

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA MATRIZ E DO TEMPO DE  
ENCHARQUE NO FECHAMENTO DE DEFEITOS INTERNOS DE CHAPAS DO  
AÇO W.NR. 1.2714**

**LICIO MARCIS QUEJI**  
Engenheiro de Materiais

Dissertação para obtenção do Título de  
*Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia*

Porto Alegre

2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA MATRIZ E DO TEMPO DE  
ENCHARQUE NO FECHAMENTO DE DEFEITOS INTERNOS DE CHAPAS DO  
AÇO W.NR. 1.2714**

LICIO MARCIS QUEJI  
Engenheiro de Materiais

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia.

Porto Alegre

2012

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Profissional e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jaime Álvares Spim Junior

Prof. Dr. Lírio Schaeffer

Prof. Dr. Alberto Moreira Guerreiro Brito

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGE3M

Porto Alegre

2012

III

Dedico este trabalho a Rafaella, Bernardo e  
Sophia, minhas fontes de inspiração.

## AGRADECIMENTOS

À minha família, fonte inesgotável de estímulo, carinho, ajuda e compreensão em todos os momentos;

À Usina Piratini, pela oportunidade de aprendizado e desenvolvimento profissional;

À equipe da Forjaria, sempre dispostos a auxiliar e motivados a melhorar a cada dia;

Ao professor Dr. Alexandre da Silva Rocha pelo conhecimento e orientação recebida durante o trabalho;

Aos colegas Jair Leopoldo Janoski e Leila Teichmann pelo apoio as atividades desenvolvidas.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VIII
LISTA DE TABELAS .....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	XII
RESUMO .....	XIII
ABSTRACT .....	XIV
1. INTRODUÇÃO .....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
2.1 Forjamento em matriz aberta.....	6
2.2 Aço-ferramenta W.NR. 1.2714 .....	9
2.2.1 Composição química .....	10
2.2.3 Equivalências .....	10
2.2.4 Aplicação.....	11
2.2.5 Processamento.....	11
2.3 Vazios internos.....	12
2.3.1 Definição e mecanismos de formação .....	12
2.4 Detecção de defeitos internos via ensaio de Ultra-som.....	17
2.4.1 Introdução ao ensaio .....	17
2.4.2 Ensaio de ultra-som .....	17
2.5 Fechamento de vazios internos .....	19
2.5.1 Passes de forjamento.....	20

2.5.2 Formato da Matriz .....	22
2.4.3 Atrito e alargamento .....	25
2.4.4 Temperatura de forjamento .....	28
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	32
3.1 Matéria-prima.....	32
3.2 Ensaio de ultra-som .....	33
3.3 Preparação das amostras .....	35
3.4 Corpos de prova .....	37
3.5 Planejamento do experimento .....	40
3.6 Execução do experimento.....	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	45
4.1 Caracterização do defeito .....	45
4.2 Determinação da área do furo .....	47
4.2.1 Configuração AA.....	47
4.2.2 Configuração AB .....	48
4.2.3 Configuração AC .....	49
4.3 Análise dos dados obtidos .....	51
4.4 Aplicação dos conceitos .....	55
5. CONCLUSÕES .....	57
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	58
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	59

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Fluxo de produção de barras forjadas na forjaria. (Fonte: Usina Piratini, 2010).....	3
Figura 1.2: Macrofluxo do processo de produção da unidade, a rota em amarelo é a rota dos forjados (Fonte: Usina Piratini).....	4
Figura 2.1: Secção transversal da seqüência de passes de um quadrado para uma barra redonda (Choi, 2006) <sup>(6)</sup> .....	7
Figura 2.2: Seqüência de passes para obter uma barra redonda a partir de um quadrado (Choi, 2006) <sup>(6)</sup> .....	7
Figura 2.3: Esquema da matriz utilizada para transformar oitavado em redondo (Choi, 2006) <sup>(6)</sup> .....	8
Figura 2.4. Prensa de mil toneladas executando forjamento em matriz aberta de barra redonda (Usina Piratini – 2006).....	8
Figura 2.5. Ilustração do processo de forjamento de lingote de sete toneladas do aço W.NR. 1.2714 (Usina Piratini – 2011).....	9
Figura 2.6: Representação do ciclo de processamento e tratamento térmico para obtenção de peças acabadas em aço W.NR. 1.2714 <sup>(7)</sup> .....	12
Figura 2.7 Seção transversal de um tarugo apresentando porosidade central. Dimensão do tarugo: 155 x 155 mm <sup>(13)</sup> .....	13
Figura 2.8: Modelo de solidificação do IRSID. Passos da teoria do mini-lingote <sup>(13)</sup> .....	14
Figura 2.9 Simulação da solidificação em lingoteira convencional (a) 35 s, (b) 287 s, (c) 703s, (d) 859 s, (e) 1014 s, (f) 2630 s, (g) 4770 s, (h) 7830 s e (i) 11285 s <sup>(15)</sup> .....	15
Figura 2.10 Lingote e vazio interno citado por LEE em seu estudo <sup>(16)</sup> .....	16
Figura 2.11: Comparação da tensão de tração entre uma amostra sem vazio e uma amostra com um vazio <sup>(14)</sup> .....	17
Figura 2.12: Método de inspeção pulso-eco, mostrando o sinal de varredura e o eco de fundo <sup>(30)</sup> .....	18

Figura 2.13: Detecção de descontinuidade utilizando o método pulso eco <sup>(30)</sup> .....	19
Figura 2.14: Caso 1 e Caso 2 utilizados no experimento de Kim <sup>(17)</sup> .....	21
Figura 2.15: Efeito do fechamento de vazio com 20 mm com os passes do Caso 1 e Caso 2 <sup>(17)</sup> .....	21
Figura 2.16: Resultado experimental de corpos de prova de chumbo com furo inicial de 10 mm forjados no Caso 1 e no Caso 2 <sup>(17)</sup> .....	22
Figura 2.17: Comparação da configuração da malha e a deformação efetiva entre (a) matrizes planas e (b) matriz V + matriz plana <sup>(14)</sup> .....	23
Figura 2.18: Comparação dos níveis de deformação entre matrizes planas e com formato em V <sup>(13)</sup> .....	23
Figura 2.19: Representação do método utilizado por Kakimoto <sup>(5)</sup> .....	24
Figura 2.20: Distribuição da tensão hidrostática ( $\sigma_H$ ) durante a laminação em deformação plana de uma placa de 20 mm de espessura com raio do cilindro de (a) 19 mm e (b) 125 mm <sup>(20)</sup> .....	25
Figura 2.21: Influência da redução absoluta em altura no alargamento <sup>(21)</sup> .....	26
Figura 2.22: Influência dos diâmetros dos cilindros de laminação no alargamento <sup>(21)</sup> .....	26
Figura 2.23: Influência da velocidade de laminação no alargamento <sup>(21)</sup> .....	27
Figura 2.24: Influência da temperatura no alargamento <sup>(21)</sup> .....	27
Figura 2.25: Curva tensão versus deformação do aço W.NR. 1.2714 <sup>(31)</sup> .....	29
Figura 2.26: Curva tensão máxima versus temperatura do aço W.NR. 1.2714 <sup>(31)</sup> .....	29
Figura 2.27: Influência do resfriamento, tabela 2.3, na diminuição do poro após uma redução em altura de aproximadamente 18% em laminação plana <sup>(24)</sup> .....	31
Figura 3.1: Espessura das chapas utilizadas nos experimentos. ....	32
Figura 3.2: Largura das chapas utilizadas nos experimentos. ....	33
Figura 3.3: Cabeçote utilizado no ensaio de ultra-som sobre a peça com acoplante. ....	33
Figura 3.4: Aparelho marca GE, modelo USN 60 utilizado na inspeção das duas chapas. ....	34
Figura 3.5: Chapa com os defeitos mais significativos marcados, onde as linhas amarelas marcam a posição para o corte. ....	34
Figura 3.6: Telas das descontinuidades detectadas na inspeção por ultra-som na chapa da figura 3.4.....	35
Figura 3.7: Macrografia da amostra 2, originária da descontinuidade 2. ....	36
Figura 3.8: Ponto de interesse da amostra 2, obtido da lupa com dez vezes de aumento com ataque de persulfato de amônio (20%).....	36
Figura 3.9: Esquema de corte das seis amostras a partir da chapa 2.....	37

Figura 3.10: Dimensões médias dos seis corpos de prova após a operação de corte e frezamento do furo. ....	38
Figura 3.11: Foto dos seis corpos de prova furados. ....	38
Figura 3.12: Corpos de prova identificados e com as tampas soldadas. ....	39
Figura 3.13: Posição das dimensões A, B e C nos corpos de prova. ....	39
Figura 3.14: Configuração de matrizes utilizadas no experimento. ....	41
Figura 3.15: Forjamento da amostra 4 – configuração AA e tempo de encharque de 7 horas. ....	43
Figura 3.16: Ilustração de como foi efetuado a retirada das amostras para análise dos furos. ....	43
Figura 3.17: Amostra do corpo de prova 3 após os dois cortes indicados na figura 3.15. ....	44
Figura 4.1: Macrografia da amostra da chapa de 311 mm por 634 mm com círculo indicando a região da porosidade ....	45
Figura 4.2: Região central da figura 4.1 com os pontos pretos que correspondem às descontinuidades. ....	46
Figura 4.3: Micrografia da indicação 2 com aumento de 50X. ....	46
Figura 4.4: Amostra 3 com a região do furo rebarbado. ....	47
Figura 4.5: Amostra 4 com a região do furo rebarbado. ....	47
Figura 4.6: Dimensões do furo da amostra 3 e amostra 4. ....	48
Figura 4.7: Amostra 5 com a região do furo rebarbado. ....	48
Figura 4.8: Amostra 6 com a região do furo rebarbado. ....	49
Figura 4.9: Dimensões do furo da amostra 3 e amostra 4. ....	49
Figura 4.10: Amostra 1 com a região do furo rebarbado. ....	50
Figura 4.11: Amostra 2 com a região do furo rebarbado. ....	50
Figura 4.12: Dimensões do furo da amostra 1 e amostra 2. ....	51
Figura 4.13: Efeito do tempo de encharque e configuração de matrizes na área do furo. ....	52
Figura 4.14: Efeito dos fatores, configuração de matrizes e tempo de encharque no alargamento. ....	54
Figura 4.15: Efeito dos fatores, combinação de matrizes e tempo de encharque no alongamento. ....	55
Figura 4.16: Comparação sobre o escoamento do material sobre o pé do lingote com a combinação AA e AC e temperatura 30°C menor que a convencional. ....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Percentual de ordens de produção com registro de descontinuidades das barras chatas de aços ferramentas produzidos na forjaria <sup>(28)</sup> .....	5
Tabela 2.1: Composição química do aço W.NR. 1.2714 <sup>(8)</sup> .....	10
Tabela 2.2: Equivalência do aço W.NR. 1.2714 2 em algumas normas internacionais <sup>(10)</sup> .....	11
Tabela 2.3: Programas de resfriamento, temperaturas superficiais e alturas finais <sup>(24)</sup> .....	30
Tabela 3.1: Dimensões A, B e C dos corpos de prova antes do forjamento. ....	40
Tabela 3.2: Valores do DOE aplicados para cada corpo de prova. ....	41
Tabela 4.1: Dados do furo e temperatura de início de forjamento das 6 amostras. ....	51
Tabela 4.2: Relação L/H das combinações de matrizes.....	53
Tabela 4.3: Dimensões dos corpos de prova antes e após o forjamento e cálculo do alargamento (B1 e B) e alongamento (C e C1). ....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

*W.NR.* número do material em norma padronizada

*h* horas

*d<sub>0</sub>* diâmetro inicial

*d<sub>f</sub>* diâmetro final

*L* comprimento (mm)

*H* altura (mm)

$\Delta H$  variação na altura (mm)

$\Delta b$  variação do alargamento

$\mu$  coeficiente de atrito

*f* fator do material do cilindro

*T* temperatura (°C)

*MPa* unidade de tensão

$N/mm^2$  unidade de tensão

*GE* general electric

$\emptyset$  diâmetro

*W* largura

*DOE* Projeto de experimentos

*DIN* norma padronizada

*SAE* norma padronizada

*AISI* norma padronizada

*JIS* norma padronizada

*AFNOR* norma padronizada

*UNI* norma padronizada

*FEM* Finite Elements Method

## RESUMO

### Análise da Influência da Geometria da Matriz e do Tempo de Encharque no Fechamento de Defeitos Internos de Chapas do Aço W.NR. 1.2714

No forjamento em matriz aberta o tempo gasto com retrabalhos e descarte de material não conforme gera custos e atraso no atendimento ao cliente. A fim de minimizar estas perdas, realizou-se uma revisão dos principais conceitos e fundamentos do processo de forjamento a quente em matriz aberta que influenciam na qualidade interna do produto.

Com o intuito de desenvolver o processo de forjamento a quente em matriz aberta de chapas do aço W.NR. 1.2714 com espessura de 311 mm, largura de 634 mm e comprimento de 6000 mm, avaliou-se as descontinuidades internas deste produto. Através de análises preliminares realizadas, foi possível observar que a descontinuidade interna típica tratava-se de vazio. Com este resultado, desenhou-se um projeto experimental com corpos de prova quadrados com defeitos falsos de 30 mm de diâmetro e forjados para simular uma das etapas do forjamento de chapas.

Foram selecionadas três combinações de matrizes e dois tempos de encharque. Todos os corpos de prova foram aquecidos no mesmo forno sob mesmas condições e forjados com duas reduções de 50 mm cada (33% - deformação relativa total), com giro de 180 graus entre elas. Após o resfriamento ao ar, as amostras sofreram alívio de tensões e foram cortadas em serra a 150 mm da extremidade do furo. As variáveis respostas do plano experimental foram a área do furo, o alargamento e o alongamento.

A amostra forjada com a combinação de matriz AC, composta pela matriz funil na parte superior e mesa de forjamento na parte inferior e tempo de encharque de 7h teve o furo caldeado. Com todas as combinações de matrizes, o tempo de encharque de 7h levou a menor área do furo, maior alargamento e maior alongamento que o tempo de 11h.

Palavras-chave: Forjamento em matriz aberta, vazios internos, aço W.NR. 1.2714.

## **ABSTRACT**

### **Influence of Die Geometry and Holding Time at Temperature in the Internal Voids Closing for Forged W.NR. 1.2714 Steel Sheets**

In open die forging the time spent on rework, and disposal of non-compliant material, generates costs and delays in customer service. To minimize these losses, a review of key concepts and fundamentals of the process of open die forging was carried out emphasizing the internal quality of the product.

In order to develop the process of open die hot forging in plate steel W.NR 1.2714 with a thickness of 311 mm, width 634 mm and a length of 6000 mm, internal discontinuities of this product were evaluated. Through preliminary analysis was possible to observe that the typical internal discontinuity were voids. With this result, experiments were designed for square specimens with false defects of 30 mm in diameter, which were forged in order to simulate one of the steps in the forging of plates.

Three combinations of dies and two soak times were selected. All samples were heated in the same furnace on the same conditions and forged with two reductions of 50 mm each (33% - total relative deformation) with 180 degrees among them. After air cooling, the samples were heated up to promote a stress relief and were cut at a position 150 mm from the edge of the hole. Output variables were the area of the hole, widening and lengthening.

The sample forged with the combination of die AC, with funnel die at the top and forging table at the bottom and the soaking time of 7 hours had the hole closed. For all combinations of dies, the soaking time of 7 hours led to a lower area of the hole, higher widening and lengthening than for 11 hours soak time.

**Key Words:** Open die forging, internal voids, steel W.NR. 1.2714.

## 1. INTRODUÇÃO

As ferramentas utilizadas na indústria em geral e particularmente, na indústria mecânica, são um acessório imprescindível na usinagem e conformação de peças metálicas, fabricadas pelos processos tradicionais de produção. Estas ferramentas devem apresentar requisitos que possibilitem realizar as operações a que foram destinadas com precisão e a custo relativamente baixo. Em consequência não basta escolher o melhor material para confeccioná-las em função do trabalho exigido, mas igualmente projetá-las adequadamente. Os aços são os materiais mais importantes de ferramentas, embora outros materiais estejam sendo empregados de modo crescente. É notório que o ferro e o aço foram os primeiros materiais utilizados por um ser humano na forma de ferramenta e a arte de endurecer o aço pelo seu aquecimento a elevadas temperaturas e subsequente resfriamento em água é tão antiga, que a data de descoberta por acaso desse processo de endurecimento não pode ser apontada com absoluta precisão. É certo, por outro lado que somente a partir do século XX, a utilização de ferramenta de aço se generalizou e começou a adquirir a importância que apresenta na presente época, graças a estudos e pesquisas no campo da técnica de fabricação, assim como no constante desenvolvimento de novos tipos de aços, mediante a incorporação de novos elementos de liga, para aplicação de responsabilidades cada vez maior. Esses aços são possivelmente os que exigem maiores cuidados tanto sob o ponto de vista de fabricação, desde a sua fundição, transformação mecânica até o tratamento térmico final, como também sob o ponto de vista de aplicação. Isso é perfeitamente compreensível quando se considera os requisitos que eles devem preencher e os tipos e condições de serviço a que se destinam <sup>(1)</sup>.

Desta forma os processos de fabricação dos aços devem ser aperfeiçoados continuamente. Este trabalho visa o aperfeiçoamento do processo de fabricação de chapas de aço ferramenta para trabalho a quente W.NR. 1.2714, estudando o comportamento de vazios internos através da alteração de variáveis de processo. O trabalho foi realizado em uma usina

semi integrada focada na produção de aços longos especiais voltados principalmente para atender a indústria automotiva.

A usina possui uma forjaria que fornece uma rota alternativa de produção. Nesta rota o aço é forjado a partir de lingotes que variam de mil duzentos e cinquenta quilos até sete mil trezentos e cinquenta quilos. A forjaria é equipada com uma prensa hidráulica de mil toneladas que conforma o material a quente, utilizando o processo de forjamento em matriz aberta. São forjadas barras redondas com bitola na faixa de 152,4 mm a 508 mm, barras quadradas de 152 mm a 424 mm e barras chatas de diferentes bitolas. O processo de fabricação inicia na aciaria da usina, onde o processamento consiste na fusão de sucata, ferro-gusa e ferro-ligas em um forno de fusão a arco elétrico. Após a fusão, ocorre o refino primário neste mesmo equipamento. Em seguida, é realizado o refino secundário e degaseificação no aço em uma estação de forno-panela e degaseificador a vácuo, onde são adicionados elementos de liga, desoxidantes, eliminado o excesso de gases, principalmente hidrogênio. Enfim, o aço é solidificado através de lingoteiras de formas e tamanhos variados, onde o aço é resfriado até solidificar e atingir a temperatura de estripamento (retirada da lingoteira). Na forjaria o material é recebido da aciaria em caixas térmicas; aquecidos em fornos a gás; forjados na prensa; tratados termicamente; despontado o pé e a cabeça em serra fita; inspecionados; usinados ou não, dependendo das especificações, e liberados para embarque ao cliente. A Figura 1.1 mostra uma seqüência de fotografias da produção de barras forjadas na forjaria da unidade e a figura 1.2 mostra onde esta rota está posicionada no fluxo de produção do aço (rota da forjaria está em amarelo).



Figura 1.1. Fluxo de produção de barras forjadas na forjaria. (Fonte: Usina Piratini, 2010).



A qualidade do produto é controlada durante as etapas de fabricação, porém a mesma é atestada na etapa de inspeção do produto final. Nesta etapa realiza-se inspeção visual dos produtos, controle dimensional e verificação da qualidade interna com o ensaio de ultra-som com uma amostragem de 100%.

Na inspeção por ultra-som, se houver a detecção de alguma descontinuidade a mesma é mapeada e registrada em um banco de dados. Neste trabalho foi realizada uma análise deste banco de dados, verificando-se que os aços-ferramenta são os materiais que possuem a maior quantidade de registros neste banco de dados. Verificou-se que os materiais chatos eram os que mais apresentam registros.

