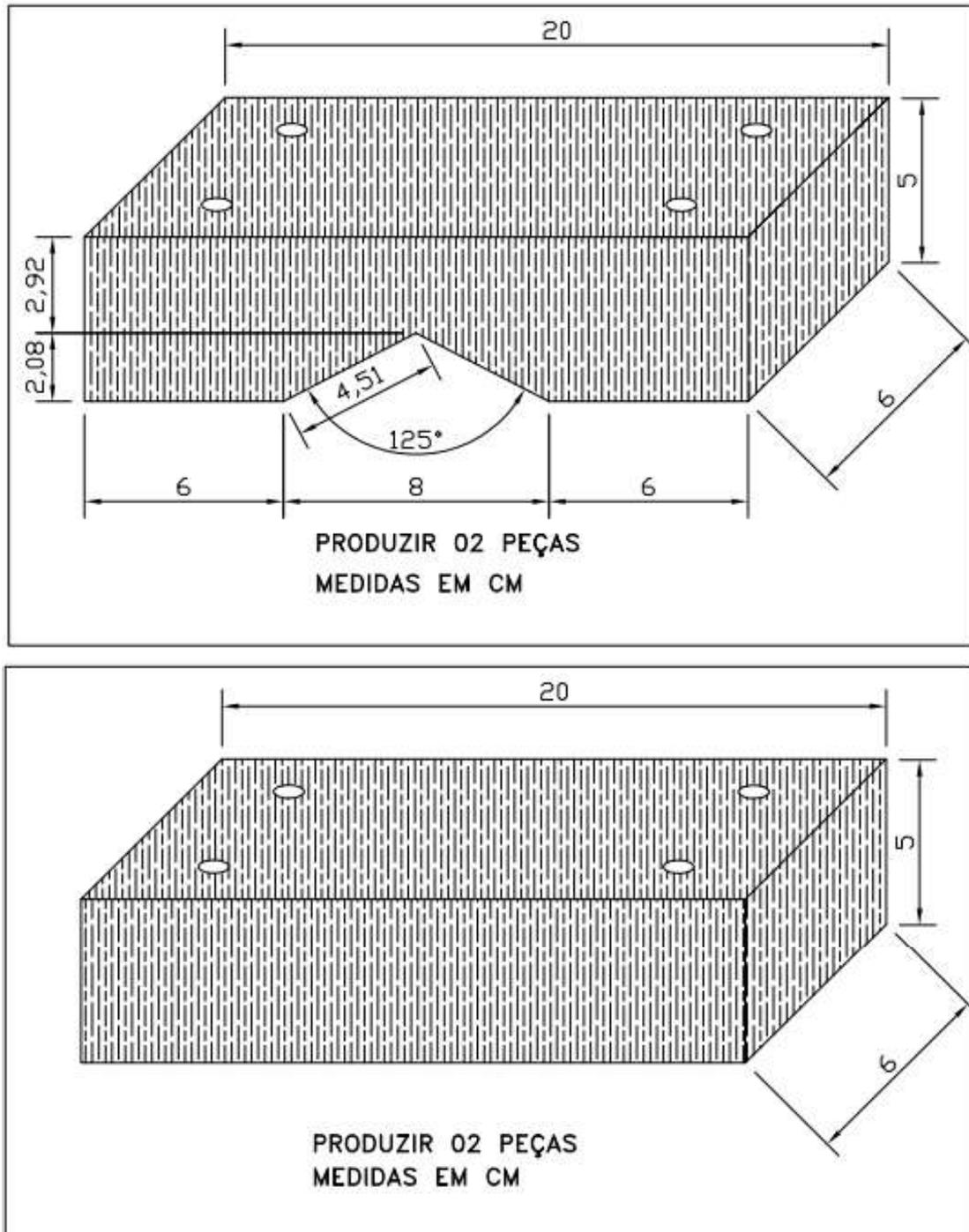
### 3.3 SIMULAÇÃO EM PLASTICINA

Para auxiliar no entendimento dos resultados do procedimento experimental, foram realizados testes de forjamento em pequena escala com uso de plasticina.

Foram confeccionadas bigornas em madeira nos formatos Plana e V para simulação das matrizes de conformação. As ferramentas foram fabricadas na escala 1:15 utilizando dimensionais reais das bigornas apresentadas na Figura 55. A Figura 61 apresenta o croqui

utilizado para confecção das ferramentas. As Figuras 62 a 64 apresentam as diferentes configurações de forjamento que puderam ser simuladas utilizando as matrizes confeccionadas.

Figura 61 – Croqui utilizado para confecção das bigornas Plana e V em madeira



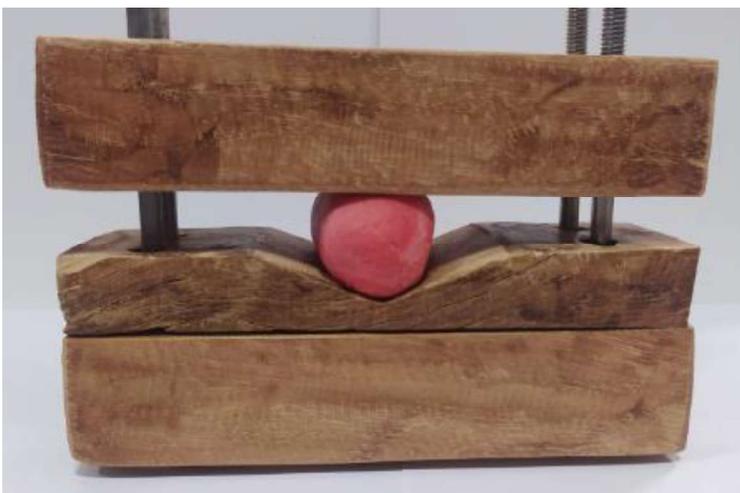
Fonte: Produção da autora

Figura 62 – Configuração de forjamento com ferramentas V-V



Fonte: Produção da autora

Figura 63 - Configuração de forjamento com ferramentas Superior Plana e Inferior V



