



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ANDERSON MARINHO MORENO**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ESTRUTURAIS DO AÇO  
DAMASCO RESULTANTE DO CALDEAMENTO DO AÇO SAE 1095 E UHB 15N20**

SÃO LUÍS - MA

2019

**ANDERSON MARINHO MORENO**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ESTRUTURAIS DO AÇO  
DAMASCO RESULTANTE DO CALDEAMENTO DO AÇO SAE 1095 E UHB 15N20**

Monografia de graduação apresentada ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. José de Ribamar Ferreira Barros Junior

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA MONOGRAFIA DEFENDIDA PELO ALUNO ANDERSON MARINHO MORENO, E ORIENTADA PELO PROF. ME. JOSÉ DE RIBAMAR FERREIRA BARROS JUNIOR.

---

PROF. ME. JOSÉ DE RIBAMAR FERREIRA BARROS  
JUNIOR.  
ORIENTADOR

SÃO LUÍS - MA

2019

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA CENTRAL – UEMA

Moreno, Anderson Marinho.

Estudo das propriedades mecânicas e estruturais do aço damasco resultante do caldeamento do aço SAE 1095 e UHB 15n20 / Anderson Marinho Moreno. – São Luís, 2019.

67 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

Orientador: Prof. Me. José de Ribamar Ferreira Barros Junior.

1.Aço Damasco. 2.Caldeamento. 3.Cutelaria. 4.Forjamento. I.Título

CDU: 620.18-034.14

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ESTRUTURAIS DO AÇO  
DAMASCO RESULTANTE DO CALDEAMENTO DO AÇO SAE 1095 E UHB 15N20**

Autor: Anderson Marinho Moreno

Orientador: Prof. Me. José de Ribamar Ferreira Barros Junior

A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta monografia.

---

**Prof. Me. José de Ribamar Ferreira Barros Junior (Orientador)**  
Universidade Estadual do Maranhão

---

**Prof. Dr. Adilto Pereira Andrade Cunha**  
Universidade Estadual do Maranhão

---

**Prof. Amadeu Santos Nunes Júnior**  
Universidade Estadual do Maranhão

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís - MA, 05 de dezembro de 2019.

## Dedicatória

*Dedico este trabalho os meus pais  
que sempre me apoiaram de todas  
as formas para que este sonho se  
realizasse.*

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por estar ao meu lado me dando forças e esperança nas diversas vezes em que pensei que não suportaria os momentos difíceis.

Ao meu orientador José de Ribamar por confiar neste trabalho e ter me auxiliado de diversas formas a completar esta última fase da minha vida acadêmica.

Aos meus pais, Jose Cleber e Marinildes do Rosário, por todo amor, carinho e pela educação, agradeço também por todo trabalho duro que eu sei que os dois tiveram para que eu tivesse condições para trilhar este caminho.

A minha irmã Vanessa Marinho pela compreensão e conselhos que me ajudaram a me manter no caminho.

A minha noiva Ana Caroline Lisboa por sempre acreditar em mim, mesmo naqueles momentos em que eu já tinha desistido, nos momentos em que desacreditei em mim, por sempre estar ao meu lado fazendo meus dias mais felizes.

Ao meu amigo e colega de turma, William Cunha, pelo companheirismo desde do começo deste curso, agradeço por tornar os momentos de aula mais divertidos e menos cansativos. Afinal, TNE: tudo nos esquemas.

Aos amigos, Alexandre Aguiar e Rodrigo, do LABEMM (Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalografia) da UEMA pelo auxílio na parte prática deste trabalho, fazendo com que essa etapa parecesse menos árdua, além de muitos conselhos e ajudas. Sem vocês, eu não teria conseguido.

Agradeço a Universidade Estadual do Maranhão pela oportunidade de fazer o curso de engenharia mecânica.

A banca Examinadora por se disponibilizarem a fazer parte desse trabalho.

## Epígrafe

*“Nossas dúvidas são traidoras e nos fazem perder o que, com frequência, poderíamos ganhar, por simples medo de arriscar.”*

*William Shakespeare*

## Resumo

O aço damasco tem alcançado grande destaque no mercado da cutelaria nos últimos anos, porém o mesmo é frequentemente produzido de forma empírica e pouco estudado cientificamente, desta forma, o estudo deste material é necessário para se entender de forma técnica o seu processo de fabricação, assim como suas propriedades mecânicas. Este aço é fabricado a partir da união de dois aços distintos por um método conhecido como caldeamento. Neste trabalho, utilizou-se para este fim o aço carbono SAE 1095 e o UHB 15n20, por serem aplicados amplamente na confecção de utensílios de corte. Após o forjamento do aço damasco, realizou-se tratamentos térmicos de normalização, têmpera e revenimento com a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas. O estudo foi embasado na coleta de dados dos ensaios de metalografia, dureza e tração, em amostras dos aços base e do aço damasco finalizado. Os resultados das micrografias demonstraram sucesso no caldeamento. Ademais, as análises revelaram um material de alta dureza, entretanto, frágil. Em resposta a esta situação foi exposta algumas alternativas para a melhoria do processo como um todo.

**Palavras-chave:** Aço Damasco; Caldeamento; Cutelaria; Forjamento;



## **Abstract**

Damascus steel has achieved great prominence in the cutlery market in recent years, but it is often empirically produced and poorly scientifically studied, so study of this material is necessary to understand the technical form or its manufacturing process as well as its mechanical properties. This steel is made from the joining of two distinct steels by a method known as welding. In this work, used for this purpose carbon steel SAE 1095 and UHB 15n20, as they are widely used in the manufacture of cutting tools. After the forging of apricot steel, carried out the normalization, tempering and tempering heat treatments with the use of improving mechanical properties. The study was based on the data collection of metallography tests, duration and use, in steel and finished apricot steel samples. The results of the micrographs demonstrated success in the welding. Moreover, as statistics revealed in material of high hardness, however, fragile. In response to this situation, some alternatives have been presented to improve the overall process.

**Keywords:** Damascus Steel; welding; Cutlery; Forging;

## Lista de Figuras

Figura 3.1 - Aço damasco.....	4
Figura 3.2 - Forjamento livre em matriz aberta.....	8
Figura 3.3 - Forjamento em matriz fechada .....	9
Figura 3.4 – Esquema do princípio do método Rockwell .....	15
Figura 3.5 - Representação esquemática do ensaio de tração .....	16
Figura 3.6 – Corpos de prova para ensaio de tração.....	17
Figura 3.7 – Curva tensão-deformação convencional .....	17
Figura 4.1 – Fluxograma das atividades realizadas .....	20
Figura 4.2 – (a) Aço UHB 15n20, (b) Aço SAE 1095 .....	21
Figura 4.3 – Primeiro protótipo confeccionado.....	22
Figura 4.4 – Segundo protótipo confeccionado.....	22
Figura 4.5 – Forno do tipo mufla .....	23
Figura 4.6 – Billet com adição de ácido bórico.....	23
Figura 4.7 – Tabela de cores indicativa para aço aquecido .....	24
Figura 4.8 – Prensa hidráulica .....	24
Figura 4.9 – (a) Retirada do billet do forno; (b) Posicionamento do billet .....	25
Figura 4.10 – (a) Posicionamento da matriz confeccionada; (b) Compressão do billet.....	26
Figura 4.11 – Aço damasco .....	26
Figura 4.12 – Aço damasco após retirada do óxido de ferro.....	27
Figura 4.13 – Durômetro Rockwell.....	29
Figura 4.14 – Corpo de prova do aço damasco .....	30
Figura 4.15 – Corpos de prova dos aços base .....	30
Figura 4.16 – Cortadora metalográfica Arocor 40 da Arotec.....	31
Figura 4.17 – (a) Embutidora metalográfica EM30D da Teclago, (b) Vista superior da embutidora.....	32
Figura 4.18 – Amostra embutida.....	33
Figura 4.19 – Politriz/lixadeira Aropol 2V da Arotec .....	33
Figura 4.20 – Lixas abrasivas de SiC .....	34
Figura 4.21 – (a) Lavadora ultrassônica, (b) Realização da limpeza .....	35
Figura 4.22 –Análise da amostra com microscópio ótico .....	36

Figura 4.23 – Realização do ensaio de tração .....	37
Figura 4.24 – Corpo de prova para o ensaio de tração .....	37
Figura 5.1 – Micrografias do aço UHB 15n20 como recebido em (a) 500X e (b) 1000X .....	39
Figura 5.2 – Micrografias do aço SAE 1095 como recebido em (a) 500X e (b) 1000X.....	39
Figura 5.3 – Micrografias do aço damasco após o forjamento e caldeamento em (a) 200X e (b) 1000X .....	40
Figura 5.4 – Micrografias do aço damasco após a normalização em (a) 200X e (b) 500X .....	41
Figura 5.5 – Micrografias do aço damasco após a têmpera e revenimento em (a) 500X e (b) 1000X .....	42
Figura 5.6 – Gráfico da distribuição da dureza na seção transversal dos corpos de prova .....	43
Figura 5.7 – Médias de dureza encontradas nos ensaios em HRC .....	44
Figura 5.8 – Corpo de prova após o ensaio de tração.....	44
Figura 5.8 – Gráfico da tensão em função da deformação para o aço damasco.....	45

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Orientação para se interpretar a classificação SAE e AISI .....	5
Tabela 3.2 - Composição química em porcentagem do aço SAE 1095. ....	5
Tabela 3.3 - Propriedades do aço SAE 1095 .....	5
Tabela 3.4 - Composição química da liga 15n20. ....	6
Tabela 3.5 - Funções dos elementos de liga encontrados no aço SAE 1095 e no UHB 15n20 .	7
Tabela 3.6 - Temperatura de austenitização para a normalização de aços carbono .....	10
Tabela 3.7 - Indicações sobre o resfriamento da têmpera .....	12
Tabela 4.1 – Tempo necessário de ataque para cada amostra. ....	35
Tabela 5.1 – Composição química em porcentagem do aço SAE 1095 .....	38
Tabela 5.2 – Composição química da liga 15n20.....	38
Tabela 5.3 – Médias de dureza encontradas nos ensaios.....	43

## **Lista de Abreviaturas**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – American Iron Steel Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

EPI's – Equipamentos de Proteção Individual

LABEMM – Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalografia

LABUSI – Laboratório de Usinagem

SAE – Society of Automotive Engineers

SiC – Carbetto de Silício

UEMA – Universidade Estadual do Maranhão

UHB – Bohler Uddeholm

UHC – Ultra High Carbon

## Lista de Símbolos

% - Porcentagem

°C – Graus Celsius

C – Carbono

Cr – Cromo

HB – Dureza Brinel

HRC – Dureza Rokcwell C

Kgf - Quilograma-força

Mg – Magnésio

mm – Milímetro

Mn – Manganês

Mo – Molibdênio

Mpa – megapascal

Ni – Níquel

P – Fósforo

*P* - Profundidade de Penetração

S – Enxofre

Si – Silício

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	2
2.1 Objetivo geral.....	2
2.2 Objetivos específicos.....	2
3 REVISÃO TEÓRICA.....	3
3.1 Aço damasco.....	3
3.2 Aço carbono SAE 1095.....	4
3.3 Aço UHB 15n20.....	6
3.4 Elementos de liga.....	6
3.5 Forjamento.....	7
3.6 Caldeamento.....	9
3.7 Tratamentos térmicos.....	10
3.7.1 Normalização.....	10
3.7.2 Têmpera.....	11
3.7.3 Revenimento.....	12
3.8 Ensaio mecânicos.....	13
3.8.1 Ensaio de dureza.....	13
3.8.2 Ensaio de tração.....	15
3.8.3 Ensaio de metalografia.....	18
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
4.1 Produção do aço damasco.....	20
4.2 Realização dos tratamentos térmicos.....	27
4.2.1 Normalização.....	27
4.2.2 Têmpera.....	28
4.2.3 Revenimento.....	28
4.3 Ensaio de dureza.....	29
4.4 Ensaio metalográficos.....	30
4.4.1 Cortes das amostras.....	31
4.4.3 Lixamento e polimento das amostras.....	33
4.4.4 Ataque químico e análise microestrutural.....	35
4.5 Ensaio de tração.....	36

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
5.1 Ensaio metalográficos .....	38
5.1.1 Materiais como recebido .....	38
5.1.2 Aço damasco.....	40
5.1.2.1 Aço damasco após o forjamento e caldeamento.....	40
5.1.2.2 Aço damasco após a normalização.....	41
5.1.2.3 Aço damasco após a têmpera e revenimento.....	42
5.2 Ensaio de dureza.....	42
5.3 Ensaio de Tração .....	44
6 CONCLUSÃO.....	46
7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	48
REFERÊNCIAS .....	49



# 1 INTRODUÇÃO

O aço damasco ou aço de damasco tem seu ano exato de criação como um mistério ainda nos dias atuais. Seu surgimento no período medieval foi estimulado pela demanda de armas melhores, dando ênfase as espadas. Estas, por sua vez, necessitavam de uma alta resistência para propiciar um corte de qualidade e ao mesmo tempo serem maleáveis para resistir a impactos.

Segundo Slaughter (2014) há indícios que comprovam a existência desse material por volta dos anos de 320 a.C, na mesma época de Alexandre o grande. Apesar da numerosa quantidade de artigos lançados, não há um consenso em relação ao surgimento do termo utilizado, aço damasco. O autor supracitado afirma ainda que o nome não tem como base o lugar de origem das espadas, mas o mercado onde os europeus tiveram o primeiro contato com estas peças, no grande centro comercial de damasco, cidade da Síria.

O aço damasco é produzido atualmente por meio do método conhecido como caldeamento, onde se realiza a solda de dois metais distintos durante o forjamento, aquecendo os materiais próximos ao ponto de fusão, então, com a aplicação de choques mecânicos ocorre a microfusão das superfícies. O aço resultante deste processo apresenta uma ótima qualidade em termos de resistência e estética (DIAS, 2018).

O diferencial deste produto é o desenho característico visível na superfície, um emaranhado de linhas de cores diferentes, contraste resultante do caldeamento de aços com diferentes taxas de carbono e ligas metálicas. Por ser um material de difícil obtenção sua valorização é bem maior do que aços comerciais comuns, sendo assim, os produtos fabricados a partir dele possuem alto valor de mercado.

