

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA  
TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO DE ENGENHARIA - (ENG06017)

**Análise da Forjabilidade a quente de aços ABNT 1045**

**LUCAS ALVES VITOR DA SILVA**

Orientador: Prof. Dr. Rafael Menezes Nunes

Porto Alegre, abril de 2023.

## CIP - Catalogação na Publicação

Silva, Lucas Alves Vitor  
Análise da Forjabilidade a quente de aços ABNT 1045  
/ Lucas Alves Vitor Silva. -- 2023.  
58 f.  
Orientador: Rafael Menezes Nunes.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Forjamento. 2. Forjabilidade. 3. ABNT 1045. I.  
Nunes, Rafael Menezes, orient. II. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, por terem me dado todo apoio, amor e sempre incentivando minhas decisões, fazendo o possível para me ajudar.

Ao meu irmão, pela parceria, incentivo e conselhos.

Ao meu orientador Rafael, pela oportunidade de realizar esse trabalho.

Ao pessoal dos laboratórios LdTM e LAMEF, por terem apoiado na realização dos ensaios e ensinamentos compartilhados.

Aos amigos da faculdade que estiveram que estiveram comigo ao longo dessa jornada da faculdade, obrigado por todo incentivo, apoio e ensinamentos compartilhados e que tornaram essa experiência a mais leve possível, ajudando nos momentos de dificuldades e felizes.

Aos amigos da vida pelos bons momentos, pelos conselhos, pela parceria, apoio e por entenderem minha ausência em certos momentos.

À minha namorada pelo apoio incondicional e por todo amor e carinho.

À UFRGS por oferecer uma graduação de qualidade e gratuita.

## RESUMO

O aço ABNT 1045 é um aço carbono de médio teor que possui boas propriedades mecânicas e de usinabilidade, tornando-o um material amplamente utilizado em diversas aplicações como engrenagens, parafusos, porcas, mandris, virabrequins, pinos entre outras aplicabilidades. O presente estudo buscou avaliar a forjabilidade do aço ABNT 1045 por meio de forjamento em diferentes temperaturas e cargas. Foram utilizadas três diferentes temperaturas de forno: 900°C, 1000°C e 1200°C. Os materiais foram inseridos da seguinte maneira, 3 “billets” e uma cunha foram ao forno para cada temperatura. As cargas aplicadas foram de 350 toneladas para as cunhas e 350 e 300 toneladas para os “billets”. Os “billets” possuíam as dimensões de 50mm de altura e 52mm de diâmetro, já as cunhas apresentavam 105mm de comprimento e 30mm de altura e largura. Após o ensaio de forjamento foram feitas as curvas de deformabilidade dos recalques dos “billets” e cunhas. O estudo também inclui análise macroscópica dos “billets” que proporcionou a análise das linhas de forjamento. Posteriormente, fez-se o ensaio de microscopia óptica dos “billets”, visando a caracterização das microestruturas com o objetivo de identificar os microconstituintes presentes na microestrutura e a forma como se apresentaram após o forjamento. Além disso, foram realizados perfis de microdureza dos “billets”, onde foram analisadas 3 regiões: superfície na região central, núcleo da região central e a lateral dos “billets”. Os resultados indicaram que melhor condição para a deformabilidade dos “billets” foi a 1200°C e 350t em maiores temperaturas e maior carga de forjamento, pois chega a uma maior deformação verdadeira ( $\phi$ ), cerca de 1,87 em torno de 20% a mais do que o menor resultado, visto em 900°C e 300t. A variação do tamanho de grão influencia na dureza do material, uma vez que conforme ocorrem as deformações plásticas e mudanças da microestrutura na superfície e núcleo do material. A dureza média dos perfis analisados indicou que a dureza da superfície foi cerca de 7% maior do que a do núcleo.

Palavras-chave: ABNT 1045, forjamento, forjabilidade.

## ABSTRACT

ABNT 1045 steel is a medium grade carbon steel that has good mechanical properties and machinability, making it a material widely used in various applications such as gears, screws, nuts, mandrels, crankshafts, pins, among other applications. The present study sought to evaluate the forgeability of ABNT 1045 steel through forging at different temperatures and loads. Three different furnace temperatures were used: 900°C, 1000°C and 1200°C. The materials were inserted in the following way, 3 “billets” and a wedge went into the furnace for each temperature. The applied loads were 350 tons for the wedges and 350 and 300 tons for the “billets”. The “billets” had the dimensions of 50mm in height and 52mm in diameter, while the wedges were 105mm in length and 30mm in height and width. After the forging test, the deformability curves of the settlements of the “billets” and wedges were made. The study also includes a macroscopic analysis of the “billets” that provided the analysis of the forging lines. Subsequently, an optical microscopy test of the “billets” was carried out, aiming at the characterization of the microstructures with the objective of identifying the microconstituents present in the microstructure and the way in which they were presented after forging. In addition, microhardness profiles of the “billets” were performed, where 3 regions were analyzed surface in the central region, core in the central region and the side of the “billets”. The results indicated that the best condition for the deformability of the “billets” was at 1200°C and 350t at higher temperatures and higher forging load, as it reaches a greater true deformation ( $\phi$ ), about 1.87 around 20% more than the lowest result seen at 900°C and 300t. Wedges presented similar results to “billets”. The variation in grain size influences the hardness of the material, as plastic deformations and changes in the microstructure on the surface and core of the material occur. The average hardness of the analyzed profiles indicated that the surface hardness was about 7% higher than that of the core.

Keywords: AISI 1045, forging, workability

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	3
RESUMO.....	4
ABSTRACT .....	5
SUMÁRIO.....	6
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	12
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. Histórico do Forjamento.....	14
2.1.1. Forjamento a quente.....	15
2.2. Equipamentos utilizados para forjamento .....	16
2.2.1. Prensas para Forjamento .....	16
2.2.2. Matrizes para forjamento .....	16
2.2.2.1. Material utilizado em Matrizes de Forjamento .....	17
2.2.2.2. Aço H13 para matrizes de Forjamento.....	18
2.2.2.3. Matriz para forjamento: Região da Rebarba .....	18
2.2.2.4. Linha de Repartição de matrizes de forjamento.....	18
2.2.3. Lubrificantes utilizados no forjamento .....	19
2.3. Aço ABNT 1045.....	20
2.3.1. Curva de escoamento .....	21
2.3.2. Temperatura de forjamento.....	22
2.4. Parâmetros utilizados para forjamento .....	22
2.5. Deformabilidade .....	23
2.5.1. Ensaios de deformabilidade .....	23
2.6. Cálculos para forjamento.....	25

2.6.1.	Avaliação da forjabilidade .....	25
2.7.	Efeito do Atrito na forjabilidade.....	26
2.8.	Macrografia .....	27
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1.	Material.....	28
3.2.	Geometria da peça .....	28
3.3.	Procedimento Experimental .....	29
3.3.1.	Equipamento utilizado para forjar .....	29
3.3.1.1.	Sistema de aquisição de dados experimentais.....	30
3.3.2.	Fixação das matrizes na prensa.....	30
3.3.3.	Lubrificação .....	31
3.3.4.	Aquecimento da matéria-prima (“billets” e cunhas).....	31
3.3.5.	Ensaio de Recalque para determinação da forjabilidade .....	32
3.4.	Curvas experimentais .....	33
3.5.	Caracterização metalúrgica.....	33
3.5.1.	Análise Macroscópica.....	33
3.5.2.	Análise microscópica .....	34
3.5.3.	Caracterização das microestruturas .....	36
3.5.4.	Microdureza .....	37
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	39
4.1.	Ensaio de Forjabilidade .....	39
4.1.1.	Análise da forjabilidade dos “billets” .....	39
4.1.2.	Análise da deformabilidade em Cunhas .....	40
4.2.	Curvas de deformabilidade.....	41
4.2.1.1.	Recalque com carga aplicada de 350 Toneladas - “billets” .....	42
4.2.1.2.	Recalque com carga aplicada de 300 Toneladas - “billets” .....	42
4.2.1.3.	Recalque com carga aplicada de 350 Toneladas – Cunhas.....	43

4.3.	Análise macrográfica .....	44
4.3.1.	Ensaio de Recalque – Carga de 350 Toneladas .....	44
4.3.2.	Ensaio de Recalque – Carga de 300 Toneladas .....	44
4.4.	Análise Micrográfica .....	45
4.4.1.	Ensaio de Recalque – “billets” – 1200°C .....	45
4.4.1.1.	Carga aplicada de 350 toneladas força .....	45
4.4.1.2.	Carga aplicada de 300 toneladas força .....	46
4.4.2.	Ensaio de Recalque – “billets” – 1000°C .....	47
4.4.2.1.	Carga aplicada de 350 toneladas força .....	47
4.4.2.2.	Carga aplicada de 300 toneladas força .....	48
4.4.3.	Ensaio de Recalque – “billets” – 900°C .....	49
4.4.3.1.	Carga aplicada de 350 toneladas força .....	49
4.4.3.2.	Carga aplicada de 300 toneladas força .....	50
4.5.	Análise de Microdureza .....	51
4.5.1.	Análise de microdureza nos “billets” recalcados a 1200°C .....	51
4.5.2.	Análise de microdureza nos “billets” recalcados a 1000°C .....	52
4.5.3.	Análise de microdureza nos “billets” recalcados a 900°C .....	53
4.5.4.	Perfil central de microdureza .....	53
4.5.5.	Perfil Lateral de Microdureza .....	54
4.6.	Análise de custos estimados de projeto .....	55
5.	CONCLUSÕES .....	56
6.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	57
7.	REFERÊNCIAS .....	58

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geometria de canais e cavidades de rebarba (MARTINS, 2005).....	18
Figura 2 - Microestruturas de perlita e ferrita presentes no Aço SAE 1045.....	21
Figura 3 - Curva de escoamento do SAE 1045. Fonte: ( <a href="https://www.mdpi.com/2073-8994/12/5/782">https://www.mdpi.com/2073-8994/12/5/782</a> ).....	22
Figura 4 - Parâmetros que podem afetar na qualidade do forjado e que podem afetar as características do processo. ....	23
Figura 5 - Aspecto do billet posicionado no centro da matriz (esquerda) e aspecto do billet após a operação de recalque (direita). Fonte: (VERLINDEN et al., 2007).....	24
Figura 6 - Aspecto da cunha antes (esquerda) e após a deformação plástica (direita) imposta pelo processo de forjamento (recalque). Fonte: (VERLINDEN et al., 2007)...	24
Figura 7 - Zonas deformadas em forjamento de amostra cilíndrica com atrito. Fonte: DIETER, G. E., KUHN, H. A., SEMIATIN, S., 2003) .....	27
Figura 8 - Billet cilíndrico utilizado para realização dos ensaios de forjamento. Fonte: O autor.....	28
Figura 9 - Cunha utilizada para realização dos ensaios de forjamento. Fonte: O autor.....	29
Figura 10 - Prensa hidráulica de 780 toneladas, marca FKL.....	30
Figura 11 - Temperatura da matriz antes (a) e após (b) o forjamento. Fonte: O autor .....	30
Figura 12- Temperatura do billet antes (a) e após (b) o forjamento. Fonte: O autor .....	30
Figura 13 - Lubrificante aplicado no processo de forjamento – Lubrodal AT 737F da Fuchs do Brasil. ....	31
Figura 14 - Forno para aquecimento dos materiais de forjamento .....	32
Figura 15 – Secções dos “billets” que usinadas em serra fita, vista topo.....	33
Figura 16 - Politriz utilizada no processo de polimento do material. ....	34
Figura 17 – Macrografia de um billet após o processo de recalque. Fonte: O autor .....	34
Figura 18 – Máquina de corte a disco.....	35
Figura 19 - Seção transversal dos “billets” .....	35
Figura 20 - Amostras cortadas após a etapa de macrografia .....	36
Figura 21 - Amostras preparadas para ensaio microscópico .....	36

Figura 22 – Microscópio óptico utilizado para análise das amostras .....	37
Figura 23 – Microdurômetro utilizado para perfil de microdureza. ....	37
Figura 24 – Perfis de microdureza analisados. ....	38
Figura 25 - Aspectos dos “billets” após o processo de reaquecimento, os parâmetros de processamento estão indicados nos “billets”. ....	39
Figura 26 - Cunhas após o ensaio de forjamento, os temperaturas de processamento e cargas aplicadas estão indicados nas cunhas.....	41
Figura 27 - Curva de Deformação verdadeira X tensão verdadeira para o Billet conformado a 900°C, 1000°C e 1200°C - a carga máxima aplicada foi de 300 t.....	42
Figura 28 - Curva de Deformação verdadeira X tensão verdadeira (Mpa) para o Billet conformado a 900°C, 1000°C e 1200°C - a carga máxima aplicada foi de 300 t.	43
Figura 29 - Curva de Carga aplicada (N) X Deslocament (mm) para a cunhas conformadas a 900°C, 1000°C e 1200°C - a carga máxima aplicada foi de 350 t. ....	43
Figura 30 – Macrografia “billets” em carga de compressão de 350 toneladas nas temperaturas (a) 900°C (b) 1000°C (c)1200°C. ....	44
Figura 31 – Macrografia “billets” em carga de compressão de 350 toneladas nas temperaturas (a) 900°C (b) .....	44
Figura 32 – Micrografia da superfície dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 1200°C .....	45
Figura 33 – Micrografia do núcleo central dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 1200 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x. ....	45
Figura 34 – Micrografia da região lateral dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 1200 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x. ....	46
Figura 35 – Micrografia da superfície dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 1200°C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x. ....	46
Figura 36 – Micrografia do núcleo central dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 1200 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x. ....	46

Figura 37 – Micrografia da região lateral dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 1200 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x. ....	47
Figura 38 – Micrografia da superfície dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 1000°C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x. ....	47
Figura 39 – Micrografia do núcleo central dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 1000 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x. ....	47
Figura 40 – Micrografia da região lateral dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 1000 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x. ....	48
Figura 41 – Micrografia da superfície dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 1000°C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x. ....	48
Figura 42 – Micrografia do núcleo central dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 1000 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x. ....	48
Figura 43 – Micrografia da região lateral dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 1000 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x. ....	49
Figura 44 – Micrografia da superfície dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 900°C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x. ....	49
Figura 45 – Micrografia do núcleo central dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 900 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x. ....	49
Figura 46 – Micrografia da região lateral dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 900 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x. ....	50
Figura 47 – Micrografia da superfície dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 900°C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x. ....	50

Figura 48 – Micrografia do núcleo central dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 900 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x. .... 50

Figura 49 – Micrografia da região lateral dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 900 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x. .... 51

Figura 50 – Componentes após o ensaio de líquido penetrante..... 52

Figura 51 – Componentes após o ensaio de líquido penetrante..... 52

Figura 52 – Componentes após o ensaio de líquido penetrante..... 53

Figura 53 – Perfil de microdureza Central. .... 54

Figura 54 –Perfil de microdureza Lateral. .... 54

### **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Composição química do aço. Fonte: (ASM Metals HandBook Volume 9 – Metallography And Microstructures) Adaptado..... 20

Tabela 2 - Condições de ensaios dos “billets” e cunhas analisados. Fonte: O autor  
..... 32

Tabela 3 –Tabela de recalque dos “billets” ..... 40

Tabela 4 –Tabela de recalque das cunhas ..... 41

Tabela 5 – Tabela de média de dureza Vickers aferidas..... 51

## 1. INTRODUÇÃO

As análises de deformação de metais são técnicas utilizadas que permitem estudar como um material metálico se deforma quando submetidos a forças externas. A importância dessas análises se dá pelo fato de tornar possível o entendimento do comportamento dos metais sob condições diferentes, como a exposição a temperaturas extremas ou altas pressões. Além disso, essas análises objetivam determinar os esforços externos que devem ser aplicados aos metais que são necessários para que o produto possa chegar as dimensões finais desejadas (HELMAN e CETLIN, 2015).

Uma das análises de deformação mais antigas da metalúrgica, é o forjamento, praticada pelos ferreiros com martelos ou bigornas. O seu desenvolvimento ocorreu na Revolução Industrial, período no qual os braços dos ferreiros foram substituídos por máquinas, permitindo o uso de mais força. O forjamento consiste na deformação de um metal, por martelamento ou prensagem, normalmente realizado a quente. Atualmente, existe uma grande variedade de máquinas de forjamento que são capazes de fabricar peças que variam em tamanho (DIETER JR, 1961; HELMAN e CETLIN, 2015).

