

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

MARIANA MENDONÇA DINIZ

**INFLUÊNCIA DA REDUÇÃO DE ÁREA EM AÇO SAE - 1070 FORJADO A
QUENTE EM MATRIZ ABERTA**

BELO HORIZONTE

2019

MARIANA MENDONÇA DINIZ

**INFLUÊNCIA DA REDUÇÃO DE ÁREA EM AÇO SAE - 1070 FORJADO A
QUENTE EM MATRIZ ABERTA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Lopes

BELO HORIZONTE

2019

MARIANA MENDONÇA DINIZ

**INFLUÊNCIA DA TAXA DE DEFORMAÇÃO EM AÇO SAE-1070 FORJADO A
QUENTE EM MATRIZ ABERTA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título em Bacharel em Engenharia de Materiais.

Apresentado em: 03/12/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wellington Lopes – Orientador

Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Profa. Dra. Aline Silva Magalhães

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir alcançar esse objetivo e conseguir concluir essa etapa de extrema importância em minha vida.

À minha família e amigos pelo apoio, carinho e por sempre acreditar que eu seria capaz de me tornar uma engenheira.

Agradeço ao CEFET-MG pelos inúmeros recursos disponibilizados durante esses anos de faculdade e pelo ensino de qualidade.

Ao meu orientador Prof. Dr. Wellington Lopes por toda dedicação e paciência durante o andamento desse trabalho e disponibilidade em ajudar sempre que eu precisava.

À Prof. Dra. Aline Magalhães sempre disposta a tirar dúvidas durante a execução desse trabalho.

Aos demais professores do CEFET-MG pelos ensinamentos e por serem fundamentais para meu crescimento acadêmico e pessoal durante esses anos de curso.

Aos amigos de Engenharia de Materiais pelo companheirismo durante a caminhada até alcançarmos o nosso objetivo final.

À empresa que proporcionou o desenvolvimento desse trabalho. Especialmente os setores de Engenharia e Laboratório pela ajuda e disponibilidade.

RESUMO

O forjamento é um processo de conformação utilizado com o intuito de imprimir em um aço a forma desejada garantindo que o produto final seja livre de defeitos, com dendritas deformadas e alcance as propriedades mecânicas desejadas. Dentre os tipos de forjamento existentes, o forjamento a quente em matriz aberta é destinado para peças de maior porte, diferente do forjamento em matriz fechada que tem como limitação o aspecto dimensional. O presente trabalho retrata o estudo da influência da redução de área em aço forjado, durante o processo de forjamento em matriz aberta, e quais suas implicações nas características finais da peça. A avaliação dessa influência foi feita com uso das técnicas de ensaio de dureza Brinell, tração e impacto. Além de análises realizadas em corpos de provas das amostras retiradas da peça, como análise de microinclusão e micrografia. Também foi feita a macrografia em uma fatia retirada da peça antes e após forjamento. Os resultados obtidos indicam que para efeito de caldear defeitos, eliminar inclusões e deformação das dendritas uma maior redução de área proporciona resultados melhores, uma vez que se observou estrutura dendrítica menor nessas reduções e também uma menor quantidade de inclusões. Porém, após realizar ensaios mecânicos observou-se que nem sempre a maior redução proporcionou o melhor desempenho mecânico do material, sendo necessário diferenciar em ensaios realizados nos corpos de prova de tração transversal e longitudinal para comparar com resultados considerados satisfatórios conforme literatura e testes anteriores realizados na empresa. Portanto foi relevante avaliar todos os testes citados para chegar à conclusão que a redução de área de 5:1 foi a mais satisfatória no sentido de caldear os vazios, deformar dendritas e alcançando resultados de tração e impacto dentro do especificado.

Palavras-chave: aço SAE-1070, forjamento, matriz aberta, redução de área, dendritas.

ABSTRACT

Forging is a forming process used to print the desired shape onto a steel ensuring that the end product is free from defects, with deformed dendrites and achieves the desired mechanical properties. Among existing types of forging, open die forging is intended for larger parts, different from closed die forging which has the dimensional limitation. The present work portrays the study of the influence of forged steel area reduction during the open die forging process, and its implications on the final characteristics of the part. The evaluation of this influence was made using Brinell hardness, traction and impact testing techniques. In addition to analyzes performed on specimens of samples taken from the part, such as the microinclusion and micrographs analysis. Macrography was also done on a slice taken from the piece before and after forging. The results indicate that for the purpose of heating defects, eliminating inclusions and dendrite deformation a larger area reduction provides better results, since a smaller dendritic structure was observed in these reductions and also a smaller amount of inclusions. However, after performing mechanical tests it was observed that the largest reduction did not always provide the best mechanical performance of the material, being necessary to differentiate in tests performed on the transverse and longitudinal tensile test specimens to compare with results considered satisfactory as literature and previous tests performed in the company. Therefore it was relevant to evaluate all tests cited to reach the conclusion that the 5: 1 area reduction was the most satisfactory in the direction of weld defects, deforming dendrites and achieving traction and impact results within the specified.

Keywords: SAE-1070 steel, forging, open die, area reduction, dendrites.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linhas de fibramento obtidas em um processo de forjamento.	14
Figura 2 – Forjamento em matriz fechada.	19
Figura 3 – Matrizes para forjamento em matriz aberta	19
Figura 4 – Representação de uma dobra em uma peça forjada.	20
Figura 5 – Dobra na peça forjada	21
Figura 6 – Cisalhamento na borda de um material forjado	22
Figura 7 – Trinca na superfície da peça forjada.	22
Figura 8 – Trinca no interior da peça forjada	23
Figura 9 – Trinca central em peça forjada.	23
Figura 10 – Influência da deformação a quente nas inclusões	25
Figura 11 – Efeito da deformação em vazios.	25
Figura 12 – Efeito das variáveis do processo de forjamento a quente no coeficiente de atrito.	27
Figura 13 – Influência das variáveis de processos de forjamento a quente no coeficiente de atrito.	28
Figura 14 – Dendritas formadas no processo de solidificação da liga metálica.	30
Figura 15 – Macrografia da estrutura dendritica	30
Figura 16 – Macrografia SAE-1070	31
Figura 17 – Caldeamento de defeito.	32
Figura 18 – Lingote utilizado no trabalho.	33
Figura 19 – Detalhe do aspecto do lingote.	34
Figura 20 – Fluxograma dos procedimentos adotados no trabalho.	35
Figura 21 – Gráfico do pré-aquecimento do aço SAE-1070	36
Figura 22 – Dimensões da matéria prima	37
Figura 23 – Peça após forjamento.	39
Figura 24 – Dimensões da peça após forjamento.	39
Figura 25 – Gráfico da normalização do aço SAE-1070	40
Figura 26 – Parâmetros do tratamento térmico	41
Figura 27 – Funcionamento do aparelho de ultrassom.	42
Figura 28 – Aparelho de ultrassom.	42
Figura 29 – Dureza Brinell em função do diâmetro da impressão.	44
Figura 30 – Pedacos retirados da peça para confecção de corpo de prova.	45
Figura 31 – Posição de retirada dos corpos de prova de tração.	46

Figura 32 – Dimensões do corpo de prova de tração.	47
Figura 33 – Corpos de prova de tração.	47
Figura 34 – Dimensões do corpo de prova de impacto.	49
Figura 35 – Posição de retirada dos corpos de prova de impacto.	49
Figura 36 – Corpos de prova de impacto.	50
Figura 37 – Lâminas de referência de inclusão segundo ASTM E 45-18a.	53
Figura 38 – Ultrassom da seção com redução 3:1.	56
Figura 39 – Ultrassom da seção com redução 4:1.	57
Figura 40 – Ultrassom da seção com redução 5:1.	58
Figura 41– Ultrassom da seção com redução 7:1.	58
Figura 42– Pontos de medição de dureza.	59
Figura 43 – Corpos de prova após ensaio de tração.	60
Figura 44 – Região da fratura do corpo de prova de tração.	60
Figura 45 – Tipos de fratura.	61
Figura 46 – Influência do grau de deformação nas propriedades mecânicas.	62
Figura 47 – Gráfico de RA em função do grau de deformação.	63
Figura 48 – Gráfico de AL em função do grau de deformação.	63
Figura 49 – Região da fratura do corpo de prova de impacto.	65
Figura 50 – Estrutura dendrítica em um aço.	66
Figura 51 – Macrografia antes do forjamento.	67
Figura 52 – Segregação na região do raio e centro.	68
Figura 53 – Dendritas na redução 3:1.	69
Figura 54 – Macrografia da redução 3:1.	69
Figura 55 – Dendritas na redução 4:1.	70
Figura 56 – Macrografia da redução 4:1.	70
Figura 57 – Macrografia da redução 5:1.	71
Figura 58 – Macrografia da redução 7:1.	71
Figura 59 – Microinclusão das reduções.	72
Figura 60 – Microestrutura das reduções.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação de critérios de acordo com a temperatura.	16
Tabela 2 – Variação de critérios de acordo com o equipamento.	17
Tabela 3 – Variação de critérios de acordo com o tipo de processo.	18
Tabela 4 – Composição química (em%) certificada pelo fornecedor.	33
Tabela 5 – Dimensional e tolerância conforme norma ASTM A 370-18.	46
Tabela 6 – Tipo de morfologia.	52
Tabela 7 – Resultados de ultrassom.	58
Tabela 8 – Durezas em HB.	59
Tabela 9 – Resultados do ensaio de tração no corpo de prova longitudinal.	61
Tabela 10 – Resultados do ensaio de tração no corpo de prova transversal.	61
Tabela 11 – Resultados esperados.	62
Tabela 12 – Resultados do ensaio de impacto.	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS.....	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1	Forjamento.....	14
<i>3.1.1</i>	<i>Forjamento em matriz fechada</i>	<i>18</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Forjamento em matriz aberta.....</i>	<i>19</i>
3.2	Defeitos em materiais forjados.....	19
<i>3.2.1</i>	<i>Dobras</i>	<i>20</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Defeito de cisalhamento</i>	<i>21</i>
<i>3.2.3</i>	<i>Fratura.....</i>	<i>22</i>
<i>3.2.3.1</i>	<i>Trinca.....</i>	<i>22</i>
<i>3.2.3.2</i>	<i>Trinca central (“central burst”).....</i>	<i>23</i>
<i>3.2.4</i>	<i>Tamanho de grão anormal.....</i>	<i>24</i>
<i>3.2.5</i>	<i>Inclusões não metálicas.....</i>	<i>24</i>
<i>3.2.6</i>	<i>Vazios</i>	<i>25</i>
3.3	Conformabilidade	26
3.4	Fatores de influência na conformabilidade.....	26
<i>3.4.1</i>	<i>Influência do atrito na conformação da peça</i>	<i>27</i>
<i>3.4.2</i>	<i>Influência da velocidade da ferramenta na conformação a quente.....</i>	<i>28</i>
3.5	Dendritas.....	29
3.6	Caldeamento de defeitos	32
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	33
4.1	Material.....	33
4.2	Métodos	34
4.3	Forjamento.....	35
<i>4.3.1</i>	<i>Redução de área.....</i>	<i>37</i>
<i>4.3.1.1</i>	<i>Redução de área 3:1</i>	<i>37</i>
<i>4.3.1.2</i>	<i>Redução de área 4:1</i>	<i>38</i>
<i>4.3.1.3</i>	<i>Redução de área 5:1</i>	<i>38</i>
<i>4.3.1.4</i>	<i>Redução de área 7:1</i>	<i>38</i>

4.4	Tratamento térmico	39
4.5	Ensaio.....	41
4.5.1	<i>Ultrassom</i>	41
4.5.2	<i>Ensaio de dureza Brinell</i>	43
4.5.3	<i>Ensaio de tração</i>	45
4.5.3.1	<i>Confecção dos corpos de prova</i>	45
4.5.3.2	<i>Realização do ensaio.....</i>	48
4.5.4	<i>Ensaio de impacto.....</i>	48
4.5.4.1	<i>Confecção dos corpos de prova</i>	48
4.5.4.2	<i>Realização do ensaio.....</i>	50
4.5.5	<i>Macrografia</i>	50
4.5.6	<i>Microinclusão</i>	51
4.5.7	<i>Micrografia</i>	55
5	RESULTADOS.....	56
5.1.1	<i>Ultrassom</i>	56
5.1.2	<i>Ensaio de dureza.....</i>	59
5.1.3	<i>Ensaio de tração</i>	59
5.1.4	<i>Ensaio de impacto.....</i>	65
5.1.5	<i>Macrografia</i>	66
5.1.5.1	<i>Macrografia antes do forjamento</i>	66
5.1.5.2	<i>Macrografia após o forjamento</i>	68
5.1.6	<i>Microinclusão</i>	72
5.1.7	<i>Micrografia</i>	73
6	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

O forjamento é uma das operações de conformação mecânica mais antiga que se conhece, sendo definido por diversos autores como a imposição de esforços compressivos em materiais acomodados em cavidades que definirão o formato e a geometria do produto conformado, as matrizes de forjamento. Utiliza-se o tipo de matriz para classificar esse processo de fabricação, dividindo-o em dois tipos de acordo com a geometria e disposição do material no interior das mesmas: forjamento em matriz aberta e forjamento em matriz fechada.

O processo de forjamento tem como objetivo para transformar metais do estado bruto em peças acabadas. O forjamento visa produzir peças com microestrutura homogênea, sem porosidade e com um fibramento favorável às propriedades mecânicas exigidas (SCHAEFER, 2006).

Diehl (2015) distingue essa operação em a quente e a frio, sendo considerado, em muitos casos, como um processo rápido. Na maioria das vezes é necessário um tratamento térmico posterior, exigindo cuidados especiais e tempo de programação para a sua execução, que consiste, normalmente, em reaquecimento e resfriamento controlado da peça de modo a atingir a desejada microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas especificadas pelo produto.

Uma das principais variáveis que afetam a qualidade de um produto forjado é a variação com a qual ocorre a deformação plástica de um material, a chamada taxa de deformação. Essa variável de processo depende diretamente do tipo de material que estiver sendo processado assim como da temperatura adotada para a realização do processo de deformação plástica.

O forjamento é um processo de conformação que melhora a qualidade interna do forjado devido às deformações compressivas que promovem estrutura de grãos uniforme, quebra das dendritas formada ainda no processo de solidificação do aço, eliminação de porosidade e quebra dos padrões de macro segregação. Além disso, a tenacidade é melhorada devido ao fluxo de grão, que permite um ganho na resistência a fadiga, e fibragem favorável (OLIVEIRA, 2017).

Porém, o forjamento possui desvantagens como a possibilidade de ocorrência de trincas internas (*internal burst*), trincas em superfícies livres e trincas em superfícies em contato com ferramentas. Outros defeitos como as dobras e rechupes também podem aparecer.

É um processo que inicialmente exige um alto investimento inicial devido ao custo do equipamento e também existem muitas perdas por carepa.

Moraes (2013) ressalta alguns pontos antes de iniciar o forjamento, sendo necessário considerar a seleção do material, quais as dimensões da peça que vai ser produzida e as propriedades mecânicas, físicas e metalúrgicas. Durante o processo também é preciso analisar a seleção do equipamento utilizado, qual a geometria da matéria prima, perdas por carepa, temperatura, número de etapas de deformação e tratamento térmico e aquecimentos intermediários.

Também se leva em consideração a redução de área, que seria a relação entre a dimensão da matéria prima e do produto final, para evitar que ocorra o fenômeno de flambagem e para garantir a deformação das dendritas provenientes do processo de solidificação do aço.

Considerando esse aspecto, este trabalho apresentará o estudo do efeito da ação da redução de área na conformabilidade do aço SAE-1070 que será submetido à operação de forjamento em matriz aberta.

2 OBJETIVOS

Geral:

Analisar a influência da modificação dos valores da redução de área na conformabilidade do aço SAE-1070 durante o processo de forjamento a quente em matriz aberta, de modo a investigar ainda os efeitos no aparecimento de defeitos típicos dessa operação de conformação mecânica.

Específicos:

- a) avaliar o efeito da mudança da redução de área na conformabilidade do aço SAE 1070 mediante avaliação da distorção dimensional e do aparecimento de descontinuidade após a realização do forjamento a quente desse aço;
- b) avaliar o efeito da realização do forjamento a quente na evolução das propriedades mecânicas e do aspecto microestrutural do aço SAE 1070;
- c) avaliar o efeito da conformação mecânica imposta pelo forjamento na deformação das dendritas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Forjamento

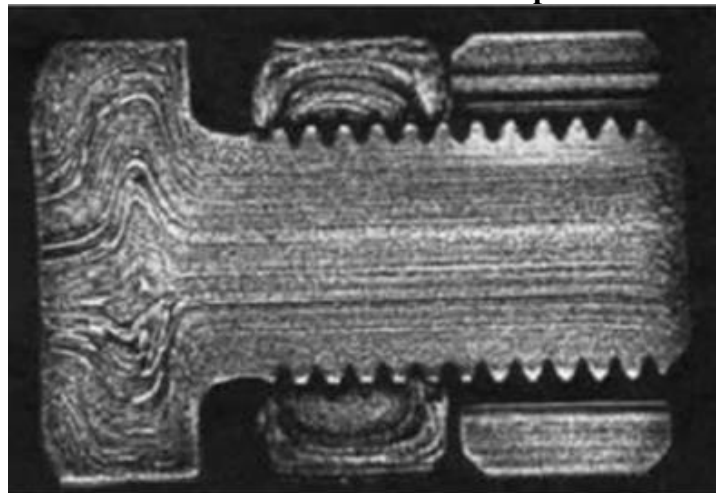
O forjamento é o mais antigo processo de conformar metais. Para Coromant (2005), esse consiste em operações de conformação mecânica efetuadas com esforço de compressão sobre um material dúctil, de tal modo que ele tende a assumir o contorno do perfil da ferramenta de trabalho.

A função primária desse processo é tornar a massa mais compacta e, por meio de esforços de compressão, caldear as pequenas trincas internas existentes na matéria prima (BRESCIANI, 2011).

As propriedades mecânicas obtidas no processo de forjamento a quente são melhores que a de outros processos, como fundição ou usinagem, por isso é muito utilizado. Suris (2012) afirma que a anisotropia obtida pelo processo é a principal causa dessa melhora de propriedades, já que durante o forjamento é imposta uma orientação, que se for adequada, agrega ótimas propriedades ao material.

A Figura 1 representa essa orientação alcançada durante o processo de forjamento, chamada de linhas de fibramento.

Figura 1 – Linhas de fibramento obtidas em um processo de forjamento.



Fonte: SURIS, 2012.

Porém esse fator não é o único que determina um resultado favorável após o processo, é necessário garantir a redução de área correta para caldear defeitos e inclusões provenientes da matéria prima.

No estudo de Souza (2008), os processos de conformação possuem diversas etapas como a escolha da geometria e construção ferramental, parametrização das variáveis de influência, manuseio e operação dos equipamentos, entre outros aspectos. A partir de uma geometria simples é possível gerar uma peça com forma complexa e detalhes necessários para sua aplicação.

Cada tipo de material e produto a serem conformados apresentam parâmetros complexos, principalmente em termos do controle da temperatura, composição química, atrito, tempo, tamanho de grão, precipitados, quantidade de deformação, taxa de deformação, além da redução de área, sendo todas essas variáveis consideradas parâmetros de processo. Destaca-se ainda que todos esses parâmetros citados influenciam na estrutura e propriedades finais do material forjado, possibilitando a produção de peças com vários formatos e tamanhos (SOUZA, 2008).

O forjamento pode ser realizado de diversos modos, variando o tipo de matriz, característica que inclusive classifica essa operação de conformação mecânica em forjamento em matriz aberta ou fechada, por martelamento ou prensagem. A escolha da temperatura de processamento também é um fator a ser considerado, sendo possível realizar forjamento a frio ou a quente.

Para o forjamento de praticamente todos os metais e ligas, é feito um aquecimento na etapa inicial da conformação. As variações estruturais, devido a esse aquecimento, proporcionam um aumento na ductilidade e na tenacidade do metal, exigindo menor energia para que seja deformado plasticamente. Esse aquecimento também facilita o escoamento plástico, diminuindo a probabilidade de trincas (CIMM, 2012).

Essa grande quantidade de variáveis envolvidas no processo permite que existam resultados diferentes dependendo do tipo de forjamento, como mostrado na Tabela 1, na qual Oliveira (2017) compara os critérios que podem variar de acordo com a temperatura do processo.

Todos esses critérios são importantes para garantir uma peça de qualidade que atenda as dimensões, propriedades mecânicas e qualidade de acabamento. Além de considerar as possíveis perdas que podem acontecer ao longo do processo e os custos envolvidos na confecção da peça.

Tabela 1 – Variação de critérios de acordo com a temperatura.

Critério	Tipo de Forjamento			
	Quente	Frio	Morno	Isotérmico
Ductilidade	Boa	Ruim a Boa	Moderada	Ideal
Esforços de conformação	Moderado	Alto	Moderado	Baixo
Taxa de conformação	Alta	Média	Alta	Baixa
Precisão Dimensional	Baixa	Boa	Moderada para Boa	Boa
Acabamento Superficial	Ruim	Bom	Moderado	Bom
Perdas de Material	Ruim	Moderada	Boa	Boa
Custo de Matriz	Moderado	Moderado	Alto	Muito Alto
Vida de Matriz	Baixa	Alta	Moderada	Muito Baixa

Fonte: OLIVEIRA, 2017.