O direcionador deste estudo foi o levantamento realizado das indicações registradas no período de 01/01/2008 até 15/04/2011. A tabela 1.1 mostra que neste período 76,19 % das ordens de produção de barras forjadas chatas e de barras forjadas quadradas do aço W.NR. 1.2714 tiveram registro de descontinuidade. A tabela 1.1 foi gerada com os dados das ordens de produção e os registros do banco de dados de descontinuidades. Optou-se pelo aço W.NR. 1.2714 em detrimento ao S1 pelo maior volume de produção do mesmo.

Tabela 1.1: Percentual de ordens de produção com registro de descontinuidades das barras chatas de aços ferramentas produzidos na forjaria <sup>(28)</sup>.

AÇO	O1	P20	D2/D6	H13	S1	1.2721	1.2714
Ordens produzidas	159	381	180	169	17	9	42
Ordens com descontinuidade	43	49	7	59	13	5	32
<b>% descontinuidades</b>	<b>27,04</b>	<b>12,86</b>	<b>3,89</b>	<b>34,91</b>	<b>76,47</b>	<b>55,56</b>	<b>76,19</b>

As descontinuidades internas podem ser restos de vazios e porosidades oriundos da solidificação dos lingotes não caldeados durante a conformação ou trincas oriundas pelo efeito do hidrogênio.

O objetivo da dissertação é caracterizar a descontinuidade e testar a influência do formato da matriz e do tempo de encharque no fechamento de descontinuidade conhecida (usinadas) em corpos de prova. Espera-se obter a combinação de variáveis que obtenha 0% de descontinuidades para replicar no forjamento de barras chatas de aço W.NR. 1.2714.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Forjamento em matriz aberta

Na fabricação de barras chatas de aços ferramenta usa-se o processo de forjamento em matriz aberta. O forjamento é feito por este processo quando: (a) a peça forjada é muito grande para se produzir pelo processo de matriz fechada; (b) as propriedades exigidas pela peça em sua aplicação não podem ser obtidos pela usinagem de uma barra ou fundido; (c) as quantidades de produção são pequenas, o que não justifica a construção de matrizes fechadas ou; (d) quando o prazo de entrega não permite a confecção de matrizes para forjamento em matriz fechada <sup>(2)</sup>. Neste processo, o tamanho das peças produzidas é limitado pela capacidade dos equipamentos de aquecimento, manipulação e forjamento. O peso pode variar de poucos quilos até 300 toneladas <sup>(2)</sup>.

Todos os metais forjáveis podem ser forjados em matriz aberta <sup>(2)</sup>. O forjamento de lingotes é feito a quente, através de múltiplas reduções até a forma final. Neste processo há quebra da estrutura bruta de fusão, redistribuição da segregação e o caldeamento de pequenos defeitos existentes no centro do lingote (vazios e porosidade) <sup>(3)</sup>. A qualidade do forjado depende do controle de vários parâmetros; por exemplo: forma da matriz, largura da matriz, configuração das matrizes, sobreposição da matriz, formato do lingote, seção do lingote, redução aplicada, seqüência de passes, gradientes de temperaturas, etc. <sup>(4) (5)</sup> As matrizes utilizadas podem ser: planas, curvas, em V, com forma de funil e do tipo mesa. Combinações entre as matrizes também podem ser utilizadas <sup>(2)</sup>. A seqüência de forjamento a ser utilizada depende do formato da peça a ser forjada.

CHOI <sup>(6)</sup> mostrou através de simulações FEM (Finite elements method) a seqüência 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° com a mesma redução

transforma-se o retângulo em um quadrado de menor secção. 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, girando a peça e conformando com a matriz representada na figura 2.3. A figura 2.1 mostra os paços descritos acima como o corte da secção transversal e a figura 2.2 um esquema tridimensional das mesmas etapas até obter uma barra redonda.

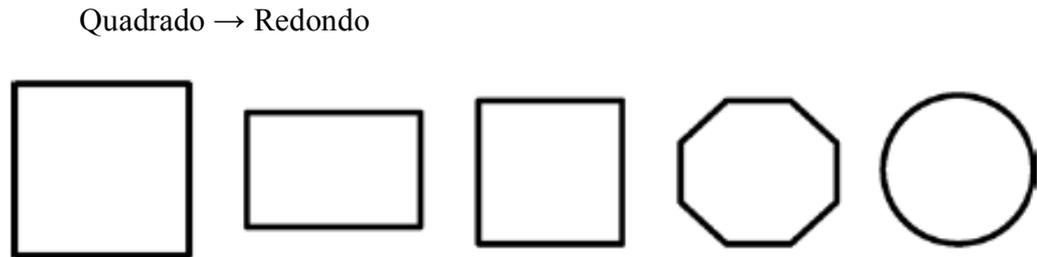


Figura 2.1: Secção transversal da seqüência de passes de um quadrado para uma barra redonda (Choi, 2006)<sup>(6)</sup>.

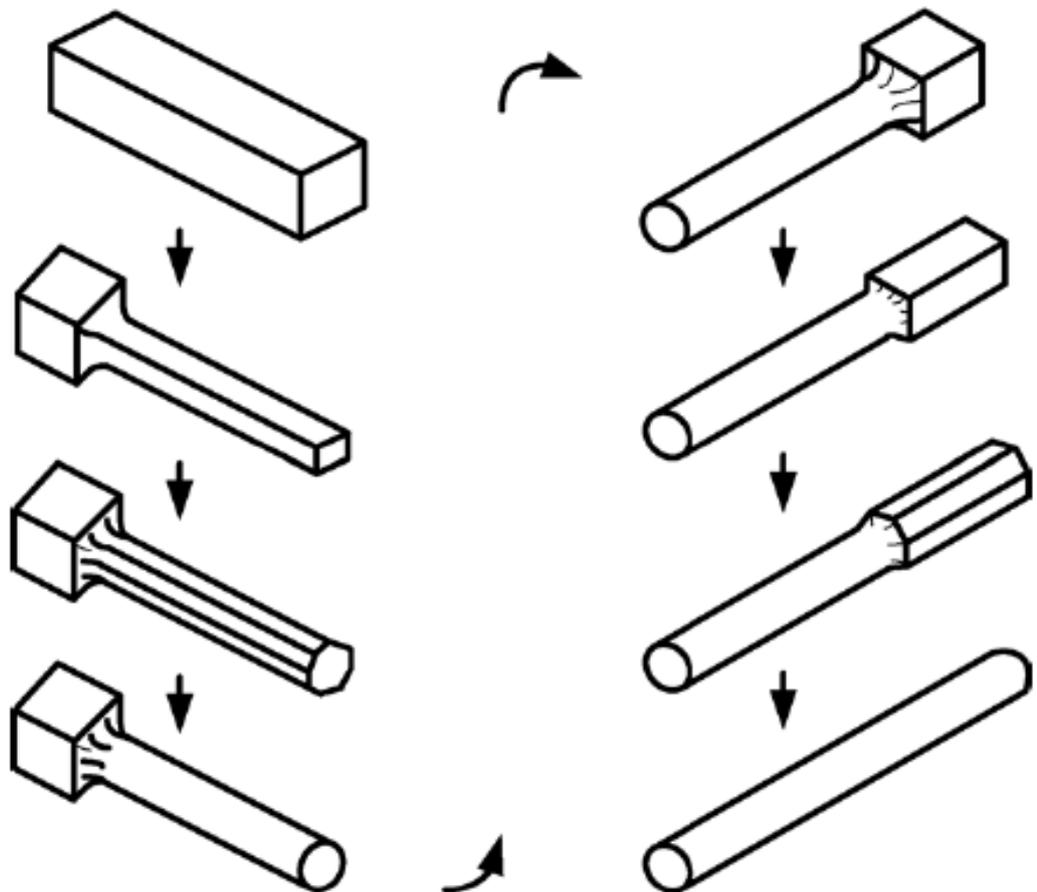


Figura 2.2: Seqüência de passes para obter uma barra redonda a partir de um quadrado (Choi, 2006)<sup>(6)</sup>.

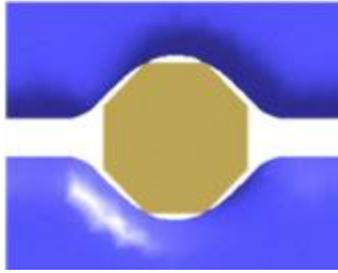


Figura 2.3: Esquema da matriz utilizada para transformar oitavado em redondo (Choi, 2006)  
(6)

No forjamento de chapas o quadrado é rebaixado até adquirir a espessura adequada. A figura 2.5 mostra as etapas para o forjamento de uma chapa de 310 mm de espessura e 630 mm de largura que foi o objeto de estudo deste trabalho. Esta seqüência é composta por três aquecimentos. No primeiro aquecimento é realizada a preparação do lingote, onde a cabeça quente é forjada com dimensão quadrada para possibilitar que o lingote seja pego pelo manipulador. Nesta etapa também é feito o emparelhamento do lingote que apresenta conicidade para ser extraído da lingoteira. No segundo aquecimento o material é rebaixado sucessivamente com passes intercalados por giros de 90° e 180° a fim de reduzir a espessura e aumentar a largura do material. No terceiro aquecimento o material continua sendo rebaixado e girado conforme no segundo aquecimento, porém nesta etapa a profundidade dos passes é reduzida para que se possa conseguir bom acabamento e dimensões simétricas (no esquadro e sem torção). A figura 2.4 mostra uma prensa de mil toneladas utilizada no forjamento em matriz aberta.



Figura 2.4. Prensa de mil toneladas executando forjamento em matriz aberta de barra redonda  
(Usina Piratini – 2006)

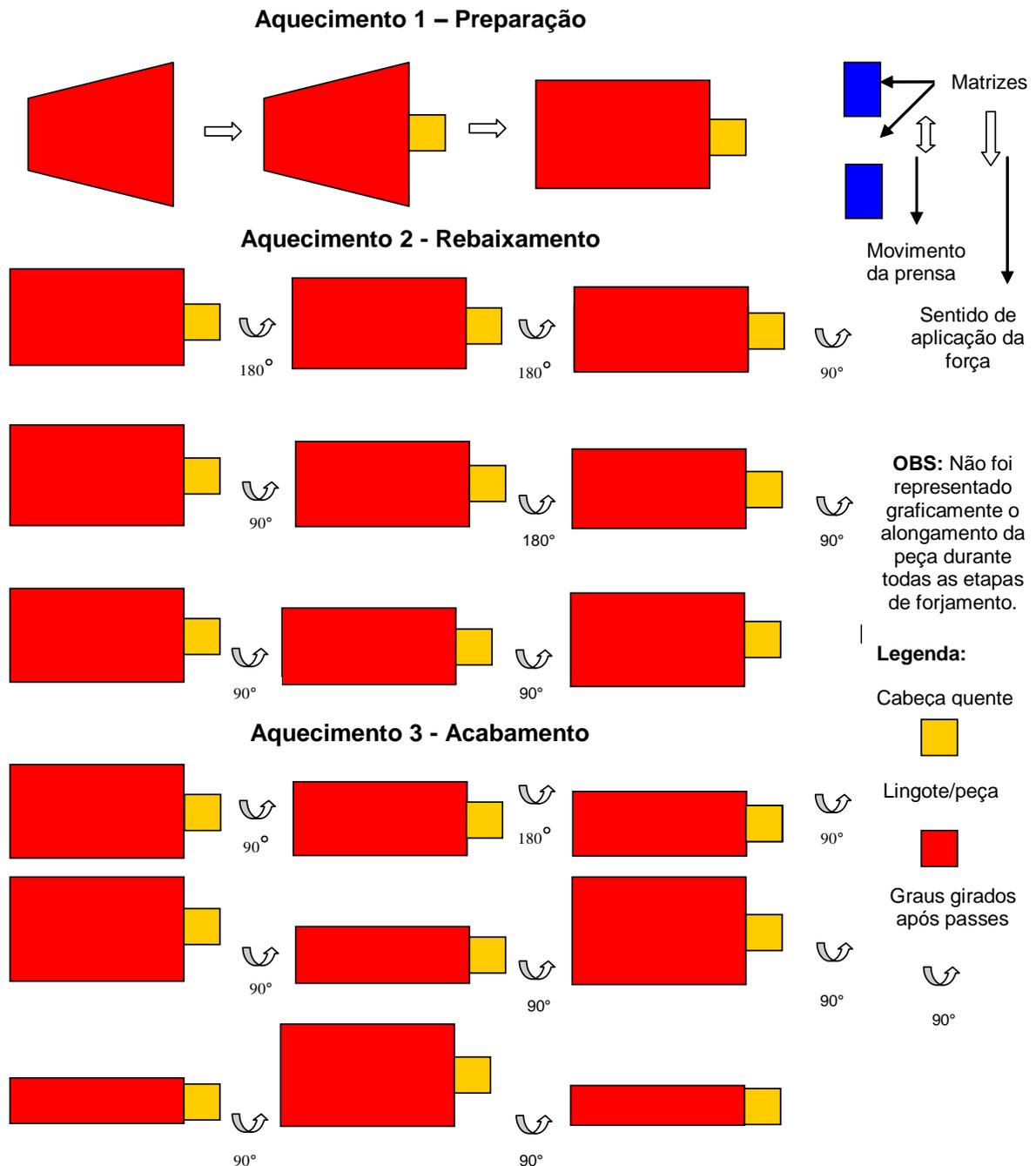


Figura 2.5. Ilustração do processo de forjamento de lingote de sete toneladas do aço W.NR. 1.2714 (Usina Piratini – 2011)

## 2.2 Aço-ferramenta W.NR. 1.2714

Os vários tipos de aços ferramentas podem ser classificados com base em características fundamentais, como a presença de certos elementos de liga (aços rápidos ao

tungstênio ou molibdênio), aplicação (aço para trabalho a frio ou a quente) e tratamento térmico (aços endurecíveis em água, óleo ou ar) <sup>(6)</sup>.

O aço 1.2714 é um aço ferramenta ligado ao cromo-níquel-molibdênio para trabalho a quente e endurecível ao ar ou ao óleo com muito baixa deformação, média resistência ao desgaste, alta tenacidade, ótima resposta ao polimento e boa resistência ao calor <sup>(7)</sup>.

### 2.2.1 Composição química

A composição química típica segundo a norma W.NR. 1.2714 é apresentada na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Composição química do aço W.NR. 1.2714 <sup>(8)</sup>.

Elemento	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S
Máx	0,60	0,40	0,95	1,20	1,80	0,55	0,07	0,03	0,03
Min	0,50	0,10	0,65	1,00	1,50	0,45	0,12	0,00	0,00

O cromo tem a função de aumentar a temperabilidade e aumentar a profundidade da tempera. O manganês e molibdênio também são adicionados para auxiliar a temperabilidade <sup>(9)</sup>. A temperabilidade é a susceptibilidade ao endurecimento por resfriamento rápido <sup>(6)</sup>. O níquel é um elemento que estabiliza a austenita e não é formador de carbonetos, comportamento diferente do cromo que é estabilizador da ferrita e um forte formador de carboneto. A diferença principal entre o efeito do cromo e do níquel em aços ferramentas de baixo carbono é resumido a seguir <sup>(9)</sup>.

a) Níquel entra na matriz exercendo um forte efeito endurecedor por solução sólida o que reduz ligeiramente a usinabilidade do aço se comparado a um aço ferramenta ao cromo de baixo carbono com o mesmo teor de carbono <sup>(9)</sup>.

b) Níquel abaixa a temperatura crítica, o que possibilita tempera em temperaturas mais baixas que os aços ferramentas de baixo carbono, ligados com cromo. Pela mesma razão a temperatura de recozimento também é reduzida, porém os tempos de recozimento devem ser maiores pela presença do níquel e seu efeito endurecedor por solução sólida <sup>(9)</sup>.

### 2.2.3 Equivalências

A tabela 2 mostra a equivalência do aço W.NR. 1.2714 em algumas normas internacionais

Tabela 2.2: Equivalência do aço W.NR. 1.2714 2 em algumas normas internacionais<sup>(10)</sup>.

Norma	W.NR.	DIN	AISI	JIS	AFNOR	BS	UNI
Designação	1.2714	56NiCrMoV7	~L6	SKT4	55NCDV7	5 (BS 224)	56NiCrMoV7KU

#### 2.2.4 Aplicação

Aço utilizado para a fabricação de blocos para matrizes, estampos para forjamento em prensas ou martelos, punções, lâminas para tesoura de corte a quente e matrizes para extrusão<sup>(7)</sup>.

#### 2.2.5 Processamento

Os produtos do aço ferramenta W.NR. 1.2714 são fabricados a partir de lingotes advindos de lingotamento convencional, que são conformados por meio de forjamento ou laminação a quente para gerar produtos de seções redondas quadradas e retangulares.

No caso do forjamento, este aço é conformado utilizando o processo de forjamento em matriz aberta utilizando seqüência de passes abordadas no item 2.1. O processo ocorre na faixa de temperatura de 850°C a 1100°C com posterior resfriamento em forno ou ambiente que propicie um resfriamento lento após a conformação<sup>(10)</sup>.

Os produtos conformados são entregues ao mercado no estado recozido (dureza máxima de 250 HB) para permitir o corte e a usinagem do material pelo cliente.

Tensões residuais podem ser introduzidas nos aços ferramenta por deformação plástica que acompanha a remoção de material durante a operação de usinagem. As tensões residuais podem causar distorções durante o aquecimento e endurecimento, de forma que o tratamento térmico de alívio de tensão é aplicado para remover estas tensões<sup>(6)</sup>.

O processamento final dos aços ferramentas consiste do tratamento térmico para produzir ajuste da dureza especificada. O ciclo de tempera em óleo seguido de revenimento confere as propriedades finais ao aço. O revenimento além de aliviar a martensita/bainita formada, propicia a transformação da austenita retida em martensita. A fase final formada é função da taxa de resfriamento empregada no resfriamento da tempera. A figura 2.6 mostra uma representação do ciclo de processamento e tratamento térmico para obtenção do produto acabado em aço W.NR. 1.2714. O ciclo inicia com a usinagem de desbaste, alívio de tensões, usinagem final, têmpera, duplo revenimento e se necessário retífica para dimensões que

necessitem de precisão dimensional. Salienta-se que todas as etapas de usinagem são realizadas com a peça na temperatura ambiente e que a figura só indica as temperaturas próximas das quais se realiza os tratamentos, não representando de forma precisa as taxas de aquecimento e resfriamento.

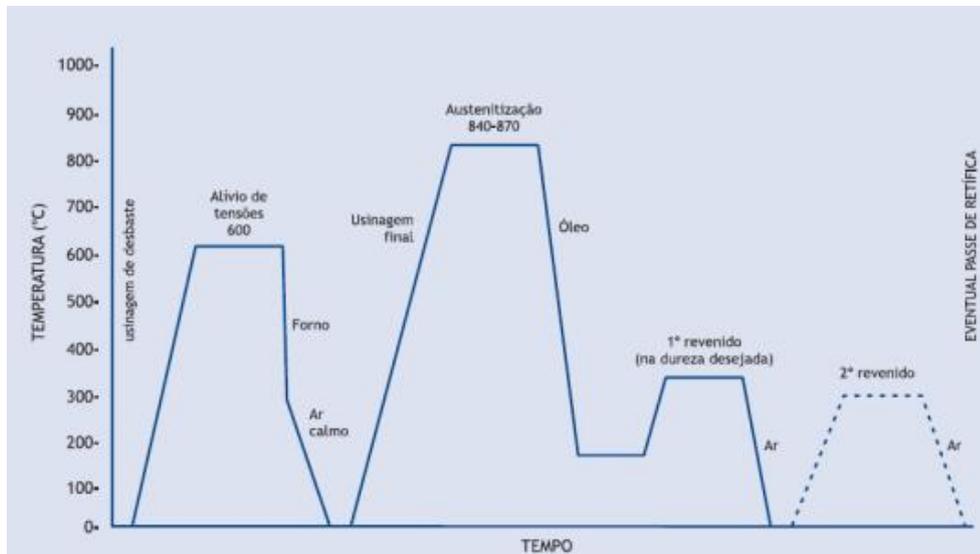


Figura 2.6: Representação do ciclo de processamento e tratamento térmico para obtenção de peças acabadas em aço W.NR. 1.2714<sup>(7)</sup>.