O aço AISI 1045 é classificado como de carbono médio que apresenta boas propriedades mecânicas e é uma opção adequada para uso como material estrutural. Possui alta resistência, tenacidade e dureza e é utilizado em aplicações como: pinos, buchas e peças automotivas. Além disso, o seu uso é vantajoso pelo fato de ser um aço de baixo custo devido poucos elementos de liga aliado a uma boa resistência mecânica e a fratura com resistência a tração 585MPa e tensão de escoamento 450 Mpa, dureza maior que aços de baixo carbono, apesar de possuir baixa temperabilidade. (MARTINS, P.; RODRIGUES, J., 2005; ALAM e DAS, 2022).

Considerando então as características do aço SAE 1045, torna-se interessante o estudo das suas análises de deformação para mostrar os resultados referentes a sua deformação verdadeira, bem como suas características de macro e microestruturas, o que não é feito através da simulação. Isso visa a melhor aplicabilidade desse aço na indústria e atendo as propriedades ideias do material para o uso em diversas áreas.

Tendo isso em vista, o objetivo principal desse trabalho é a análise da forjabilidade do forjamento do aço AISI 1045, utilizando diferentes temperaturas e cargas de forjamento, comparando a influência de tais fatores nesse processo através de gráficos de deformabilidade. Já os objetivos específicos do projeto são realizar a avaliação da sua

macroestrutura, microestrutura e a sua microdureza utilizando microdurômetro, elucidando, então, as alterações da propriedade do metal.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

No capítulo 2 é mostrada uma revisão bibliográfica sobre aspectos básicos de forjamento e principalmente sobre forjabilidade. Como definição a forjabilidade está atrelada a capacidade do material em se deformar sem causar defeitos (Dieter, 1981).

### **2.1. Histórico do Forjamento**

Durante a Revolução Industrial no final do século 18, foram desenvolvidos processos para fabricar ferro e aço em grandes quantidades para atender a demanda por produtos de metal. Surgiu a necessidade de equipamentos de forjamento com maior capacidade. Essa necessidade foi atendida com a invenção da prensa hidráulica, na qual a força é fornecida pela pressão hidráulica (ASM Metals HandBook Volume 14 - Forming and Forging).

Ao realizar o processo de conformação, é essencial levar em conta várias variáveis que podem ser agrupadas em fatores como o material a ser conformado, o ferramental utilizado, as condições de interface, as zonas de deformação, o equipamento empregado, o ambiente e as características finais do produto, de acordo com (SCHAEFFER, L; 2020). Com relação ao material a ser conformado, é importante considerar algumas condições específicas da matéria-prima, tais como a tensão de escoamento, a taxa de deformação, a temperatura, a microestrutura, as condições superficiais do material que será forjado, as propriedades termo físicas e a conformabilidade.

Ao considerar o ferramental necessário para a conformação, é importante levar em conta diversas questões relevantes, como as condições de acabamento superficial, o material, a dureza, a geometria das ferramentas, os tratamentos térmicos e a temperatura de trabalho, levando em conta a relação entre a peça e a matriz, e também os tipos de matrizes disponíveis, sejam elas fechadas ou abertas. No caso de matrizes fechadas, as geometrias das matrizes são tipicamente de complexidade média e podem ser usadas para a produção em larga escala de diversos tipos de aços e ligas. É importante manter o ferramental em boas condições para garantir a viabilidade econômica do processo, uma vez que a conformação pode exigir um grande número de ciclos, conforme mencionado

em (MORAES, 2010). Dessa forma, é essencial garantir a manutenção adequada do ferramental para prolongar sua vida útil e reduzir custos de produção.

Ao realizar o processo de forjamento, é crucial observar vários fatores que influenciam a interface entre a ferramenta e a peça, incluindo o tipo e a quantidade de lubrificante utilizado, a temperatura de trabalho, o resfriamento na camada de interface, a tensão de cisalhamento e o atrito. A zona de deformação da peça também apresenta características importantes, tais como o fluxo de metal, a velocidade, a taxa de deformação e a transferência de calor, que podem ser afetadas pelos tipos de prensa e equipamentos utilizados. A geometria da peça, a precisão e as tolerâncias dimensionais, o acabamento superficial desejado, a microestrutura e as propriedades mecânicas e metalúrgicas são considerações importantes com relação ao produto final. Além disso, o ambiente de produção também é relevante, incluindo a disponibilidade de mão de obra qualificada, a qualidade do ar e a poluição sonora, a geração de resíduos líquidos e o controle de produção, bem como a disponibilidade de equipamentos adequados, como discutido em (MORAES, 2010). É fundamental considerar esses fatores para garantir a eficiência e a qualidade do processo de forjamento.

### **2.1.1. Forjamento a quente**

O processo de fabricação de peças por forjamento envolve o aquecimento de uma barra ou tarugo de metal até uma determinada temperatura, seguido por conformação mecânica através do uso de uma prensa. Para iniciar o processo, as barras de metal são cortadas por serra ou guilhotinas, a fim de se obter um bloco ou billet. Os blocos são aquecidos em um forno e, em seguida, submetidos ao forjamento, que pode ser dividido em várias etapas para garantir o completo preenchimento da cavidade das matrizes. Após a conformação, uma rebarba é formada em torno da peça, que é removida por corte com uma matriz e um rebarbador enquanto a peça ainda está quente. Para atingir a microestrutura desejada para a usinagem, as peças são tratadas termicamente após a conformação. As matrizes de forjamento devem ser pré-aquecidas para evitar danos por choque térmico. Após a primeira peça ser forjada, as dimensões são verificadas e, se necessário, ajustes são feitos no ferramental para garantir a conformidade com as especificações do produto. (MORAES, 2010; SOUSA, J.H.,2001)

## **2.2. Equipamentos utilizados para forjamento**

Para selecionar o equipamento adequado para o processo de forjamento, é necessário levar em consideração diversos fatores, incluindo a complexidade do forjado e a capacidade de deformação do material (ALTAN, 1999)

### **2.2.1. Prensas para Forjamento**

O forjamento a quente, por sua vez, geralmente emprega prensas e martelos como equipamentos principais. As prensas podem ser classificadas em três tipos: mecânicas, hidráulicas e de fuso/fricção, sendo amplamente utilizadas em processos de forjamento, bem como em conformação de chapas e estampagem. Já os martelos são mais comumente utilizados no forjamento a quente de peças de grande porte. (ALTAN, 1999)

### **2.2.2. Matrizes para forjamento**

Na área de forjamento, é comum que a despesa com ferramentas represente uma parcela significativa do custo total de um componente, podendo chegar a 50%. Nesse sentido, evidencia-se que a redução dos custos dos componentes depende, em grande parte, da melhoria do desempenho e da durabilidade das matrizes utilizadas, a fim de otimizar o processo de fabricação. (BRUCELLE, O., & BERNHART, 1999)

Diversos fatores podem afetar a longevidade de uma ferramenta, incluindo a taxa de deformação e a temperatura da peça durante o processo de forjamento, o atrito entre a ferramenta e o material, a geometria da ferramenta, entre outros. É fundamental que haja uma interação adequada entre esses fatores para garantir a produção de peças de alta qualidade, ao mesmo tempo em que se mantém os custos sob controle. (SCHAEFFER, 2006).

Nos dias de hoje, o processo de desenvolvimento de matriz é baseado no modelo CAD criado pelo designer e o projetista define a cavidade utilizando softwares especializados. Esses softwares permitem uma produção mais rápida e eficiente, mesmo em peças com geometria complexa. Depois, o projeto é encaminhado para a engenharia de processo que é responsável pela fabricação da matriz. A grande vantagem é que todo esse processo é integrado, com o modelo CAD sendo aberto em um software CAM que gera estratégias de usinagem para a remoção do material, chegando à forma final da matriz. O uso dessas tecnologias é fundamental para garantir uma matriz de alta qualidade e um processo econômico viável.

### **2.2.2.1. Material utilizado em Matrizes de Forjamento**

Em forjamentos, as matrizes são submetidas a impactos de alta intensidade. Nesse sentido, durante o forjamento a quente convencional, as matrizes apresentam uma área de absorção de choque para lidar com o impacto da conformação. Contudo, esse impacto pode resultar em danos em regiões das ferramentas, tais como trincas e deformações permanentes com variação dimensional.

Além disso, as matrizes também são expostas a solicitações térmicas em razão das altas temperaturas envolvidas no processo. Como resultado dessas solicitações, os materiais usados para a fabricação de matrizes precisam apresentar determinadas características, como alta dureza, tenacidade, resistência à fadiga, limite de escoamento, alongamento, resistência a altas temperaturas e insensibilidade a oscilações térmicas de curta duração. Diante desses requisitos, os aços ligados ao cromo, molibdênio, vanádio, tungstênio e níquel são os mais indicados e amplamente utilizados atualmente.

Dessas características a resistência ao trabalho a quente é a principal necessidade dos aços usados para a fabricação de matrizes de forjamento a quente. Essa resistência é crucial em virtude das elevadas temperaturas envolvidas no processo, já que a resistência mecânica dos aços ferramenta tende a diminuir à medida que a temperatura de trabalho aumenta e isso ocorre porque se tem a maior facilidade do movimento das linhas de discordância.

A quantidade de repetições de forjamento e o tempo de contato da peça forjada com a ferramenta são ponto relevantes. Caso o aquecimento durante a conformação seja muito alto, pode ocorrer o revenimento da ferramenta, que leva a redução da dureza superficial e, conseqüentemente, da resistência mecânica da matriz. (MESQUITA, R. A; HADDAD, P. T., 2009).

A capacidade de um material absorver energia e se deformar permanentemente sem quebrar, também conhecida como tenacidade, é uma propriedade crucial. A falta de tenacidade pode levar ao surgimento de trincas, que, dependendo do tamanho, podem se propagar e causar danos permanentes à matriz.

Além disso, a resistência à fadiga térmica é uma característica importante, pois as trincas de fadiga geralmente começam em pontos onde a tensão é maior. Essas trincas são geradas pelas mudanças de temperatura que ocorrem durante a utilização da peça e pela condição da superfície da matriz. É essencial que um material possua boa resistência à fadiga térmica para evitar falhas prematuras. (AGUIAR, F.S.,2022)

Dentre as principais falhas em matrizes de forjamento são: desgaste abrasivo, fadiga térmica e mecânica, além da deformação plástica.

#### 2.2.2.2. Aço H13 para matrizes de Forjamento

Ainda que haja uma grande variedade de aços ferramenta disponíveis no mercado, a indústria de ferramentaria utiliza uma quantidade reduzida de aços com propriedades e desempenho consagrados ao longo do tempo, como é o caso do AISI H13.

O aço H13 apresenta uma excelente combinação de dureza e resistência à fratura, além de manter essas propriedades em altas temperaturas. Além disso, possui resistência a choques térmicos e às trincas por fadiga térmica, características fundamentais para aplicação em matrizes de forjamento. (GABARDO, 2008).

#### 2.2.2.3. Matriz para forjamento: Região da Rebarba

A eliminação de rebarbas, refere-se ao excesso de material presente ao redor da peça após o processo de forjamento. Esse excesso surge durante o movimento de fechamento das matrizes, quando um canal é formado e provoca estrangulamento, gerando tensões compressivas na cavidade das matrizes e facilitando o preenchimento da cavidade. A formação da rebarba implica em um aumento mais rápido da força necessária durante o processo. Essa etapa é de grande importância, já que é a partir dela que o forjamento começa a atingir a forma desejada conforme ilustrado na figura 1. (BRUCELLE, O., & BERNHART, 1999)

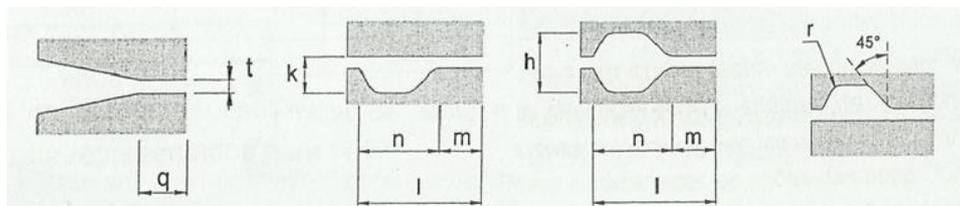


Figura 1 - Geometria de canais e cavidades de rebarba (MARTINS, 2005)

Para assegurar a eficiência do projeto da rebarba, é essencial ajustar suas dimensões de modo que a extrusão do metal pela abertura estreita seja mais difícil do que preencher os detalhes interiores da matriz. É preciso ter cuidado para não exagerar na dimensão da rebarba, a fim de evitar altas cargas de forjamento e possíveis problemas de deformação ou quebra da matriz. O projeto ideal deve permitir a execução do trabalho com a menor rebarba necessária (DIETER, 1981).

#### 2.2.2.4. Linha de Repartição de matrizes de forjamento

A linha de repartição das matrizes é o ponto em que a peça é dividida entre a ferramenta superior e a ferramenta inferior durante o processo de forjamento. O

posicionamento correto dessa linha pode interferir em vários aspectos do processo, incluindo a fechamento e preenchimento das ferramentas mais simples; na formação de defeitos, por exemplo, dobras; na quantidade de material perdido na rebarba e a determinação do ângulo de saída, que, por sua vez, pode influenciar o peso do forjado, além de outros fatores (SCHAEFFER, 2006).

### **2.2.3. Lubrificantes utilizados no forjamento**

A origem do lubrificante de matrizes ocorreu há mais de 100 anos quando Edward Acheson, ao realizar uma grafitização completa do carvão vegetal, obtiveram grafite sintético de alta pureza e com baixa granulometria, em torno de 1  $\mu\text{m}$ .

O dano causado pelo atrito é reduzido pelo uso de lubrificantes e as principais funções que um lubrificante deve desempenhar são (ALTAN, 1999):

- Reduzir o atrito de deslizamento entre a peça e a matriz;
- Evitar a aderência da peça na matriz;
- Prolongar a vida útil da matriz;
- Refrigerar a matriz, através da formação de película protetora;
- Evitar a oxidação da matriz e do forjado;
- Possuir boas propriedades de isolamento, especialmente em forjamento a quente, a fim de reduzir a perda de calor da peça para a matriz.

A lubrificação é influenciada pela temperatura, acabamento das matrizes e produto, forma e volume do lubrificante. Já os principais componentes do lubrificante são água, grafite, resinas promotoras de aderência, estabilizantes, espessantes e inibidores bacteriológicos.

Durante o processo de deformação a quente, é comum utilizar lubrificantes diluídos à base de água para resfriar e lubrificar as matrizes. Esses lubrificantes ajudam a reduzir a temperatura das superfícies aquecidas da matriz, que podem atingir valores entre 200 e 700 °C, além de criar uma camada lubrificante que auxilia o fluxo do metal. Já as temperaturas da peça de trabalho podem atingir entre 1100 e 1200 °C. É usual no forjamento a quente aplicar uma mistura de partículas de grafite em água, para criar um filme lubrificante aderente que facilitar a deformação. A composição do mesmo é definida pela necessidade de lubrificação e capacidade de refrigeração.

Recomenda-se o uso de lubrificantes baseados em grafite para o forjamento a quente de aço 1045 em temperaturas de 900 a 1200°C. O uso de grafite como lubrificante

tem como objetivo reduzir o atrito entre a superfície da matriz e a peça em forjamento, além de promover uma melhor distribuição de temperatura no processo.

### 2.3. Aço ABNT 1045

O aço ABNT 1045 é um aço de médio carbono que possui aproximadamente de 0,43 a 0,5% de composição de carbono, resistência a tração intermediária, entre 570 e 70 MPa e apresenta temperabilidade baixa. É um aço que tem usinabilidade boa, podendo passar por têmpera em secções de até 60mm. Esse tipo de aço provém de condições de laminação a quente ou trefilação, sendo usualmente normalizado. Ele é um aço de sem elementos de liga, portanto não é recomendado para nitretação.

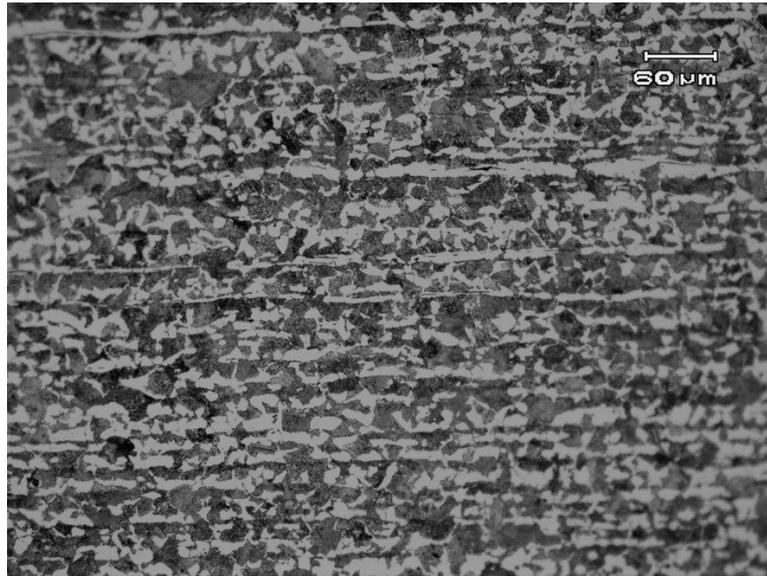
O aço ABNT 1045 é muito utilizado em diversos setores da indústria de aplicações que necessitam de resistência mecânica e ao desgaste maior que os aços carbono, sendo normalmente empregado em eixos, parafusos, bielas, rolos, mandris, virabrequins, pinhões de transmissão, pinos entre outros materiais.

