

HUBERT RICHARD VOSS GIOPATO
EDIVALDO ANANIAS GONÇALVES

**AÇO DAMASCO DE AÇOS SAE 5160 E UHB 15N20:
UMA AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS ENTRE O AÇO DAMASCO E SEUS
COMPONENTES**

São Paulo
2022

HUBERT RICHARD VOSS GIOPATO
EDIVALDO ANANIAS GONÇALVES

**AÇO DAMASCO DE AÇOS SAE 5160 E UHB 15N20:
UMA AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS ENTRE O AÇO DAMASCO E SEUS
COMPONENTES**

Trabalho de conclusão do curso apresentado à
FATEC – Itaquera – Prof. Miguel Reale como
requisito para a obtenção do título de graduado
de Tecnologia em Mecânica – Processos de
Soldagem.

Orientador: Professor Doutor Gonçalo Siqueira

São Paulo
2022

HUBERT RICHARD VOSS GIOPATO
EDIVALDO ANANIAS GONÇALVES

**AÇO DAMASCO DE AÇOS SAE 5160 E UHB 15N20:
UMA AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS ENTRE O AÇO DAMASCO E SEUS
COMPONENTES**

Trabalho de conclusão do curso
apresentado à FATEC – Itaquera – Prof.
Miguel Reale como requisito para a
obtenção do título de graduado de
Tecnologia em Mecânica – Processos
de Soldagem.

BANCA EXAMINADORA

Professor Dr. Gonçalo Siqueira

Professor Me. Sérgio Pamboukian

Professor Me. Rafael Rocha Maia

Professor Me. Silvestre da Silva Neto

São Paulo, 19 de dezembro de 2022

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, autor e guia dos nossos destinos e especialmente ao meu irmão William (*In Memoriam*), que sempre me inspirou com seus conhecimentos, bom humor e carinho. muito do que sou hoje devo

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial ao cuteleiro Roger Glasser, que além da orientação gentilmente cedeu a sua oficina de forja na Escola Brasileira de Cutelaria para a confecção do aço damasco.

Ao Sr. Fábio Mimura, que orientou e auxiliou no forjamento do aço damasco na Escola Brasileira de Cutelaria.

Ao professor Me Edgar de Souza Dutra, que possibilitou a confecção das amostras de metalografia e da própria análise metalográfica.

Ao professor Me Silvestre da Silva Neto que auxiliou e nos orientou na fabricação dos corpos de prova Charpy e Jominy, além de possibilitar os contatos para a realização dos ensaios mecânicos e de temperabilidade. Além de direcionar a parte escrita deste projeto, ministrando a matéria de Redação Técnico Científica.

Ao professor Edson Gomes Barbosa, que nos orientou, auxiliou e supervisionou na execução dos ensaios mecânicos de dureza.

Ao professor da USP Dr. Eduardo Franco de Monlevade, pela execução do ensaio Jominy na sala de preparação de amostras, do departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP.

Ao professor Dr. Gonçalo Siqueira, por toda a orientação, acompanhamento e direcionamento durante os meses necessários para a elaboração deste projeto.

Agradecemos ainda a todos os professores e Coordenadores do Curso de Soldagem, que passaram todo o conhecimento, expertise e vivência profissional durante os anos do curso de soldagem, sem os quais este trabalho não seria possível.

Ainda, e não menos importante, agradecemos as nossas esposas, famílias, filhos, amigos e colegas que nos apoiaram nesta empreitada e compreenderam a nossa ausência e afastamento temporário durante estes anos de aprendizado, também a todos que nos apoiaram para a realização de mais esta etapa da vida.