## 2.3 Vazios internos

### 2.3.1 Definição e mecanismos de formação

O aço, após a solidificação pode conter vazios, devido à contração do material durante a solidificação ou aprisionamento de gases. A redução em volume na transformação de fase de líquido para sólido durante a solidificação é maior do que a contração da casca do veio (primeira região a solidificar) que ocorre ao mesmo tempo, espaços vazios (“blowholes”) são formados no centro do veio<sup>(11)</sup>. Geralmente a maior fração de vazio está localizada no centro do material, muitas vezes com formato transversal circular, e pode ser tão alta que um poro central longitudinal é formado. A figura 2.7 mostra uma foto da seção transversal de um tarugo de lingotamento contínuo com porosidade central.

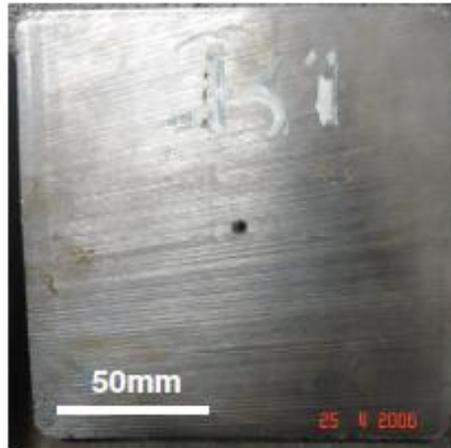


Figura 2.7 Seção transversal de um tarugo apresentando porosidade central. Dimensão do tarugo: 155 x 155 mm<sup>(13)</sup>.

A teoria do mini-lingote é uma formulação teórica para a tentativa de explicar os padrões de contração observados no lingotamento contínuo. A teoria consiste na divisão do tarugo em cinco partes que analisam individualmente a solidificação e o histórico térmico, conforme apresentado na figura 2.8. Em (a) existe um crescimento uniforme da zona colunar e o seguimento segue perpendicular à direção de extração de calor. Em (b) algumas dendritas colunares tendem a crescer mais rapidamente que as suas vizinhas devido à instabilidade causada pelas correntes convectivas e gradientes térmicos associados ao preenchimento do molde pela válvula submersa. Em (c) o crescimento colunar acentuado pode produzir pontos de solidificação que isolam pequenas bolsas de aço líquido. Neste caso, a solidificação destas bolsas de metal líquido ocorre de maneira semelhante à solidificação de lingotes, e deste modo são conhecidos como mini-lingotes. Em (d) a solidificação se encerra enquanto uma cavidade interna de contração pode ser formada. Finalmente, em (e), com a solidificação completada, tem-se a macroestrutura final.

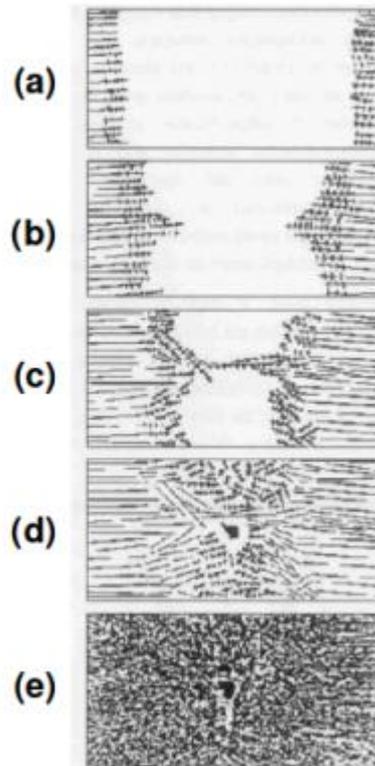


Figura 2.8: Modelo de solidificação do IRSID. Passos da teoria do mini-lingote <sup>(13)</sup>.

A taxa de solidificação influencia na formação da porosidade. Também abaixo de certo teor de gás, que depende da taxa de solidificação, nenhuma porosidade ocorre. Para lingotes advindos do lingotamento convencional o processo de solidificação acontece de maneira similar ao descrito anteriormente.

KERMANPUR <sup>(15)</sup> simulou a solidificação de lingotes convencionais de seis toneladas para entender como os parâmetros do processo de solidificação influenciam na formação de trincas entre a cabeça quente e a peça durante o forjamento. Aproveita-se este estudo para exemplificar a solidificação em lingotes utilizados para forjamento em matriz aberta. Na figura 2.9 pode-se observar a formação da casca de aço (cinza) na parede da lingoteira e seu crescimento com o passar do tempo.

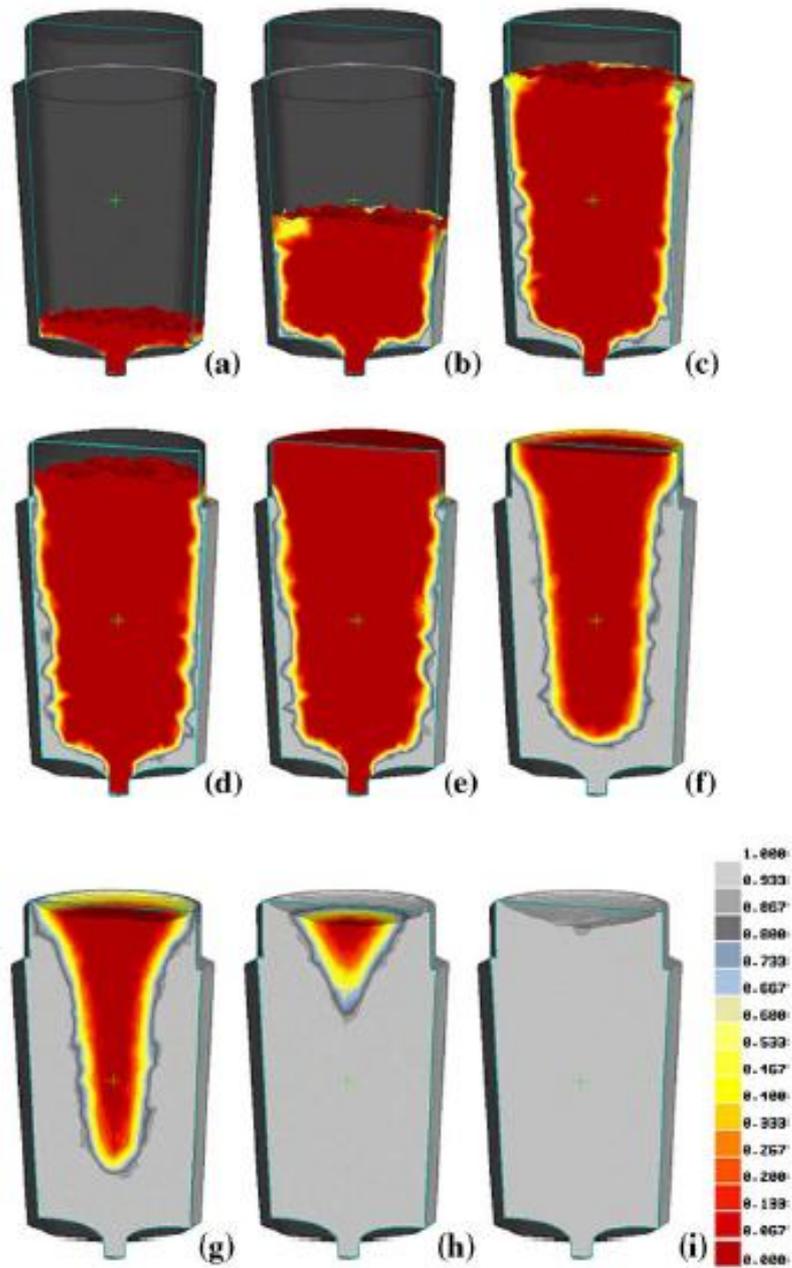


Figura 2.9 Simulação da solidificação em lingoteira convencional (a) 35 s, (b) 287 s, (c) 703s, (d) 859 s, (e) 1014 s, (f) 2630 s, (g) 4770 s, (h) 7830 s e (i) 11285 s<sup>(15)</sup>.

LEE<sup>(16)</sup> exemplificou um vazio interno encontrado em um lingote. A figura 2.10 mostra a representação do lingote e do vazio interno de cinco a oito milímetros de diâmetro<sup>(16)</sup>.

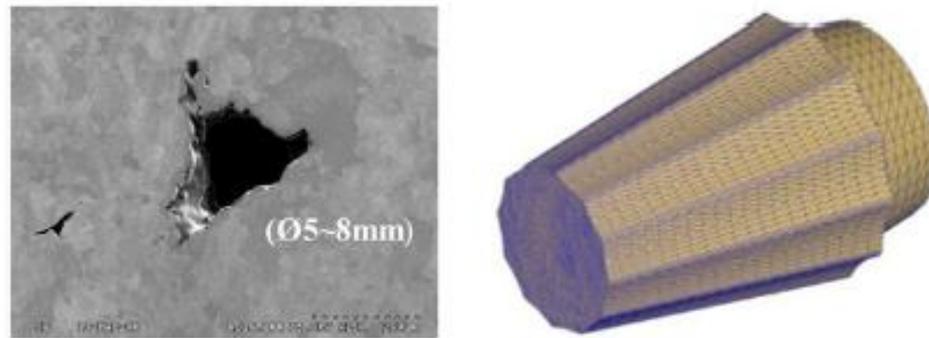


Figura 2.10 Lingote e vazio interno citado por LEE em seu estudo<sup>(16)</sup>.

### 2.3.2 Influência da porosidade no produto final

Caso a porosidade seja formada no processo de solidificação e não seja eliminada no processo de conformação, 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 (>1ppm), que favorece a iniciação de trincas nos defeitos já presentes<sup>(13)</sup>.

PARK<sup>(14)</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 figura 2.11. 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°C e redução de área superior a 20%.

Além do decréscimo das propriedades mecânicas, o aparecimento de porosidades é deletério quando aparece na superfície de matrizes usinadas utilizadas em injeção, estampagem ou forjamento por necessitar de retrabalho da matriz para que a porosidade não seja empresa na superfície da peça final.

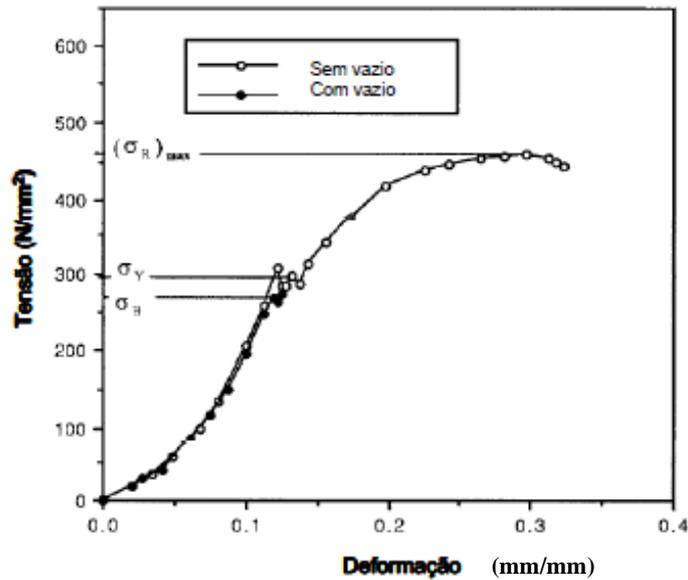


Figura 2.11: Comparação da tensão de tração entre uma amostra sem vazio e uma amostra com um vazio <sup>(14)</sup>.

## 2.4 Detecção de defeitos internos via ensaio de ultra-som

### 2.4.1 Introdução ao ensaio

O ensaio por ultra-som é um método não destrutivo, no qual um feixe sônico de alta frequência é introduzido no material a ser inspecionado com o objetivo de detectar discontinuidades internas e superficiais. O som que percorre o material é refletido pelas interfaces e é detectado e analisado para determinar a presença e localização de discontinuidades. Trincas, rechupes (vazios), poros, falta de fusão (solda) e inclusões podem ser facilmente detectados<sup>(29)</sup>.

### 2.4.2 Ensaio de ultra-som

Para realização do ensaio, usa-se aparelho de ultra-som (figura 3.4), cabeçote (figura 3.3) e blocos para calibração dos equipamentos. Um dos métodos de inspeção é o pulso-eco,

no qual o transdutor (cabeçote) emite pulsos de energia sônica, que são introduzidos no material em intervalos regulares de tempo através de um acoplante entre a peça e o cabeçote. Se os pulsos encontram uma superfície refletora, parte ou toda a energia é refletida e retorna ao transdutor, que converte as vibrações em energia elétrica e a transforma em sinal na tela do aparelho. A figura 2.12 ilustra os passos do ensaio: (a) o transdutor emite o pulso que entra no material e gera o sinal de entrada chamado de sinal de varredura ou eco de entrada; (b) o pulso percorre a peças e é refletido pela extremidade oposta do material; (c) o pulso retorna pelo material e é recebido pelo transdutor que gera na tela do equipamento o pulso de eco de fundo.

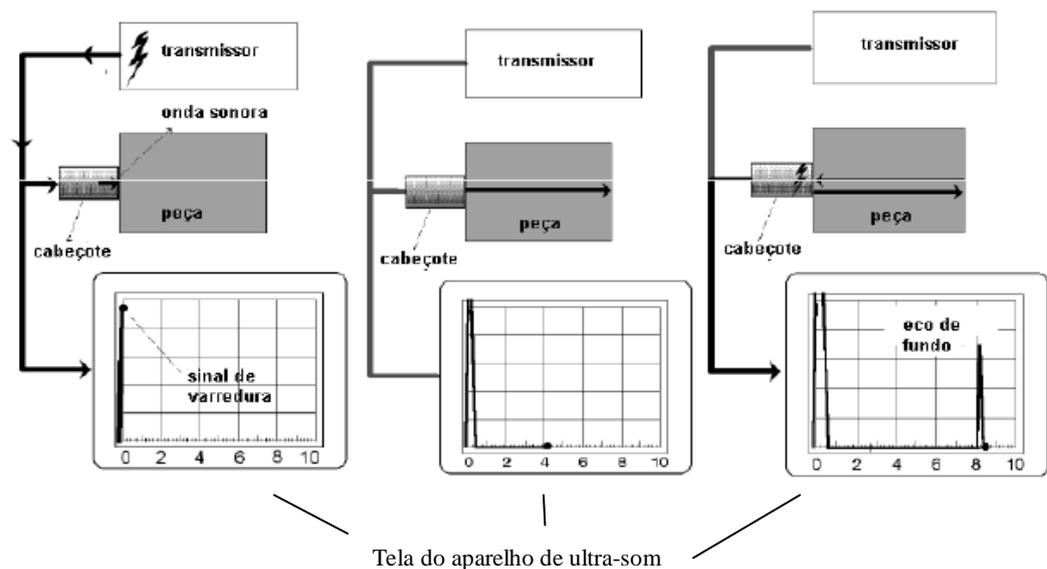


Figura 2.12: Método de inspeção pulso-eco, mostrando o sinal de varredura e o eco de fundo<sup>(30)</sup>.

Se houver uma descontinuidade no material, parte do pulso sônico é refletido antes do mesmo atingir a superfície oposta da peça. Desta forma o sinal da descontinuidade aparecerá entre o sinal de varredura e o eco de fundo conforme mostrado na figura 2.13. Se a descontinuidade refletir todo o pulso sônico o sinal do eco de fundo não aparecerá na tela (queda do eco de fundo), indicando uma descontinuidade maior que o feixe sônico.

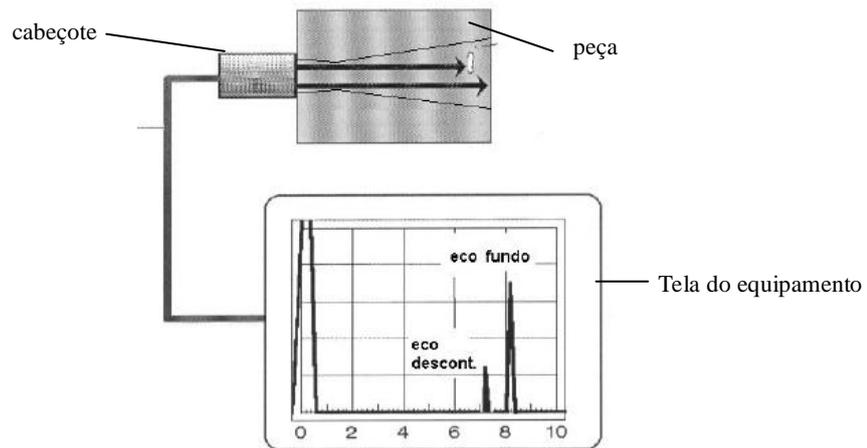


Figura 2.13: Detecção de descontinuidade utilizando o método pulso eco <sup>(30)</sup>.

### 2.5 Fechamento de vazios internos

Vazios ou poros devem ser eliminados por deformação compressiva durante o processo de conformação. Devido às condições de temperatura e deformação, os processos de laminação e de forjamento a quente possibilitam a redução e eliminação da porosidade central. Por se tratarem de processos similares de compressão direta, ambos os processos serão analisados.

Para obter um material isento de porosidade após a conformação, a eliminação dos poros deve incluir dois passos: primeiramente, o fechamento do poro, e segundo, a soldagem ou ligação das superfícies internas do poro. 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. Duas superfícies de um vazio fechado têm que ser completamente ligadas para eliminar alguma descontinuidade e, além disso, obter um produto isento de defeito. Muitas variáveis tais como temperatura de trabalho, a resistência do filme de óxido na superfície, a existência de contaminantes, a extensão da superfície e a pressão de contato, têm um efeito no nível de ligação. 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>(13)</sup>.

Resultados de experimentos laboratoriais realizados por WANG<sup>(18)</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 mostra que o poro começa a fechar e soldar progressivamente das extremidades em direção ao centro. Ele também mostra que os poros localizados mais próximos da superfície em relação ao centro fechavam mais rapidamente. No presente estudo foram considerados apenas os poros centrais.

### 2.5.1 Passes de forjamento

Como descrito no item 2.1 o forjamento é realizado através de sucessivos passes até o produto final. Existem vários estudos sobre a profundidade dos passes na redução de vazios internos tanto para o processo de forjamento quanto para o processo de laminação.

KIM<sup>(17)</sup> simulou em um modelo assimétrico bi-dimensional uma redução de 400 mm aplicada de 2 formas, as quais ele chamou de Caso 1 e Caso 2. No Caso 1 foi aplicado um primeiro passe de 300 mm e um segundo passe de 100 mm. Para o caso 2 foi simulado um passe de 200 mm com dois passes subsequentes de 100 mm. A figura 2.14 ilustra as duas condições. Utilizando um defeito com raio inicial de 20 mm 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 2.15 mostra o resultado da simulação do Caso 1 e Caso 2. Para validar o modelo o mesmo realizou experimento com corpos de prova de uma liga de chumbo com furos de 10 mm. O resultado do experimento é apresentado na figura 2.16 e comprova que maior redução é mais eficaz no fechamento de vazios internos<sup>(17)</sup>.

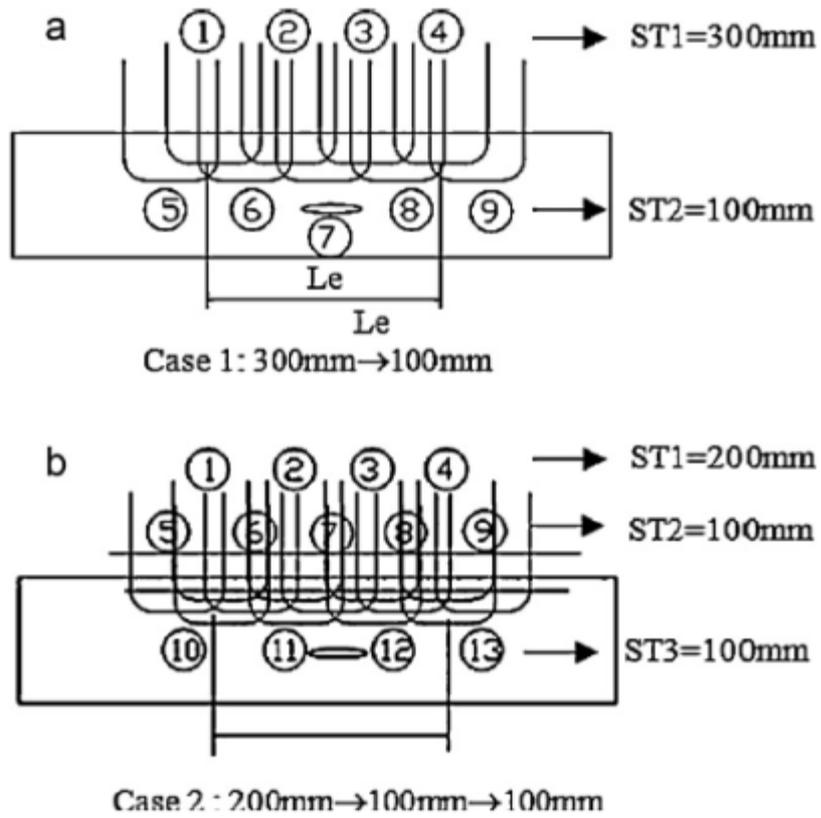


Figura 2.14: Caso 1 e Caso 2 utilizados no experimento de Kim<sup>(17)</sup>.