Por ser um processo que envolve variação de temperatura é necessário incluir nos cálculos um fator de correção que considere a dilatação das dimensões. Isso pode ser feito aplicando padrões como proposto por Júnior (2007) em sua dissertação:

- Forjamento a quente em prensa (mecânica e recalcadora): 1,014
- Forjamento a quente em martelo: 1,016
- Forjamento semi-quente: 1,010
- Forjamento a morno: 1,008

Com isso é possível garantir que quando a peça esfriar ela terá exatamente a dimensão exigida mesmo após sofrer a compressão causada pela queda da temperatura.

Também é válido considerar, nos processos que envolvem temperatura, que existe a perda por carepa, que é uma camada de óxido formada durante o aquecimento da peça que será conformada. Ao sofrer compressão essa carepa se desprende da peça, gerando perda de massa que deve ser previamente considerada no projeto inicial da peça.

Assim como a temperatura, o tipo do equipamento também deve ser avaliado durante a realização de um projeto, para que o mais adequado seja escolhido e o processo possa ser realizado com sucesso. Na Tabela 2 são fornecidas essas informações, relacionando o equipamento com suas restrições e características.

Atualmente o forjamento é feito por meio de equipamentos, porém o princípio do processo permanece o mesmo. A deformação é obtida realizando a aplicação individual e intermitente de pressão, que seria o martelamento, ou então, a prensagem (SENAI, 1999).

Tabela 2 – Variação de critérios de acordo com o equipamento.

Equipamentos		Restrição	Características
Martelo		Energia	Custo de operação baixo Versatilidade (tipos de operações) Vibração / Barulho
Prensa	Mecânica	Curso	Custo maior investimento Tolerâncias melhores Vida de ferramenta melhor
	Hidráulica	Força	Operação e manutenção cara Operações “tipo” extrusão
	De Fuso	Energia	Princípio de funcionamento semelhante a um martelo
Recalcadora		Curso	Operações “tipo” recalque Princípio de funcionamento semelhante a prensa mecânica.

Fonte: OLIVEIRA, 2017.

Por fim, o tipo de processo, mostrado na Tabela 3, também é uma variável que deve ser avaliada para melhor execução do projeto e para que a forma final seja atingida. A escolha do processo ideal visa garantir qualidade do produto para determinada situação, analisando as vantagens de cada um e principalmente as limitações para que a peça final não apresente defeitos que possam gerar um retrabalho ou inutilização da mesma.

Cada processo tem suas vantagens e limitações. É preciso considerá-las para que o produto final seja produzido de acordo com o planejado, evitando problemas futuros no produto e também no maquinário que será utilizado.

Tabela 3 – Variação de critérios de acordo com o tipo de processo.

Processo	Vantagens	Limitações
Matriz aberta	Custo da ferramenta Lote pequeno Variação de tamanho	Formas simples Tolerâncias pobres Baixas taxas de produção Requer habilidade do operador
Matriz fechada	Rendimento de material Boas tolerâncias e precisão Altas taxas de produção Boa reprodutibilidade	Custo da ferramenta Usinagem do produto Perda de material para a rebarba
Precisão	Tolerâncias fechadas Eliminação de usinagem Melhor utilização de material Almas e flanges finos	Custo da ferramenta Usinagem do produto Cargas de forjamento Matrizes complicadas

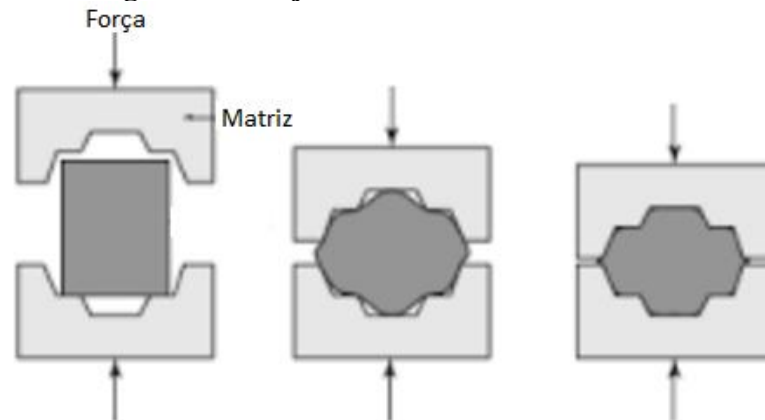
Fonte: OLIVEIRA, 2017.

3.1.1 Forjamento em matriz fechada

No forjamento em matrizes fechadas, o metal adquire o formato da cavidade esculpida na matriz e, por causa disso, há forte restrição ao escoamento do material para as laterais, como demonstrado na Figura 2, em um estudo do SENAI (1999). Essa matriz é construída em duas metades: a metade de baixo fica presa à bigorna e nela é colocado o metal aquecido. A outra metade está presa ao martelo (ou à parte superior da prensa) que cai sobre a metade inferior, fazendo o material escoar e preencher a cavidade da matriz.

A matriz apresenta uma cavidade extra em sua periferia e que tem o objetivo de conter o excesso de material necessário para garantir o total preenchimento da matriz durante o forjamento. Esse excesso de material chama-se rebarba e deve ser retirado da peça em uma operação posterior de corte.

Figura 2 – Forjamento em matriz fechada.

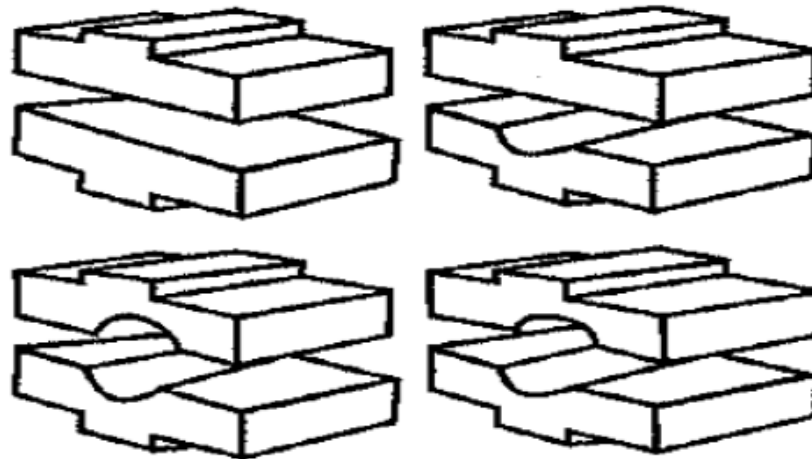


Fonte: SILVEIRA, 2016.

3.1.2 Forjamento em matriz aberta

O forjamento em matriz aberta é geralmente utilizado quando se deseja produzir um número de peças pequeno e com grandes dimensões. As matrizes têm geometrias ou formatos bastante simples como exibido na Figura 3.

Figura 3 – Matrizes para forjamento em matriz aberta



Fonte: CETLIN; HELMAN, 2015.

3.2 Defeitos em materiais forjados

Para Oliveira (2017), os defeitos têm grande influência nas propriedades dos materiais, principalmente as que se referem à deformação plástica. A análise dessas falhas é um ponto importante no processo de fabricação de uma peça, uma vez que pode comprometer a eficiência do produto quando o mesmo for ser utilizado.

Os defeitos podem aparecer na superfície do material, sendo facilmente detectados em uma inspeção visual, mas também pode ser um defeito interno sendo necessário realizar ensaios como o de ultrassom, líquido penetrante ou até mesmo uma microscopia eletrônica para identificar e caracterizar o mesmo.

Os problemas causados por defeitos, além de comprometer a qualidade do produto, geram prejuízos para as empresas, atraso na entrega de peças, tempo de retrabalho, tempo para analisar o que pode ser feito e possíveis causas. Por isso é um assunto de grande relevância dentro da produção, que busca melhorias no processo para evitar que eles apareçam.

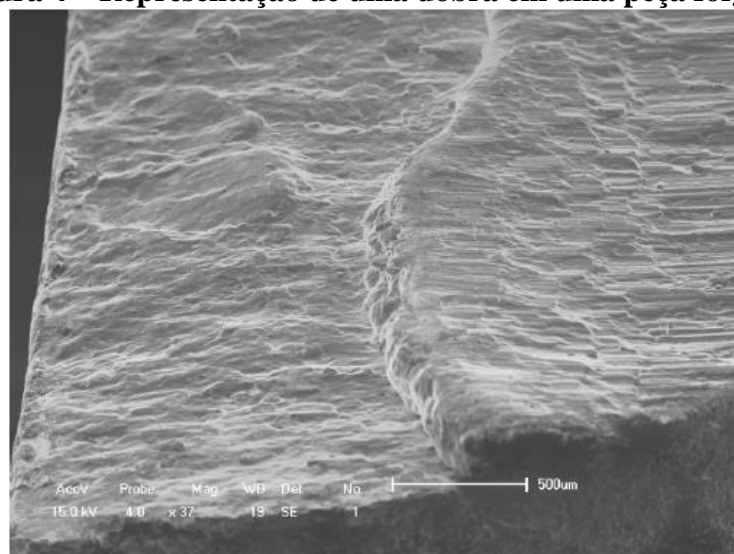
Esses defeitos podem estar relacionados com o processo de forjamento, mas também podem ser fruto de algum defeito originado da matéria prima, como as inclusões não metálicas ou vazios de solidificação.

3.2.1 Dobras

As dobras são formadas devido a caldeamento deficiente das superfícies, que geram descontinuidade, podendo resultar em regiões de concentradores de tensões que são potenciais locais para o aparecimento de trincas (BLAIR; MONROE, 2015).

A Figura 4 mostra a dobra formada na superfície do material forjado, como um defeito superficial.

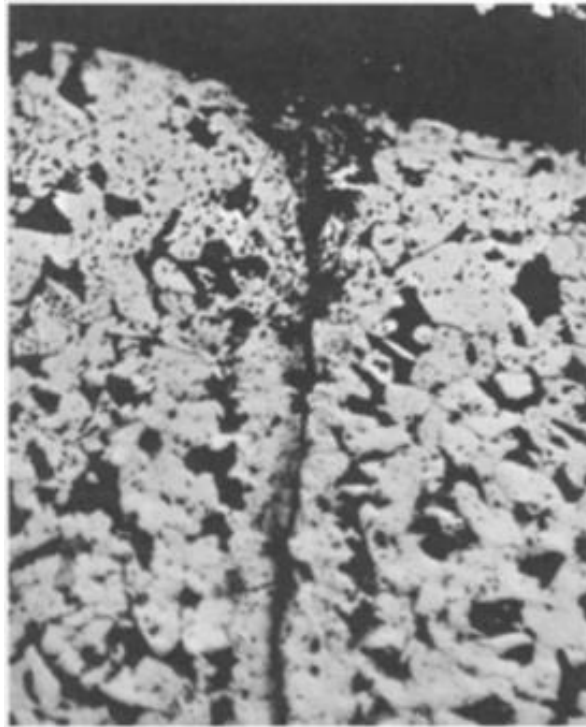
Figura 4 – Representação de uma dobra em uma peça forjada.



Fonte: OLIVEIRA, 2017.

Porém, ao analisar o interior da peça, como na Figura 5, observa-se que a dobra não é apenas superficial. Esse defeito também provoca falha no interior da peça e pode se propagar dentro do material. Em muitos casos, por estar no interior da peça, pode ser um defeito difícil de ser identificado, sendo preciso realizar uma inspeção mais cuidadosa do forjado, para que esse defeito não cause problemas durante seu uso.

Figura 5 – Dobra na peça forjada

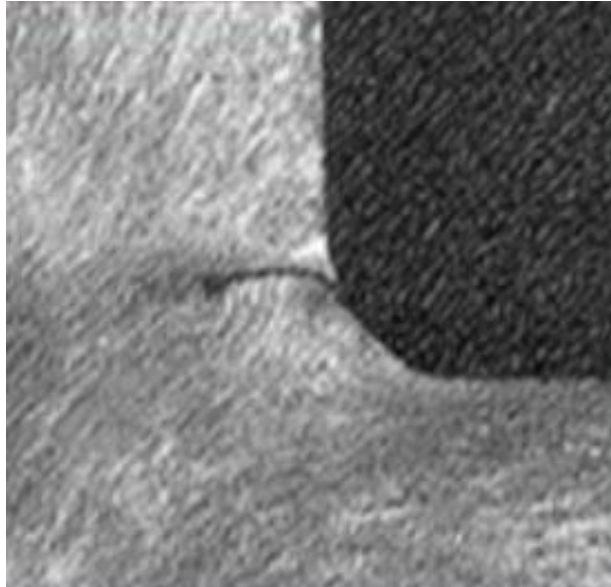


Fonte: OLIVEIRA, 2017.

3.2.2 Defeito de cisalhamento

Geralmente acontece nas bordas dos forjados, como mostrado na Figura 6, quando a tensão cisalhante interfacial excede a tensão de escoamento em cisalhamento do material que a peça é feita. Neste ponto a peça para de deslizar sobre a superfície da ferramenta e passa a deformar-se por cisalhamento subsuperficial, explica Oliveira (2017).

Figura 6 – Cisalhamento na borda de um material forjado.



Fonte: OLIVEIRA, 2017.

3.2.3 Fratura

3.2.3.1 Trinca

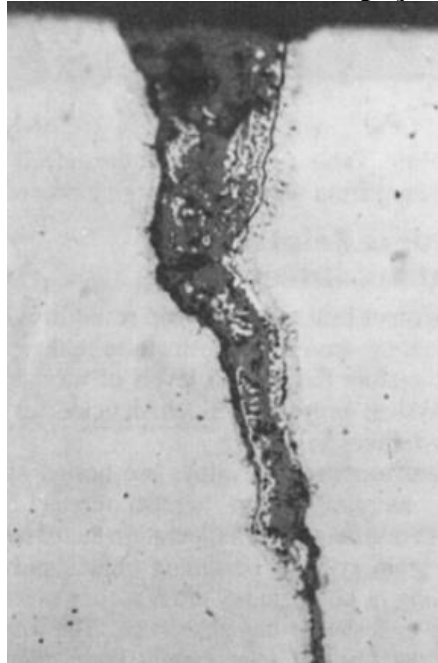
É um defeito de descontinuidade interna, como na Figura 7, ou externa, como na Figura 8, em que sua origem pode estar relacionada a diversas possibilidades, tendo como uma possível consequência a fratura do material. Sua origem pode ser uma trinca que já veio na matéria prima ou pode ser causada durante o processo.

Figura 7 – Trinca na superfície da peça forjada.



Fonte: OLIVEIRA, 2017.

Figura 8 – Trinca no interior da peça forjada.

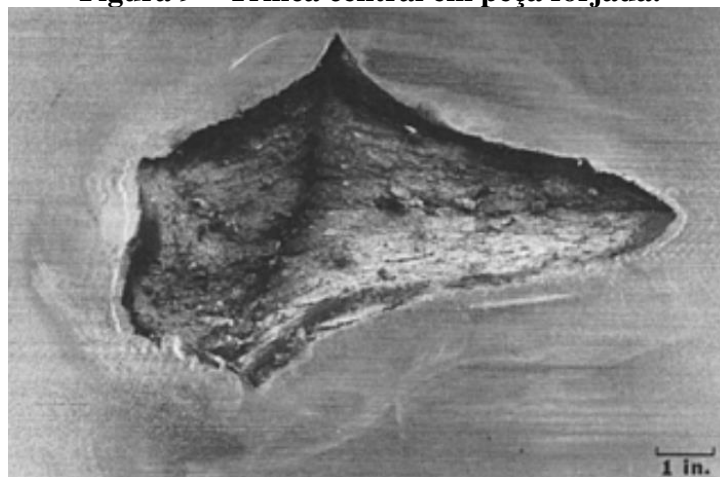


Fonte: OLIVEIRA, 2017.

3.2.3.2 *Trinca central (“central burst”)*

Para Oliveira (2017) essas são trincas internas decorrentes de processo de forjamento que ocorreu de forma inadequada, como a apresentada na Figura 9. Nesses casos, geralmente, o caldeamento não foi suficiente para eliminar essa trinca. Esse defeito pode levar à falha completa do produto durante o processo de conformação ou permanecer subcrítico, causando redução na ductilidade do produto acabado ou causando a falha catastrófica durante o uso.

Figura 9 – Trinca central em peça forjada.



Fonte: OLIVEIRA, 2017.

3.2.4 *Tamanho de grão anormal*

Outro defeito metalúrgico é o tamanho de grão anormal. Durante o processo de conformação à quente a peça fica submetida às regiões com diferentes temperaturas, entre a parte externa e interna da peça, o que contribui para formação de tamanhos de grãos heterogêneos dentro da mesma peça. Souza (2008) explica que isso ocorre uma vez que o crescimento do tamanho de grão é um fenômeno termicamente ativado, tendo como consequência o comprometimento das propriedades mecânicas como a resistência e tenacidade da mesma.

De acordo com Hendler (2010), a ocorrência da recristalização depende da quantidade de deformação aplicada durante a operação de forjamento e da temperatura durante esse processo de conformação. Esses fatores influenciam no tamanho de grão final que é causada por uma transformação de fase irreversível ativada termicamente. Ao completar o processo de recristalização, inicia-se o crescimento de grão.

3.2.5 *Inclusões não metálicas*

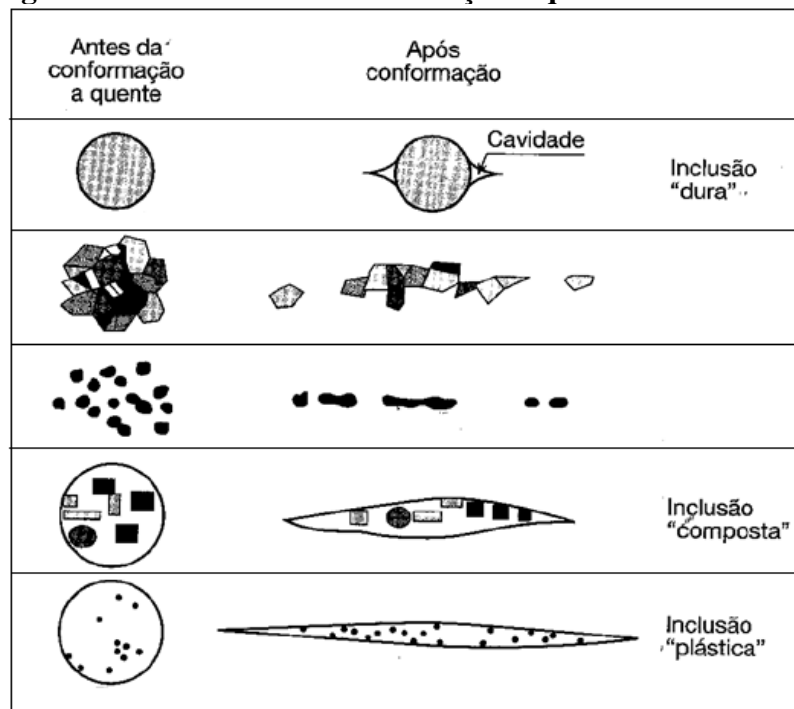
De acordo com Pires, Neto e Garcia (2002), as inclusões rejudicam a forjabilidade e as propriedades mecânicas do aço prejudicando, conseqüentemente, sua vida útil. Por isso é importante controlar a quantidade, tamanho, morfologia e composição química das inclusões, para no final do processo obter um produto de qualidade.

As inclusões não metálicas podem apresentar comportamentos distintos dependendo da sua composição química e formato (COLPAERT, 2008).

Colpaert (2008) ilustra os possíveis efeitos que o trabalho de conformação a quente pode causar na morfologia das inclusões, conforme Figura 10. Inclusões mais duras podem não ser alteradas ou quebram, podendo gerar microtrincas ao redor delas. Inclusões plásticas tendem a alongar e podem impedir que vazios sejam caldeados ou aprisionar partículas em seu interior. Outro problema que pode ser causado por essa plasticidade da inclusão em questão é que se tiver grande quantidade da mesma elas podem se unir e formar trincas.

Essas inclusões tem efeito nas propriedades macroscópicas e também nas microscópicas do material que passou pelo processo de conformação.

Figura 10 – Influência da deformação a quente nas inclusões.

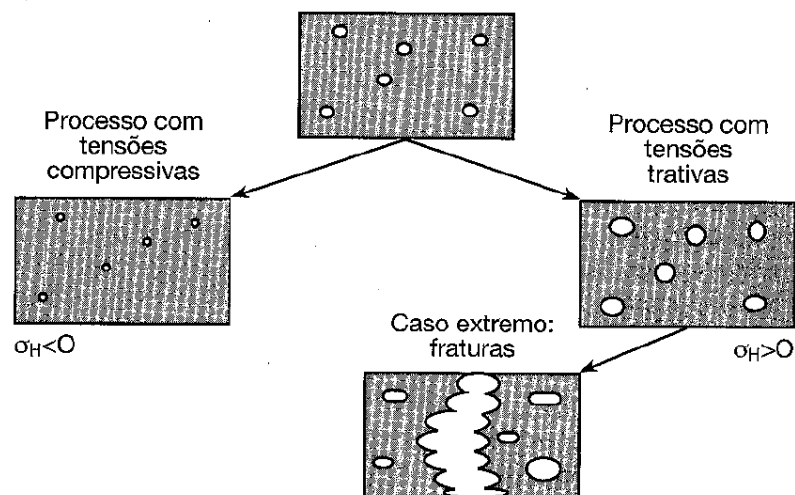


Fonte: COLPAERT, 2008.