No contexto atual, o aço damasco tem sido largamente utilizado no mercado da cutelaria, principalmente para a fabricação de facas, devido a qualidade excepcional do fio (parte destinada ao corte) e a estética da lâmina, revelada após o ataque com produtos químicos. Porém o estudo deste material é pouco discutido no meio acadêmico, neste trabalho será discutido os resultados das análises dos metais base, o aço SAE 1095 e o UHB 15n20, posteriormente a comparação com os resultados das análises do aço damasco resultante do caldeamento. Os dados comparados serão decorrentes dos ensaios de metalografia, tração e dureza.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Fabricar e estudar o aço damasco resultante do caldeamento e forjamento dos aços SAE 1095 e UHB 15n20.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Descrever a metodologia utilizada na obtenção do aço damasco.
- Realizar os tratamentos térmicos de normalização, têmpera e revenimento.
- Verificar a microestrutura dos aços empregados no projeto e suas propriedades através de ensaios mecânicos.
- Apresentar e discutir os resultados encontrados.

## **3 REVISÃO TEÓRICA**

### **3.1 Aço damasco**

O aço damasco é um material com características visuais particulares, visto que para sua fabricação são necessárias duas ligas metálicas com teores de carbono distintos. Desta forma, pode apresentar uma alta resistência a tração e ainda exibir uma alta dureza, característica indispensável para produtos de cutelaria (MARTINS; MILANEZ; PERUCH, 2018).

Este aço tem sua data exata de origem não determinada, porém, indícios afirmam que por volta de 320 a.C. haviam ferreiros que o fabricavam. A proveniência do nome deste aço não é relacionada ao local de sua origem, mas ao local de sua comercialização, a cidade de damasco na Síria (SLAUGHTER, 2014).

A fabricação do aço damasco medieval era feita a partir do forjamento de um único lingote de alto teor de carbono (aço UHC – Ultra High Carbon – ligas de ferro-carbono de teor de carbono entre 1,0 % e 2,1 %.) A produção deste aço é executada atualmente com o auxílio do processo chamado de caldeamento, no qual, ocorre a soldagem de duas superfícies metálicas em contato, para tanto é necessário que, estejam limpas, aquecidas e submetidas a compressão (SLAUGHTER, 2014).

Este aço pode possuir várias camadas, identificadas por linhas visíveis no aço, estas linhas são determinadas pela quantidade de vezes que a barra inicial será dobrada sobre ela mesma. A barra inicial ou billet é o nome comumente utilizado por couteiros para identificar a sobreposição dos aços em um único bloco para ser caldeado. Este termo é oriundo dos Estados Unidos e significa sanduíche (PAZINI, 2011).

As linhas características do aço damasco se tornam visíveis após um ataque químico em percloroeto férrico, o ataque será mais eficaz no aço com menor resistência, o de maior resistência irá permanecer praticamente inalterado, possibilitando a diferenciação dos mesmos (DIAS, 2018).

A Figura 3.1 exemplifica o aço damasco contemporâneo, o seu desenho superficial ondulado alterna tons claros e escuros, este é o atributo que o difere dos demais tipos de aços, em termos de aparência física.



Figura 3.1 – Aço damasco (Adaptado de SHOTOKANN, 2019).

### 3.2 Aço carbono SAE 1095

Encontra-se no mercado uma grande variedade de tipos de aços, sendo que cada um possui diferentes elementos em sua estrutura, para facilitar a compreensão foram criadas classificações normatizadas baseadas na composição química.

Dentre as classificações existentes, a SAE (americana – “Society of Automotive Engineers”) possui destaque, sendo padronizada para uso industrial, além da SAE, é adotada a AISI (americana – “American Iron Steel Institute”) e a ABNT (nacional, “Associação Brasileira de Normas Técnicas”). A interpretação adequada da denominação do aço, com base nas normas SAE e AISI, permitem identificar imediatamente a porcentagem de carbono e o tipo de liga que o compõe (CUNHA; CRAVENCO, 2006).

Cunha e Cravenco (2006) explicam que, os prefixos usados para nomear os aços possuem 4 dígitos. Sendo que, os dois últimos algarismos indicam a quantidade de carbono do aço em centésimos de porcentagem, a exemplo o SAE 1095, onde o número 95 demonstra a porcentagem de 0,95 % de carbono. Os dois números iniciais apontam a qualificação do aço, quer dizer, se é aço carbono, aço manganês, aço níquel, etc., entretanto, o primeiro número simboliza o tipo de liga e o segundo a porcentagem aproximada do elemento principal.

A Tabela 3.1 ilustra alguns exemplos de nomenclatura de acordo com sua classificação.

Tabela 3.1 – Orientação para se interpretar a classificação SAE e AISI (Adaptado de CUNHA; CRAVENCO, 2006).

<b>SAE</b>	<b>AISI</b>	<b>Tipo de aço</b>
10XX	C 10XX	Aços-carbono comuns
13XX	13XX	Aços-manganês com 1,75% de Mn
23XX	23XX	Aços-níquel com 3,5% de Ni
25XX	25XX	Aços-níquel com 5,0% de Ni
31XX	31XX	Aços-níquel-cromo com 1,25 de Ni e 0,65% de Cr
40XX	40XX	Aços-molibdênio com 0,25 de Mo

O aço carbono SAE 1095 é aplicado para a fabricação de molas, limas, facas e além de outros equipamentos de cutelaria. Por possuir uma alta taxa de carbono, este aço possui boas propriedades mecânicas para produtos de corte, dentre elas, podemos destacar a alta dureza, resistência a abrasão bem como a resistência mecânica (LUZ, 2019).

A Tabela 3.2 demonstra a composição detalhada deste aço.

Tabela 3.2 - Composição química em porcentagem do aço SAE 1095 (Adaptado de GERDAU, 2003).

<b>Carbono (C)</b>	0,9 a 1,03%
<b>Magnésio (Mg)</b>	0,3 a 0,50%
<b>Fósforo (P)</b>	0,03%
<b>Enxofre (S)</b>	0,05%

A Tabela 3.3 define algumas propriedades mecânicas do aço SAE 1095 considerado o processo de fabricação.

Tabela 3.3 - Propriedades do aço SAE 1095 (Adaptado de GERDAU, 2003).

<b>Aço Sae 1095</b>	<b>Temperatura de Austenização (°C)</b>	<b>Resistência à tração (Mpa)</b>	<b>Limite de Escoamento (Mpa)</b>	<b>Dureza (HB)</b>
<b>Laminado</b>	-	965	570	293
<b>Normalizado</b>	900	1015	505	293
<b>Recozido</b>	790	655	380	192

### 3.3 Aço UHB 15n20

O aço 15n20 é uma liga com adição de níquel, cerca de 2%, utilizada para a produção de ferramentas destinadas ao corte, principalmente para a confecção de lâminas de aço damasco (DIAZ, 2018).

A sigla UHB tem possível origem no nome da fabricante, a companhia Bohler Uddeholm. Suas principais características são a elevada tenacidade, microestrutura muito homogênea com baixo nível de inclusões e acabamento superficial de ótima qualidade (PÁTRIA, 2019).

Segundo Pazini (2011) o aço 15n20 possui uma grande capacidade de resistir à ataques químicos, isso se deve ao fato dessa liga possuir uma quantia significativa de níquel em sua composição.

A Tabela 3.4 descreve a composição química do aço 15n20.

Tabela 3.4 - Composição química da liga 15n20 (Adaptado de PÁTRIA, 2019).

<b>Carbono (C)</b>	0,72 – 0,78%
<b>Manganês (Mg)</b>	0,3 – 0,5%
<b>Silício (Si)</b>	0,15 – 0,35%
<b>Níquel (Ni)</b>	1,9 – 2,1%

### 3.4 Elementos de liga

As propriedades finais de um aço dependem diretamente dos tipos e porcentagens de elementos de liga presentes em sua composição. Diante disso, é necessário conhecer os efeitos de cada elemento contido nos materiais de estudo, o aço SAE 1095 e UHB 15n20.

Nestes dois aços encontramos uma variedade de tipos de elementos de liga, entre eles o carbono, magnésio, manganês, fósforo, enxofre, silício e níquel. Na tabela 3.5 é descrita algumas funções destes elementos.

Tabela 3.5 - Funções dos elementos de liga encontrados no aço SAE 1095 e no UHB 15n20

(Adaptado de TESTMAT, 2019)

<b>Elementos</b>	<b>Funções dos elementos de liga</b>
Carbono (C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forma perlita, bainita, grafite e martensita;</li> <li>• Aumenta a dureza, resistência e temperatura de transição dúctil-frágil;</li> </ul>
Enxofre (S)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminui soldabilidade;</li> <li>• Melhora a usinabilidade;</li> </ul>
Fósforo (P)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduz a tenacidade e ductibilidade;</li> <li>• Melhora a resistência a corrosão;</li> <li>• Diminui a ductibilidade em aços de médio e alto teor de carbono;</li> </ul>
Magnésio (Mg)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• É utilizado em ligas de alumínio para a melhoria das propriedades mecânicas;</li> <li>• Aumenta a resistência a tração;</li> </ul>
Manganês (Mn)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Promove a austenita retida na têmpera;</li> <li>• Produz aço austenítico de alto carbono;</li> <li>• Aumenta a resistência e reduz a ductibilidade em aços ferríticos;</li> </ul>
Níquel (Ni)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Promove austenita retida com médio e alto carbono;</li> <li>• Torna aços de alto cromo austeníticos;</li> <li>• Fornece tenacidade em aços ferríticos e perlíticos;</li> </ul>
Silício (Si)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumenta a resistência de aços temperados e revenidos;</li> <li>• Fornece resistência à oxidação em temperaturas elevadas;</li> <li>• É um desoxidante geral;</li> </ul>

### 3.5 Forjamento

O forjamento é provavelmente o processo de conformação mais antigo, utilizada inicialmente por ferreiros que tinham como ferramentas de trabalho a bigorna e martelo. Normalmente a forja é feita apenas a quente, porém tem se realizado a frio para alguns metais (HELMAN; CETLIN, 2010).

Na atualidade, o forjamento tem grande importância no contexto industrial, sua utilização se faz necessária na fabricação de diversos produtos, principalmente aqueles de elevada resistência, a exemplo peças do setor da indústria automotiva e aeroespacial. Dentre elas, se destacam, eixos de manivela para motores, bielas, engrenagens, componentes estruturais para aeronaves, além de, lingotes e ligas metálicas que recebem um forjamento primário, para posteriormente serem usinadas (MACHADO, 2009).

Neste processo o metal é deformado com a aplicação de esforços por um martelo ou prensa, os martelos provocam deformações por meio do impacto e as prensas comprimem o material com uma força constante provocando o mesmo resultado. Este processo é dividido em duas categorias distintas, o forjamento livre ou matriz aberta e o forjamento em matriz fechada, conhecida usualmente como forjamento em matriz (FILHO et al., 2011).

Segundo Filho et al. (2011) no processo de forjamento livre o material sofre alteração no seu formato entre ferramentas planas ou de formato simples. A deformação ocorre pela compressão direta do material que escoar no sentido perpendicular à força aplicada. Este método é utilizado para a produção de peças de grandes proporções ou então em produções menores onde o valor de retorno não compensa o investimento em matrizes.

A Figura 3.2 demonstra o processo de forjamento livre, onde duas ferramentas deformam o metal localizado no meio das matrizes.

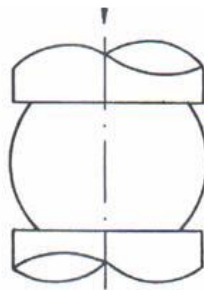


Figura 3.2 – Forjamento livre em matriz aberta (Adaptado de MACHADO, 2009).

O autor ainda define o forjamento em matriz fechada como um processo em que um metal é deformado entre duas metades de matrizes, que proporciona o formato preestabelecido (Figura 3.3). Deste modo, a deformação fica delimitada pela cavidade da matriz, quando aplicada uma pressão sobre o material. Para que ocorra o total preenchimento da cavidade é necessário a adição de uma quantidade razoável de material, no entanto, esta quantidade é difícil de se determinar, sendo assim, o excesso de material sai da matriz, formando a rebarba, retirada posteriormente.



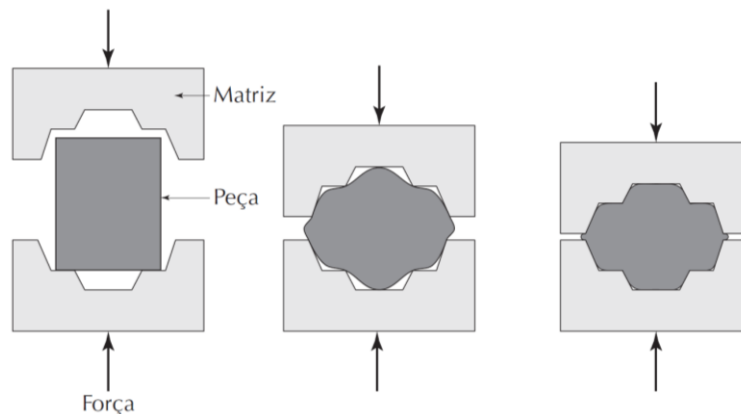


Figura 3.3 – Forjamento em matriz fechada (Adaptado de KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

### 3.6 Caldeamento

O aço damasco moderno é obtido com procedimento de soldagem por caldeamento. Neste processo dois tipos de aços distintos são dispostos de forma alternada um sobre o outro, essa barra inicial sofre elevação de sua temperatura para aproximadamente 1200 °C, posteriormente é submetida a choques e/ou prensagem por meio de marretas e bigorna, prensas hidráulicas ou martelete pneumático, esses choques mecânicos promovem a solda das camadas. Após a união inicial, a barra é cortada em pedaços, então empilhada formando uma nova barra, sofrendo o processo novamente até conseguir o número de camadas pretendida pelo cuteleiro, normalmente uma faca artesanal padrão possui 25 a 400 camadas (MARTINS; MILANEZ; PERUCH, 2018).

Para facilitar o processo de caldeamento é necessário que as extremidades do billet sejam soldados, e nele um cabo, também chamado de espigão. Durante o processo de caldeamento deve-se aplicar sobre o billet um agente químico, o ácido bórico, conhecido na cutelaria como fluxo de solda (PAZINI, 2011).

O ácido bórico deve ser adicionado sobre a superfície do billet antes que o mesmo alcance a temperatura de 700 °C, pois é nesta temperatura que começa a formação de óxido de ferro. Quando submetido a altas temperaturas o ácido bórico derrete, formando uma camada protetora, esse revestimento possui a função de evitar a formação e contaminação dos espaços entre as camadas pelo óxido de ferro, permitindo o caldeamento. (DIAS, 2018).