A composição química do aço SAE 1045 pode ser analisada na tabela 1 onde pode-se verificar o percentual máximo aceitável de Enxofre e Fósforo, além dos teores adequados de Carbono e Silício (MARTINS, P.; RODRIGUES, J., 2005).

*Tabela 1 – Composição química do aço. Fonte: (ASM Metals HandBook Volume 9 – Metallography And Microstructures) Adaptado.*

Elemento	Carbono (C)	Manganês(Mn)	Enxofre (S)	Fósforo (P)	Ferro (Fe)
Composição (%)	0,42 - 0,5	0,60 - 0,90	< 0,05	< 0,04	98,51 – 98,98

A figura 2 apresenta a metalografia do SAE 1045 e sua microestrutura, na qual pode-se notar a ferrita nas regiões brancas e a perlita nas regiões lamelares, as esperadas para a composição desse aço.



*Figura 2 - Microestruturas de perlita e ferrita presentes no Aço SAE 1045.*

### **2.3.1. Curva de escoamento**

No processo de forjamento as propriedades mecânicas do material a ser conformado têm extrema importância na forjabilidade do material. A forma mais simples de se obter as propriedades mecânicas dos materiais é pelo ensaio de tração ou compressão, obtendo-se assim uma curva tensão x deformação.

Abaixo, a figura 3, apresenta as curvas de tensão x deformação.

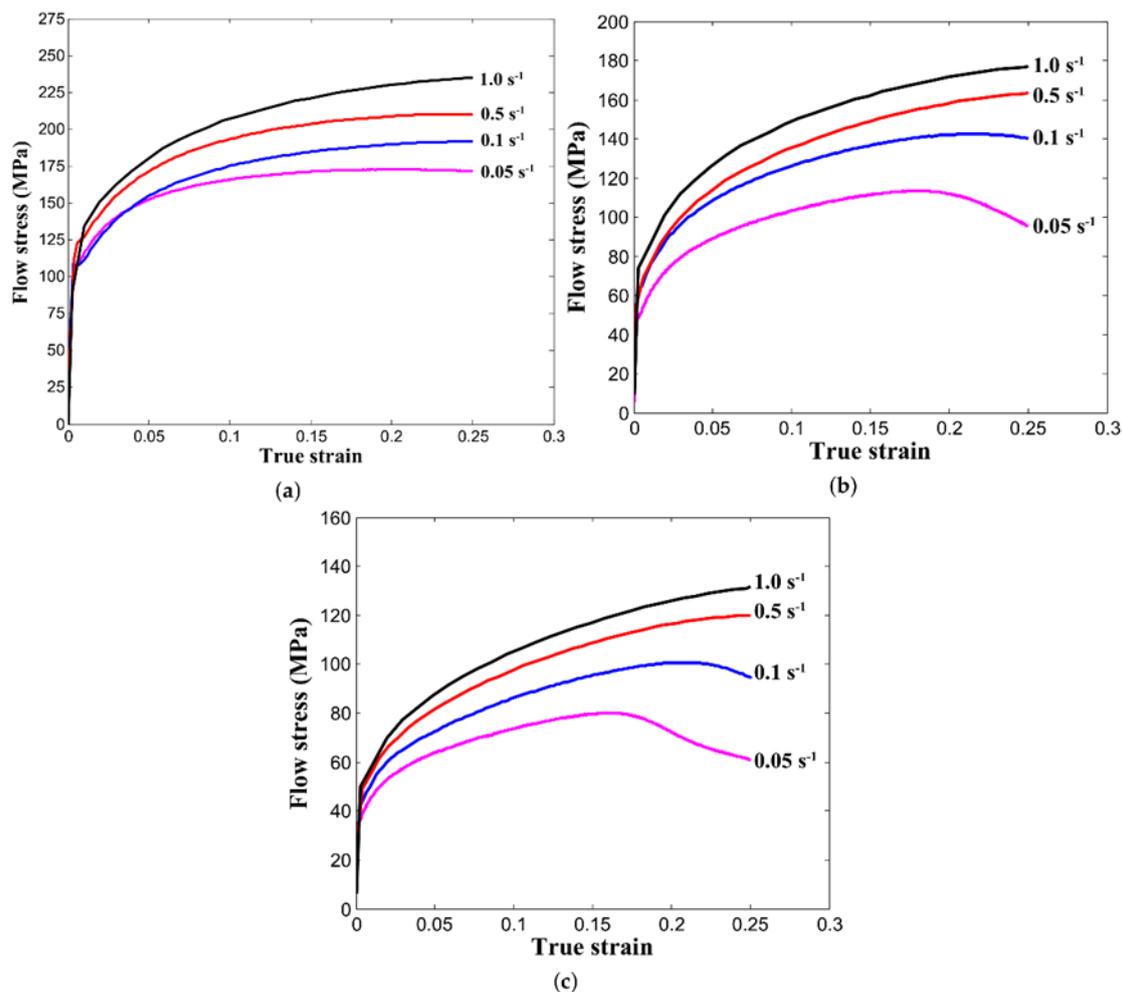


Figura 3 - Curva de escoamento do SAE 1045. Fonte: (<https://www.mdpi.com/2073-8994/12/5/782>)

### 2.3.2. Temperatura de forjamento

A temperatura ideal para o forjamento do aço AISI 1045 depende do tipo de processo de forjamento utilizado e das propriedades finais desejadas para a peça forjada. Em geral, a temperatura de forjamento deve ser alta o suficiente para facilitar a deformação plástica do material, mas não tão alta a ponto de causar oxidação ou alterações indesejadas na microestrutura do aço. O Aço AISI 1045 tem temperatura de forjamento estimada em uma faixa entre 870°C e 1240°C segundo (AGUIAR, F.S.,2022).

### 2.4. Parâmetros utilizados para forjamento

Segundo (SCHAEFFER, L., 2006) diversos parâmetros e o que eles influenciam no forjamento são mostrados na figura 4. São eles:

- Matéria-prima;
- Matriz;
- Peça acabada;

- Equipamento;
- Material;
- Lubrificação.

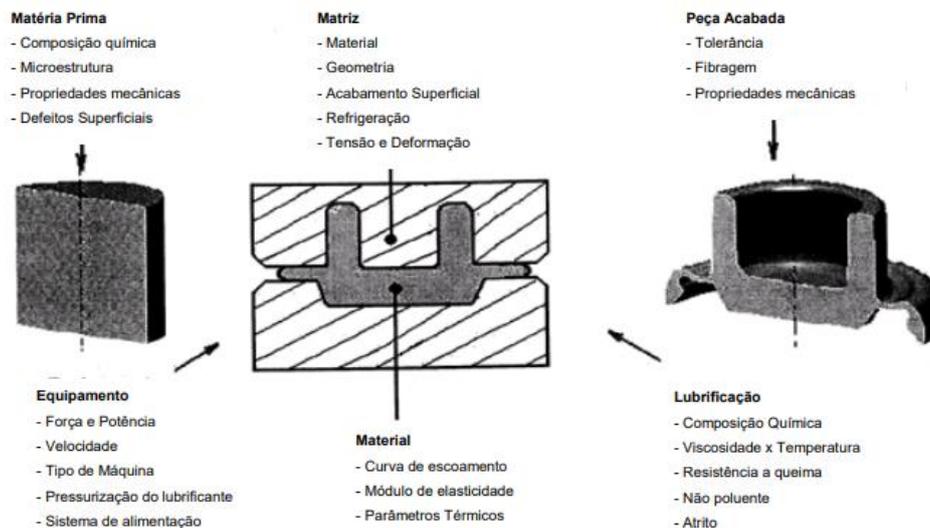


Figura 4 - Parâmetros que podem afetar na qualidade do forjado e que podem afetar as características do processo.

## 2.5. Deformabilidade

A deformabilidade tem como conceito a capacidade do material ser deformado sem que haja defeitos após este procedimento. Existem alguns diferentes nomes que estão relacionados aos processos, por exemplo: Forjabilidade quando relacionada ao processo de forjamento; estampabilidade quando relacionada ao processo de estampagem.

### 2.5.1. Ensaios de deformabilidade

Durante a deformação a quente, os mecanismos de amaciamento que agem na microestrutura têm influência direta na deformabilidade do material durante o processo de forjamento. Conforme indicado por (ALTAN; NGAILE; SHEN, 2005), a forjabilidade em processos de forjamento pode ser descrita como a capacidade de um material ser moldado por meio de deformações plásticas sem a ocorrência de falhas ou imperfeições. No entanto, essa definição leva em conta apenas aspectos macroscópicos, tais como preenchimento incompleto da matriz e formação de trincas, sem considerar outras possíveis falhas.

(DIETER; KUHN; SEMIATIN, 2003) a mais apropriada definição de forjabilidade considera este conceito como um aspecto tecnológico, que engloba problemas referente às propriedades mecânicas e de microestrutura do material deformado, assim como ferramental utilizado e lubrificação. O desgaste excessivo das

ferramentas, as tensões elevadas de conformação e design inadequado são um dos maiores problemas relacionados a lubrificação e ferramentaria. Com relação ao material deformado, o surgimento de microestrutura inadequada do forjado e fluxo errôneo de material podem acarretar problemas. Estes levam a propriedades mecânicas não desejadas dos componentes que ocasionam no retrabalho e refugo (DIETER; KUHN; SEMIATIN, 2003).

De acordo com VERLINDEN, a pesquisa das características do material e ajuda a determinar qual o processamento correto do material. Muitos processos podem ser utilizados na compreensão e desenvolvimento desse processo. A seguir serão mostrados os ensaios mais usuais de forjabilidade.

- **Recalque:** O ensaio de compressão a quente de “billet” cilíndrico apresenta perdas térmicas de condução devido as matrizes e convecção devido ao ar. Esse tipo de ensaio permite a obtenção da curva de escoamento do material e a identificação de regiões com fluxo de material reduzido, causadas pelo atrito e perdas térmicas.

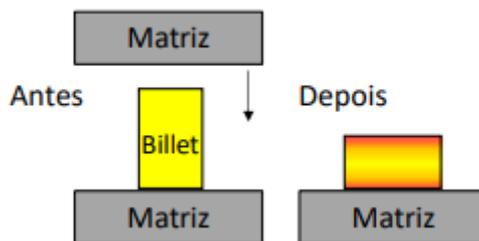


Figura 5 - Aspecto do billet posicionado no centro da matriz (esquerda) e aspecto do billet após a operação de recalque (direita). Fonte: (VERLINDEN et al., 2007)

- **Cunha:** O forjamento a quente de material em formato de cunhas possibilita a verificação do efeito da taxa de deformação e da variação da deformação em diversos graus no material em somente um corpo de prova.

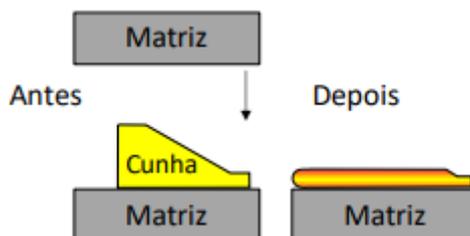


Figura 6 - Aspecto da cunha antes (esquerda) e após a deformação plástica (direita) imposta pelo processo de forjamento (recalque). Fonte: (VERLINDEN et al., 2007)

O trabalho será focado nos processos de recalque de billet cilíndrico e recalque de cunha a quente, apresentando a seguir suas principais características assim como sua vantagem.

## 2.6. Cálculos para forjamento

Determinar com precisão a força requerida para a deformação durante o processo de forjamento é uma tarefa desafiadora. Isso se deve não apenas à complexidade inerente à deformação plástica, mas também a outros fatores, como o atrito entre a peça e a matriz, e os efeitos do resfriamento da peça durante o contato com a matriz. Em vista dessas dificuldades, é necessário realizar simplificações que permitam a estimativa aproximada da magnitude das forças envolvidas. (SCHAEFFER, L., 2020)

### 2.6.1. Avaliação da forjabilidade

Um dos ensaios mais empregados no estudo da forjabilidade é o recalque a quente, explicado na secção 2.5.1. Através deste é possível obter as tensões de escoamento conforme o decorrer do ensaio através da obtenção de curvas de força e deslocamento que, posteriormente, transforma-se em curvas de tensão e deformação verdadeiras.

Através da Equação 1, dada pela lei das constantes dos volumes. Tem-se que pela sua área circular inicial ( $A_1$ ) e altura inicial ( $h_1$ ), obtém-se o volume inicial do cilindro ( $V_1$ ), que deve ser o mesmo que o volume ao final do processo ( $V_2$ ). Isso é baseado em um processo de compressão sem atrito, onde a geometria cilíndrica se mantém ao longo do processo. Dessa maneira, pode-se supor que:

$$V_1 = V_2 \quad \text{Equação 1}$$

$$A_1 h_1 = A_2 h_2$$

$$A_2 = \frac{A_1 h_1}{h_2} \therefore A_{\text{instantânea}} = \frac{A_1 h_1}{h_{\text{instantânea}}}$$

Ao levar em conta que o ( $V_2$ ) é o volume é constante durante a compressão, conseguimos adquirir a área instantânea ( $A_{\text{instantânea}}$ ) para cada altura aferida em função de ( $A_1$ ), ( $h_1$ ) e ( $h_{\text{instantânea}}$ ).

Então, através de uma célula de carga obtém-se a aquisição dos esforços aplicados pelo deslocamento, podendo estimar as tensões geradas no corpo de prova, segundo a equação 2:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 2}$$

Por fim, é possível adquirir a curva de escoamento do processo, através da equação 3:

$$\varepsilon = \ln \left| \frac{h_1}{h_2} \right| \quad \text{Equação 3}$$

Devido a presença de atrito, que leva a deformações desiguais que podem causar o embarrilamento do billet durante o ensaio, esse método é tido como uma aproximação (ALTAN; NGAILE; SHEN, 2005; HANDBOOK, 1993).

### **2.7. Efeito do Atrito na forjabilidade**

O atrito é um fenômeno que ocorre quando há movimento relativo entre materiais e ferramentas em contato, e é crucial para o processo mecânico de trabalho de metais (RODRIGUES, J., & MARTINS, P., 2010). Em forjamento o atrito é indesejado, já que influencia o acabamento superficial dos forjados além de diminuir a vida útil das ferramentas e aumentar as exigências de força do processo segundo (BÖESCH, 2011).

Pode ocorrer a ruptura e surgimento prematuro de trincas em casos de lubrificação inadequada, o que impediria a obtenção da deformação buscada. Além de que, o atrito excessivo pode levar a problemas relacionados ao acabamento superficial do produto, como o *pick-up*, que é uma transferência de material da peça para as ferramentas, e também o *galling* que é a soldagem a frio localizada entre a ferramenta e a peça. O desgaste prematuro de ferramentas devido ao aumento de tensões superficiais também pode acontecer devido ao atrito excessivo (DIETER, G., 1981).

Conforme analisado por (DIETER, G. E., KUHN, H. A., SEMIATIN, S., 2003) através da fratura dúctil, em um ensaio compressivo de material cilíndrico entre matrizes planas, o atrito limita o escoamento radial do material na face ferramenta e amostra. Entretanto, relativo à altura média da amostra, o material escoava livre produzindo uma superfície saliente, que resulta em tensões de tração na direção circunferencial do forjado. Já em casos de abaulamento severo, a tensão axial na superfície em expansão pode se tornar trativa. Esse estado de tensões na superfície do cilindro, produz condições para que fraturas prematuras aconteçam. Durante a conformação compressiva, o atrito forma uma distribuição desigual, da deformação do material, dividindo a peça em 3 zonas de deformação, onde pode-se ver na figura 7:

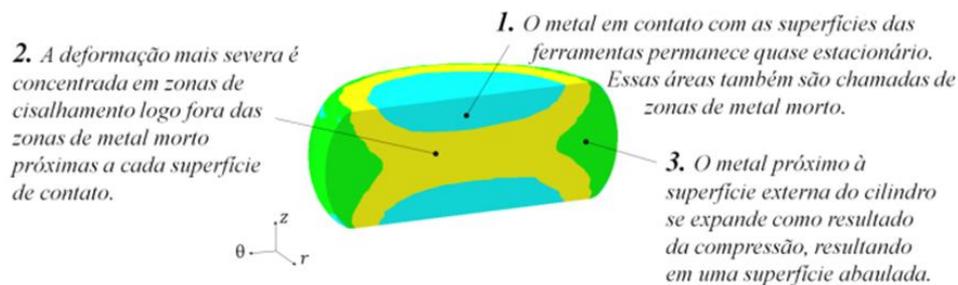


Figura 7 - Zonas deformadas em forjamento de amostra cilíndrica com atrito. Fonte: DIETER, G. E., KUHN, H. A., SEMIATIN, S., 2003)

## 2.8. Macrografia

Macrografia é uma técnica utilizada na metalografia para examinar a microestrutura de materiais metálicos a olho nu ou com auxílio de lupas ou microscópios de baixa ampliação. Através da macrografia, é possível identificar defeitos macroscópicos, como trincas, poros, inclusões e segregações, que podem afetar a qualidade e a integridade dos materiais.