3.2.6 Vazios

Colpaert (2008) ressalta que o trabalho a quente favorece a difusão, que é benéfica para reduzir heterogeneidades químicas provenientes dos lingotes na etapa de solidificação. Essas microcavidades e porosidades podem ser eliminadas por caldeamento, unindo por pressão e temperatura esse vazio, como na Figura 11, através do forjamento a quente que exerce sobre o lingote uma força compressiva.

Figura 11 – Efeito da deformação em vazios.



Fonte: COLPAERT, 2008.

3.3 Conformabilidade

A conformabilidade plástica é definida por Bresciani (2011) como a capacidade do metal, ou da liga metálica, em poder ser processada por deformação plástica sem apresentar defeitos ou fraturas na peça trabalhada. Por isso é comum associar o termo conformabilidade a condições limites de deformação nas quais o material mantém-se íntegro.

Tradicionalmente, duas características de fabricação por conformação têm sido estudadas em detalhes:

- a estampabilidade, ou capacidade de uma chapa metálica poder ser estampada profundamente - nesse caso, se evidencia essencialmente a conformação plástica de superfícies metálicas;
- a forjabilidade, ou capacidade de um corpo tridimensional metálico poder ser conformado por forjamento ou por outros processos (como laminação e extrusão), onde predomina o trabalho com volumes metálicos.

3.4 Fatores de influência na conformabilidade

Dentro de uma consideração geral, Bresciani (2011) afirma que, no que se refere ao material da peça a ser conformada, quanto maior a sua ductilidade, associada a uma resistência mecânica mínima para suportar os esforços de conformação, maior será a capacidade de ser processada com deformação plástica.

Nos processos não estacionários, ao analisar a cada instante um mesmo ponto geométrico, o estado de tensão e deformação será diferente, alterando de forma gradativa com a mudança da geometria do corpo durante a deformação plástica (como na estampagem profunda e no forjamento). Por isso a conformabilidade é sensivelmente influenciada pelo tipo de processo de conformação aplicado, uma vez que o comportamento do material depende do estado de tensão e deformação em cada ponto do corpo sólido.

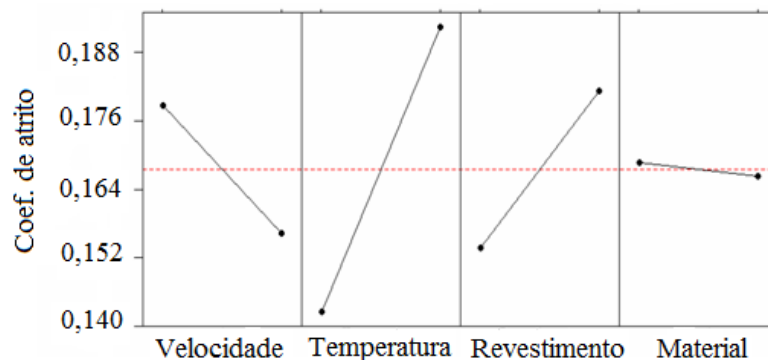
De acordo com Matos (2014), a redução de área terá influência na conformabilidade da peça, que afeta o grau de forjabilidade da mesma. Garantir essa redução durante o processo de conformação é um ponto importante para evitar possíveis fraturas, flambagem e ineficiência no caldeamento de defeitos. O processo de redução de área correto vai originar uma microestrutura composta de grãos alongados e alinhados e provocar deformação das dendritas.

A natureza metalúrgica do material exerce uma influência considerável quando se trata da relação entre microestrutura e plasticidade. Babakhani et al. (2010) investigaram a influência da temperatura, uma vez que a sua elevação conduz a uma condição de plasticidade do material e, conseqüentemente, de conformabilidade plástica. Diferentes processos de conformação podem produzir, num mesmo material, diferentes propriedades finais em termos de dimensão, tolerância dimensional, acabamento superficial, microestrutura, resistência mecânica, ductilidade e probabilidades de aparecimento de defeitos de fabricação.

3.4.1 Influência do atrito na conformação da peça

A variável mais importante que vai afetar o coeficiente de atrito é a temperatura, seguida do tipo de revestimento das ferramentas, da velocidade e por último do material, como observado na Figura 12.

Figura 12 – Efeito das variáveis do processo de forjamento a quente no coeficiente de atrito.



Fonte: Adaptada de BÖRDER, 2005.

Esforços tangenciais, devido ao atrito, aparecem no contato da ferramenta com a peça, agindo na mesma durante o processo de forjamento. O atrito resulta simultaneamente em uma perturbação do campo das tensões e das deformações e uma elevação aparente da resistência à deformação. Porém esse atrito será responsável pela conformação do metal, interferindo diretamente na vida das matrizes, qualidade do produto e capacidade dos equipamentos empregados no processo (BÖRDER,2005).

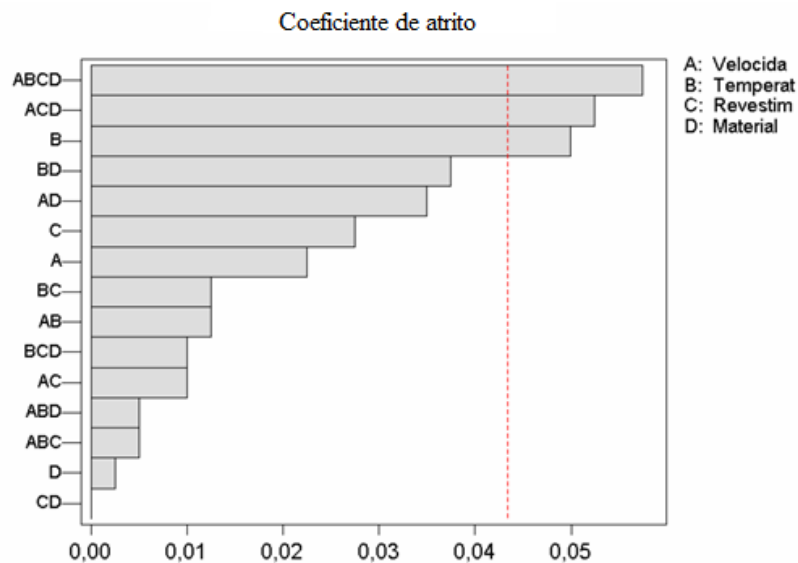
O desgaste de matrizes será maior no processo de forjamento a quente, levando em consideração que quanto maior a temperatura de trabalho mais complicada é a sua lubrificação, causando problemas de atrito e desgaste.

Börder (2005) também analisa a grande influência do revestimento, uma vez que a maior formação de óxido favoreceu a determinação de coeficientes de atrito mais elevados. Outra variável que afeta no atrito é a velocidade da prensa, que atua diretamente na taxa de deformação do material, que também, representa um fator importante para o coeficiente de atrito.

A Figura 13 revela as combinações das variáveis do processo de forjamento a quente e a influência que uma variável isolada ou a combinação de duas ou mais variáveis possuem no coeficiente de atrito.

O aumento do atrito ferramenta/material além de ter forte influência nas variáveis de processo de deformação, vai causar uma influência na microestrutura, ou seja, no tamanho de grão no produto processado.

Figura 13 – Influência das variáveis de processos de forjamento a quente no coeficiente de atrito.



Fonte: BÖRDER,2005.

De acordo com a figura de Börder (2005), a combinação das quatro variáveis provoca o maior aumento do coeficiente de atrito presente na figura, sendo a combinação que mais influencia na microestrutura. Outra variável que deve ser analisada é a temperatura, que como fator isolado também já causa grande aumento no coeficiente de atrito.

O aumento do fator de atrito, nas zonas que não ocorre nenhum mecanismo de recristalização durante todo o processo influencia no tamanho médio de grão (SOUZA,2012).

3.4.2 Influência da velocidade da ferramenta na conformação a quente

Um parâmetro importante na análise de peças forjadas é a velocidade imprimida à ferramenta no momento que está forjando, já que essa vai interferir diretamente na velocidade com que a peça é deformada.

Lemos, Vieira e Santos (2013) analisam a velocidade com que a peça é deformada durante o processo e como essa afeta o escoamento e o limite de resistência máxima fazendo com que apresentem tensões de escoamento mais altas, quanto maior for à velocidade de deformação, assim como também provoca um aumento da fração recristalizada. Outra consequência desse aumento de velocidade seria a queda da tenacidade.

De acordo com Lopes (2009), a deformação verdadeira sofrida pela peça pode ser expressa pela Equação 1.

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h} \quad (1)$$

Onde: h_0 é a altura da peça antes da compressão e h é a altura da peça após a compressão.

A variação da deformação por unidade de tempo é denominada taxa de deformação e pode ser descrita pela seguinte Equação 2.

$$\varepsilon' = \frac{de}{dt} = \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = \frac{Vd}{h} \quad (2)$$

Onde: Vd é a velocidade de deslocamento

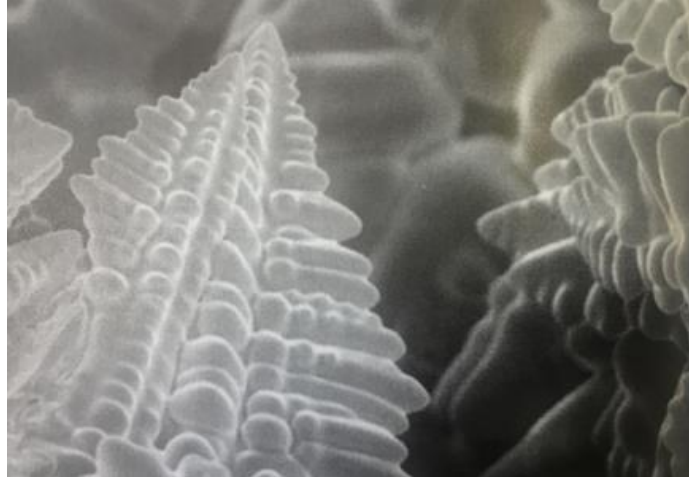
Dessa equação note-se que a taxa de deformação tem relação direta com a velocidade de deslocamento da ferramenta.

3.5 Dendritas

A semelhança que o metal sólido adquire e o crescimento e ramificações de árvores é responsável pelo nome dendrita, do grego *dendron* que significa árvore, resultando em uma estrutura como a mostrada na Figura 14 (COLPAERT, 2008).

Cardoso (2005), ao explicar a formação das dendritas, menciona que essas se formam durante o processo de solidificação que usualmente inicia na parede do molde em direção ao seu interior, à medida que se perde calor através dessa parede. Assim, os grãos da microestrutura do sólido formado são, na maioria das vezes, colunares, longos, estreitos e perpendiculares à parede do molde. Inicialmente, o grão se forma pelo resfriamento de algumas camadas e o líquido entre elas se solidifica mais tarde. Estas camadas externas do grão formam estruturas chamadas de dendritas. É importante ressaltar que quanto mais lenta a taxa de resfriamento maior a dendrita resultante.

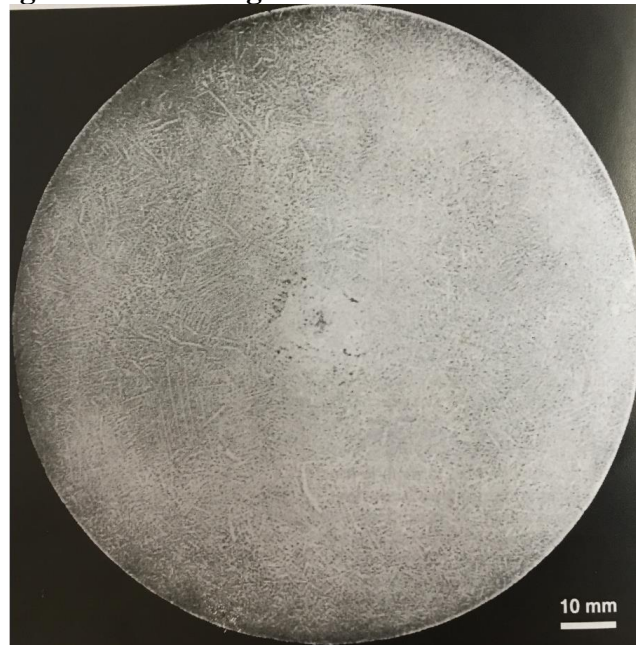
Figura 14 – Dendritas formadas no processo de solidificação da liga metálica.



Fonte: COLPAERT, 2008.

Segundo Colpaert (2018), no caso de metais, as estruturas dendríticas são reveladas por um ataque químico, como observado na Figura 15, porque a sua composição química varia da parte interna para a externa.

Figura 15 – Macrografia da estrutura dendrítica.



Fonte: COLPAERT, 2008.

O gradiente de composição entre o primeiro e o último material a se solidificar é denominado segregação dendrítica e, normalmente, é considerado indesejável. Na tentativa de eliminar esses gradientes é feita a homogeneização da peça segregada, que consiste no

aquecimento utilizando temperatura elevada para que a composição seja uniforme em todo o material.

Colpaert (2008) afirma que as dendritas podem ter efeitos indesejáveis durante a conformação mecânica, como no forjamento, podendo aparecer poros entre os braços das dendritas que vão tornar o material inutilizável.

O objetivo, no forjamento seria deformar ou quebrar essas dendritas, pois quanto maior a dendrita, maior será o grão resultante e, portanto, maior será a concentração de impurezas nos contornos destes grãos, tornando o material mais frágil (COLPAERT, 2008). Porém nem sempre a conformação mecânica é suficiente para provocar essa deformação desejada, o que terá influencia nas propriedades mecânicas finais que desejam ser atingidas após o processo empregado.

A Figura 16 é um exemplo de um SAE-1070 forjado, na empresa que foi realizado esse trabalho, com redução de 3:1 e que a estrutura dendrítica ainda está grande.

Figura 16 – Macrografia SAE-1070.



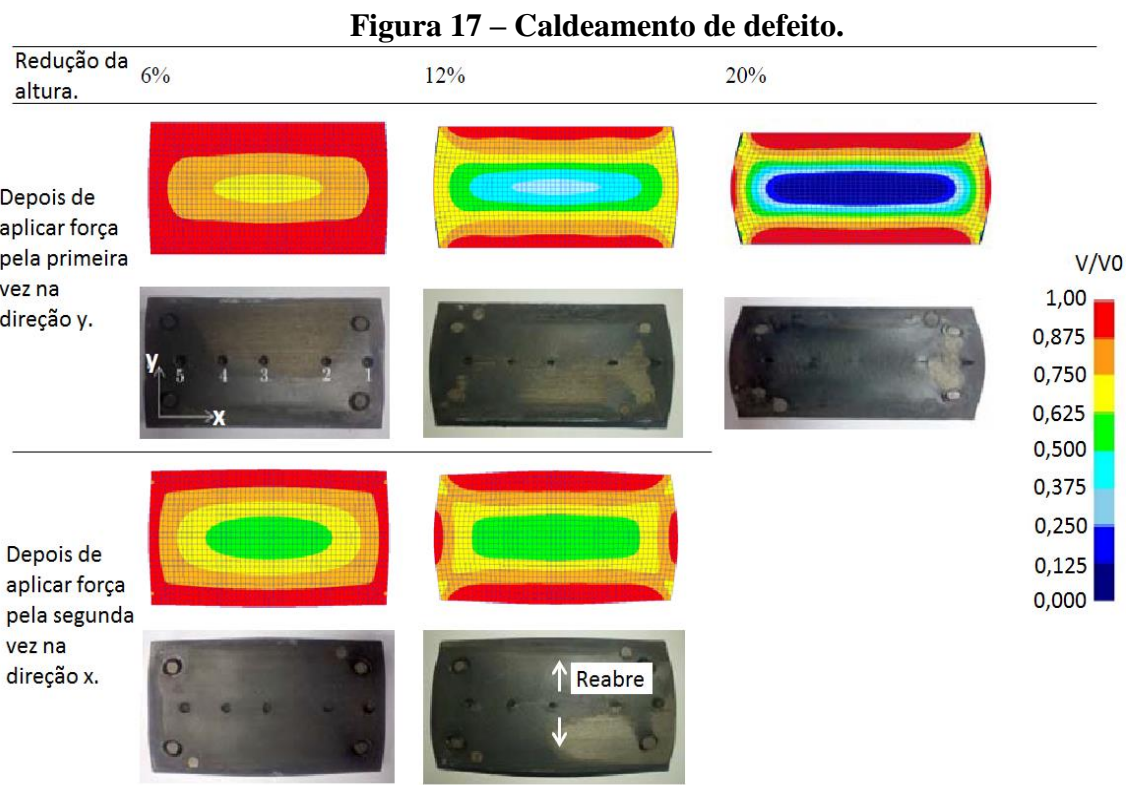
Fonte: Próprio autor.

3.6 Caldeamento de defeitos

Para Silveira (2016), a função primária do forjamento é a de tornar a massa mais compacta, soldando as pequenas trincas internas, que se torna mais fácil quando estes defeitos forem submetidos a razoáveis esforços de compressão, desde que as faces opostas das trincas sejam apropriadas.

Porém, no forjamento não é possível fazer com que as heterogeneidades químicas e as inclusões não metálicas desapareçam. Esse processo pode somente orientá-las no sentido do alongamento que o lingote é submetido e, caso o alongamento seja grande, obtém-se o que se chama de fibragem.

De acordo com Feng, Cui e Liu et al. (2016), o forjador tem que estar atento ao sentido de forjamento para que segregações e vazios presentes no lingote sejam caldeados a partir do esforço aplicado, como mostrado na Figura 17. Quando o esforço é aplicado no sentido y, com o aumento na redução da altura, observa-se que os defeitos estão fechando. Em contrapartida, ao se aplicar esforço no sentido x, os defeitos tendem a reabrir.



Fonte: Adaptado de FENG, CUI e LIU et al., 2016.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

O material utilizado para realização dos ensaios foi o aço SAE - 1070. A composição química desse aço é descrita na Tabela 4 e foi retirada das informações enviadas pelo fornecedor junto com a matéria prima.

Tabela 4 – Composição química (em%) certificada pelo fornecedor.

C	Mn	Cr	Si	Ni	Mo	P	S	Al	Cu	Ti	V
0,69	0,87	0,15	0,30	0,04	0,01	0,035	0,020	0,023	0,076	0,002	0,003

Fonte: VDL, 2019.

O aço SAE-1070 chegou à empresa conforme Figura 18, apresentando um aspecto poroso e com resquícios do refratário onde o aço foi vazado, como indicado pelas setas na Figura 19. A condição que o lingote apresentava foi registrada, pois essas características podem causar futuros defeitos caso não sejam apenas superficiais e não possam ser eliminadas durante o forjamento.

Figura 18 – Lingote utilizado no trabalho.



Fonte: Próprio autor.

Figura 19 – Detalhe do aspecto do lingote.



Fonte: Próprio autor.

4.2 Métodos

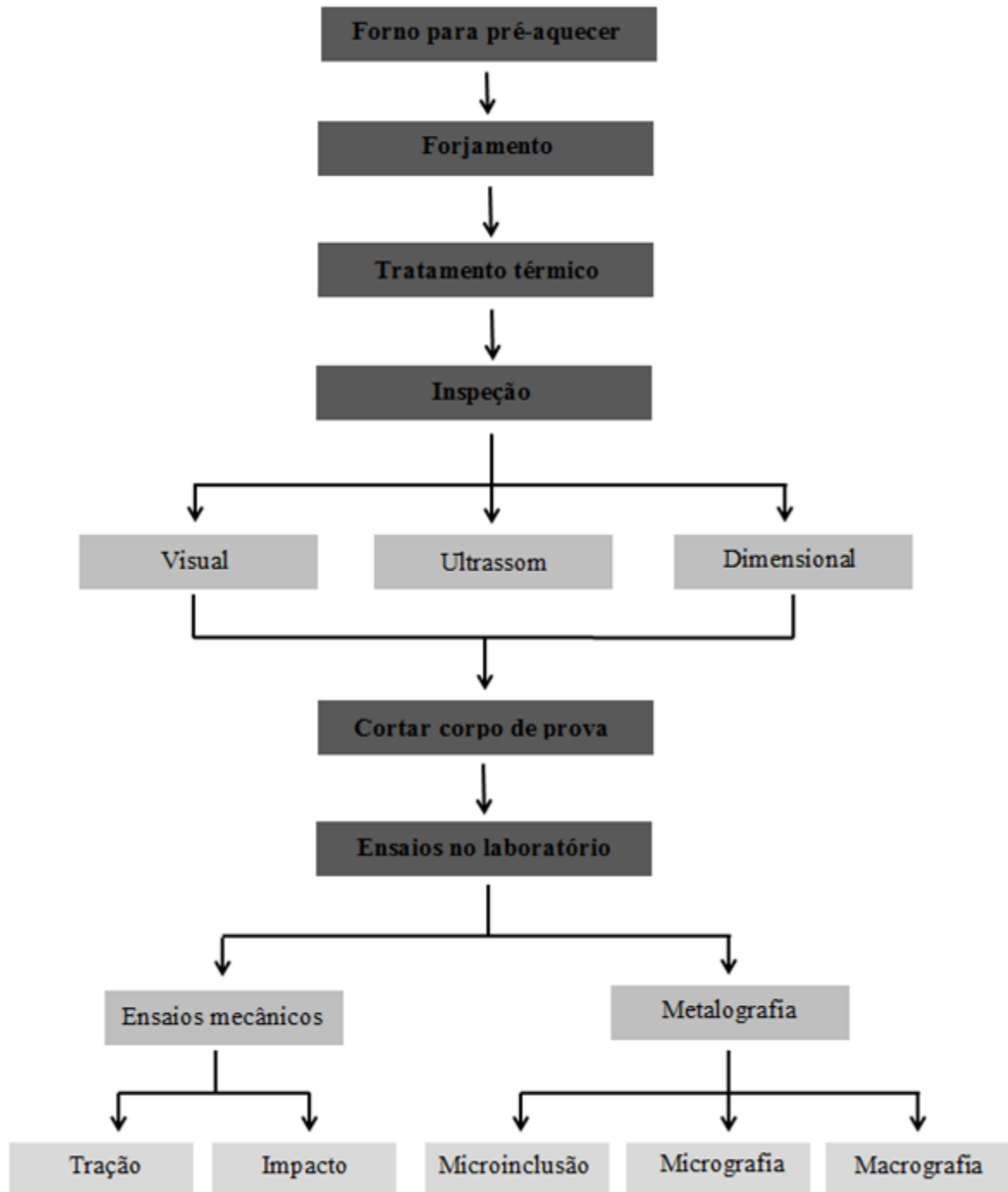
Os procedimentos adotados para desenvolver este trabalho estão resumidos esquematicamente no fluxograma da Figura 20. Os ensaios e procedimentos realizados durante a execução do trabalho serão descritos posteriormente.