### 3.7 Tratamentos térmicos

#### 3.7.1 Normalização

A normalização apresenta como objetivo uniformizar a estrutura e regularizar o tamanho do grão, porém, para alguns aços a normalização inclui a função de desenvolver condições favoráveis para que o mesmo seja submetido a outros tratamentos térmicos (CHIAVERINI, 2008).

Segundo Silva e Mei (1988) a normalização é realizada com o aquecimento do material até uma temperatura onde ocorra a austenitização completa do aço, deixando o mesmo resfriar no ar. Este tratamento térmico apresenta como principal objetivo a homogeneização da estrutura após o forjamento e anterior à aplicação da têmpera ou revenimento.

A Tabela 3.6 apresenta faixas de temperaturas de austenitização para alguns aços carbonos, esses valores foram tabelados com base na experiência industrial, assim sendo, podem sofrer variação de 30 °C para menos e 60 °C para mais (CHIAVERINI, 2005).

Tabela 3.6 - Temperatura de austenitização para a normalização de aços carbono (Adaptado de CHIAVERINI, 2005).

<b>Aços (SAE)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
1015 a 1020	880 – 910
1035	850 – 880
1040, 1045 e 1050	825 – 850
1060	800 – 825
1095	800 – 825

O autor Colpaert (2008) afirma que a normalização obtém resultados positivos em relação a melhoria das propriedades de resistência e tenacidade, além disto, a estrutura uniforme obtida neste tratamento é necessária para se alcançar uma resposta estável durante outros tratamentos térmicos.

O processo de normalização é similar ao recozimento comum, porém a estrutura resultante do primeiro tratamento é mais fina devido a sua rápida velocidade de resfriamento,

se comparado ao recozimento, que tem o forno como local de resfriamento. Esta velocidade não depende somente do ambiente no qual o material é exposto, o tamanho da peça que está sendo tratada também tem grande influência. Assim sendo, peças maiores resfriam mais lentamente, pois o calor a ser retirado, por unidade de área, é bem maior (Vlack, 1970).

### 3.7.2 Têmpera

Tratamento térmico com maior importância, pois com a sua aplicação e posteriormente o revenimento, pode-se atingir estruturas e propriedades que possibilitam a utilização do aço tratado em áreas de maior responsabilidade, a exemplo a indústria mecânica, a indústria de transporte e outros diversos setores industriais (CHIAVERINI, 2008).

Colpaert (2008) afirma que o tratamento da têmpera se resume em aquecer o material até uma temperatura adequada para obtenção da microestrutura austenítica, em seguida, manter essa temperatura por um tempo determinado, e, por último, realizar o resfriamento em um meio que permita uma velocidade adequada para obtenção da martensita.

A penetração e distribuição da dureza ao longo de uma determinada seção, depende da temperabilidade do aço, do tamanho e forma da peça, da temperatura de austenitização e do meio de têmpera. O termo temperabilidade ou profundidade de penetração da tempera é o atributo que decide o nível de alteração na dureza em todas as dimensões, desde a superfície até o centro da peça quando temperada (COLPAERT, 2008)

O controle da taxa de resfriamento é realizado em fluidos, variados meios de têmpera são empregados, cada um com sua capacidade de extração de calor específica. A água, óleo e ar, são os fluidos mais comumente utilizados nesta etapa, apesar que, outros líquidos e gasosos possam ser utilizados (SILVA; MEI, 1988).

De acordo com Silva e Mei (1988) quando o processo de resfriamento ocorre em meios líquidos, é possível delimitar três estágios, na medida em que a peça esfria. Na primeira etapa, a peça é envolta por um filme contínuo de vapor, para que este filme seja disperso, pode-se agitar a peça logo no início da têmpera. A segunda etapa é caracterizada pela formação de bolhas de vapor devido o término do filme de vapor, essas bolhas devem ser retiradas agitando o material, pois, as mesmas dificultam o resfriamento do ponto onde estão localizadas se

permanecerem durante um longo período de tempo sobre a superfície. Na terceira e última etapa ocorre o resfriamento por condução e convecção, esta etapa surge em decorrência da baixa temperatura da peça, insuficiente para vaporizar o meio de têmpera. Esta etapa é extremamente rápida se realizada em água.

A têmpera feita em uma peça depende da função exercida pela mesma posteriormente, se vai ser sujeita a choques, pancadas, vibrações, atrito, pressão, etc. Elementos que serão empregados em atividades sujeitas a vibrações, golpes, choques, abalos, devem receber uma têmpera branda para não trincar. Aqueles submetidos a pressão, esforço, atrito ou peso devem receber uma têmpera dura ou forte, desta forma o risco de deformação é reduzido (CUNHA; CRAVENCO, 2006).

Na Tabela 3.7 está descrito meios empregados na realização da têmpera considerando o grau de severidade.

Tabela 3.7 - Indicações sobre o resfriamento da têmpera (Adaptado de CUNHA; CRAVENCO, 2006).

<b>Têmpera suave resfriar em:</b>	<b>Têmpera média resfriar em:</b>	<b>Têmpera dura resfriar em:</b>
Água morna ou água quente ou água de cal	Água destilada ou água da chuva	Água salgada
Óleo ou óleo de colza; Sal ou sebo	Água comum a 20 °C	Água acidulado (ácido muriático ou clorídrico)

### 3.7.3 Revenimento

A têmpera tem como resultado microestruturas martensíticas, porém, elas apresentam, na maior parte dos casos, um nível elevado de tensões residuais, sua ductibilidade e tenacidade possuem valores abaixo do recomendado para a maioria das aplicações em um contexto industrial. Portanto, é necessário executar um tratamento térmico capaz de alterar a microestrutura e aliviar essas tensões provocadas pela têmpera, para que estas peças possam ser utilizadas, este processo é conhecido como revenimento (COLPAERT, 2008).

O revenimento é realizado com aquecimento a temperaturas inferiores a menor temperatura crítica do material, desta forma é possível aumentar a ductibilidade e regular a

resistência mecânica ao ponto ideal de acordo com sua posterior utilização e gerar alívio de tensões (COLPAERT, 2008).

Segundo Chiaverine (2008), a faixa de temperatura de trabalho do revenido é extensa, variando de temperaturas razoavelmente baixas, na grandeza de 120 °C a 350 °C, quando aplicado para aços-carbono de baixos teores de elementos de liga e temperaturas de até 600 °C a 650 °C, para os aços com alto teor de elementos de liga.

O tempo e a temperatura são as variáveis que determinam as propriedades dos aços que sofrem o revenimento. Normalmente, há uma diminuição acentuada da dureza nos primeiros minutos do tratamento, após duas horas de revenimento a queda de dureza é inexpressiva, desta forma, para que haja uma queda considerável da dureza deve-se aumentar a temperatura invés de manter uma baixa temperatura por um longo período de tempo (SILVA; MEI, 1988).

Conforme Colpaert (2008), as transformações que ocorrem durante o revenimento da martensita podem ser divididas em cinco estágios distintos, sendo que, a maior parte deles não podem ser observados em microscópios óticos, devido a pequena escala. O primeiro estágio acontece antes dos 100 °C e é descrito pela redistribuição de carbono. O segundo, ocorre na faixa de 100 °C a 300 °C, esta etapa é marcada pela precipitação de carbonetos. Ocorre a decomposição da austenita retida em aços com médio e alto carbono no terceiro estágio. Em seguida, quando acima de 300 °C, inicia-se o processo de recuperação e recristalização da martensita, além do crescimento e esferoidização das partículas de cementita, com isso, há uma queda da dureza e resistência mecânica. Por último, entre a faixa de 500 e 650 °C, para aços que detenham elementos de liga formadores de carbonetos, pode acontecer precipitação de carbonetos destes elementos, resultando em um aumento da resistência e dureza.

### **3.8 Ensaios mecânicos**

#### **3.8.1 Ensaio de dureza**

A dureza é uma propriedade mecânica amplamente utilizada para especificar diversos materiais, no entanto, seu significado muda de acordo o contexto no qual está inserido, quando usado por um metalurgista, dureza indica a resistência à deformação plástica permanente, para

um engenheiro mecânico a dureza designa a resistência à penetração de um material duro no outro, já para um projetista o seu significado está ligado a base de conhecimento da resistência e do tratamento térmico ou mecânico de um metal e da sua resistência ao desgaste (SOUZA, 1982).

No início, os ensaios de dureza eram feitos com base em minerais, a escala de medida era determinada analisando a capacidade de um material riscar a superfície de outro mais macio, chamada de escala Mohs, sua escala partia do 1, para o talco, com máximo o 10, para diamante. Com o advento de novas tecnologias, surgiram novas técnicas de medir a dureza de um material, onde um pequeno penetrador é pressionado contra a superfície do material em questão, de acordo com níveis controlados de carga e taxas de aplicação. Neste novo modelo, o que determina a dureza é a profundidade ou tamanho da impressão resultante do processo (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Dentre os métodos utilizados para a medição da dureza existem aqueles mais usados no campo da metalurgia e mecânica, a dureza por penetração tem um maior destaque, sendo citada em especificações técnicas. Dentre as técnicas deste método se destaca a dureza por penetração Rockweel, porém existem outras metodologias, a exemplo, dureza Vickers, Brinell, Knoop e Meyer (SOUZA, 1982).

O ensaio de dureza Rockweel é o método mais utilizado internacionalmente, proposto pela indústria Rockweel dos Estados Unidos, de onde seu nome teve origem. Para este tipo de ensaio é utilizado um penetrador de diamante esferocônico com ângulo de 120° ou ainda uma esfera de aço endurecido ou carboneto de tungstênio. A profundidade da impressão causada pelo penetrador é o fator determinante para a medida de dureza, este penetrador sofre a ação de uma carga aplicada em dois estágios, a pré-carga e a carga suplementar (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

O esquema representado na Figura 3.4 indica a forma como ocorre a realização do ensaio de dureza Rockwell, especificando as deformações ocasionadas pelas aplicações da pré-carga e carga principal. A máquina de ensaio relaciona a profundidade de penetração ( $P$ ) com um número arbitrário, assim a leitura é indicada no leitor do equipamento (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

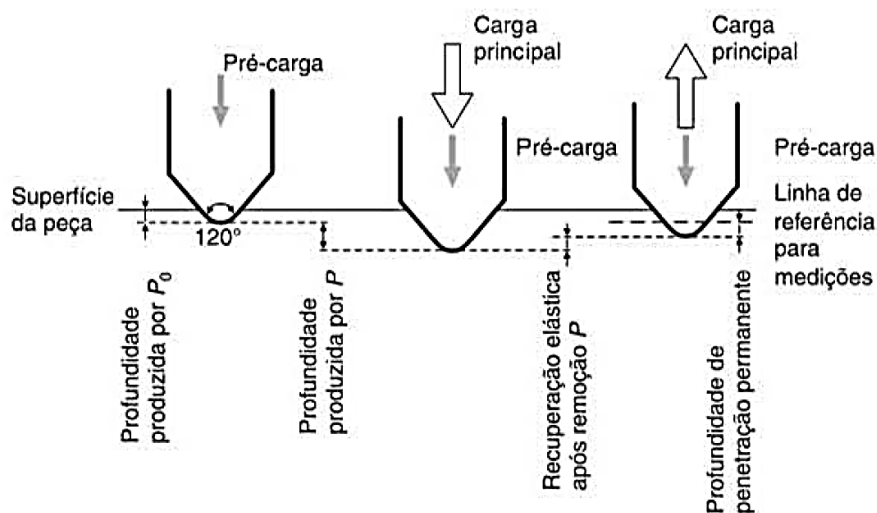


Figura 3.4 – Esquema do princípio do método Rockwell (Adaptado de GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

A aplicação da pré-carga é necessária para eliminar ação de quaisquer defeitos superficiais e auxiliar na fixação do corpo de prova no suporte da máquina. Ainda possui a função de realizar uma pequena deformação permanente o suficiente para eliminar erros relacionados pela recuperação do material devido à deformação plástica. O ensaio de dureza Rockwell comum utiliza uma pré-carga de 3 ou 10 kgf e uma força total de 60 kgf, 100 kgf ou 150 kgf (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

### 3.8.2 Ensaio de tração

Por sua facilidade de simulação e reprodução de dados, o ensaio de tração é considerado como o ensaio com maior importância, dentre todos os outros. Este ensaio consiste na aplicação de uma força em um único sentido de eixo, o material então é submetido a um esforço que tende a estica-lo e alonga-lo, geralmente até o ponto de ruptura. Normalmente o ensaio é executado em um corpo de prova padronizado com medidas específicas, para que seja possível comparar os resultados obtidos, bem como reproduzi-los (SOUZA, 1982).

Geralmente, o corpo de prova possui a seção transversal circular, toda via, em alguns casos a seção é retangular. A configuração do corpo de prova se assemelha a um “osso de cachorro”, esse formato foi escolhido para que durante o teste, a deformação fique retida à

região central, reduzindo a ameaça de ocorrer fraturas nas extremidades (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

O ensaio de tração é realizado por um equipamento programado para esticar o corpo de prova a uma taxa constante, no mesmo momento, ele mede a carga instantânea que está sendo aplicada com uma célula de carga e mede também os alongamentos resultantes utilizando um extensômetro. Este tipo de ensaio leva alguns minutos para ser finalizado, além disso, ele é destrutivo, ou seja, o corpo de prova usado será deformado permanentemente, podendo ser levado a fratura. O resultado deste tipo de ensaio é geralmente registrado em um computador, por meio da apresentação de um gráfico com a carga ou força em função do alongamento (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

A Figura 3.5 exibe uma representação esquemática do ensaio de tração.

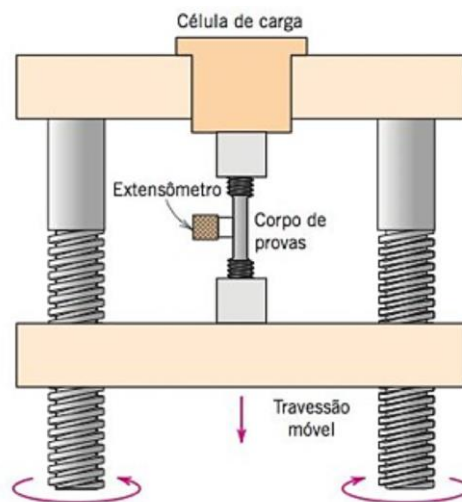


Figura 3.5 - Representação esquemática do ensaio de tração (Adaptado de CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Conforme Souza (1982), o corpo de prova para o ensaio de tração pode dispor da sua parte útil com uma secção circular ou retangular, de acordo com a forma e tamanho do produto do qual ele foi retirado. A secção retangular é indicada para corpos de provas retirados de placas, chapas ou lâminas, a espessura será igual à do material, secções circulares são adequadas para produtos circulares ou irregulares, ou ainda, que possua uma espessura muito grande. A Figura 3.6 exemplifica o formato dos corpos de prova com secções retangulares e circulares.