Fonte: Produção da autora

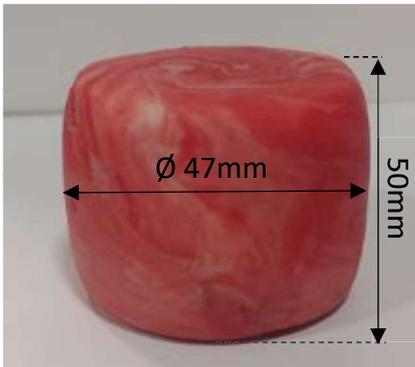
Figura 64 - Configuração de forjamento com ferramentas Plana-Plana



Fonte: Produção da autora

Foram confeccionados ainda corpos de prova de plasticina (Figura 65) com diâmetros de 47mm (simulação do diâmetro de 715mm da Figura 49 na escala 1:15) e 57mm (simulação do diâmetro de 855mm na escala 1:15). Esse segundo diâmetro foi confeccionado para permitir testes com mais passes de forjamento de 150mm do que os descritos na Figura 59. Uma régua foi utilizada ao lado das matrizes durante a simulação de forjamento para controlar a profundidade dos passes de deformação, conforme ilustrado na Figura 66.

Figura 65 – Corpo de prova de plasticina com 47mm de diâmetro e 50mm de comprimento



Fonte: Produção da autora

Figura 66 - Régua utilizada com as matrizes para controlar a profundidade da deformação



Fonte: Produção da autora

## 4 RESULTADOS

### 4.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Mesmo após os processos de conformação, os furos do cilindro forjado podiam ser facilmente e visualmente identificados na superfície da peça. Conforme pode ser visto nas Figuras 67 a 69, apesar de todos os furos terem adquirido formato de uma elipse na superfície, foram observados diferentes tipos de comportamentos entre eles: em alguns furos o batoque provavelmente se soltou e saiu da peça, sendo possível observar o furo preenchido por óxidos (Figura 67), em outros o batoque se manteve no cilindro, sendo possível observar que não houve fechamento do furo na superfície da peça (Figura 68), e em outros furos há uma aparente fusão do batoque com óxidos ao redor do furo (Figura 69).

Figura 67 – Furos preenchidos por óxidos e aparentemente sem os batoques



Fonte: Produção da autora

Figura 68 – Furos com batoque e sem fechamento próximo à superfície



Fonte: Produção da autora

Figura 69 – Furos com aparente fusão do batoque com óxidos ao redor do furo



Fonte: Produção da autora

Para identificação do fechamento ou não dos vazios, o cilindro foi serrado de forma que todos os 12 furos pudessem ter sua seção visualizada em profundidade. Primeiramente as duas metades do cilindro foram cortadas em pedaços que continham os furos iniciais da peça. A Figura 70 apresenta um dos pedaços cortados.

Na sequência, cada pedaço foi serrado em seções menores que permitiam a visualização da seção transversal de cada furo. A Figura 71-a) apresenta uma ilustração de como cada seção menor foi cortada, enquanto a Figura 71-b) apresenta duas dessas seções já cortadas.

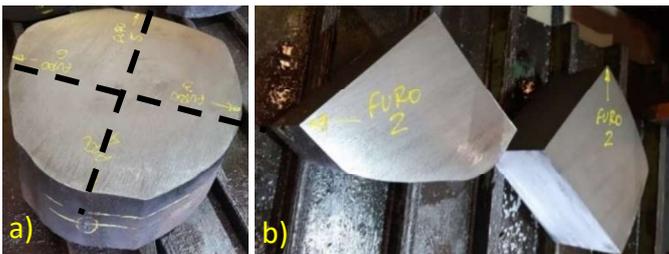
Os furos 6 e 7 foram cortados no sentido indicado na Figura 72-a, enquanto os demais furos foram cortados conforme sentido indicado na Figura 72-b.

Figura 70 - Seção transversal do cilindro forjado



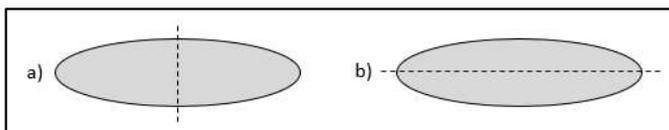
Fonte: Produção da autora

Figura 71 – a) Ilustração de como as seções menores foram cortadas e b) duas seções menores já cortadas



Fonte: Produção da autora

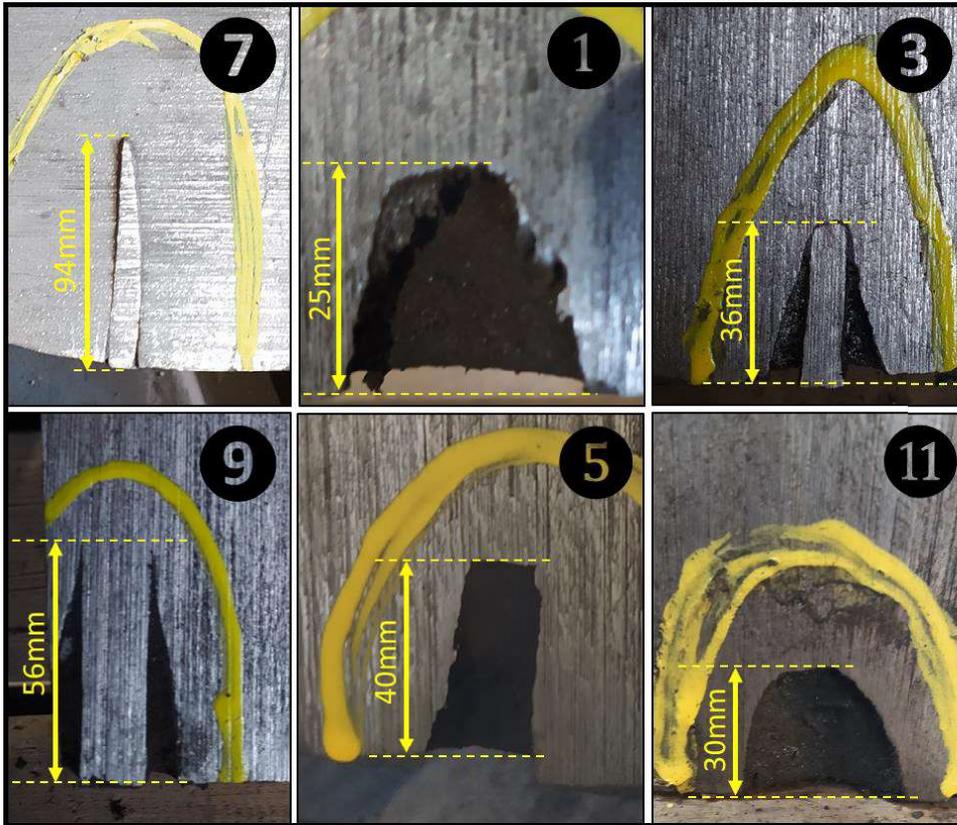
Figura 72 – Desenho esquemático indicando os sentidos de cortes dos furos



