

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ANÁLISE DA ENERGIA ENVOLVIDA NA CONFORMAÇÃO MECÂNICA POR  
FORJAMENTO A QUENTE DE UM AÇO MÉDIO CARBONO**

**GIOVANNI BRUNO MATEUCCI EUZÉBIO**

**SÃO CARLOS -SP**  
**2022**

**ANÁLISE DA ENERGIA ENVOLVIDA NA CONFORMAÇÃO MECÂNICA POR  
FORJAMENTO A QUENTE DE UM AÇO MÉDIO CARBONO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Francisco Gil Coury

**SÃO CARLOS -SP  
2022**



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

**NOME:** Giovanni Bruno Mateucci Euzebio

**RA:** 758998

**TÍTULO:** Análise da energia envolvida na conformação mecânica por forjamento a quente de um aço médio carbono

**ORIENTADOR(A):** Prof. Dr. Francisco Gil Coury

**CO-ORIENTADOR(A):**

**DATA/HORÁRIO:** 16/09/2022, 10h

### BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Francisco Gil Coury	9.5	9.5
Prof. Dr. Eric Marchezini Mazzer	9.5	9.5
<b>Média</b>	9.5	9.5

### BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Francisco Gil Coury

Prof. Dr. Eric Marchezini Mazzer

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta monografia a todos os meus parentes, em especial aos meus pais e a minha irmã, por todo carinho e ensinamentos fornecidos durante o meu desenvolvimento como indivíduo, dedico também aos meus amigos por serem parte fundamental do meu cotidiano.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço veementemente meu orientador Prof. Dr. Francisco Gil Coury por aceitar dividir esse projeto comigo, além de ter ministrado diversas disciplinas durante minha graduação e contribuído para meu interesse com a área de materiais metálicos. Agradeço também ao técnico de laboratório Rover Belo que participou ativamente das atividades executadas durante o decorrer desta monografia, seu conhecimento prático e teórico foram essenciais para a execução deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho foi idealizado com o intuito de realizar uma atividade prática que pudesse ser adaptada para a disciplina de Conformação Mecânica a ser lecionada nos próximos semestres pelo Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade de São Carlos. Dessa forma, o projeto tem como princípio realizar a conformação mecânica por forjamento a quente de um aço, a princípio desconhecido, mas que posteriormente foi caracterizado por meio das técnicas de FRX e microscopia óptica como um aço SAE 4340, na forma de uma abridor de garrafa (*Hoffman Bottle Opener*), de forma a analisar a mudança metalográfica das amostras utilizadas durante a conformação e principalmente estimar a energia total empregada durante o procedimento de conformação, englobando a energia térmica empregada para o aquecimento do aço e a energia aplicada para deformar plasticamente o material, o que inclui a energia de impacto transferida por cada marretada durante a forja, de forma a comparar e analisar a contribuição energética de cada uma no forjamento do mesmo. De modo que, é possível afirmar que a prática poderá ser implementada nas seguintes disciplinas a serem lecionadas, desde que sejam efetuados alguns ajustes na prática para torná-la mais eficiente e caso os docentes notarem a viabilidade pedagógica desse método de ensino, visto que os conceitos expostos na disciplina são amplamente utilizados durante a execução do forjamento.

**Palavras-chave:** Conformação mecânica. Forja. Forjamento. Aço SAE 4340. Deformação plástica. FRX. Microscopia Óptica.

## ABSTRACT

This work was conceived with the aim of developing a practical activity that could be adapted to the course Mechanical Forming to be taught in upcoming semesters at the Department of Materials Engineering from the University of São Carlos. Therefore, the project's principle is to perform the hot forging of a steel, at first of unknown composition, but which was characterized to be a SAE 4340 steel by mechanical by XRF and optical microscopy techniques, in the form of a Hoffman Bottle Opener in order to analyze the metallographic change of the samples used during the forming and mostly to estimate the total energy stored during the forming procedure, encompassing the thermal energy used to heat the steel, the energy applied to plastically deform the material, which includes the impact energy transferred by the hammer during forging, in order to compare and analyze the energy contribution of each one in the forging of SAE 4340 steel. Therefore, it is viable to say that the practice can be implemented in the coming subjects to be taught, since some adjustments are made in this practice to make it more efficient and in case the teachers notice the feasibility of this teaching mode, since the concepts exposed in the subject are widely used during the execution of the forging.

**Keyword:** Mechanical conformation. Forge. Forging. SAE 4340 steel. Plastic deformation. XRF.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Diagrama Fe-C, explicitando o limite de solubilidade de Carbono no Ferro, assim como as possíveis fases formadas. ....	3
Figura 2: Diagrama Fe-C dos aços hipoeutetóides, representados pela região hachurada entre 0,02 e 0,76%C. ....	5
Figura 3: Forjamento simples por operação de: a) Esmagamento, b) Conformação de Flange, c) Dobramento com auxílio de cilindro e d) Dobramento com auxílio de matriz aberta. ....	7
Figura 4: Coloração de aços médio carbono ao serem aquecidos a determinada temperatura. ....	10
Figura 5: Variação do Calor específico do aço SAE 1045 em relação ao aumento da temperatura. ....	11
Figura 6: Variação do Calor específico do aço SAE 4340 em relação a variação da temperatura. ....	12
Figura 7: Curvas tensão de escoamento por deformação verdadeira obtidas por ensaios de tração a quente do aço SAE 1045 a 950°C. ....	14
Figura 8: Curvas de Tensão verdadeira por deformação verdadeira do aço SAE 4340 durante o processo de conformação a quente. (a) Curvas de taxa de deformação à temperatura de 1100°C. (b) Curvas em função da temperatura para a taxa de deformação de 1 s <sup>-1</sup> . ....	14
Figura 9: Amostras de aço médio carbono desconhecido cortadas utilizando disco de corte. ....	20
Figura 10: Fluxograma da metodologia empregada na conformação por forjamento e identificação microestrutural do aço médio carbono. ....	20
Figura 11: Ferramentas utilizadas para, respectivamente, realizar o corte das amostras, e realizar o embutimento com baquelite. (a) Cortadeira tipo cut off, modelo Arotec Arocor 40. (b) Prensa de Embutimento, modelo Arotec PRE-30Mi. ....	21
Figura 12: Microscópio Olympus, modelo BX41-LED com câmera Infinity 1 acoplada. ....	22
Figura 13: Espectrômetro Shimadzu XRF – EDX – 720. ....	24
Figura 14: Durômetro Tipo TESTOR HT1 fabricado pela Süssen Wolpert. ....	25
Figura 15: Forno Elétrico BP utilizado para aquecimento da amostra de aço durante o forjamento. ....	26
Figura 16: Mecanismo utilizado para a realização da etapa de forjamento a partir da queda livre de um cilindro de 30 Kg. ....	28
Figura 17: Amostra metálica após passar pela etapa de forjamento de queda por gravidade. ....	29
Figura 18: Amostra metálica com o formato de abridor de garrafas. ....	30

Figura 19: Pesagem da amostra após o forjamento, utilizando uma balança de precisão Marte AS 2000. ....	31
Figura 20: Amostra da ponta do gancho embutida para realização de metalografia.....	32
Figura 21: (a) Micrografia da amostra de aço médio carbono com aumento de 200x. (b) Micrografia da amostra com aumento de 500x. (c) Micrografia da amostra com aumento de 1000x. Obtidas através do software de captura Infinity Capture. ....	33
Figura 22: Micrografia da amostra de aço carbono no estado recozido, magnitude de aumento de 1000x. ....	34
Figura 23: Imagens da microestrutura da extremidade da amostra obtidas a partir do software Infinity Capture. (a) Magnitude de aumento de 500 vezes.(b) Magnitude de aumento de 1000 vezes. ....	35
Figura 24: Microscopia com magnitude de 1000x de aumento da: (a) Amostra antes do forjamento. (B) Após o forjamento, na região do gancho. ....	36
Figura 25: Micrografia da amostra recozida com aumento de 1000X e alteração de cores, na qual a cor vermelha evidencia os microconstituintes perlíticos. ....	37
Figura 26: Espectro completo da amostra obtido após a realização de FRX. ....	38
Figura 27: Espectro característico da amostra para os principais elementos identificados na análise de FRX.....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Temperatura de fusão (Melting point) em °C de alguns aços médio carbono. ....	17
Tabela 2: Medições de dureza HRC efetuadas para as diferentes condições da amostra metálica. .....	35
Tabela 3: Composição química da amostra a partir da análise quantitativa de FRX. ....	39
Tabela 4: Composição química do aço SAE 4340 de acordo com a norma SAE/AISI. ....	40

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	1
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA</b>	3
2.1 AÇOS	3
<b>2.1.1 Aços Hipoeutetóides</b>	4
2.2 CONFORMAÇÃO MECÂNICA POR FORJAMENTO	5
<b>2.2.1 Forjamento Simples ou Livre</b>	6
2.2.1.1 Energia Envolvida na Conformação por Forjamento Livre	8
<b>2.2.2 Importância do Aquecimento Durante o Processo de Forja</b>	9
<b>2.2.3 Energia Efetiva para Deformar Plasticamente um Aço por Forjamento</b>	13
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	17
3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	17
3.2 MATERIAIS	18
3.3 MÉTODOS	18
<b>3.3.1 Infraestrutura e Maquinários Utilizados</b>	18
<b>3.3.2 Amostras Utilizadas</b>	19
<b>3.3.3 Fluxograma de Atividades</b>	20
<b>3.3.4 Obtenção de Microscopias Preliminares da Microestrutura por Metalografia</b>	21
<b>3.3.5 Técnicas Auxiliares para Determinação da Microestrutura da Amostra e Caracterização do Material</b>	23
3.3.5.1 Realização de Recozimento da Amostras	23
3.3.5.2 Caracterização pela Técnica de Fluorescência de Raios-X	23
3.3.5.3 Ensaio de Dureza Rockwell C	24
<b>3.3.6 Aquecimento Pré-Forja</b>	25
<b>3.3.7 Etapas de Forjamento</b>	26

<b>3.3.8 Remoção de uma Amostra do Gancho do Abridor de Garrafas para Realização de Análise Microestrutural</b>	31
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	33
4.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL E QUÍMICA DA AMOSTRA	33
<b>4.1.1 Comparativo da Microestrutura Antes e Após o Forjamento</b>	35
<b>4.1.2 Análise da Microestrutura obtida por MO da Amostra Recozida</b>	36
<b>4.1.3 Análise dos Resultados Obtidos por FRX</b>	38
4.2 CÁLCULO DA ENERGIA EFETIVA PARA DEFORMAR PLASTICAMENTE A AMOSTRA	40
4.3 CÁLCULO DA ENERGIA MECÂNICA EMPREGADA NO FORJAMENTO	43
<b>4.3.1 Eficiência Energética do Processo</b>	45
4.4 CÁLCULO DA ENERGIA TÉRMICA FORNECIDA DURANTE O FORJAMENTO	46
<b>5 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	48
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	49

# 1 INTRODUÇÃO

A graduação em Engenharia de Materiais exige conhecimentos e habilidades das mais diversas áreas da educação, como conceitos físicos, químicos e habilidades matemáticas, que quando utilizados em união são capazes de fornecer informações sobre os fenômenos que ocorrem nos materiais, seja antes, durante ou após o seu processamento, visando sempre compreender como os mecanismos ocorrem, por que ocorrem e quais serão as consequências nas propriedades finais dos materiais, o que, conseqüentemente, irá determinar para quais aplicações um determinado material será adequado. Dessa forma, é esperado que o conhecimento teórico seja fundamental para compreender a ciência dos materiais. Entretanto, apenas o conhecimento teórico não é suficiente para uma boa formação como engenheiro de materiais, já que a parte prática é de vital importância ao decorrer da graduação, atuando como uma forma de complementar o que é ministrado em aula, atrelando-se os conhecimentos teóricos com as práticas a metodologia de ensino se torna muito mais orgânica, já que o aluno é capaz de compreender, replicar, realizar e verificar os conceitos lecionados em sala de aula.

Desse modo, pensando em aplicar esta metodologia na disciplina de Conformação Mecânica, foi proposto pelo professor Dr. Francisco Gil Coury a adaptação de uma prática realizada no curso de Engenharia Metalúrgica da *Colorado School of Mines*, de modo que se a prática se mostrar viável será implementada nas próximas disciplinas de conformação mecânica a serem ministradas.

Para a prática escolheu-se um aço médio carbono desconhecido, devido à grande importância comercial dessa classe de aços, por serem relativamente de baixo custo e apresentarem boa resistência mecânica, podendo ser endurecíveis por forjamento ou por tratamento térmico de têmpera, isto é, um aço que ao sofrer endurecimento forma a fase metaestável martensita, o que confere ao aço uma maior dureza em detrimento da sua capacidade de se deformar plasticamente, em seguida, é realizado o revenimento para o aumento da tenacidade do material, para que finalmente possa ser empregado nas mais diversas áreas, como por exemplo na indústria automotiva, aeronáutica e petrolífera, na forma de eixos, parafusos, porcas, pinos, cilindros, entre outros. No desenvolvimento da parte prática do trabalho juntamente com a seção de apresentação e discussão de resultados será feita a determinação de qual aço médio carbono pertence as amostras utilizadas no forjamento, confirmando ou desmentindo a suspeita de que as amostras utilizadas tratavam-se do aço SAE 1045, por meio de técnicas de metalografia, micrografia e análise química.

Destarte, o interesse do desenvolvimento deste trabalho é compreender melhor sobre a teoria de plasticidade, com o propósito de compreender como que o material se deforma plasticamente durante a conformação mecânica, qual é o valor energético empregado nesta deformação, sabendo-se que, ao aquecer o aço a priori à forja, há o fornecimento de energia térmica ao mesmo, e que durante a conformação mecânica por forjamento há a transferência da energia cinética das marretadas para o corpo metálico.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 AÇOS

Os aços são ligas de Ferro que possuem átomos de Carbono dissolvidos em sua matriz, sendo estes presentes nos interstícios da rede cristalina do Ferro ou na forma de carbonetos, quando em solução sólida, os átomos de Carbono se posicionam nos interstícios das células unitárias do Ferro, podendo estar presente na forma de átomos de Carbono em matriz austenítica ( $\gamma$ ), quando o aço está em altas temperaturas, ou em matriz ferrítica ( $\alpha$ ) para baixas temperaturas. A Figura 1 descreve o Diagrama Ferro-Carbono, no qual é possível diferenciar as fases formadas ao se resfriar um aço com um determinado percentual em peso de Carbono, além de ser possível identificar as curvas de solubilidade e de transformação de fase, como as curvas  $T_L$  e a curva  $T_S$  (CALLISTER, 2012).