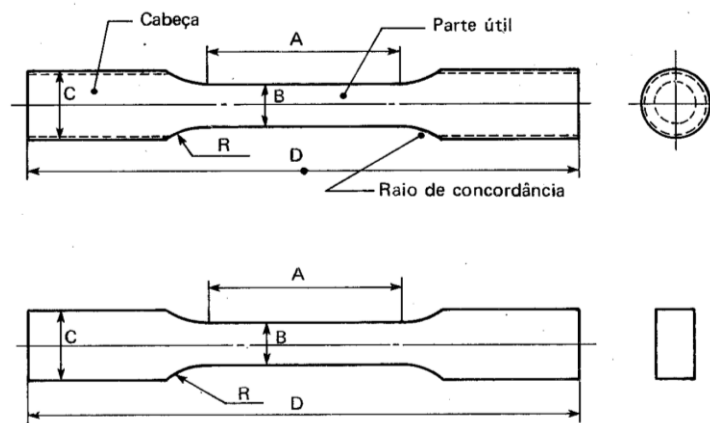


Figura 3.6 – Corpos de prova para ensaio de tração (Adaptado de SOUZA, 1982).

No corpo de prova, é denominada como parte útil a região onde são realizadas as medidas das propriedades mecânicas. A porção nomeada de cabeça é destinada a fixação na máquina, de acordo com o tipo de garra da máquina a cabeça pode ser rosqueada (SOUZA, 1982).

Conforme Garcia, Spim e Santos (2012), por meio deste ensaio é possível encontrar uma curva, conhecida com curva tensão-deformação, por meio dela é possível analisar diversas propriedades mecânicas dos materiais, como os limites de escoamento e de resistência à tração, o grau de deformação e o tipo de fratura que ocorreu.

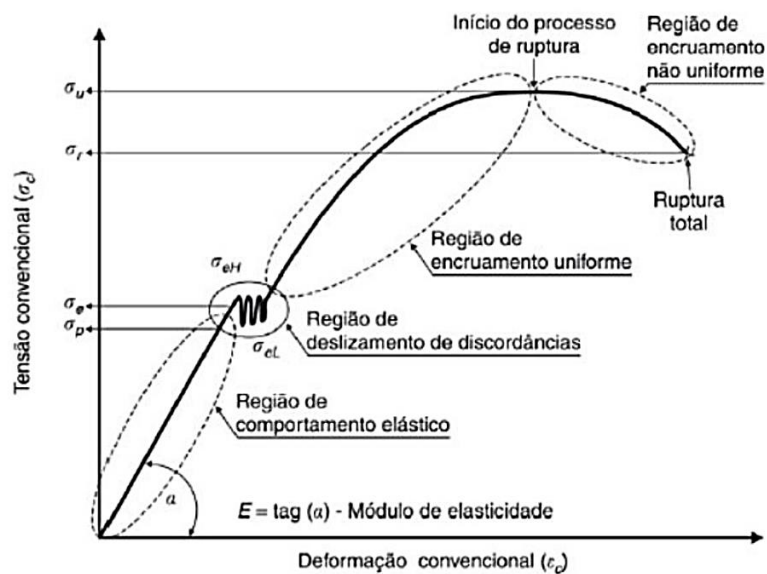


Figura 3.7 – Curva tensão-deformação convencional (Adaptado de GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

A Figura 3.7 apresenta um esboço da curva tensão-deformação, nela é apontada quatro regiões de comportamentos distintos, cada região é definida por uma determinada tensão, algumas delas são determinantes de propriedades mecânicas (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Exibida no começo da curva, a região de comportamento elástico, é definida como tensão proporcional ou limite de proporcionalidade, ela é a tensão máxima até a qual existe uma relação linear entre tensão e deformação, ela estabelece o limite de deformação elástica. A segunda parte, região de deslocamento de discordâncias, representa a tensão de escoamento ou limite de escoamento, é compreendida como a tensão de início da deformação plástica. A terceira parte, região de encruamento uniforme, representa a tensão máxima ou limite de resistência a tração, é a tensão máxima que o material suporta sem nenhuma forma de ruptura. A última parte, região de encruamento uniforme, representa a tensão de ruptura, ou seja, é a tensão onde ocorre a fratura (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

### 3.8.3 Ensaio de metalografia

O ensaio de microestrutura é definido com um exame dos elementos estruturais e defeitos de um material que influenciam suas propriedades. Os metais são constituídos de estruturas cristalinas chamadas de grãos, normalmente estes grãos possuem tamanhos microscópios, sendo observados apenas com auxílio de um microscópio. Este ensaio porta grande relevância, visto que, por meio dele é possível certificar as associações entre as propriedades dos materiais e a estrutura, sendo entendidas da forma correta, além de contribuir positivamente no projeto de ligas com novas propriedades, pode determinar se um material recebeu um tratamento térmico de forma correta, investigar o tipo de fratura mecânica, entre outros benefícios (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Os ensaios metalográficos podem ser divididos em dois tipos de avaliação, a da macroestrutura e microestrutura, em ambos os casos é encontrado um problema recorrente, pois as técnicas de análise disponíveis permitem uma visualização bidimensional de uma estrutura que possui característica tridimensional. Sendo assim, deve-se tomar cuidados especiais que permitam o estudo adequado, partindo desde a seleção das seções estudadas até a avaliação criteriosa dos resultados obtidos (COLPAERT, 2008).

Segundo Colpaert (2008), o exame do aspecto de uma peça ou amostra é chamado de macrografia, para tal, a seção deve ser plana e estar polida, sofrendo na maioria das vezes ataque químico por um reagente adequado. O resultado deste processo é nomeado de macroestrutura, sua análise é realizada ao olho nu ou com o auxílio de uma lupa.

A análise micrográfica pode ser realizada através diversas técnicas, o modo de preparação e execução é em sua grande maioria idêntica, a microscopia eletrônica de varredura consegue examinar seções quase se nenhuma preparação, sendo muito utilizada na análise de falhas. Outras técnicas requerem métodos específicos na preparação das amostras, a microscopia eletrônica de transmissão é um exemplo deste caso (COLPAERT, 2008).

A microscopia ótica é a técnica mais utilizada dentre todas as disponíveis, os resultados são obtidos por meio da aplicação de luz sobre a amostra, sendo refletida e visualizada no microscópio ótico. Para uma perfeita visualização, a amostra deve estar totalmente plana, polida, atacada de forma correta e deve estar absolutamente perpendicular ao eixo ótico quando for feita a observação (COLPAERT, 2008).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A concepção deste trabalho exigiu a realização de vários procedimentos, desta forma, para facilitar a visualização do mesmo como um todo foi elaborado um fluxograma resumindo todas as atividades realizadas. O fluxograma pode ser visualizado na Figura 4.1.

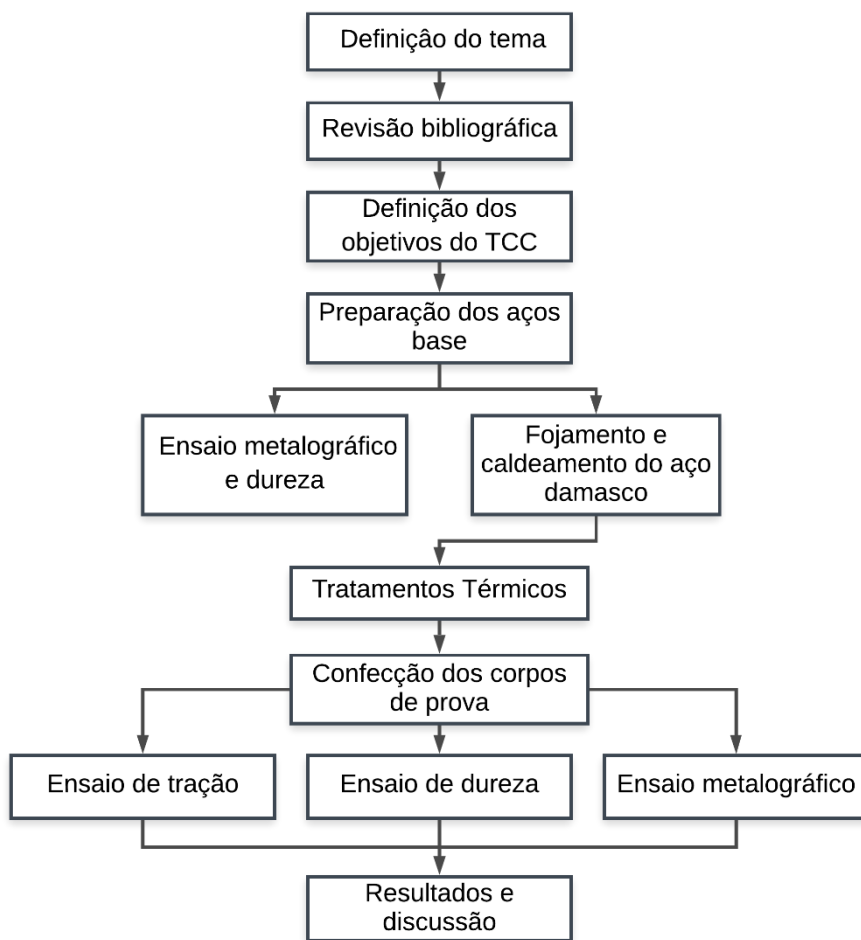


Figura 4.1 – Fluxograma das atividades realizadas.

Este estudo baseia-se na produção de um protótipo de aço damasco através de duas ligas metálicas distintas, o aço carbono SAE 1095 e a liga UHB 15n20. Posteriormente, análises e ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalografia – LABEMM, da Universidade Estadual do Maranhão.

### 4.1 Produção do aço damasco

O aço damasco foi produzido a partir do caldeamento de dois aços com propriedades distintas, neste trabalho utilizou-se para a produção do segundo protótipo 3 chapas do aço carbono SAE 1095 com as dimensões de 50 x 50 mm, com espessura de 3 mm e 4 chapas de 50 x 50 mm com 1,5 mm de espessura da liga UHB 15n20. Sobrepostas de forma alternada, uma placa de aço SAE 1095, para duas placas de aço UHB 15n20, devido a diferença de espessura entre elas. As chapas passaram por uma limpeza da superfície utilizando lixas abrasivas de SiC de granulometria #150, para a retirada de qualquer resíduo e deformidade que estivesse sobre as mesmas. A Figura 4.2 apresenta as chapas limpas em suas medidas finais.

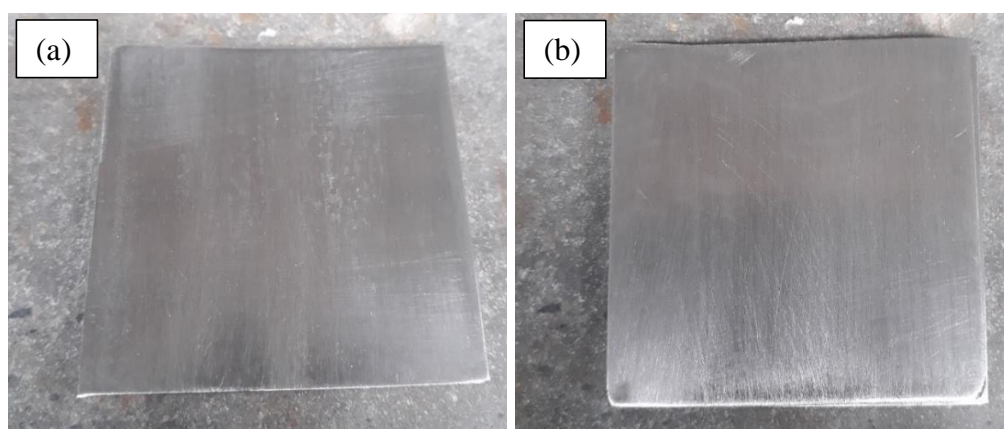


Figura 4.2 – (a) Aço UHB 15n20, (b) Aço SAE 1095.

A quantidade e medidas das chapas aplicadas no segundo protótipo foram escolhidas devido a um problema encontrado no primeiro protótipo, onde se utilizou 3 chapas de aço SAE 1095 com medidas de 100 x 50 mm e 6 chapas da liga UHB 15n20 medindo 100 x 50 mm. O primeiro protótipo detinha as medidas finais de 100 x 50 mm e espessura de 18 mm. Porém, devido à baixa capacidade da prensa, 15 toneladas, a compressão do billet foi malsucedida, com pouca redução, desta forma o caldeamento não foi possível. O primeiro billet montado pode ser visualizado na Figura 4.3.



Figura 4.3 – Primeiro protótipo confeccionado.

Após a intercalação das chapas, foram realizadas soldas nas laterais para que não ocorresse escorregamentos durante o processo de compressão. Após a soldagem, removeu-se as rebarbas da solda, deixando a superfície homogênea para a acomodação na prensa hidráulica. O segundo billet confeccionado continha 5 camadas e as seguintes dimensões: 50 x 50 mm e espessura de 15 mm. A Figura 4.4 apresenta o billet depois da realização da solda de segurança e com as rebarbas desbastadas. O desbaste foi efetuado em um moto esmeril de bancada, modelo GYME3600 da Hammer.



Figura 4.4 – Segundo protótipo confeccionado.

A etapa de forjamento e caldeamento envolveu a manipulação do billet em altas temperaturas, foi necessário a utilização de EPI's (Equipamentos de Proteção Individual) para os operadores envolvidos na produção. Avental de raspa, luvas de couro e protetor facial foram utilizados por todos os operadores, além da utilização de tenaz para manusear a peça aquecida.

O aquecimento do billet foi realizado com a utilização de um forno mufla da marca Quimes pertencente ao Laboratório de Ensaio Mecânicos e Metalografia – LABEMM da Universidade Estadual do Maranhão. Elevou-se a temperatura do billet à aproximadamente 1200 °C.



Figura 4.5 – Forno do tipo mufla.

Durante o processo de aquecimento foi aplicado o fluxo de solda, o ácido bórico, deixando todas as superfícies completamente cobertas pelo produto. Esta etapa foi realizada antes do material atingir a temperatura aproximada de 700 °C. A Figura 4.6 apresenta o billet com a adição do ácido bórico.