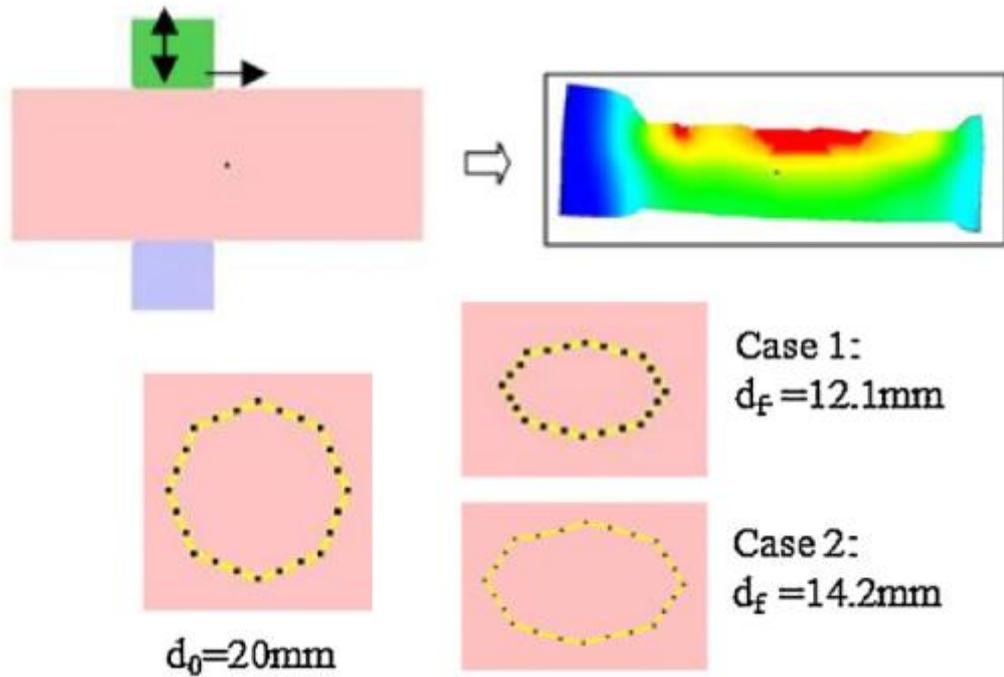


Figura 2.15: Efeito do fechamento de vazio com 20 mm com os passes do Caso 1 e Caso 2<sup>(17)</sup>.

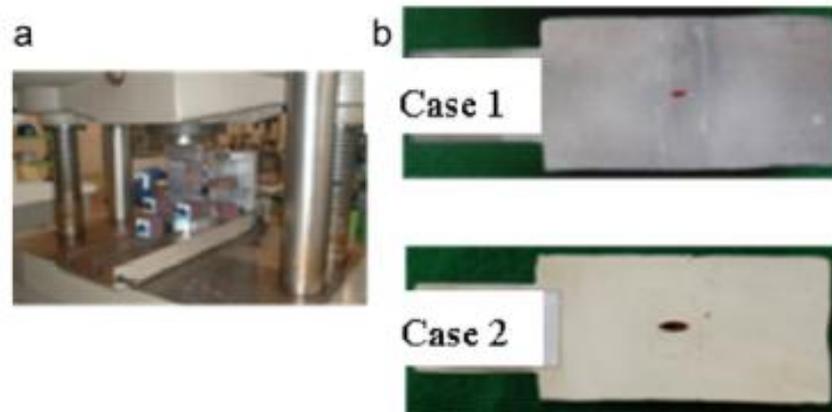


Figura 2.16: Resultado experimental de corpos de prova de chumbo com furo inicial de 10 mm forjados no Caso 1 e no Caso 2 <sup>(17)</sup>.

### 2.5.2 Formato da Matriz

As matrizes utilizadas podem ser: planas, curvas, em V, com forma de funil e do tipo mesa. Combinações entre as matrizes também podem ser utilizadas <sup>(2)</sup>. Vários autores realizaram experimentos da influência do formato da matriz na eliminação de defeitos internos.

Experimentos realizados por PARK e TANAKA <sup>(14)</sup>, no forjamento a quente em amostras de aço, mostraram que em matrizes com formato em V, a velocidade de ligação das superfícies do vazio assim como a eficiência de ligação são melhores do que em matrizes planas. A figura 2.17 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.

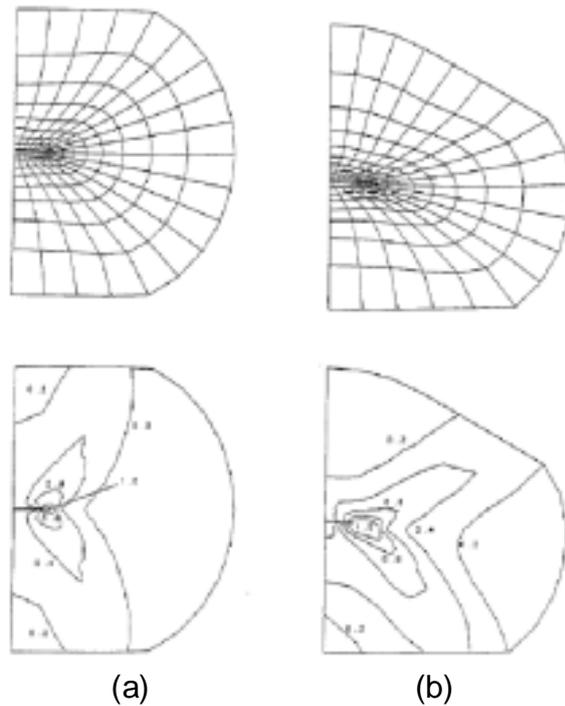


Figura 2.17: Comparação da configuração da malha e a deformação efetiva entre (a) matrizes planas e (b) matriz V + matriz plana <sup>(14)</sup>.

WANG <sup>(13)</sup>, também mostrou a influência do formato da matriz no fechamento de vazios. Simulações por elementos finitos mostraram que matriz plana deforma áreas globais, e matriz com formato em V deforma áreas centrais (Fig. 2.18). Além disso, a matriz em V proporciona um rápido fechamento do vazio com uma menor redução em relação à matriz plana <sup>(13)</sup>.

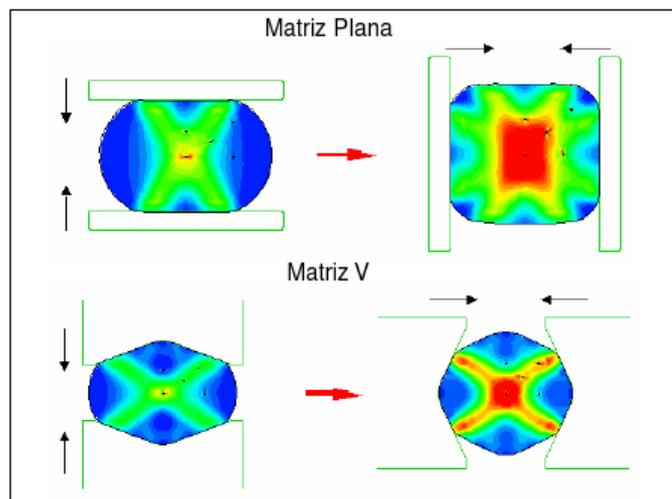


Figura 2.18: Comparação dos níveis de deformação entre matrizes planas e com formato em V <sup>(13)</sup>.

A eficiência da matriz em V é clara para a redução de defeitos internos no forjamento de peças redondas. Quando trabalhamos com materiais quadrados ou chatos o uso desta matriz encontra limitações. Uma alternativa a matriz V para chapas é o uso de matriz funil, que permite trabalhar com o dobro da redução de espessura do que a matriz plana, sem o aparecimento de trincas <sup>(19)</sup>.

KAKIMOTO <sup>(5)</sup>, em seu estudo sobre as variáveis que interferem no fechamento de vazios, utilizou simulação 2D de deformações e modelos 3D para determinação do “Q valor” que avalia o fechamento de vazios internos. No que diz respeito a matrizes, foram utilizadas matrizes planas na parte superior e matrizes planas e de grande largura e comprimento na parte inferior conforme figura 2.19.

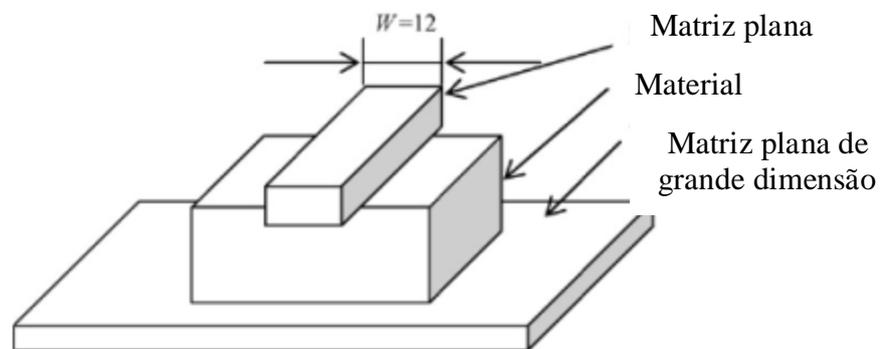


Figura 2.19: Representação do método utilizado por Kakimoto <sup>(5)</sup>.

Combinações de matrizes superiores e inferiores (matrizes 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>(5)</sup>.

O fenômeno de aumento da região de contato entre peça e os cilindros de laminação com sua influência sobre fechamento de vazios internos também foram estudados. Têm sido relatado que grandes valores de  $L/H$ , onde  $L$  é o comprimento do arco de contato e  $h$  a altura média do material, são preferíveis para o fechamento do vazio. A explicação é que estas geometrias resultam em valores favoráveis da pressão hidrostática dentro da região plástica e

tensões compressivas no centro do material. Desta forma, um programa de laminação deve ser baseado em reduções pesadas por meio de cilindros grandes <sup>(13)</sup>.

A figura 2.20 mostra as simulações por elementos finitos realizadas por CHAIJARUWANICH <sup>(20)</sup> em deformação plana. Para baixa relação L/H (onde L é o comprimento de contato e H é a altura inicial) a deformação foi concentrada nas camadas superficiais e não penetrou até o meio da placa. Com uma alta relação L/H uma tensão hidrostática compressiva (negativa) é experimentada em toda a espessura da placa, embora ela seja maior na superfície do que no centro <sup>(20)</sup>.

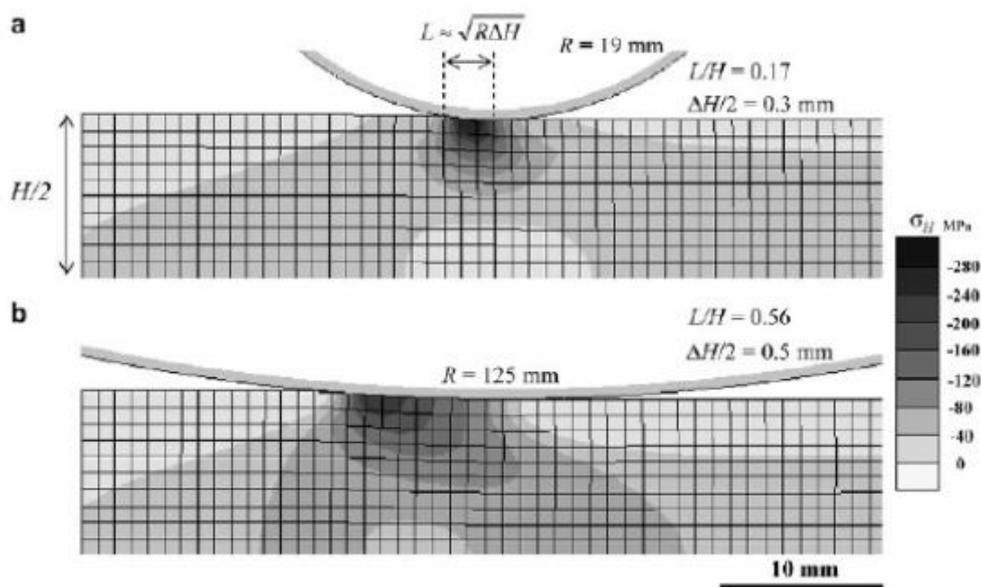


Figura 2.20: Distribuição da tensão hidrostática ( $\sigma_H$ ) durante a laminação em deformação plana de uma placa de 20 mm de espessura com raio do cilindro de (a) 19 mm e (b) 125 mm <sup>(20)</sup>.

#### 2.4.3 Atrito e alargamento

O alargamento é amplamente abordado no processo de laminação a quente. A deformação na largura denominada de alargamento é consequência de um estado tridimensional de deformação e de tensões. O alargamento depende de vários fatores do processo de laminação que atuam simultaneamente e que se supõem, de forma que o alargamento resultante é a soma de todas essas influências. As influências são tão significativas que não há a possibilidade de cálculos precisos. A seguir são discutidas algumas dependências <sup>(21)</sup>.

Influência da redução em altura ( $\Delta h$ ) no alargamento: Quanto maior a redução em altura maior é o alargamento. A figura 2.21 mostra a influência da redução em altura ( $\Delta h$ ) no alargamento ( $\Delta b$ ) empregando a expressão de Ekelund<sup>(21)</sup>.

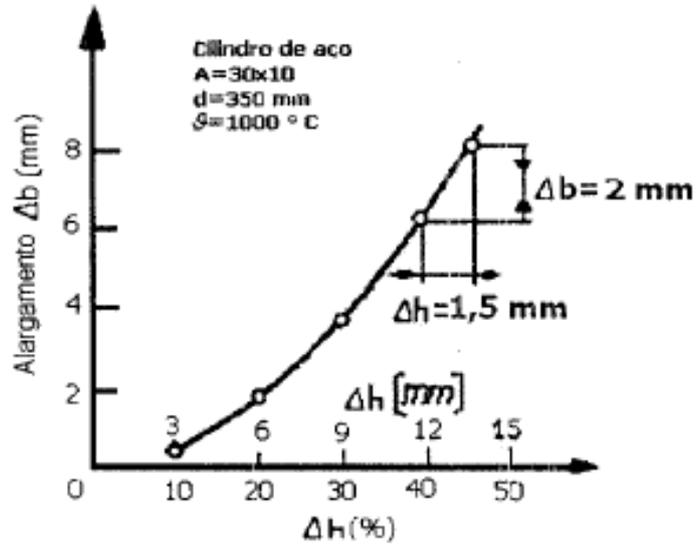


Figura 2.21: Influência da redução absoluta em altura no alargamento<sup>(21)</sup>.

Influência do diâmetro do cilindro: a barra laminada flui de forma regular para todas as direções em dependência do aumento do diâmetro dos cilindros. Assim, cilindros com grande diâmetro conduz a um maior alargamento conforme figura 2.22.

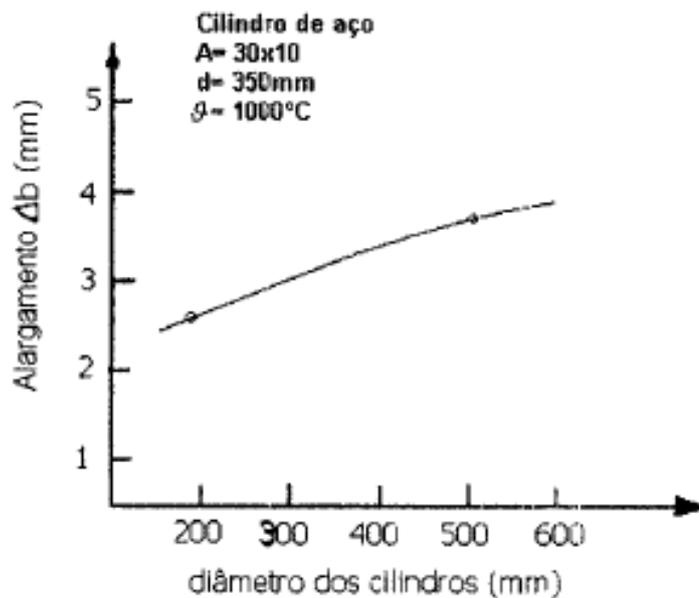


Figura 2.22: Influência dos diâmetros dos cilindros de laminação no alargamento<sup>(21)</sup>.

Influência da velocidade de laminação: A redução da velocidade aumenta o alargamento conforme figura 2.23.

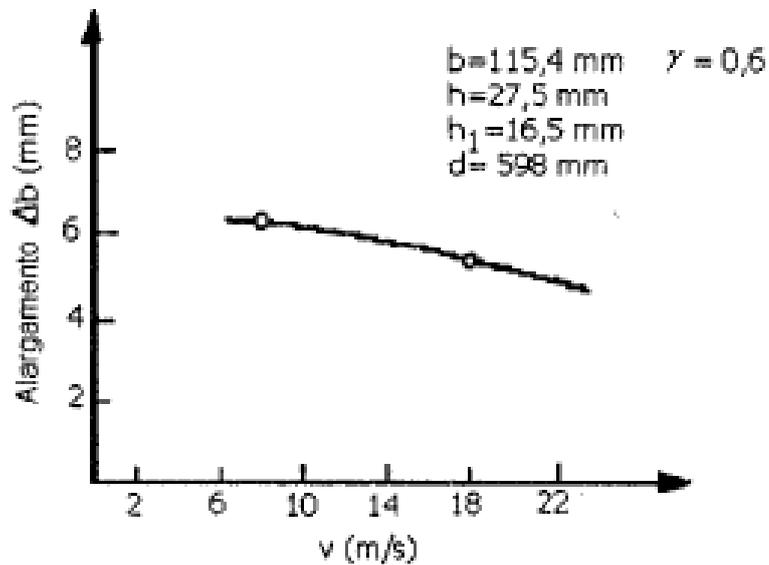


Figura 2.23: Influência da velocidade de laminação no alargamento <sup>(21)</sup>.

Influência da temperatura: A redução da temperatura aumenta a força e o atrito e aumenta o alargamento conforme pode ser observado na figura 2.24.

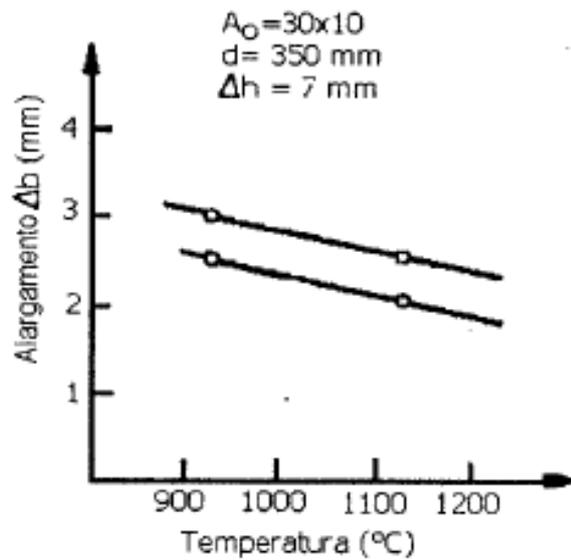


Figura 2.24: Influência da temperatura no alargamento <sup>(21)</sup>.

Atrito é a força que resiste ou se opõe ao movimento quando uma superfície desliza sobre a outra. O coeficiente de atrito  $\mu$  é definido pela força tangencial necessária para realizar

o movimento relativo entre as superfícies e a força normal. Para cálculo do coeficiente de atrito entre cilindro de laminação e material laminado, utilizamos a lei de Ekelund:

$$\mu = f(1,05 - 0,0005T)$$

onde T é a temperatura do material em graus centígrados, e f é um fator que considera o material dos cilindros. Para cilindros de aço  $f = 1,0$ .