*Uma mente precisa de livros da mesma forma que uma espada
precisa de uma pedra de amolar para se manter afiada.
(Tyrion Lannister - Game of Thrones)*

RESUMO

O aço damasco é uma liga de aço que fascina a humanidade desde que foi inventada, tanto por sua beleza, como por suas excelentes propriedades, as armas feitas dessas ligas tendem a ser extremamente afiadas e resistentes, sendo utilizadas em facas, punhais, espadas, machados e martelos, entre outros tipos, sendo confeccionada principalmente de forma artesanal, por caldeamento, de dois, ou até mais tipos de aço. Foi realizada uma pesquisa experimental com o objetivo de avaliar as propriedades do aço damasco de SAE 5160 e UHB 15N20 em comparação com os seus aços componentes através de ensaios mecânicos de impacto e dureza, e do ensaio de temperabilidade, tanto no aço damasco feito com os aços SAE 5160 e UHB 15N20, como nesses aços de forma isolada. Os resultados dos ensaios demonstraram que o aço damasco realmente apresenta boas características para a sua utilização na cutelaria artesanal.

Palavras-chave: aço damasco. Caldeamento. Ensaio mecânicos. Cutelaria.

ABSTRACT

Damascus steel is a steel alloy that has fascinated mankind since it was invented, both for its beauty and for its excellent properties, weapons made from these alloys tend to be extremely sharp and resistant, being used in knives, daggers, swords, axes and hammers, among other types, being made mainly by hand, by melting two, or even more types of steel. An experimental research was carried out with the objective of evaluating the properties of the SAE 5160 and UHB 15N20 damascus steel in comparison with their component steels through mechanical impact and hardness tests, and the hardenability test, both in the damascus steel made with the SAE 5160 and UHB 15N20 steels, as well as in these steels in isolation. The results of the tests demonstrated that damascus steel really has good characteristics for its use in handmade knife making.

key words: Damascus steel. Melting. Mechanical tests. knife making.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Padrões de aço damasco	16
Figura 2 - Referências de cor do aço nas faixas de temperatura de revenimento	28
Figura 3 - Corpo de prova Jominy	30
Figura 4 - Corpo de prova – Amostra de tamanho padrão real	33
Figura 5 - Corpo de prova – Amostra de tamanho padrão reduzido.....	33
Figura 6 - Distância mínima entre indentações	35
Figura 7 - Barras de aço 15n20 e SAE 5160	38
Figura 8 - Soldagem do billet.....	38
Figura 9 - Prensa e forja utilizadas	39
Figura 10 - Barra de damasco com 42 camadas.	40
Figura 11 - Billet de damasco com 168 camadas	40
Figura 12 - Corpo prova Jominy de damasco	41
Figura 13 - Damasco para ensaios de metalografia	41
Figura 14 - Aços UHB15n20 e SAE 5160.....	42
Figura 15 - Endurecedor e Resina Epóxi.....	42
Figura 16 - Pesagem da resina	42
Figura 17 - Embutimento das amostras	43
Figura 18 - Lixadeira e politriz	43
Figura 19 - Amostras após o polimento	44
Figura 20 - Amostras após o ataque com nital	44
Figura 21 - Corpos de prova Charpy-V	45
Figura 22 - Corpos de prova - dureza Rockwell	45
Figura 23 - Material para corpos de prova do ensaio Jominy	46
Figura 24 - Corpos de prova - Jominy.....	46
Figura 25 - Corpos de prova em aço damasco.....	47
Figura 26 - Brochadeira para entalhe em "V"	47
Figura 27 - Máquina Charpy	48
Figura 28 - Alinhamento dos corpos de prova - ensaio Charpy	48
Figura 29 - CP Jominy sendo preparados.....	49
Figura 30 - Equipamentos para o ensaio Jominy	50
Figura 31 - Sequência do ensaio Jominy	50
Figura 32 - Graminho e sua utilização	51
Figura 33 - Durômetro Galileo D-200	51
Figura 34 - Ensaio de dureza - CP 15N20	52
Figura 35 - Microscópio Zeiss Axio Vert.A1	52
Figura 36 - CP Charpy - 15N20, SAE 5160, damasco	54
Figura 37 - Amostras SAE 5160, 15N20, damasco com 42 e com 168 camadas.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Designação e tipos de aço	19
Tabela 2 - Composição química dos aços 15N20, 1075 e 75Ni8	21
Tabela 3 - Faixa de temperatura de revenido e transformações	29
Tabela 4 - Escala de dureza Rockwell e aplicações	36
Tabela 5 - Resultados do ensaio Charpy	53
Tabela 6 - Jominy - Dureza HRC	56
Tabela 7 - Dureza Rockwell (HRC)	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Composição química.....	20
Gráfico 2- Diagrama de equilíbrio das ligas de ferro-carbono	23
Gráfico 3 - Ensaio Jominy, dureza (HRC) x distância (mm).....	56
Gráfico 4 - Dureza Rockwell (HRC).....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A.C.	Antes de Cristo
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BSI	<i>British Standards Institution</i>
C	Carbono
Cr	Cromo
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão de Normatização)
HB	<i>Dureza Brinell (Hardness Brinell)</i>
HR	<i>Dureza Rockwell (Hardness Rockwell)</i>
In.	Polegadas (<i>inches</i>)
JIS	<i>Japanese Industrial Standards</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
Ni	Níquel
P	Fósforo
S	Enxofre
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
Si	Silício