Figura 4.6 – Billet com adição de ácido bórico.

Para a verificação da temperatura nesta etapa utilizou-se a relação de cor x temperatura, exemplificada pela Figura 4.7. Desta forma, ocorreu a adição do fluxo de solda ao se notar uma coloração próxima ao marrom claro.

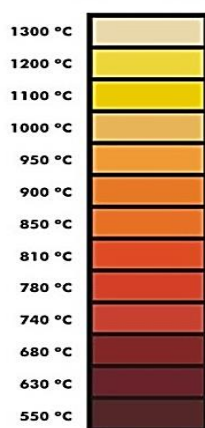


Figura 4.7 – Tabela de cores indicativa para aço aquecido (Adaptado de TECNOHARD, 2011).

A prensagem foi realizada através de uma prensa hidráulica com capacidade total de 15 toneladas, modelo MPH-15C da Marcon (Figura 4.8), pertencente ao Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalografia – LABEMM da Universidade Estadual do Maranhão. Para prevenir qualquer forma de acidente, limitou-se uma carga máxima de 13 toneladas.



Figura 4.8 – Prensa hidráulica (Fonte: autor).

Antes do processo se iniciar foi observado que a prensa não detinha as medidas adequadas para permitir a prensagem da peça após sua retirada do forno. Pois a distância do pistão até a base era grande, mesmo movimentando a alavanca de forma rápida, o tempo gasto



seria suficiente para o billet perder calor para ao ambiente. Algumas soluções foram levantadas e com alguns pedaços de tarugos encontrados no próprio laboratório foi possível diminuir o espaço entre o pistão e o billet. Porém notou-se que a parte do pistão que entraria em contato com a peça detinha um formato circular, o que proporcionaria uma compressão pontual.

Desta forma, foram feitas algumas adequações para permitir uma prensagem uniforme, para tal, fabricou-se uma matriz, uma chapa de aço com 200 x 200 mm e 10 mm de espessura. Essa chapa era posicionada sobre o billet após a retirada do forno, permitindo a distribuição da força sobre toda a superfície do billet.

A etapa da prensagem ocorria da seguinte forma:

1. O billet foi retirado do forno com o auxílio de um tenaz (Figura 4.9 (a));
2. O billet foi posicionado acima do tarugo maior (Figura 4.9 (b));
3. A matriz foi posicionada acima do billet (Figura 4.10 (a));
4. Um tarugo menor foi posicionado sobre a matriz (Figura 4.10 (b));
5. Por último, a prensa foi acionada com movimentos rápidos;

Vale ressaltar que a ponta do pistão foi posicionada um pouco abaixo do seu local de origem, deixando apenas o espaço necessário para o encaixe do billet, da matriz e do tarugo menor. Todos os passos descritos de 1 a 5 ocorriam em torno de 10 a 15 segundos.

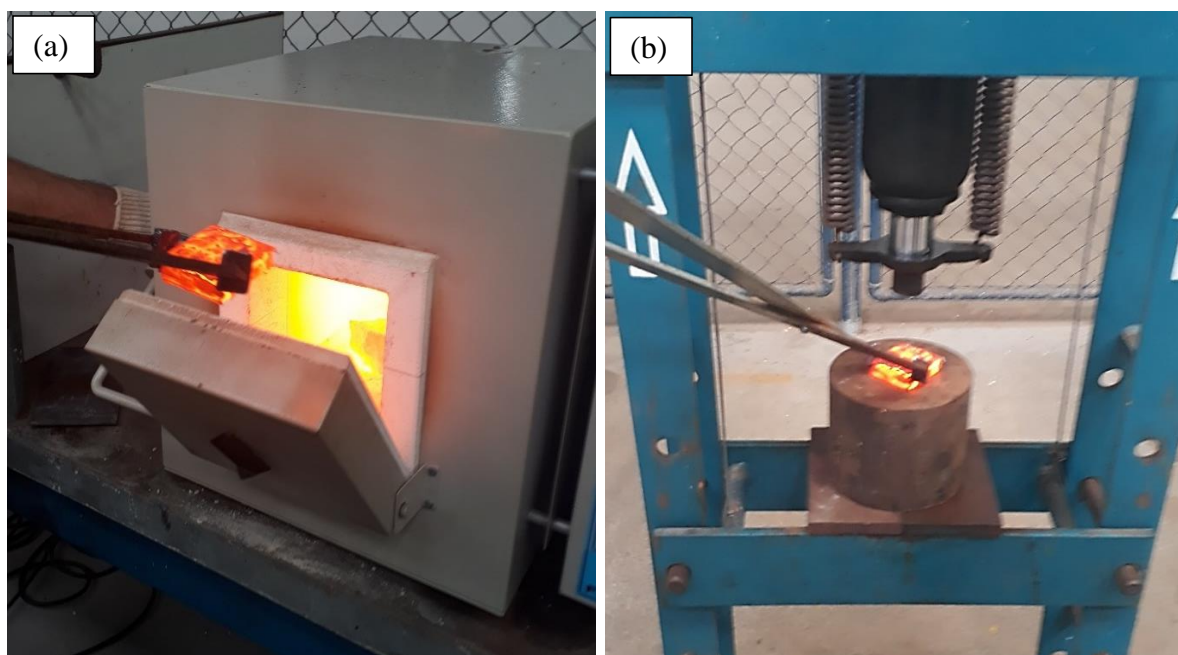


Figura 4.9 – (a) Retirada do billet do forno; (b) Posicionamento do billet.

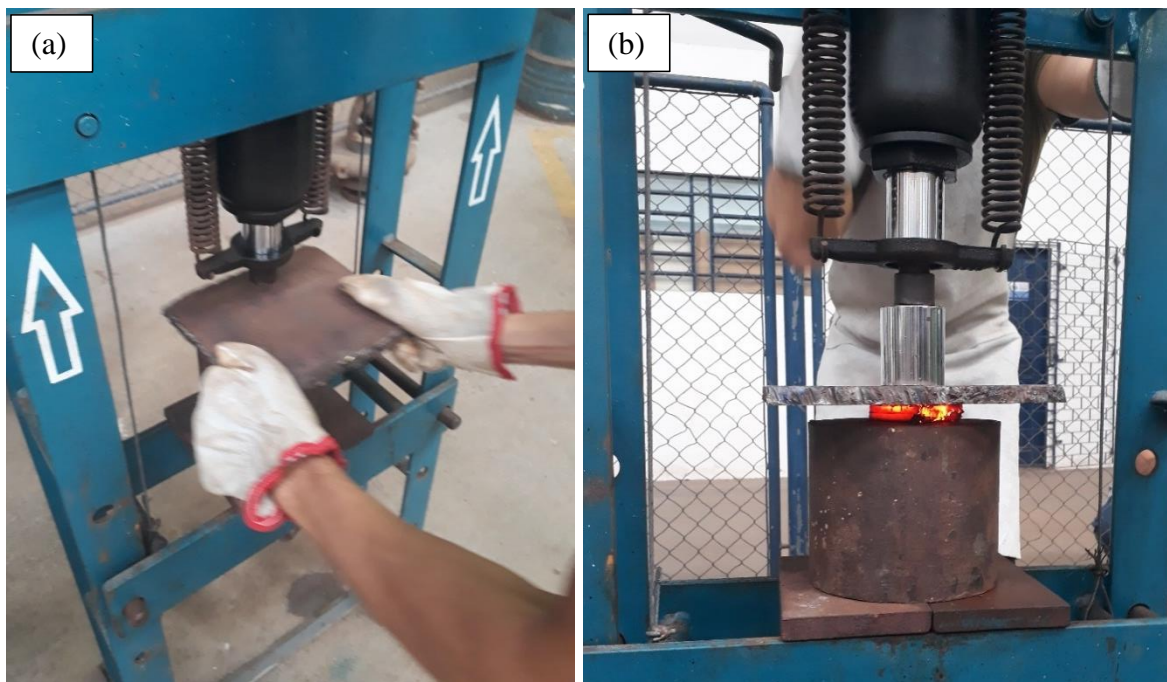


Figura 4.10 – (a) Posicionamento da matriz confeccionada; (b) Compressão do billet.

Assim que se notava o escurecimento da peça, ou seja, a queda brusca de temperatura, retirava-se o billet da prensa levando-o ao forno. O billet permanecia de 15 a 20 minutos no forno e se repetia todo processo de prensagem, ao todo foram realizadas 15 compressões.

Ao final do processo de forjamento e caldeamento, o billet, que antes detinha as dimensões de 50 x 50 mm e 15 mm de espessura, terminou com 55 x 55 mm e 8 mm de espessura, desta forma houve uma redução de 37 % em relação a quantidade de material. A Figura 4.11 apresenta o aço damasco pronto, ainda com resíduos de óxido de ferro provenientes do forjamento e caldeamento.



Figura 4.11 – Aço damasco.

Todas as etapas referentes a produção do aço damasco foram realizadas no Laboratório de Usinagem – LABUSI da Universidade Estadual do Maranhão.

## 4.2 Realização dos tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalografia – LABEMM da Universidade Estadual do Maranhão utilizando forno mufla da marca Quimes, seguindo as orientações encontradas na literatura.

### 4.2.1 Normalização

A normalização é um tratamento térmico utilizada por possui a finalidade de regular o tamanho do grão e deixar a estrutura uniforme, indicada principalmente para aços após o forjamento, além de possuir a função de preparar o material para outros tratamentos térmicos. Por estes motivos, a normalização foi o primeiro tratamento realizado.

Antes do tratamento, o aço damasco recém forjado passou por um processo de desbaste da sua superfície usando um moto esmeril de bancada, modelo GYME3600 da Hammer pertencente ao Laboratório de Usinagem – LABUSI da Universidade Estadual do Maranhão, e posterior acabamento utilizando lixas abrasivas de SiC de granulometria #150. Este processo de desbaste foi necessário devido a irregularidade encontrada em toda a superfície e nas laterais do aço damasco, deixando-o com 52 x 52 mm e 6 mm de espessura. A Figura 4.12 apresenta o aço damasco após a retirada dos resíduos de óxido de ferro, nela é visível a irregularidade na superfície e laterais.



Figura 4.12 – Aço damasco após retirada do óxido de ferro.

O autor Chiaverini (2005) define a temperatura de 825 °C para a normalização, levando em consideração o aço SAE 1095, pois este representa a maior parte do aço damasco. A peça foi aquecida até temperatura determinada pela literatura, permanecendo no interior do forno por 30 minutos e em seguida foi resfriada ao ar livre.

#### 4.2.2 Têmpera

A têmpera apresenta como objetivo aumentar a dureza do material tratado, o aço damasco como foi dito anteriormente é usado largamente na indústria da cutelaria, normalmente a dureza dos aços empregados na fabricação de laminas em geral apresentam uma dureza elevada. Desta forma optou-se pela aplicação da tempera no aço damasco em estudo.

Novamente utilizando-se o aço base SAE 1095 como parâmetro para encontrar a temperatura usual para este tipo de tratamento, foi determinada a temperatura de aquecimento para 800 °C. O aço teve sua temperatura elevada até 800 °C, permanecendo no forno por volta de 30 a 40 minutos, depois recebeu uma têmpera média em água comum com movimentos circulares e lentos.

#### 4.2.3 Revenimento

O revenimento foi um tratamento utilizado logo após a têmpera, por sua principal funcionalidade de aliviar as tensões residuais provocadas pela têmpera. Colpaert (2008) afirma que a menor redução da dureza pelo revenimento ocorre na faixa de temperatura de 100° a 300° C, desta forma optou-se por uma temperatura intermediária para que não ocorresse uma queda brusca desta propriedade.

O revenimento foi realizado com uma temperatura de 200 °C, ela foi mantida constante por uma (1) hora, e em seguida o material foi resfriado em temperatura ambiente.

### 4.3 Ensaio de dureza

Aços empregados na cutelaria normalmente possuem uma dureza elevada, para a comprovação de que o aço damasco fabricado atingiu altos patamares em termos de dureza, se fez necessário o ensaio de dureza após todos os tratamentos térmicos.

O ensaio de dureza Rockwell foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalografia – LABEMM da Universidade Estadual do Maranhão utilizando o durômetro Rockwell RBS-M da marca Pantec, mostrado na Figura 4.13, seguindo as especificações da norma ASTM E18-15.



Figura 4.13 – Durômetro Rockwell (Fonte: autor).

O método de ensaio adotado foi o método Rockwell C com um penetrador cônico de diamante com conicidade de  $120^\circ$ . Neste ensaio primeiramente foi aplicado uma pré-carga de 3 kgf e em seguida liberada a carga total de 100 kgf. Após alguns segundos a carga foi retirada e a leitura foi feita na escala externa do mostrador, de cor preta.

A leitura foi realizada em 11 pontos espaçados de 4 em 4 mm, corpo de prova demonstrado na Figura 4.14.

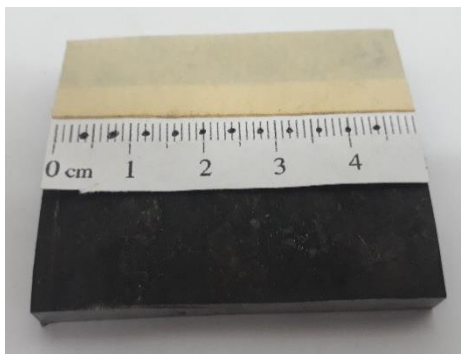


Figura 4.14 – Corpo de prova do aço damasco.

O ensaio também foi realizado no o aço SAE 1095 e na liga UHB 15n20. A leitura foi realizada da mesma forma, 12 pontos espaçados de 5 em 5 mm, corpos de prova demonstrados na Figura 4.15.



Figura 4.15 – Corpos de prova dos aços base.

#### 4.4 Ensaio metalográficos

A preparação das amostras para os ensaios metalográficos requerem cuidados especiais, que vão desde o corte até o ataque realizado com um reagente químico. Além dos cuidados empregados na preparação das amostras, deve-se tomar medidas protetivas em relação ao uso das máquinas utilizadas no processo e o manuseio dos produtos químicos envolvidos no ataque de revelação da microestrutura. Os EPI's (Equipamento de Proteção Individual) necessários são: óculos de proteção, jaleco, máscara de proteção respiratória e luva de látex.

Todos os procedimentos que envolvem o ensaio de microestrutura foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos e Metalografia – LABEMM da Universidade Estadual do Maranhão.