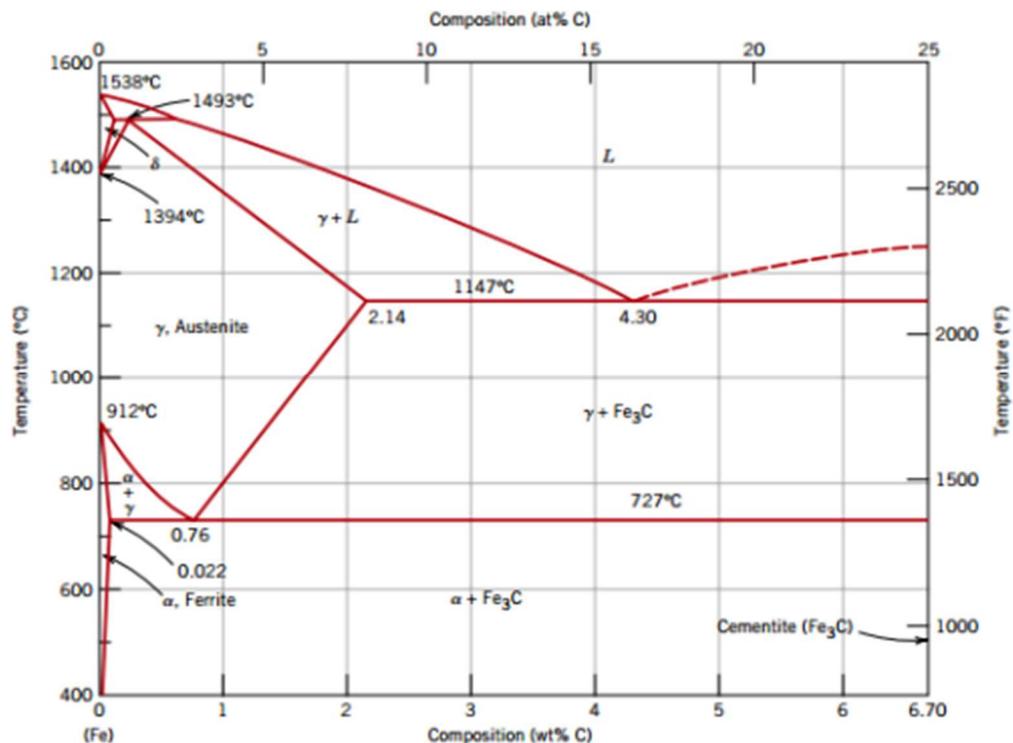


Figura 1: Diagrama Fe-C, explicitando o limite de solubilidade de Carbono no Ferro, assim como as possíveis fases formadas.

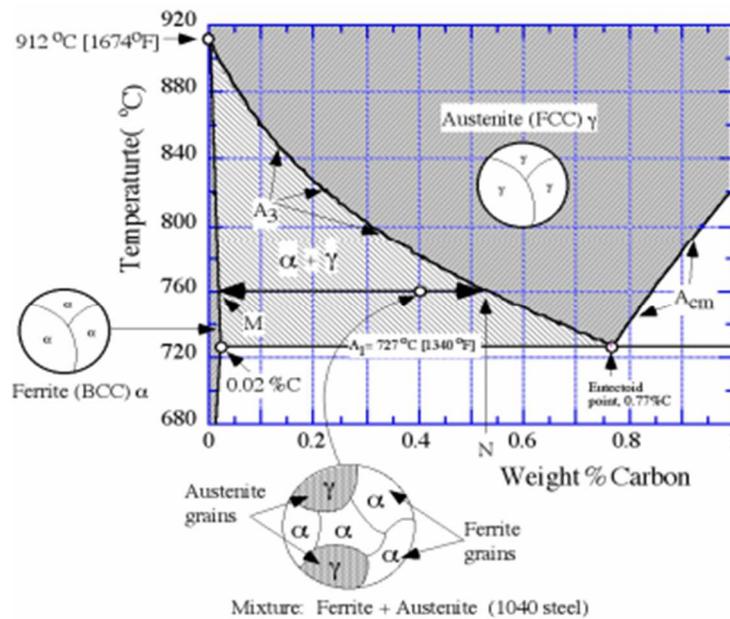
Fonte: CALLISTER, 2012.

Comercialmente os aços são as ligas de maior interesse dentre os demais materiais

metálicos, devido à grande variedade de aplicações que podem ser dadas a depender do percentual de Carbono, dos demais elementos de liga, do tipo de tratamento térmico e do tipo de processamento a ser realizado, podendo apresentar as mais variáveis propriedades de dureza e tenacidade, ou seja, os aços são versáteis, possibilitando sua aplicabilidade nas mais diferentes vertentes da engenharia, a depender das propriedades requisitadas para uma determinada aplicação, o que explicita sua grande importância comercial, além da abundância na qual Ferro e Carbono são encontrados na atmosfera (CALLISTER, 2012; VERHOEVEN, 2005).

### **2.1.1 Aços Hipoeutetóides**

Analisando o Diagrama Ferro-Carbono retratado na Figura 1 nota-se que as fases presentes na microestrutura de um aço podem variar de acordo com o teor de Carbono da liga, assim como a temperatura na qual se está analisando a microestrutura (CALLISTER, 2012; VERHOEVEN, 2005). Existem três pontos invariantes importantes neste diagrama, o ponto peritético, eutético e eutetóide, sendo o último deles o mais importante para a Engenharia e Ciência dos Materiais assim como para aplicações industriais, isso porque aços com teor de Carbono maiores do que 0,76% apresentam baixa resistência mecânica, já que em sua microestrutura formam-se grãos ferríticos ou austeníticos com a presença de cementita, uma fase rica em Carbono altamente fragilizante, desse modo, atualmente, a maioria dos aços com aplicações industriais e tecnológicas possuem teor de Carbono entre o limite de solubilidade do Carbono no Ferro no ponto invariante eutetóide, 0,02%C e 0,76%C, implicando na presença do material no campo ferrítico-austenítico, impedindo a formação de cementita e, conseqüentemente, promovendo melhorias nas propriedades mecânicas como aumento da resistência mecânica e à fadiga, contribuindo para uma maior tenacidade do material (WOO, 2015; VERHOEVEN, 2005). A Figura 2 retrata o Diagrama Fe-C focando na região hipoeutetóide.



**Figura 2:Diagrama Fe-C dos aços hipoeutetóides, representados pela região hachurada entre 0,02 e 0,76% C.**

**Fonte: VERHOEVEN, 2005.**

A parte prática deste trabalho será baseada na manipulação de um aço médio carbono, que é, em suma, um aço hipoeutetóide, entretanto nem todo aço hipoeutetóide é um aço médio carbono, já que os aços médio carbono são aqueles que possuem peso em Carbono de 0,3% a 0,6%, abaixo de 0,3%C os aços são considerados de baixo carbono e acima de 0,6%C considerados alto carbono (CALLISTER, 2012).

Os aços médio carbono são amplamente utilizados na indústria, devido a sua versatilidade de aplicações, boa resistência mecânica, usinabilidade e formabilidade, além de serem passíveis de realização de tratamentos térmicos, como a têmpera e revenimento, e por serem, principalmente, de baixo custo (CALLISTER, 2012).

## 2.2 CONFORMAÇÃO MECÂNICA POR FORJAMENTO

A conformação mecânica por forjamento foi um dos primeiros mecanismos de manipulação de metais desenvolvidos pelos seres humanos, isso se deve pela sua relativa facilidade de execução, visto que a forja, diferentemente da fundição, consiste em elevar a temperatura do metal a temperaturas inferiores a temperatura de fusão ( $T_F$ ) do mesmo, o que para as civilizações antigas era vantajoso, visto que, para alguns metais, era difícil, ou

impossível, atingir a  $T_F$  dos mesmos para que fosse realizada a fundição, desse modo, durante muitos anos a forja foi um dos processos de conformação mecânica de metais mais relevantes para a sociedade, pode-se citar a larga aplicabilidade da forja nos equipamentos de guerra, por exemplo na produção de espadas e adagas.

Com a descoberta de novas técnicas de conformação mecânica, a forja deixou de ser a melhor opção de conformação para alguns metais a depender também da aplicação, entretanto a forja ainda é muito utilizada para determinadas aplicações, podendo ser citados alguns componentes utilizados na indústria automobilística, como pistões, bielas e anéis e na produção dos rolos de laminação, essenciais no processo de conformação por laminação.

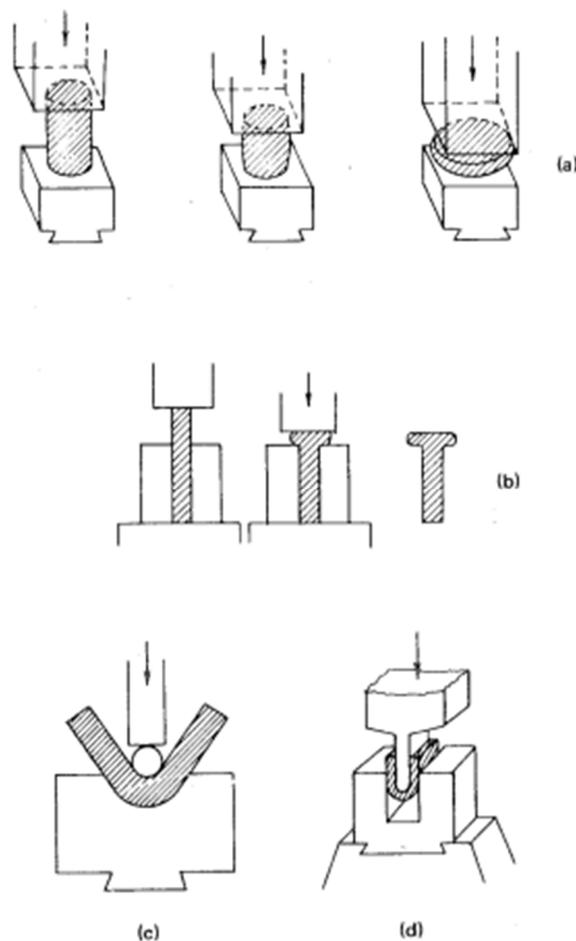
Entre os motivos que contribuíram para que o forjamento deixasse de ser um dos principais processos de conformação mecânica, para determinadas ligas metálicas e peças de geometrias complexas, estão a baixa eficiência, isto é, o baixo rendimento energético do processo, além do fato de ser difícil obter peças com grande fidelidade dimensional em processos de conformação mecânica por forjamento simples ou de matriz aberta (CHIAVERINI, 1986). As energias envolvidas no processo de forjamento simples podem ser distinguidas em contribuição térmica, isto é, o aquecimento que deverá ser feito do corpo metálico dentro do forno, e a contribuição dos impactos mecânicos desferidos durante os repetidos movimentos de forjamento, de modo que a energia transferida para o corpo metálico durante os golpes pode ser expressa como a conservação da energia cinética adquirida pelos objetos de golpeamento. Assim, a fim de calcular o rendimento do processo, deve-se comparar o valor de energia teórico para gerar a deformação que foi dada ao corpo metálico com o valor da energia transferida para o corpo metálico durante os repetidos impactos mecânicos (CHIAVERINI, 1986; BEDDOES, 1999).

Dentre os processos de forja utilizados atualmente estão presentes os processos de forjamento por prensagem, forjamento simples/livre e forjamento em matriz, com a principal distinção de que o forjamento por prensagem é realizado a partir da aplicação gradual de tensão (CHIAVERINI, 1986; BEDDOES, 1999).

### **2.2.1 Forjamento Simples ou Livre**

O processo de forjamento simples consiste em deformar plasticamente o material metálico a partir da aplicação de repetidos golpes, sejam eles efetuados por êmbolos e cilindros hidráulicos ou efetuados manualmente por um operador, de modo que não se utiliza uma matriz

para dar forma ao material, sendo função do cilindro hidráulico ou do operador conformar o metal na geometria desejada (CHIAVERINI, 1986). Dessa forma, para o desenvolvimento da parte prática deste trabalho, será utilizado o processo de forjamento simples, visto que, para a finalidade do projeto, não é necessário uma precisão dimensional excepcional, visto que o alvo do trabalho é aplicar os conceitos abordados durante a disciplina de Conformação Mecânica; assim o processo será executado manualmente utilizando-se um cilindro de forja em queda livre, um martelo e uma marreta para realizar o golpeamento do corpo metálico, sendo denominado por esmagamento, já que não há nenhuma matriz ou aparato auxiliar para dar forma ao metal que está sendo forjado, entretanto há outros tipos de operação, como conformação de uma flange numa extremidade de barra, dobramento com auxílio de um cilindro e dobramento utilizando uma matriz aberta, de acordo com o que é apresentado na Figura 3 (CHIAVERINI, 1986).



**Figura 3: Forjamento simples por operação de: a) Esmagamento, b) Conformação de Flange, c) Dobramento com auxílio de cilindro e d) Dobramento com auxílio de matriz aberta.**

**Fonte: Chiaverini (1986).**

O processo de forjamento livre pode ser uma etapa preparatória para etapas posteriores de forjamento em matriz fechada, servindo como uma etapa para esboçar a geometria desejada do corpo metálico, para que nas etapas seguintes ele adquira a complexidade geométrica necessária.

### 2.2.1.1 Energia Envolvida na Conformação por Forjamento Livre

É possível estimar qual será a energia transferida durante os repetidos golpes efetuados sobre o corpo metálico, para isso basta levar em consideração o Teorema de Conservação de Energia, isto é, considerar que a energia cinética ( $E_c$ ) adquirida pelo martelo (cilindro ou marreta) a cada golpe, será transferida na forma de trabalho durante a deformação, podendo ser encarada como a energia mecânica transferida para o aço para que ocorra deformação plástica, de acordo com o que está descrito na relação desenvolvida pela Equação (1) (DIETER, 1986; BEDDOES, 1999).

$$E_c = W = \text{Energia deformacional}(U)$$
$$U = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Dessa forma, sabendo-se a massa do objeto de golpeamento e a velocidade com o qual atinge o corpo metálico é possível determinar qual será a energia transferida para o corpo metálico, considerando-se que o movimento de golpear o aço é um movimento uniforme nos casos em que o golpeamento é efetuado pelo operador, isto é, não há aceleração ao decorrer do movimento; pode-se modificar a Equação (1) substituindo os valores aproximados da altura inicial do martelo até entrar em contato com a amostra ( $d$ ) e do tempo que leva para o mesmo entrar em contato com o corpo metálico ( $t$ ), dessa forma, pode-se reescrever a equação, chegando-se a expressão descrita na Equação (2) (DIETER, 1986).