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	– QUESTÃO DE PESQUISA.....	16
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos.....	16
1.3	JUSTIFICATIVA.....	17
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1	AÇOS	18
2.1.1	SAE 5160.....	21
2.1.2	UHB 15N20.....	21
2.2	PROCESSOS E TRATAMENTOS.....	22
2.2.1	Recozimento.....	24
2.2.2	Normalização	25
2.2.3	Caldeamento e forjamento.....	25
2.2.4	Têmpera.....	26
2.2.5	Revenimento	27
2.3	ENSAIO DE TEMPERABILIDADE JOMINY	29
2.4	ENSAIOS MECÂNICOS.....	31
2.4.1	Impacto – Charpy	32
2.4.2	Dureza.....	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	CONFECÇÃO DO AÇO DAMASCO	37
3.2	CORPOS DE PROVA PARA ANÁLISES METALOGRÁFICAS	41
3.3	CORPOS DE PROVA - ENSAIO DE IMPACTO CHARPY-V.....	44
3.4	CORPOS DE PROVA – DUREZA ROCKWELL	45
3.5	CORPO DE PROVA – ENSAIO DE TEMPERABILIDADE JOMINY.....	46
3.6	ENSAIO DE IMPACTO CHARPY-V	47
3.7	ENSAIO JOMINY.....	49
3.8	ENSAIO DE DUREZA.....	51
3.9	ANÁLISE METALOGRAFICA.....	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
5	CONCLUSÕES	58
6	REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

A cutelaria é o ofício de quem produz instrumentos de corte ou perfuração, como facas, espadas, machados, punha, adagas, tesouras, entre outras, e que existe praticamente desde que o homem saiu da idade da pedra. O metal, por ser mais maleável e resistente do que a pedra podia assumir formas e funções mais sofisticadas, e com esses novos e melhores instrumentos conseguimos aperfeiçoar a agricultura e a caça, ajudando a formar sociedades organizadas, cada vez maiores e mais sólidas. Para transformar os metais em ferramentas as sociedades antigas utilizavam fornalhas em altíssimas temperaturas, com moldes de pedra, não demorou para que as primeiras ligas metálicas fossem desenvolvidas. Outra vantagem dos metais, podiam ser afiados sem perder a estabilidade, criando armas potentes que podiam ser usadas tanto para a caça quanto para a guerra, assim, lanças e espadas afiadas, além de escudos e armaduras, transformaram a forma de combate entre grupos diferentes. Dominar a cutelaria passou a significar poder, processo que foi intensificado com as grandes civilizações do mundo antigo, com um auge na idade média. Hoje, o aço é a principal matéria-prima para a produção das lâminas nos artigos de cutelaria. Resultante da ligação do ferro e do carbono, exibe imensa durabilidade com grande dureza e afiação. São utilizados diferentes tipos de aço, como o aço carbono, aços liga, aços damasco e aços inoxidáveis. Cada um possui sua aplicação especializada, valorizando aspectos específicos da lâmina. (O Couteleiro - Cutelaria CIMO, 2022)