Foram preparadas 5 amostras, sendo 2 amostras para os aços base Sae 1095 e UHB 15n20 como foi recebido. Outras 3 para o aço damasco, sendo uma para o aço logo após o forjamento e caldeamento, outra depois do tratamento de normalização e a última para o damasco depois da têmpera e revenimento

#### 4.4.1 Cortes das amostras

Para o corte das amostras foi utilizado a cortadora metalográfica Arocor 40 da Arotec, apresentada na Figura 4.16. O procedimento inicia-se com a devida fixação do material e escolha adequada do disco de corte necessário, para os aços base se utilizou um disco de corte indicado para durezas acima de 35 HRC, para o aço damasco finalizado foi preciso um disco para durezas acima de 65 HRC.



Figura 4.16 – Cortadora metalográfica Arocor 40 da Arotec (Fonte: autor).

A profundidade do corte foi controlada manualmente por uma alavanca, é essencial tomar cuidado para que o material não sofra aquecimento excessivo, para tal, a seção cortada foi refrigerada continuamente por um jato de líquido refrigerante. O aquecimento exagerado pode resultar em transformações microestruturais na superfície, que posteriormente será analisada.

#### 4.4.2 Embutimento das amostras

As amostras utilizadas no ensaio de microestrutura geralmente possuem pequenas dimensões, dificultando os processos necessários para deixá-las planas e polidas. Por isso, foi necessário ser realizado um procedimento conhecido como embutimento. Para este processo foi utilizado a embutidora metalográfica EM30D da Teclago (Figura 4.17).

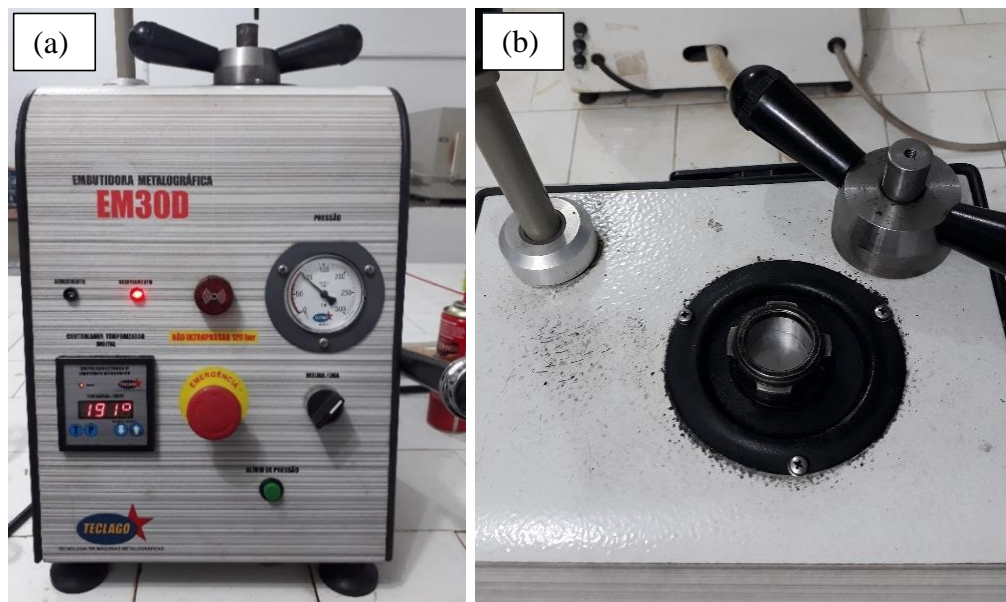


Figura 4.17 – (a) Embutidora metalográfica, (b) Vista superior da embutidora.

O processo de embutimento consiste em envolver a amostra com um polímero de condensação extremamente resistente chamado de baquelite. Na parte superior da máquina existe um local destinado ao posicionamento da amostra (Figura 4.16 (b)). Primeiro coloca-se a amostra e depois se preenche com baquelite, após isso, ocorre a prensagem por um êmbolo devidamente fixado.

A transformação do baquelite ocorreu no interior da máquina em altas temperaturas e pressão. Por motivos de segurança a pressão foi mantida entre 100 a 120 bar, quando atingiu a temperatura aproximada de 190 °C o resfriamento foi iniciado, após o alívio de pressão a amostra estava pronta (Figura 4.18) para o lixamento e polimento.



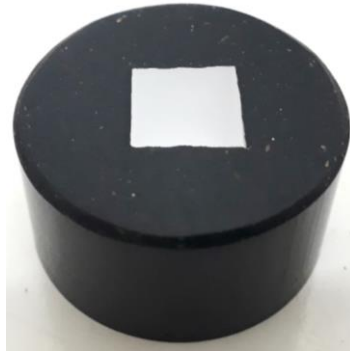


Figura 4.18 – Amostra embutida.

#### 4.4.3 Lixamento e polimento das amostras

Para o processo de lixamento e polimento das amostras utilizou-se a Politriz/lixadeira Aropol 2V da Arotec (Figura 4.19). As amostras devem estar livres de imperfeições no final do procedimento, por este motivo essa etapa leva bastante tempo para ser concluída.



Figura 4.19 – Politriz/lixadeira Aropol 2V da Arotec.

O lixamento foi realizado com 7 lixas abrasivas de SiC com granulometria de #80, #100, #220, #320, #400, #600 e #1200 (Figura 4.20). Em relação as lixas, quanto menor a granulometria, maior será os riscos residuais no final do lixamento.



Figura 4.20 – Lixas abrasivas de SiC.

Foi utilizado um jato de água como líquido refrigerante durante todo o processo. As lixas foram trocadas sempre que a superfície da amostra apresentava apenas as marcas provenientes da lixa usada no momento, sempre que havia a troca, a amostra sofria uma rotação de 90° para facilitar a retirada das marcas da lixa anterior.

O polimento foi realizado com a finalidade de eliminar todas as marcas residuais da última lixa, ou seja, deixar a superfície da amostra totalmente polida, parecendo um espelho. Foi utilizado neste processo um pano especial fabricado unicamente para este tipo de tarefa com a adição de um abrasivo.

O processo foi realizado com o auxílio da politriz/lixadeira. O pano de polimento foi fixado e nele foi adicionado alumina em suspensão N° 4 de granulometria 1  $\mu\text{m}$  da Skill-Tec. Em espaços de tempo as amostras eram limpas com álcool etílico e secas com um jato de ar quente afim de verificar a qualidade do polimento.

A amostra deve ter sua superfície livre de qualquer resíduo de alumina, então, após a limpeza com álcool etílico as amostras passaram por uma limpeza ultrassônica complementar, através da lavadora ultrassônica UltraCleaner 800 da Unique (Figura 4.21).

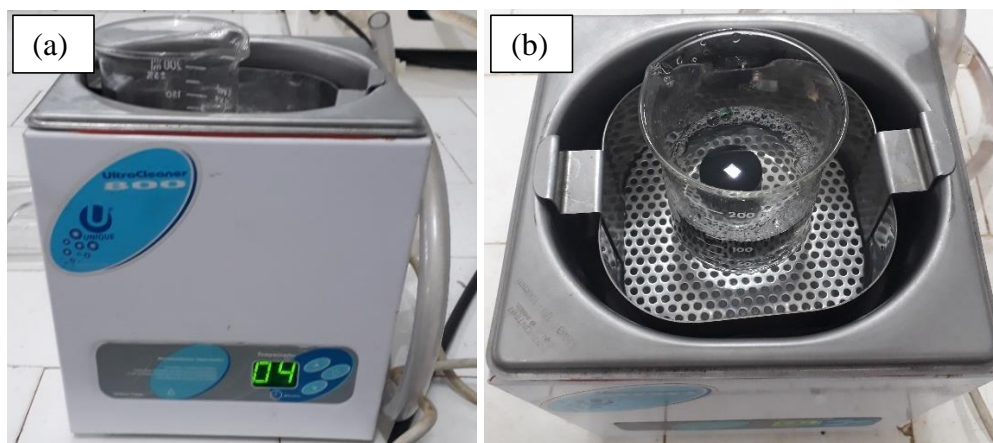


Figura 4.21 – (a) Lavadora ultrassônica, (b) Realização da limpeza.

A limpeza ultrassônica ocorre através da cavitação, limpando as impurezas existentes na superfície e até em áreas microscópicas de difícil acesso. Esse fenômeno de limpeza é explicado com base na criação de bolhas geradas pelo contato entre a água, a solução de limpeza e a frequência do ultrassom, que implodem e criam um vácuo retirando as impurezas (TAVARES, 2019).

#### 4.4.4 Ataque químico e análise microestrutural

Todos os ataques foram realizados com ácido nítrico a 2%, ou seja, para cada 100 ml, 98 ml são de álcool etílico e 2 ml são de ácido nítrico. É listado na Tabela 4.1 o tempo de ataque necessário para cada tipo de material.

Tabela 4.1 – Tempo necessário de ataque para cada amostra.

<b>Material</b>	<b>Condição</b>	<b>Tempo de ataque (segundos)</b>
SAE 1095	Recebido	24 s
UHB 15n20	Recebido	23 s
Aço damasco	Após forjamento e caldeamento	15 s
Aço damasco	Após a normalização	15 s
Aço damasco	Após têmpera e revenimento	14 s

Após o ataque químico a peça era imediatamente lavada em água corrente, seguida de álcool etílico para paralisar o processo de corrosão, sua secagem era feita com um jato de ar quente. O tempo foi ajustado para cada material, primeiramente se atacava por alguns segundos e observava a microestrutura no microscópio, se a revelação fosse insuficiente a amostra era mergulhada novamente no ácido até que fosse possível verificar a microestrutura de cada amostra.

Todas as amostras passaram em média por quatro tentativas antes que se fosse possível acertar o tempo correto de ataque, para cada tentativa malsucedida o processo de lixamento e polimento foi realizado novamente, porém o lixamento foi refeito apenas com as lixas de granulometria #400, #600 e #1200.

As amostras foram analisadas por microscopia óptica (Figura 4.22) no microscópio metalográfico da Micron Scientific. As imagens foram obtidas pela reflexão da luz em diversas regiões da amostra, revelando assim, a microestrutura.



Figura 4.22 –Análise da amostra com microscópio óptico (Fonte: autor).

#### **4.5 Ensaio de tração**

O ensaio de tração, mostrado na Figura 4.23, foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalografia – LABEMM da Universidade Estadual do Maranhão utilizando a máquina universal de ensaios DL 10000 da marca Emic.



Figura 4.23 – Realização do ensaio de tração.

A Figura 4.24 mostra as dimensões do corpo de prova, que foi usinado seguindo a norma ASTM A370 – 17a. Ele foi submetido a uma carga axial ao longo do seu comprimento. A resistência à tração foi calculada dividindo a carga máxima pela seção transversal do corpo de prova medido antes do ensaio.



Figura 4.24 – Corpo de prova para o ensaio de tração.

Segundo a norma ASTM A370 – 17a é permitido a preparação dos corpos de prova a partir de uma seção completa. Utilizou-se deste artifício para adequar o corpo de prova tanto para a máquina utilizada no ensaio quanto ao total de material disposto, apesar desta adequação foi possível usinar apenas um corpo de prova.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho foram utilizados dois aços distintos, o SAE 1095 e o 15n20, nas Tabela 5.1 e 5.2 são apresentadas as composições químicas destes materiais.

Tabela 5.1 - Composição química em porcentagem do aço SAE 1095 (Adaptado de GERDAU, 2003).

<b>Carbono (C)</b>	<b>Magnésio (Mg)</b>	<b>Fósforo (P)</b>	<b>Enxofre (S)</b>
0,9 a 1,03%	0,3 a 0,50%	0,03%	0,05%

Tabela 5.2 - Composição química da liga 15n20 (Adaptado de PÁTRIA, 2019).

<b>Carbono (C)</b>	<b>Manganês (Mg)</b>	<b>Silício (Si)</b>	<b>Níquel (Ni)</b>
0,72 – 0,78%	0,3 – 0,5%	0,15 – 0,35%	1,9 – 2,1%

A seguir serão apresentados todos os resultados obtidos nos ensaios de dureza, tração e análise microestrutural.

### 5.1 Ensaios metalográficos

#### 5.1.1 Materiais como recebido

O ensaio metalográfico foi realizado nos aços base como recebido com a finalidade de se verificar o estado microestrutural dos mesmos, desta forma, será possível avaliar se alguma mudança na microestrutura ou de propriedades está diretamente relacionado com características provenientes dos aços base, ou até mesmo justificar resultados de outros ensaios.

O fornecedor dos aços base empregados neste trabalho afirmaram que houve a realização de um tratamento térmico conhecido como recozimento, com o propósito de reduzir a dureza deixando o material sucessível ao processo de forjamento.

A microestrutura do UHB 15n20 como recebido apresentou cementita esferoidal sobre uma matriz ferrítica (Figura 5.1). É possível verificar uma microestrutura homogênea e refinada. Também é possível visualizar algumas inclusões, pontos maiores e mais escuros.

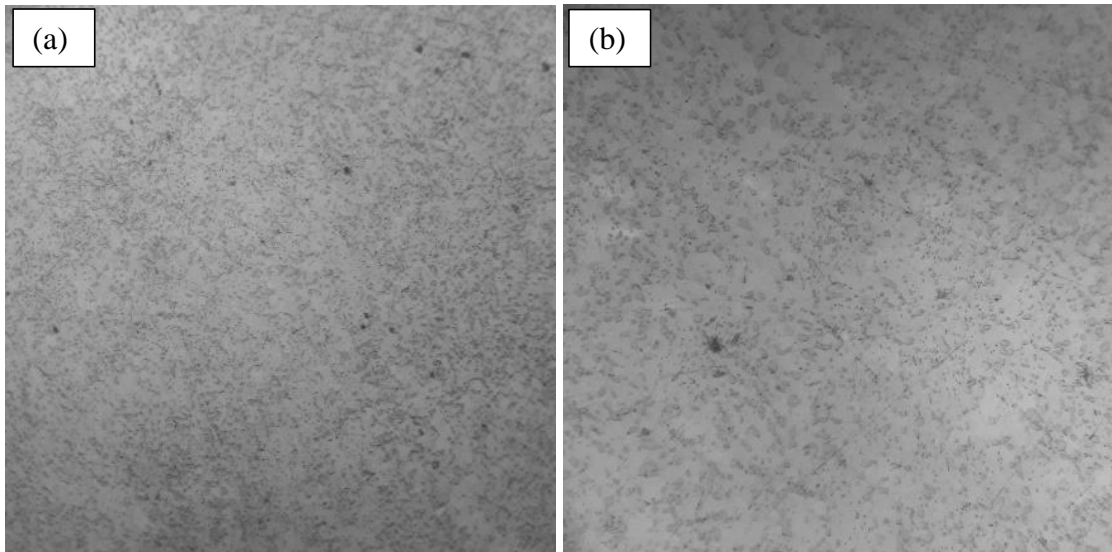


Figura 5.1 – Micrografias do aço UHB 15n20 como recebido em (a) 500X e (b) 1000X.