Inicialmente, a peça foi pré-aquecida, para realizar o forjamento a quente na prensa hidráulica. Na etapa de forjamento foram aplicadas forças para compressão do material seguindo as reduções de área propostas no trabalho.

Com o objetivo de avaliar o efeito das diferentes reduções de área, foram feitos os ensaios mecânicos de tração e impacto. Também foi feito o ensaio de ultrassom para identificar qualquer falha interna não caldeada pelo forjamento. Por fim, realizou-se os ensaios metalográficos de macrografia para visualizar a deformação da estrutura dendrítica, microinclusões presentes mesmo após o forjamento e micrografia para avaliar a estrutura do material. Toda essa caracterização foi realizada no laboratório da própria empresa, em máquinas que serão especificadas no decorrer do trabalho.

A peça também foi submetida a um controle visual e dimensional, para verificar se o dimensional atende ao que foi projetado e se a peça não apresenta trincas, dobras ou qualquer outro aspecto fora do padrão de qualidade da empresa.

Figura 20 – Fluxograma dos procedimentos adotados no trabalho.



Fonte: Próprio autor.

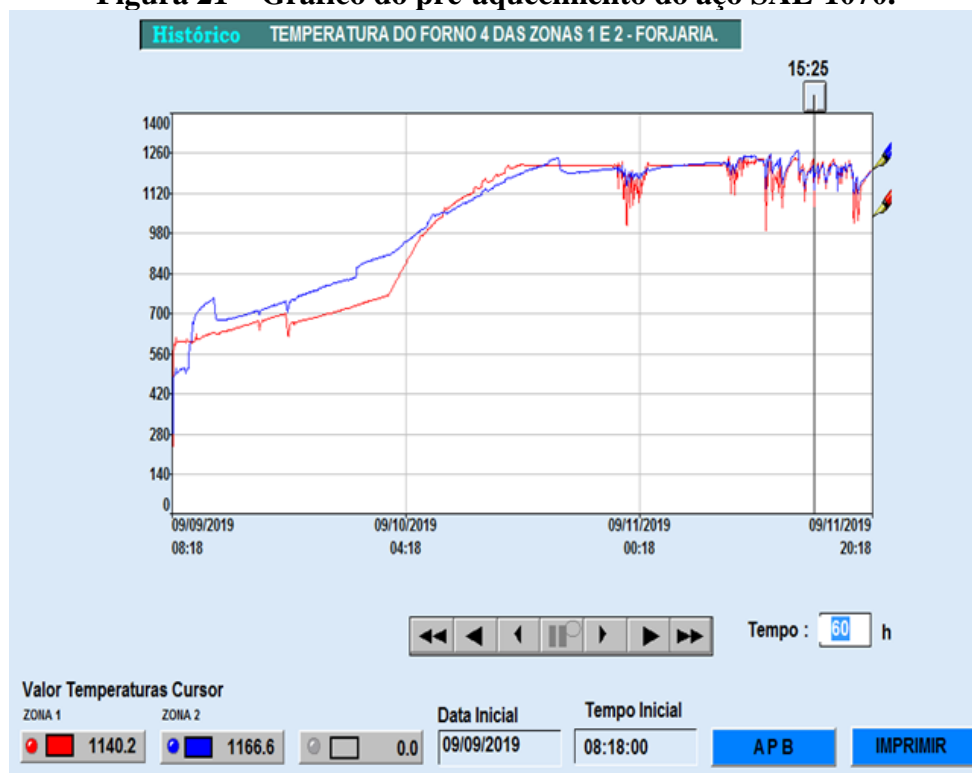
4.3 Forjamento

Para realizar o processo de forjamento foi utilizada a Prensa PR04 (SCHULER 2500 Ton.), que é uma prensa hidráulica com capacidade de 2500 toneladas e abertura de 3000 milímetros.

Por ser forjamento a quente, o aquecimento precede essa etapa de conformação, sendo necessário enformar a peça. Esse procedimento foi feito em um forno a gás fabricado pela Kei Tek, cuja capacidade máxima de aquecimento para forjamento é de 25000 quilogramas. Esse forno trabalha em uma temperatura que varia de 400°C a 1300°C, utilizando como combustível o gás natural. A altura do equipamento é de 4074 metros, largura de 3287 metros e 6882 metros de comprimento.

O procedimento de pré-aquecimento está registrado no gráfico da Figura 21.

Figura 21 – Gráfico do pré-aquecimento do aço SAE-1070.



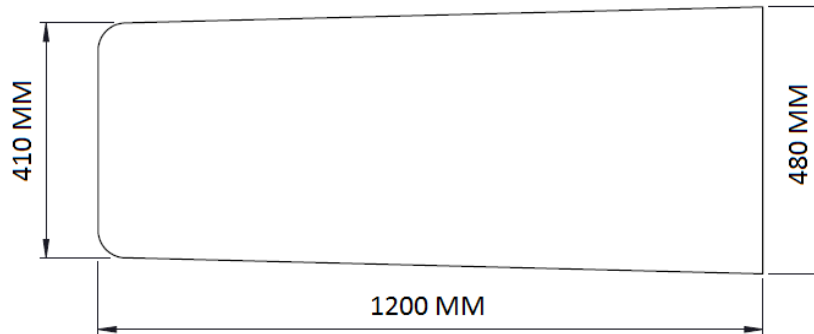
Fonte: Próprio autor.

A peça foi inserida ao forno com temperatura de aproximadamente 560°C até alcançar a temperatura de 1220°C, permanecendo por um tempo equivalente a 0,5 hora por cada 25,4 milímetros de espessura da matéria prima mais o tempo padrão de 12 horas definido para aço carbono.

A peça foi aquecida até a temperatura de início de forjamento a uma velocidade menor ou igual a 80°C/h, conforme o procedimento interno retirado da norma de tratamento térmico da empresa. A mesma foi retirada do forno apenas no momento que se iniciou o forjamento, registrando uma temperatura de aproximadamente 1250°C nesse momento.

Com o intuito de realizar forjamento para obter reduções de área distintas e analisar a influência desse processo nas propriedades finais do material forjado, a operação envolveu o forjamento de um esboço com diferentes sessões circulares, partindo da matéria prima que chegou à empresa com as dimensões conforme Figura 22.

Figura 22 – Dimensões da matéria prima.



Fonte: Próprio autor.

4.3.1 Redução de área

Para garantir que o material não sofra com o fenômeno de flambagem e tenha seus defeitos caldeados, a matéria prima passou por uma redução que iniciou com uma relação de pelo menos 3:1 em relação à área inicial que o lingote chegou à empresa. Também foram realizadas reduções maiores, nesse caso de 4:1, 5:1 e 7:1. Essa redução é calculada dividindo a área inicial da matéria prima, no caso de origem retangular, pela área final do lingote forjado para uma seção redonda.

Partindo dessa matéria prima de origem retangular e chegando a uma peça final circular, é possível chegar à redução a partir da Equação 3.

$$\text{Redução} = \frac{\#^2}{\frac{\pi \theta_f^2}{4}}$$

$$\text{Redução} = \frac{\#^2}{\theta^2} \times 1,27 \quad (3)$$

Onde: $\#^2$ é a área inicial do lingote e θ^2 é o diâmetro final após o forjamento.

4.3.1.1 Redução de área 3:1

Para alcançar a redução de área proposta de 3:1 o lingote foi forjado para o diâmetro de 267 milímetros, utilizando a Equação 3 para chegar a esse valor.

$$3 = \frac{410^2}{\emptyset^2} \times 1,27$$

$$\emptyset = 267 \text{ mm}$$

4.3.1.2 Redução de área 4:1

Com o objetivo de verificar a eficácia dessa redução foram realizados forjamentos com reduções de área diferentes, utilizando lingotes da mesma corrida para um melhor efeito comparativo.

Nesse caso a peça foi forjada para o diâmetro de 231 milímetros. A maior relação entre área inicial e final conduz para um melhor caldeamento de algum possível defeito interno que ainda esteja presente na peça.

$$4 = \frac{410^2}{\emptyset^2} \times 1,27$$

$$\emptyset = 231 \text{ mm}$$

4.3.1.3 Redução de área 5:1

À medida que aumenta a redução maior o esforço exercido, o que levaria a um melhor caldeamento dos defeitos presentes no interior do lingote. Nessa redução de 5:1 a peça ficou com diâmetro de 207 milímetros.

$$5 = \frac{410^2}{\emptyset^2} \times 1,27$$

$$\emptyset = 207 \text{ mm}$$

4.3.1.4 Redução de área 7:1

Por fim foi realizada a redução 7:1, na qual se espera caldear todos os possíveis defeitos, resultando em um diâmetro de 175 milímetros.

$$7 = \frac{410^2}{\emptyset^2} \times 1,27$$

$$\emptyset = 175 \text{ mm}$$

É importante ressaltar que essas são as medidas quando a peça já está fria e o processo acontece com a peça quente, portanto é necessário considerar o fator dilatação provocado pelo aquecimento do aço. A peça final ficou conforme Figura 23.

Figura 23 – Peça após forjamento.

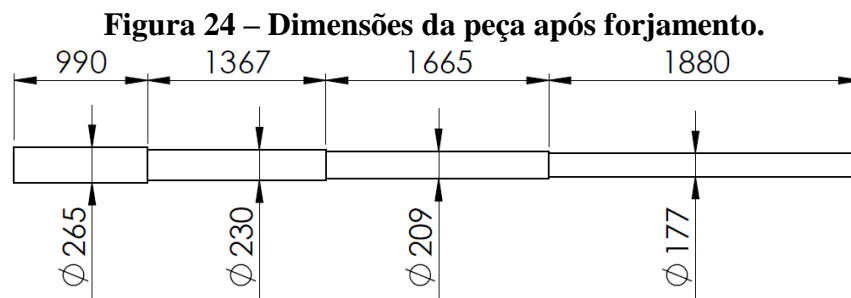


Fonte: Próprio autor.

Outro ponto importante é que as dimensões foram medidas ao final do forjamento, o que resulta na variação de alguns milímetros nas dimensões devido à utilização de instrumentos que não tinham a capacidade de medir com exatidão as dimensões do material forjado, considerando que tais medições foram realizadas nas as peças ainda com temperatura elevada.

Ao final do forjamento, utilizou-se um paquímetro de metal com abertura de até 900 milímetros e sua abertura foi então medida por uma trena que indica o valor do diâmetro final enquanto a peça ainda está quente.

Realizou-se uma inspeção dimensional na peça quando a mesma já estava fria, obtendo uma peça com as dimensões, em milímetros, mostrada na Figura 24.



Fonte: Próprio autor.

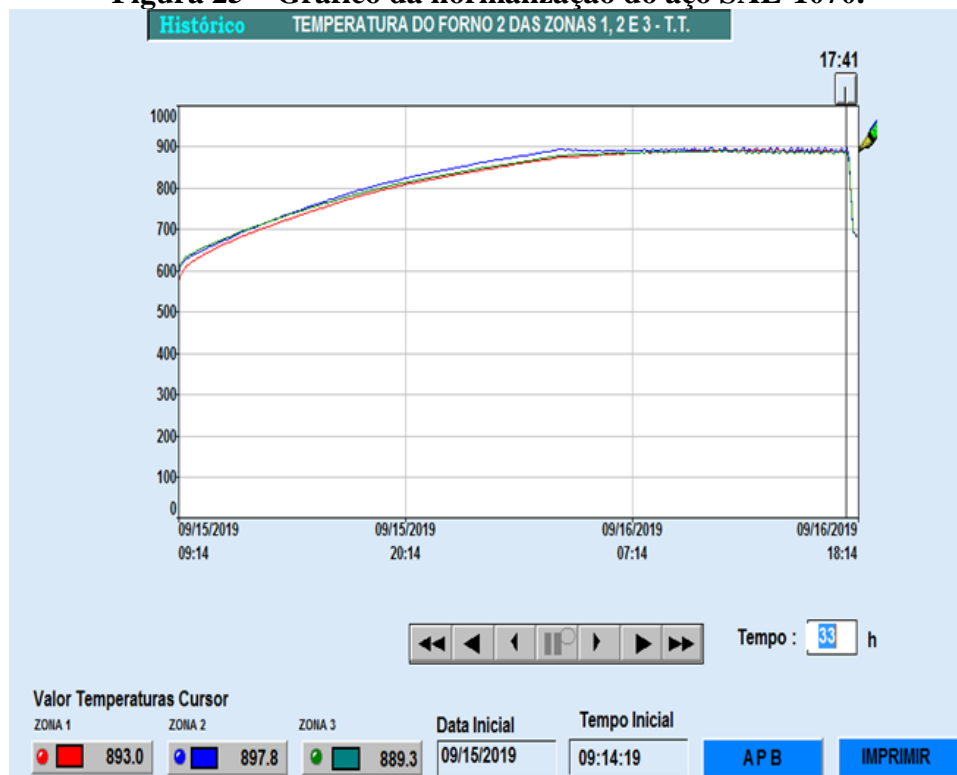
4.4 Tratamento térmico

Após o forjamento, a peça passou pelo tratamento térmico de normalização com o objetivo de refinar e uniformizar a microestrutura, contribuindo para uma melhora da resistência mecânica e tenacidade da peça tratada. O resfriamento que a peça passa após a normalização é ao ar.

A normalização foi realizada seguindo a norma da empresa. Para realizar o tratamento térmico utilizou-se o forno a gás do fabricante Pyro, com capacidade máxima de 17000 quilogramas e temperatura de trabalho variando entre 300°C a 1000°C. O forno apresenta as seguintes dimensões: 1300 metros de altura, 1820 metros de largura e 6900 metros de comprimento e o combustível utilizado foi gás natural.

O aço SAE-1070 foi então normalizado, conforme registrado na imagem do gráfico da Figura 25, na temperatura de 890°C, por um período de 13,2 horas, que só começa a ser contado quando o forno atinge a temperatura considerada acima da zona crítica para esse aço. Em seguida a peça é resfriada em temperatura ambiente ao ar de forma natural.

Figura 25 – Gráfico da normalização do aço SAE-1070.



Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros do tratamento térmico executado foram registrados pelo computador e são mostrados na Figura 26.

Figura 26 – Parâmetros do tratamento térmico.

PARÂMETROS DO TRATAMENTO TÉRMICO	
FORNO Nº	FGTT2
TEMPERATURA(°C)	890°C
PATAMAR (HS.)	13,2 horas
MEIO RESFRIAMENTO	AO AR / THE AIR
TEMPERATURA MEIO	'.....'

1) INICIO DE AQUECIMENTO - 9:14 h

2) INÍCIO DE PATAMAR 4:30 h

**3) RETIRADA DO PEDIDO - FJ-28307 PARA
RESFRIAMENTO AO AR 17:41 h**

Fonte: Próprio autor.

4.5 Ensaios

4.5.1 Ultrassom

Para verificar a eficiência do caldeamento dos defeitos em cada redução foi feito o exame de ultrassom conforme ASTM A388/388M-18.

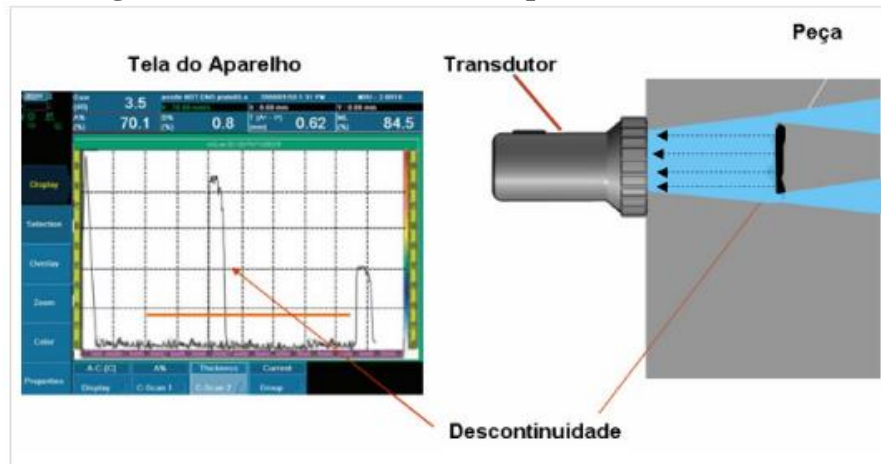
O método de ultrassom de Eco de Fundo é feito no lingote quando a mesma chega à empresa e antes da peça ser expedida. O aparelho utilizado foi o MITHEC MF800C, sendo que o ensaio foi feito seguindo a norma citada. Realizou-se o ultrassom inicial utilizando cabeçote na faixa de frequência de 0,5MHz à 1MHz, pois o mesmo chega com aspecto grosseiro e heterogêneo sendo difícil identificar as descontinuidades. Após passar pelos processos de forjamento e tratamento térmico a frequência utilizada variou de 1MHz à 2MHz.

Na superfície foi usado o acoplante carbox metil celulose diluído em água que ajuda na realização do ensaio por criar uma camada isolante entre a peça e o ambiente, o que facilita a passagem da vibração emitida durante o ensaio. O operador passou o cabeçote do equipamento pela superfície sem exceder a velocidade de 150 mm/s, para que o escaneamento fosse eficaz.

A AWI Service – Inspeção Industrial (2018) explica que a onda ultrassônica percorre o meio, no caso a peça forjada, e vai refletir ao incidir em uma descontinuidade ou falha interna enviando o sinal ao aparelho, conforme Figura 27. Caso nenhuma descontinuidade seja

encontrada a mesma onda ultrassônica emitida pelo cabeçote, também conhecido como transdutor, retorna para ele e nenhum pico é registrado na tela.

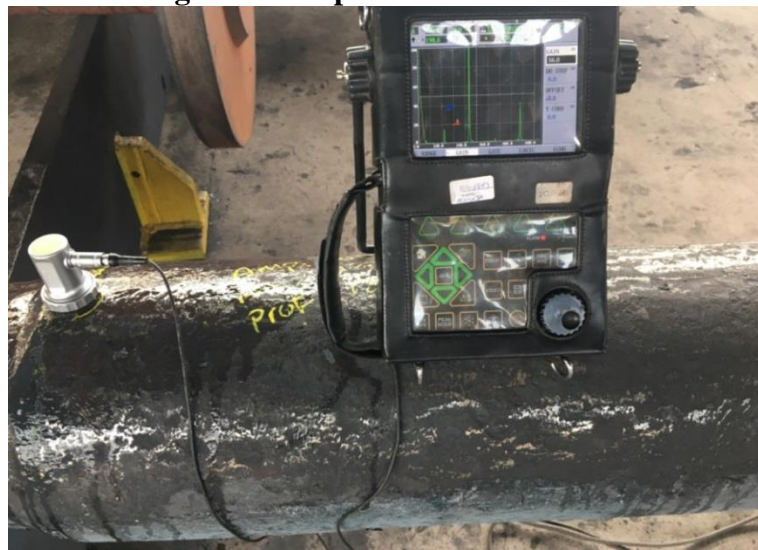
Figura 27 – Funcionamento do aparelho de ultrassom.



Fonte: AWI SERVICE – INSPEÇÃO INDUSTRIAL, 2018.