$$U = \frac{1}{2}m \cdot \left(\frac{d}{t}\right)^2 \quad (2)$$

No caso em que o golpeamento é efetuado por um cilindro em queda livre, a expressão para cálculo de transferência energética é similar a Equação (2), com a única diferença de que o movimento é acelerado pela força da gravidade, ou seja, substitui-se o valor da velocidade pela expressão que descreve a velocidade final de um objeto ao cair em queda livre partindo do

repouso, desse modo fazendo-se a modificação da Equação (1) tem-se pela Equação (3):

$$U = \frac{1}{2}m(gt)^2 \quad (3)$$

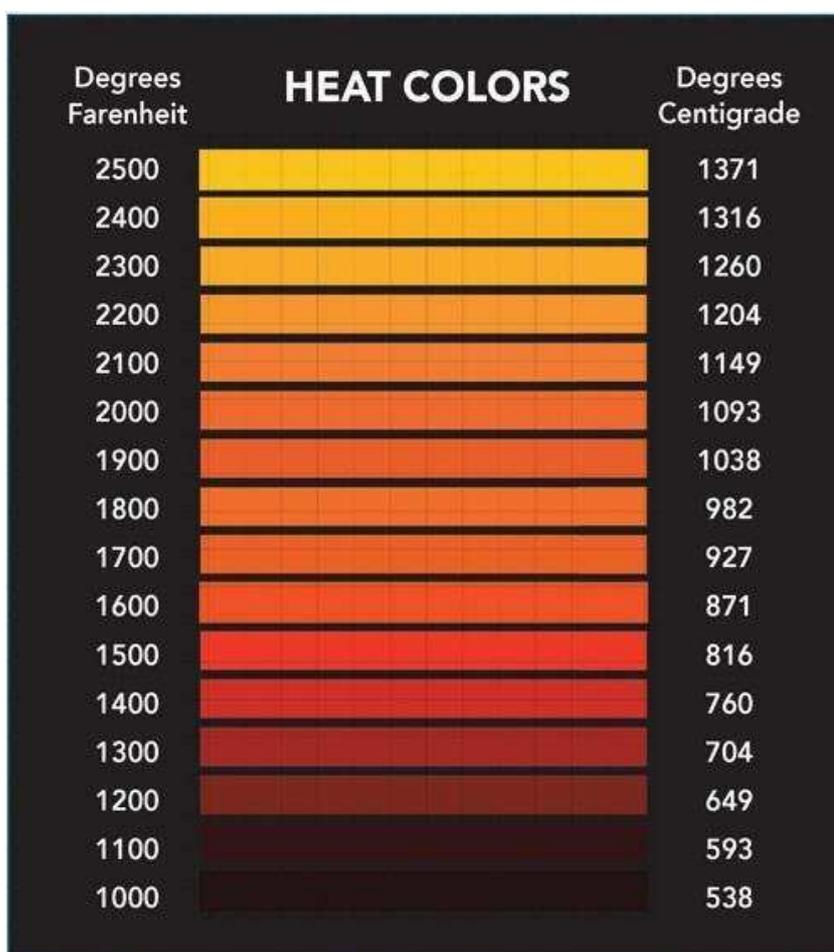
No qual o tempo de queda livre pode ser determinado a partir da especificação da altura de queda livre do cilindro. Previamente a realização do forjamento na parte prática deste trabalho será efetuada a medição da altura de queda livre (CHIAVERINI, 1986; DIETER, 1986).

Chega-se assim a expressões que relacionam a energia cinética transferida ao corpo metálico a cada golpeamento, desse modo basta somar o número de impactos efetuados na conformação do material para determinar a energia transferida para o corpo metálico, todavia parte da energia cinética acumulada não será transformada em energia de deformação plástica, já que parte da energia é transformada em energia sonora e em energia térmica ao se atingir o corpo metálico, isto é, parte da energia acumulada pelo objeto de golpeamento é perdida na forma de calor e na forma de emissão sonora, visto que parte da energia é transformada em energia sonora, de modo que a energia necessária para deformar plasticamente o aço médio carbono desconhecido será menor do que a energia desferidas pelas objetos de golpeamento. A eficiência da transferência de energia para conformar plasticamente o aço será analisada na seção de Discussão dos Resultados deste trabalho (DIETER, 1986).

### **2.2.2 Importância do Aquecimento Durante o Processo de Forja**

A elevação da temperatura do metal para temperaturas inferiores a  $T_F$  é realizada para que o material amoleça, isso porque, ao aquecer o material a temperaturas superiores a 50% da  $T_F$ , a densidade de discordâncias presentes no material irá diminuir devido ao fenômeno de recuperação e recristalização dinâmica, quando há a reorganização das discordâncias formando sub-grãos, de modo que o metal no estado recuperado terá mais planos de deslizamento o que permitirá que as linhas de discordância (LD) se movimentem com maior facilidade, o que, conseqüentemente, favorecerá/facilitará a deformação plástica do material, ou seja, o aquecimento do metal antes da forja é essencial para diminuir o encruamento do metal, possibilitando que o mesmo seja deformado plasticamente com maior facilidade. Para a maioria dos aços médio e baixo carbono é indicado que a temperatura de aquecimento para a realização da forja seja de aproximadamente  $2/3 T_F$  em K, para garantir que o material esteja recuperado,

de forma a melhorar a eficiência da energia mecânica transferida por cada golpe desferido em termos de deformação plástica gerada no aço, dessa forma, para a maior parte dos aços baixo e médio carbono os aquecimentos pré-forja devem ser realizados em temperaturas entre 950°C e 1260°C, como pode-se observar na Figura 4. É fácil identificar quando os aços médio carbono, atingem o intervalo de temperaturas ideais para a realização da forja, já que visualmente a coloração dos aços é alaranjada quando se atinge este patamar de temperaturas. (ŁUKASZEK-SOŁEK, 2019; BEDDOES, 1999).



**Figura 4:** Coloração de aços médio carbono ao serem aquecidos a determinada temperatura.

**Fonte:** FREE 2022.

Destarte, é de se esperar que com o aquecimento do aço será fornecido energia para que ocorra o amolecimento do mesmo, ao aquecer um material sem que ocorra mudança de estado físico pode-se descrever a relação entre quantidade de calor, ou energia, empregada como uma relação dependente da massa do material, da variação de temperatura sofrida e do calor

específico ( $C_p$ ) do material, assim como descrito na Equação (4).

$$U_{t\acute{e}rmica} = Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (4)$$

De forma que o calor específico do material indica a quantidade de calor mínima que cada unidade de massa do corpo metálico deve receber para que ocorra a elevação de uma unidade de temperatura. Entretanto o calor específico do metal não é constante para todas as temperaturas, já que o mesmo aumenta de acordo com a quantidade de energia já fornecida ao material, pois a cada grau de temperatura que o material é elevado torna-se mais difícil aquecê-lo, este comportamento é apresentado na Figura 5, onde é possível notar a variação do calor específico e da condutividade térmica do aço SAE 1045, um possível candidato a ser o aço médio carbono das amostras utilizadas para o forjamento, em relação ao aumento de temperatura (WOO, 2015; FREITAS, 2016).

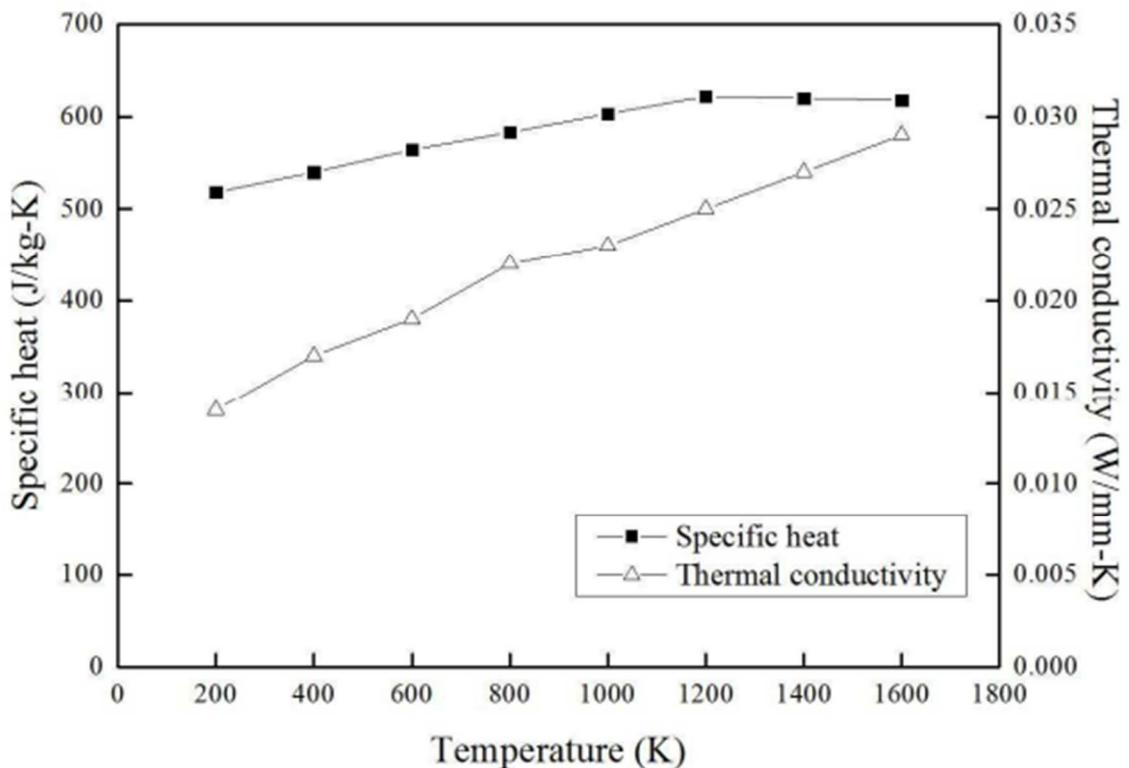


Figura 5: Variação do Calor específico do aço SAE 1045 em relação ao aumento da temperatura.

Fonte: (WOO, 2015)

Lembrando que o aquecimento pré-forja de aços médio carbono deve ser efetuado no intervalo entre 950°C a 1260°C (aproximadamente de 1223 K a 1533 K) pode-se afirmar que o

calor específico desses aços é de aproximadamente 600 J/Kg.K ou 0,6 J/g.°C. (WOO, 2015; FREITAS, 2016). Além do aço SAE 1045 há outros possíveis candidatos a materiais da amostra, como por exemplo ligas com maior adição de elementos de liga, como o SAE 4140 e SAE 4340, entretanto para a maior parte dos aços médio carbono o valor do calor específico será muito próximo um ao outro, na Figura 6 demonstra-se a variação do calor específico da liga SAE 4340 em função da temperatura. (FAKIR, 2020). Percebe-se que o valor do  $C_P$  para o aço SAE 4340 é de 600 J/Kg.K para temperaturas entre 950 e 1260°C, idêntico ao analisado anteriormente para o aço SAE 1045. Percebe-se que o comportamento do  $C_P$  é diretamente proporcional em relação ao aumento de temperatura no intervalo da temperatura ambiente até atingir 800°C, isto é, com o aumento da temperatura há também o aumento do  $C_P$ , por volta de 800°C até 900°C há a formação de um pico do calor específico em relação a temperatura, justamente pois nessa faixa de temperaturas ocorre a austenitização completa do aço SAE 4340, após a formação completa de austenita o valor de  $C_P$  diminui e se estabiliza em torno de 600 J/Kg.K (FAKIR, 2020).

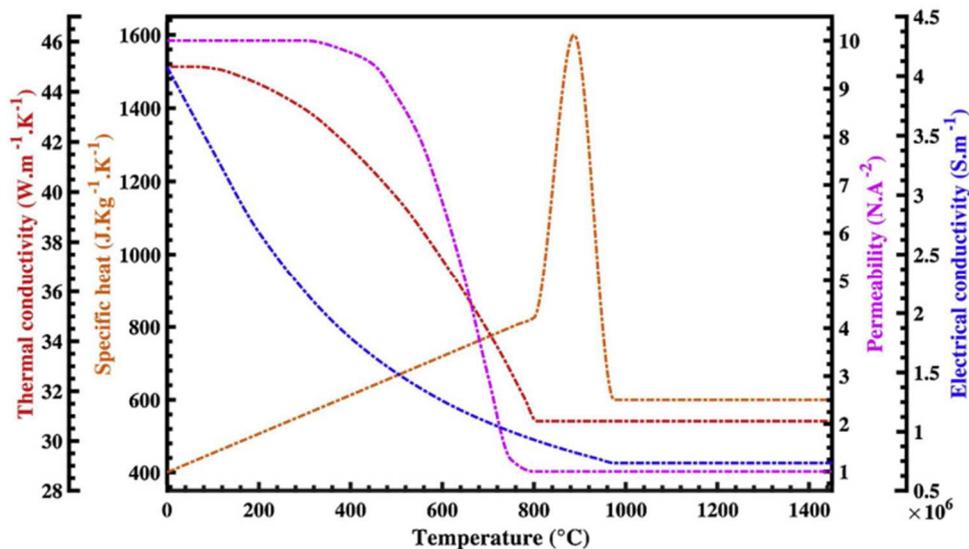


Figura 6: Variação do Calor específico do aço SAE 4340 em relação a variação da temperatura.

Fonte: (FAKIR, 2020)

Dessa forma, sabendo-se o material e a massa da amostra metálica a ser conformada e a variação de temperatura de aquecimento em relação à temperatura ambiente, é possível determinar qual a energia fornecida durante o aquecimento (ŁUKASZEK-SOŁEK, 2019; DIETER, 1986).

### 2.2.3 Energia Efetiva para Deformar Plasticamente um Aço por Forjamento

Até agora foram abordadas as contribuições energéticas, tanto da energia térmica fornecida pelo aquecimento do metal quanto da energia cinética transferida pelas marteladas, entretanto necessita-se prever qual o valor de energia que deve ser empregado no material para que ocorra deformação plástica. No caso da conformação mecânica por forjamento de aços médio carbono a quente, pode-se relacionar a tensão aplicada no aço com a deformação por meio da Equação Constitutiva de deformação a quente (5), isso ocorre pois, como analisado anteriormente, ao realizar um processo de conformação mecânica a quente os fenômenos de recuperação e recristalização dinâmica estarão ocorrendo no material, de modo que o Modelo de Holloman descrito na Equação (6) não descreve corretamente o comportamento do material nestas condições, visto que o mesmo não prevê esses fenômenos (DIETER, 1986; BEDDOES, 1999).

$$\sigma = C \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (5)$$

$$\sigma_T = K \cdot (\epsilon_T)^n \quad (6)$$

Dessa forma, nota-se que para conformações mecânicas a quente, a taxa de deformação imposta será mais relevante do que a própria deformação para a compreensão do estado de tensões do corpo metálico, isto porque em teoria a equação constitutiva de deformação a quente deve ser elaborada com base em uma taxa de deformação constante. Porém não é fácil obter experimentalmente uma taxa de deformação constante, como no caso do forjamento simples, visto que a operação não é mecanizada, o que de certa forma invalida a equação constitutiva de deformação a quente (DIETER, 1986). Na Figura 7 constam curvas de tensão de escoamento por deformação verdadeira para diferentes taxas de deformação para o aço SAE 1045 a temperatura de 950°C (MURUGESAN, 2020). Na Figura 8 constam as curvas de tensão verdadeira em função da deformação verdadeira sofrida por um aço SAE 4340 sujeito a forjamento a quente à temperatura de 1100°C para diferentes taxas de deformação (ŁUKASZEK-SOŁEK, 2019).