O aço damasco é uma liga de aço que fascina a humanidade desde que foi inventada, tanto por sua beleza, como por suas excelentes propriedades, as armas feitas dessas ligas tendem a ser extremamente afiadas e resistentes, como é demonstrado em vários contos e histórias, de tal forma que é tão intimamente ligada e associada à civilização islâmica, que acabou se tornando um de seus símbolos.

Segundo Slaughter (2014) “A espada de damasco é frequentemente associada ao mundo islâmico, sendo considerada por muitos como a arma típica dos exércitos muçulmanos medievais.”

Slaughter (2014) explica ainda que durante a era de ouro do islamismo (entre 750 e 1250 d.C.) o império muçulmano viveu seu apogeu como civilização,

alcançando altos níveis de desenvolvimento cultural, científico, intelectual e econômico. Desenvolveu em seu território um grande e rico comércio por diversas rotas que ligavam desde a China, a leste, até a península Ibérica, a oeste. É aceitável dizer que a espada de Damasco foi uma consequência, mesmo que indireta, do grande desenvolvimento do comércio, da economia e do rico contato com outras civilizações tão desenvolvidas quanto ela própria. A espada Damasco está inserida dentro do contexto mais amplo de todas as inovações, intercâmbio e desenvolvimento tecnológico e cultural do mundo islâmico medieval.

Segundo vários autores pesquisados, o “Aço Damasceno” ou “Aço de Damasco” é um termo usado desde a idade média pelas culturas ocidentais para designar um tipo especial de aço utilizado para a confecção de espadas, que eram construídas com uma tecnologia especial desenvolvida na região da atual Síria, as lâminas de aço Damasco foram consideradas como exemplo de um artesanato de altíssima qualidade e capaz de surpreender até o mais experiente ferreiro durante a Era Medieval.

É preciso lembrar que a técnica de mescla de diferentes metais já era utilizada por ferreiros Celtas no século VI, Vikings do século XI e, inclusive, japoneses do século XIII. Apesar disso, nenhum deles foi capaz de atingir o mesmo resultado do que o obtido pelos mestres das forjas sarracenas e, por esta razão, os ferreiros da Europa buscavam apenas imitar o efeito estético do metal de Damasco gravando a lâmina de suas espadas ou cobrindo a superfície de suas espadas com filigranas de prata ou cobre – uma técnica que envolvia martelar esses metais sobre a lâmina, até que eles virassem uma fina camada com padrões de formas (Gasco, 2020)

Ainda, segundo Gasco (2020), os esforços despendidos pelos ferreiros nessa época da história medieval foram tão intensos, que pode ser considerado por alguns estudiosos como o início do que seria conhecido a ciência dos materiais.

E um ponto em que vários autores e estudiosos concordam é que um dos constituintes desse aço damasceno era o chamado aço *wootz*, que era produzido na região da Índia e da Ásia Central, aproximadamente desde 400 A.C., e que era um aço com altíssimo teor de carbono, acima de 1,5 %, e que esse altíssimo teor era fundamental para a obtenção do aço damasceno. Uma suposição é de que os ferreiros islâmicos foram capazes de controlar esse teor de carbono, mas que esse conhecimento com o tempo foi esquecido, desaparecendo inteiramente

durante o século XVIII, sendo que atualmente não existe um consenso sobre a fabricação desse damasco original.

O aço damasco é uma liga muito desejada em vários tipos de armas de corte e ferramentas, facas, punhais, espadas, machados e martelos, entre outros tipos, sendo confeccionada principalmente de forma artesanal, onde a habilidade e o renome do couteleiro balizam a sua qualidade e beleza, formando assim o seu valor comercial.