A margem esquerda da tela indica a superfície da peça por onde o cabeçote passa, enquanto a margem direita indica a superfície oposta. Portanto qualquer indicação entre esses pontos indica a existência de uma descontinuidade no interior da peça, podendo a mesma estar ou não próxima à superfície da mesma. Essas informações foram recebidas do cabeçote, que passou por toda extensão da peça durante a realização do ensaio, conforme Figura 28.

Figura 28 – Aparelho de ultrassom.



Fonte: Próprio autor.

4.5.2 Ensaio de dureza Brinell

O ensaio foi executado segundo a norma ASTM E10-18. A medição foi feita com o auxílio de um durômetro portátil Brinell. A leitura do diâmetro das impressões nesse durômetro foi realizada com lupa graduada com ampliação mínima de 2,5 vezes e escala de 0,01 milímetros.

A superfície em que o teste foi feito passou pelo processo de desbaste, com profundidade entre 4,0-5,0 mm, para que não houvesse influência da região de descarbonetação devido ao tratamento térmico. Foram feitas medições nas duas extremidades da peça, uma na maior seção e outra na menor.

Para o desbaste utilizou-se um rebolo para desbaste e, em seguida, foi feito um acabamento com disco do tipo Flap com uma granulometria igual o maior que #80 até ser obtida uma superfície livre de ranhuras e ressaltos, de forma que a marca de indentação fosse claramente visualizada e medida.

Para realizar a indentação deve-se garantir a perpendicularidade entre o equipamento e a peça. Essa foi posicionada entre o anteparo e a unidade hidráulica, sem deslocamento do durômetro, em seguida a unidade hidráulica desceu até encostar-se à peça. A válvula de liberação da pressão foi fechada, enquanto a alavanca hidráulica foi movimentada por um tempo de 8 segundos, alcançando um valor de força igual a 3000 Kg. Essa força foi mantida por 15 segundos e a válvula de controle de pressão foi aberta de forma controlada para que não houvesse choque ou vibração.

As calotas foram feitas utilizando penetrador esférico com diâmetro de 10 milímetros e em seguida foram medidas posicionando-se lupa sobre a região de indentação, fornecendo o diâmetro da calota. Para saber qual valor de dureza Brinell o diâmetro encontrado correspondente utilizou-se a Figura 29, que fornece os valores de dureza Brinell em função de um diâmetro \emptyset , em milímetros.

Figura 29 – Dureza Brinell em função do diâmetro da impressão.

Ø	HB	Ø	HB	Ø	HB	Ø	HB
3,06	398	3,49	304	3,92	239	4,35	192
3,07	395	3,50	302	3,93	237	4,36	191
3,08	393	3,51	300	3,94	236	4,37	190
3,09	390	3,52	298	3,95	235	4,38	189
3,10	388	3,53	297	3,96	234	4,39	188
3,11	385	3,54	295	3,97	232	4,40	187
3,12	383	3,55	293	3,98	231	4,41	186
3,13	380	3,56	292	3,99	230	4,42	185
3,14	378	3,57	290	4,00	229	4,43	185
3,15	375	3,58	288	4,01	228	4,44	184
3,16	373	3,59	286	4,02	226	4,45	183
3,17	370	3,60	285	4,03	225	4,46	182
3,18	368	3,61	283	4,04	224	4,47	181
3,19	366	3,62	282	4,05	223	4,48	180
3,20	363	3,63	280	4,06	222	4,49	179
3,21	361	3,64	278	4,07	221	4,50	179
3,22	359	3,65	277	4,08	219	4,51	178
3,23	356	3,66	275	4,09	218	4,52	177
3,24	354	3,67	274	4,10	217	4,53	176
3,25	352	3,68	272	4,11	216	4,54	175
3,26	350	3,69	271	4,12	215	4,55	174
3,27	347	3,70	269	4,13	214	4,56	174
3,28	345	3,71	268	4,14	213	4,57	173
3,29	343	3,72	266	4,15	212	4,58	172
3,30	341	3,73	265	4,16	211	4,59	171
3,31	339	3,74	263	4,17	210	4,60	170
3,32	337	3,75	262	4,18	209	4,61	170
3,33	335	3,76	260	4,19	208	4,62	169
3,34	333	3,77	259	4,20	207	4,63	168
3,35	331	3,78	257	4,21	205	4,64	167
3,36	329	3,79	256	4,22	204	4,65	167
3,37	326	3,80	255	4,23	203	4,66	166
3,38	325	3,81	253	4,24	202	4,67	165
3,39	323	3,82	252	4,25	201	4,68	164
3,40	321	3,83	250	4,26	200	4,69	164
3,41	319	3,84	249	4,27	199	4,70	163
3,42	317	3,85	248	4,28	198	4,71	162
3,43	315	3,86	246	4,29	198	4,72	161
3,44	313	3,87	245	4,30	197	4,73	161
3,45	311	3,88	244	4,31	196	4,74	160
3,46	309	3,89	242	4,32	195	4,75	159
3,47	307	3,90	241	4,33	194	4,76	158
3,48	306	3,91	240	4,34	193	4,77	158

Fonte: Adaptada de ASTM E10-18.

Essa figura foi obtida a partir da norma ASTM E10-18, sendo adaptada à realidade do aço e tratamento térmico adotados nesse trabalho. Portanto, nem todos os valores de conversão presentes na tabela foram apresentados no trabalho, utilizando apenas a parte necessária da mesma que abrange valores mais próximos dos que poderiam ser encontrados para a situação tratada.

4.5.3 Ensaio de tração

Ensaio de tração foram realizados à temperatura ambiente, utilizando corpos de prova confeccionados conforme norma ASTM A 370-18.

4.5.3.1 Confeção dos corpos de prova

Para serem usinadas e transformadas em corpos de provas para realização do ensaio de tração, as amostras foram retiradas da peça com comprimento mínimo de 150 milímetros, conforme Figura 30, na serra de fita do fabricante Franho, modelo SFC 660A.

Figura 30 – Pedacos retirados da peça para confecção de corpo de prova.

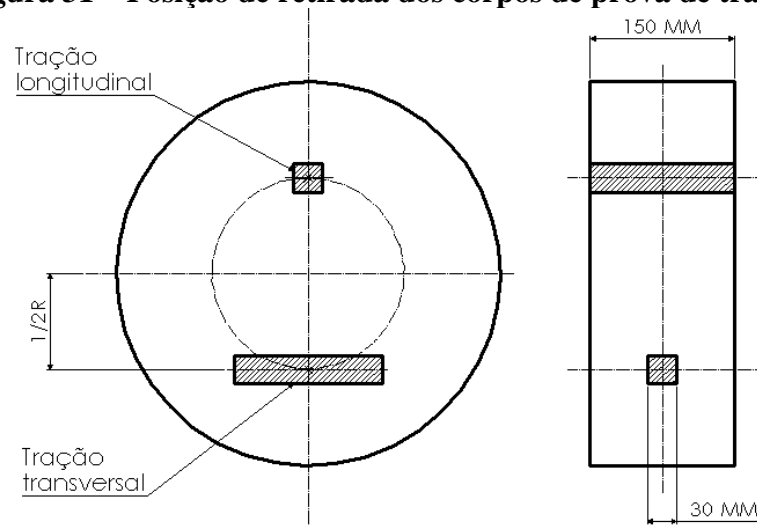


Fonte: Próprio autor.

De cada uma dessas quatro amostras de 150 milímetros foram confeccionados dois corpos de prova para avaliar os resultados cada redução de área proposta. Um foi retirado no sentido longitudinal da peça, ou seja, no sentido do fibramento, enquanto o outro foi retirado no sentido transversal, como mostrado na Figura 31. Ambos foram retirados na região da metade do raio.

Para cada condição de redução, apenas um corpo de prova de tração foi retirado das seções longitudinal e transversal do aço SAE 1070 devido à limitação de quantidade de material fornecido pela empresa.

Figura 31 – Posição de retirada dos corpos de prova de tração.



Fonte: Próprio autor.

No caso desse trabalho foram feitos corpos de prova seguindo as dimensões do modelo 1 da Tabela 5.

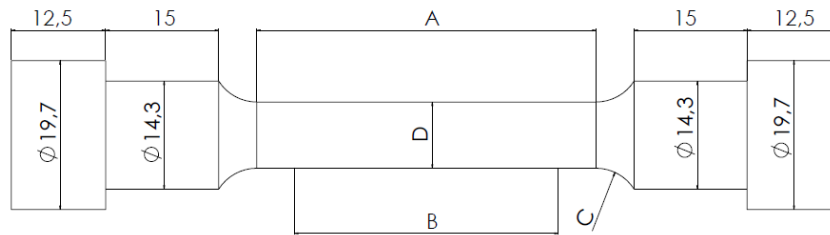
Tabela 5 – Dimensional e tolerância conforme norma ASTM A 370-18.

	ASTM A 370			
	1	2	3	4
A	60 mm	45 mm	32 mm	20 mm
B	50(±0,10) mm	35(±0,10) mm	25(±0,10) mm	16(±0,10) mm
C	10 mm	6 mm	5 mm	4 mm
D	12,5 (±0,25) mm	8,75 (±0,18) mm	6,25 (±0,12) mm	4 (±0,08) mm

Fonte: ASTM A 370-18.

Após a usinagem, o corpo de prova ficou com as dimensões, em milímetros, conforme mostrado na Figura 32, seguindo os valores orientados pela norma ASTM A 370-18.

Figura 32 – Dimensões do corpo de prova de tração.



Fonte: Adaptado de ASTM A 370-18.

Os valores de A,B,C e D são retirados da norma ASTM A 370-18, devendo seguir um dos quatro modelos propostos pela norma, mencionados na tabela já citada.

Após definidas as dimensões iniciou-se a usinagem do corpo de prova em um torno convencional modelo MS 205 FO KGQ 512. A primeira etapa foi fazer o furo de centro, com rotação de 1000 RPM, e em seguida fez o primeiro desbaste com rotação de 500 RPM.

Em seguida iniciou-se a usinagem, com rotação de 1000 RPM, para atingir as dimensões desejadas. Utilizando um micrômetro externo analógico 0,01 mm foi verificado o dimensional do corpo de prova. Para finalizar, o acabamento final foi feito através do lixamento manual usando granulações de lixas de forma decrescente, com os respectivos números: 80,120,220, com a rotação sugerida de 1250 à 1600 RPM .

Assim foram obtidos os oito corpos de prova, mostrados na Figura 33, utilizados para realizar o ensaio.

Figura 33 – Corpos de prova de tração.



Fonte: Próprio autor.

4.5.3.2 Realização do ensaio

O ensaio foi realizado na Máquina de tração MTL-001 modelo UVT 20tf do fabricante Kratos Equipamentos Ind. Ltda e o software utilizado é o Kratos. A velocidade de ensaio lida no Kratos foi de 10,0 N/mm²/s, baseado na Norma ASTM A 370-18.

Inicialmente, conferiu-se o dimensional dos corpos de prova estava de acordo com a norma. Em seguida, o corpo de prova foi inserido à máquina de ensaio de tração e feita a colocação do extensômetro. No software Kratos é necessário inserir algumas informações do corpo de prova: diâmetro externo (diâmetro inicial) e o comprimento inicial.

Após a ruptura mediu-se o comprimento e diâmetro final do corpo de prova para o cálculo das propriedades mecânicas. Esses dados ficam registrados junto com os corpos de prova caso seja necessário conferir os cálculos, uma vez que a máquina do ensaio de tração já fornece esses resultados.

Utilizando esses dados a própria máquina de ensaio de tração calcula e fornece os seguintes dados: limite de resistência à tração (RT), o limite de escoamento (LE), alongamento (AL) e a estrição (RA).

4.5.4 Ensaio de impacto

Ensaio de impacto foram realizados com uso de corpos de prova do tipo Charpy, conforme norma ASTM E23-18.

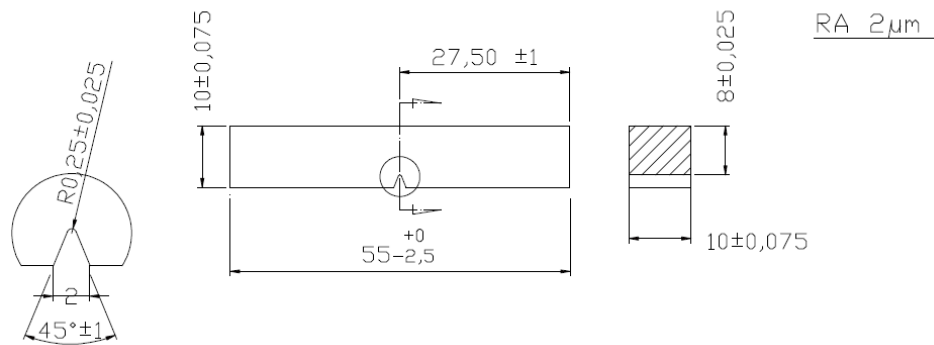
4.5.4.1 Confecção dos corpos de prova

As amostras retiradas da peça para o ensaio de impacto foram cortadas com dimensões de 15 milímetros de espessura e 55 milímetros de comprimento na serra de fita Franho, sendo retiradas das amostras de 150 milímetros tirado da peça para realizar ensaio de tração.

Essa amostra foi então colocada na fresa planetária modelo FER40A3PRE do fabricante AtlasMaq e usinada até atingir a dimensão de 10 milímetros de espessura e 55 milímetros de comprimento. Com auxílio de um micrômetro externo analógico 0,01 mm conferiu-se as dimensões da espessura do corpo de prova e utilizando um paquímetro universal quadridimensional verificou o comprimento.

Nesse caso foi utilizada a brochadeira “V” entalhe “V”. As dimensões do corpo de prova, em milímetros, foram baseadas na norma da ASTM E23-18, conforme Figura 34.

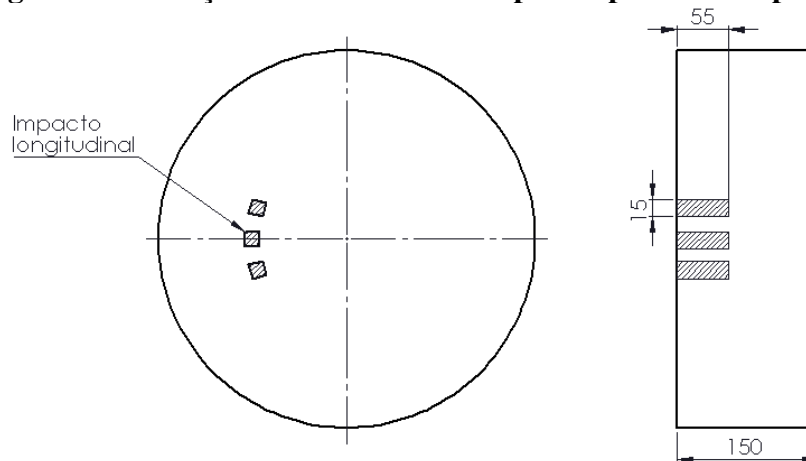
Figura 34 – Dimensões do corpo de prova de impacto.



Fonte: Adaptado de ASTM E23-18.

Os corpos de prova de impacto também foram retirados das amostras utilizadas para os de tração, da Figura 28. A forma como eles foram retirados está representada na Figura 35.

Figura 35 – Posição de retirada dos corpos de prova de impacto.



Fonte: Próprio autor.

Para cada redução proposta foram retirados três corpos de prova, conforme Figura 36, no sentido longitudinal.

Figura 36 – Corpos de prova de impacto.



Fonte: Próprio autor.

4.5.4.2 Realização do ensaio

Primeiro, com o auxílio da mesa ordenada, foi verificada a dimensão do entalhe. Em seguida instalou-se o cutelo, com raio de 8 milímetros, na máquina de impacto e zerou o ponteiro da máquina. O corpo de prova foi então posicionado no batente da máquina, com o auxílio de uma pinça, e o pêndulo é liberado em direção ao corpo de prova batendo no lado contrário ao do entalhe.

Para obter o resultado em Joule é feita a conversão, uma vez que a leitura realizada na máquina foi em “kilopond meter” (kpm). No caso da máquina utilizada a leitura varia de 0 a 30 kpm com divisão de 0,2 kpm.

O ensaio foi feito seguindo a ASTM A 370-18, respeitando a velocidade de ensaio com uma variação de 4,9-5,8 m/s, realizado em temperatura ambiente na Máquina de impacto (PÊNDULO) MIL-001 do fabricante WOLPERT modelo PW-30/15K. O tempo de posicionamento do corpo de prova, acionamento do pêndulo e a ruptura do corpo de prova foram de 5 segundos.

4.5.5 Macrografia

O ensaio de macrografia foi realizado conforme a norma ASTM E 381-17. O teste teve como objetivo visualizar a homogeneidade da amostra e a deformação dendrítica. Para realização do ensaio foi cortado, com auxílio da serra de fita, um disco na superfície da peça com espessura de 20 milímetros da seção transversal da peça. Esse disco teve sua superfície lixada com disco de acabamento para possibilitar um melhor ataque químico. Então foi feito

um ataque químico com uma mistura de 1:1 de ácido clorídrico e água, durante uma hora a 100°C, para evidenciar a macroestrutura característica da amostra.

A macrografia foi realizada em recipiente de vidro que resiste ao ataque do reagente de corrosão. O volume de solução colocado no recipiente tinha uma camada de 25 milímetros, suficiente para cobrir a amostra. Após o tempo citado, a amostra foi removida da solução, tomando cuidado para não danificar a superfície da amostra. Em seguida, removeu-se a sujeira que se forma na superfície da amostra, esfregando com uma escova dura de fibra sintética em água corrente. Depois que a sujeira foi removida lavou-se a amostra em água corrente e secou utilizando um secador.

O melhor momento para o exame, que é feito sem auxílio de lentes amplificadoras, é imediatamente após a secagem, enquanto a amostra ainda não sofreu corrosão devido ao contato com o ar atmosférico.

Para efeito comparativo foi retirada, ainda na matéria prima, uma fatia de 20 milímetros do aço com o objetivo de realizar macrografia na superfície da mesma para avaliar a influência do forjamento na deformação da estrutura dendrítica.

4.5.6 Microinclusão

Ensaio de microinclusão realizado conforme a norma ASTM E 45-18a. Essa norma possui uma equivalente em português na norma NBR NM 88.

O ensaio de microinclusão foi realizado com o objetivo de analisar a quantidade do conteúdo não-metálico no aço forjado. O método utilizado requer corpos de prova cortados no sentido longitudinal ou paralelo à direção do forjamento. A superfície polida do corpo de prova a ser ensaiado tinha área de aproximadamente 160 mm² e era paralelo à direção de deformação do produto.

Métodos microscópicos são usados para caracterizar os tipos de inclusões e sua morfologia em uma superfície previamente polida. As inclusões são classificadas em quatro categorias, conforme Tabela 6, conhecidas como Tipo A, B, C e D, que é baseado em sua morfologia e duas subcategorias baseadas em sua largura ou diâmetro (série fina e grossa).

Tabela 6 – Tipo de morfologia.

Tipo	Morfologia
A	Sulfeto
B	Aluminato
C	Silicato
D	Óxido globular

Fonte: ASTM E 45-18a.

As amostras analisadas foram retiradas na superfície, a $\frac{1}{2}$ raio e no centro, com 160 mm² de área cada. Para que fossem obtidas classificações de inclusão satisfatórias e consistentes, a amostra tinha uma superfície polida livre de corrosão, material estranho e arranhões.