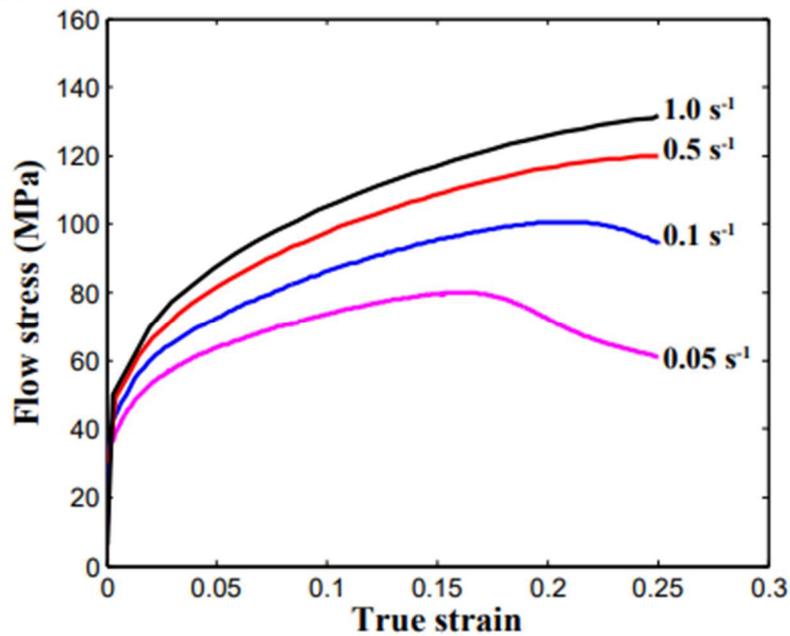


Figura 7: Curvas tensão de escoamento por deformação verdadeira obtidas por ensaios de tração a quente do aço SAE 1045 a 950°C.

Fonte: Adaptado de MURUGESAN, 2020.

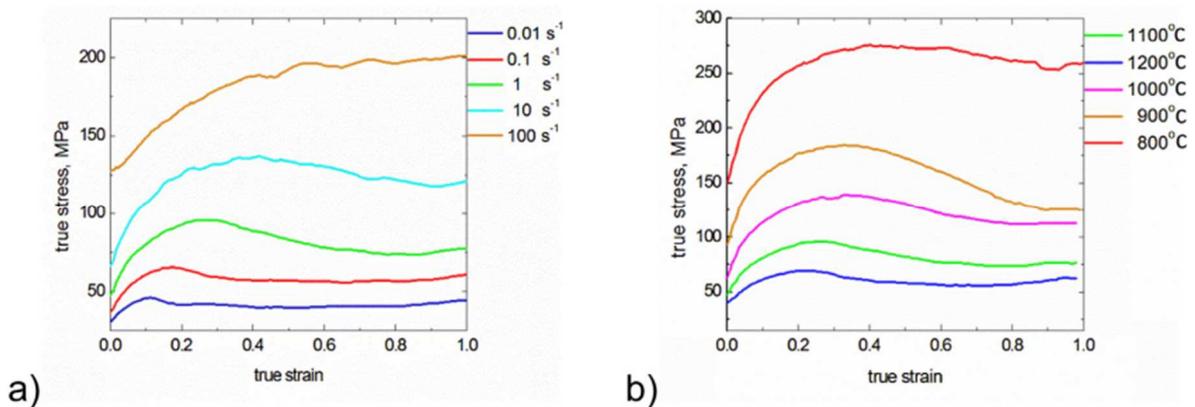


Figura 8: Curvas de Tensão verdadeira por deformação verdadeira do aço SAE 4340 durante o processo de conformação a quente. (a) Curvas de taxa de deformação à temperatura de 1100°C. (b) Curvas em função da temperatura para a taxa de deformação de 1 s<sup>-1</sup>.

Fonte: (ŁUKASZEK-SOŁEK, 2019)

Caso fosse possível impor uma taxa de deformação constante durante a forja simples e manual do aço carbono desconhecido, bastaria calcular a área sob a curva da taxa de deformação correspondente para determinar o trabalho realizado para deformar plasticamente o material, conforme expresso na Equação (7) (BEDDOES, 1999); para que o valor de energia de

deformação plástica seja preciso deve-se considerar apenas a região plástica da deformação, isso é, apenas após a tensão de escoamento ser atingida, na qual há o início do regime plástico.

$$U = W = C.V.\varepsilon^m \cdot \int_{h_0}^{h_f} \frac{dh}{h} = \text{Área sob a curva}$$

$$U = C.V.\varepsilon^m \cdot \varepsilon_l \quad (7)$$

Devido a dificuldade de se obter uma taxa de deformação constante durante a conformação por forjamento simples a quente, deve-se contar com o auxílio das relações invariantes dos estados de tensão e deformação, visto que as relações invariantes são suficientemente boas para simplificar a representação de um estado de tensão ou deformação complexos, sendo capazes de representar um estado complexo apenas pela utilização de tensões e deformações principais, já que as curvas traçadas, baseadas nos invariantes, praticamente não apresentarão modificações, independentemente do estado de tensão em questão, de modo que seja possível determinar, a partir de um estado de tensões triaxial complexo, a deformação plástica total sofrida pelo metal a ser forjado. Assim, possuindo o valor de deformação efetiva do material, pode-se estimar a taxa de deformação imposta durante o processo, de modo a utilizá-la para determinar a tensão de escoamento do material e, conseqüentemente, a energia necessária para deformar plasticamente o corpo metálico. Para se obter a deformação efetiva, ou equivalente, sofrida pelo material, utiliza-se das relações invariantes de tensão efetiva (Equação (8)) e deformação efetiva (Equação (9)) (DIETER, 1986).

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (8)$$

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1)^2]^{1/2} \quad (9)$$

Simplificando a Equação (9) e integrando-a, chega-se na relação que descreve a deformação plástica total sofrida por um material com base em um estado de deformação complexo, assim como está explicitado na Equação (10) (DIETER, 1986).

$$\bar{\epsilon} = \left[ \frac{2}{3} (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2) \right]^{1/2} \quad (10)$$

De modo que, ao realizar o forjamento do aço médio carbono desconhecido, seja possível, com base nos valores de deformação observados, determinar a deformação plástica total. Recapitulando, a energia necessária para deformar plasticamente um material metálico pode ser descrita pela área sob a curva Tensão X Deformação no intervalo de regime plástico, dessa forma substituindo a Equação (10) na Equação (7) e utilizando-se o valor já conhecido da tensão de escoamento para o material em determinada temperatura, chega-se ao valor da energia gasta para deformar plasticamente aquele material por unidade de volume, sendo necessário multiplicar pelo volume do corpo metálico para se obter a energia total empregada no processo de conformação de todo o volume, assim como descrito na Equação (11) (BEDDOES, 1999; DIETER, 1986).

$$U_T = \sigma_y \cdot \bar{\epsilon} \cdot V \quad (11)$$

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Antes que qualquer etapa de conformação seja realizada é necessário iniciar o processo de determinação do material da amostra, para isto deve-se realizar a metalografia, microscopia e ensaio pela técnica de Fluorescência de Raio-X (FRX) da amostra, de modo que seja possível determinar o material da amostra com base nas imagens obtidas por MO atrelado aos dados de composição química obtida por FRX. Ao término do forjamento a quente, outra microscopia será feita, para que seja possível comparar as imagens obtidas, verificando quais foram as principais mudanças na microestrutura da amostra.

Vale ressaltar que a parte prática deste trabalho foi elaborada como uma forma de se analisar e constatar a energia envolvida durante o processo de conformação mecânica por forjamento a quente de um aço médio carbono desconhecido, embasando-se na contribuição da energia térmica que fora fornecida à amostra por meio do aquecimento realizado pelo forno, atrelada a contribuição da energia fornecida pelos choques mecânicos durante a forja, sendo a determinação da temperatura e do tempo que a amostra deve permanecer no forno de extrema importância para a compreensão dos mecanismos envolvidos e para o desenvolvimento do cálculo da energia envolvida no processo. De acordo com o que foi levantado na revisão de literatura e fundamentação teórica, a temperatura na qual a amostra de aço médio carbono deve ser aquecida para que possa passar pelo processo de conformação mecânica por forjamento deve ser, aproximadamente, dois terços da temperatura de fusão ( $2/3 T_F$ ), em K, desse modo, analisando-se a Tabela 1 é possível observar a temperatura de fusão para diferentes aços médio carbono.

**Tabela 1: Temperatura de fusão (Melting point) em °C de alguns aços médio carbono.**

SAE 1040	SAE 1045	SAE 4140	SAE 4340
1521	1520	1416	1427

Fonte: AZO Materials. (2012).

De acordo com o que fora abordado na revisão de literatura, a temperatura máxima de forja para aços médio carbono é de 1260°C sendo a maioria dos procedimentos de forja realizados entre 950°C a 1260°C, como há incerteza de qual aço carbono se está utilizando para

a realização da conformação a temperatura que será utilizada no forjamento da amostra será de 1100°C, de forma a garantir que o metal atinja a plasticidade suficiente para que a deformação plástica ocorra com maior facilidade, independentemente de qual seja o aço médio carbono em questão.

Em sequência, a amostra foi submetida ao procedimento de forja a quente, utilizando-se um cilindro de punção manual, marreta, martelo e um aparato de apoio para a amostra metálica. Durante a execução desta etapa contou-se a quantidade de impactos necessários para conformar a amostra, assim como o número de vezes que a mesma foi retornada ao forno, para que, ao fim da prática, pudesse ser feita uma estimativa da energia transferida pelos objetos de golpeamento e qual a eficiência desta transferência energética.

## 3.2 MATERIAIS

As amostras de aço médio carbono foram adquiridas a partir de uma barra cilíndrica de 15,7 mm de diâmetro disposta no laboratório de fundição do DEMa, sabe-se que o fornecedor da amostra foi a empresa Villares Metals S.A., entretanto não há nenhuma classificação atrelada à amostra, de modo que a composição química da liga seja desconhecida, sendo necessário efetuar ensaios de caracterização para que a composição possa ser definida. Sabe-se que a amostra é um aço médio carbono, isto é, quando o percentual em peso de Carbono na liga está entre 0,3 e 0,6%.

## 3.3 MÉTODOS

### 3.3.1 Infraestrutura e Maquinários Utilizados

A prática, englobando o processo de conformação mecânica e de caracterização de materiais, foi desenvolvida nos laboratórios de Metais localizados no Departamento de Engenharia de Materiais do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, mais especificamente nos laboratórios de metalografia, de laminação, no laboratório de imagens e no laboratório de caracterização estrutural (LCE). Dentre os equipamentos utilizados durante a execução desta prática estão:

- Cortadeira tipo *cut off*, modelo Arotec Arocor 40;
- Paquímetro;
- Prensa de Embutimento, modelo Arotec PRE-30Mi;
- Lixa D'água para polimento com números de grão de 240, 320, 400, 600 e 1500;
- Politriz, modelo Arotec Aropol VV-PUD;
- Solução Nital 2%;
- Forno elétrico BP com resistência de carbeto de tungstênio, com controle digital e sem atmosfera controlada;
- Sensor Termopar;
- Cilindro de 30 Kg para forjamento em queda livre;
- Morsa de Bancada;
- Microscópio Óptico Olympus BX41M-LED com lentes de aumento de magnitude de até 1000 vezes com o acoplamento de uma câmera Olympus U-TV0.5XC-3, Infinity 1 para obtenção e processamento das imagens;
- Durômetro Tipo TESTOR HT1 fabricado pela *Süssen Wolpert*;
- Espectrômetro Shimadzu XRF – EDX – 720;
- Balança de precisão Marte, modelo AS 2000 com erro de medida de  $\pm 0,01$  g.

### 3.3.2 Amostras Utilizadas

A barra cilíndrica de aço médio carbono foi cortada utilizando uma Cortadeira tipo *cut off*, de forma que o modo de operação do maquinário é de extrema importância para que o corte seja preciso, evitando maiores danos à amostra e ao próprio disco. Foram retiradas 2 amostras contendo aproximadamente 76 mm de comprimento e 15,7 mm de diâmetro e uma terceira amostra de menor comprimento para que fosse realizada a metalografia. Uma das amostras de 76 mm foi destinada para o processo de forjamento em si, enquanto a outra foi reservada para a realização de ensaios de dureza Rockwell C (HRC), recozimento e análise química pela técnica de Fluorescência de Raio-X, para que fosse possível analisar a microestrutura do material. As amostras descritas acima estão representadas na Figura 9.

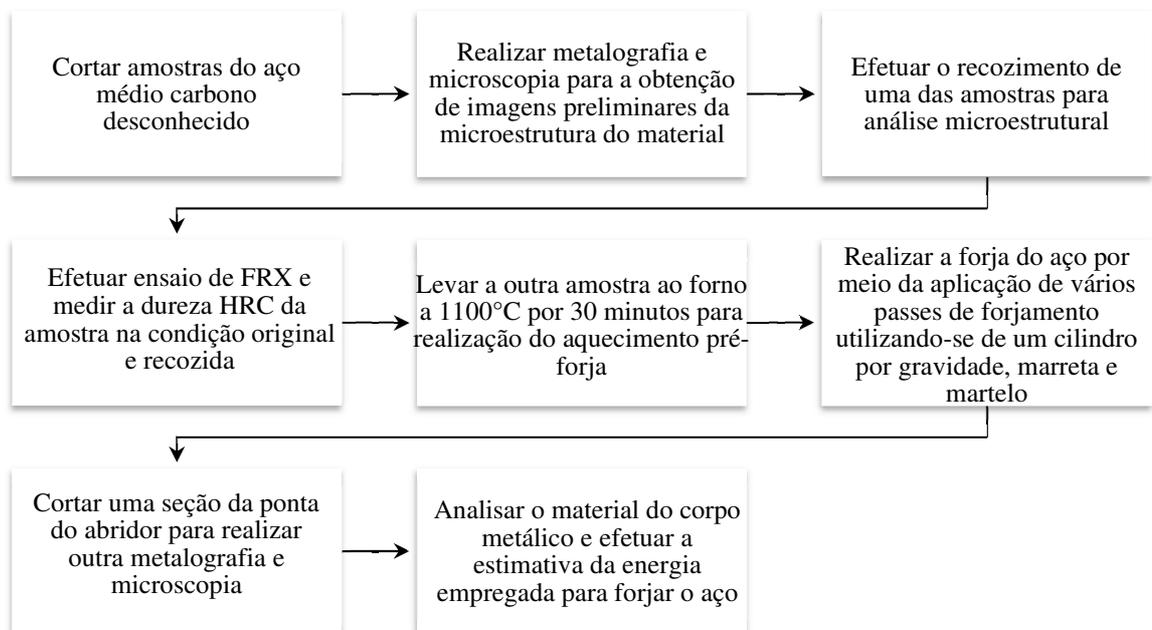


**Figura 9: Amostras de aço médio carbono desconhecido cortadas utilizando disco de corte.**

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.3.3 Fluxograma de Atividades

O fluxograma contemplado pela Figura 10 contém informações resumidas das etapas que foram implementadas durante o decorrer da atividade prática.



**Figura 10: Fluxograma da metodologia empregada na conformação por forjamento e identificação microestrutural do aço médio carbono.**

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.3.4 Obtenção de Microscopias Preliminares da Microestrutura por Metalografia

A fim de se obter imagens da microestrutura das amostras no estado em que foram adquiridas foi necessário primeiramente realizar o embutimento com baquelite a quente da menor das amostras cortadas a prior no cortador *cut off*, para isso utilizou-se da Embutidora Arotec PRE-30Mi, no qual foi preciso manter a pressão entre 100 e 150 Kgf/cm<sup>2</sup> durante todo o processo de embutimento para garantir que a baquelite se solidificasse adequadamente e que a aderência à amostra metálica fosse perfeita.