Atualmente o aço damasco é produzido através de conformação mecânica por caldeamento de um aço de alto teor de carbono com outro aço de propriedades distintas, geralmente com um bom teor de níquel. Várias camadas intercaladas desses dois aços são juntadas e soldadas formando um lingote que é chamado de *billet* que será aquecido na forja e posteriormente caldeado. Com a fusão das camadas e o estiramento do lingote ele é cortado, ou dobrado, e empilhado novamente, esse processo se repete várias vezes, sendo que a cada novo empilhamento, as camadas dos metais dobram geometricamente (por exemplo: 10 camadas, 20 camadas, 40 camadas, e assim sucessivamente). (Pazini, 2011)

Após atingir a quantidade de camadas desejada, começa a conformação, usinagem, têmpera e revenimento da lâmina. Finalmente, a fim de revelar o padrão obtido, a lâmina é mergulhada em uma solução de percloroeto de ferro, e finalmente, é realizado um tratamento de superfície chamado de banho negro, com fosfato de manganês, para proteger a lâmina contra a corrosão.

O processo acima descreve o padrão de aço damasco conhecido como aleatório, para formar outros padrões o processo de caldeamento do damasco é acrescido de outros procedimentos que podem ser de cortes alternados, torção, ou outros métodos. Alguns desses padrões são mostrados na figura 1.

Figura 1 - Padrões de aço damasco

Fonte: <https://www.couteau-damas.com/blogs/acier-de-damas/vrai-acier-damas>

1.1 – QUESTÃO DE PESQUISA

Como se comportam as propriedades mecânicas do aço damasco de SAE 5260 e UHB 15n20 em comparação com os seus aços componentes?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar as propriedades do aço damasco de SAE 5160 e UHB 15n20 em comparação com os seus aços componentes através de ensaios mecânicos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Descrever etapas de produção do aço damasco;

Executar ensaios mecânicos de dureza Rockwell e impacto Charpy, conforme as normas ASTM E 18 – 15 e ASTM A370 / ASME SA-370, e ensaio de temperabilidade Jominy, conforme a norma ASTM A255-10;

Efetuar a comparação das propriedades mecânicas entre o aço damasco de SAE 5160 e UHB 15N20 e os referidos aços em separado.

1.3 JUSTIFICATIVA

Embora não tenha propriamente um uso industrial, sendo utilizado basicamente em cutelaria, principalmente artesanal, o aço damasco, além da sua beleza e exclusividade, representa um mercado amplo e em expansão, com peças feitas por cuteleiros de renome alcançando altos valores comerciais, são tidas como tendo uma qualidade superior as peças feitas com uma liga de aço simples. A aplicabilidade do caldeamento como técnica de união de materiais num contexto mais amplo do curso de Tecnologia Mecânica Processos de Soldagem. Além de ser um processo de fabricação com pouca mecanização mas que acolhe vários temas do curso, como metalurgia, tratamentos térmicos, entre outros, aliado ao interesse dos autores sobre o tema justifica a realização do trabalho e evidencia a relevância do tema.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 AÇOS

O aço, segundo uma definição de Chiaverini (1988) é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008 % até aproximadamente 2,11 % de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação. Ainda, conforme explica Chiaverini (1988) o limite inferior a 0,008 % corresponde à máxima solubilidade do carbono no ferro à temperatura ambiente e o limite superior 2,11 % corresponde a máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro a 1.148 °C, e essa quantidade máxima pode variar de 2,00 % a 2,11 % dependendo da presença de elementos de liga ou de elementos residuais em teores maiores que os normais.

Assim podemos designar a definição acima como sendo para aço carbono, e acrescentar uma definição para aço-liga ou “aço carbono que contém outros elementos de liga ou apresenta os elementos residuais em teores acima dos que são considerados normais” (CHIAVERINI, 1988).