Fonte: Produção da autora

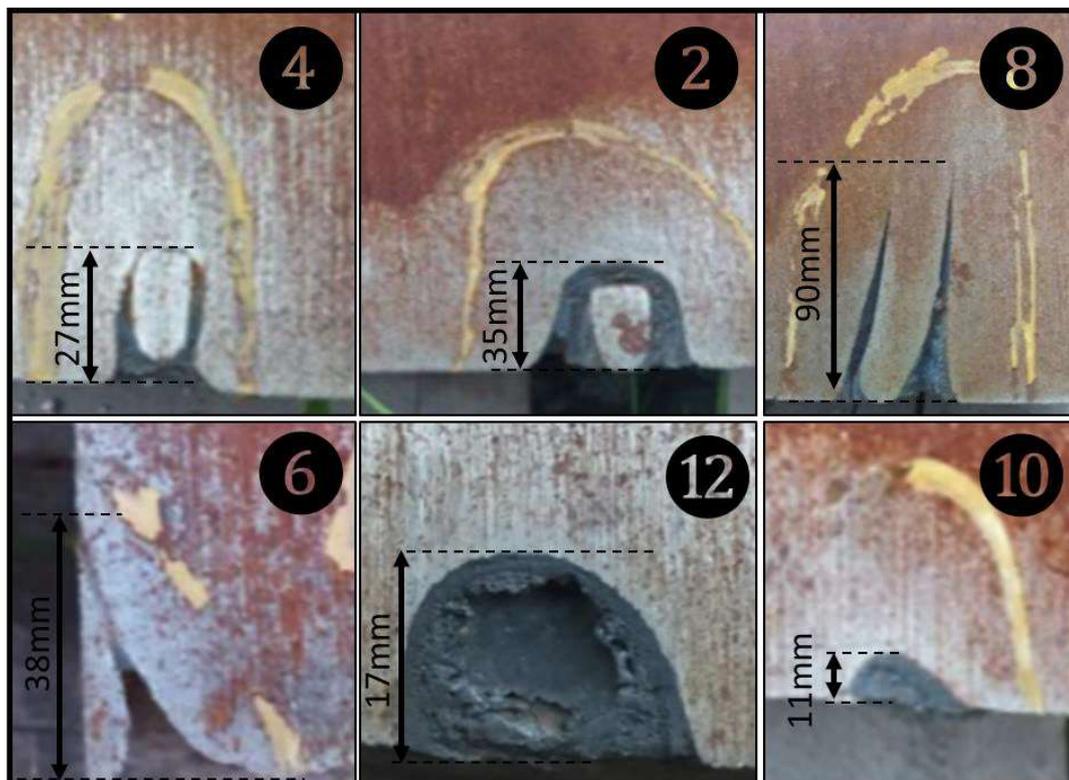
As Figuras 73 e 74 registram a seção transversal de cada um dos 12 furos da peça, conforme numeração inicial indicada na Figura 53.

Figura 73 – Furos da metade que foi conformada utilizando ferramentas Plana-V



Fonte: Produção da autora

Figura 74 – Furos da metade que foi conformada utilizando ferramentas V-V



Fonte: Produção da autora

## 4.2 ANÁLISES MICROESTRUTURAIS

Foram retiradas amostras da superfície, meio raio e centro das duas metades da peça, com o objetivo de avaliar o tamanho de grão.

As figuras 75 a 80 apresentam o tamanho de grão de cada uma das seis amostras, sendo todas as fotos obtidas com aumento de 200x em Microscópio Ótico. Em todas as figuras a escala indicada é de 50 $\mu$ .

Figura 75 – Tamanho de grão na superfície da peça (plana-V)



Fonte: Produção da autora

Figura 76 – Tamanho de grão no meio-raio da peça (plana-V)



Fonte: Produção da autora

Figura 77 – Tamanho de grão no centro da peça (plana-V)



Fonte: Produção da autora

Figura 78 - Tamanho de grão na superfície da peça (V-V)



Fonte: Produção da autora

Figura 79 – Tamanho de grão no meio-raio da peça (V-V)



Fonte: Produção da autora

Figura 80 – Tamanho de grão no centro da peça (V-V)

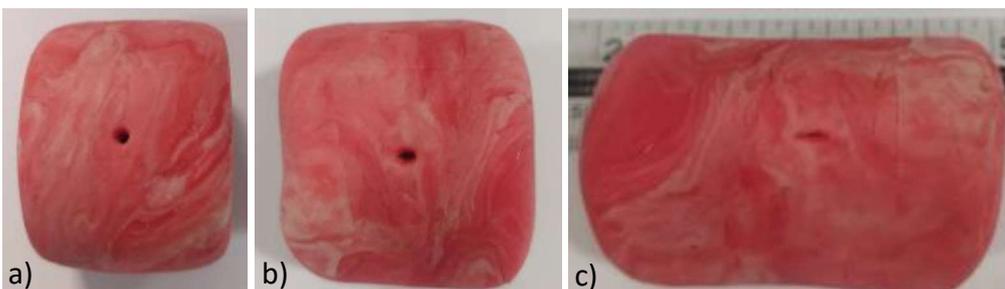


Fonte: Produção da autora

#### 4.3 SIMULAÇÃO EM PLASTICINA

Um furo até o centro da peça foi feito no corpo de prova de 47mm de diâmetro (Figura 65) a fim de simular um dos vazios que foram usinados no cilindro do procedimento experimental. Utilizando as bigornas de madeira superior e inferior no formato V, foram realizados 6 passes de forjamento de 10mm de profundidade para simular na escala de 1:15 os mesmos 6 passes de forjamento de 150mm da Figura 59. A Figura 81 apresenta o corpo de prova sem deformação, após 2 e 6 passes de 10mm de deformação.