WANG <sup>(18)</sup> através de simulação por elementos finitos mostrou que valores altos de tensão e deformação de cisalhamento são favoráveis ao fechamento de poros. Aumentando o coeficiente de atrito em simulação, sobe a tensão e deformação de cisalhamento, implicando que o aumento do atrito entre os cilindros e a peça melhora a eliminação do poro.

#### 2.4.4 Temperatura de forjamento

O forjamento do aço W.NR. 1.2714 é realizado em temperaturas entre 850°C e 1100°C<sup>(10)</sup>. O forjamento é planejado a partir das curvas tensão versus deformação e tensão máxima versus temperatura. Estas curvas são obtidas através de ensaios de tração realizados na Gleblee (simulador termomecânico) com taxas de deformação calculadas a partir das condições industriais. A figura 2.25 mostra a Curva tensão versus deformação obtida através de amostras do aço W.NR. 1.2714 ensaiados na Gleblee da Usina Piratini a taxa de deformação de 5 s<sup>-1</sup>. A figura 2.26 apresenta a curva tensão máxima versus temperatura ensaiada no mesmo equipamento e mesma taxa de deformação da curva anterior.

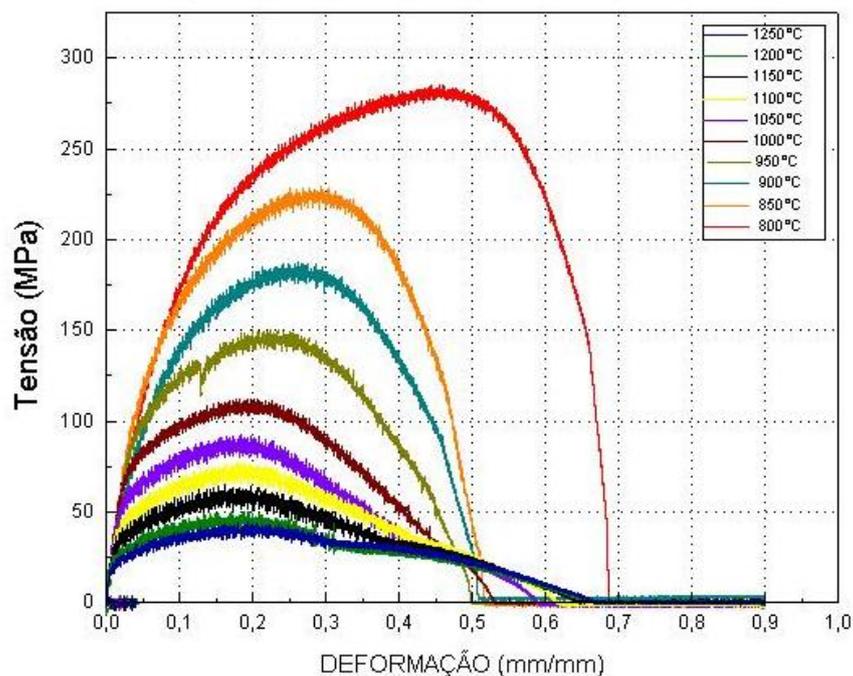


Figura 2.25: Curva tensão versus deformação do aço W.NR. 1.2714<sup>(31)</sup>

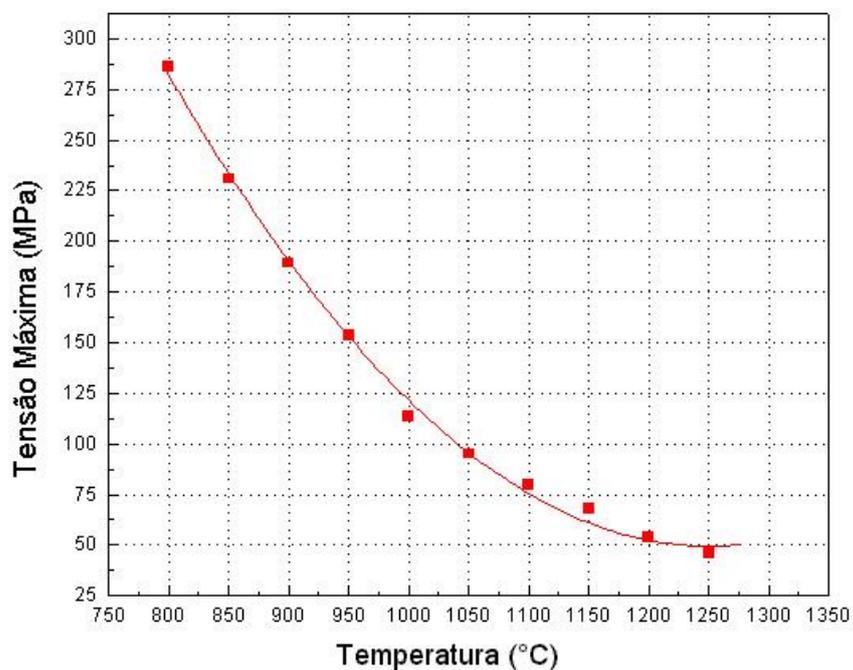


Figura 2.26: Curva tensão máxima versus temperatura do aço W.NR. 1.2714<sup>(31)</sup>.

Observa-se nas curvas apresentadas na figura 2.25 e 2.26 que com o aumento da temperatura, as tensões necessárias para a deformação plástica do material decrescem.

Vários autores descrevem o efeito do pré-resfriamento no caldeamento de defeitos internos.

Resultados de PIETRZYK <sup>(22)</sup>, usando a simulação por elementos finitos na laminação de placas, mostraram que as tensões compressivas foram maiores quando o material foi submetido a um resfriamento intenso da superfície antes da laminação. Isto levou a conclusão que o resfriamento da superfície da placa resultou em um aumento da compressão hidrostática na zona central da placa e favoreceu o fechamento dos vazios <sup>(22)</sup>.

KAKIMOTO <sup>(5)</sup> também estudou o comportamento da temperatura no “Q value” que avalia o fechamento de vazios internos. Em relação à distribuição de temperatura, confirmou-se que o “Q value” mostra uma tendência ascendente com a queda da temperatura superficial da peça, porque uma diferença da tensão de escoamento surge como resultado da queda de temperatura da superfície, a deformação transversal (largura) é contida, e o estresse hidrostático no interior do material aumenta.

O gradiente de temperatura no material laminado corresponde à diferença de temperatura entre a superfície e o centro. O efeito benéfico do pré-resfriamento do material é aumentar a deformação e a tensão compressiva no centro. Quando o material é pré-resfriado para adquirir um gradiente de temperatura da superfície até certa profundidade, antes de atingir o centro do material, ocorre um aumento da tensão de escoamento resultante do pré-resfriamento na camada mais externa, e uma maior tensão hidrostática na região central <sup>(23)</sup>.

STAHLBERG <sup>(24)</sup> estudou a influência do resfriamento forçado no fechamento de porosidade central em lingotes de aço de seção quadrada de 300 x 300 mm, laminados em cilindros planos. A tabela 2.3 mostra os programas de resfriamento realizados nos testes. A altura inicial do poro era de 30 mm. Verificou-se que é possível obter uma redução maior dos poros por meio de um resfriamento da superfície do material em contato com os cilindros.

Tabela 2.3: Programas de resfriamento, temperaturas superficiais e alturas finais <sup>(24)</sup>.

Nº Lingote	0	2	4	5
Programas de Resfriamento	Ar 4 min	Água 2 min	Água 1 min Ar 1 min Água 1 min	Água 1 min Ar 2 min Água 1 min
Temperatura Inicial (°C)	1095	1110	1038	1052
Após Resfriamento (°C)	980	914	888	846
Após Laminação (°C)	980	906	816	840
Altura Final do Poro (mm)	16,9	11,9	10,7	13,5

Considerando as faces verticais dos lingotes, é evidente que a forma côncava da superfície livre é marcante quando grandes reduções em altura do poro são obtidas. Portanto, o alargamento da parte central do lingote foi grande, e concluiu-se que alargamentos pesados

correspondem a uma grande diminuição da altura do poro (Fig. 2.27). A natureza do resfriamento e o alargamento teve uma grande influência na altura final do poro.

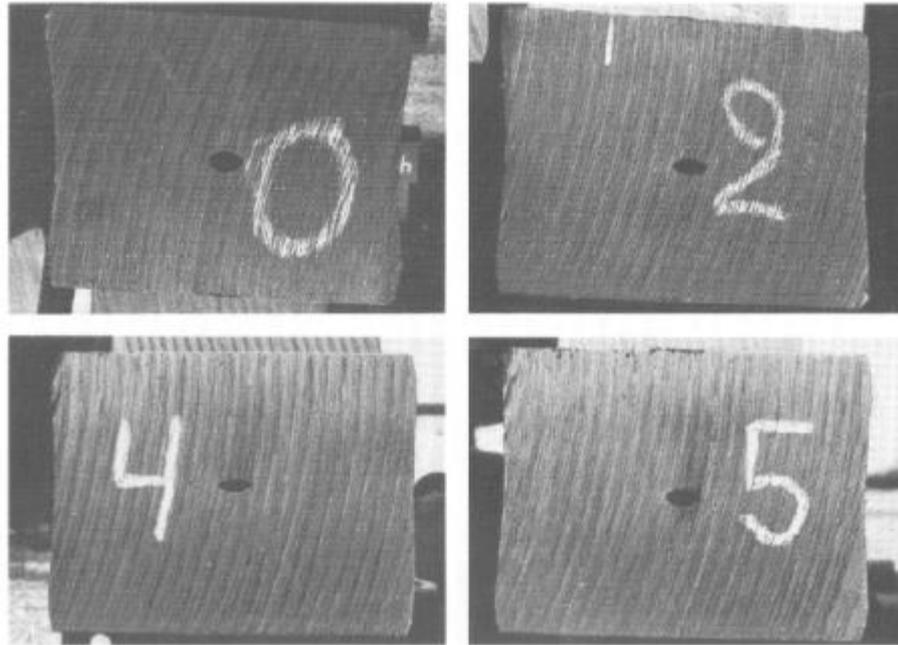


Figura 2.27: Influência do resfriamento, tabela 2.3, na diminuição do poro após uma redução em altura de aproximadamente 18% em laminação plana <sup>(24)</sup>.

Resultados de PIETRZYK <sup>(25)</sup>, usando a simulação por elementos finitos na laminação de placas, mostraram que as tensões compressivas foram maiores quando o material foi submetido a um resfriamento intenso da superfície antes da laminação. Isto levou a conclusão que o resfriamento da superfície da placa resultou em um aumento da compressão hidrostática na zona central da placa e favoreceu o fechamento dos vazios.

Os trabalhos de IMAMURA <sup>(26)</sup> e de TSUDA <sup>(27)</sup> mostraram que uma maior temperatura interna de laminação da placa em relação à temperatura externa, tão bem como uma redução pesada, é efetiva para eliminar defeitos internos tipo microporosidade.

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi realizado nas instalações de uma usina siderúrgica semi-integrada produtora de aços especiais. Utilizou-se uma prensa hidráulica de 1000 toneladas de fabricação alemã, marca SACK, voltada a produção de barras redondas, quadradas e chatas. São forjadas peças de aço para construção mecânica, aços inoxidáveis e aços ferramentas, utilizando o processo de forjamento a quente em matriz aberta.

#### 3.1 Matéria-prima

No experimento foram utilizadas duas chapas forjadas do aço W.NR. 1.2714 com espessura de 311 milímetros, largura de 634 milímetros e comprimento de 6000 milímetros cada. Ambas as chapas foram segregadas devido a descontinuidades internas maiores que as aceitas nos padrões de qualidade da fabricante. A figura 3.1 mostra a espessura da chapa e a figura 3.2 a largura da mesma. As medidas foram obtidas utilizando escala graduada. As duas chapas foram ensaiadas com ultra-som para identificar as descontinuidades internas. Uma das chapas foi serrada para a caracterização das descontinuidades e a segunda chapa foi serrada para a fabricação de corpos de prova utilizados nos experimentos. A composição química das chapas apresentou-se dentro das faixas da composição típica apresentada na tabela 2.1.



Figura 3.1: Espessura das chapas utilizadas nos experimentos.



Figura 3.2: Largura das chapas utilizadas nos experimentos.

### 3.2 Ensaio de ultra-som

O aparelho de ultra-som utilizado foi da marca GE, modelo US60. O cabeçote foi do tipo normal GE B2S de frequência de 2MHz e transdutor de 24 milímetros de diâmetro. O acoplante usado no ensaio foi água com metil celulose e espalhado na superfície da peça com pincel. A carepa existente na peça foi removida mecanicamente com martetele pneumático e a técnica de ensaio utilizada foi a do pulso-eco. O equipamento foi calibrado com bloco padrão B1 para uma escala de 400 milímetros. O ensaio foi conduzido por inspetor da empresa onde foi realizado o experimento, o qual possui 20 anos de experiência neste ensaio em peças forjadas. Os ganhos utilizados foram os descritos em procedimento interno da empresa e por confidencialidade não serão descritos. A figura 3.3 mostra o cabeçote utilizado para ensaio posicionado sobre a peça com acoplante. A figura 3.4 apresenta uma foto do equipamento utilizado para ensaio. A figura 3.5 é uma foto da chapa 1 com as descontinuidades mais significativas marcadas em amarelo. O corte das amostras enviadas ao laboratório para caracterização da descontinuidade foi efetuado nas linhas amarelas indicadas na figura 3.5.



Figura 3.3: Cabeçote utilizado no ensaio de ultra-som sobre a peça com acoplante.



Figura 3.4: Aparelho marca GE, modelo USN 60 utilizado na inspeção das duas chapas.



Figura 3.5: Chapa com os defeitos mais significativos marcados, onde as linhas amarelas marcam a posição para o corte.

O sinal da descontinuidade obtida na tela do aparelho de ultra-som para as descontinuidades 1, 2 e 3 é apresentado na figura 3.6. O defeito mais significativo encontrado foi o número 2 por apresentar queda do eco de fundo além do pico da descontinuidade.

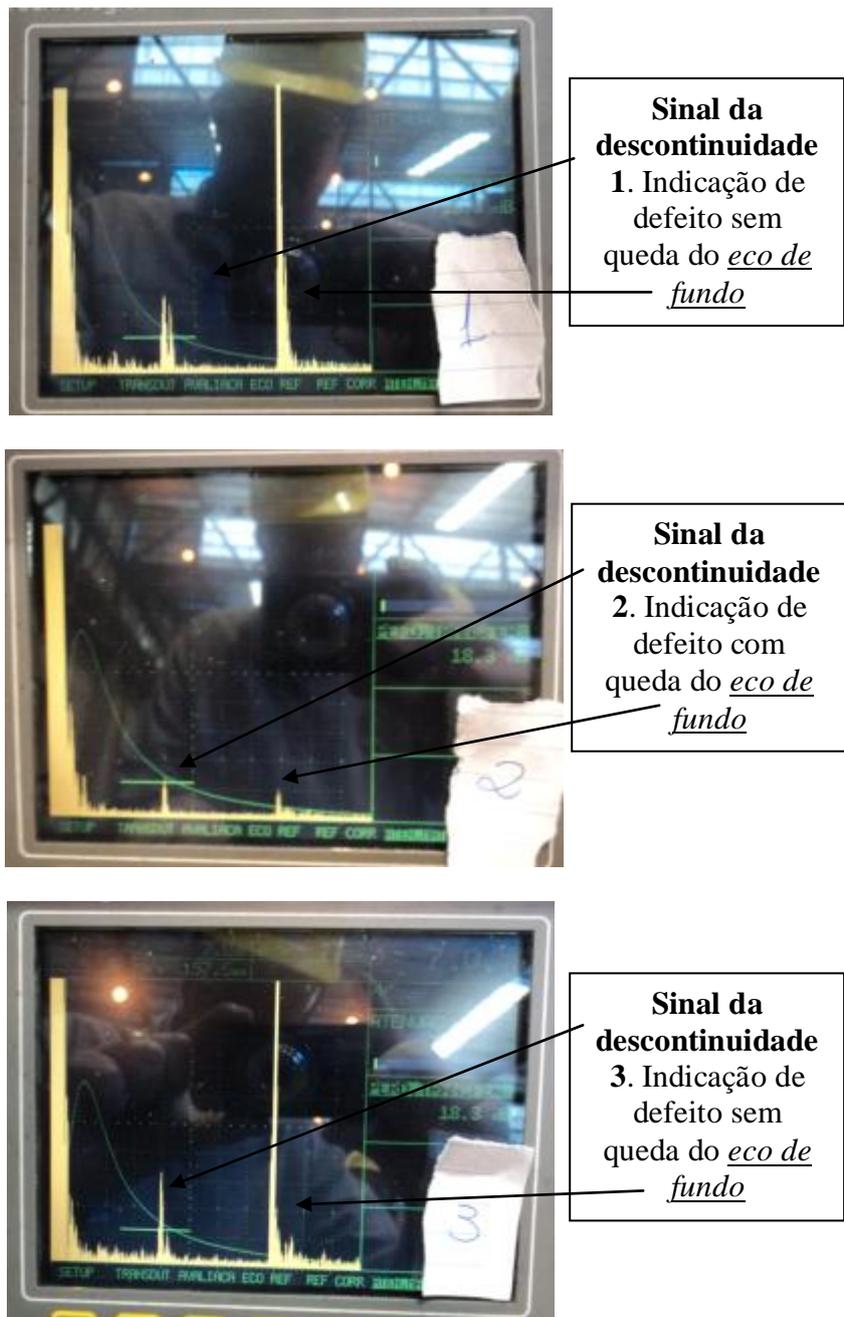


Figura 3.6: Telas das descontinuidades detectadas na inspeção por ultra-som na chapa da figura 3.4.

### 3.3 Preparação das amostras

O corte das chapas foi realizado em serra fita industrial. Foram encaminhadas ao laboratório 3 amostras com altura e largura da chapa e comprimento aproximado de 30 milímetros. As amostras tiveram uma das superfícies lixadas com lixadeira manual com lixas

de 160 mesh. Após a preparação, as amostras foram limpas com álcool e atacadas com persulfato de amônio em solução de 20% a fim de obter a macrografia das amostras. A figura 3.7 ilustra a macro da amostra 2 depositada sobre a bancada do laboratório.



Figura 3.7: Macrografia da amostra 2, originária da descontinuidade 2.

Pontos de interesse marcados na macrografia foram levados a lupa de marca Olympus, modelo SZ60, acoplada ao analisador de imagem Leica Qwinv3, onde os mesmos foram observados com aumento de dez vezes e registrados de forma fotográfica. A fotografia 3.8 ilustra uma das imagens obtidas pelo analisador de imagem de um ponto de interesse da amostra 2.

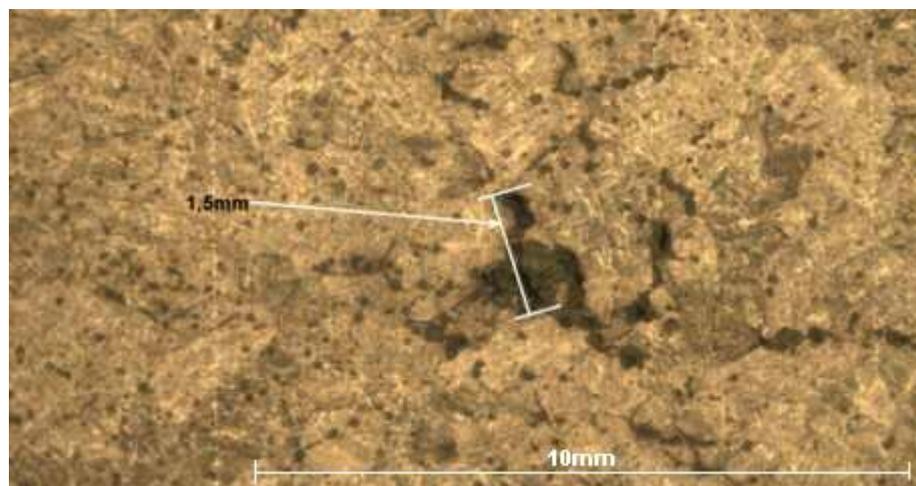


Figura 3.8: Ponto de interesse da amostra 2, obtido da lupa com dez vezes de aumento com ataque de persulfato de amônio (20%).