Em forjamento, a macrografia é uma ferramenta importante para avaliar a qualidade das peças forjadas e identificar possíveis defeitos que podem ocorrer durante o processo. Por exemplo, a presença de trincas na superfície da peça forjada pode indicar que a temperatura de forjamento foi inadequada ou que a peça foi submetida a esforços mecânicos excessivos durante o processo (GÜNTER, A; FINDIK, F, 2018).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada no trabalho, bem como todo o procedimento experimental.

#### 3.1. Material

Apenas um material foi investigado neste trabalho, o aço ABNT 1045.

#### 3.2. Geometria da peça

Foram utilizadas duas geometrias de corpos de prova nesse trabalho. Como apresentado na figura 8, os corpos de prova foram barras cilíndricas de 50 x 52 mm de altura e diâmetro, respectivamente. Esses, foram chamados de “billets” e passaram pelo ensaio de recalque. Estes materiais foram obtidos através do corte do aço em uma máquina de serra-fita no Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS.

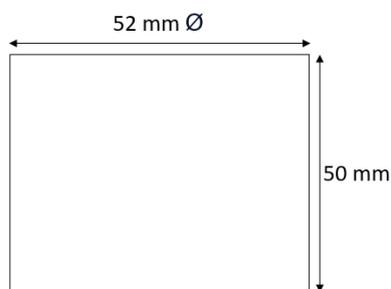


Figura 8 - Billet cilíndrico utilizado para realização dos ensaios de forjamento. Fonte: O autor

A definição das dimensões desta geometria está atrelada as barras disponíveis pelo Laboratório de Transformação Mecânica e que são utilizadas no desenvolvimento de pesquisas de forjamento.

O corpo de prova para o ensaio forjamento de cunha foi confeccionado em uma torneadora automática que, através de barras cilíndricas de 50 mm de diâmetro, gerou-se um material com as seguintes dimensões:

- Altura 1 (h1): 30 mm
- Altura 2 (h2): 5 mm
- Largura: 30 mm
- Comprimento base superior maior: 15mm
- Comprimento base superior menor: 7,5 mm
- Comprimento área inclinada: 82,5 mm
- Comprimento total: 105 mm

Conforme mostra a figura abaixo:

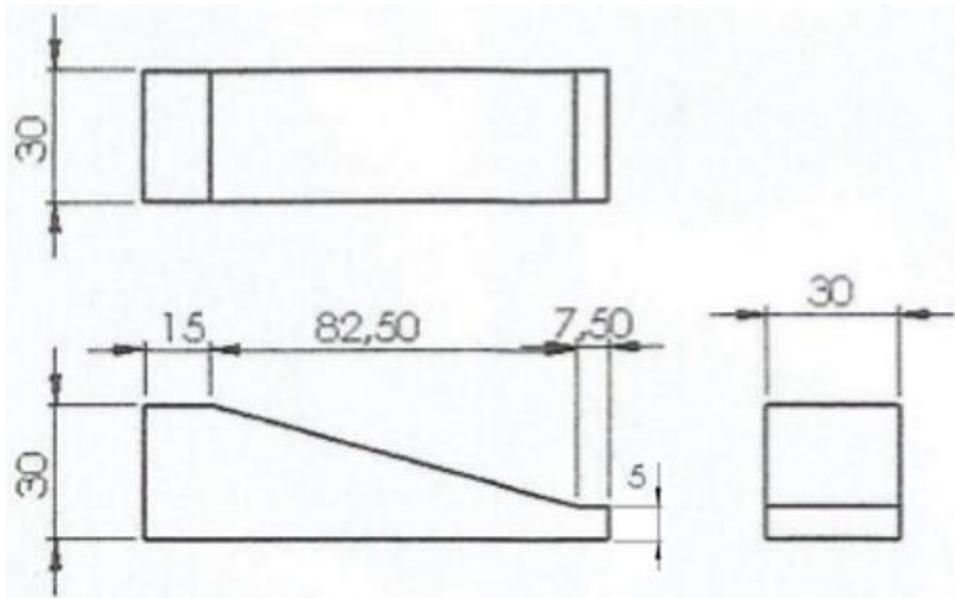


Figura 9 - Cunha utilizada para realização dos ensaios de forjamento. Fonte: O autor.

### 3.3. Procedimento Experimental

#### 3.3.1. Equipamento utilizado para forjar

Para o forjamento das peças estudadas se utilizou a prensa hidráulica FKL, com capacidade de força de 780 MN e velocidade de 5mm/s, figura 10.

A parte hidráulica dessa prensa se encontra na parte superior. Seu sistema hidráulico é composto por tanque, bombas, válvulas direcionais, cilindro principal e cilindros auxiliares, além da válvula de preenchimento. Esta, é montada sobre o cilindro principal cuja função é abrir cilindro para movimentações rápidas.



Figura 10 - Prensa hidráulica de 780 toneladas, marca FKL

### 3.3.1.1. Sistema de aquisição de dados experimentais

Esta seção descreve a parte instrumental dos ensaios, detalhando a utilização de células de carga e transdutores de deslocamento. Para todas as aquisições de dados, utilizou-se o sistema de aquisição Spyder 8 da HBM conectado a um sensor de deslocamento LVDT e uma célula de carga com capacidade de 400 MN.

### 3.3.2. Fixação das matrizes na prensa

Para prevenir o deslocamento das matrizes durante o processo de forjamento, elas são presas à máquina usando grampos específicos. As ferramentas possuem meios de impedir qualquer movimento indesejado enquanto estão sendo conformadas com a fixação por pinos e presilhas.

As matrizes não foram aquecidas no processo, entretanto há uma troca de calor entre o billet aquecido e a matriz de forjamento. A verificação de temperatura foi realizada com uma termocâmera da marca FLUKE, antes e após o forjamento para verificação da variação da temperatura da matriz e a temperatura dos “billets” no início do processo, quando colocados na matriz. Abaixo, na figura 11, tem-se a temperatura sendo aferida.

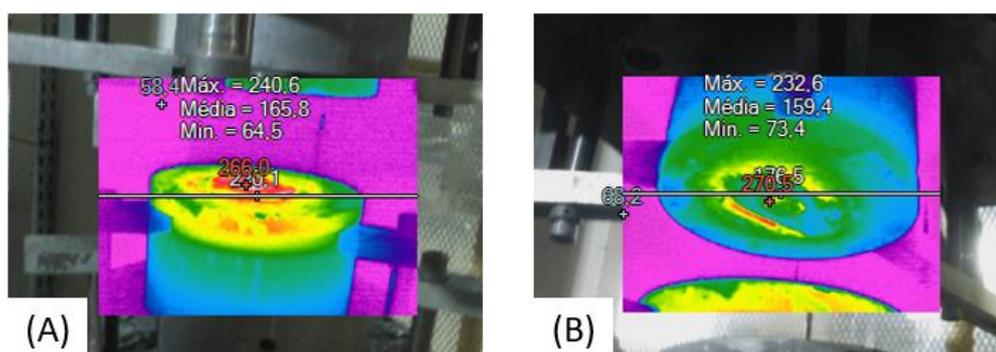


Figura 11 - Temperatura da matriz antes (a) e após (b) o forjamento. Fonte: O autor

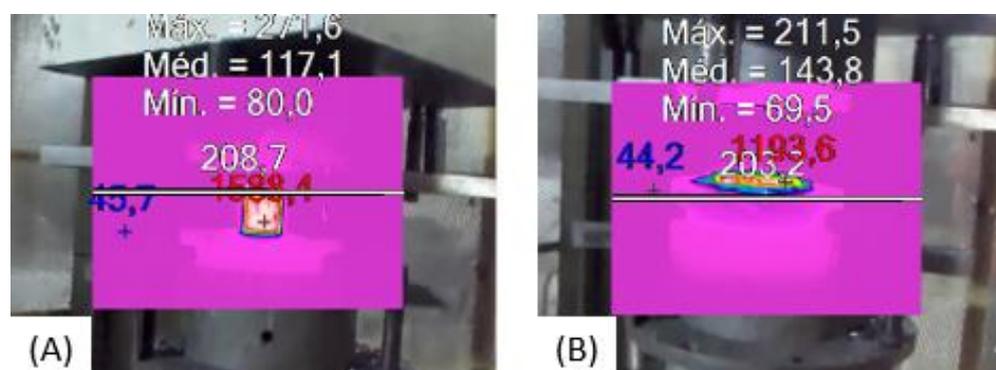


Figura 12- Temperatura do billet antes (a) e após (b) o forjamento. Fonte: O autor

### 3.3.3. Lubrificação

Aplicou-se nesse processo de forjamento o lubrificante LUBRODAL AT 737F que é uma mistura base de grafita em água. Foi utilizado um pincel para aplicação na superfície superior e inferior da matriz no local onde o billet entra em contato com a ferramenta.



Figura 13 - Lubrificante aplicado no processo de forjamento – Lubrodal AT 737F da Fuchs do Brasil.

### 3.3.4. Aquecimento da matéria-prima (“billets” e cunhas)

Os “billets” e as cunhas foram aquecidos, em forno elétrico da marca Sanchis. Para esse estudo, realizou-se ensaio em 3 diferentes temperaturas de forno: 900, 1000 e 1200°C. Os materiais foram inseridos da seguinte maneira, 2 “billets” e uma cunha foram ao forno para cada temperatura, pois o ensaio realizado busca a comparação das forças em diferentes temperaturas.

Dentro do forno, ficaram durante todo o período da rampa de aquecimento de cada temperatura e, após atingir a temperatura especificada em cada ensaio, ficaram mais um período de encharque que é de 1 hora por polegada de aço. Cada remessa ficou em torno de 2 horas dentro do forno antes de começar o ensaio de forjamento. Esse é o tempo necessário para que aconteça o encharcamento completo dos “billets” e sua temperatura se mantenha a mais homogênea possível.

A figura 14 apresenta o forno usado no ensaio.



Figura 14 - Forno para aquecimento dos materiais de forjamento

### 3.3.5. Ensaio de Recalque para determinação da forjabilidade

Os ensaios começaram com a temperatura de 1200°C onde foi retirada primeiramente a cunha e posteriormente os “billets”. A cunha foi forjada com uma carga pré-determinada de 350 toneladas. Já os “billets” foram prensados com as cargas de 350 e 300 toneladas. As demais temperaturas de 1000 e 900°C seguiram as mesmas etapas que o processo de 1200°C. Para as cunhas foi utilizada apenas 1 força em cada temperatura devido a quantidade de material disponível.

Na tabela 3 pode-se ver como foram subdivididos os ensaios:

Tabela 2 - Condições de ensaios dos “billets” e cunhas analisados. Fonte: O autor

Temperaturas	Item	Força
1200°C	Cunha 1	350 Ton
	Billet 1	350 Ton
	Billet 2	300 Ton
1000°C	Cunha 2	350 Ton
	Billet 3	350 Ton
	Billet 4	300 Ton
900°C	Cunha 3	350 Ton
	Billet 5	350 Ton
	Billet 6	300 Ton

### 3.4. Curvas experimentais

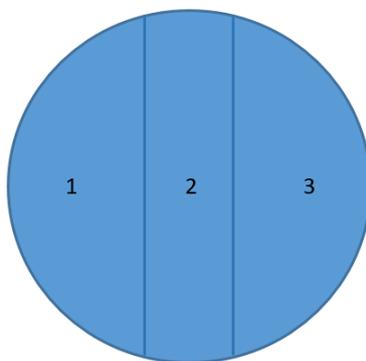
As curvas experimentais dos ensaios de forjamento foram obtidas através do Excel utilizando os parâmetros de tempo, força e deslocamento obtidos através do LVDT.

### 3.5. Caracterização metalúrgica

Após os ensaios para determinação da forjabilidade foram realizadas apenas as caracterizações metalúrgicas dos “billets” obtidos nos ensaios devido à ausência de tempo para a realização deste ensaio para as cunhas.

#### 3.5.1. Análise Macroscópica

A preparação para a análise macrográfica foi feita após a etapa de corte dos materiais em serra-fita onde os “billets” foram cortados em tiras onde a parte 2 foi analisada conforme a figura 15.



*Figura 15 – Secções dos “billets” que usinadas em serra fita, vista topo.*

O processo seguiu para o lixamento sistemático feito com lixas d’água de granulometria progressiva de 100, 220, 400, 600 e 1200 com variação angular de 90° entre cada lixa. Posteriormente, foi realizado o polimento com pasta de diamante de 3 e 1  $\mu\text{m}$  onde um pano de polimento foi fixado em uma politriz circular marca FORTPEL em rotação de 600 rpm. A mesma se encontra na figura 16:



Figura 16 - Politriz utilizada no processo de polimento do material.

O ensaio macroscópico foi realizado através do ataque químico do metal em uma solução de ácido pícrico (2 mL de HCl, 100 mL de água destilada e 10g de ácido pícrico) por imersão em um período de 2 minutos, tal solução busca a visualização do contorno de grão.

A figura 17 mostra a macrografia representativa do comportamento usual dos “billets” depois do forjamento. Segundo (SILVEIRA, A.,2019) as regiões superficiais, apresentam menor grau de deformação e maiores gradientes de temperatura. Já as regiões centrais da peça apresentam deformações e temperaturas mais homogêneas no decorrer do processo. Para o presente estudo foram adotadas 3 regiões de verificação que podem ser analisadas na pela fibragem do forjado, que mostra o deslocamento de material na amostra indicando o fluxo de escoamento da peça conforme a figura abaixo.



Figura 17 – Macrografia de um billet após o processo de recalque. Fonte: O autor

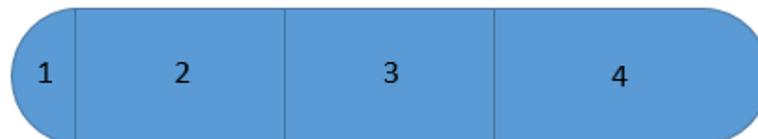
### 3.5.2. Análise microscópica

Para etapa de análise microscópica realizou-se o seccionamento da peça numa máquina de corte a disco, apresentada na figura 18.



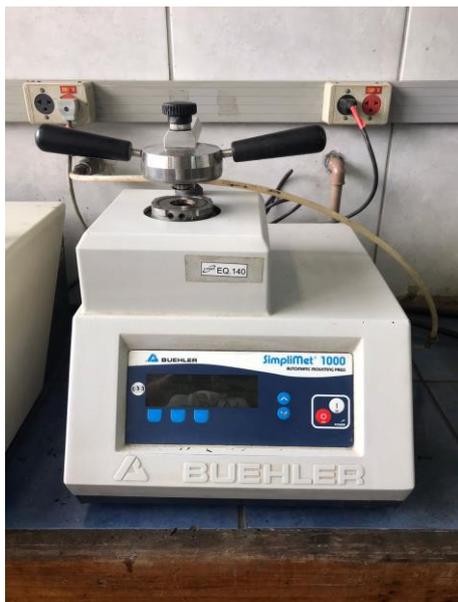
*Figura 18 – Máquina de corte a disco*

A etapa de análise microscópica visou duas partes em específico, a parte central e a lateral dos “billets”. Para isso, cortou-se o material conforme as secções que mostradas na figura 19. Então, as secções 1 e 3 seguiram para análise.



*Figura 19 - Seção transversal dos “billets”*

Após cortadas as partes de interesse na pesquisa, 1 e 3, foram embutidas na máquina de embutimento a quente da marca Buehler, conforme figura 20.



*Figura 20 - Amostras cortadas após a etapa de macrografia*

Então, o processo seguiu a mesma etapa sistemática de lixamento e polimento da análise macroscópica, conforme visto em 3.5.1.