E de acordo com Callister & Rethwisch (2016) as ligas ferrosas são aquelas nas quais o ferro é o componente principal, mas o carbono, assim como outros elementos de liga, pode estar presente, e com base no teor de carbono existem três tipos de ligas: ferro, que comercialmente puro possui menos de 0,008 % C; aço, possui entre 0,008% C e 2,14 % C, embora, na prática essas concentrações raramente excedem a 1,0 % C, e finalmente o ferro fundido, com 2,14 % C a 6,7 % C, entretanto, os ferros fundidos comerciais normalmente possuem menos de 4,5 % C.

A classificação dos aços não segue um único critério, existindo classificações quanto à composição química, processamento, microestrutura, propriedades ou até mesmo quanto a sua finalidade. As principais classificações utilizadas no Brasil são as das americanas SAE (*Society of Automotive Engineers*), AISI (*American Iron and Steel Institute*) nas quais o sistema brasileiro da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) se baseia, além da norma alemã DIN (*Deutsches Institut für Normung*) ou Instituto Alemão de Normatização, a japonesa JIS (*Japanse Industrial Standards*), a francesa

AFNOR (*Association Française de Normalisation*) e a inglesa BSI (*British Standards Institution*).

Os sistemas de classificação da SAE e AISI utilizam quatro algarismos na forma ABXX, onde A e B identificam os principais elementos de liga e os seus teores, e os dois finais (XX) representam a quantidade de carbono, ambos em porcentagem de peso, conforme demonstra a Tabela 1.

Tabela 1 - Designação e tipos de aço

Designação		Tipos de Aço
SAE	AISI/ABNT	
10XX	10XX	Aços carbono comuns, com máximo 1 % Mn
11XX	11XX	Aços resulfurados de corte fácil, alta % S
13XX	13XX	Aços manganês com 1,75 % Mn
23XX	23XX	Aços níquel com 3,5 % Ni
25XX	25XX	Aços níquel com 5,0 % Ni
31XX	31XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 1,25 % de Ni e 0,65 % de Cr
33XX	33XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 3,5 % de Ni e 1,55 % de Cr
40XX	40XX	Aços molibdênio com 0,25 % Mo
41XX	41XX	Aços cromo-molibdênio com 0,50 a 0,95 % Cr e 0,12 a 0,30 % Mo
43XX	43XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 1,80 % Ni, 0,50 a 0,80 % Cr e 0,25 % Mo
46XX	46XX	Aços níquel-molibdênio com 1,80 % Ni, 0,50 a 0,80 % Cr e 0,25 % Mo
47XX	47XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 1,05 % Ni, 0,45 % Cr e 0,20 a 0,35 % Mo
48XX	48XX	Aços níquel-molibdênio com 3,5 % Ni e 0,25 % Mo
50XX	50XX	Aços cromo com 0,27 a 0,65 % Cr
50BXX	50BXX	Aços cromo-boro com 0,5 % Cr e de 5 a 30 ppm B (◊)
51XX	51XX	Aços cromo com 0,8 a 1,05 % Cr
51XXX	51XXX	Aços cromo com 1,0 % Cr e 1,0 % min C
52XXX	52XXX	Aços cromo com 1,45 % Cr e 1,0 % min C
61XX	61XX	Aços cromo-vanádio 0,60-0,95 % Cr e 0,10 a 0,15 % V
86XX	86XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 0,55 % Ni, 0,5 % Cr e 0,20 % Mo*
87XX	87XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 0,55% Ni, 0,5 % Cr e 0,25 % Mo
92XX	92XX	Aços silício-manganês com 1,4 a 2,0 % Si, 0,85 a 0,85 % Mn e 0,65 % Cr
93XX	93XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 3,25 % Ni, 1,20 % Cr e 0,12 % Mo
94BXX	94BXX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 0,45 % Ni, 0,40 % Cr, 0,12 % Mo e 30 ppm B
98XX	98XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 1,0 % Ni, 0,80 % Cr e 0,25 % Mo

Fonte: GERDAU Aços Especiais: <https://www2.gerdau.com.br/blog-acos-especiais/tipos-de-aco-e-sua-classificacao>

Conforme consta no *ASM Metal handbook* (1993), os aços formam um dos grupos mais complexos de ligas de uso comum. O efeito combinado de elementos de liga e tratamento térmico produz uma enorme variedade de microestruturas e propriedades que são modificadas pela influência de outros elementos. Essas inter-relações devem ser consideradas quando avaliar uma mudança na composição de um aço.