**Figura 11:** Ferramentas utilizadas para, respectivamente, realizar o corte das amostras, e realizar o embutimento com baquelite. (a) Cortadeira tipo *cut off*, modelo Arotec Arocor 40. (b) Prensa de Embutimento, modelo Arotec PRE-30Mi.

Fonte: Autoria própria.

Em sequência foi realizado o lixamento da amostra utilizando lixas d'água de granulometria de 240, 320, 400, 600 e 1500 de maneira crescente, sendo que a cada troca de lixa foi realizada uma alteração em 90° no sentido de lixamento, de forma a garantir que os riscos na amostra se orientassem para uma mesma direção, após o lixamento levou-se a amostra para a politriz para que os riscos fossem totalmente eliminados. Antes de iniciar o ataque químico levou-se a amostra ao microscópio, para analisar se já era possível realizar o ataque

químico ou se seria necessário dar mais passes de lixamento, a amostra mostrou-se estar apta a passar por ataque químico já que as imagens geradas por microscopia óptica (MO) mostravam uma quantidade insignificante de caudas de cometa. Para realização do ataque químico utilizou-se uma solução de Nital 2%, uma solução de ácido nítrico e álcool capaz de revelar os contornos de grão da microestrutura presente, principalmente de aços baixo e médio carbono, desse modo imergiu-se a superfície da amostra durante 2 a 4 segundos na solução, fazendo com o que o aspecto espelhado da amostra tornasse-se fosco, o que indicou que o ataque havia funcionado, imediatamente após a amostra ficar com aspecto ofuscado, lavou-se a mesma com água corrente para evitar que a superfície metálica fosse queimada.

Posteriormente levou-se a amostra para o Microscópio Óptico Olympus BX41M-LED para obter imagens de sua microestrutura, utilizando-se da câmera acoplada, Infinity 1, e do software *Infinity Capture* para obtenção e processamento das imagens.



**Figura 12: Microscópio Olympus, modelo BX41-LED com câmera Infinity 1 acoplada.**

**Fonte: Autoria própria.**

### **3.3.5 Técnicas Auxiliares para Determinação da Microestrutura da Amostra e Caracterização do Material**

#### **3.3.5.1 Realização de Recozimento da Amostras**

Para que fosse possível visualizar e analisar as fases presentes na microestrutura com maior precisão foi efetuado o tratamento térmico de recozimento, já que no estado recozido seria possível observar os grãos de ferrita e a fração de perlita presente na amostra com melhor nitidez e, conseqüentemente, sendo possível estimar o teor de C do aço, o que seria mais difícil a partir das imagens obtidas por MO da amostra no estado original. Desse modo fez-se o aquecimento da amostra em um forno elétrico BP a 900°C durante 30 minutos, seguido de resfriamento lento dentro do próprio forno durante 15h. Ao retirar a amostra do forno foram feitas todas as etapas de preparo da amostra para metalografia, para que a posteriori fosse possível observar as alterações microestruturais advindas do recozimento.

#### **3.3.5.2 Caracterização pela Técnica de Fluorescência de Raios-X**

Com o intuito de determinar a composição química do material foi realizada a Técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX ou XRD), por meio desta técnica é possível determinar o percentual estimado dos elementos químicos presentes na amostra, os resultados obtidos são de grande confiabilidade, entretanto há alguns elementos que não são detectados por FRX, por exemplo o Carbono; desse modo a realização de FRX teve como interesse a determinação de outros elementos de liga do aço carbono da amostra, como uma forma de complementar os dados obtidos por MO, de modo contribuir para a interpretação das imagens e, conseqüentemente, determinar quais os possíveis materiais da amostra. A caracterização de materiais por FRX consiste em incidir um feixe de Raio-X sobre a amostra, de forma que a energia do Raio-X é absorvida pela amostra e, depois de feita a análise e interpretação via software, resulta em um espectro de emissão de Raio-X característico para cada elemento químico presente na amostra.

A técnica de FRX foi executada no LCE, com o interesse de se realizar uma análise

quantitativa e, principalmente, qualitativa dos elementos químicos presentes na amostra, isto é, foram efetuadas duas análises da amostra, uma com especificação de elementos e outra sem.



**Figura 13: Espectrômetro Shimadzu XRF – EDX – 720.**

**Fonte: MELINA 2022.**

### 3.3.5.3 Ensaio de Dureza Rockwell C

Além da obtenção de imagens por MO e por ensaio de FRX, para determinação da composição química do material, foi realizada a mediação da dureza HRC do material da amostra, como uma forma auxiliar de se obter dados, podendo contribuir para a identificação do material da amostra. Para isso realizou-se o ensaio de dureza Rockwell C utilizando-se de uma pré-carga de 150 Kg para as amostras no estado original, aquele em qual a amostra foi obtida, e no estado recozido, as medidas foram realizadas em triplicata para cada um dos estados. Na Figura 14 esta retratado o durômetro utilizado para realização dos ensaios de dureza.



**Figura 14: Durômetro Tipo TESTOR HT1 fabricado pela Süssen Wolpert.**

**Fonte: Autoria própria.**

### **3.3.6 Aquecimento Pré-Forja**

A etapa de aquecimento é bastante simples, conforme o que fora abordado na seção de revisão bibliográfica e planejamento experimental, a amostra metálica do aço carbono desconhecido deve ser aquecida a temperatura de 1100°C durante 30 minutos, para que a mesma adquira plasticidade suficiente para realização da conformação por forjamento. Para que a temperatura do forno não oscilasse durante o aquecimento da amostra, ligou-o cerca de 6 horas antes da realização do aquecimento pré-forja da amostra, tempo suficiente para que os termopares indicassem que a temperatura estava estabilizada.



**Figura 15: Forno Elétrico BP utilizado para aquecimento da amostra de aço durante o forjamento.**

**Fonte: Autoria própria.**

Durante o forjamento foram realizados outros ciclos de aquecimento para que a plasticidade da amostra fosse mantida durante o golpeamento, sendo estes ciclos de aquecimento mais curtos do que o aquecimento pré-forja, já que a amostra estava com uma temperatura próxima aos 600°C, o que era visualmente perceptível pela mudança de cor ao decorrer dos passes de forjamento, assim como descrito na Figura 4.

### **3.3.7 Etapas de Forjamento**

Diferentemente da prática desenvolvida no curso de Engenharia Metalúrgica da *Colorado School of Mines*, a barra de aço utilizada para remoção das amostras deste trabalho possuía seção transversal circular, de maneira que se julgou interessante realizar um estágio inicial de forjamento utilizando-se um cilindro de 30 Kg em queda livre de 1,46 m, até que a seção transversal da amostra fosse o mais retangular possível, desse modo, para iniciar o forjamento, retirou-se a amostra do forno elétrico e colocou-a diretamente abaixo do cilindro, realizando-se a seguinte progressão de etapas:

- 1° Passo: 4 impactos do cilindro com a amostra a partir de queda livre, seguido de 5 minutos de aquecimento no forno para devolver plasticidade a amostra;
- 2° Passo: 2 impactos do cilindro com a amostra a partir de queda livre, seguido de mais 5 minutos de aquecimento no forno para fornecer plasticidade necessária para a amostra;
- 3° Passo: 3 impactos do cilindro com a amostra a partir de queda livre, seguido de mais 5 minutos de aquecimento no forno para devolver plasticidade a amostra;
- 4° Passo: 3 impactos do cilindro com a amostra a partir de queda livre, seguido de 5 minutos de aquecimento no forno para devolver plasticidade a amostra;
- 5° Passo: 3 impactos do cilindro com a amostra a partir de queda livre, seguido novamente de 5 minutos de aquecimento no forno para devolver plasticidade a amostra.

Todas as etapas de forjamento com a utilização do cilindro foram executadas de forma que, quando a coloração da amostra começasse a ficar menos alaranjada, a mesma deveria ser reinsertada no forno elétrico para que sua temperatura fosse aumentada e, conseqüentemente, houvesse um ganho de plasticidade por parte do metal; os períodos de 3 a 5 minutos de aquecimento entre cada passo foi sugerido pelo técnico de laboratório, que, a partir de seu conhecimento empírico, pôde sugerir um período de tempo longo o suficiente para que a amostra atinge-se a temperatura estipulada de 1100°C partindo da temperatura aproximada de 600°C.



**Figura 16: Mecanismo utilizado para a realização da etapa de forjamento a partir da queda livre de um cilindro de 30 Kg.**

**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 17 denota que após 5 passes de forjamento por queda livre, seguidos de aquecimento, foram suficientes para alterar o formato da seção transversal da amostra, de modo a se assemelhar à uma seção transversal retangular.



**Figura 17: Amostra metálica após passar pela etapa de forjamento de queda por gravidade.**

**Fonte: Autoria própria.**

Em seguida, como a seção transversal desejada havia sido atingida pôde-se dar início ao processo de forjamento de maneira análoga à prática desenvolvida no curso de Engenharia Metalúrgica da *Colorado School of Mines*, desta vez o processo de forjamento foi separado em duas outras etapas, uma na qual se utilizou uma marreta de 2423 g para diminuir ainda mais a espessura da amostra metálica, seguido da etapa de forjamento na qual foi utilizado um martelo, de massa igual a 600 g, para que a deformação imposta à amostra fosse mais precisa, sendo possível diminuir mais a espessura de uma das extremidades da amostra, para que em sequência fosse possível realizar a conformação na forma de um gancho com o auxílio de uma morsa de bancada. Para que fosse possível analisar a energia fornecida a cada marretada, ou martelada, as distâncias entre o início do movimento e o impacto do martelo com a amostra foram estimadas, visto que, por ser um forjamento simples manual era inviável medir a distância percorrida pela marretada (martelo) a cada impacto, ainda mais pelo fato de que era necessário realizar os impactos rapidamente após a amostra ser retirada do forno elétrico, além da estimativa referente à distância percorrida pelo objeto de golpeamento também fez-se uma estimativa do tempo na qual a marreta, ou martelo, atingiria o corpo metálico partindo do repouso, esse tempo foi estimado em 0,1 segundos, de forma que, com os dados de distância e tempo, fosse possível determinar a velocidade com a qual o objeto de golpeamento atingia a

amostra. Dessa forma, realizou-se os seguintes passos:

- 6º Passo: 10 marretadas, com uma distância estimada em 50 cm, seguido de 5 minutos de aquecimento;
- 7º Passo: 20 marretadas, com uma distância estimada em 50 cm, seguido de 5 minutos de aquecimento;
- 8º Passo: 10 marretadas, com uma distância estimada em 50 cm, seguido de 5 minutos de aquecimento;
- 9º Passo: 15 marretadas, com uma distância estimada em 50 cm, seguido de 3 minutos de aquecimento;
- 10º Passo: 5 marretadas, com uma distância estimada em 50 cm, seguido de 3 minutos de aquecimento;
- 11º Passo: 20 marteladas, com uma distância estimada em 30 cm, seguido de 3 minutos de aquecimento;
- 12º Passo: 15 marteladas, com uma distância estimada em 30 cm, seguido de 3 minutos de aquecimento;
- 13º Passo: 20 marteladas com o auxílio de uma morsa de bancada para que fosse possível realizar a deformação no formato de um gancho, com uma distância estimada em 30 cm, seguido de 3 minutos de aquecimento;
- 14º Passo: 15 marteladas com o auxílio de uma morsa de bancada para que fosse possível realizar a deformação no formato de um gancho, com uma distância estimada em 30 cm.

Ao término destes passos a conformação por forjamento se deu por completa, chegando-se à geometria de uma abridor de garrafas, cumprindo com o propósito de execução da prática.



**Figura 18: Amostra metálica com o formato de abridor de garrafas.**

**Fonte: Autoria própria.**

Em seguida, para que fosse possível efetuar os cálculos da contribuição da energia térmica fornecida ao material, realizou-se a pesagem da amostra utilizando uma balança de precisão Marte, modelo AS 2000 com erro de medida de  $\pm 0,01$  g, anotando-se o valor de  $99,13 \pm 0,01$  g.



**Figura 19: Pesagem da amostra após o forjamento, utilizando uma balança de precisão Marte AS 2000.**

**Fonte: Autoria própria.**

### **3.3.8 Remoção de uma Amostra do Gancho do Abridor de Garrafas para Realização de Análise Microestrutural**

Para finalizar a metodologia implementada durante a execução desta prática, cortou-se a extremidade do gancho obtido no processo de conformação por forjamento para que fosse possível realizar uma nova metalografia e microscopia, com o intuito de comparar a microestrutura antes e após o forjamento, para isso realizou-se todo o procedimento de metalografia de maneira semelhante ao que foi executado na seção 3.3.4 deste trabalho, com a única diferença, de que foi necessário a utilização de uma presilha para sustentar a amostra de 2 mm de largura, que foi retirada da ponta do gancho, durante o processo de embutimento. Na Figura 20 pode-se observar a amostra já embutida pronta para a realização da MO.