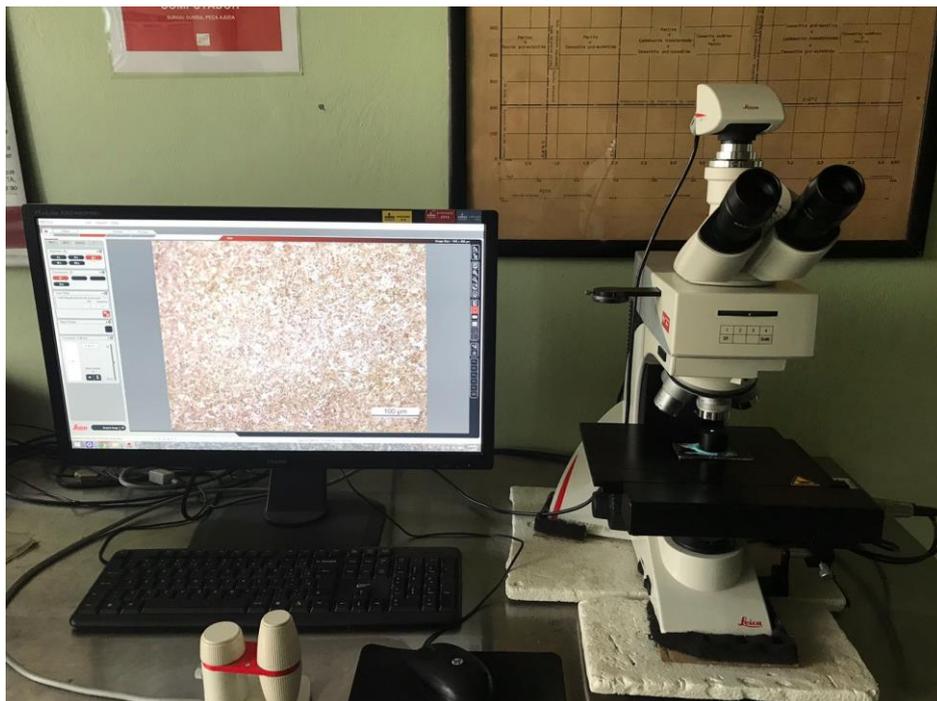
*Figura 21 - Amostras preparadas para ensaio microscópico*

Por fim, segundo (CASTRO, P., 2021) realizou-se o ataque químico com Nital 2% por 10 segundos, onde essa solução é usada para caracterização da microestrutura por microscópio ótico.

### **3.5.3. Caracterização das microestruturas**

Nas microestruturas analisadas do forjamento, foi feita uma avaliação qualitativa com o objetivo de identificar os microconstituintes presentes na microestrutura do material do estudo. Para a identificação das fases presentes, foi usada como base a literatura referente a aços médio carbono de resfriamento contínuo.

Para a caracterização das microestruturas as imagens obtidas através do microscópio ótico da marca Leica apresentado na figura 22.



*Figura 22 – Microscópio óptico utilizado para análise das amostras*

Foram realizadas 3 imagens de cada amostra de billet forjado com magnificações de 100, 200 e 500x nas áreas de interesse, 1 e 3. Na parte do billet 1 foi realizada apenas imagem da parte interior. Já na parte 3 do billet, foram realizadas imagens da parte superior (3S) e central (3C).

#### **3.5.4. Microdureza**

Realizou-se ensaio de microdureza Vickers com carga de 1kgf ( $HV_1$ ), usando o microdurômetro da marca Instron modelo Tukon 2100B conforme a figura 23.



*Figura 23 – Microdurômetro utilizado para perfil de microdureza.*

Foi realizado um perfil de identações da superfície até o centro da peça para cada região, com o espaçamento mínimo necessário de 2,5 identações entre elas como indicado pela norma (ASTM INTERNATIONAL, 2017b).

Para definição de dureza nas regiões foi utilizada a média das 3 primeiras identações desse perfil como a dureza para a região superficial, e a média das 3 últimas são indicados como a dureza do interior da peça. Na figura 24 pode-se verificar a metodologia descrita acima.

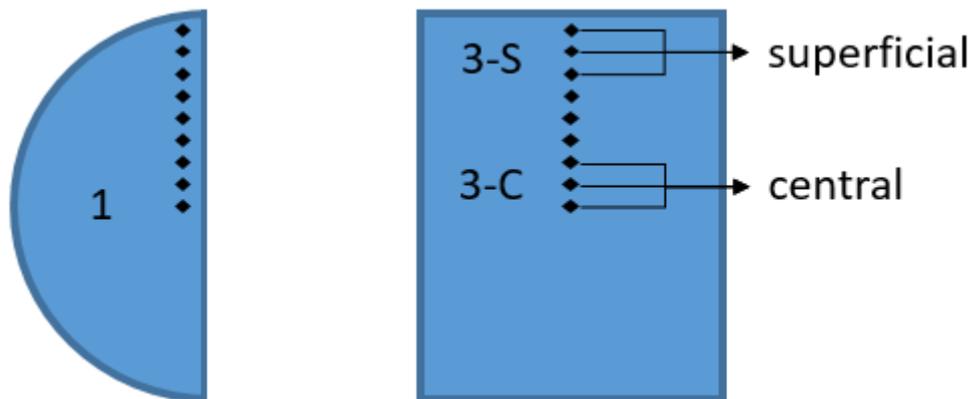


Figura 24 – Perfis de microdureza analisados.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são mostrados os resultados obtidos nos ensaios realizados nesta pesquisa.

### 4.1. Ensaio de Forjabilidade

Os ensaios de forjabilidade foram divididos em duas etapas, forjamento de “billets” com variação de temperatura e carga e das cunhas onde houve a variação apenas de temperatura conforme indicado no procedimento experimental.

#### 4.1.1. Análise da forjabilidade dos “billets”

Os “billets” obtidas nos ensaios de forjamento foram todos unificados na figura 25.



Figura 25 - Aspectos dos “billets” após o processo de reclaque, os parâmetros de processamento estão indicados nos “billets”.

Observa-se nas imagens que com o aumento da temperatura há uma maior deformação dos “billets”, onde seus diâmetros foram sucessivamente aumentando e a sua altura reduzindo, conforme o esperado. O mesmo vale para a variação de carga aplicada, em que os “billets” de menor carga apresentaram menor deformação e com o aumento da carga, obteve-se maiores diâmetros e menores alturas, o que mostra uma maior deformação.

Não se observa visualmente nenhum defeito ou trinca causado pelo processo de forjamento e também se observa formação de carepas, ainda que em pouca quantidade.

No billet forjado a 1200°C e carga de 350t, a altura final é de 7,652 mm e a deformação foi de 1,877. Já para o de mesma temperatura e carga de 300 t, a altura final

foi de 8,5 mm com uma deformação verdadeira de  $\varphi=1,771$ . Isso mostra um comportamento esperado de que a maior carga apresenta maior deformação.

No billet forjado a 1000°C e carga de 350t, a altura final é de 9,652 mm e a deformação verdadeira foi de  $\varphi=1,645$ . Já para o de mesma temperatura e carga de 300 t, a altura final foi de 10,41 mm com uma deformação verdadeira de  $\varphi=1,569$ . Isso mostra um comportamento diferente do esperado uma vez que a maior carga não apresentou a maior deformação. Isso pode acontecer devido a uma demora na transição do forno para a prensa, homogeneização inadequada dentro do forno ou a um problema na aquisição de dados.

No billet forjado a 900°C e carga de 350t, a altura final é de 10,28 mm e a deformação verdadeira foi de  $\varphi=1,582$ . Já para o de mesma temperatura e carga de 300 t, a altura final foi de 10,86 mm com uma deformação verdadeira de  $\varphi=1,527$ . Isso mostra um comportamento esperado, de que a maior carga apresenta maior deformação.

Na tabela 4 pode-se verificar os dados:

*Tabela 3 –Tabela de recalque dos “billets”*

Temperaturas	1200°C		1000°C		900°C	
Item	Billet 1	Billet 2	Billet 3	Billet 4	Billet 5	Billet 6
Força (t)	350	300	350	300	350	300
h1 (mm)	50	50	50	50	50	50
h2 (mm)	7,652	8,5	9,652	10,41	10,28	10,86
$\Delta h$ (mm)	42,348	41,5	40,348	39,59	39,72	39,14
Def	1,877	1,772	1,645	1,569	1,582	1,527

#### 4.1.2. Análise da deformabilidade em Cunhas

As cunhas obtidas nos ensaios de forjamento foram todas unificadas na figura 26. Observa-se nas imagens que com o aumento da temperatura há uma maior deformação das cunhas apesar de manter a mesma carga de 350t.

Assim como nos “billets”, não se observa visualmente nenhum defeito ou trinca causado pelo processo de forjamento.

Observa-se a formação de carepas que acabaram se desprendendo do material durante o forjamento, esse é um comportamento esperado devido a alta temperatura de processamento do material.



Figura 26 - Cunhas após o ensaio de forjamento, as temperaturas de processamento e cargas aplicadas estão indicados nas cunhas

É importante salientar que a deformação calculada para as cunhas é referente a altura final, uma vez que a sua área de contato é variável durante o forjamento.

A altura final da cunha é de 6,95 mm para a cunha forjada a 900°C o que gera uma deformação verdadeira máxima final de 1,462. Para a cunha conformada a 1000°C a altura final da cunha é de 6,79 mm e a deformação verdadeira máxima final é de 1,485. Na cunha forjada a 1200°C a altura final é de 5,63 mm e a deformação verdadeira máxima final é de 1,673.

Na tabela 5 pode-se ver os dados:

Tabela 4 –Tabela de recalque das cunhas

Temperaturas	1200°C	1000°C	900°C
Item	Cunha 1	Cunha 2	Cunha 3
Força (t)	350	350	350
h1 (mm)	30	30	30
h2 (mm)	5,63	6,79	6,95
$\Delta h$ (mm)	24,37	23,21	23,05
Def	1,673	1,485	1,462

#### 4.2. Curvas de deformabilidade

Durante os ensaios de recalque dos “billets” foram obtidos os valores de carga aplicada e deslocamento da prensa. Assim, utilizando a lei de constância de volume e sabendo a altura inicial dos “billets” é possível calcular a variação dos diâmetros durante a operação de recalque em função da altura instantânea dos “billets” e assim calcular a tensão aplicada.

#### 4.2.1.1. Recalque com carga aplicada de 350 Toneladas - “billets”

A Figura 27 apresenta a curva de deformação verdadeira pela tensão verdadeira nos “billets” forjado a uma carga de 350 toneladas. Observa-se que para esta condição de processamento do material, a deformação verdadeira máxima na temperatura de 900°C foi de  $\phi=1,6$  e a sua tensão máxima foi próxima a 310 MPa. Conforme a temperatura aumenta, a tensão verdadeira do material se reduz e a deformação verdadeira aumenta. Então, como se esperava, a 1000°C obteve-se aproximadamente 290 MPa e  $\phi=1,64$  de tensão e deformação verdadeiras, respectivamente. Já a 1200°C, houve maior redução da tensão verdadeira para aproximadamente 240 MPa e aumento da deformação verdadeira para  $\phi=1,86$ .

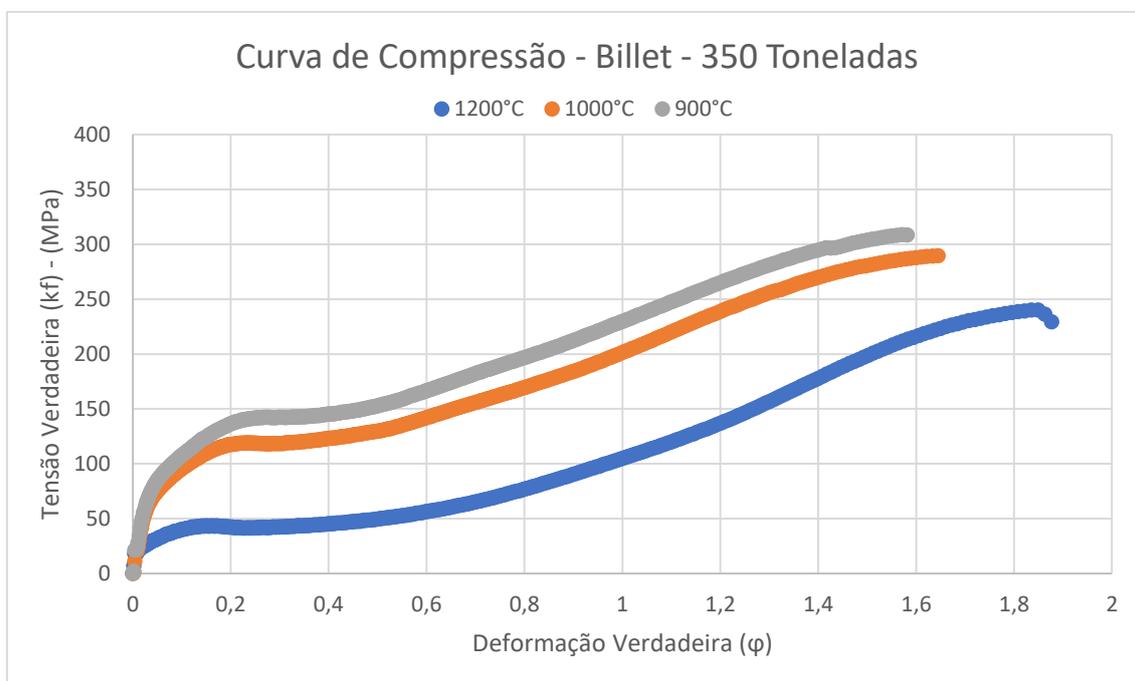


Figura 27 - Curva de Deformação verdadeira X tensão verdadeira para o Billet conformado a 900°C, 1000°C e 1200°C - a carga máxima aplicada foi de 300 t.

#### 4.2.1.2. Recalque com carga aplicada de 300 Toneladas - “billets”

A Figura 28 apresenta a curva de deformação verdadeira pela tensão verdadeira nos “billets” recalcados com uma carga de 300 toneladas. Observa-se que para esta condição de processamento do material, a tensão verdadeira máxima também foi da temperatura de 900°C e a deformação verdadeira máxima também foi na maior temperatura, 1200°C. Contudo, se observou uma redução da variação da tensão verdadeira entre as temperaturas de 900°C e 1000°C, isso ocorre pois com uma menor carga de forjamento aplicada, as curvas de compressão em temperaturas menores tendem a se aproximar.

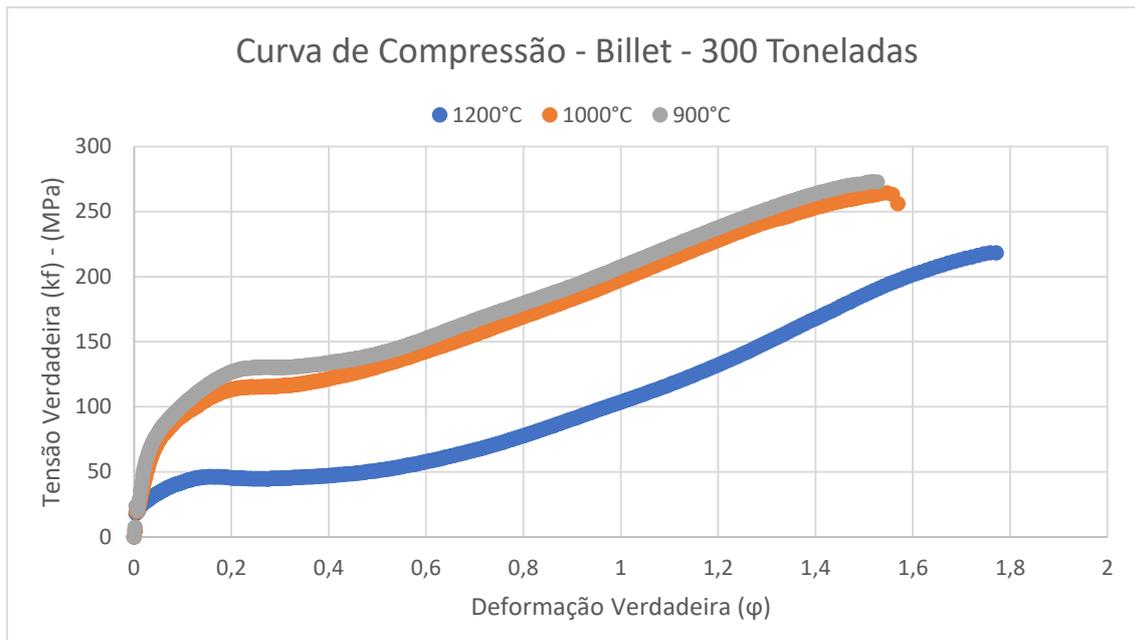


Figura 28 - Curva de Deformação verdadeira X tensão verdadeira (Mpa) para o Billet conformado a 900°C, 1000°C e 1200°C - a carga máxima aplicada foi de 300 t.