Os pontos de interesse marcados foram cortados em serra e lixados com a seqüência de lixas 120, 320 e 600 mesh e polidos com pasta de diamante  $7\mu$  e  $1\mu$  em polires laboratorial com feltro a fim de obter amostra para análise micrografica dos pontos. As amostras foram analisadas em microscópio óptico da marca Olympus modelo BX60M com aumento de cinquenta vezes com registro de imagem pelo analisador de imagem Leica Qwinv3. Com os resultados da análise micrografica, partiu-se para o planejamento dos corpos de prova e do experimento propriamente dito.

### 3.4 Corpos de prova

Os corpos de prova foram obtidos executando três cortes transversais conforme posição 1 (figura 3.9) em serra fita espaçados 650 milímetros cada no comprimento da chapa 2. Foram obtidas três peças com a largura de 634 milímetros, altura 311 milímetros e comprimento 650 milímetros. A próxima etapa foi realizar três cortes na posição 2 (figura 3.9), dividindo a largura de cada peça pela metade. Após o corte as amostras foram furadas por fresamento a fim de obter um furo de 30 milímetros de diâmetro no centro de uma das faces com 350 milímetros de profundidade. O furo representará um defeito interno falso de dimensões conhecidas. A figura 3.10 mostra as dimensões médias dos seis corpos de prova obtidos após os cortes e furação e a figura 3.11 uma foto dos corpos de prova.

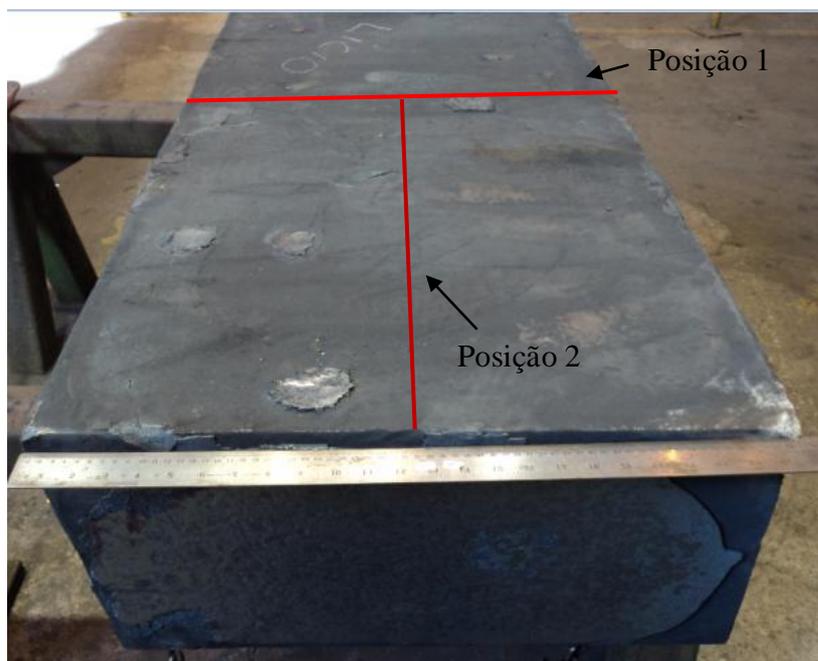


Figura 3.9: Esquema de corte das seis amostras a partir da chapa 2.

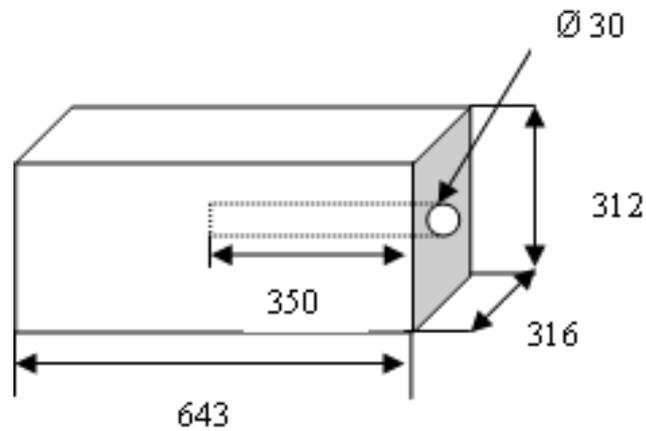


Figura 3.10: Dimensões médias dos seis corpos de prova após a operação de corte e frezamento do furo.



Figura 3.11: Foto dos seis corpos de prova furados.

Os corpos de prova foram aquecidos para posterior forjamento. Para evitar a oxidação da superfície do furo foram confeccionadas tampas em aço SAE 1020 para serem soldadas ao furo para fechamento do mesmo. As tampas confeccionadas podem ser observadas sobre uma das peças da figura 3.11. As tampas foram soldadas em seus respectivos corpos de prova e os mesmos foram numerados de 1 a 6 com números construídos com solda na face do furo conforme pode ser observado na figura 3.12.



Figura 3.12: Corpos de prova identificados e com as tampas soldadas.

Os seis corpos de prova tiveram três dimensões medidas e tabeladas. As dimensões A, B e C serão comparadas com as obtidas após o forjamento a fim de obter o alargamento (A), a profundidade do passe (B) e o alongamento (C). A figura 3.13 ilustra a posição das dimensões A, B, C no corpo de prova.

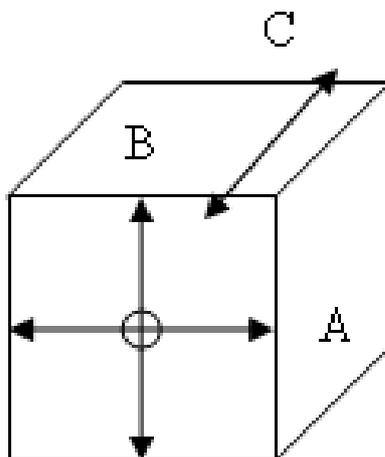


Figura 3.13: Posição das dimensões A, B e C nos corpos de prova.

As dimensões A, B e C de cada corpo de prova estão na tabela 3.1, juntamente com a média dos valores utilizados na construção da figura 3.9.

Tabela 3.1: Dimensões A, B e C dos corpos de prova antes do forjamento.

Amostra	Dimensional Inicial (mm)		
	A	B	C
1	311,99	313,03	648
2	313,74	319,93	645
3	308,68	312,5	637
4	312,26	321,85	642
5	312,89	314,04	646
6	314,58	314,48	644
Média	312,36	315,97	643,67

### 3.5 Planejamento do experimento

As matrizes selecionadas para estudo foram:

- (a) Matriz funil, que possui sua superfície retangular (300 x 950 milímetros), onde a dimensão de 300 milímetros é dividida em três planos distintos onde o plano do centro é paralelo a base da prensa e os dois planos laterais inclinados a partir do plano central terminando com um raio.
- (b) Matriz plana com toda a superfície retangular paralela a base da prensa e com mesma área superficial que a matriz funil.
- (c) Mesa de forjamento que possui superfície retangular paralela a base da prensa com 1000 x 2.000 milímetros.

As combinações estudadas foram: matriz funil com matriz funil chamada de configuração AA, matriz funil na parte superior e matriz plana na inferior nomeada de combinação AB e por fim a combinação AC composta pela matriz funil na parte superior e a mesa de forjamento na parte inferior. A figura 3.14 ilustra as configurações de matrizes utilizadas no experimento.

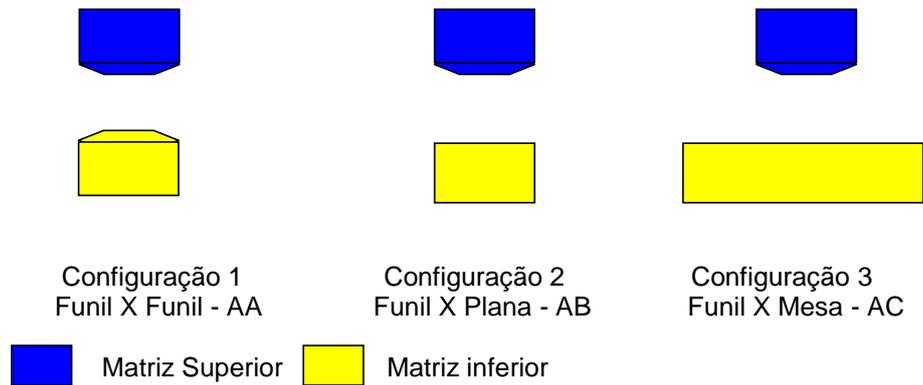


Figura 3.14: Configuração de matrizes utilizadas no experimento.

Escolheu-se trabalhar com o tempo de encharque por se julgar já possuir o conhecimento a respeito da influência da temperatura e pelos fornos estarem trabalhando na temperatura limite, não havendo espaço para aumento da temperatura. Foi escolhido o tempo de 7 horas que é o tempo mínimo para o forjamento de chapas de dimensões de 310 milímetros de espessura, 630 milímetros de largura e 6000 mm de comprimento. Somou-se há este tempo quatro horas para avaliar este efeito, sendo então 11 horas o segundo tempo de encharque planejado.

Com estas definições, elaborou-se o DOE (Design of Experiments) de dois fatores sendo o fator matriz com três níveis e o tempo de encharque com dois níveis. Cada combinação de matrizes foi testada com os dois tempos de encharque. A combinação AC foi atribuída aos corpos de prova 1 e 2, sendo o corpo de prova 1 com tempo de encharque de 7 horas e o 2 com 11 horas. Para a combinação AA, usaram-se os corpos de prova 3 e 4 onde o 3 utilizou o tempo de 11 horas e o 4 de 7 horas. Os corpos de prova 5 e 6 foram atribuídos a combinação AB com o 5 com 7 horas e o 6 com 11 horas. A tabela 3.2 complementa a tabela 3.1 com os dados do DOE para cada corpo de prova.

Tabela 3.2: Valores do DOE aplicados para cada corpo de prova.

Amostra	Dimensional Inicial (mm)			DOE	
	A	B	C	Matriz	Tempo Encharque (h)
1	311,99	313,03	648	AC	7
2	313,74	319,93	645	AC	11
3	308,68	312,5	637	AA	11
4	312,26	321,85	642	AA	7
5	312,89	314,04	646	AB	7
6	314,58	314,48	644	AB	11

A variável resposta do experimento foi a área da elipse dada pela largura do furo de 30 mm após a conformação do corpo de prova. A área da elipse é dada por:  $(\pi \cdot a \cdot b) / 4$  onde “a” é a largura e “b” a altura do furo após conformação, os dados de a,b e área da elipse são apresentados na tabela 4.1. A mudança das dimensões B (alargamento) e C (alongamento) dos corpos de prova ilustrados na figura 3.13 foram analisadas e são apresentadas na tabela 4.3.

### 3.6 Execução do experimento

Os seis corpos de prova foram pré-aquecidos em forno industrial a gás tipo carro com capacidade para 40 toneladas e aquecido em forno similar com capacidade de 60 toneladas. As amostras na temperatura ambiente foram pré-aquecidas em um forno a 850°C durante 10 horas. Após este tempo as mesmas foram transferidas para um forno a 1250°C onde permaneceram 7 e 11 horas, respectivamente, conforme o planejamento do experimento. O forno de aquecimento escolhido foi o mais próximo a prensa. Todas as amostras foram enforadas na mesma zona do forno e na sua retirada o carro permaneceu dentro do forno para evitar a perda excessiva de temperatura. O transporte das amostras para a prensa foi efetuado por manipulador de 6 toneladas.

Escolheu-se a etapa de rebaixamento para estudo, pois nesta etapa ocorrem as maiores reduções de seção. O material de partida aproxima-se a um quadrado e este é conformado com sucessivos passes para formar a maior dimensão da chapa (630 mm). Desta forma escolheu-se para o experimento o forjamento de uma das faces do quadrado (corpo de prova) com um passe de 50 mm (redução da altura), giro de 180° e novo passe de 50 mm, totalizando uma deformação relativa de 33%.

O tempo decorrido entre a primeira amostra do tempo de encharque de 7 horas e a ultima foi de 20 minutos, repetindo-se para as com tempo de encharque de 11 horas. O forjamento foi iniciado com as amostras 4, 5 e 1 para o tempo de 7 horas e 2, 6 e 3 para o tempo de 11 horas. Esta seqüência foi escolhida para otimizar a troca de matrizes. A temperatura do forno foi monitorada através do seu termopar e a temperatura da peça durante o forjamento pelo pirômetro instalado na prensa. A temperatura registrada foi após a queda da carepa.

A operação de forjamento durou aproximadamente 1 minuto para cada corpo de prova. A figura 3.15 apresenta foto do forjamento de amostra 4, configuração AA e tempo de encharque de 7 horas.

Após o forjamento as amostras resfriaram ao ar calmo até atingirem a temperatura aproximada de 300°C e foram enfiadas em forno a 630°C durante o tempo de 6 horas para alívio de tensão e permitir o corte do material por serra fita.

A amostra de cada corpo de prova foi obtida a partir de dois cortes da seção transversal em serra fita. O primeiro corte foi a 150 mm da extremidade da tampa soldada e o segundo a 20 mm a partir do primeiro conforme indicado na figura 3.16. A figura 3.17 é a amostra obtida do corpo de prova 3 após o corte indicado na figura 3.15.



Figura 3.15: Forjamento da amostra 4 – configuração AA e tempo de encharque de 7 horas.



Figura 3.16: Ilustração de como foi efetuado a retirada das amostras para análise dos furos.



Figura 3.17: Amostra do corpo de prova 3 após os dois cortes indicados na figura 3.15.

As seis amostras cortadas foram enviadas ao laboratório para lixamento da superfície com lixadeira pneumática com lixa de 160 mesh para retirar rebarba de corte do furo central para posterior dimensionamento da largura e comprimento do furo. Este procedimento foi realizado utilizando o analisador de imagem Leica Qwinv3.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização do defeito

Foi observado na macrografia o acúmulo de descontinuidades centrais tipo vazio com formato elíptico com 30 mm de altura por 88 mm de largura. A figura 4.1 mostra a seção transversal da amostra de 311 milímetros de altura por 634 milímetros de largura com indicação circular do local onde foi retirada a fotografia da figura 4.2 que mostra os pontos pretos no centro da amostra, que correspondem as descontinuidades.

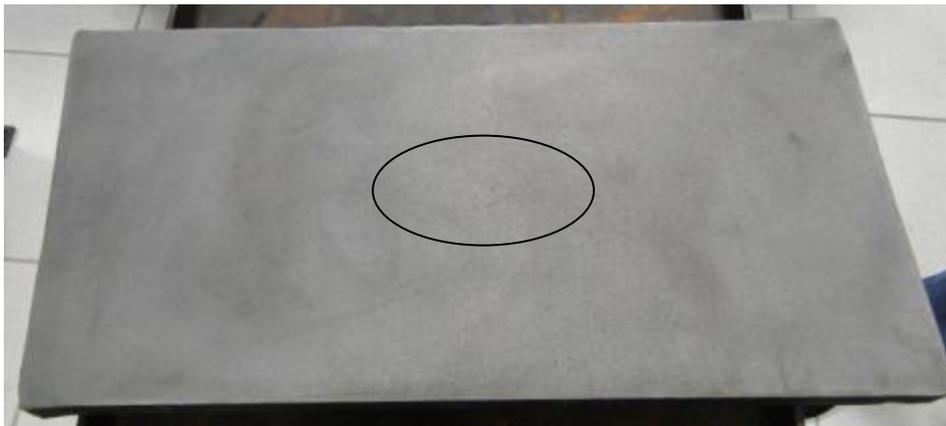


Figura 4.1: Macrografia da amostra da chapa de 311 mm por 634 mm com círculo indicando a região da porosidade

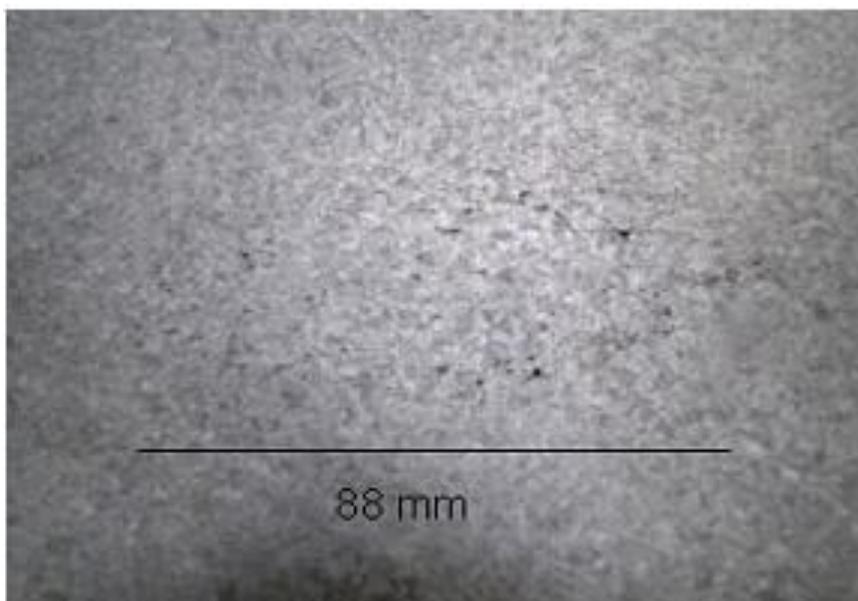


Figura 4.2: Região central da figura 4.1 com os pontos pretos que correspondem às discontinuidades.

Analisando as amostras após preparação metalográfica, observaram-se defeitos irregulares com vários tamanhos, o maior deles com 0,91 mm de comprimento. As medições foram realizadas com microscópio óptico Olympus BX60M com aumento de 50 vezes com ajuda do analisador de imagem Leica Qwinv3. Este defeito foi classificado como resto de vazio oriundo do processo de solidificação. A figura 4.3 apresenta a micrografia do maior defeito encontrado.

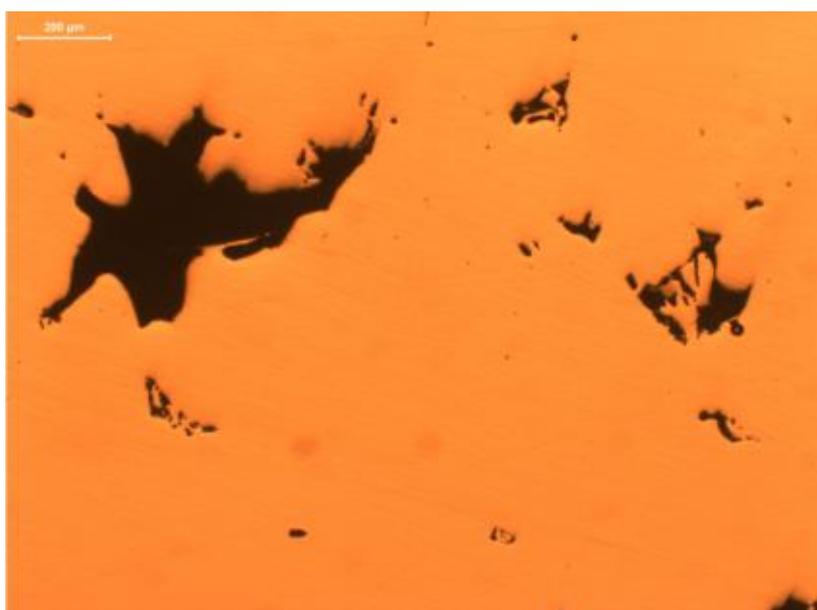


Figura 4.3: Micrografia da indicação 2 com aumento de 50X.

## 4.2 Determinação da área do furo

### 4.2.1 Configuração AA

A configuração de matrizes AA foi utilizada no forjamento das amostras 3 e 4. A figura 4.4 é uma fotografia da amostra 3 e a figura 4.5 a fotografia da amostra 4.