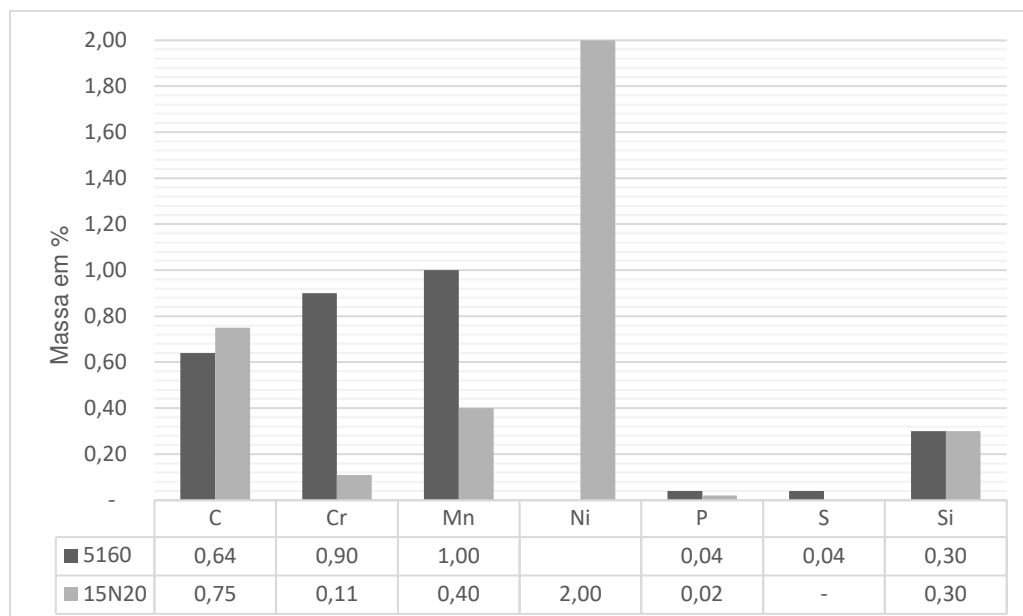
Alguns dos principais elementos de liga e seus efeitos são:

- **Carbono (C)**– Aumenta a temperabilidade e resistência à ruptura, diminui a tenacidade e principalmente, aumenta a dureza;

- **Manganês (Mn)**– Aumenta a resistência à fratura e resistência ao desgaste, com ligas podem chegar a aproximadamente 1,5 %. Diminui conformabilidade plástica e diminui a temperatura para têmpera;
- **Fósforo (P)**- Torna o aço frágil em temperatura ambiente;
- **Enxofre (S)**- Melhora a usinabilidade. Torna o aço frágil em alta temperatura de trabalho;
- **Silício (Si)**- Desoxida o aço, aumentando a resistência à fratura e a tenacidade. Aumenta a temperatura para têmpera;
- **Cromo (Cr)**– Aumenta a dureza, resistência à ruptura e tenacidade, forma carbonetos de cromo duro e nitretos: aumentando a resistência ao desgaste e a corrosão e calor e em aços de baixa liga aumenta a resistência e a dureza;
- **Níquel (Ni)**- Aumenta resistência à tenacidade e impacto, a resistência à ruptura, melhora a resistência à corrosão em aços de baixo carbono, aumenta a temperabilidade, reduz a temperatura de têmpera;

Para o presente trabalho, serão utilizados um aço cromo (SAE 5160) e aço níquel (UHB 15N20), cujas composições químicas são demonstradas no Gráfico 1:

Gráfico 1- Composição química



Fonte: Os autores, adaptado de GERDAU (2020) e MAXIME FERRUM (2019)

2.1.1 SAE 5160

O aço designado como SAE 5160 é um aço de alto teor de carbono (0,60 %) e alto teor de cromo (0,90 %), geralmente utilizado na fabricação de molas helicoidais, feixes de molas e eixos, geralmente de uso automotivo.