#### 4.2.1.3. Recalque com carga aplicada de 350 Toneladas – Cunhas

Referente a curva de deformação verdadeira pela tensão verdadeira nas cunhas não pode ser analisada devido a sua variação de área ao longo do tempo no processo de forjamento. Portanto, conforme a figura 29, o que se obteve foi o gráfico da força aplicada pelo deslocamento, onde com maior temperatura de 1200°C houve maior deslocamento a uma menor carga aplicada. Já para as temperaturas de 900°C e 1000°C nota-se uma curva bem aproximada, comportamento semelhante ao encontrado nas curvas de compressão dos “billets”.

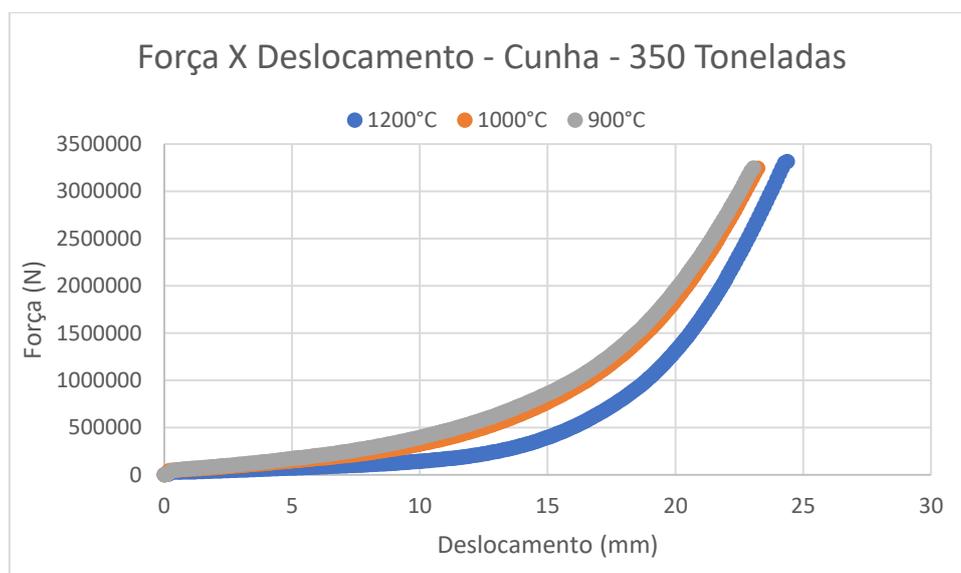


Figura 29 - Curva de Carga aplicada (N) X Deslocament (mm) para a cunhas conformadas a 900°C, 1000°C e 1200°C - a carga máxima aplicada foi de 350 t.

### 4.3. Análise macrográfica

#### 4.3.1. Ensaio de Recalque – Carga de 350 Toneladas

A figura 30 mostra as macrografias realizadas para as 3 temperaturas estudadas e com a carga de 350 toneladas.



Figura 30 – Macrografia “billets” em carga de compressão de 350 toneladas nas temperaturas (a) 900°C (b) 1000°C (c) 1200°C.

Os ensaios de recalque dos “billets” a uma carga de 350 toneladas força apresentaram as seguintes macrografias. Pode-se notar que a secção de maior temperatura apresenta uma altura menor e maior diâmetro. Também é possível perceber que as linhas de deformação presentes no material aumentam o grau de deformação com o aumento da temperatura, como é analisado nas linhas de forjamento a 1200°C em relação as linhas de temperaturas menores como das temperaturas de 1000 e 900°C. Nas regiões superficiais nota-se um grau menor de deformação, por outro lado, no interior, nota-se deformações mais homogêneas conforme analisado em (SILVEIRA, A.C., 2019)

#### 4.3.2. Ensaio de Recalque – Carga de 300 Toneladas

A figura 31 mostra as macrografias realizadas para as 3 temperaturas estudadas e com a carga de 300 toneladas.



Figura 31 – Macrografia “billets” em carga de compressão de 300 toneladas nas temperaturas (a) 900°C (b) 1000°C (c) 1200°C.

Para 300 toneladas, pode ser evidenciado os mesmos comportamentos que para a carga de 350 toneladas, a grande diferença está para a altura das secções que são um pouco maiores em uma menor carga aplicada e com um diâmetro menor, uma vez que o volume se mantém constante.

#### 4.4. Análise Micrográfica

A microestrutura de um aço 1045 normalizado consiste principalmente de ferrita e perlita. A ferrita é uma fase metálica macia e dúctil, enquanto a perlita é uma estrutura lamelar composta de camadas alternadas de ferrita e cementita, que são uma composição de duas fases metálicas com a característica de maior dureza e fragilidade.

Após o processo de forjamento e resfriamento ao ar sem tratamento térmico posterior, a microestrutura esperada e o formato microestrutural em que o aço 1045 se encontra dependem da temperatura de forjamento.

As análises micrográficas foram realizados ensaios apenas dos “billets”, não foram realizados para as cunhas devido à ausência de tempo.

##### 4.4.1. Ensaio de Recalque – “billets” – 1200°C

O aço 1045 forjado a 1200°C e resfriado ao ar sem tratamento térmico posterior, a microestrutura esperada é que se tenha ferrita e perlita, com um tamanho de grão mais elevado devido a alta temperatura.

##### 4.4.1.1. Carga aplicada de 350 toneladas força

Para as figuras 32 a 34 são apresentadas as subdivisões das áreas de análise, conforme citado em 3.5.2.

1) Superfície:

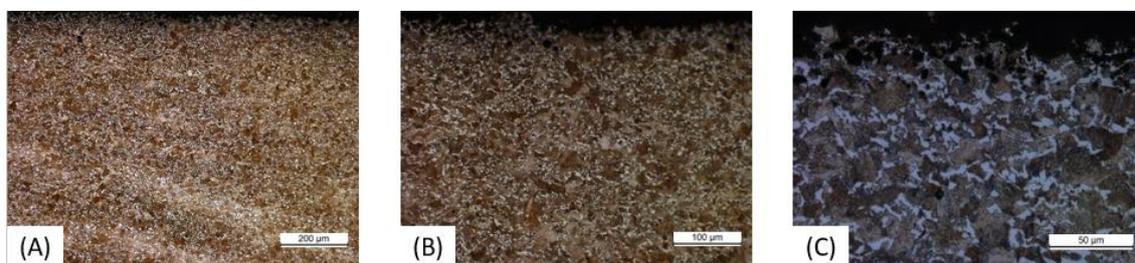


Figura 32 – Micrografia da superfície dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 1200°C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x.

2) Centro:

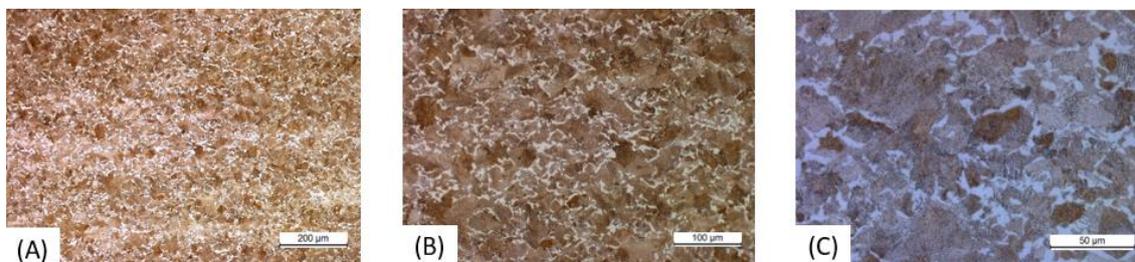


Figura 33 – Micrografia do núcleo central dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 1200°C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x.

3) Lateral:

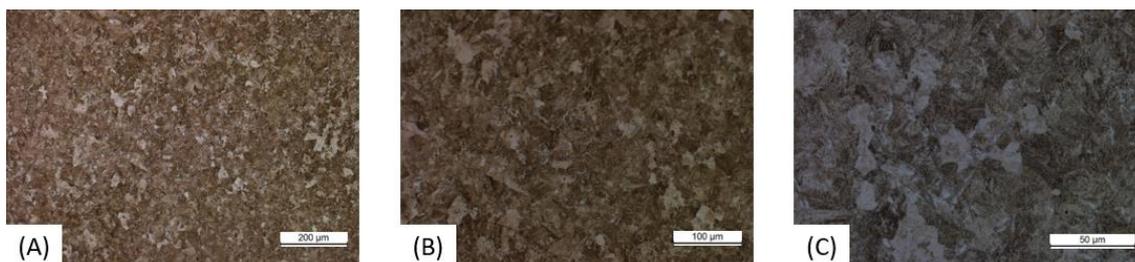


Figura 34 – Micrografia da região lateral dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 1200 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x.

Conforme (SILVEIRA, A.C., 2019) as microestruturas do centro (2) e lateral (3) deformações mais homogêneas durante o processo. Em (1) pode-se perceber um maior achatamento da região clara (ferrita) do que nas demais regiões 2 e 3. Também conforme o esperado, verificamos grãos maiores devido a alta temperatura do processo, ocasionada pelo aumento da temperatura de austenitização. Isso leva essa faixa de temperatura a uma redução da ductilidade do material.

#### 4.4.1.2. Carga aplicada de 300 toneladas força

Para as figuras 35 a 37 são apresentadas as subdivisões das áreas de análise, conforme citado em 3.5.2.

##### 1) Superfície:

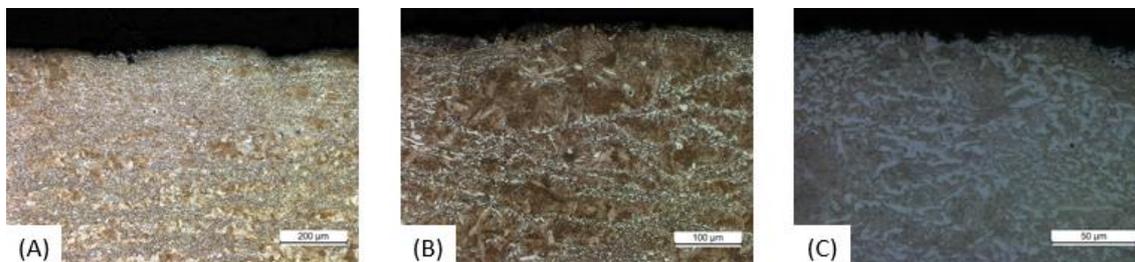


Figura 35 – Micrografia da superfície dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 1200°C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x.

##### 2) Centro:

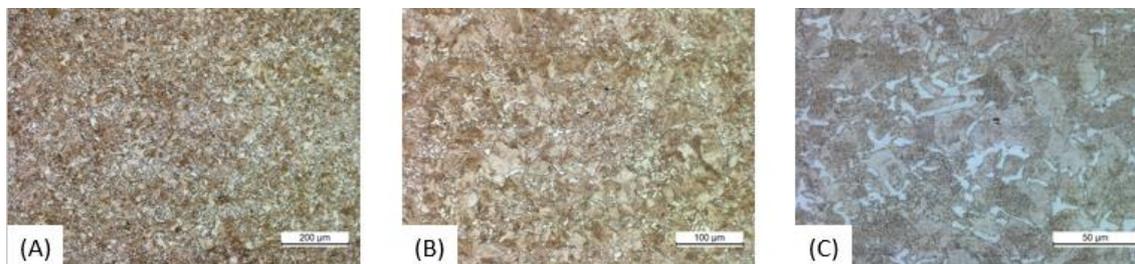


Figura 36 – Micrografia do núcleo central dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 1200 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x.

##### 3) Lateral:

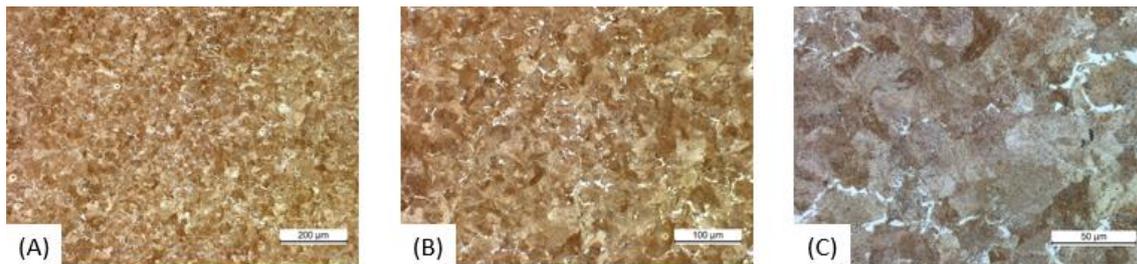


Figura 37 – Micrografia da região lateral dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 1200 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x.

Para a carga de 300 toneladas e 1200°C obteve-se microestruturas bem semelhantes às do item 4.4.1.1. Conforme (SILVEIRA, A.C., 2019) houve o esperado para as microestruturas do centro (2) e lateral (3) deformações mais homogêneas durante o processo. Em (1) pode-se perceber um maior achatamento da região clara (ferrita) do que nas demais regiões 2 e 3.

#### 4.4.2. Ensaio de Recalque – “billets” – 1000°C

O aço 1045 forjado a 1000°C e resfriado ao ar sem tratamento térmico posterior, a microestrutura esperada é uma mistura de, e o formato microestrutural em que o aço se encontra é ferrita e perlita.

##### 4.4.2.1. Carga aplicada de 350 toneladas força

Para as figuras 38 a 40 são apresentadas as subdivisões das áreas de análise, conforme citado em 3.5.2.

##### 1) Superfície:

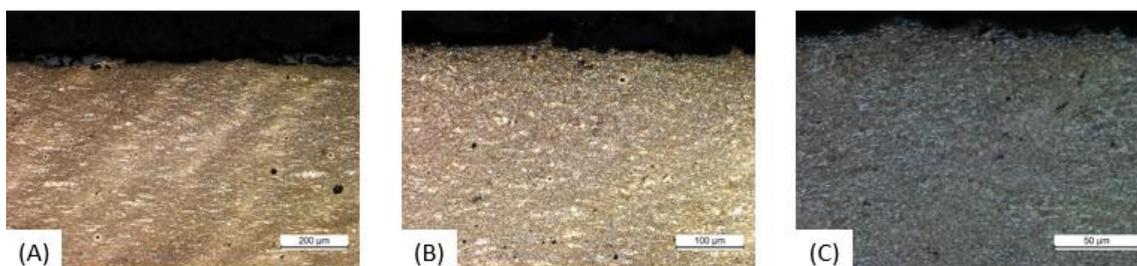


Figura 38 – Micrografia da superfície dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 1000°C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x.

##### 2) Centro:

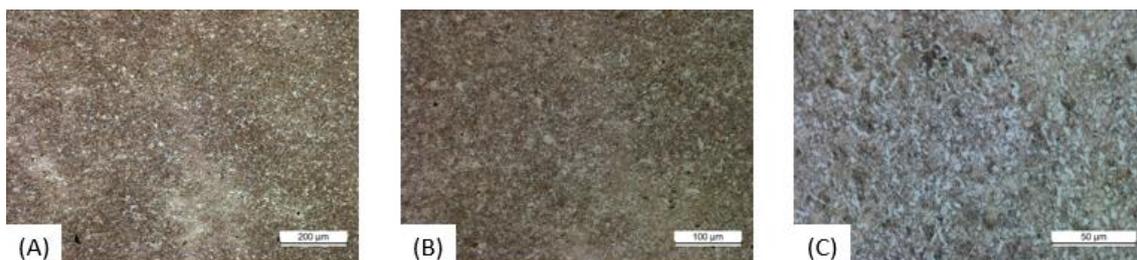


Figura 39 – Micrografia do núcleo central dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 1000 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x.

## 3) Lateral:

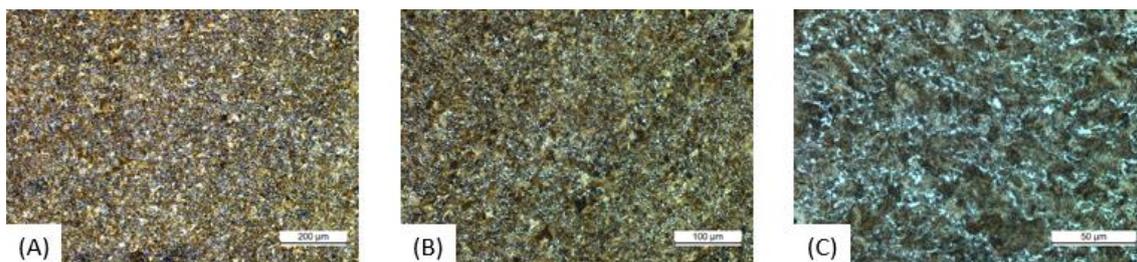


Figura 40 – Micrografia da região lateral dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 1000 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x.