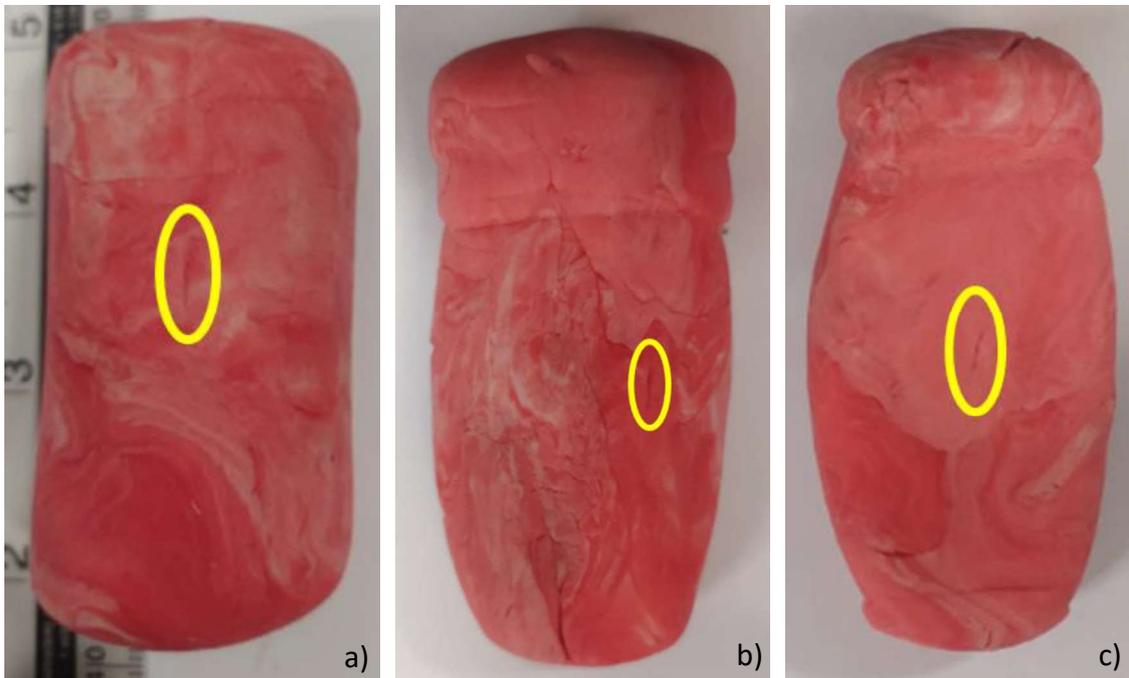
Figura 81 – Corpo de prova de 47mm de diâmetro – a) sem nenhuma deformação; b) com 2 passes de deformação de 10mm e c) com 6 passes de deformação de 10mm



Fonte: Produção da autora

Em sequência foi criado um furo até o centro da peça em 3 corpos de prova de 57mm de diâmetro. Esses corpos de prova foram conformados utilizando as 3 configurações de ferramentas apresentadas nas Figuras 62 a 64, até que o furo fosse visualmente fechado na superfície. Foram necessários 17 passes de forjamento de 10mm com as matrizes V-V para que o furo fosse visualmente fechado. Nas combinações de bigornas Plana-V e Plana-Plana foram necessários, respectivamente, 14 e 11 passes de 10mm para obter o mesmo resultado. A Figura 82 apresenta os corpos de prova após o forjamento com cada tipo de matriz.

Figura 82 – Corpos de prova de 57mm de diâmetro forjados até o fechamento do furo com matrizes – a) V-V; b) Plana-V e c) Plana-Plana



Fonte: Produção da autora

## 5 DISCUSSÕES

### 5.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Durante o procedimento experimental foram fixadas diferentes variáveis no processo de forjamento em matriz aberta que poderiam interferir no fechamento dos vazios internos da peça forjada, portanto, a comparação entre as Figuras 73 e 74 com a Tabela 2 fornece informações sobre a influência do formato das bigornas no fechamento de vazios.

Como é possível observar nas Figuras 67, 68, 69, 73 e 74, os furos que eram esféricos ficaram com formato de elipse na superfície da peça, ou seja, não houve deformação suficiente para fechamento dos vazios nas regiões superficiais dos furos com nenhum dos dois formatos de bigorna, pelo contrário, houve um aumento na largura e área superficial desses furos devido à pouca quantidade de deformação aplicada e ao sentido em que ela foi realizada na peça.

Como já havia sido apresentado por Kin e Bae<sup>28</sup> nas Figuras 17 e 18, o formato elíptico é a etapa intermediária entre o início do forjamento e o fechamento completo do vazio, sendo que o fechamento do furo ocorre quando todas as regiões internas da elipse se tocam e caldeiam.