A Figura 5.2 apresenta a micrografia do aço 1095 como recebido, sua microestrutura mostra de forma evidente cementita esferoidal em matriz ferrítica, muito semelhante ao UHB 15n20, diferenciando-se pelo tamanho de grão, pois o 15n20 apresenta uma estrutura mais refinada. É justamente este refinamento da estrutura que o torna mais duro quando comparado ao 1095.

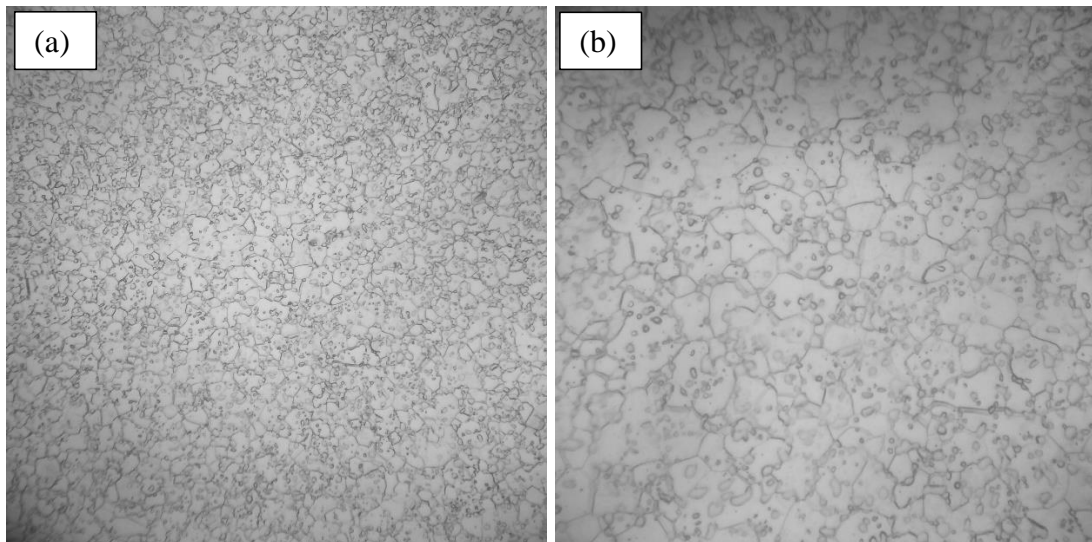


Figura 5.2 – Micrografias do aço SAE 1095 como recebido em (a) 500X e (b) 1000X.

Em ambos os casos foi confirmada a presença de cementita esferoidal, este tipo de microestrutura é encontrado em aços que passaram por um tratamento térmico com finalidade de melhorar a usinabilidade do mesmo, deixando-o mais fácil para se trabalhar. Um dos tratamentos indicados para este propósito é a esferoidização.

### 5.1.2 Aço damasco

O ensaio de metalografia foi realizado no aço damasco em três estágios, após o forjamento e caldeamento, após a normalização e depois da têmpera e revenimento com o objetivo de confirmar os efeitos na microestrutura em decorrência dos tratamentos térmicos.

#### 5.1.2.1 Aço damasco após o forjamento e caldeamento

No meio da Figura 5.3 (a) é visível uma linha escura, esta é a linha de caldeamento, ela apresenta essa coloração devido a contaminação por óxido de ferro durante o processo de caldeamento.

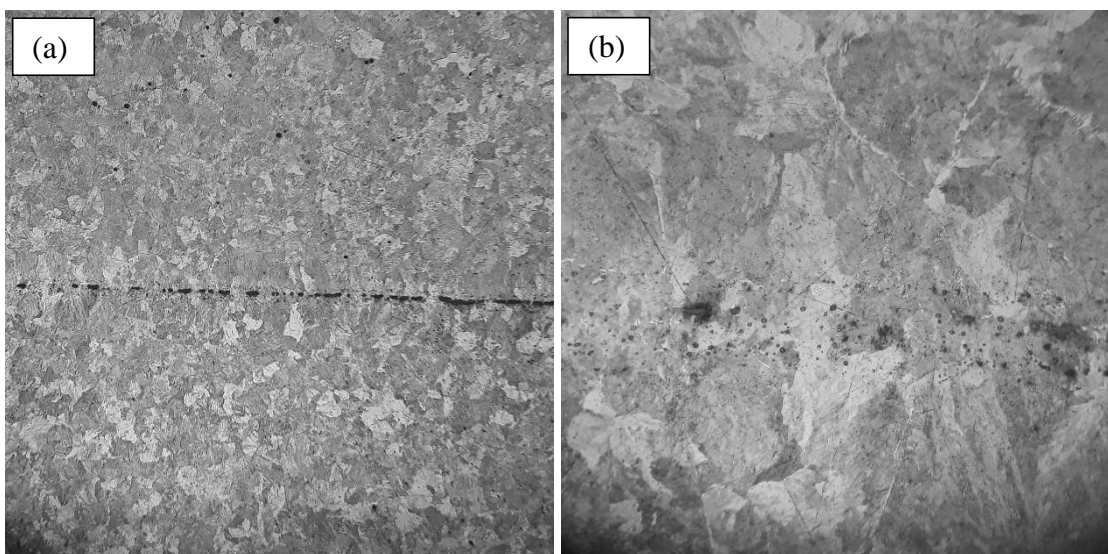


Figura 5.3 – Micrografias do aço damasco após o forjamento e caldeamento em (a) 200X e (b) 1000X.



A parte superior acima da linha de caldeamento (mais escura) é referente ao aço 1095, por ser considerado um aço hiperetetoide ele apresenta perlita e cementita. Os grãos mais escuros são referentes a perlita fina, aqueles mais claros são a perlita grossa, podemos identificar cementita nos contornos de grão na figura 5.3 (b).

A seção inferior, abaixo da linha de caldeamento, é referente ao aço 15n20, por ser um aço hipoeutetoide ele apresenta perlita e ferrita. Os grãos mais escuros são perlita fina, aqueles de coloração intermediária são a perlita grossa e os mais claros a ferrita.

Na Figura 5.3 (b) com ampliação de 1000X é possível verificar detalhadamente essa linha, percebe-se que o caldeamento ocorreu com sucesso, apresentando, no entanto, inclusões de óxido de ferro.

#### 5.1.2.2 Aço damasco após a normalização

As micrografias do aço damasco normalizado (Figura 5.4) comprovam a homogeneização dos grãos de perlita. Pois a perlita grossa deu lugar a perlita fina, apresentando somente perlita fina (grãos escuros) e ferrita (grãos claros). A figura 5.4 mostra a linha de caldeamento entre duas placas do 15n20, ou seja, nesta imagem podemos ver apenas um material, desta forma fica evidente a sua diferença com o aço 1095, encontrado na figura 5.3.

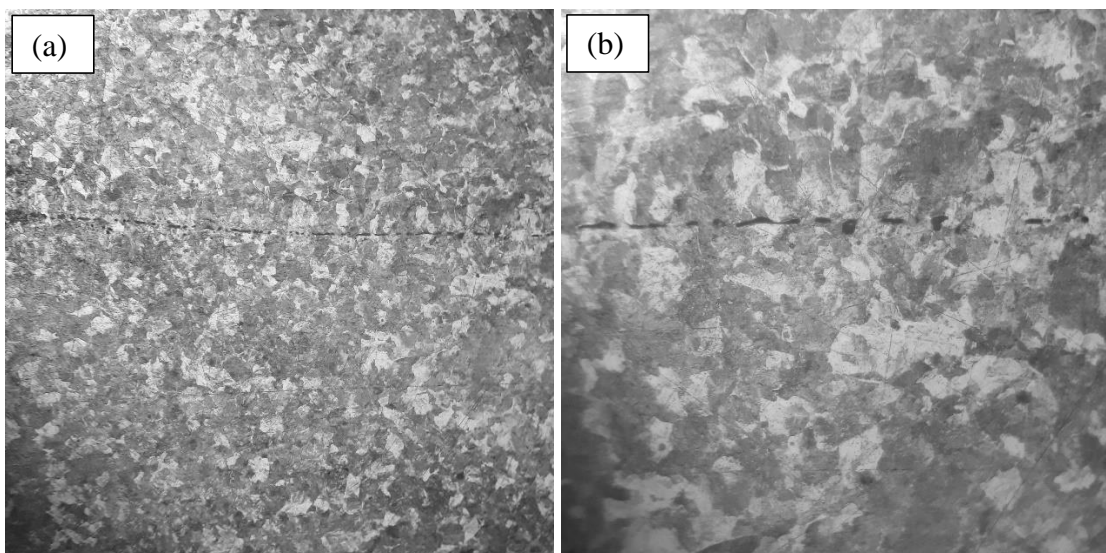


Figura 5.4 – Micrografias do aço damasco após a normalização em (a) 200X e (b) 500X.

### 5.1.2.3 Aço damasco após a têmpera e revenimento

A Figura 5.5 apresenta a micrografia do aço damasco temperado e revenido. Nela encontra-se martensita lenticular e austenita retida. A parte superior da Figura 5.5 (a) é referente a liga 15n20, nela encontra-se uma maior concentração de austenita retida (pontos com coloração mais clara) do que a parte inferior (aço SAE 1095).

Este resultado não se mostrou satisfatório, pois não foi possível notar através da microscopia ótica qualquer efeito causado pelo revenimento.

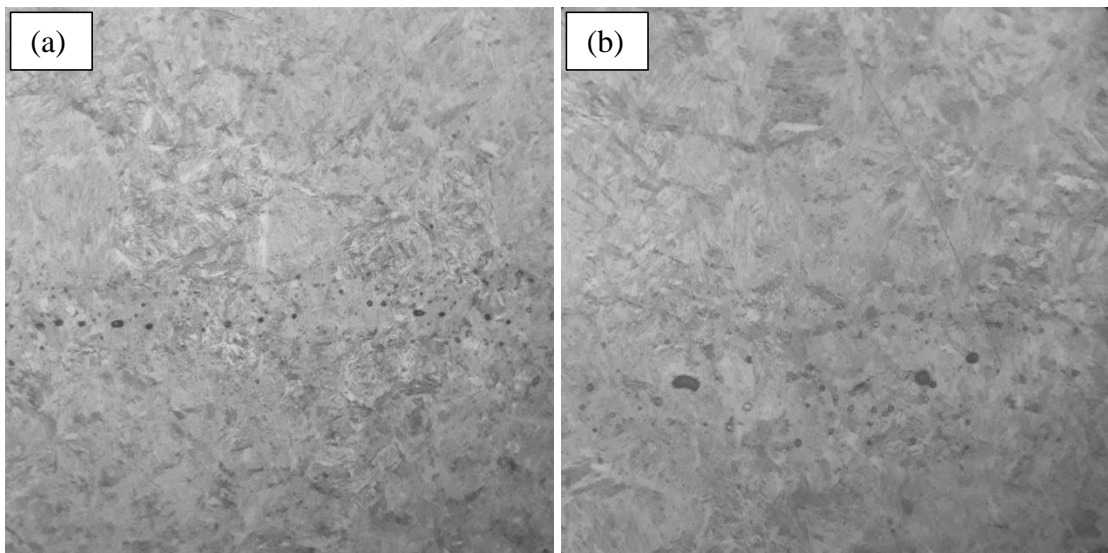


Figura 5.5 – Micrografias do aço damasco após a têmpera e revenimento em (a) 500X e (b) 1000X.

## 5.2 Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza foram realizados com a finalidade de avaliar a melhoria desta propriedade após o processo de fabricação e dos tratamentos térmicos. As medições foram realizadas nos aços base como recebidos e no aço damasco finalizado. A Figura 5.6 ilustra os resultados obtidos em cada ponto medido ao longo da seção transversal dos corpos de prova de cada material.

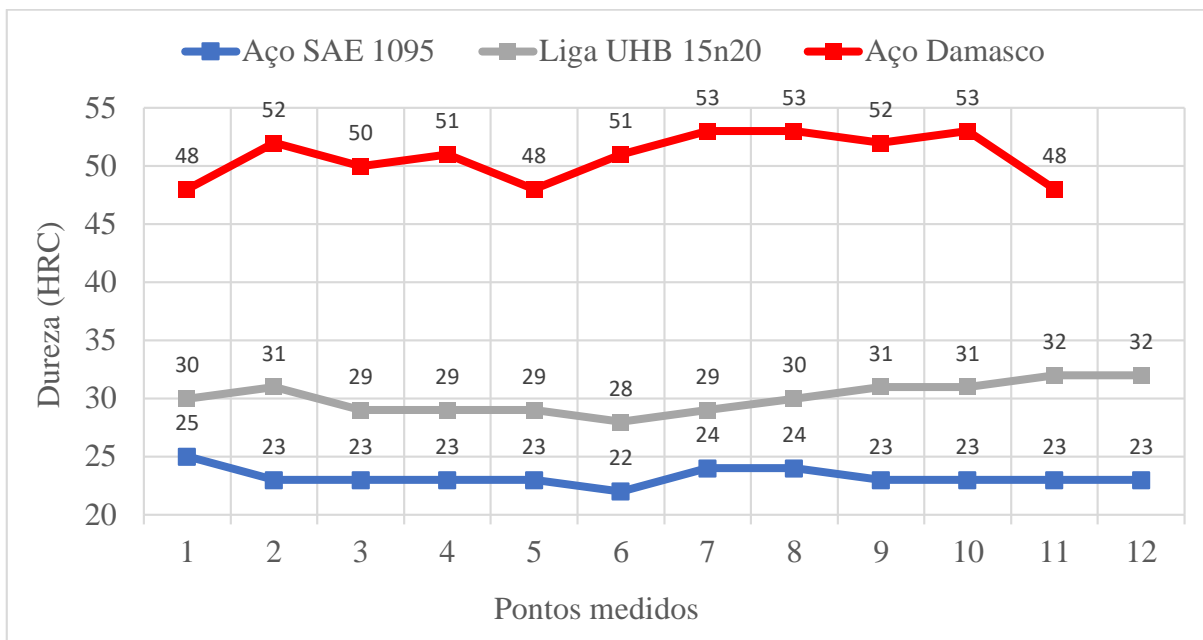


Figura 5.6 – Gráfico da distribuição da dureza na seção transversal dos corpos de prova.