Conforme esperado as microestruturas do centro (2) e lateral (3) deformações mais homogêneas durante o processo (SILVEIRA, A.C., 2019). Em (1) nota-se que há menor achatamento dos grãos do que na temperatura de 1200°C, algo que era esperado. Também se percebe que houve uma significativa redução nos tamanhos de grão, comparando com a temperatura de 1200°C, conforme esperado segundo (ASM Metals HandBook Volume 14 - Forming and Forging).

#### 4.4.2.2. Carga aplicada de 300 toneladas força

Para as figuras 41 a 43 são apresentadas as subdivisões das áreas de análise, conforme citado em 3.5.2.

## 1) Superfície:

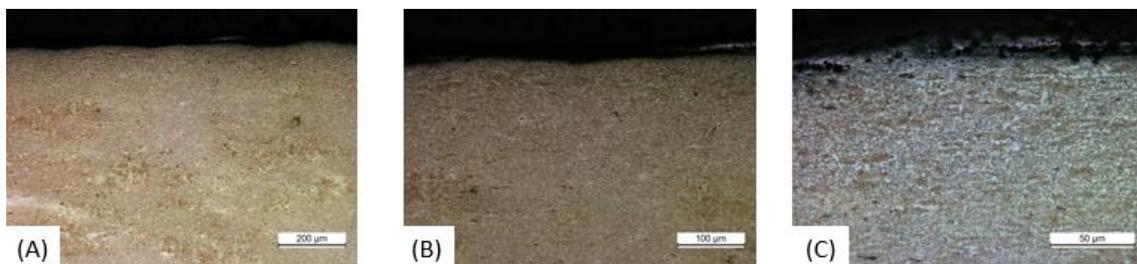


Figura 41 – Micrografia da superfície dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 1000°C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x.

## 2) Centro:

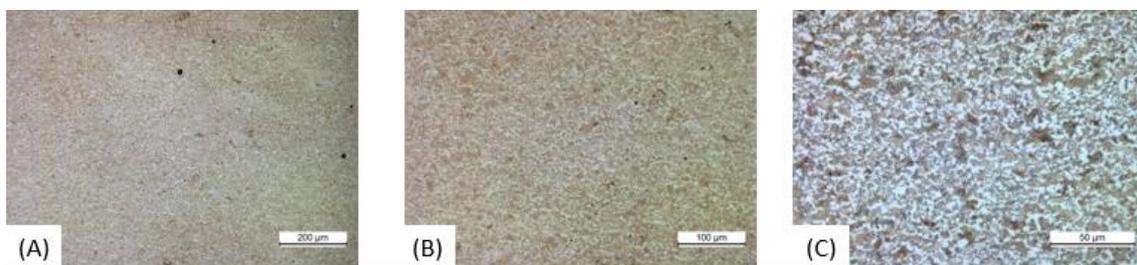


Figura 42 – Micrografia do núcleo central dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 1000 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x.

## 3) Lateral:

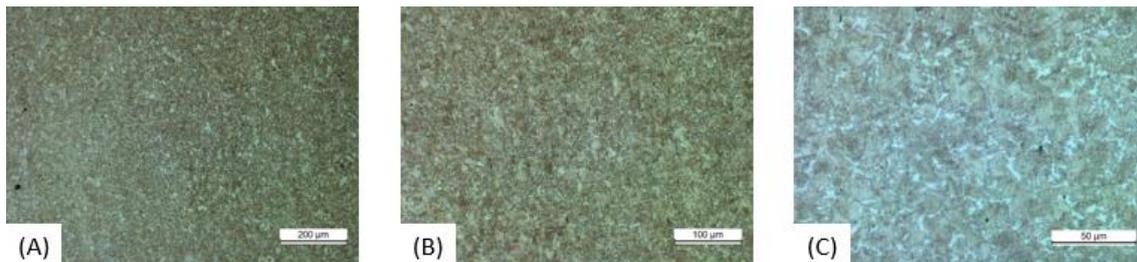


Figura 43 – Micrografia da região lateral dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 1000 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x

Conforme esperado as microestruturas de 300 toneladas apresentam características semelhantes às do item 4.4.2.1. Conforme esperado as microestruturas do centro (2) e lateral (3) deformações mais homogêneas durante o processo (SILVEIRA, A.C., 2019). Em (1) nota-se que há menor achatamento dos grãos do que na temperatura de 1200°C, algo que era esperado conforme (ASM Metals HandBook Volume 14 - Forming and Forging).

#### 4.4.3. Ensaio de Recalque – “billets” – 900°C

O aço 1045 for forjado a 900°C e resfriado ao ar sem tratamento térmico posterior, a microestrutura esperada é a ferrita e a perlita, e o formato microestrutural em que o aço se encontra é geralmente de grãos mais finos e com formato irregular.

##### 4.4.3.1. Carga aplicada de 350 toneladas força

Para as figuras 44 a 46 são apresentadas as subdivisões das áreas de análise, conforme citado em 3.5.2.

##### 1) Superfície:

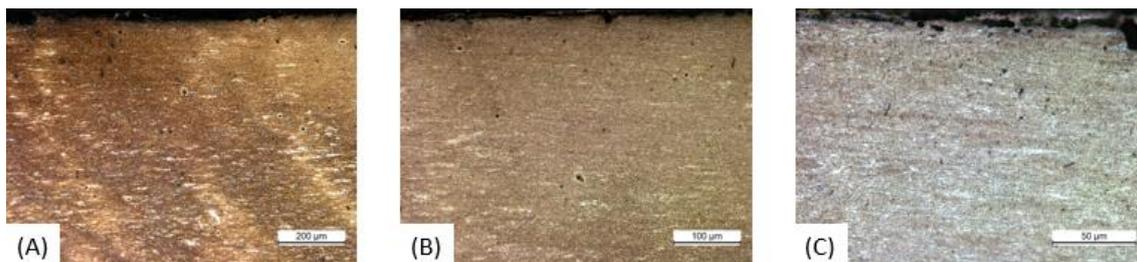


Figura 44 – Micrografia da superfície dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 900°C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x.

##### 2) Centro:

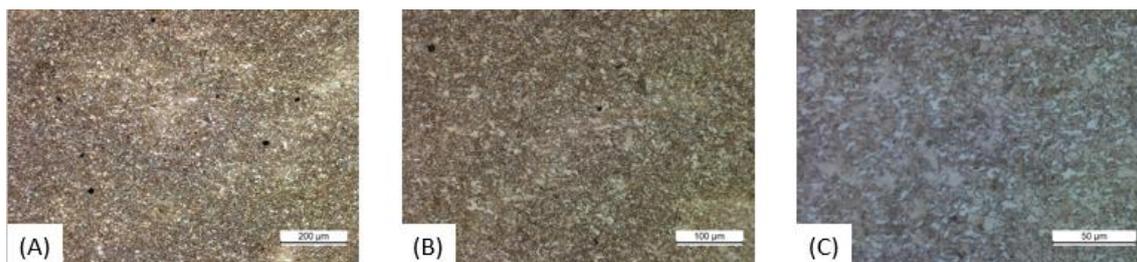


Figura 45 – Micrografia do núcleo central dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 900 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x.

## 3) Lateral:

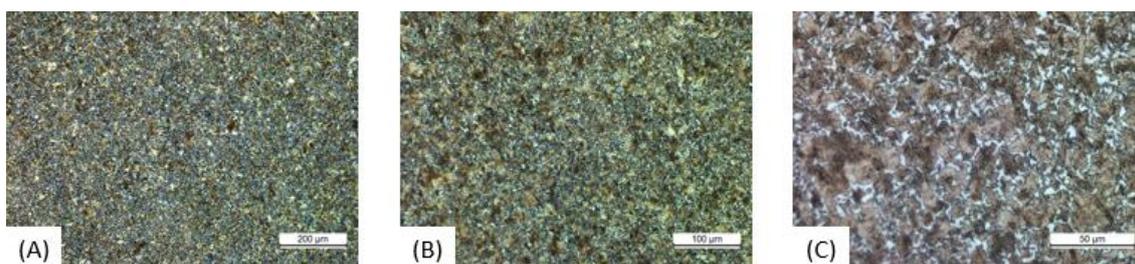


Figura 46 – Micrografia da região lateral dos “billets” em carga de compressão de 350 toneladas a 900 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x.

Conforme esperado as microestruturas do centro (2) e lateral (3) são semelhantes e apresentaram deformações mais homogêneas durante o processo (SILVEIRA, A.C., 2019). O aço apresenta microestrutura predominante de ferrita e perlita de grãos mais finos e de formato irregular onde pode-se perceber em (1) um achatamento dessas microestruturas conforme esperado segundo (ASM Metals Handbook Volume 14 - Forming and Forging) e (ASM Metals Handbook Volume 9 – Metallography and Microstructures).

#### 4.4.3.2. Carga aplicada de 300 toneladas força

Para as figuras 47 a 49 são apresentadas as subdivisões das áreas de análise, conforme citado em 3.5.2.

## 1) Superfície:

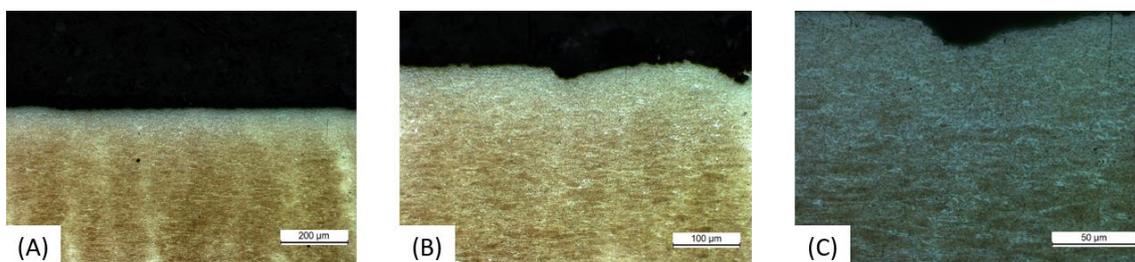


Figura 47 – Micrografia da superfície dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 900°C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x.

## 2) Centro:

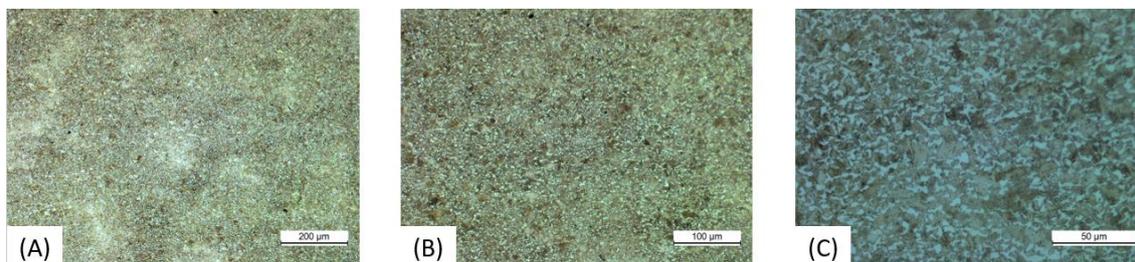


Figura 48 – Micrografia do núcleo central dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 900 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x.

## 3) Lateral:

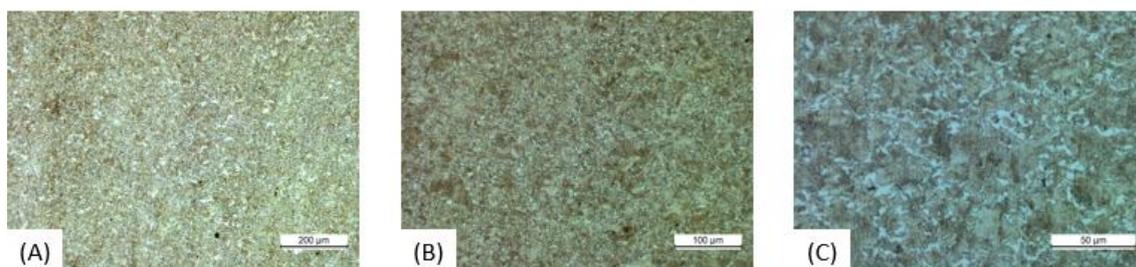


Figura 49 – Micrografia da região lateral dos “billets” em carga de compressão de 300 toneladas a 900 °C (a) Aumento de 100x (b) Aumento de 200x (c) Aumento de 500x.

Conforme esperado as microestruturas do centro (2) e lateral (3) são semelhantes e apresentaram deformações mais homogêneas durante o processo (SILVEIRA, A.C., 2019). O aço apresenta microestrutura semelhante ao do forjamento de 350 toneladas, porém com menor achatamento dos grãos.

#### 4.5. Análise de Microdureza

Na tabela 5, são mostradas as médias de 3 indentações realizadas na superfície e parte interior dos corpos de prova da região central.

Tabela 5 – Tabela de média de dureza Vickers aferidas

	900-300-C	900-350-C	1000-300-C	1000-350-C	1200-300-C	1200-350-C
MÉDIA SUPERFÍCIE (Hv)	255,00	237,67	228,67	249,00	214,33	221,67
MÉDIA CENTRO	232,00	222,00	210,33	216,00	229,33	213,33

O comportamento esperado para o perfil de microdureza de “billets” de aço 1045 forjado sem tratamento térmico é que a dureza deve ser maior no interior do “billet” do que da superfície. Além disso, é esperado que a dureza aumente em direção ao centro do “billet” devido às deformações plásticas geradas durante o processo de forjamento segundo a literatura. Contudo, conforme as médias analisadas na tabela 5 foi observado o contrário, o que indica que a dureza foi maior na superfície do que no interior do corpo de prova devido ao efeito da perda de temperatura, que é mais rápida na superfície do que no interior dos corpos de prova. Isso ocorre, pois, a superfície troca calor com a matriz não aquecida, o que leva ao refinamento de grãos.

##### 4.5.1. Análise de microdureza nos “billets” recalcados a 1200°C

Na figura 50, os perfis de microdureza analisados são referentes aos “billets” forjados a 1200°C.

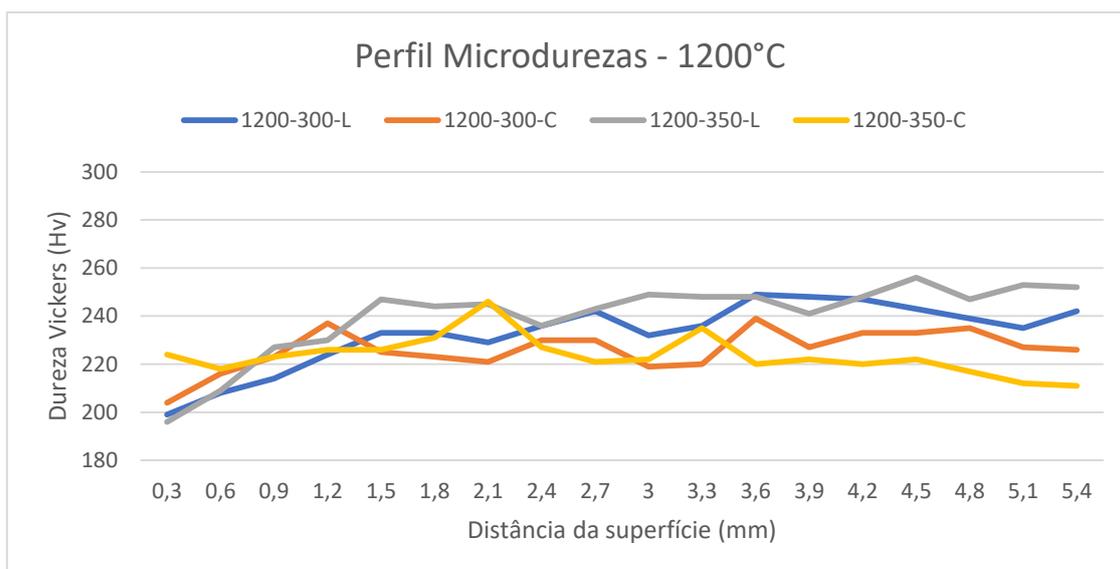


Figura 50 – Componentes após o ensaio de líquido penetrante.

Nota-se que tanto para a região central (C) como para a lateral (L) a dureza começa mais baixa nas primeiras identificações, próximas a superfície, e depois se estabiliza a um patamar um pouco mais elevado, um comportamento esperado. Como exemplo, nota-se que a amostra 1200°C-300t-C, houve uma redução de 6,5% da dureza superficial em relação a do núcleo da peça.