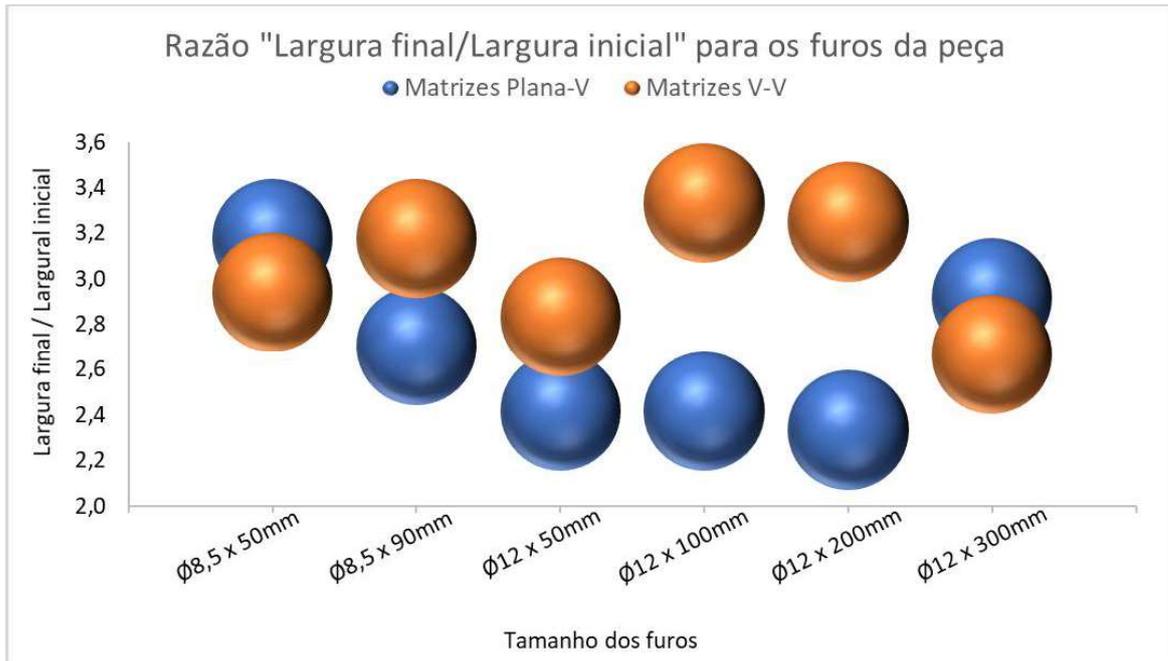
A Tabela 4 indica a largura e área superficial inicial e final de cada furo, sendo largura inicial o diâmetro do furo, largura final a maior dimensão da elipse, área inicial a área do círculo da superfície do furo inicial e área final a área da elipse da superfície do furo final. Os gráficos das Figuras 83 e 84 ilustram o comparativo “Largura final/Largura inicial” e “Área final/Área inicial” para os dois tipos de matrizes utilizadas.

Tabela 4 - Largura e área superficial inicial e final de cada furo

Nº do furo	Tipo de matriz	Largura inicial (mm)	Largura final (mm)	Largura final/Largura inicial	Área inicial superfície (mm <sup>2</sup> )	Área final superfície (mm <sup>2</sup> )	Área final / Área inicial
3	Plana-V	8,5	27	3,18	56,7	339,1	5,98
5		8,5	23	2,71	56,7	234,7	4,14
1		12	29	2,42	113,0	455,3	4,03
7		12	29	2,42	113,0	455,3	4,03
9		12	28	2,33	113,0	351,7	3,11
11		12	35	2,92	113,0	467,1	4,13
4	V-V	8,5	25	2,94	56,7	353,3	6,23
6		8,5	27	3,18	56,7	593,5	10,46
2		12	34	2,83	113,0	453,7	4,01
8		12	40	3,33	113,0	471,0	4,17
10		12	39	3,25	113,0	459,2	4,06
12		12	32	2,67	113,0	326,6	2,89

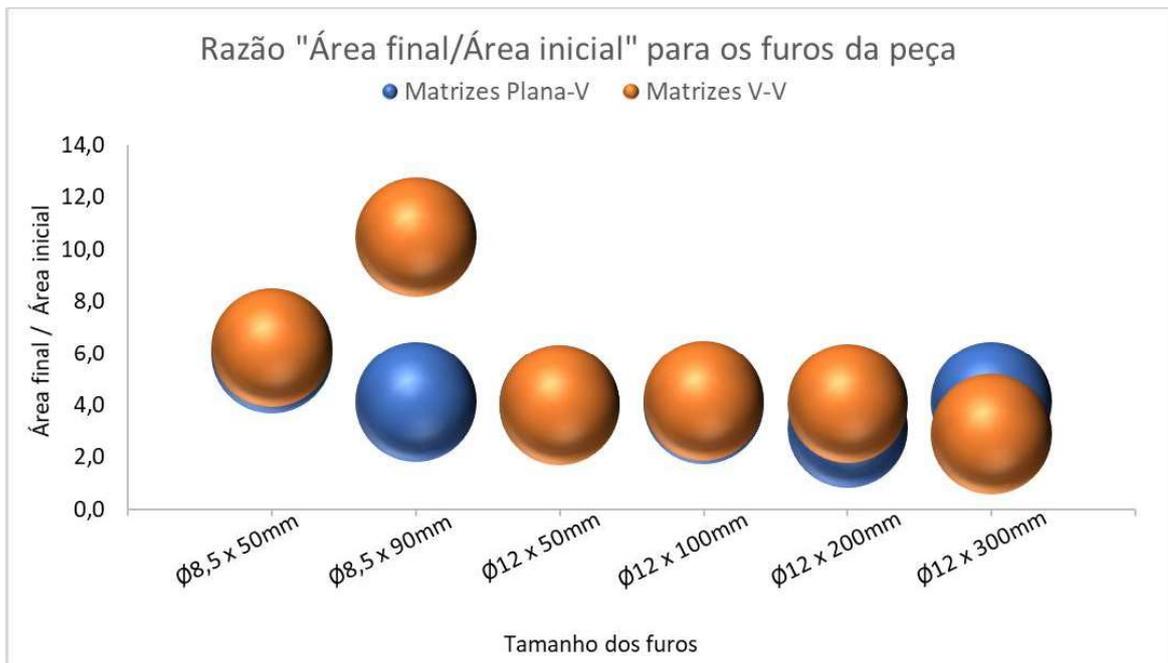
Fonte: Produção da autora

Figura 83 - Razão "Largura final/Largura inicial" para os doze furos da peça



Fonte: Produção da autora

Figura 84 - Razão "Área final/Área inicial" para os doze furos da peça



Fonte: Produção da autora

A largura final dos furos de 8,5mm de diâmetro da bigorna Plana-V (furos 3 e 5) aumentou em média 294%, enquanto a largura final dos furos de mesmo diâmetro da bigorna V-V (furos 4 e 6) aumentou em média 310%. A área final superficial dos furos 3 e 5 (bigorna Plana-V) aumentou em 510%, enquanto para os furos 4 e 6 (bigorna V-V) o aumento foi de

830%. Quando se analisa os furos com 12mm de diâmetro da bigorna Plana-V (furos 1, 7, 9 e 11), observa-se um aumento médio de 250% na largura final superficial, enquanto para os furos de mesmo diâmetro da bigorna V-V (2, 8, 10 e 12) este aumento foi de 300%. A área final superficial dos furos 1, 7, 9 e 11 (bigorna Plana-V) aumentou em 380%, enquanto para os furos 2, 8, 10 e 12 (bigorna V-V) o aumento foi de 390%.