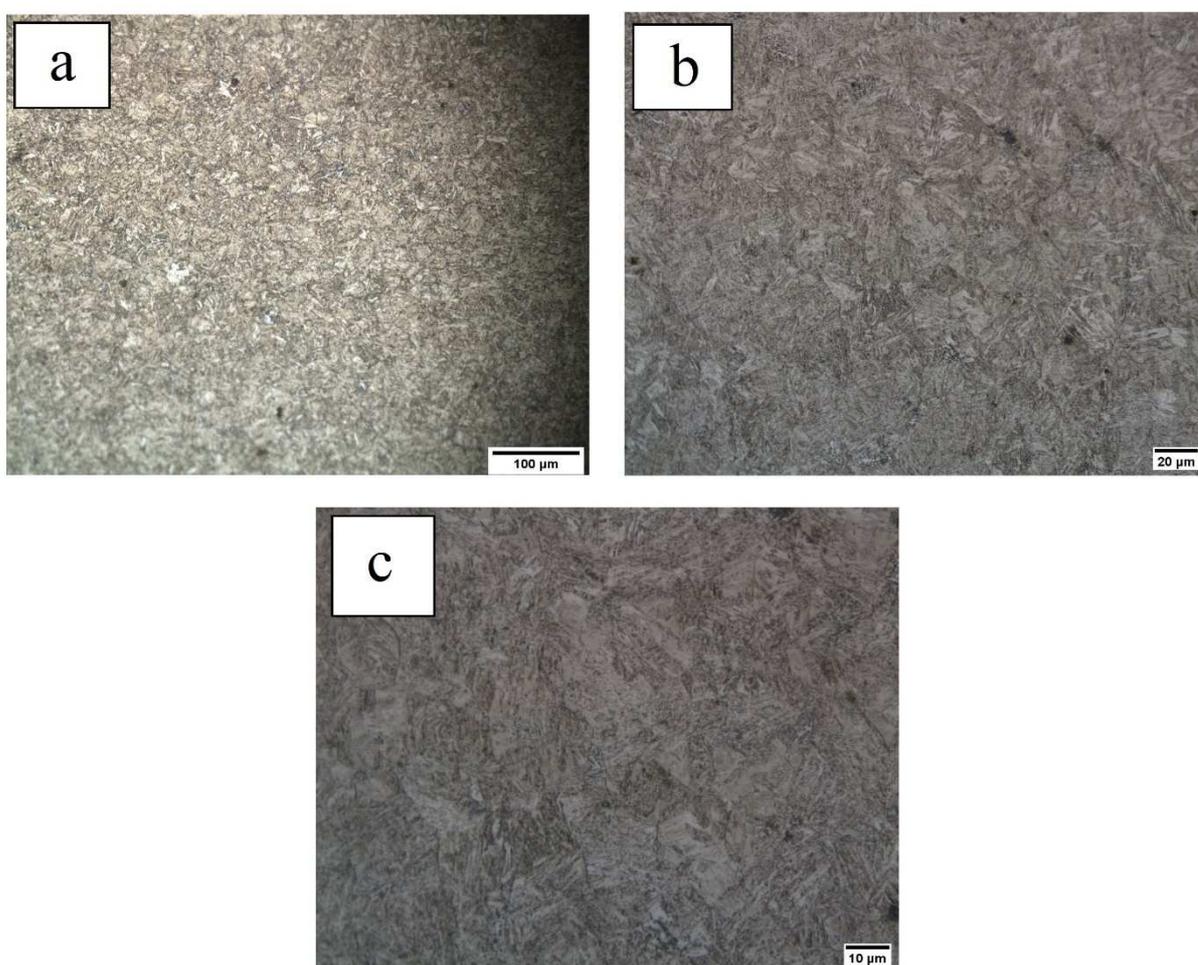
**Figura 20: Amostra da ponta do gancho embutida para realização de metalografia.**

**Fonte: Autoria própria.**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL E QUÍMICA DA AMOSTRA

Na execução da primeira MO, isto é, da microscopia realizada com a amostra no estado original, representada na Figura 21, é possível notar, que como esperado, a diferenciação das fases presentes na microestrutura do aço médio carbono desconhecido é muito sutil, sendo praticamente impossível determinar com precisão quais fases estão sendo representadas.

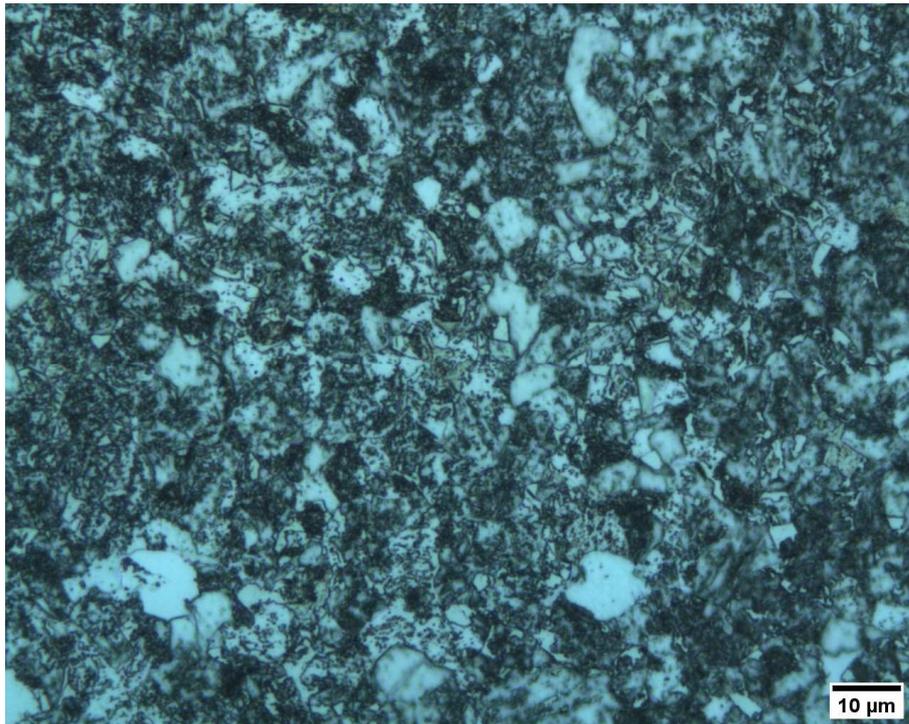


**Figura 21:** (a) Micrografia da amostra de aço médio carbono com aumento de 200x. (b) Micrografia da amostra com aumento de 500x. (c) Micrografia da amostra com aumento de 1000x. Obtidas através do software de captura *Infinity Capture*.

**Fonte:** Autoria própria.

Como já era esperado que a visualização das microscopias da amostra no estado original

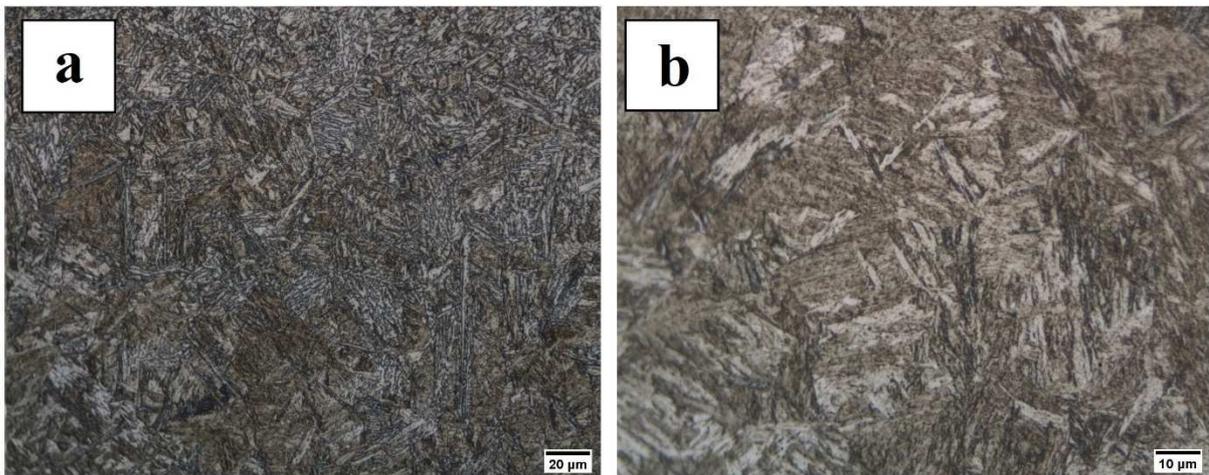
não fossem tão simples e fáceis de serem interpretadas realizou-se o recozimento da amostra, de acordo com o que foi abordado anteriormente na seção de apresentação dos Métodos aplicados na execução da parte prática deste trabalho. Após fazer o recozimento obteve-se a microestrutura representada na Figura 22, na qual já é possível identificar e diferenciar as fases presentes na microestrutura com melhor precisão, sendo essencial no auxílio da determinação de qual liga metálica a amostra pertence.



**Figura 22:** Micrografia da amostra de aço carbono no estado recozido, magnitude de aumento de 1000x.

**Fonte:** Autoria própria.

Por fim, a última microscopia efetuada foi a da extremidade da amostra, na região em que o gancho do abridor foi formado, para que fosse possível comparar posteriormente a mudança microestrutural do corpo metálico após a forja.



**Figura 23:** Imagens da microestrutura da extremidade da amostra obtidas a partir do software Infinity Capture. (a) Magnitude de aumento de 500 vezes.(b) Magnitude de aumento de 1000 vezes.

**Fonte:** Autoria própria.

Além das microscopias obtidas, os resultados do ensaio de dureza Rockwell C contribuirão ativamente para a determinação do material da amostra, na Tabela 2 constam os valores de dureza HRC medidos para a amostra no estado original e no estado recozido.

**Tabela 2:** Medições de dureza HRC efetuadas para as diferentes condições da amostra metálica.

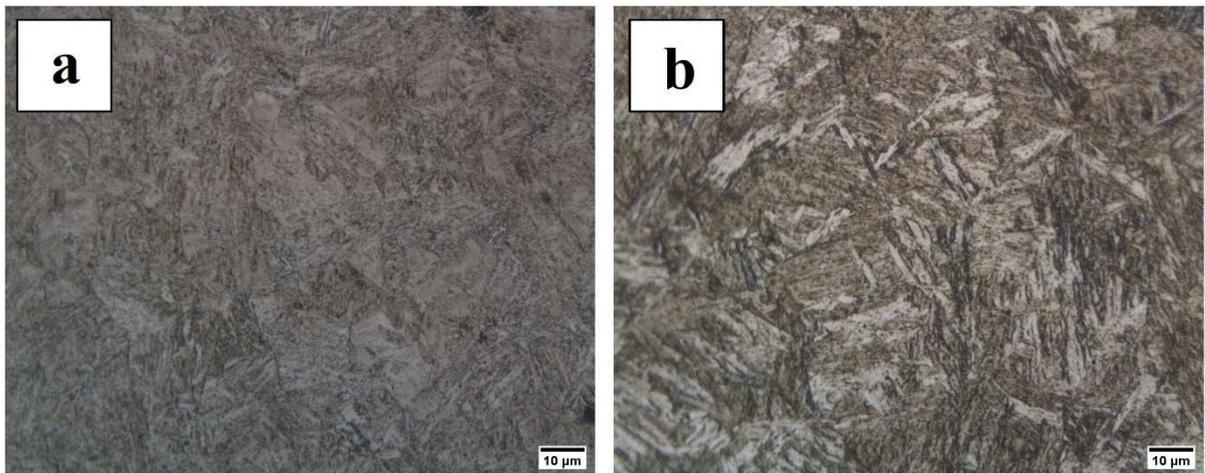
	HRC			Média (HRC)
Amostra no estado original	42,0	44,0	42,5	42,8
Amostra recozida	27,0	22,5	30,0	26,5

**Fonte:** Autoria própria.

#### 4.1.1 Comparativo da Microestrutura Antes e Após o Forjamento

Efetuada a comparação das microscopias ópticas obtidas no estado em que a amostra foi coletada e no estado após o processo de conformação, é perceptível que no resfriamento após a forja a quente houve a formação de martensita na forma de agulhas. Na Figura 24 estão dispostas, respectivamente, a microscopia da amostra no estado em que foi coletada e a microscopia após ser feito o forjamento, sendo possível observar a formação de martensita

decorrente do resfriamento pós-forja, além disso, nota-se que no estado original já havia a presença de martensita, mas em menor porcentagem quando comparada com a martensita presente na microestrutura após a forja. A formação de martensita é esperada durante o resfriamento pós-forja, já que durante o forjamento a quente há os fenômenos de recuperação e recristalização dinâmica, com a formação de martensita durante o resfriamento é esperado que ocorra o endurecimento do material, sendo este fator um dos maiores benefícios deste processo de conformação.



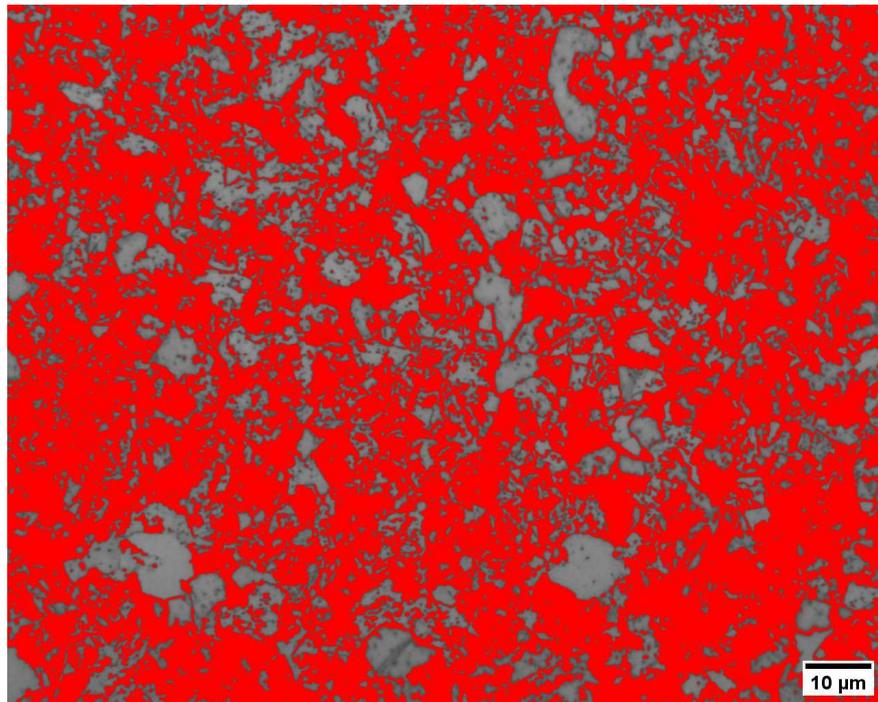
**Figura 24: Microscopia com magnitude de 1000x de aumento da: (a) Amostra antes do forjamento. (B) Após o forjamento, na região do gancho.**

**Fonte: Autoria própria.**

#### **4.1.2 Análise da Microestrutura obtida por MO da Amostra Recozida**

Para melhor visualização do teor de carbono da amostra foi conduzido o recozimento de umas das amostras a 900°C durante 30 minutos, seguido de resfriamento lento dentro do próprio forno, este tratamento térmico possibilitou que a identificação das fases e microconstituintes presentes na microestrutura fossem de mais fácil observação, já que ao observar a Figura 22 é possível identificar que a microestrutura do corpo metálico é composta majoritariamente por microconstituente perlítico e por grãos ferríticos que cresceram durante o resfriamento pós-recozimento. Com a melhora da distinção das fases e microconstituintes presentes na micrografia da amostra, é possível estimar a porcentagem de Carbono presente na mesma com base no percentual em área do microconstituente perlítico encontrado. Para que

fosse realizada a determinação do percentual de perlita utilizou-se o software de análise de imagens ImageJ™, no qual é possível diferenciar as fases presentes em uma dada microestrutura, a imagem obtida pela análise de fases presentes na microestrutura está retratada na Figura 25.



**Figura 25: Micrografia da amostra recozida com aumento de 1000X e alteração de cores, na qual a cor vermelha evidencia os microconstituintes perlíticos.**

**Fonte: Autoria própria.**

Utilizando a ferramenta de cálculo de área no ImageJ chegou-se ao valor aproximado de área de 64,37% para o microconstituente perlítico, este valor pode alterar dependendo da região da amostra em que se está fazendo a análise, desse modo efetuou-se a medição de 9 regiões distintas da amostra chegando-se ao valor médio de 64,42% em área.