#### 4.5.2. Análise de microdureza nos “billets” recalcados a 1000°C

Na figura 51, são analisados os perfis de microdureza dos “billets” forjados a 1000°C.

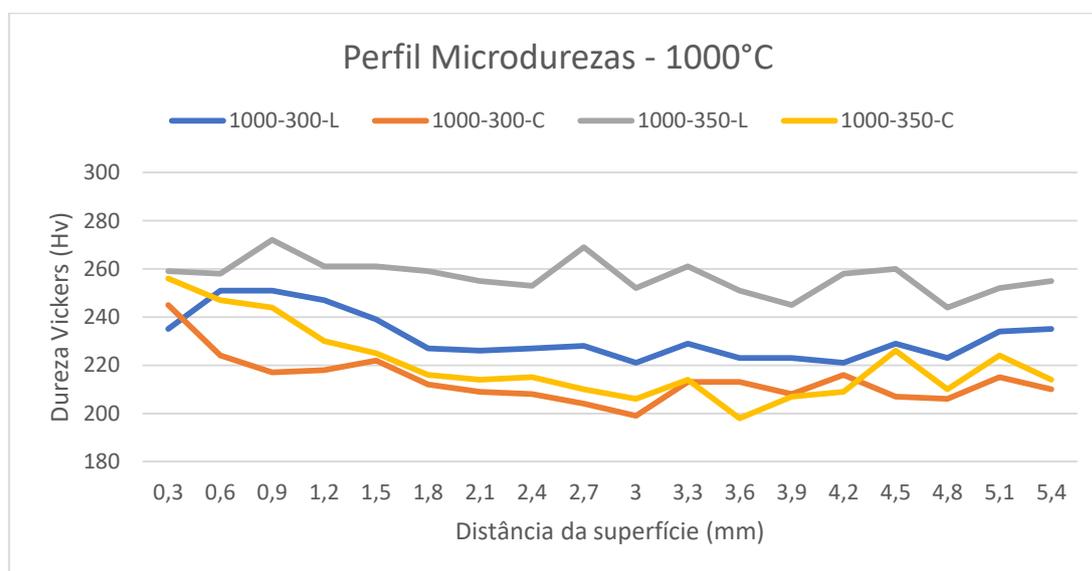


Figura 51 – Componentes após o ensaio de líquido penetrante.

Para os perfis de temperatura de forno de 1000°C percebe-se que, os “billets” de região central, apresentam comportamento diferente do esperado com maior dureza na superfície e conforme as identificações se deslocam para o interior da peça nota-se uma

queda considerável da dureza que chegou a uma variação de 8,72% e 15,28% de redução para os corpos de prova de 1000°C-300Ton-C e 1000°C-350Ton-C, respectivamente. Já os perfis laterais apresentaram um comportamento mais uniforme, se comparados aos centrais.

#### 4.5.3. Análise de microdureza nos “billets” recalcados a 900°C

Na figura 52, são apresentados os perfis de microdureza da temperatura de 900°C.

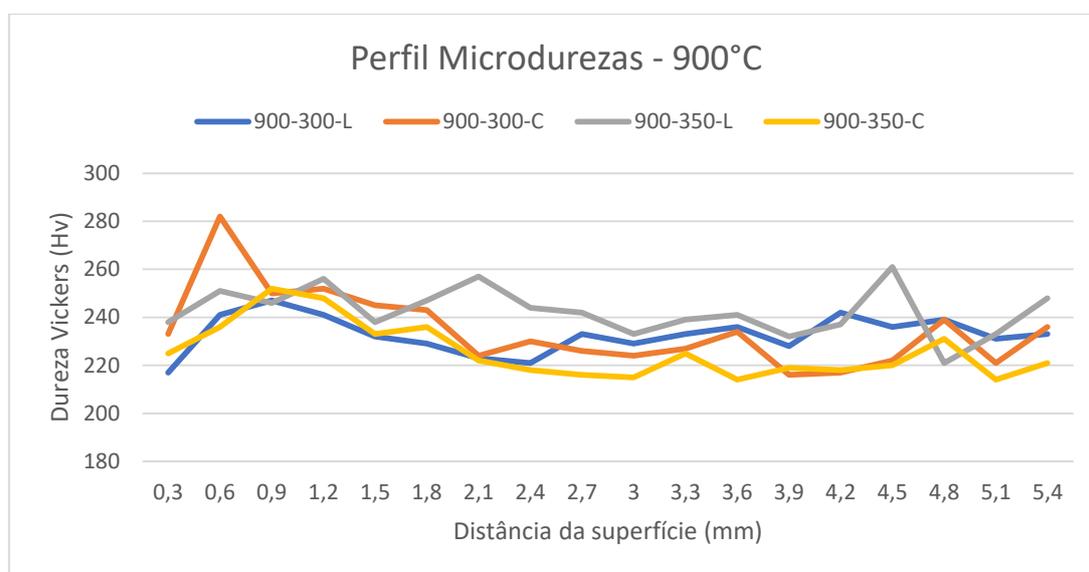


Figura 52 – Componentes após o ensaio de líquido penetrante.

Nota-se que para a temperatura de 900°C o perfil de microdureza se mantém mais estável e que o centro e a lateral do billet não apresentam uma grande variação de dureza. Para o billet central de recalco com uma carga de 300 toneladas, nota-se que a dureza superficial, que se refere as primeiras 3 indentações, é em torno de 10% maior que a do centro do billet, últimas 3 indentações. Já para o de 350 toneladas, a superfície apresenta aproximadamente 7% maior dureza.

#### 4.5.4. Perfil central de microdureza

Na figura 53 são apresentados os perfis de microdureza da região lateral dos corpos de prova.

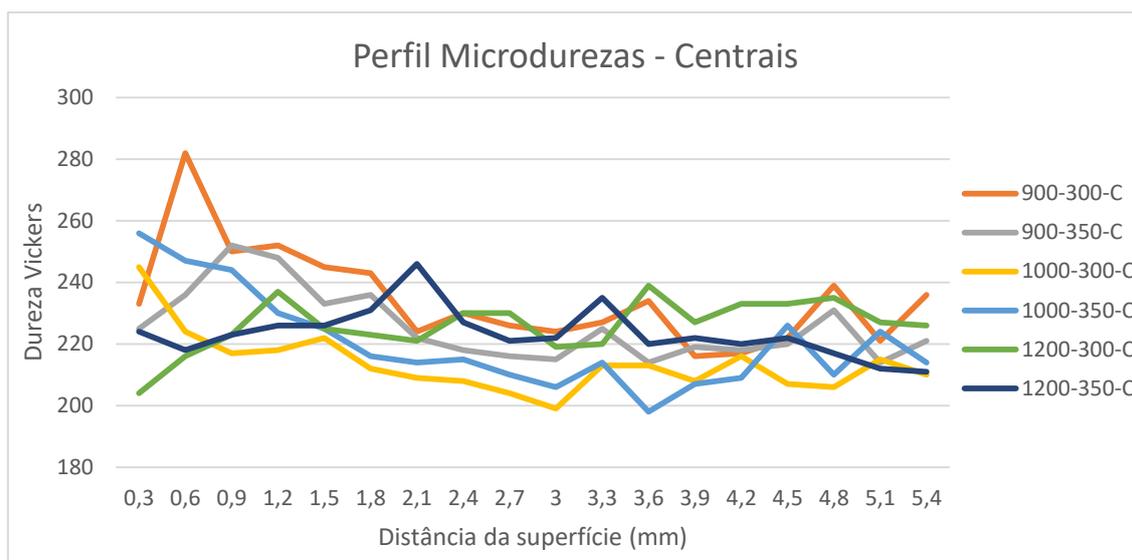


Figura 53 – Perfil de microdureza Central.

Pode-se perceber que o perfil de microdureza da parte central da peça encontra uma dureza mais elevada na superfície e conforme as indentações vão em direção ao interior há redução da dureza. O comportamento dos perfis a 1200°C que apresentam uma menor variação da dureza, isso se deve ao maior tamanho de grão encontrado nas amostras de maior temperatura.

#### 4.5.5. Perfil Lateral de Microdureza

Na figura 54 são apresentados os perfis de microdureza da região lateral dos corpos de prova.

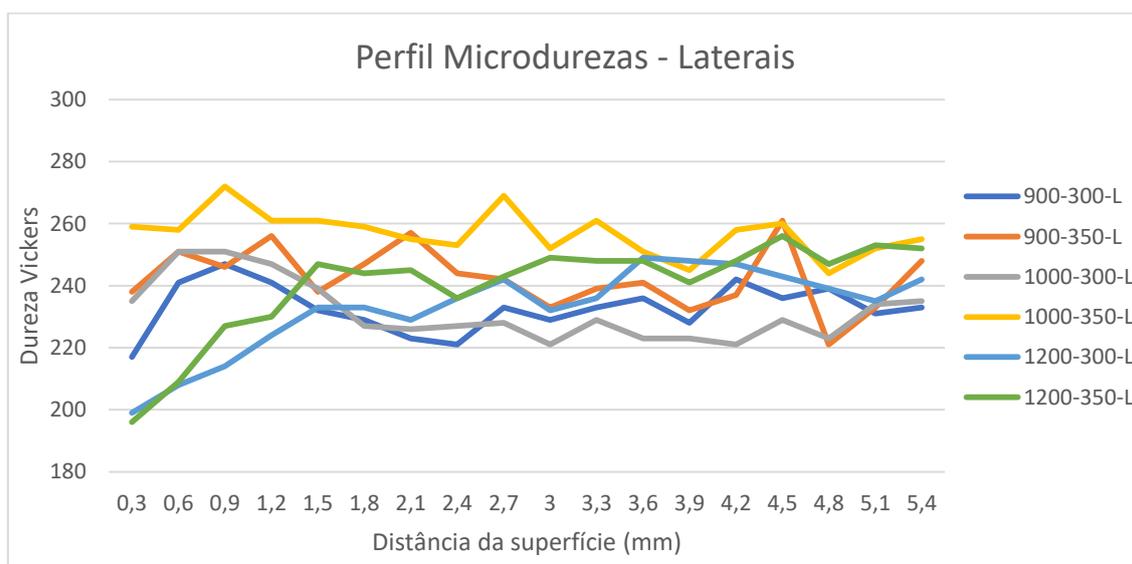


Figura 54 – Perfil de microdureza Lateral.

Ao contrário do analisado no perfil central, há uma maior constância no perfil de microdureza da parte lateral dos “billets”. Para as amostras laterais também pode-se

observar que há um comportamento esperando em que as amostras na parte superior, apresentam menor dureza do que nas regiões interiores.

#### **4.6. Análise de custos estimados de projeto**

Os custos estimados para o projeto são os seguintes:

Referente ao material utilizado na pesquisa, obteve-se a seguinte estimativa de custo:

- **Material:**

Aço ABNT 1045 – O custo estimado do aço para a quantidade utilizada nos ensaios do projeto foi de aproximadamente 1500 R\$.

Material Químico – O material químico apresentou o custo dividido em:

Ácido pícrico: R\$ 437,00 por 100 gramas.

Ácido clorídrico: R\$ 90,00 o litro.

Ácido nítrico: R\$ 108,00 o litro.

Álcool Étílico: R\$ 45,00 o litro.

- **Serviços:**

Usinagem - Apresentou um custo de 680 R\$ para confecção das cunhas utilizadas no projeto.

Ensaio de Forjamento, microscopia óptica e ensaio de microdureza geralmente são estimados juntos: A realização desses serviços em conjunto apresentam custo estimado em 10.000 R\$.

Totalizando um custo de 12.860 R\$.

## 5. CONCLUSÕES

A partir da investigação realizada pode-se concluir que:

- Nesse estudo observou-se que a maior condição para a deformabilidade dos “billets” foi em maiores temperaturas e maior carga de forjamento (1200°C e 350 t), pois chega a uma maior deformação verdadeira, cerca de 1,87 em torno de 20% a mais do que o menor resultado, encontrado em 900°C e 300t.
- Conclui-se que há redução do tamanho de grão após o forjamento devido à deformação plástica sofrida pelo material no processo de recalque, que leva a recristalização e reorganização dos grãos, resultando em um tamanho de grão mais fino e achatado na superfície da peça e em menor tamanho na região do interior dos “billets”.
- A variação do tamanho de grão influencia na dureza do material, uma vez que conforme ocorre o achatamento da microestrutura na superfície, há um aumento da dureza. A maior variação da dureza média da superfície para o interior da peça foi registrada em 1000°C e 350 t, onde se tem um aumento de dureza de 15% do núcleo para a superfície. A dureza média dos perfis analisados indicou que a dureza da superfície foi cerca de 7% maior do que a do núcleo.
- Referente a macrografia, nas regiões superficiais nota-se um grau menor de deformação, por outro lado, no interior, nota-se deformações mais homogêneas.

## **6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Comparação da forjabilidade a quente com forjabilidade a frio do Aço 1045.

Avaliar comparação de forjabilidade do aço ABNT 1045 para aços mais avançados.

Avaliação mecânica do material obtido no forjamento.

## 7. REFERÊNCIAS

1. HELMAN, HORACIO; CETLIN, PAULO ROBERTO. Fundamentos da conformação mecânica dos metais. 2 ed. São Paulo: Artliber Editora. 2015.
2. DIETER JR., GEORGE E. Mechanical Metallurgy. McGraw-Hill Book Company. 1961.
3. MARTINS, P.; RODRIGUES, J. Tecnologia Mecânica: Tecnologia Da Deformação Plástica (Vol. II). Lisboa: Escolar Editora, 2005.
4. ALAM, M.S.; DAS, A. K. A Critical Review of Coating on AISI 1045 Steel Substrate by High Velocity Oxygen Fuel (HVOF). 2022 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1228.
5. ASM Metals HandBook Volume 14 – Forming and Forging.
6. SCHAEFFER, L. Forjamento Tecnologia do Processo. 1ª. ed. Porto Alegre: Editora Gráfica da UFRGS, 2020.
7. MORAES, 2010 MORAES, S. A. de: Estudo teórico-experimental da calibração de barras redondas laminadas a quente. Dissertação de Mestrado. PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
8. ASM Metals HandBook Volume 9 – Metallography and Microstructures
9. SOUZA, J. H. Estudo do processo de Corte de Chapas por Cisalhamento. Porto Alegre, pg65, 2001.
10. ALTAN, 1999 ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H. Conformação de metais: Fundamentos e aplicações, São Carlos: EESC-USP, 1999.
11. BRUCELLE, O., & BERNHART, G. Methodology for service life increase of hot forging tools. Journal of Materials Processing Technology, v.87, p. 235-246, 1999.
12. SCHAEFFER, L. Introdução ao projeto de ferramentas para forjamento a quente em matriz fechada. Ferramental, v.9, p. 19-28, 2006.
13. ASM Metals Handbook Volume 7 - Powder Metallurgy and Particulate Materials, 1998.
14. Verhoeven, J. D. Metallurgy of Steel for Bladesmiths & Others who Heat Treat and Forge Steel, 2005.
15. MESQUITA, R. A; HADDAD, P. T. Propriedades Fundamentais dos Aços Ferramenta para Matrizes de Forjamento. XXIX Senafor, Porto Alegre, 2009.

16. AGUIAR, F. S. Estudo e análise do forjamento a quente de um aço SAE 1045. Dissertação de Mestrado. UFRGS, Porto Alegre/RS, 2022
17. GABARDO, J. F. Estudo da tenacidade do aço ferramenta H13. Dissertação de mestrado. UFPR, Curitiba/PR, 2008.
18. DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. 2º Edição, Rio de Janeiro: Guanabara Dois. 1981.
19. ALTAN, Taylan; NGAILE, Gracious; SHEN, Gangshu. Cold and Hot Forging. 1. ed. Materials Park, OH: ASM International, 2005.
20. DIETER, G. E., KUHN, H. A., SEMIATIN, S. L., Handbook of Workability and Process Design, ASM International, 2003.
21. VERLINDEN, B. et al. Thermo-mechanical processing of metallic materials. 1
22. ASTM INTERNATIONAL. E384 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. ASTM International, [s. l.], p. 1–40, 2017. B
23. SILVEIRA, A.C. Estudo para aplicação do aço bainítico de resfriamento contínuo. Dissertação de mestrado. UFRGS, Porto Alegre/RS, 2019.
24. CASTRO, P. J. Estudo da aplicação de tratamentos termomecânicos. Dissertação de mestrado. UFRGS, Porto Alegre/RS, 2021.
25. GÜNTER, A; FINDIK, F. Macroscopic and microscopic investigation of hot forging defects in steel, 2018.