Desta forma observa-se que o par de bigornas Plana-V teve mais efetividade no fechamento dos vazios nas regiões superficiais, já que a deformação com matriz V-V alargou mais os furos na superfície. Ou, em outras palavras, podemos dizer que uma menor quantidade de passes de forjamento será necessária com o par de ferramentas Plana-V para o fechamento dos vazios superficiais.

O diâmetro inicial da peça forjada (Figura 49) era 715mm, e os furos iniciais atingiam profundidades de até 300mm (86% do raio). Nas Figuras 73 e 74 fica claro que os furos estão abertos apenas nas regiões mais superficiais da peça, logo as regiões dos vazios que estavam em profundidades maiores foram fechadas. Sendo assim, o plano de passe aplicado no procedimento experimental (Figura 59) foi suficiente para fechamento dos vazios internos (com maiores profundidades) independente do tipo de ferramenta utilizado.

Fazendo uma avaliação individual de cada orifício usinado no cilindro, temos ainda as seguintes informações a serem exploradas:

- Furos 3 e 7 (bigorna Plana-V): é clara a separação entre o batoque e o furo, sendo possível identificar que houve um alongamento de até 10mm no comprimento do batoque devido o processo de forjamento da peça, porém não há indicativo de vazios não fechados abaixo do batoque (em profundidades maiores que a localização do batoque). As regiões não fechadas no forjamento encontram-se ao redor do batoque e estão relacionadas ao formato elíptico adquirido pelos furos nas áreas mais superficiais. O furo 7 foi cortado no sentido indicado na figura 72-a) por isso não é possível identificar o formato elíptico na superfície do furo na Figura 73.

- Furos 5 e 1 (bigorna Plana-V): o batoque desprende-se da furação em alguma das etapas do procedimento experimental e, provavelmente, o desprendimento ocorreu em alguma etapa após a conformação da peça, já que o furo remanescente possui o mesmo comprimento inicial do batoque. Não há indicativo de vazios não fechados abaixo do batoque, sendo que as regiões não fechadas encontram-se ao redor do batoque e estão relacionadas ao formato elíptico adquirido pelos furos nas áreas mais superficiais.

- Furo 9 (bigorna Plana-V): não é possível determinar a olho nu a separação entre o batoque e o final do furo, portanto houve caldeamento do batoque ao material do cilindro

durante os processos de aquecimento + conformação (forjamento). Não há indicativo de vazios não fechados abaixo de 56mm de profundidade, sendo que as regiões não fechadas no forjamento encontram-se ao redor do batoque e estão relacionadas ao formato elíptico adquirido pelos furos nas áreas mais superficiais.

- Furo 11 (bigorna Plana-V): o batoque desprende-se da furação em alguma das etapas do procedimento experimental e, provavelmente, o desprendimento ocorreu em alguma etapa anterior à conformação da peça, já que o furo remanescente não possui o mesmo comprimento inicial do batoque (275mm). Não há indicativo de vazios não fechados abaixo de 30mm de profundidade, sendo que as regiões não fechadas no forjamento estão relacionadas ao formato elíptico adquirido pelos furos nas áreas mais superficiais.

- Furos 4 e 2 (bigorna V-V): é clara a separação entre o batoque e o furo, sendo possível identificar uma camada espessa de óxido entre o batoque e o final do furo 2. Os batoques apresentam comprimento muito próximo ao inicial (25mm) e não há indicativo de vazios não fechados abaixo deles (em profundidades maiores que a localização dos batoques). A camada espessa de óxido ao redor e abaixo do batoque do furo 2 pode ter se formado após a etapa de conformação e durante o aquecimento do cilindro para o forjamento da segunda metade da peça, já que a abertura do furo em um formato elíptico já havia acontecido, abrindo espaço para preenchimento de óxidos. As regiões não fechadas no forjamento encontram-se ao redor dos batoques e estão relacionadas ao formato elíptico adquirido pelo furo nas áreas mais superficiais.

- Furo 6 (bigorna V-V): houve uma falha no processo de serrar ao meio o furo 6, levando ao corte da furação fora da sua região central, conforme pode ser confirmado na Figura 85. Ainda assim é possível identificar que o batoque desprende-se da furação em alguma das etapas do procedimento experimental e, provavelmente, o desprendimento ocorreu em alguma etapa anterior à conformação da peça, já que o furo remanescente não possui o mesmo comprimento inicial do batoque (47mm). Não há indicativo de vazios não fechados abaixo de 38mm de profundidade, sendo que as regiões não fechadas no forjamento estão relacionadas ao formato elíptico adquirido pelos furos nas áreas mais superficiais.

Figura 85 – Vista frontal do furo 6 forjado com bigorna V-V: não foi serrado no centro



Fonte: Produção da autora

- Furo 8 (bigorna V-V): não é possível determinar a olho nu a separação entre o batoque e o final do furo, portanto houve caldeamento do batoque ao material do cilindro durante os processos de aquecimento + conformação (forjamento). Houve um alongamento de até 23mm no comprimento do batoque devido o processo de forjamento da peça, porém não há indicativo de vazios não fechados abaixo do batoque (em profundidades maiores que a localização do batoque). As regiões não fechadas no forjamento encontram-se ao redor do batoque e estão relacionadas ao formato elíptico adquirido pelos furos nas áreas mais superficiais.

- Furos 10 e 12 (bigorna V-V): os batoques desprenderam das furações em alguma das etapas do procedimento experimental e, provavelmente, o desprendimento ocorreu em alguma etapa anterior à conformação da peça, já que os furos remanescentes não possuem o mesmo comprimento inicial dos batoques (175mm e 275mm, respectivamente). O preenchimento desses furos com óxidos pode ter ocorrido após a etapa de conformação e durante o aquecimento do cilindro para o forjamento da segunda metade da peça, já que a abertura do furo em um formato elíptico já havia acontecido, abrindo espaço para preenchimento de óxidos. Não há indicativo de vazios não fechados abaixo de 17mm de profundidade, sendo que as regiões não fechadas no forjamento estão relacionadas ao formato elíptico adquirido pelos furos nas áreas mais superficiais.