Os valores médios de dureza de cada material podem ser observados na Tabela 5.3 e Figura 5.7. Percebe-se pela Tabela 5.3 e Figura 5.7 que a dureza final do aço damasco é muito superior se comparado as durezas dos aços base. Este resultado já era esperado, pois o aço damasco passou por um tratamento térmico que visava a melhoria desta propriedade, portanto, o tratamento da têmpera apresentou um resultado satisfatório.

Tabela 5.3 – Médias de dureza encontradas nos ensaios.

Material	SAE 1095	UHB 15n20	Aço Damasco
<b>Médias (HRC)</b>	23,25	30,08	50,82
<b>Desvio padrão</b>	0,75	1,31	2,04

Os ensaios de dureza comprovaram um aumento considerável de dureza, sendo de 118,58% para o 1095 e 68,94% para o 15n20 se comparados com o aço damasco finalizado, desta forma, o aço damasco produzido apresentou uma característica importante para a fabricação de itens da cutelaria. A Figura 5.7 apresenta um gráfico das médias encontradas em cada ensaio.

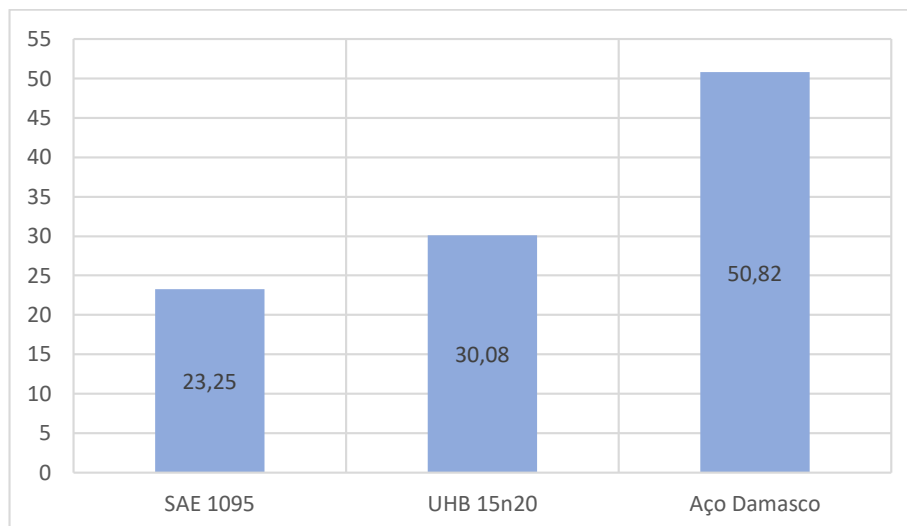


Figura 5.7 - Médias de dureza encontradas nos ensaios em HRC.

### 5.3 Ensaio de Tração

No ensaio de tração, pode-se observar características que indicam uma fratura frágil. Na Figura 5.8 é possível visualizar uma fratura reta, praticamente isenta de deformação plástica. A face da fratura apresenta duas colorações, uma borda mais escura e a outra de aparência brilhante, isso significa que a fratura se iniciou a partir da borda escura.



Figura 5.8 – Corpo de prova após o ensaio de tração.

A curva de tensão em função da deformação, visualizada na Figura 5.9, é típica de materiais frágeis. Ela apresenta uma curva em parte reta, com ruptura repentina e pouquíssimo escoamento.

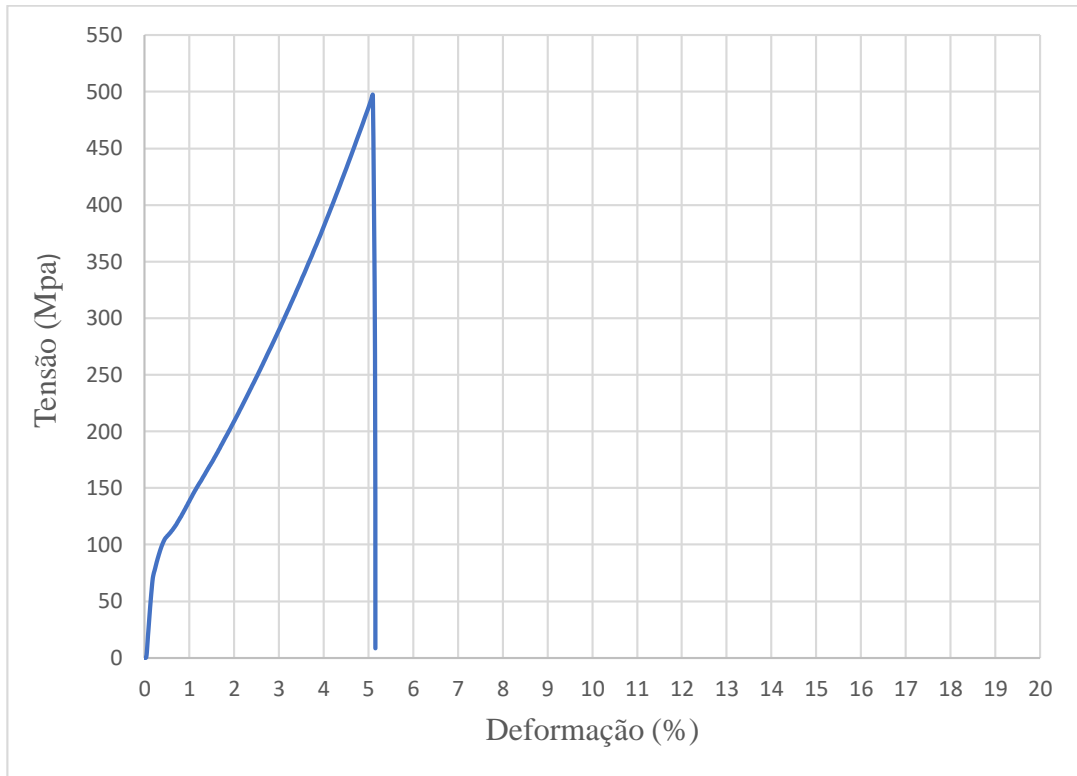


Figura 5.9 – Gráfico da tensão em função da deformação para o aço damasco.

Deste ensaio foram obtidos os seguintes resultados:

- Tensão Máxima = 497,08 Mpa
- Limite de Ruptura = 493 MPa
- Força Máxima = 11809,75 N
- Alongamento após a ruptura = 5,05 %
- Limite de escoamento = 490 Mpa

Materiais que apresentam deformações com valores de até 5% são considerados como frágeis, neste caso o resultado apresentado foi de 5,05%, desta forma pode-se considerar o material ensaiado como frágil.

## 6 CONCLUSÃO

Este estudo teve o objetivo de produzir o aço damasco a partir do aço SAE 1095 e da liga UHB 15n20, bem como estudar suas propriedades mecânicas e estruturais. Durante a fabricação do aço damasco passou-se por alguns problemas, como a disponibilidade de equipamentos adequados para o forjamento e caldeamento, pois é necessária uma prensa com no mínimo 50 toneladas e uma forja adequada para aquecer o material em torno de 1200 °C. Estes empecilhos contribuíram para que a compressão do primeiro protótipo não fosse eficaz, desta forma houve a necessidade de reduzir-se as dimensões do material, dando origem ao segundo protótipo, o que possibilitou a realização do trabalho.

Apesar do material obtido apresentar pequenas dimensões, impedindo a realização de alguns testes, por exemplo o ensaio de impacto, foi possível estudar suas principais características, como a qualidade do caldeamento, a dureza do material, além de outros dados relacionados ao ensaio de tração, por exemplo a tensão máxima, limite de ruptura e força máxima.

Os ensaios metalográficos do aço damasco revelaram que o caldeamento foi atingido com sucesso seguindo os procedimentos descritos na seção de materiais e métodos. Porém foi notado a presença de inclusões de óxido de ferro ao longo da linha de caldeamento. Esta contaminação pode ser explicada pela dificuldade encontrada em se realizar a retirada do óxido de ferro presente em toda a superfície do billet durante as compressões, pois, devido ao tamanho reduzido do billet foi muito complicado remover o óxido de ferro sem colocar em risco os operadores.

As micrografias realizadas no aço damasco comprovaram o êxito nos tratamentos térmicos executados, a normalização deixou a microestrutura mais homogênea se comparada à encontrada após o forjamento. A têmpera resultou em uma estrutura martensita em ambos os aços empregados, aumentando assim a dureza do material, propriedade muito relevante para aços empregados da cutelaria. Entretanto o revenimento não foi capaz de completar a transformação da martensita lenticular em martensita revenida.

O ensaio de dureza comprovou uma melhora notável desta propriedade no aço damasco quando comparado aos aços bases, antes do início dos trabalhos eles apresentavam médias de

23,25 HRC para o SAE 1095 e 30,08 HRC para o UHB 15n20, alcançando média de 50,82 HRC para o damasco, em suma a têmpera teve maior contribuição para esta melhoria.

O ensaio de tração apresentou características que indicam uma fratura frágil do corpo de prova, este resultado pode ser justificado por dois fatos constatados nos ensaios de microestrutura do aço damasco, primeiro, deve-se ao fato do material conter várias inclusões de óxido de ferro e ao tratamento de revenimento não ter atingido o resultado esperado. Estes problemas resultaram em uma fragilização da estrutura.

De forma geral o objetivo do trabalho foi atingido, estudou-se o aço damasco desde seu processo de fabricação até suas principais propriedades mecânicas e estruturais.

## **7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

Estudos posteriores devem levar em consideração a quantidade necessária de material para a realização das análises de forma mais ampla. Para tanto é fundamental a utilização de uma forja apropriada para este tipo de trabalho, bem como uma forma de compressão eficaz, pois sem estes dois itens o processo de forjamento e caldeamento será muito difícil, resultando ao final do processo uma quantidade limitada do produto.



## REFERÊNCIAS

ASTM A370-17a. **Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**. American Society for Testing and Materials, 2017.

ASTM E18-15. **Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials**. American Society for Testing and Materials, 2015.

CALLISTER, Willian; RETHWISCH, David. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8º Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 7º Ed. São Paulo: ABM, 2005.

CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. 1º Ed. São Paulo: ABM, 2008.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos**. Revisão de André Luiz V. da Costa e Silva. 4º Ed. São Paulo: BLUCHER, 2008.

CUNHA, L. Salles; CRAVENCO, M. Padovani. **Manual Prático do Mecânico**. São Paulo: Hemus, 2006.

DIAS, F. Augusto. **Propriedades Mecânicas da Liga de Aço Damasco SAE 1075 + UHB 15n20**. 2018, 39f. Dissertação (Graduação) – Centro Universitário do Sul de Minas Unis, Varginha, 2018.

FILHO, E. B. et al. **Conformação Plástica dos Metais**. 1º Ed. Digital. São Paulo: EPUSP, 2011.

GARCIA, Amauri; SPIM, J. Alvares; SANTOS, C. Alexandre; **Ensaio dos Materiais**. 2º Ed. Rio de Janeiro: LTC; 2012.

GERDAU. **Manual de aços** (2003). Disponível em: <  
[https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo\\_acos\\_gerdau.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf)> Acesso em: 7 abr. 2019.

HELMAN, Horácio; CETLIN, P. Roberto. **Fundamentos da Conformação: Mecânica dos Metais**. 2º Ed. São Paulo: Artliber, 2005.

LUZ, Gelson; **Aço SAE 1095 Propriedades Mecânicas e Composição Química**. 2019. Disponível em :< <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1095-propriedades-mecanicas.html> >. Acesso em 10 abr. 2019.

KIMINAMI, C. Shyinti; CASTRO, W. Bênicio; OLIVEIRA, F. Oliveira. **Introdução aos Processos de Fabricação de Produtos Metálicos**. 1º Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2013.

MACHADO, M. L. Pereira. **Conformação dos Metais: Fundamentos e Aplicação**. Vitória, 2009. Disponível em: <[http://paginapessoal.utfpr.edu.br/jmario/conformacao-mecanica/livros/Apostilha\\_Conformacao\\_dos\\_Metais\\_fund\\_e\\_aplicacao.pdf/at\\_download/file](http://paginapessoal.utfpr.edu.br/jmario/conformacao-mecanica/livros/Apostilha_Conformacao_dos_Metais_fund_e_aplicacao.pdf/at_download/file) > Acesso em: 5 de abr. 2019.

MARTINS, J. Henrique; MILANEZ, Alexandre; PERUCH, Fabio. **Avaliação das propriedades mecânicas do aço damasco SAE 5160 com SAE 1020 para fabricação de facas artesanais**. Santa Catarina, 2018. Disponível em: < <http://repositorio.satc.edu.br/handle/satc/329> > Acesso em: 12 jun. 2019.

PÁTRIA, H. I. *et al.* Aços utilizados na cutelaria. **Siderurgia: A revista de negocios do aço**, São Paulo: Grips, ano 20, ed. 134, p. 29, 2019.

PAZINI, Henrico. **Propriedades Mecânicas da Liga de Aço Damasco SAE 5160 + UHB 15n20**. 2011, 47f. Dissertação (Graduação) – Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul, Panambi, 2011.

SHOTOKANN. **Katana Rikai Damasco**. Disponível em: < Fonte: <https://www.espadaskatana.com.br/produto/katana-rikai/> > Acesso em: 7 ago. 2019.

SLAUGHTER, Christian. **Espada de Damasco. Um Produto da Civilização Islâmica**. 2014, 139f. Dissertação Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SILVA, A. L. Costa; MEI, P. Roberto. **Aços e ligas especiais**. 2º Ed. São Paulo: Eletrometal S. A. Metais Especiais, 1988.

SOUZA, Sergio. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5º Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

VLAC, L. H. Van. **Princípios de ciências dos materiais**. 1º Ed. São Paulo: BLUCHER, 1970.

TAVARES, W. C. R. Medeiros. **Análise comparativa das características mecânicas e estruturais do aço AISI 304 por meio dos processos de soldagem manual GTAW e SMAW**. 2019, 74f. Monografia (Graduação) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2019.

TECNOHARD. **Tabela de cores**. Disponível em: <  
<http://www.tecnohard.ind.br/downloads/cores.jpg> > Acesso em: 9 ago. 2019.

TESTMAT. **Tabela Elementos de Liga – Aços**. Disponível em: <  
<http://www.testmat.com.br/wp-content/uploads/2018/01/efeito-elementos-liga-tratamento-termico.pdf> > Acesso em: 9 mai. 2019.