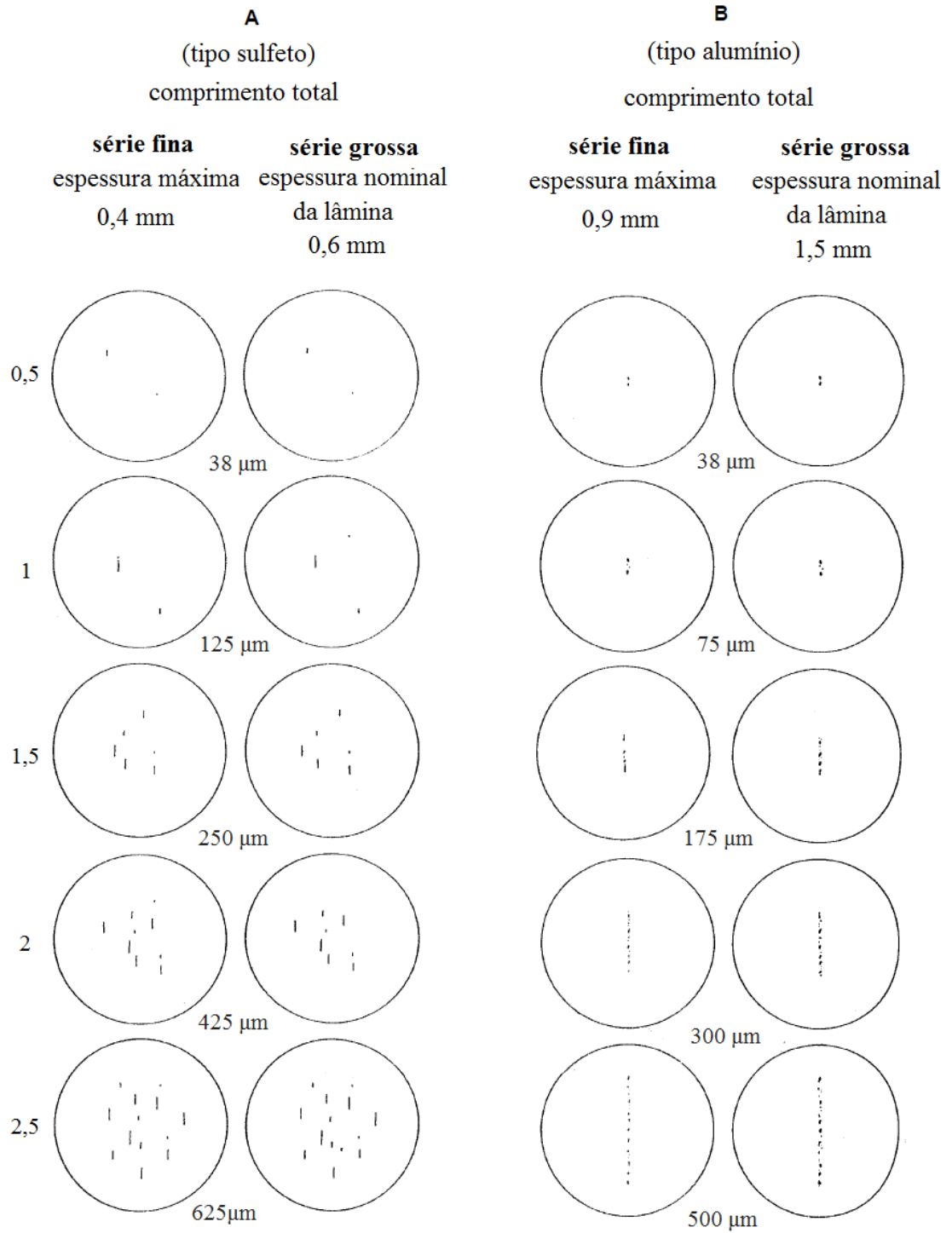
As amostras foram preparadas e comparadas aos campos quadrados de referência retirados da norma NBR NM 88, conforme Figura 37, para identificar qual tipo de inclusão e a qual série ela pertence. Então foi definido se a inclusão era do Tipo A, B, C ou D, da série fina ou grossa e qual o nível de severidade: 0,5; 1; 1,5; 2 e 2,5.

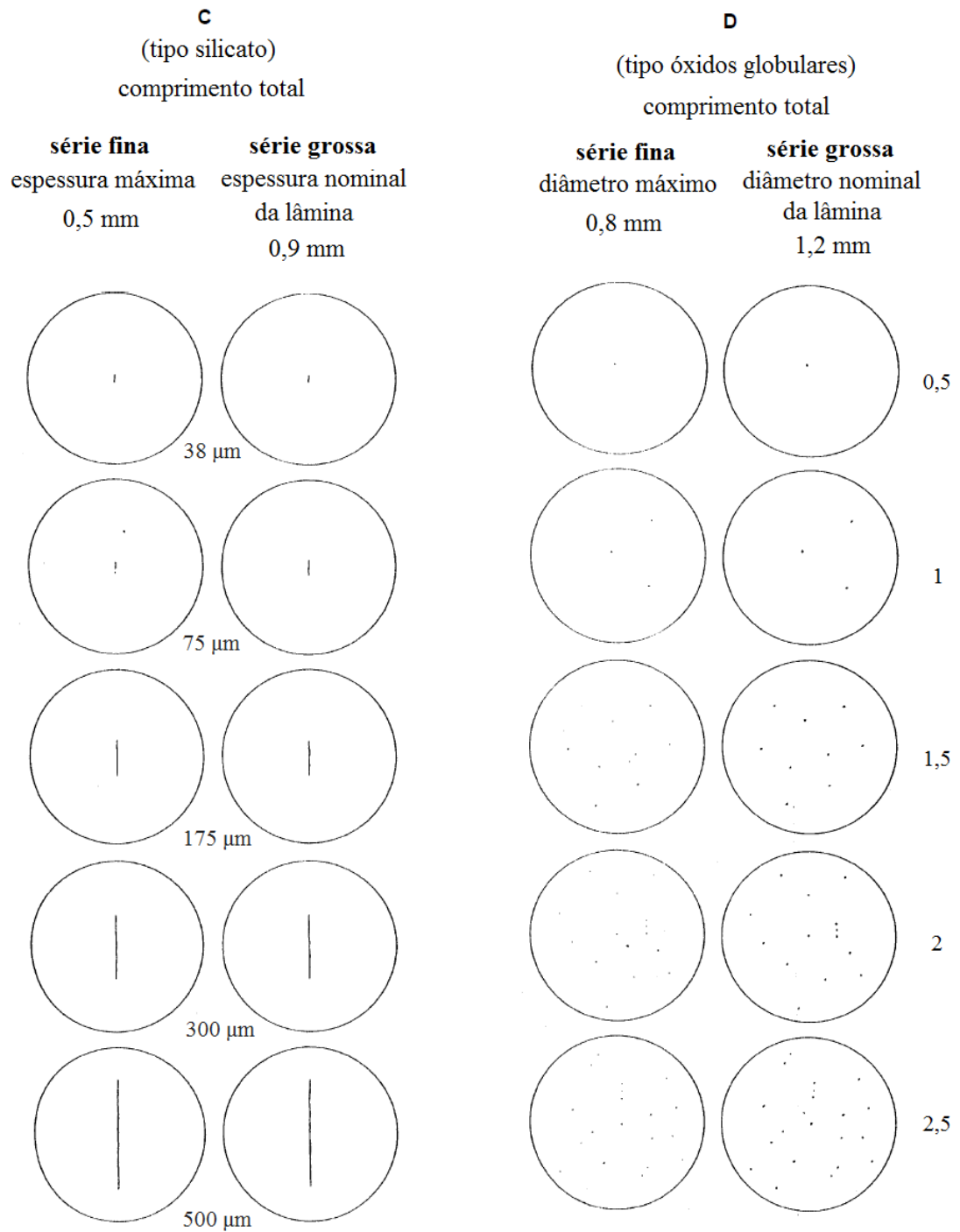
A preparação consistiu em lixar as amostras seguindo uma sequência de lixas metalográficas começando por #100 e seguindo a seguinte sequência: #240, #320, #400, #600 e #1200. Ao mudar de uma lixa para outra a direção de lixamento mudou de 90°. As amostras foram lavadas utilizando álcool antes de passar para etapa seguinte.

Após esse processo, as amostras passaram pelo polimento sobre disco giratório com pano de polimento, no qual foi aplicada uma fina camada de abrasivo, sendo utilizada a pasta de diamante com 3 μ m e depois 1 μ m. Ao final desse processo, a amostra foi lavada com água e um pouco de detergente líquido com o auxílio de um pedaço de algodão. A mesma foi seca por um algodão com álcool e jato de ar quente, utilizando secador, evitando as manchas de secagem.

A superfície polida do corpo de prova, com aproximadamente 160 mm², foi examinada com o uso de um microscópio Olympus – GX41, com ampliação de 100 vezes e um campo de observação quadrado de 0,71 milímetros de lado, com área aproximada de 0,50mm².

Figura 37 – Lâminas de referência de inclusão segundo ASTM E 45-18a.





Fonte: Adaptado de NBR NM 88NM88, 2000.

4.5.7 Micrografia

A análise de micrografia (microestrutura) conforme a norma ASTM E 112-13.

As amostras foram preparadas durante o ensaio de microinclusão e depois as mesmas sofrem um ataque químico para que seja possível visualizar a microestrutura.

O ataque químico foi realizado com o uso do reativo químico Nital 2%, consistindo o mesmo em uma solução de ácido nítrico a 2% em álcool etílico. A superfície de cada amostra fica em contato com a solução por 10 segundos. As amostras então foram lavadas com álcool e secadas com auxílio de um secador para depois serem levadas para o microscópio com ampliação de 100 vezes.

5 RESULTADOS

5.1.1 Ultrassom

O ultrassom foi realizado em cada seção da peça, ou seja, com barras com diâmetros de 265 mm, 230 mm, 209 mm e 177 mm, sendo observado na tela do aparelho o gráfico mostrado no primeiro quadrante. Ao realizar esse ensaio não destrutivo foi possível identificar a descontinuidade que o material possuía de forma eficaz e sem causar danos no mesmo.

Como pode ser observado na tela do ultrassom registrado na Figura 38, na redução 3:1 o aparelho mostrou um pico. Isso indicou que o sinal emitido pelo cabeçote encontrou alguma descontinuidade interna, uma vez que o sinal não conseguiu se propagar por toda extensão do diâmetro da peça voltando para o cabeçote, que registrou esse retorno.

O fato de o pico estar localizado no centro, entre as duas margens da tela, mostra que essa descontinuidade estava presente na região central da peça. Esse resultado indica que o processo de caldear o defeito, ou seja, ocasionar uma deformação em compressão por forjamento, não foi eficaz para esse valor de redução 3:1. A descontinuidade registrada pelo ultrassom tinha comprimento de 20 milímetros estava localizada a uma distância de 128 milímetros da superfície da peça, conforme indicado no eixo x da figura citada.

Figura 38 – Ultrassom da seção com redução 3:1.



Fonte: Próprio autor.

Os picos que apareceram no primeiro quadrante da tela do aparelho de ultrassom, em todos os ensaios realizados nas diferentes reduções, foram indicados com uma seta. Os picos que aparecem no outro quadrante da tela são chamados de ruídos, que é um erro de exibição e não pode ser atribuído como uma descontinuidade na peça.

Na redução 4:1 o pico continuou aparecendo, conforme Figura 39, porém estava menor. Isso indica que o sinal emitido propagou mais se comparado ao da redução 3:1, ou seja, a descontinuidade encontrada foi menor que o do primeiro caso. Assim como na redução anterior a falha apareceu no entre as duas margens da tela, indicando que essa continua localizada no centro da peça, a uma distância de 120 milímetros da sua superfície, conforme indicado no eixo x da figura citada. Portanto a descontinuidade continua presente, mas a redução de área maior fez com que ela reduzisse, ficando com 10 milímetros de comprimento e localizada

Figura 39 – Ultrassom da seção com redução 4:1.



Fonte: Próprio autor.

Já na redução 5:1, o ultrassom não reportou nenhuma indicação de falha interna, o que mostra que todos os defeitos existentes nas reduções de 3:1 e 4:1 foram caldeados no forjamento, como observado na Figura 40. Assim como na redução 7:1, Figura 41, que o ultrassom não apontou indicação de falha interna.

Em um estudo feito por Corrêa, Costa e Shaeffer (2014), o ensaio de ultrassom permitiu verificar se havia ou não descontinuidades internas no forjado sem danificar a peça. Foi observado que o esforço compressivo eliminou os pequenos vazios que estavam presentes no material antes do processo de forjamento em matriz aberta, oriundos do processo de fabricação do aço.

Figura 40 – Ultrassom da seção com redução 5:1.



Fonte: Próprio autor.

Figura 41– Ultrassom da seção com redução 7:1.



Fonte: Próprio autor.

Sumarizando os resultados obtidos nos ensaios de ultrassom foi construída a Tabela 8, indicando se foi identificada a presença da descontinuidade e, caso tenha sido identificada, a localização da mesma (posição) em relação a superfície da peça.

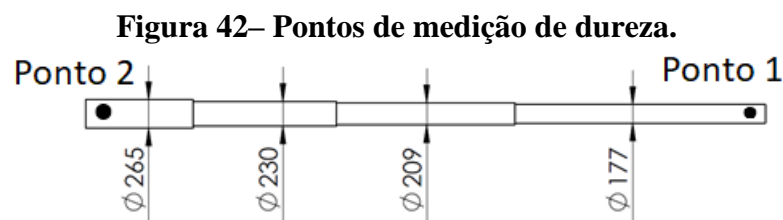
Tabela 7 – Resultados de ultrassom.

Redução de área	Descontinuidade	Posição (mm)
3:1	Sim	128
4:1	Sim	120
5:1	Não	-
7:1	Não	-

Fonte: Próprio autor.

5.1.2 Ensaio de dureza

Os dois pontos de dureza medidos em cada extremidade da barra foram, conforme Figura 42. Nesse caso observou-se que a dureza apresentou uma variação pequena que já era esperada, sendo mais alta no menor diâmetro, uma vez que esse sofreu uma conformação maior podendo ter uma estrutura mais homogênea, como registrado na Tabela 8. Ainda assim ambas as medições estão dentro da faixa esperada para o SAE-1070 normalizado, que varia na faixa de 167 a 229 HB (CHANDLER, 1995).



Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 – Durezas em HB.

Peça	Ponto 1	Ponto 2
Dureza (HB)	223	210

Fonte: Próprio autor.

5.1.3 Ensaio de tração

Os corpos de provas confeccionados foram posicionados na máquina de tração onde foram realizados os testes. A máquina registrou os valores até o momento que os corpos de prova romperam. Na Figura 43 foram apresentados os dois sentidos de corpos de prova retirados da peça, transversal que foi indicado pela letra T e longitudinal indicado pela letra L, para os quatro valores de redução de área adotados neste trabalho.

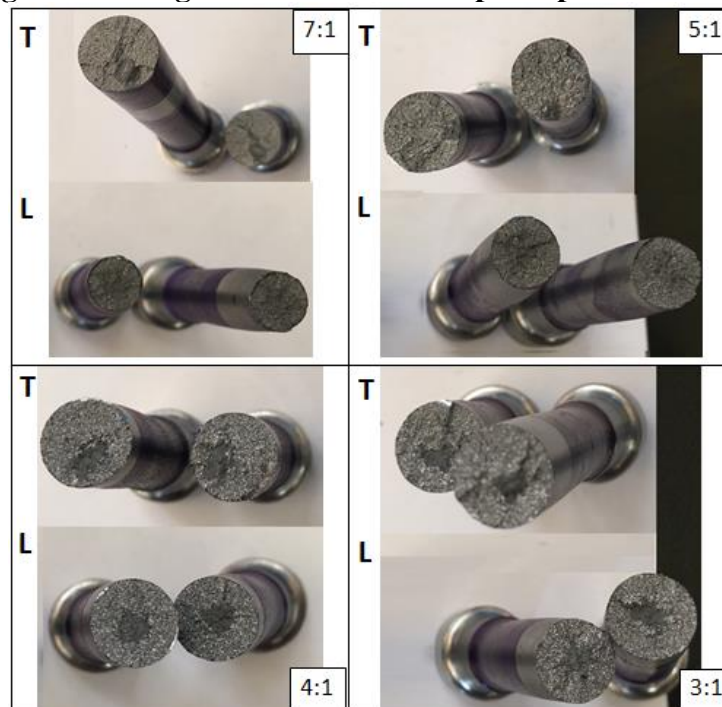
Analisando a região da fratura dos corpos de prova, foi identificada a característica de fratura frágil nos oito corpos de prova, uma vez que o topo da fratura ficou reto pouco profundo, como mostrado na Figura 44. Isso indica que ocorreu pouca deformação plástica, característico de uma fratura frágil.

Figura 43 – Corpos de prova após ensaio de tração.



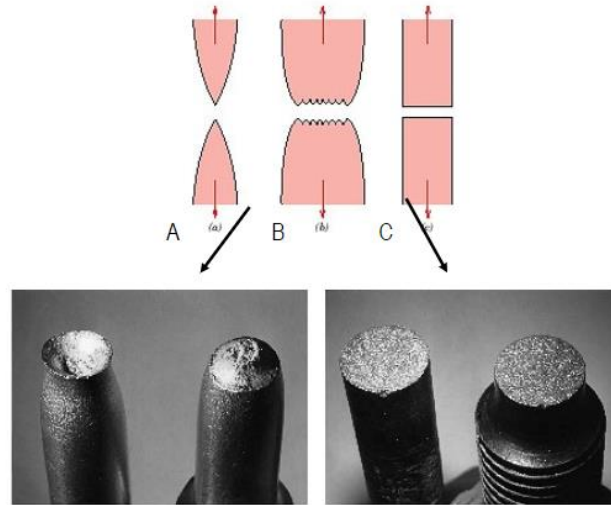
Fonte: Próprio autor.

Figura 44 – Região da fratura do corpo de prova de tração.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 45, Porcaro (2016) é mostrado como seriam os dois tipos de fratura. Comparando com o resultado obtido foi possível concluir que o material SAE-1070 normalizado rompeu como um material frágil.

Figura 45 – Tipos de fratura.

Fratura tipo cone em Al
Fonte: Porcaro, 2016.

Fratura frágil em aço

Os resultados obtidos pelo ensaio de tração foram: limite de resistência à tração (LR), limite de escoamento (LE), alongamento (AL) e redução de área (RA). Os resultados dos corpos de prova longitudinal podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados do ensaio de tração no corpo de prova longitudinal.

Longitudinal				
Redução	LR (MPa)	LE (MPa)	AL(%)	RA(%)
3:1	868.5	418.8	13.4	23.0
4:1	868.7	318.7	13.2	20.7
5:1	811.0	360.0	19.0	32.4
7:1	831.6	412.9	20.2	34.6

Fonte: Próprio autor.

Os resultados dos corpos de prova transversal foram os mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados do ensaio de tração no corpo de prova transversal.

Transversal				
Redução	LR (MPa)	LE (MPa)	AL(%)	RA(%)
3:1	840.4	402.6	10.8	16.0
4:1	828.9	391.7	11.8	17.1
5:1	812.8	366.2	11.0	14.6
7:1	815.9	397.5	8.4	7.1

Fonte: Próprio autor.

Baseando-se em ensaios realizados na empresa e com normas de clientes foram obtidos os valores especificados na Tabela 11. Diante desses valores, os resultados obtidos nesse trabalho seriam aprovados pela empresa.

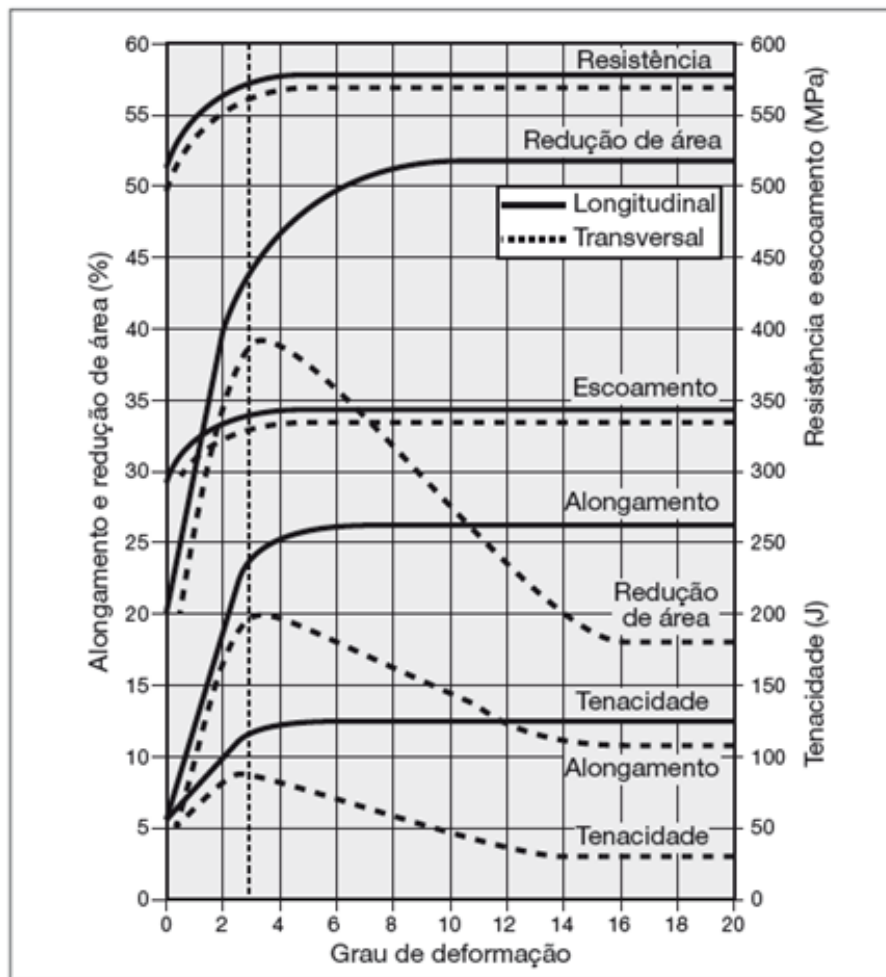
Tabela 11 – Resultados esperados.

Sentido	LR (Mpa)	LE (Mpa)	A(%)	RA(%)
Transversal	≥ 620	≥ 260	≥ 7	-
Longitudinal	≥ 620	≥ 260	≥ 10	-

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 45 é mostrada a variação das propriedades mecânicas em função do grau de deformação no forjamento a quente de um aço Ni-Cr, diferenciando se o ensaio foi realizado no sentido longitudinal ou transversal.

Figura 46 – Influência do grau de deformação nas propriedades mecânicas.