Com o valor do percentual em área de perlita é possível calcular o percentual de Carbono presente na liga, já que a perlita é constituída por ferrita + cementita, desse modo faz-se a consideração de que se o material fosse resfriado em condição de equilíbrio na composição eutetóide do diagrama Fe-C, 0,76%wt de Carbono, haveria a formação de 100% perlita na microestrutura do material, sendo possível calcular o valor aproximado do teor de carbono da liga com base na porcentagem de perlita, como mostra a Equação (12)

$$\%C = \frac{\text{Porcentagem de Perlita}, 0,76\% \text{wt C}}{100\%} \quad (12)$$

$$\%C = \frac{64,42 \cdot 0,76}{100} \Rightarrow \%C \cong 0,489$$

Com o valor obtido de 0,489%wt em Carbono pode-se dizer que o material da amostra realmente é um aço médio carbono, já que se encontra entre o intervalo de 0,3 - 0,6%wt C. Entretanto não se pode afirmar com exatidão qual a liga metálica em questão, visto que esta medição pode variar dependendo da área de microscopia que for analisada, para que a determinação do material da liga seja mais preciso é necessário interpretar os resultados obtidos pela técnica de análise química por FRX.

#### 4.1.3 Análise dos Resultados Obtidos por FRX

Como discorrido, foi realizado a priori o ensaio de análise química por FRX, a partir aspecto qualitativo de medição e do aspecto quantitativo, nos quais foram possíveis determinar quais componentes de liga estão presentes na amostra, assim como uma aproximação para sua porcentagem em peso na liga. Analisando o espectro completo resultante do FRX, compreendido na Figura 26, é possível determinar qualitativamente quais materiais estão presentes na amostra, entre eles estão o Fe, Ni, Mn, Cr, Al, Mo, Cu, Si, V, Br, Os, entre outros.

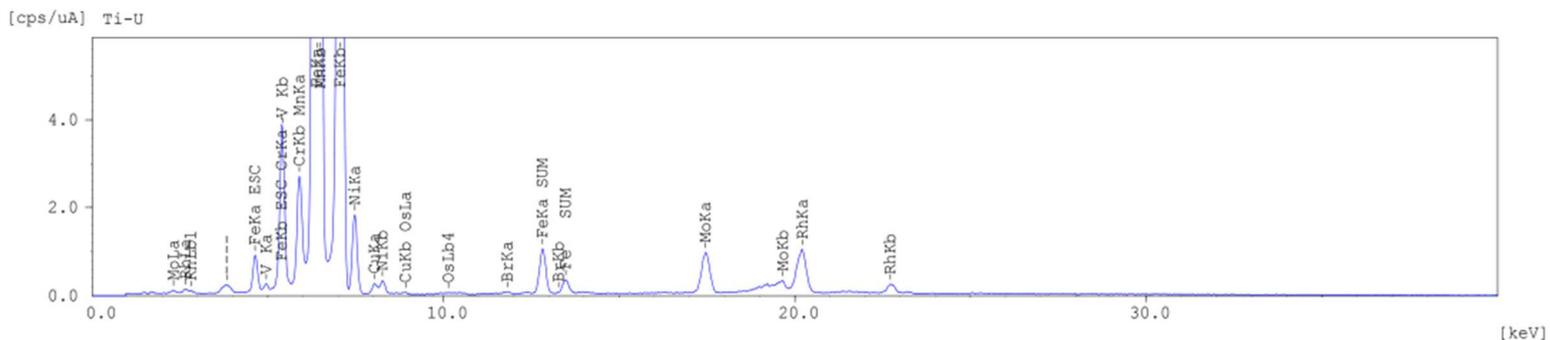
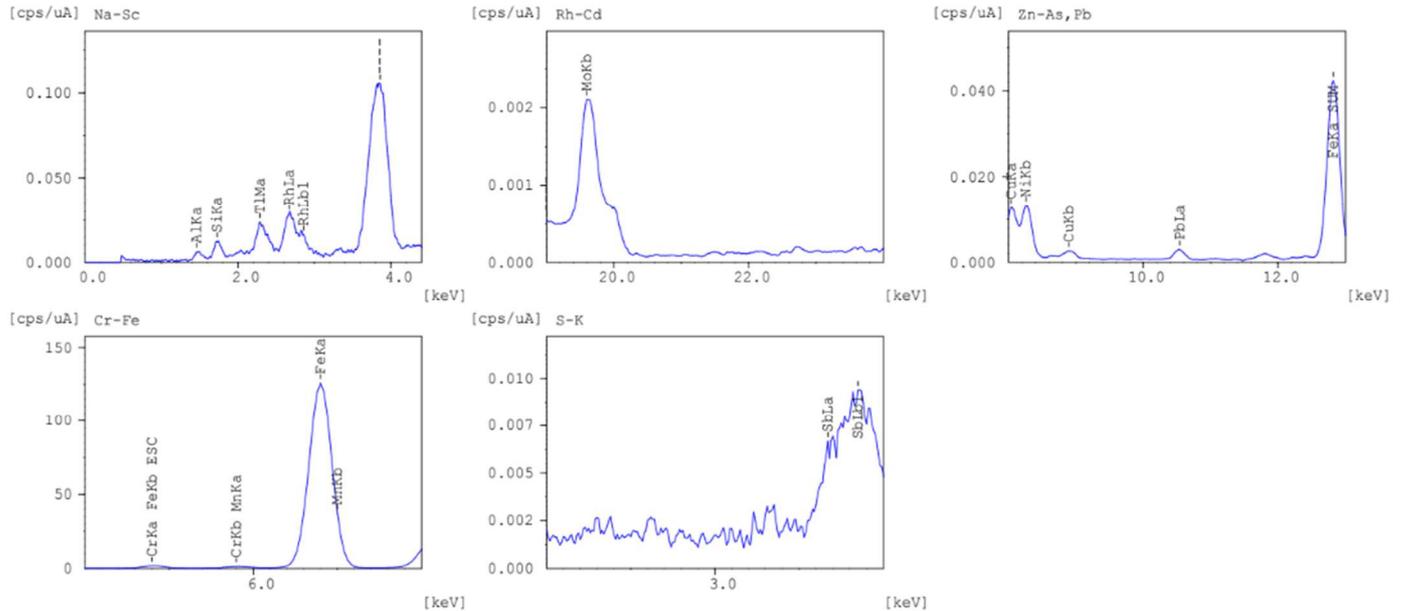


Figura 26: Espectro completo da amostra obtido após a realização de FRX.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 26 cada pico representa a resposta de um determinado elemento à radiação incidida na amostra, de modo que os maiores picos representam os elementos em maior concentração. Na Figura 27 é possível observar os picos de maior amplitude de forma ampliada e com a retirada de picos muito pequenos.



**Figura 27: Espectro característico da amostra para os principais elementos identificados na análise de FRX.**

**Fonte: Autoria própria.**

Entretanto, para que a identificação da liga seja mais precisa, é necessário analisar os resultados quantitativos obtidos descritos na Tabela 3.

**Tabela 3: Composição química da amostra a partir da análise quantitativa de FRX.**

	Fe	Ni	Cr	Mn	Al	Mo	Cu	Si	V
Concentração (%)	95,698	1,736	0,803	0,800	0,298	0,282	0,161	0,143	0,034

**Fonte: Autoria própria.**

Lembrando que a técnica de FRX não é capaz de identificar a presença de Carbono na amostra, é necessário realizar a análise conjunta do teor de carbono, obtido pelo cálculo na seção 4.1.2, com os teores de elementos químicos identificados pela caracterização por FRX

com especificação de elementos.

Com os teores de Carbono e dos demais elementos de liga determinados, consultou-se o Metals Handbook: Desk Edition em busca de um material candidato para o material da amostra, sendo o SAE 4340 o aço médio carbono mais compatível com a composição química determinada por FRX, como pode ser observado na Tabela 4, os valores de dureza demonstrados na Tabela 2 corroboram que o aço em questão é um SAE 4340, assim como o teor de carbono determinado pela micrografia no estado recozido, desse modo, pôde-se concluir que o material em questão definitivamente é um grade de aço SAE 4340.

**Tabela 4: Composição química do aço SAE 4340 de acordo com a norma SAE/AISI.**

Composição química em %wt									
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V
SAE	0,38 –	0,60 –	<0,035	<0,040	0,15 –	1,65 –	0,70 –	0,20 –	-
4340	0,43	0,80			0,35	2,00	0,90	0,30	

**Fonte: Modificado de ASM INTERNATIONAL.**

## 4.2 CÁLCULO DA ENERGIA EFETIVA PARA DEFORMAR PLASTICAMENTE A AMOSTRA

De acordo com o que foi discorrido durante a fundamentação teórica é possível calcular qual a deformação efetiva de um corpo a partir de um estado complexo de deformações, para isso se utiliza das relações invariantes de deformação e tensão, de forma que seja possível simplificar este estado complexo em um estado simplificado, onde apenas as deformações principais são consideradas para descrever o estado de deformação efetiva. Na Equação (10) pode-se observar como que esta relação se dispõe.

$$\bar{\epsilon} = \left[ \frac{2}{3} (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2) \right]^{1/2} \quad (9)$$

Sabendo que a deformação verdadeira é descrita pela Equação (11) e que durante a conformação mecânica da amostra considera-se que não há variação de volume, já que apenas o regime plástico é considerado, é possível determinar as deformações principais e,

consequentemente, determinar a deformação efetiva sofrida pela amostra, a partir da comparação do valor inicial de diâmetro da barra de seção transversal cilíndrica com os valores de espessura e largura do abridor de garrafas obtidos no fim do processo de conformação mecânica.

$$\varepsilon_T = \int_{l_0}^{l_f} \frac{dl}{l} = \ln \left( \frac{l_f}{l_0} \right) \quad (13)$$

Dados:

- Espessura e largura inicial da amostra ( $e_0, w_0$ ): 15,7 mm de diâmetro (seção transversal circular);
- Comprimento inicial da amostra ( $l_0$ ): 76 mm;
- Espessura final da amostra ( $e_f$ ): 5,9 mm;
- Largura final da amostra ( $w_f$ ): 23,8 mm;
- Comprimento final da amostra ( $l_f$ ): 108 mm

Fazendo a substituição da Equação (13) na Equação (10) tem-se:

$$\bar{\varepsilon} = \left[ \frac{2}{3} \left( \ln \left( \frac{e_f}{e_0} \right)^2 + \ln \left( \frac{w_f}{w_0} \right)^2 + \varepsilon_3^2 \right) \right]^{1/2}$$

Dessa forma, é possível obter o valor da deformação principal  $\varepsilon_3$  a partir da consideração, feita a priori, de que não há variação de volume durante o regime plástico de deformação, assim como demonstrado na Equação (14).

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \Rightarrow \varepsilon_3 = -\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \quad (14)$$

Assim faz-se os cálculos das deformações principais.

$$\varepsilon_1 = \ln \left( \frac{e_f}{e_0} \right) = \ln \left( \frac{5,9 \text{ mm}}{15,7 \text{ mm}} \right) = -0,9787$$

$$\varepsilon_2 = \ln \left( \frac{w_f}{w_0} \right) = \ln \left( \frac{23,8 \text{ mm}}{15,7 \text{ mm}} \right) = 0,4160$$

$$\varepsilon_3 = -\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \Rightarrow \varepsilon_3 = 0,5627$$

$$\therefore \bar{\varepsilon} = \left[ \frac{2}{3} ((-0,9787)^2 + (0,4160)^2 + (0,5627)^2) \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow \bar{\varepsilon} \cong 0,8021$$

Agora, basta utilizar a Equação (11) para determinar a Energia conformacional efetiva teórica ( $U_T$ ) que deve ser transferido ao corpo metálico para conformá-lo no formato desejado, para isto é necessário determinar o volume inicial da amostra a partir dos dados obtidos com medição por paquímetro e determinar qual a tensão de escoamento para o aço SAE 4340 na condição utilizada. Sabe-se que a tensão de escoamento ( $\sigma_y$ ) para o aço SAE 4340 varia de 635 a 1125 MPa a depender de seu estado, entretanto, esses valores são obtidos quando a deformação ocorre a frio, assim é necessário determinar a tensão de escoamento a quente do aço SAE 4340 na temperatura e na taxa de deformação imposta durante o processo de forjamento, para que os cálculos de energia necessária para deformar plasticamente o corpo metálico possam ser efetuados corretamente. Dessa forma deve-se realizar a estimativa da taxa de deformação do processo de forjamento, para que possa ser comparado com os valores representados na Figura 8. Assim faz-se necessário determinar o tempo de queda livre do cilindro utilizado para a forja, por meio da conservação de energia, sabendo-se que o cilindro despenca de uma altura de 1,46 m, conforme representado pela Equação (15).

$$E_C = E_G$$

$$\frac{1}{2}m(gt)^2 = mgh \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,46}{9,81}} \cong 0,5 \text{ segundos} \quad (15)$$

Com a determinação do tempo de queda livre pode-se dar prosseguimento para o cálculo da taxa de deformação imposta à amostra de SAE 4340 durante o processo de conformação por forjamento simples a quente, conforme explicitado pelo desenvolvimento da Equação (16).

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\bar{\varepsilon}}{N^\circ \text{ de impactos} \cdot \text{tempo estimado para cada impacto}} \Rightarrow (16)$$

$$\Rightarrow \frac{\bar{\varepsilon}}{(N^\circ \text{ impac queda livre} \cdot \text{tempo queda livre}) + (N^\circ \text{ impac golpeamento} \cdot \text{tempo})} \Rightarrow$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{0,8021}{(15 \cdot 0,5) + (95 \cdot 0,1)} \Rightarrow \dot{\varepsilon} \cong 0,047 \text{ s}^{-1}$$

Com a determinação de que a taxa média de deformação durante todas as etapas de conformação é de aproximadamente  $0,047 \text{ s}^{-1}$ , pode-se concluir que a tensão de escoamento do aço SAE 4340 durante o forjamento a  $1100^\circ\text{C}$  é de aproximadamente 50 MPa, já que para uma taxa de deformação de  $0,01 \text{ s}^{-1}$  a tensão de escoamento é próximo a 30 MPa enquanto para uma taxa de deformação de  $0,1 \text{ s}^{-1}$  a tensão de escoamento é de 70 MPa, de acordo com o que pode ser observado na Figura 8(a); vale ressaltar que para interpretar a tensão de escoamento da amostra considera-se apenas o regime plástico da curva Tensão X Deformação.

Com todos os valores obtidos, basta substituí-los na Equação (11) a fim de determinar a energia deformacional teórica necessária para conformar o material durante o processo de forjamento em questão, chegando-se ao valor de 590,1 J.

$$U_T = \sigma_y \cdot \bar{\epsilon} \cdot V \Rightarrow U = 50 \text{ MPa} \cdot 0,8021 \cdot (76 \text{ mm} \cdot \pi (\frac{15,7}{2})^2) \Rightarrow$$

$$U_T = 50 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 0,8021 \cdot 1,4713 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \Rightarrow U \cong 590,1 \text{ J}$$

#### 4.3 CÁLCULO DA ENERGIA MECÂNICA EMPREGADA NO FORJAMENTO

Para calcular a energia mecânica transferida para a amostra durante as etapas de forja realizadas ao decorrer desta prática é necessário relembrar os conceitos por trás da Equação (1), já que a energia deformacional (U) transferida para a amostra durante o forjamento é congruente ao trabalho empregado pelo cilindro, marreta ou martelo utilizados e, desconsiderando a perda de energia por efeito Joule ou por atrito, pode-se afirmar que a variação de energia cinética dos objetos de impacto utilizados é igual ao trabalho empregado pelos mesmos, logo, tem-se a Equação (1).

$$E_c = W = \text{Energia deformacional}(U)$$

$$U = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Como foram utilizados três objetos distintos para realizar a forja deve-se aplicar a Equação (1) para cada um deles e ao final realizar um somatório do número de impactos para cada um dos objetos assim como um somatório geral da energia mecânica total empregada no

processo de conformação mecânica por forjamento da amostra metálica.