## 5.2 ANÁLISES MICROESTRUTURAIS

É possível identificar nas Figuras 75 a 80 tamanhos de grãos médios entre  $16\mu$  e  $25\mu$  em todas as amostras, sendo que as amostras de meio raio apresentam grãos levemente maiores ( $25\mu$ ) que as amostras de centro e superfície ( $16\mu$  a  $20\mu$ ). Não é possível observar uma diferença significativa no tamanho de grão, em amostras de mesma profundidade nas duas metades da peça, logo, as diferentes deformações devidas aos dois tipos de ferramentas de forjamento, não influenciaram no tamanho de grão após o tratamento térmico.

A primeira metade forjada passou por um novo ciclo de aquecimento (Figura 54-b) após o forjamento, enquanto o aquecimento para forjamento da segunda metade era realizado. Esse maior tempo de aquecimento após conformação também não causou diferença significativa no tamanho de grão, quando comparamos as amostras de mesmas profundidades das duas metades do cilindro.

As semelhanças observadas nas Figuras 75 a 80 ocorre, provavelmente, devido à realização do tratamento térmico de Normalização ao ar forçado da peça após o forjamento, o qual levou à homogeneização da microestrutura do cilindro.

### 5.3 SIMULAÇÃO EM PLASTICINA

A Figura 81-b) demonstra que com apenas 2 passes de deformação de 10mm de profundidade o furo já começou a apresentar formato elíptico na superfície da peça. Ou seja, a teoria apresentada por Kin e Bae<sup>28</sup> nas Figuras 17 e 18 é confirmada novamente nos testes do presente trabalho.

Na Figura 81-c), que apresenta o corpo de prova conformado com o mesmo plano de passe da Figura 59, podemos confirmar que os 6 passes de 10mm de profundidade no corpo de prova, ou que os 6 passes de 150mm de profundidade realizados no cilindro do procedimento experimental, não são suficientes para realizar o fechamento completo dos furos na superfície da peça.

Os resultados dos testes de forjamento realizados com as três configurações de matrizes apresentados na Figura 82 mostraram que em todas as simulações os vazios superficiais puderam ser fechados, desde que houvesse quantidade de passes de forjamento suficiente. Observa-se ainda que as combinações de bigornas Plana-V e Plana-Plana foram mais efetivas em fechar os vazios superficiais, já que obtiveram esse resultado com menos passes de deformação.

A deformação verdadeira calculada conforme Equação 2, necessária para fechamento dos furos nas simulações com plasticina foi de 39% para o par de ferramentas V-V, 30% para a combinação de bigornas Plana e V e 19% para as matrizes Plana-Plana.

## 6 CONCLUSÃO

O par de bigornas Plana-V apresentou mais efetividade no fechamento de vazios superficiais no cilindro forjado no procedimento experimental, quando analisado, principalmente, a largura final dos furos, já que os furos deformados com matriz V-V estavam mais largos na superfície da peça. Portanto, uma maior quantidade de passes de forjamento será necessária com as ferramentas V-V para realizar o fechamento completo dos furos nas regiões superficiais.

O fechamento superficial dos furos 1, 3, 5, 9 e 7 da bigorna Plana-V e furos 4, 2 e 8 das matrizes Plana-Plana foi afetado pela presença do batoque. As regiões não fechadas no forjamento desses furos encontram-se ao redor do batoque e estão relacionadas ao formato elíptico adquirido pelos furos nas áreas mais superficiais. Portanto, a presença do batoque e a pequena deformação total do cilindro durante os testes experimentais influenciaram no não fechamento desses furos nas regiões superficiais.

O furo 11 da bigorna Plana-V e os furos 6, 10 e 12 das bigornas Plana-Plana, provavelmente foram conformados sem a presença do batoque, nos permitindo concluir que furos com profundidades maiores que 30mm na Plana-V e 38mm na V-V são completamente fechados. Portanto, ambos os formatos de matriz do procedimento experimental apresentaram efetividade no fechamento ao longo do comprimento de vazios com profundidades entre 38mm e 300mm.

A diferença de 8mm entre as profundidades dos furos que são completamente fechados com os dois tipos de ferramenta do procedimento experimental, não é considerada significativa para um processo industrial diante da amostragem que foi realizada no presente trabalho. Novos testes de conformação sem a presença de batoques nos orifícios seriam necessários para confirmação desse valor.

Como os processos industriais comumente apresentam deformação verdadeira maior que a apresentada nesse trabalho, é possível concluir que vazios na matéria prima que possuam o eixo principal perpendicular à superfície da peça onde é realizado o forjamento, possuam profundidade entre 11% e 84% do raio da peça, e diâmetros de até 12mm, também serão fechados nos processos industriais de conformação por forjamento em matriz aberta dos tipos Plana-V ou V-V.

A ausência de diferença microestrutural entre as amostras de mesma profundidade nas duas metades do cilindro forjado, se deve, provavelmente, à realização do tratamento

térmico de normalização após o forjamento, levando à uma homogeneização da estrutura bruta de forja.

Os resultados das simulações de forjamento com plasticina demonstraram que as três configurações de matrizes podem realizar o fechamento de vazios superficiais, porém é necessária uma quantidade de deformação maior que aquela utilizada no procedimento experimental com o cilindro. O fechamento de furos superficiais é mais efetivo com o forjamento utilizando um par de matrizes planas, reduzindo em até 35% o número de passes de deformação quando comparado ao par de bigornas V-V e 21% quando comparado à combinação de matrizes Plana e V.

Todo o estudo exposto neste trabalho permite concluir, por fim, que os furos superficiais são mais difíceis de serem fechados quando comparados aos furos mais profundos. Logo, peças provenientes de processos de conformação e/ou solidificação com alguma falha, tendem a apresentar vazios mais próximos à superfície da peça ao invés de apresentarem vazios em profundidade.