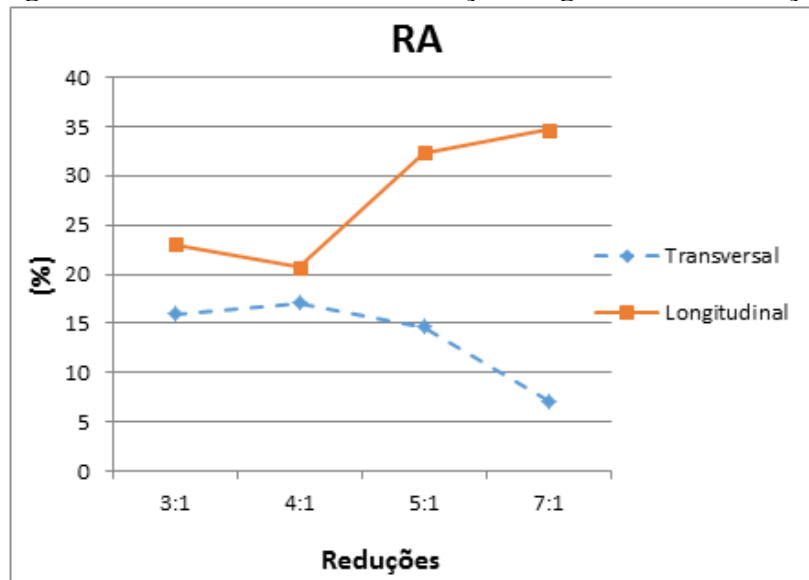


Fonte: COLPAERT, 2008.

De acordo com Colpaert (2008) a tentativa de promover reduções para eliminar as inclusões e caldear vazios provenientes da solidificação provoca significativa alteração macroestrutural, que interferem nas propriedades do material que foram obtidas ao realizar o ensaio.

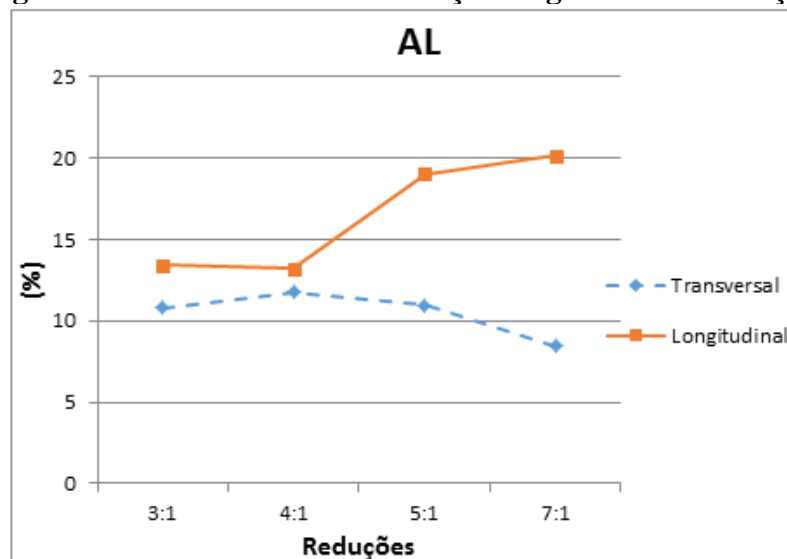
É possível verificar pela análise da Figura 46 que existe uma tendência de redução dos parâmetros RA e AL quanto à ductilidade, que também foi observado de modo similar ao acréscimo da quantidade de redução adotado neste trabalho para o aço SAE-1070, conforme Figura 47 e Figura 48.

Figura 47 – Gráfico de RA em função do grau de deformação.



Fonte: Próprio autor.

Figura 48 – Gráfico de AL em função do grau de deformação.



Fonte: Próprio autor.

Ao analisar os resultados obtidos no ensaio de tração transversal e compará-los com o da Figura 45, que foi a figura de comparação, observa-se que os valores de ductilidade do aço SAE 1070, indicados pelos parâmetros RA (%) e AL (%) quando medidos na seção transversal foram menores que os detectados na seção longitudinal. Esse resultado pode ser associado ao fato de o fibramento ter sido observado no sentido longitudinal, ocasionando assim, menor ductilidade no sentido oposto ao do fibramento.

. Os resultados do ensaio de tração das amostras retiradas no sentido longitudinal foram similares aos percebidos na seção transversal. No entanto, é necessário considerar que fatores externos, como o resfriamento heterogêneo do material devido ao posicionamento do mesmo em relação à passagem de ar ao longo do processo de forjamento, assim como pelo fato de uma peça grande e quente estar posicionada próxima à outra, dificultando assim, tanto a circulação do próprio ar quanto da liberação do calor.

A tensão limite de escoamento, do sentido longitudinal, exibiu uma queda relevante para o valor de redução de 4:1, sendo tal comportamento associado à presença de inclusões que podem ter originado trincas, sendo tais inclusões e trincas detectadas na peça após a realização da análise macrográfica. Ao realizar o ensaio, essas inclusões podem ter dado origem a trincas que causaram a queda desse valor.

O alongamento exibiu acréscimo com o aumento da redução até o valor de 6:1 para em seguida ficar constante, sendo tal comportamento mais evidente ao longo da seção longitudinal por essa seção ter a tendência de assumir uma microestrutura mais refinada com o aumento da redução de área.

A redução de área tende a crescer até uma redução 10:1, de acordo com a figura de comparação. Observou-se uma pequena queda da redução 4:1 que pode ser reflexo da queda que também foi observada no limite de escoamento por causa das inclusões.

Analisando os corpos de prova retirados no sentido transversal, para o limite de resistência à tração na redução de 3:1, observa-se que o valor encontrado foi o mais alto e depois caiu um pouco, podendo ter como causa a presença das inclusões e vazios, porém depois apresenta valores praticamente constantes como o da figura de comparação. A maior queda foi na redução 5:1, assim como no transversal que pode ter sofrido influência de fatores externos.

O escoamento apresentou valores similares para todas as reduções, assim como na figura de referência que, após a redução de 3:1, o valor dessa propriedade mecânica se manteve constante.

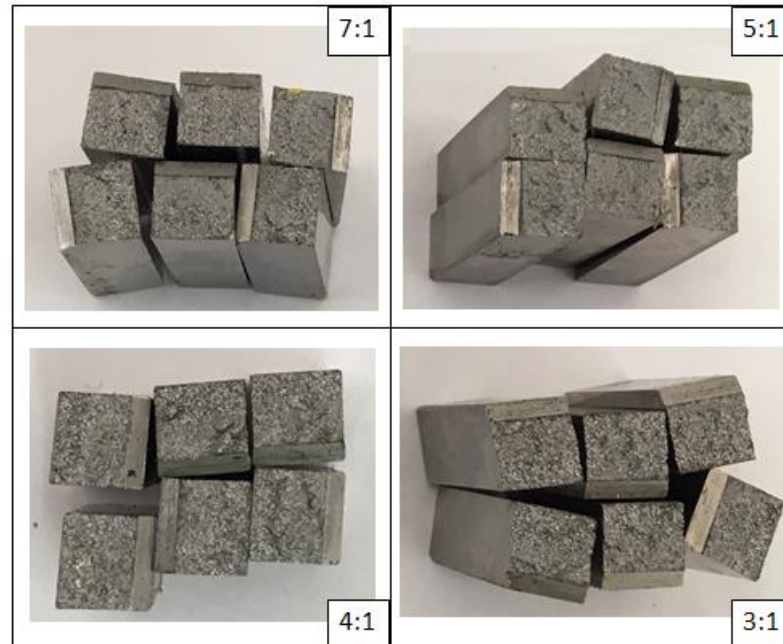
Baseando na figura de comparação, a tendência do alongamento seria de ter um pico na redução entre 3:1 e 4:1 e depois começasse a cair, sendo esse o resultado encontrado. De acordo

com trabalho realizado por Mélo (2016), em uma microestrutura mais refinada assim como pelo aumento da quantidade de redução, a movimentação das linhas de discordâncias tende a ser mais difícil, o que resultará na queda progressiva da ductilidade do material, sendo tal comportamento atribuído principalmente ao endurecimento por deformação plástica (encruamento). A redução de área tem comportamento semelhante ao do alongamento já que também é uma medida de ductilidade. Então o valor cresce até a redução 4:1 e depois começa a cair.

5.1.4 Ensaio de impacto

Os corpos de prova de impacto longitudinal foram posicionados na máquina e após o ensaio foi percebido que, assim como no de tração, a fratura apresentou aspecto de um material frágil, conforme Figura 49.

Figura 49 – Região da fratura do corpo de prova de impacto.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados registrados pela máquina durante o ensaio estão na Tabela 12. Os valores foram baixos, o que já era esperado se tratando de um aço com característica frágil, ou seja, a quantidade de energia absorvida antes do seu rompimento não foi elevada.

Tabela 12 – Resultados do ensaio de impacto.

Posição	Sentido	Redução	Energia absorvida (J)	Média (J)
½ Raio	Longitudinal	3:1	6/6/8	6,67
½ Raio		4:1	6/8/8	7,33
½ Raio		5:1	10/10/12	10,67
½ Raio		7:1	12/14/14	13,33

Fonte: Próprio autor.

5.1.5 Macrografia

5.1.5.1 Macrografia antes do forjamento

O ataque realizado na peça é capaz de revelar a estrutura dendrítica, parte branca, presente no aço, conforme pode ser observado na Figura 50.

Figura 50 – Estrutura dendrítica em um aço.

Fonte: COLPAERT, 2008.

No início do processo foi retirada uma fatia de 20 milímetros para realizar a macrografia. A amostra com dimensão de 200x300 milímetros foi retirada de forma a mostrar a região da superfície, meio raio e centro da peça, sendo possível perceber estruturas dendríticas maiores na região entre o raio e o centro, mostrada na Figura 51.

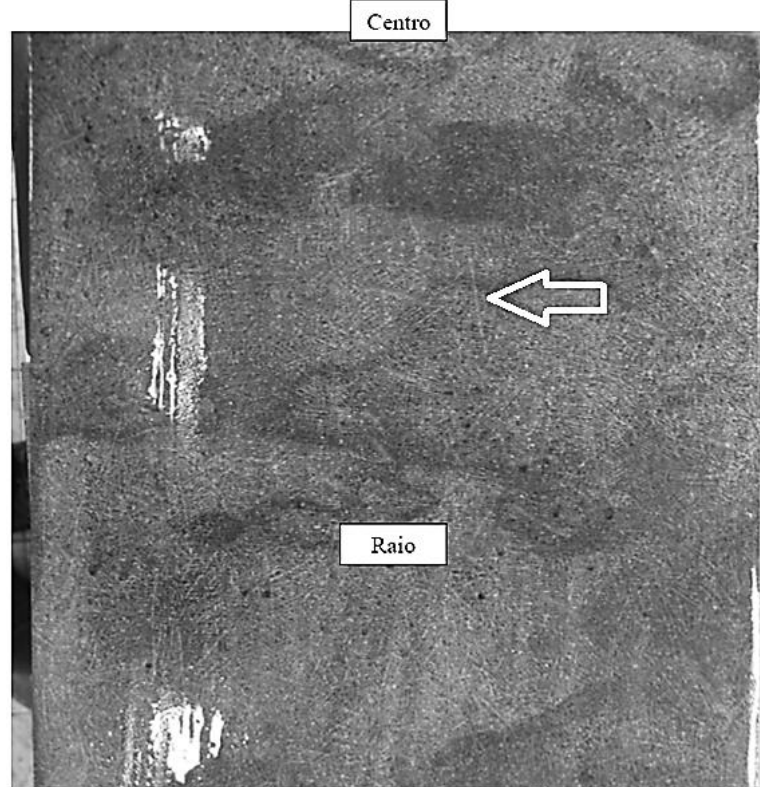
Essas estruturas dendríticas, reveladas após o ataque com ácido clorídrico, são as finas linhas brancas, como a indicada na Figura 52 pela seta branca. Além disso, foi observada uma quantidade maior de segregação próxima ao raio e centro, por serem regiões que demoram mais para solidificar, concentrando essas impurezas presentes na liga metálica. Também é uma região mais propícia de encontrar os vazios de solidificação que ainda não foram caldeados devido à grande quantidade de segregação.

Figura 51 – Macrografia antes do forjamento.



Fonte: Próprio autor.

Figura 52 – Segregação na região do raio e centro.



Fonte: Próprio autor.

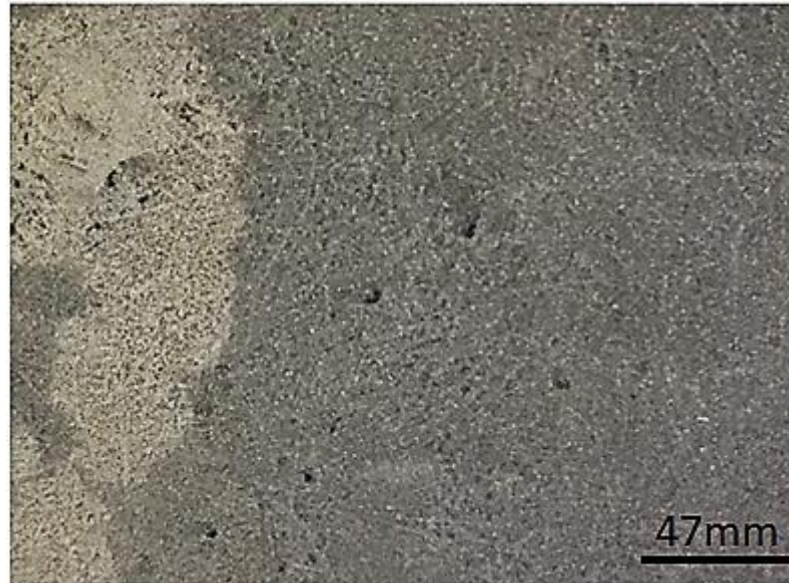
Após o forjamento é esperado que as dendritas sejam deformadas, as segregações expulsas do material e os vazios caldeados.

5.1.5.2 Macrografia após o forjamento

Para efeito comparativo foi feita a macrografia em cada uma das quatro reduções de área, sendo analisado o efeito do forjamento na quebra da estrutura dendrítica, nas inclusões e no caldeamento de vazios.

No disco referente à redução 3:1, Figura 53, observa-se que a estrutura dendrítica ainda está grande quando comparada com as reduções maiores. Porém já não é possível visualizar essa estrutura como se observou na macrografia antes do forjamento.

Figura 53 – Dendritas na redução 3:1.



Fonte: Próprio autor.

Além disso, no centro do disco, que corresponde ao centro do lingote, ainda pode ser observada a presença de inclusões que nessa redução ainda se encontram no centro do disco e também vazios pequenos, conforme Figura 54. Porém isso já era esperado uma vez que no ultrassom já havia sido identificado a presença de vazios. Os vazios se diferenciam das inclusões devido ao seu formato, eles possuem formato mais circular enquanto as inclusões não têm uma forma definida.

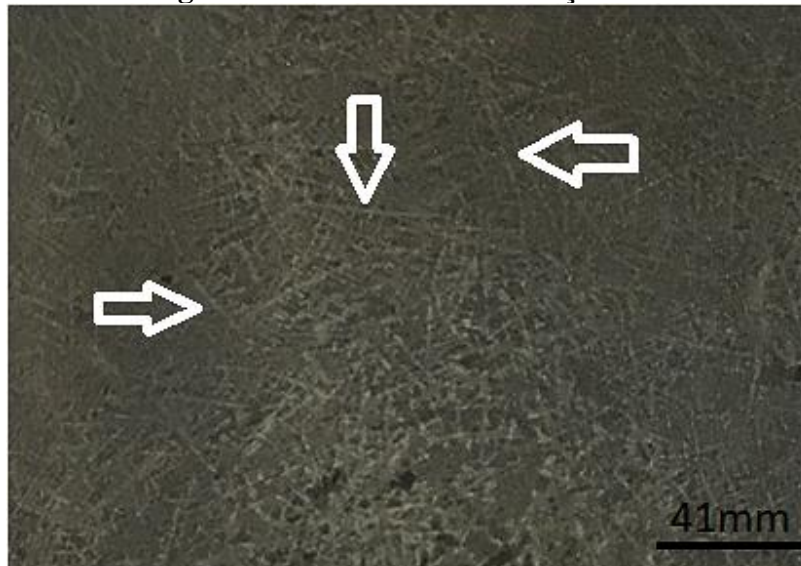
Figura 54 – Macrografia da redução 3:1.



Fonte: Próprio autor.

Analisando o disco retirado da parte da peça que sofreu redução 4:1 ainda foi encontrada uma estrutura dendrítica grande, como percebido pela indicação das setas na Figura 55. O ataque com ácido realizado nessa redução foi mais eficiente que na anterior, revelando melhor as dendritas, sendo mais fácil visualiza-las.

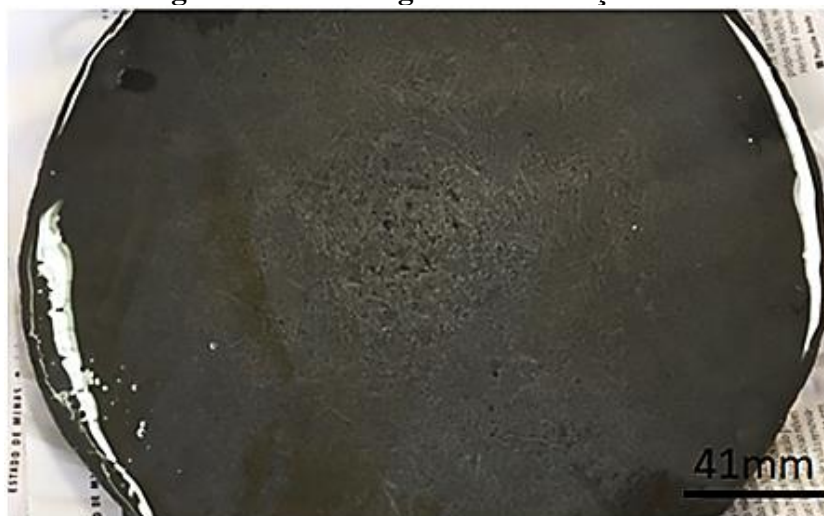
Figura 55 – Dendritas na redução 4:1.



Fonte: Próprio autor.

Inclusões e vazios na região central, Figura 56, continuam presentes nessa redução, o que também foi verificado quando foi feito o ultrassom.

Figura 56 – Macrografia da redução 4:1.

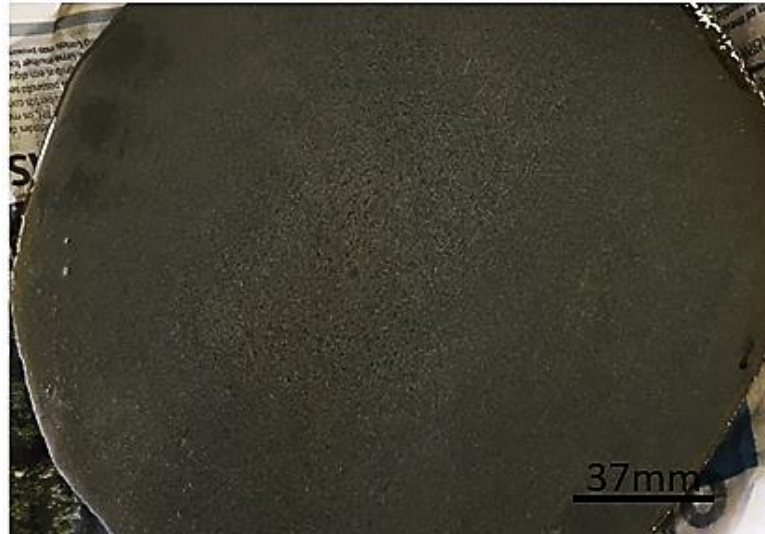


Fonte: Próprio autor.

A redução 5:1 apresentou um resultado considerado melhor que o das reduções anteriores. A estrutura dendrítica foi bem deformada durante o forjamento e após o ataque foi

difícil identificá-las por já estarem em um tamanho reduzido, como pode ser observado na Figura 57. Na região central do disco pode ser observado que a estrutura apresenta quantidade de inclusão reduzida, indicando que o as mesmas podem ter sido quebradas ou deformadas durante os esforços compressivos não sendo possível visualizá-las na redução 5:1 realizando apenas uma análise visual sem lente de aumento.

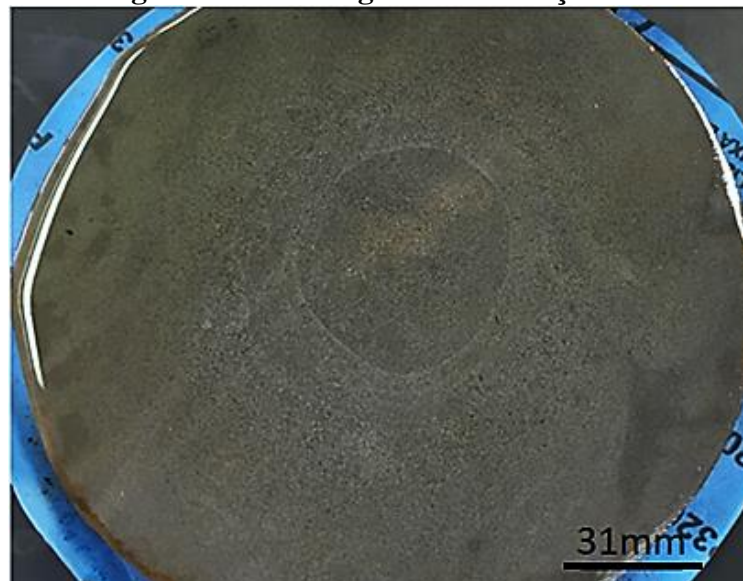
Figura 57 – Macrografia da redução 5:1.