Realizando o cálculo da energia empregada pelo cilindro é necessário relembrar que o mesmo desenvolve um movimento uniformemente variado e que parte do repouso, isto é, acelerado pela força gravitacional ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ), desse modo a Equação (1) pode ser alterada de forma a chegar a expressão descrita pela Equação (3) conforme observado na seção de revisão de literatura.

Sabendo que a massa do cilindro é de 30 Kg, substitui-se todos os valores obtidos até então na Equação (3), obtendo-se o valor da energia conformacional  $U_C$  realizada pelo cilindro a cada impacto, sendo necessário multiplicar pelo número de impactos realizados durante a prática, lembrando que para este caso, foi considerada a queda livre sob o regime de conservação de energia, isso é, não há perda de energia por atrito, por exemplo.

$$U_C = \frac{1}{2} m(gt)^2 \Rightarrow U_C = \frac{1}{2} 30(9,81 \cdot 0,5)^2 \Rightarrow$$

$$U_C \cong 360,88 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} \text{ ou } 360,88 \text{ J/n}^\circ \text{ de Impactos} \Rightarrow U_C = 360,88 \cdot 15 = 5413 \text{ J}$$

Somando-se o número de impactos realizados pelo cilindro nos 5 primeiros passos do forjamento tem-se que a contribuição de energia mecânica fornecida para a conformação é de 5413 J.

Em sequência, do 6° ao 10° passo foi utilizada uma marreta de massa 2423 g para conformar o material; com o objetivo de calcular a energia envolvida no processo anotou-se em cada passo uma estimativa da altura inicial da marreta até entrar em contato com a amostra (d) e o tempo de 0,1 segundos para percorrer este trajeto, desse modo considerando a Equação (2) pôde-se calcular a energia deformacional empregada pela marreta ( $U_M$ ) nestas etapas.

$$U_M = \frac{1}{2} m \cdot \left(\frac{d}{t}\right)^2 \quad (2)$$

- 6° Passo:  $U_{M,6} = \frac{1}{2} m \cdot \left(\frac{d}{t}\right)^2 \cdot n^\circ \text{marretadas} = \frac{1}{2} \cdot 2,423 \cdot \left(\frac{0,50}{0,1}\right)^2 \cdot 10 \Rightarrow U_{M,6} \cong 302,9 \text{ J};$
- 7° Passo:  $U_{M,7} = \frac{1}{2} m \cdot \left(\frac{d}{t}\right)^2 \cdot n^\circ \text{marretadas} = \frac{1}{2} \cdot 2,423 \cdot \left(\frac{0,50}{0,1}\right)^2 \cdot 20 \Rightarrow U_{M,7} \cong 605,8 \text{ J};$
- 8° Passo:  $U_{M,8} = \frac{1}{2} m \cdot \left(\frac{d}{t}\right)^2 \cdot n^\circ \text{marretadas} = \frac{1}{2} \cdot 2,423 \cdot \left(\frac{0,50}{0,1}\right)^2 \cdot 10 \Rightarrow U_{M,8} \cong 302,9 \text{ J};$

- 9º Passo:  $U_{M,9} = \frac{1}{2} m \cdot \left(\frac{d}{t}\right)^2 \cdot n^{\circ} \text{marretadas} = \frac{1}{2} \cdot 2,423 \cdot \left(\frac{0,50}{0,1}\right)^2 \cdot 15 \Rightarrow U_{M,9} \cong 454,3 J$ ;
- 10º Passo:  $U_{M,10} = \frac{1}{2} m \cdot \left(\frac{d}{t}\right)^2 \cdot n^{\circ} \text{marretadas} = \frac{1}{2} \cdot 2,423 \cdot \left(\frac{0,50}{0,1}\right)^2 \cdot 5 \Rightarrow U_{M,10} \cong 151,4 J$ .

$$U_M = U_{M,6} + U_{M,7} + U_{M,8} + U_{M,9} + U_{M,10} \Rightarrow U_M = 1817,3 J$$

Por fim, tem-se a contribuição da energia conformacional fornecida pelo forjamento com o martelo ( $U_m$ ), entre a 11ª e a última etapa, entretanto as duas últimas etapas serão desconsideradas pois não houve a imposição de uma deformação expressiva na amostra, já que os dois últimos passos foram destinados apenas para formar o gancho do abridor de garrafas, assim serão considerados apenas dois passos para a contribuição de  $U_m$ . Para realizar os cálculos utilizou-se da massa do martelo (600 g) mensurada durante a metodologia da prática, os cálculos foram realizados de forma análoga ao que foi demonstrado para  $U_M$ .

- 11º Passo:  $U_{m,11} = \frac{1}{2} m \cdot \left(\frac{d}{t}\right)^2 \cdot n^{\circ} \text{marteladas} = \frac{1}{2} \cdot 0,600 \cdot \left(\frac{0,30}{0,1}\right)^2 \cdot 20 \Rightarrow U_{m,11} = 54,0 J$ ;
- 12º Passo:  $U_{m,12} = \frac{1}{2} m \cdot \left(\frac{d}{t}\right)^2 \cdot n^{\circ} \text{marteladas} = \frac{1}{2} \cdot 0,600 \cdot \left(\frac{0,30}{0,1}\right)^2 \cdot 15 \Rightarrow U_{m,12} = 40,5 J$ .

$$U_m = U_{m,11} + U_{m,12} \Rightarrow U_m = 94,5 J$$

Calculada a contribuição de cada um dos objetos utilizados na forja pode-se determinar a energia conformacional total (U), descrita pela Equação (17), fornecida para a amostra durante o processo de conformação.

$$U = U_C + U_M + U_m \quad (17)$$

$$U = 5413 + 1817,3 + 94,5 = 7324,8 J$$

#### 4.3.1 Eficiência Energética do Processo

A partir dos cálculos efetuados nas seções 4.2 e 4.3 é possível calcular a eficiência energética do processo de conformação por forjamento desenvolvido ao decorrer da prática

deste trabalho (Equação (18)), para isto basta comparar os valores de Energia efetiva necessária para que ocorra deformação, calculado na seção 4.2, com o valor da Energia total transferida durante o processo de forjamento, calculado na seção 4.3.

$$\eta = \frac{U_T}{U} = \frac{590,1}{7324,8} = 0,08056 \text{ ou } 8,06\% \quad (18)$$

O rendimento apresentado pelo processo de forjamento a quente executado nesta prática foi de aproximadamente 8,06%, uma eficiência baixa quando comparada com os rendimentos obtidos na prática desenvolvida pelo curso de Engenharia Metalúrgica da *Colorado School of Mines*, que foram de 10 a 25%, isso pode ser explicado pelo fato de que, diferentemente da prática original, a amostra adquirida para execução do forjamento possuía seção transversal circular, o que pode ter dificultado o processo de conformação, visto que para dar a forma de abridor de garrafa (*Hoffman Bottle Opener*), foi necessário primeiramente transformar a seção transversal em uma geometria próxima a retangular. Outro fator que pode influenciar na eficiência calculada do processo é a taxa de deformação, visto que, caso a estimativa feita da taxa de deformação imposta durante o processo de  $0,047 \text{ s}^{-1}$  seja subestimada, ou seja, que a taxa de deformação imposta na realidade era maior, a energia necessária para conformar plasticamente a amostra seria maior, o que aumentaria a eficiência do forjamento, por exemplo, caso a taxa de deformação imposta fosse de  $0,1 \text{ s}^{-1}$  a eficiência do processo seria de 11,28%.

#### 4.4 CÁLCULO DA ENERGIA TÉRMICA FORNECIDA DURANTE O FORJAMENTO

De acordo com o que fora abordado na seção de revisão de literatura 2.2.2, a contribuição energética do aquecimento realizado pelo forno elétrico pode ser descrito pela Equação (4), onde a energia fornecida para a amostra está descrita na forma de calor transferido, sendo dependente da massa da amostra, do calor específico do aço SAE 4340 e da variação de temperatura na qual a amostra foi imposta, já que, como não foi fornecido nenhum dado da amostra por parte do fabricante, é impossível determinar a massa da mesma apenas com o volume calculado anteriormente.

$$U_{térmica} = Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \Rightarrow U = 99,13 \text{ g} \cdot 0,6 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C} \cdot (1100^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) \Rightarrow$$

$$U_{\text{térmica}} = 99,13.0,6.1075 \Rightarrow U_{\text{térmica}} = 63938,85 J$$

Desse modo, percebe-se que a energia fornecida para que houvesse o amolecimento do corpo metálico é muito superior há energia efetiva teórica para conformar a barra ( $U_T$ ). Vale ressaltar, que devido a impossibilidade de se fazer uma medição precisa, todos os aquecimentos realizados entre os passos de forjamento foram desconsiderados, visto que era impossível determinar exatamente qual a temperatura da amostra no final de cada passo de forjamento, entretanto é possível concluir que a energia térmica fornecida para o amolecimento do corpo metálico é muito superior a energia efetiva de conformação ( $U_T$ ). Outro ponto de extrema relevância a ser considerado é que a energia gasta no processo de aquecimento foi, na prática, muito maior do que a calculada acima, visto que para aquecer a amostra é necessário primeiramente aquecer o forno e a atmosfera do mesmo.

## 5 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Relembrando os objetivos que foram propostos para a realização desta monografia, como realizar a caracterização do material da amostra, determinar a energia transferida durante os passos de forjamento a quente, além de determinar a viabilidade da implementação da parte prática deste trabalho nas próximas disciplinas de conformação a serem ofertadas pelo Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, pode-se concluir que o objetivo foi atingido com êxito, mesmo que o rendimento do processo tenha sido baixo, aproximadamente 8,06%. Entretanto, para que os próximos professores possam implementar esta prática na disciplina de Conformação Mecânica acredito que seja interessante realizar alguns passes de laminação a frio, ou a quente, antes de ser feita a realização dos passes de forja, de modo que a seção transversal da amostra se torne retangular de maneira mais fácil quando comparada a mudança de seção transversal efetuada por forjamento neste trabalho, principalmente se a laminação a quente for adotada, já que durante a laminação a quente há a diminuição do encruamento do material pelo fenômeno de recuperação e recristalização dinâmica, de maneira análoga ao que ocorre durante o forjamento a quente, dessa maneira, realizando-se passos preliminares de laminação a quente, o rendimento do processo de conformação da amostra em um *Hoffman Bottle Opener* por forjamento será aumentada.

Quanto aos resultados de caracterização obtidos, acredito que a técnica de caracterização química por Fluorescência de Raios-X (FRX) tenha sido essencial para a determinação do aço SAE 4340, por mais que alguns elementos presentes na amostra não estejam presentes na norma do AISI 4340, já que pode haver a contaminação de alguns elementos de liga, além de que alguns elementos podem ser microligados visando a melhora para alguma aplicabilidade, ou processamento, como a microadição de Vanádio presente no material da amostra, que geralmente é adicionado para melhorar a temperabilidade do aço SAE 4340. A determinação das fases presentes na microestrutura do material por meio das imagens obtidas por MO é suficientemente boa para atender os requisitos do trabalho, mas caso julgue-se necessário, seria válido a execução de um ensaio de Difração de Raios-X (DRX), no qual seria possível obter com maior precisão quais as fases presentes no material da amostra.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. AISI 1045 (USA) Standards, Estados Unidos: AISI.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. AISI 4340 (USA) Standards, Estados Unidos: AISI.

BLAU, P. SAE-AISI designations for Alloy Steels. **Metals Handbook: Desk Edition**. ASM INTERNATIONAL, v. 1 .

BEDDOES, J.; BIBBY, M. J. Bulk deformation processes: Forging. In: BEDDOES, J.; BIBBY, M. J. **Principles of metal manufacturing processes**. Londres: Arnold, 1999. Cap 4, p.99-115.

CALLISTER JR, W. D. Diagrama de Fases: O Sistema Ferro-Carbono. In: CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2012, Cap 9, p. 271-285.

CHIAVERINI, V. Forjamento e processos correlatos: Forjamento Livre. In: CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento, Volume II**. São Paulo: McGraw-Hill Ltda., 1986, Cap 3, p.80-95.

DIETER, G. **Mechanical Metallurgy**: SI Edition. 1. Ed. Singapura: McGraw-Hill Ltda, 1986. 739 p.

FAKIR, R.; BARKA, N.; BROUSSEAU, J.; CARON-GUILLEMETTE, G. Analysis of the Mechanical Behavior of AISI 4340 Steel Cylindrical Specimens Heat Treated with Fiber Laser. **Journal of Manufacturing Processes**. Quebec, Canadá, vol. 55, mar. 2020, p. 1-16. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612518317778>. Acesso em: 31 ago. 2022.

FREE, M. **Heat Treat Colors for Steel**. Disponível em: <https://www.productionmachining.com/articles/heat-treat-colors-for-steel>. Acesso em: 23 jul. 2022.

FREITAS, B. J .M. **Estudo da Influência das Temperaturas de Austenitização na Dureza dos Aços AISI D6 e SAE 1045**. 89 p. Engenharia de Materiais – UTFPR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 31 out. 2016.

ŁUKASZEK-SOŁEK, A.; KRAWCZYK, J.; ŚLEBODA, T.; GRELOWSKI, J. Optimization of the Hot Forging Parameters for 4340 Steel by Processing Maps. **Journal of Materials Research and Technology**. Golezów, Polônia, mai. 2019, p. 1-10. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785418312456>. Acesso em: 31 ago. 2022.

MELINA. **EDX Series EDX-720-800HS**. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/452891068/EDX-Series-EDX-720-800HS>. Acesso em: 31 ago. 2022.

MURUGESAN, M.; SAJJAD, M.; JUNG, D. W. Microstrucutre Evaluation and Constitutive Modeling of AISI-1045 Steel for Flow Stress Prediction under Hot Working Conditions. **Symmetry**, Jeju-Do, v. 12, n. 5 maio. 2020, Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-8994/12/5/782>>. Acesso em: 23 jul. 2022.

VERHOEVEN, J. D. Steel and the Fe-C Phase Diagram: Low Carbon Steels (Hyoeutectoid Steels). In: VERHOEVEN, J. D. **Metallurgy of Steel for Bladesmiths & Others who Heat Treat and Forge Steel**. Iowa: Iowa State University, 2005, Cap 3, p.8-17.

WOO, W.; LEE, C. A study of the machining characteristics of AISI 1045 steel and Inconel 718 with a cylindrical shape in laser-assisted milling, **Applied Thermal Engineering**, Changwon-Si, v. 91, maio/agosto. 2015, Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431115007887?via%3Dihub>. Acesso em: 23 jul. 2022.