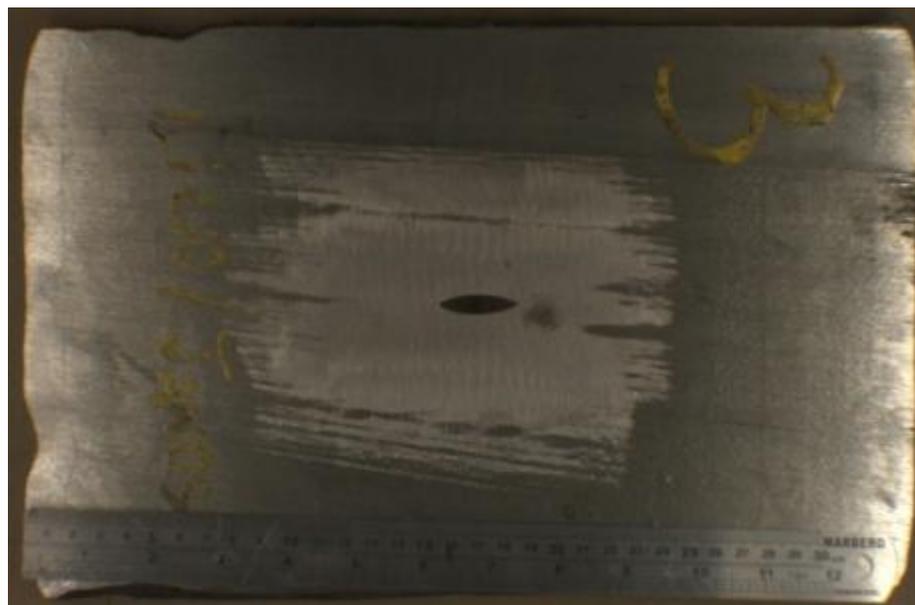


Figura 4.4: Amostra 3 com a região do furo rebarbado.



Figura 4.5: Amostra 4 com a região do furo rebarbado.

A amostra 3 é relativa ao tempo de encharque de 11 horas. A largura do furo foi de 28,4 mm e a altura de 7,5 mm com área resultante de 166,51 mm<sup>2</sup>. A amostra 4, referente ao tempo de encharque de 7 horas a largura foi de 16,2 mm e a altura de 1,1 mm com área de 13,97 mm<sup>2</sup>. A figura 4.6 mostra as medidas do furo da amostra 3 e da amostra 4.

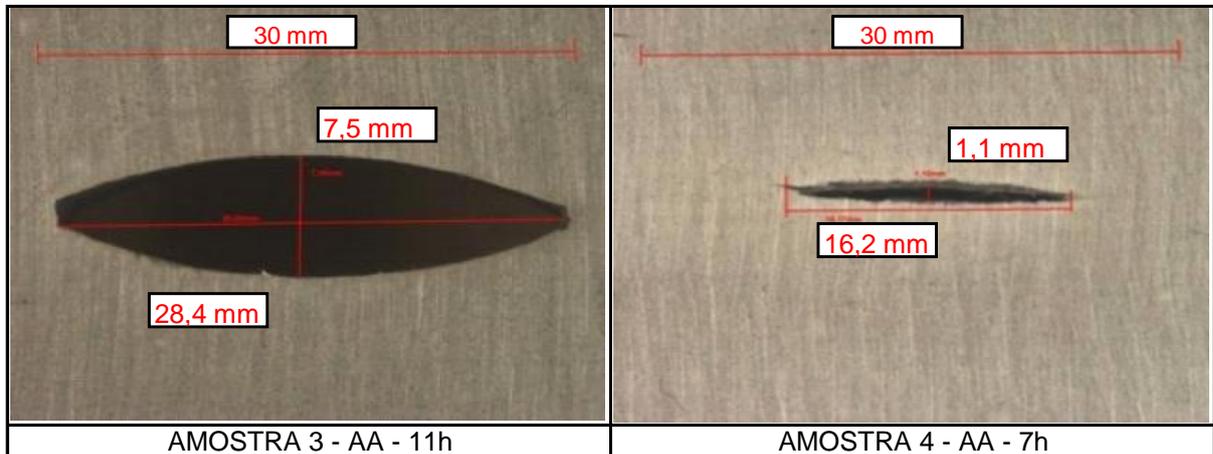


Figura 4.6: Dimensões do furo da amostra 3 e amostra 4.

#### 4.2.2 Configuração AB

Esta combinação foi utilizada para o forjamento das amostras 5 e 6. A figura 4.7 é uma fotografia da amostra 5 e a figura 4.8 a fotografia da amostra 4.

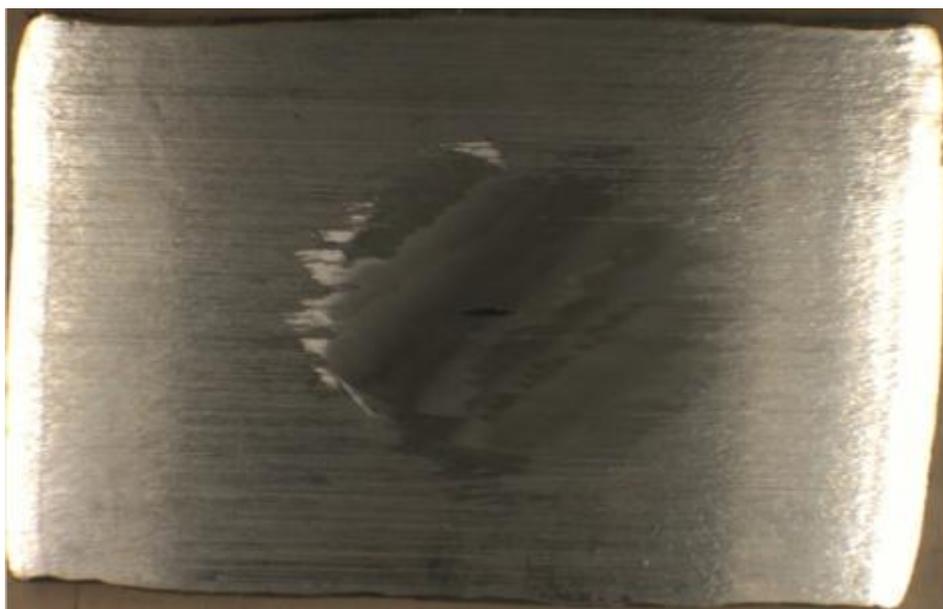


Figura 4.7: Amostra 5 com a região do furo rebarbado.

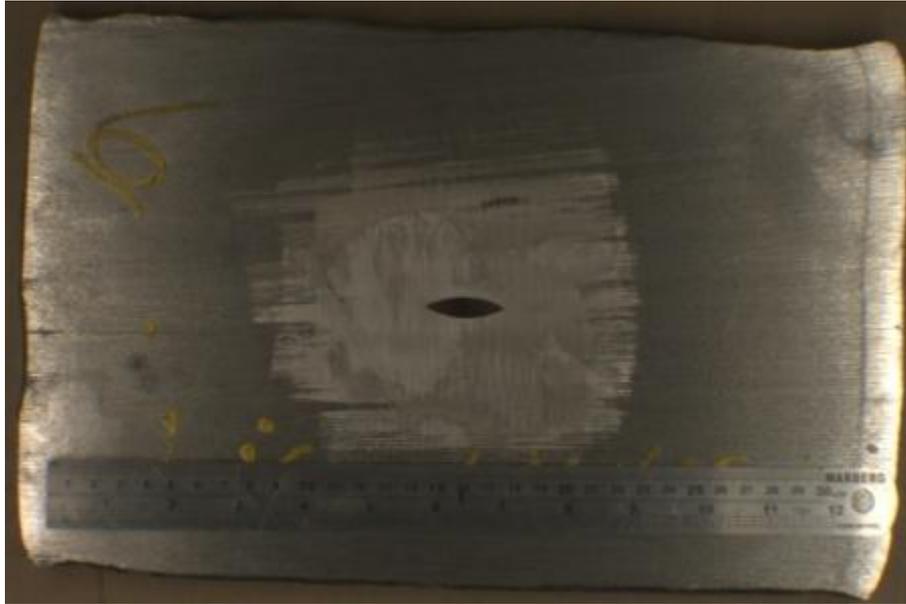


Figura 4.8: Amostra 6 com a região do furo rebarbado.

A amostra 5 é relativa ao tempo de encharque de 7 horas. A largura do furo foi de 22,69 mm e a altura de 3,41 mm. A área resultante foi de 60,77 mm<sup>2</sup>. A amostra 4, referente ao tempo de encharque de 11 horas, a largura foi de 29,94 mm e a altura de 8,15 mm e área de 191,64 mm<sup>2</sup>. A figura 4.9 mostra as medidas do furo da amostra 5 e da amostra 6.

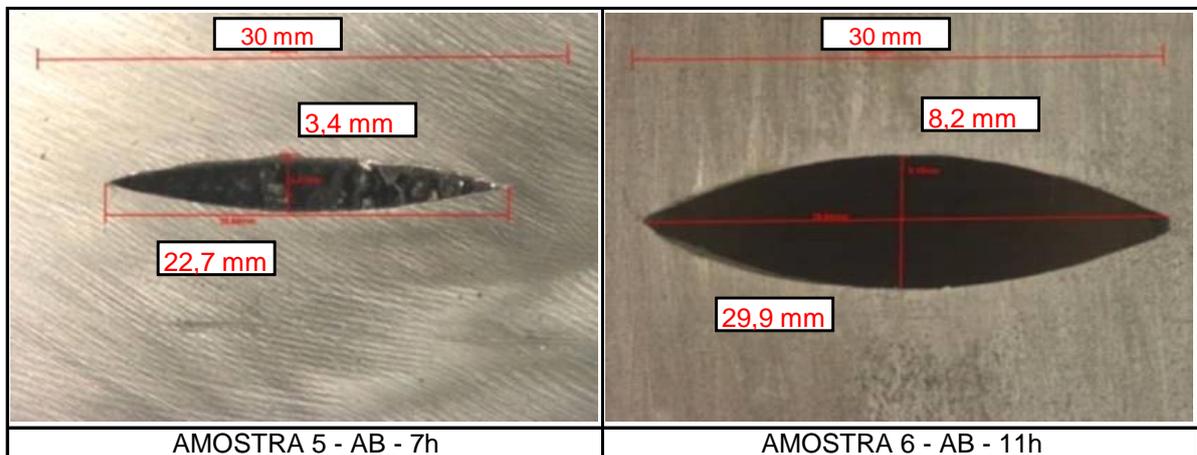


Figura 4.9: Dimensões do furo da amostra 3 e amostra 4.

#### 4.2.3 Configuração AC

Nesta configuração foram utilizadas as amostras 1 e 2. A figura 4.10 e 4.11 mostra as amostras 1 e 2 respectivamente.

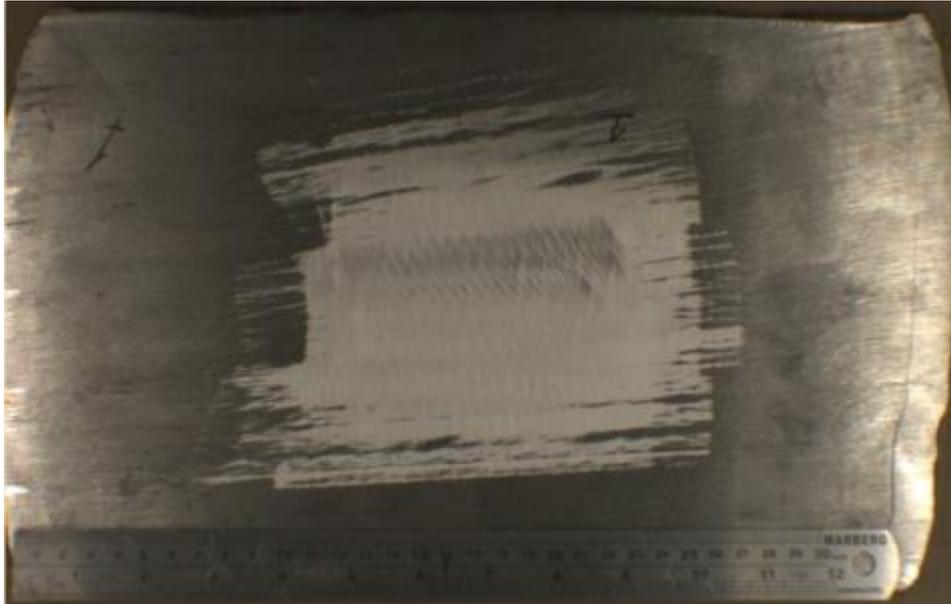


Figura 4.10: Amostra 1 com a região do furo rebarbado.

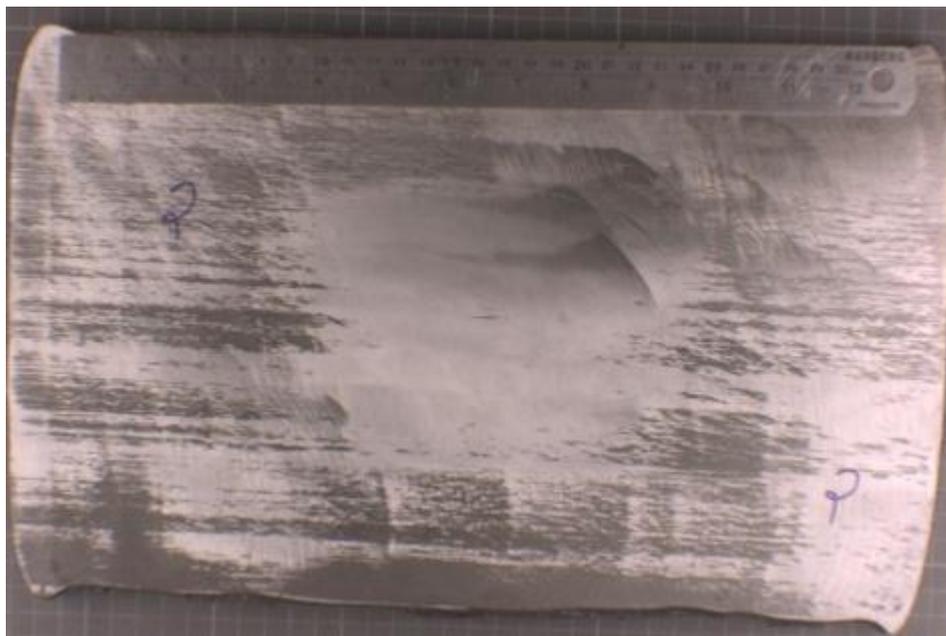


Figura 4.11: Amostra 2 com a região do furo rebarbado.

A amostra 1, forjada com o tempo de encharque de 7 horas o furo foi caldeado completamente. A amostra 2 submetida a 11 horas de aquecimento teve a largura do furo dimensionada em 11,5 mm, altura 0,6 mm e área do furo de  $5,42 \text{ mm}^2$ . A figura 4.12 mostra o dimensionamento do furo das amostras 1 e 2.

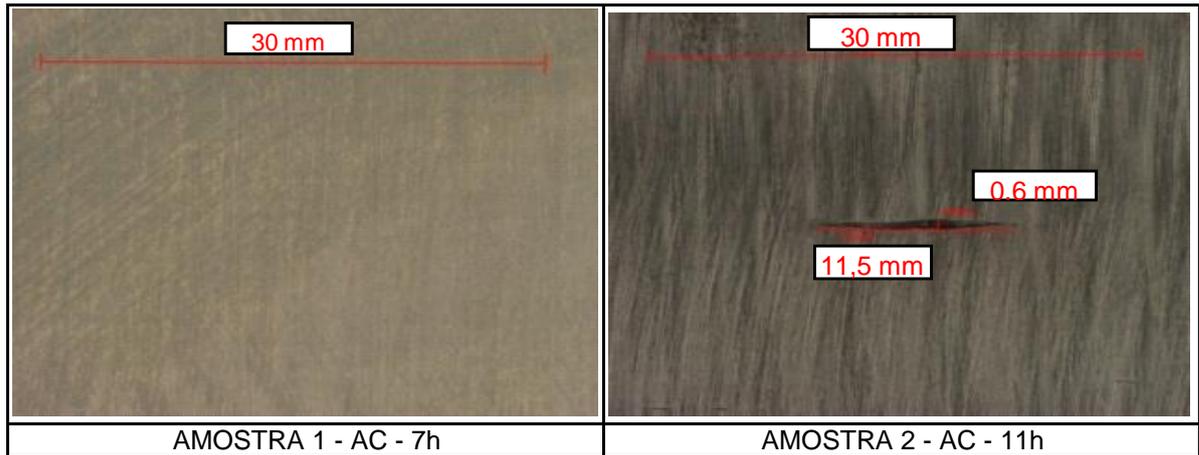


Figura 4.12: Dimensões do furo da amostra 1 e amostra 2.

#### 4.3 Análise dos dados obtidos

A área dos furos foi tabelada para facilitar a análise dos valores obtidos, nesta mesma planilha foram inseridas as temperaturas de início de forjamento das amostras. A tabela 4.1 mostra as temperaturas de início de forjamento, as dimensões do furo após o forjamento e a área da elipse. A área inicial do furo era de  $706,5 \text{ mm}^2$  (redondo de 30 mm).

Tabela 4.1: Dados do furo e temperatura de início de forjamento das 6 amostras.

Amostra	Matriz	Tempo de Encharque (h)	Temperatura Forj.(°C)	Área da elipse		
				a (mm)	b (mm)	área (mm <sup>2</sup> )
1	AC	7	1055	0,0	0,0	---
2	AC	11	1131	11,5	0,6	5,4
3	AA	11	1144	28,4	7,5	166,5
4	AA	7	1050	16,2	1,1	14,0
5	AB	7	1066	22,7	3,4	60,8
6	AB	11	1130	29,9	8,2	191,6

Os valores da área foram inseridos no software Minitab 5, que foi utilizado como ferramenta de organização dos dados. A figura 4.13 representa no eixo Y o valor da área em milímetros quadrados e no eixo X os tempos de encharque em horas.

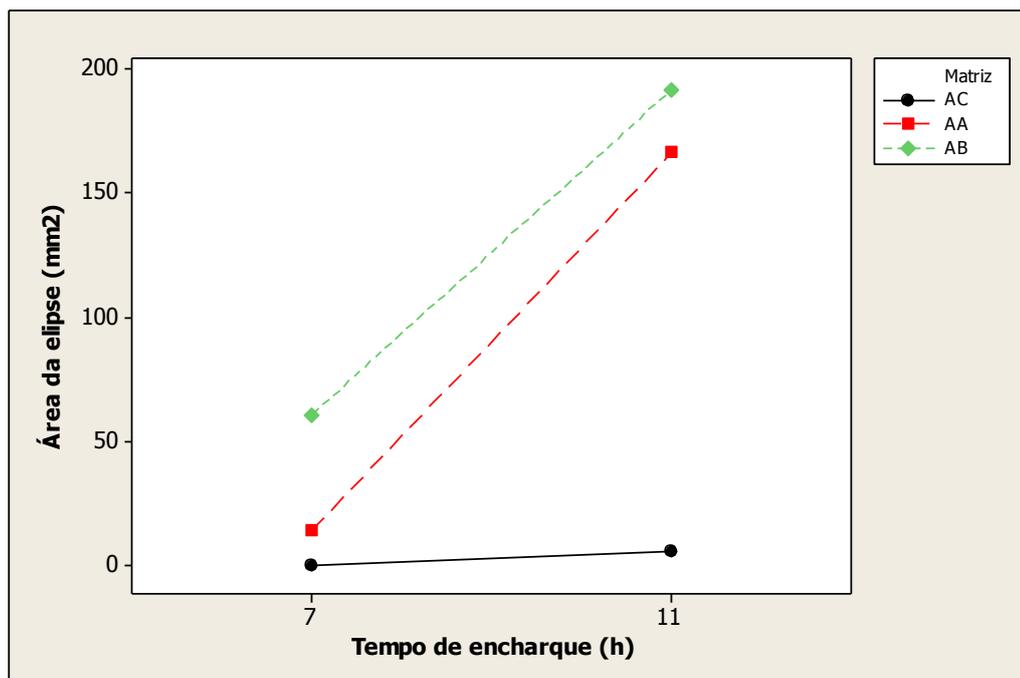


Figura 4.13: Efeito do tempo de encharque e configuração de matrizes na área do furo.

Pode-se verificar que o tempo de encharque de 7 horas obteve a maior redução da área do furo para todas as combinações de matrizes. Para o tempo de 7 horas a menor área foi obtida pela combinação AC seguida pela combinação AA, que possui valores de área próximos ao da combinação AC. A combinação AB teve menor redução da área do furo. Para o tempo de encharque de 11 horas a combinação AC obteve a menor área ficando próximo ao valor da mesma combinação com 7 h. Para as combinações AA e AB houve um distanciamento significativo dos valores de área de AC para o tempo de 11 horas. A combinação AA permaneceu com menor área que a combinação AB.