Fonte: Próprio autor.

Por fim, na redução 7:1, praticamente não é mais possível identificar a presença de estrutura dendrítica, que foram quebradas durante o processo de forjamento. Conforme observado na Figura 58, a quantidade de inclusões também reduziram.

Figura 58 – Macrografia da redução 7:1.



Fonte: Próprio autor.

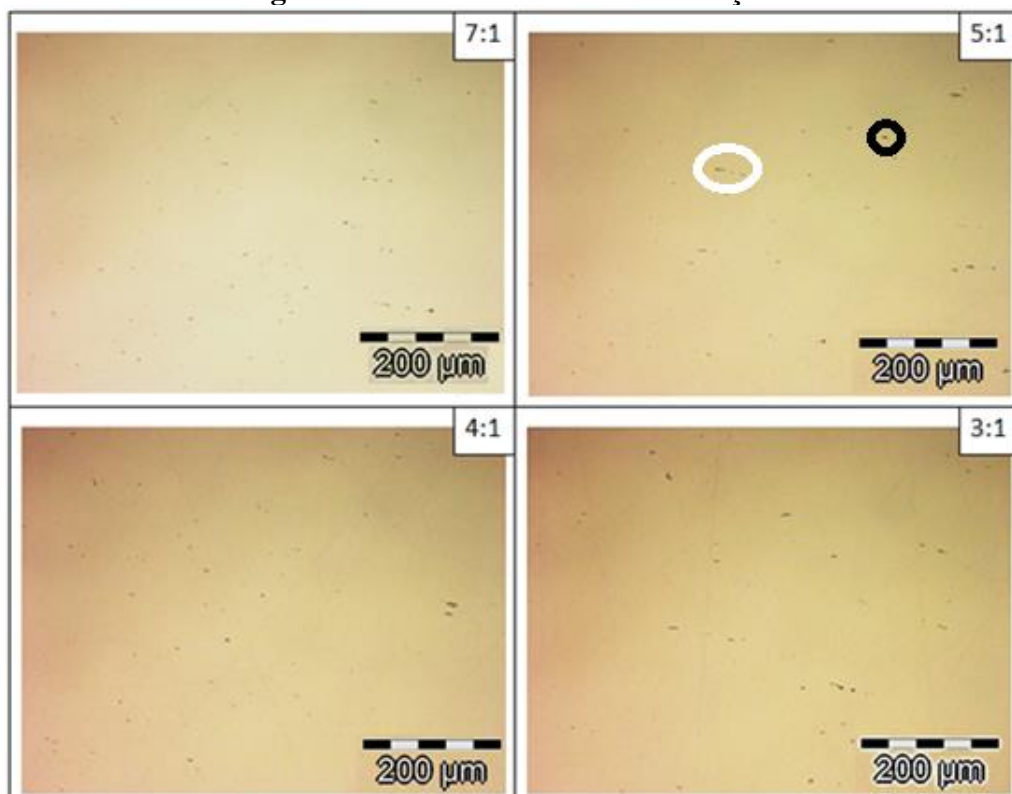
De acordo com Colpaert (2008) uma redução mínima de 4:1 seria suficiente para garantir propriedades mecânicas satisfatórias, porém com o objetivo de quebrar as dendritas e diminuir a quantidade de inclusões essa redução ainda obteve resultados que não foram satisfatórios.

5.1.6 *Microinclusão*

De acordo com a ASTM E45-18a as inclusões são caracterizadas pela sua morfologia, tipo, tamanho, forma e distribuição, mas não especificamente por sua composição. Embora sua composição não seja identificada, os métodos microscópicos as alocam em uma das categorias sendo possível discriminar se a inclusão se trata de um sulfeto, aluminato, óxido ou silicato.

Após comparar as imagens obtidas no ensaio de microinclusão com as lâminas da Figura 37, nas amostras analisadas de cada redução, em todas foram identificadas inclusões de sulfeto (tipo A), série fina e nível de severidade 1,5, como a destacada pelo círculo branco na Figura 59. Também foram observadas inclusões de óxido globular (tipo D), série fina e nível de severidade 1, destacada pelo círculo preto. Todas as imagens foram analisadas no microscópio com ampliação de 100 vezes.

Figura 59 – Microinclusão das reduções.



Fonte: Próprio autor.

Para Silva (2001), controle das inclusões é indispensável, já que a presença de inclusões representa significativa modificação nas propriedades mecânicas dos aços. Inclusões não metálicas de óxidos e de sulfetos representam a maior parte das inclusões formadas em processo de aciaria.

O aço utilizado nesse trabalho é acalmado ao alumínio, ou seja, passa pela desoxidação de modo que o desprendimento de gás é evitado no momento da solidificação. De acordo com Moraes (2009) à medida que aumenta essa desoxidação, a solubilidade do enxofre no aço líquido aumenta, o que gera as inclusões de sulfeto encontradas nesse aço.

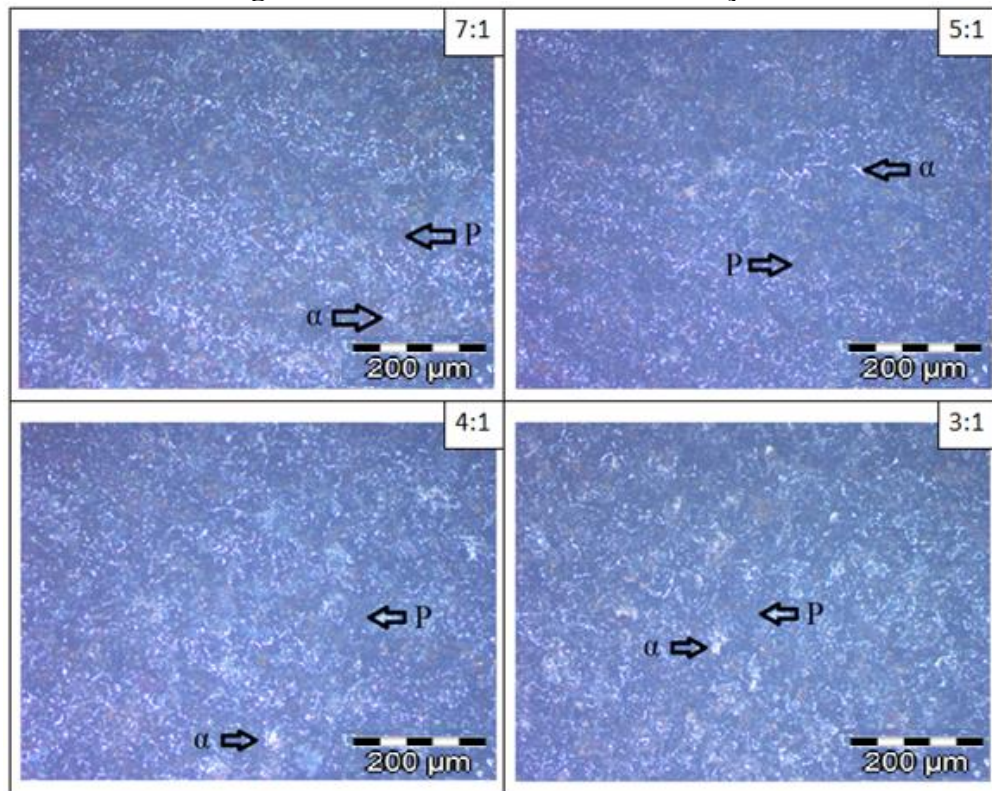
Moraes (2009) também explica que o sulfeto mais relevante na aciaria é o sulfeto de manganês. Em aços acalmados ele pode ser prejudicial por precipitar nas últimas regiões do aço a se solidificar que são os contornos de grão, região propícia à propagação de trincas que podem ser iniciadas ao realizar um esforço compressivo na inclusão. A inclusão de sulfeto de manganês muda de forma quando o aço é deformado devido a sua plasticidade, tornando-se mais alongada.

O óxido é proveniente do excesso de oxigênio no banho que após solidificar fica aprisionado dentro do aço, dando origem às pequenas cavidades no lingote, sendo muito difícil removê-los completamente do aço líquido. A dureza dessas inclusões normalmente é maior que a do aço, o que pode ocasionar o surgimento de trincas ao redor delas. Portanto, esses óxidos prejudicam a resistência mecânica do aço (MORAES, 2009). Não existe uma definição do quanto de inclusão é aceitável, sendo determinado de acordo com a aplicação que o aço se destina.

5.1.7 Micrografia

Após realização do ensaio as imagens obtidas revelaram uma estrutura composta de ferrita proeutetóide (α) e perlita (P). Na Figura 60 estão as micrografias de cada redução de área, nas quais foi indicada a perlita pela letra P, sendo essa as partes mais escuras. Enquanto a ferrita proeutetóide, representada por α , é a parte clara.

Figura 60 – Microestrutura das reduções.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com Chiaverini (2015) é esperado que a constituição estrutural de um aço eutetóide com 0,77% de carbono fosse perlita, caso esse aço seja submetido à temperatura superior que 727°C. Porém o aço analisado tem 0,69% de carbono, sendo encontrado na micrografia ferrita proeutetóide e perlita. Todas as imagens foram analisadas no microscópio com ampliação de 100 vezes.

Esse arranjo microestrutural não apresentou mudanças com o aumento da redução de área, com a ampliação empregada, mas apenas um pequeno aumento da orientação dos grãos com o acréscimo da quantidade de deformação plástica associada ao valor da respectiva redução.

6 CONCLUSÕES

Analisando os resultados de ultrassom, o forjamento apresentou resultado satisfatório a partir da redução 5:1, pois nas duas anteriores o ensaio detectou indicação interna, levando a conclusão de que a redução de 4:1 ainda não seria suficiente para eliminar inclusões e vazios.

Após avaliar os resultados é possível concluir que nem sempre aumentar a redução vai significar uma melhora nas propriedades do aço. As propriedades têm comportamentos diferentes sendo ainda influenciadas pelo sentido que o material foi submetido ao esforço.

A redução de área de 5:1 que o material sofreu foi eficiente para deformar as dendritas, quebrar as inclusões ou até mesmo provocar uma mudança de região das mesmas e caldear os defeitos, uma vez que nos valores de reduções anteriores a estrutura dendrítica ainda estava pouco deformada e a concentração de inclusões na região central ainda era grande. Tal resultado está relacionado com o fato de que no centro o tempo de solidificação é mais longo, sendo o local com maior quantidade de inclusões.

As reduções de áreas analisadas neste trabalho foram baseadas nas reduções que são mais comuns na empresa e próximas de valores encontrados em literatura, uma vez que menor que 3:1 os resultados não seriam satisfatórios e muito maior que 7:1 não é usual, pois tornaria mais longa a operação de forjamento, gerando aumento do custo produtivo.

Em relação aos ensaios mecânicos os resultados obtidos não tiveram uma diferença significativa entre eles sendo difícil concluir apenas com base nesses dados qual seria a melhor redução. Por isso é importante considerar que outros fatores podem influenciar a resposta mecânica do aço SAE-1070 forjado a quente em matriz aberta.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A370 - 18**: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. Estados Unidos, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E10 - 18**: Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. Estados Unidos, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E112 - 13**: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. Estados Unidos, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E23 - 18**: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. Estados Unidos, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E45 - 18a**: Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. Estados Unidos, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM381 - 17**: Standard Method of Macroetch Testing Steel Bars, Billets, Blooms, and Forgings. Estados Unidos, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 88**: Aço- Determinação de inclusões não metálicas – Método micrográfico. Rio de Janeiro, 2000.
- BABAKHANIA, A.; ZIAEIB, S. M. R.; KIANI-RASHID, A.R. **Investigation on the effects of hot forging parameters on the austenite grain size of vanadium microalloyed forging steel (30MSV6)**. Journal of Alloys and Compounds, V. 490, p. 572–575, 2010.
- BLAIR, Malcolm; MONROE, Raymond W. **Fundido em aço ou forjado? Uma avaliação realística**. Revista Fundição & Matérias Primas, Minas Gerais, 18 jul. 2015. 50, p. 6. Disponível em: <<https://docslide.com.br/documents/revista-fundicao-fundido-em-aco-ou-forjado-uma-avaliacao-realistica.html>>. Acesso em: 15 set. 2018.
- BÖRDER, Carlos. **Análise do coeficiente de atrito no ensaio do anel para o forjamento a quente**. 2005. 80 p. Trabalho de conclusão de curso(TCC) (Engenharia Automotiva)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3149/tde-24122014-113846/pt-br.php>>. Acesso em: 20 set. 2018.
- BRESCIANI Filho, Ettore (coord.); ZAVAGLIA, Cecília Amélia Carvalho; BUTTON, Sérgio Tonini; GOMES, Edson; NERY Fernando Antonio da Costa. **Conformação Plástica dos Metais**. Campinas: Editora da Unicamp, 2011, 258 p. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2018.

CARDOSO, Antônio Valadao; ANDREATTA, Mateus; NETO, Mário Ruben Aguilar. **processamento dos materiais: fusão e solidificação**. Minas Gerais, 2005. Disponível em: <<http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=12&top =60>>. Acesso em: 25 mar. 2019.

CHANDLER, Harry. Introduction: The Normalizing Process. *In*: CHANDLER, Harry. **Heat Treating Processes and Related Technology**. 1. ed. Estados Unidos: ASM International, 1995. cap. 1, p. 31.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. rev. e aum. São Paulo: ABM, 2015. 599 p.

COLPAERT, Hubertus; SILVA, André Luiz V. da Costa e. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Blucher, 2008.

LEMO, Guilherme Vieira Braga; VIEIRA, Diego Moises Maciel; SANTOS, Bill Paiva dos *et al.* O efeito da velocidade de deformação no ensaio de tração em um aço sae 4340. **Congresso Anual da ABM**, São Paulo, 68. ed. p. 1-8, 30 jul. 2013. 68. : 2013 jul. 30-ago. 2 : Belo Horizonte, MG. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/78859/000900291.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 20 set. 2018.

CORRÊA, Fábio Junkes; COSTA, Luana de Lucca de; SHAEFFER, Lirio. Emprego do Ultrassom em Produtos Forjados para Verificação de Descontinuidades. **Simulação na Indução - Parte I**, Rio Grande do Sul, n. 16, p. 26-27, 4 dez. 2014. Disponível em: <<https://www.aquecimentoindustrial.com.br/emprego-do-ultrassom-em-produtos-forja-dos-para-verificacao-de-descontinuidades/>>. Acesso em: 8 nov. 2019.

ENSAIO POR ULTRASSOM – APLICAÇÕES INDUSTRIAIS. *In*: AWI SERVICE (MG). **Ensaio por Ultrassom – Aplicações Industriais**. Minas Gerais, 6 mar. 2018. Disponível em: <http://www.awiservice.com.br/ensaio-por-ultrassom-aplicacoes-industriais/>. Acesso em: 8 nov. 2019.

DIEHL, Peterson Duarte. **Resfriamento controlado: uma alternativa à normalização em componentes forjados a quente**. 2015. 42 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Metalúrgica)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2015.

FENG, Chao; CUI, Zhenshan; LIU, Mingxiang *et al.* Investigation on the void closure efficiency in cogging processes of the large ingot by using a 3-D void evolution model. **Journal of Materials Processing Technology**, China, v. 237, p. 371-375, 19 jun. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013616302096>>. Acesso em: 9 abr. 2019.

SOUZA Filho, Valter de. **Estudo do comportamento microestrutural de aços forjados a quente em condições de alta taxa de deformação**. 2008. 125 p. Pós- Graduação (Engenharia Mecânica)- Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2008.

HENDLER, Rafael Borges. **Avaliação do tamanho de grão de um forjado a quente via simulação numérica.** 2010. 53 p. Trabalho de Diplomação (Engenharia Metalúrgica)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2010. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/60665/000825617.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 10 set. 2018.

MÉLO, Drumond de. **Influência do tamanho de grão nas propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico UNS S30100.** Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco. 2005. 46 p. Projeto de iniciação científica (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itabira, 2005. Disponível em: <https://fei.edu.br/~rodrmag/PROJETOS_IC/2005/DM2004.pdf>. Acesso em: 20 out. 2019.>

LENHARD JÚNIOR, Adalberto Luiz. **Análise da influência das propriedades do material e parâmetros do processo na simulação numérica do processo de forjamento.** 2007. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da Ufrgs, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/11255/000605747.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

LOPES, Nathalia Correia. **Influência da temperatura e da velocidade de deslocamento no ensaio de compressão de liga de alumínio aa6004.** 2009. 53 p. Trabalho de conclusão de curso(TCC) (Engenharia Mecânica)- Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2009. Disponível em: <https://fei.edu.br/~rodrmag/PROJETOS_IC/2009/NCL_IC-2009.pdf>. Acesso em: 21 set. 2018.

MARTINS, Fábio. **Conformação Mecânica.** Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/jmario/conformacaomecanica/livros/notas%20de%20aula%20conformacao%20mecanica.pdf/at_download/file>. Acesso em: 21 set. 2018.

MATOS, R. A. G. **Estudo comparativo da recristalização da liga Al-4.5Cu após forjamento rotativo, obtida por solidificação convencional e unidirecional.** 104 p. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2014.

MEDEIROS, Gianpaulo Alves; SCHAEFFER, Lírio. **Forjamento em matriz aberta: aspectos de cálculo.** 2011. 5 p.- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2011.

MORAES, Araldo Luiz Isaias de. **Simulação numérica do forjamento a quente de um aço baixo carbono em matriz fechada acoplado com a evolução microestrutural.** 2013. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013. Disponível em: <<http://www.dema.ufscar.br/termomec/images/Teses-dissertacoes-Completas/Araldo%20-%20Mestrado.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2019.

MORAES, Luís Augusto. **Caracterização de macro e micro-inclusões em aços acalmados ao alumínio produzidos por lingotamento contínuo.** Orientador: Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório. 2009. 180 p. Dissertação (Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-18112009102050/publico/Luis_Moraes.pdf>. Acesso em: 30 out. 2019.

OLIVEIRA, Mauro. **Engenharia de Forjamento**. 14. ed. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2017.

PIRES, José Carlos dos Santos; NETO, Marcolino Fernandes; GARCIA, Amauri. Avaliação do tamanho, da morfologia e da composição química de inclusões não metálicas em aço baixo carbono desoxidado ao alumínio. **Escola de Minas**, Minas Gerais, v. 55, ed. 1, 15 mar. 2002. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S037044672002000100006. Acesso em: 14 nov. 2019.

PORCARO, Rodrigo Rangel. Ensaaios Mecânicos: Aula 10: Ensaaios de Impacto. *In*: PORCARO, Rodrigo Rangel. **Ensaaios Mecânicos**: Aula 10: Ensaaios de Impacto. Minas Gerais: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, 2016. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/11411879/>. Acesso em: 15 out. 2019.

QI, Rong-sheng et al. Formation Mechanism of Inclusion Defects in Large Forged Piece. **Journal of Iron and Steel Research**, China, 08 jun. 2016. 23(6), p. 531-538. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1006706X1630084X>. Acesso em: 20 set. 2018.

SENAI (ES). Centro de Educação Profissional Jerônimo Monteiro. (coord.). **Mecânica**: Outros Processos. Espírito Santo: [s. n.], 1999. 52 p. Disponível em: <ftp://ftp.ufv.br/dta/disciplinas/tal420/2002/MANUTEN%C7%C3O/PNQC/OutrosProcessos.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2019.

SILVA, Paulo Rogério Tavares da. **Análise do comportamento em fadiga do aço SAE52100 sob diferentes condições microestruturais**. Porto Alegre, 2001, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Departamento de Metalurgia, UFRGS. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/3040>. Acesso em: 30 out. 2019.

SILVEIRA, José Luís. **Conformação plástica**. 2016. Universidade Federal Do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.mecanicaufrj.educacao.ws/util/b2evolution/media/blob/joseluis/4-Conformacao-Plastica-2016-1.pdf>. Acesso em: 25 set. 2018.

SOUZA, Antonio Lourenço Batista de. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 22., 2016, Natal. **Influência do atrito no gradiente microestrutural determinado via MEF durante o recalque a quente de um cilindro de aço**. São Paulo: [s.n.], 2016. 12 p. Disponível em: <http://www.metallum.com.br/22cbecimat/anais/PDF/303-089.pdf>. Acesso em: 20 set. 2018.

SURIS, Jaques Araripi. **Influência da fibragem na vida em fadiga de componentes obtidos pelo processo de forjamento a quente**. 2012. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da Ufrgs, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/75764/000884332.pdf?sequence=1>. Acesso em: 20 out. 2018.

TACA, Mihaela et al. **Influence of forging parameters on the structure and toughness of forged parts**. MaterialsToday, Romania, 24 ago. 2017. 4(5), p. 5969-5972. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317308544>. Acesso em: 20 set. 2018.

ZULIANI, Leonardo; DA SILVA, Valdinei Aparecido. **Produtividade em usinagem de forjados**. 2008. 61 p. Monografia de Conclusão do CEAI (Curso de Especialização em Administração Indústria)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.