## REFERÊNCIAS

- 1 HARRIS, N.; SHAHRIARI, D.; JHAZI, M. Development of a fast converging material specific void closure model during ingot forging. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 26, p. 131-141, 2017.
- 2 XAVIER, R. Y. **Influência da deformação plástica no tratamento térmico de homogeneização de um aço ferramenta para trabalho a frio**. 2017. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.
- 3 CIMM - CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. **Defeitos de solidificação**. Disponível em: [https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir\\_noticia/6751-defeitos-de-solidificacao](https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/6751-defeitos-de-solidificacao). Acesso em: 01 maio 2019.
- 7 LEITE, M.V. **Relatórios técnicos de defeitos em cilindros de laminação**. Mensagem recebida por bruna.lopes@gerdausummit.com em 30 de abr. 2019.
- 8 ASKELAND, D.; FULAY, P. P.; WRIGHT, W. J. **The Science and Engineering of Materials**. Ohio: Editora Cengage Learning, 2006.
- 15 LEE, Y.S; LEE, S.U; TYNE, C. J. V; JOO, B. O; MOON, Y.H. Internal void closure during the forging of large cast ingots using a simulation approach. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 211, p. 1136-1145, 2011.
- 16 ALTAN, T.; NGAILE, G.; SHEN, G. **Cold and Hot Forging - Fundamentals and Applications**. Ohio: ASM International, 2004.
- 17 GERDAU SUMMIT. Cilindro de laminação. **Cilindros de Trabalho para Laminação de Tiras a Frio**. Disponível em: <https://www.gerdau.com/gerdausummit/pt/produtos/cilindros-de-trabalho-para-laminacao-de-tiras-a-frio#ad-image-0>. Acesso em: 17 mar. 2019
- 18 CHRISTOVAM, R.V. **Análise do perfil de dureza e microestrutura de um aço forjado AISI A2 submetido a tratamento térmico com resfriamento em água**. 2015. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2015.
- 19 CAMPOS, G. A. F. **Pesquisa em consolidação do fechamento de vazios internos em produtos forjados no aço W.Nr. modificado**. 2018. 82f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.
- 20 ZHANG, X et al. Multi-scale Analysis of Void Closure for Heavy Ingot Hot Forging. **Modern Applied Science**, v. 6, p. 15-25, 2012
- 21 DYJA, H. et al. Effect of symmetrical and asymmetrical forging processes on the quality of forged products. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 157-158, p. 496-501, 2004.

- 22 QUEJI, L. M. **Análise da influência da geometria da matriz e do tempo de encharque no fechamento de vazios**. 2012. 62f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- 23 CHOI S.K; CHUN M.S; VAN TYNE C.J; MOON Y.H.. Optimization of open die forging of round shapes using FEM analysis. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 172, p. 88-95, 2006.
- 24 KERMANPUR A., ESKANDARI M., PURMOHAMAD H. SOLTANI M.A. SHATER R. Influence of mould design on the solidification of heavy forging ingots of low alloy steels by numerical simulation, **Materials and Design**, n. 31 p.1096-1104, 2010.
- 25 LEE Y.S., LEE S.U., VAN TYNE C.J., JOO B. D., MOON Y. H. Internal void closure during the forging of large cast ingots using a simulation approach, **Journal of Materials Processing Technology**, n. 211, p 1136-1145, 2011.
- 26 PARK, C. Y., YANG, D. Y. A study of void crushing in large forgings I, Bonding mechanism and estimation model for bonding efficiency. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 57, p. 129-140, 1996.
- 27 WANG, A., THOMSON, P. F., HODGSON, P. D. A study of pore closure and welding in hot rolling process. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 60, p. 95-102, 1996.
- 28 KIN Y., CHO J., BAE W. Efficient forging process to improve the closing effect of the inner void on an ultra-large ingot, **Journal of Materials Processing Technology**, n. 211, p. 1005-1013, 2011.
- 29 PARK C.Y., YANG D. Y. A study of void crushing in large forgings II. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 72, p. 32-41, 1997.
- 30 KAKIMOTO H., ARIKAWA T., TAKAHASHI Y., TANAKA T., IMAIDA Y. **Development of forging process design to close internal voids**. *Journal of Materials Processing Technology*, n. 210, p. 415-422, 2010.
- 31 BUTELER D. I., NEVES P. C. U., VILLABÓN R. L., SOUZA R. M., SINATORA A. **Efeito da forma da bigorna no estiramento de cilindros**. Disponível em <https://xdocs.com.br/doc/efeito-da-forma-da-bigorna-no-estiramento-de-cilindros-280ley0d4g8w>. Acesso em: 15 mar. 2019.
- 32 CARDOSO K. C. B., PETEFFI M. H. M., LIMBERGER R. P., COSTA L. L., SCHAEFFER L. Simulação numérica aplicada ao estudo da relação entre largura de contato da matriz e o alongamento no forjamento. In: **ENEMET ABM WEEK, 15**. Rio de Janeiro: ABM, 2015.
- 33 CHEN K., YANG Y., SHAO G., LIU K. Simulation of large forging flat-anvil stretching process and its optimization. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, Shanghai, 2011.

- 34 COSTA L. L., LIMBERGER R. P., BRITO A. M. G., SCHAEFFER L. Uma contribuição ao forjamento em matriz aberta de eixos aerogeradores. In: **ENEMET ABM WEEK, 14**. Rio de Janeiro: ABM, 2014.
- 35 COSTA L. L., LIMBERGER R. P., BRITO A. M. G., SCHAEFFER L. **Considerações sobre o processo de forjamento a quente em matriz aberta - revisão literária dos cálculos**. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/334330582>. Acesso em: 25 abr. 2019
- 36 LENHARD A. L., **Análise da Influência das Propriedades do Material e Parâmetros do Processo na Simulação de forjamento**. 2007. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- 37 DUDRA S. P., TAEKLM Y. Analysis of void closure in open die forging. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 30, p. 65-75, 1990.
- 38 FENG C., CUI Z., LIU M., SHANG X., SUI D., LIU J. Investigation on the void closure efficiency in cogging processes of the large ingot by using a 3-D void evolution model. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 237, p. 371-385, 2016.
- 39 COELHO R. T. **Processos de Conformação dos Materiais - Introdução aos Processos de Conformação**. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4613601/mod\\_resource/content/1/Apostila\\_conforma%C3%A7%C3%A3o\\_V1\\_P1.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4613601/mod_resource/content/1/Apostila_conforma%C3%A7%C3%A3o_V1_P1.pdf). Acesso em: 18 jun. 2022

---

<sup>1</sup> De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6023)