São eficazes para fechamento de vazios internos com 7 horas de encharque a combinação AC e AA e para o tempo de encharque de 11 horas somente a combinação AC é efetiva.

O tempo de 7 horas levou a uma temperatura média medida de 78,6°C menor que a do tempo de encharque de 11 horas. Esta redução de temperatura causa um aumento da força necessária para deformar o material de 62,5MPa (11 horas) para 100MPa (7 horas) com base no gráfico da figura 2.24. A temperatura menor também causa um aumento do atrito que causa maior alargamento e maior tensão transferida ao núcleo do corpo de prova. O efeito do alargamento pode ser observado na figura 4.14.

Com 11 horas de encharque a redução do furo continuou efetiva com a combinação AC, pois mesmo com a redução do atrito pelo aumento da temperatura, a mesa possui grande área superficial, possuindo área de contato com toda a superfície inferior da peça apoiada sobre a mesa durante o forjamento. Outra vantagem da combinação AC é a maior extração de calor da superfície da peça o que aumenta a resistência na superfície e o gradiente de temperatura entre superfície e núcleo o que é benéfico para aumentar a tensão hidrostática no núcleo do material.

Como mostrado em simulações por CHAIJARUWANICH <sup>(20)</sup>, calculou-se a relação L/H para o experimento. Quanto maior esta relação maior a efetividade no fechamento de vazios internos. O valor para a combinação AC foi de 2,56 contra 0,96 para as combinações AA e AB. A tabela 4.2 apresenta o cálculo do fator L/H onde L é o comprimento de contato da matriz inferior com a peça e H a altura inicial média dos corpos de prova. Usou-se o comprimento da matriz inferior, pois em todas as combinações a matriz superior não foi alterada.

Tabela 4.2: Relação L/H das combinações de matrizes

<b>Combinação</b>	<b>L (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b>L/H</b>
AA	300	312	0,96
AB	300	312	0,96
AC	800	312	2,56

As dimensões A, B e C foram medidas nos corpos de prova obtendo as medidas A1, B1 e C1. A mudança das dimensões B (alargamento) e C (alongamento) foram analisadas. A tabela 4.3 mostra as dimensões A1, B1 e C1 obtidas após o forjamento. A partir destas dimensões calculou-se a diferença percentual entre as dimensões B e B1, resultando no alargamento. O alongamento foi obtido pela diferença entre C e C1.

Da mesma forma que a interação da área com os fatores foi analisada, o alargamento e o alongamento tiveram seus dados inseridos no software Minitab 5 para sua melhor análise. A figura 4.14 mostra o efeito dos fatores, configuração de matrizes e tempo de encharque no alargamento. A figura 4.15 representa o efeito dos fatores, combinação de matrizes e tempo de encharque no alongamento.

Tabela 4.3: Dimensões dos corpos de prova antes e após o forjamento e cálculo do alargamento (B1 e B) e alongamento (C e C1).

Amostra	Dimensional Inicial (mm)			Dimensional Forjado(mm)			Alargamento	Alongamento	Matriz	Tempo Encharque (h)
	A	B	C	A1	B1	C1	DIF B (%)	DIF C (%)		
1	311,99	313,03	648	213,61	359,89	877	15,0	35,3	AC	7
2	313,74	319,93	645	218,73	364,25	840	13,9	30,2	AC	11
3	308,68	312,5	637	215,22	342,15	835	9,5	31,1	AA	11
4	312,26	321,85	642	217,3	357,96	849	11,2	32,2	AA	7
5	312,89	314,04	646	218,03	354,45	822	12,9	27,2	AB	7
6	314,58	314,48	644	215,59	344,87	839	9,7	30,3	AB	11

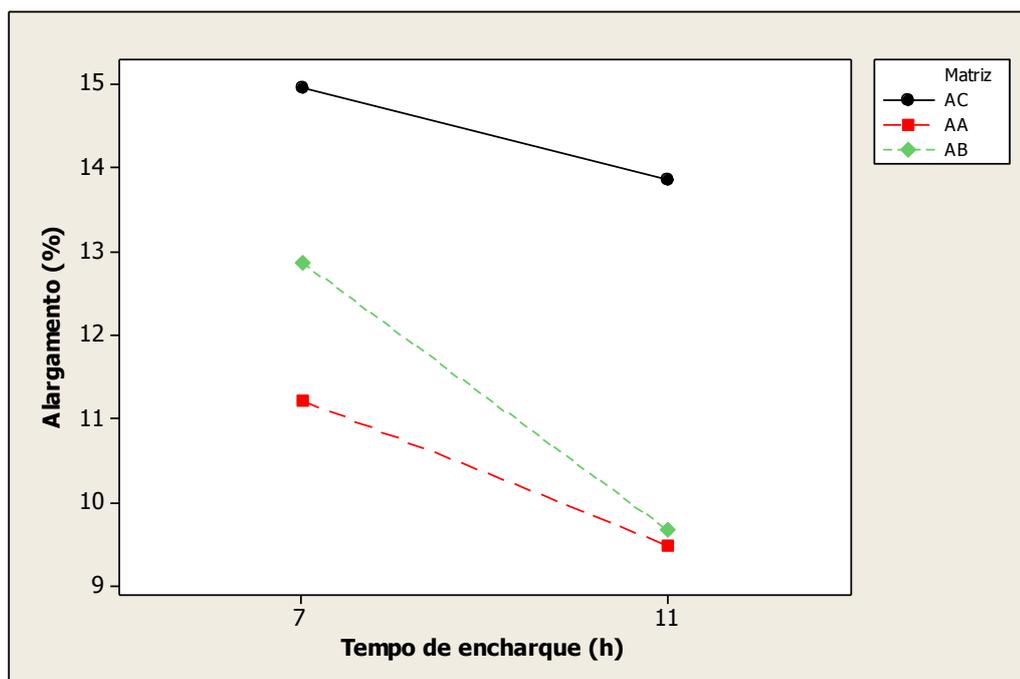


Figura 4.14: Efeito dos fatores, configuração de matrizes e tempo de encharque no alargamento.

A combinação AC com 15% (7 horas) e 13,9% (11 horas) de alargamento foi a combinação com maior alargamento para os dois tempos de encharque. Para a combinação AB o alargamento percentual (12,9% - 7 h e 9,7% - 11 h) foi inferior a matriz AC, porém superiores a combinação AA com o tempo de encharque de 7 horas (11,2%) e semelhante a esta combinação com o tempo de encharque de 11 horas (9,5%). O tempo de encharque de 7 horas obteve maior alargamento para todas as combinações. Com 11 horas a matriz AA e AB diminuíram seu efeito no alargamento devido ao aumento da temperatura reduzir o atrito o que provoca menor alargamento. A combinação AC foi a menos afetada pelo tempo de encharque na redução da área do furo (menor área da elipse) e no alargamento. Desta forma podemos caracterizar a combinação AC como o conjunto que possui alargamento estável.

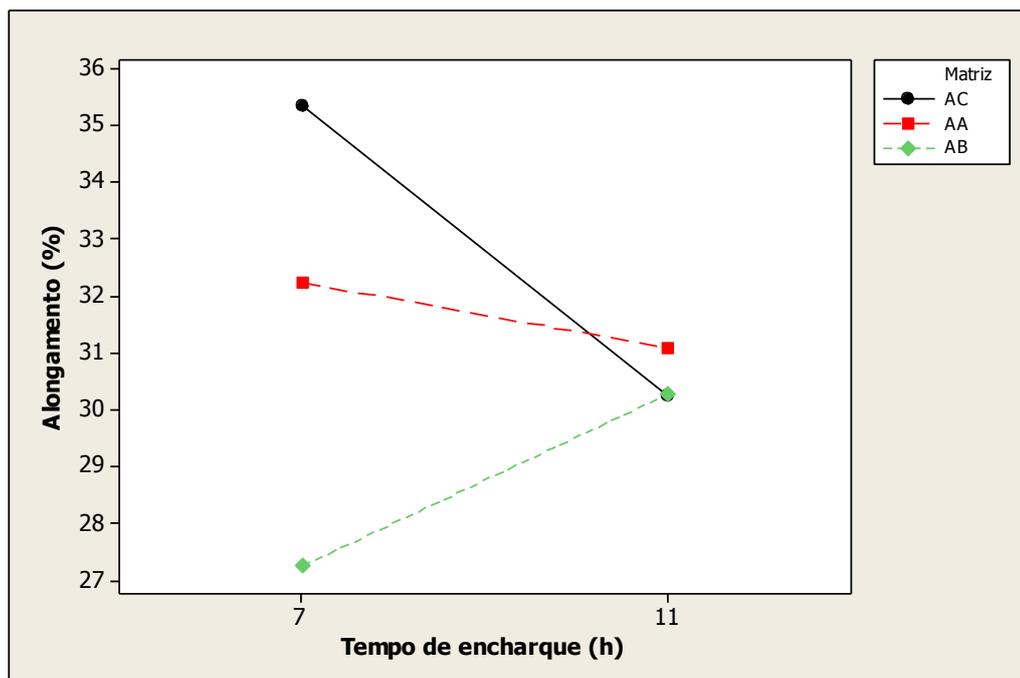


Figura 4.15: Efeito dos fatores, combinação de matrizes e tempo de encharque no alongamento.

O alongamento foi maior para a combinação AC com 35,3% para o tempo de 7 horas seguido pela matriz AA (32,2%) e matriz AB (27,2%). Para o tempo de encharque de 11 horas a matriz AA teve o maior alongamento com 31,1% contra 30,3% da combinação AB e 30,2% da AC. A combinação AA mostrou comportamento estável no alongamento com ambos os tempos de encharque. Esta matriz é caracterizada pelo estiramento (alongamento) estável, por possuir planos e ângulos de saída projetados para favorecer o mesmo.

#### 4.4 Aplicação dos conceitos

Após a análise dos resultados dos corpos de prova, foram forjadas 6 chapas de 310 mm de espessura e 630 mm de largura a partir de lingotes de 7,5 t oriundos da mesma corrida. Três chapas foram forjadas pelo processo convencional e três chapas com redução da temperatura de aquecimento em 30°C para obter-se a condição alcançada pelo tempo de encharque de 7 horas, sendo destas três com temperatura menor, duas forjadas com a combinação AC e uma com combinação AA.

As três chapas forjadas pelo processo convencional apresentaram descontinuidades internas contínuas ao longo do comprimento da chapa detectadas pelo ultra-som. Das três chapas forjadas com menor temperatura. As chapas forjadas com a combinação AC não

apresentaram descontinuidades após o ensaio de ultra-som e a forjada com a combinação AA apresentou uma descontinuidade isolada no centro da chapa de 30 mm de comprimento e de amplitude desprezível. A figura 4.16 mostra o pé das chapas forjadas com temperatura 30°C menor que a convencional. Observa-se no pé das peças que com a matriz AA a superfície foi projetada sobre o pé, por se tratar de uma matriz de estiramento que empurra a superfície antes de atingir o centro plenamente. Com a combinação AC, observa-se que o núcleo foi projetado para fora, o que demonstra a efetividade do atrito e do alargamento em transferir a tensão de cisalhamento para o núcleo da peça.

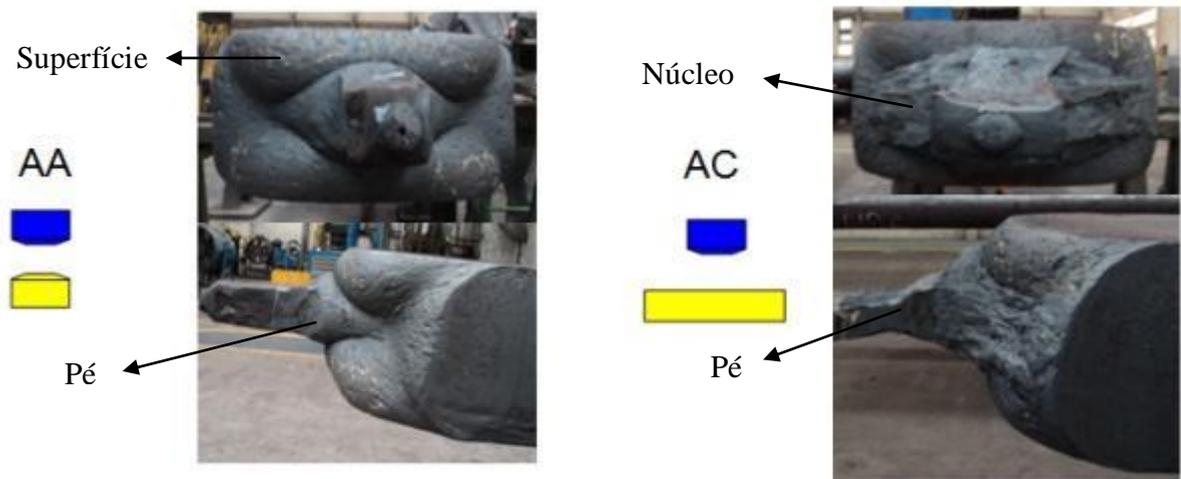


Figura 4.16: Comparação sobre o escoamento do material sobre o pé do lingote com a combinação AA e AC e temperatura 30°C menor que a convencional.

## 5. CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho, foram introduzidos conceitos sobre o aço W.NR. 1.2714 e sobre o processo de forjamento a quente em matriz aberta. O efeito das variáveis matriz e tempo de encharque foram discutidos e experimentados. A partir dos resultados apresentados e da bibliografia pesquisada, é possível concluir que:

- 1) A combinação da matriz funil na parte superior e mesa de forjamento na parte inferior (combinação AC) é a mais eficiente no processo de fechamento de vazios internos;
- 2) A maior área de contato entre a matriz e a peça mostrou-se eficaz para o fechamento de vazios;
- 3) Temperatura menor na superfície favorece a transferência da tensão de cisalhamento para o núcleo oportunizando o fechamento de vazios na etapa de rebaixamento do material;
- 4) Combinações de matrizes que geram maior alargamento são mais efetivas na redução de vazios internos.
- 5) A temperatura ideal para o forjamento do aço W.NR. 1.2714 é em torno de 1050 °C o que correspondeu a um tempo de encharque de 7 horas nas condições experimentais deste trabalho;

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Das perspectivas abertas durante a realização deste trabalho, podemos citar as seguintes sugestões:

- Realizar simulação de elementos finitos utilizando este estudo para validar o modelo;
- Com o modelo validado aplicar a técnica para aprimorar o processo de forjamento de outros aços ferramenta de interesse como o S1, O1 e W.NR. 1.2721;
- Explorar outras melhorias de processo a partir do aprimoramento da técnica de simulação por elementos finitos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), 7ª edição, 2002.
2. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **Metals Handbook**. Vol 5, Forging and casting, 8ª edition, 1970.
3. GEORGE A. ROBERTS; ROBERT A. CARY, **Toolsteels**. American Society of Metals, 4ª edition, 1980.
4. 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.
5. KAKIMOTOA H.; ARIKAWAA T.; TAKAHASHIB Y; TANAKAC T.; IMAIDAC Y.. **Development of forging process design to close internal voids**. Journal of Materials Processing Technology, N. 210, p. 415–422, 2010.
6. KWIETNIEWSKI C.E.F; KISS F.J. **Metalografia e tratamento térmico dos aços e ferros fundidos**; Laboratório de Metalurgia Física, Departamento de Metalurgia, UFRGS, 2ª edição, 2010.

7. GERDAU; **Manual de Aços Especiais**, Aços Alta Liga. Disponível em: <<http://www.gerdau.com.br/produtos-e-servicos/produtos-por-aplicacao-detalhe-produto.aspx?familia=282>>. Acesso em: 06 nov. 2011.
8. WEGST C.; WEGST M.. **Key to Steel**, Verlag Stahlschlüssel Wegst Gmbh, 22°Auflange, 2010.
9. GEORGE A. ROBERTS; ROBERT A. CARY, **Toolsteels**. American Society of Metals, 4<sup>a</sup> edition, 1980.
10. BÖHLER EDELSTAHL GMBH & CO KG. **Catalogo do aço W500**. <[http://www.bohler-brasil.com.br/br/b\\_1110.ph](http://www.bohler-brasil.com.br/br/b_1110.ph)>. Acesso em: 30 jul. 2011.
11. THOME, R., OSTHEIMER, V., NEY, G., RUPPEL, F., GIRGENSOHN, A., PLOCIENNIK, U., SCHMITZ, W., GEERKENS, C., BECKER, M. **Soft reduction of continuous cast billets at Saarstahl. Metallurgical Plant and Technology**, v. 30, n.1, p. 36-42, 2007.
12. SOARES, R.B., VILELA, A.C.F. **Lingotamento Contínuo de Blocos e Tarugos**, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), São Paulo, 2004.
13. ASSUNÇÃO, A. L. **Fechamento da Porosidade Central na Laminação de Fio-Máquina**, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
14. PARK, C.Y., YANG, D.Y. **A study of void crushing in large forgings II**, Estimation of bonding efficiency by finite-element analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, n. 72, p. 32-41, 1997.
15. KERMANPUR A., ESKANDARI M., PURMOHAMAD H. SOLTANI M.A. SHATERI 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.

16. 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.
17. KIN YOUNGDEAK, CHO JONGRAE, BAE WONBYUNG. **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.
18. 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. In: ASSUNÇÃO, A. L. **Fechamento da Porosidade Central na Laminação de Fio-Máquina**, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, p.27, 2007.
19. TYSSENKRUPP. **Proceedings of Forging Committee of Verein Deutsche Eisenhüttenleute**, Usina Piratini, Charqueadas, RS, 1992.
20. CHAIJARUWANICH, A., DASHWOOD, R.J., LEE, P.D., NAGAUMI, H. **Pore evolution in a direct chill cast Al-6 wt.% Mg alloy during hot rolling**. Acta Materialia, v. 54, p. 5185-5194, 2006. In: ASSUNÇÃO, A. L. **Fechamento da Porosidade Central na Laminação de Fio-Máquina**, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, p. 20, 2007.
21. ROCHA, A. **Curso de laminação**, Mestrado Profissional, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2010.
22. PIETRZYK, M., KAWALLA, R., PIRCHER, H. **Simulation of the behavior of voids in steels plates during hot rolling**. Steel Research, v. 66, n. 12, p. 526-529, 1995.
23. 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.

24. STAHLBERG, U., KEIFE, H. **A study of hole closure in hot rolling as influenced by forced cooling**, Journal of Materials Processing Technology, n. 30, p. 131-135,1992.
25. PIETRZYK, M., KAWALLA, R., PIRCHER, H. **Simulation of the behavior of voids in steels plates during hot rolling**. Steel Research, v. 66, n. 12, p. 526-529, 1995.
26. IMAMURA, H., TOMONAGA, M., TOMINAGA, M., SAITO, S., TSUDA, O. **Effect of slab inner temperature distributions on improving loose structure by new slabbing method**. In: 100th ISIJ Meeting, October 1980, Lecture n. S989. In: ASSUNÇÃO, A. L. **Fechamento da Porosidade Central na Laminação de Fio-Máquina**, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, p. 24, 2007.
27. TSUDA, O., MIZUTA, A., YAMAGUCHI, Y., OSUNA, H., YUGAKI, H. **A rolling method with partially cooling of slabs**. In: 101st ISIJ Meeting, April 1981, Lecture n.S369. In: ASSUNÇÃO, A. L. **Fechamento da Porosidade Central na Laminação de Fio-Máquina**, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, p. 24, 2007.
28. RAVAFORJ, **Banco de Dados de Descontinuidades Detectadas por Ultra-som em Peças Forjadas**, Usina Piratini, Charqueadas, RS, 2011.
29. SANTIN, J. L. **Ultra – som, Técnica e Aplicação**, Editora Qualitymark, Rio de Janeiro, RJ, 1997.
30. CLARKE, T. **Métodos de Ultra-som**, Mestrado Profissional, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2011.
31. QUEJI, L.M. **Ensaio do Aço W.NR. 1.2714 na Gleblee - Simulador termomecânico**, Usina Piratini, Charqueadas, RS, 2011.