Pela quantidade de carbono no SAE 5160, é um aço com uma boa dureza, além de ser apresentar uma boa resistência a fadiga e a tração, apresenta também uma alta temperabilidade e ductibilidade, além de uma boa tenacidade. Quando temperado sua dureza pode chegar aos 60 HRC, e com revenimento essa dureza é reduzida para a faixa de 55 ou 56 HRC.

É um aço muito utilizado por cuteleiros novatos, devido as suas propriedades, e por ser um aço que suporta uma variação mais ampla na definição e aplicação dos tratamentos térmicos, suportando bem alguns deslizes causados pelo cuteleiro novato, além de ser de fácil obtenção devido ao seu largo uso no ramo automotivo, podendo até ser adquirido em ferros-velhos e desmanches (O cuteleiro - Cutelaria CIMO, 2020)

2.1.2 UHB 15N20

Trata-se de um aço com uma liga bem específica, e seu uso é basicamente para a confecção de aço damasco. Sua composição química se assemelha a do aço DIN 75Ni8, sendo que este apresenta a mais uma pequena porcentagem de Cromo (até 0,15 %) e de Molibdênio (0.10 %). Também pode ser considerado como uma variação do aço 1075, que apresenta a seguinte composição química: Carbono – entre 0,70 % e 0,80 %; manganês – entre 0,40 % e 0,70 %; fósforo – máximo de 0,03 % e enxofre – máximo de 0,05 %, onde a principal diferença é a adição de cerca de 2 % de níquel, conforme demonstra a Tabela 2 (MAXIME FERRUM, 2019)

Tabela 2 - Composição química dos aços 15N20, 1075 e 75Ni8

Designação	Elementos - massa em %							
	C	Cr	Mn	Ni	P	S	Si	Mo
15N20	0,75	0,11	0,40	2,00	0,02	-	0,30	-
1075	0,70 - 0,80	-	0,40 - 0,70	-	0,03	0,05	-	-
75Ni8	0,72 - 0,78	0,00 - 0,15	0,30 - 0,50	1,80 - 2,10	0,02	0,02	0,15 - 0,35	0,10

Fonte: Os autores, adaptado de MAXIME FERRUM, 2019

O principal motivo dessa adição de níquel é diminuir aquilo que, em metalurgia chamamos de temperatura de transição de fratura dúctil

para frágil. Aços, quando expostos a determinadas e baixas temperaturas, podem romper-se fragilmente e isso não é desejável pois pode gerar uma falha catastrófica na peça ou equipamento em uso. A temperatura onde isso acontece é chamada de TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO, e é uma faixa de temperatura muito pequena onde a energia absorvida pelo material no impacto diminui drasticamente e o mesmo rompe-se fragilmente e foi descoberta a duras penas na história, inclusive com perda de vidas, pois quando se desconhecia isso construíam-se embarcações que muitas vezes ao chegarem a regiões frias, perto dos polos ou durante o inverno rigoroso da América do Norte simplesmente partiam-se com os esforços aplicados afundando e gerando muitas perdas de vidas. (Leirião Filho, 2019)

Ainda, segundo Leirião Filho (2019), a temperatura de transição é uma temperatura onde o material, que normalmente se deformava antes do rompimento (fratura dúctil), de repente passa a romper-se fragilmente (como vidro, ou um aço com uma têmpera muito violenta e sem revenimento).

2.2 PROCESSOS E TRATAMENTOS

Conforme Chiaverini (1988), tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas.

Chiaverini (1988) ainda lista os principais objetivos dos tratamentos térmicos:

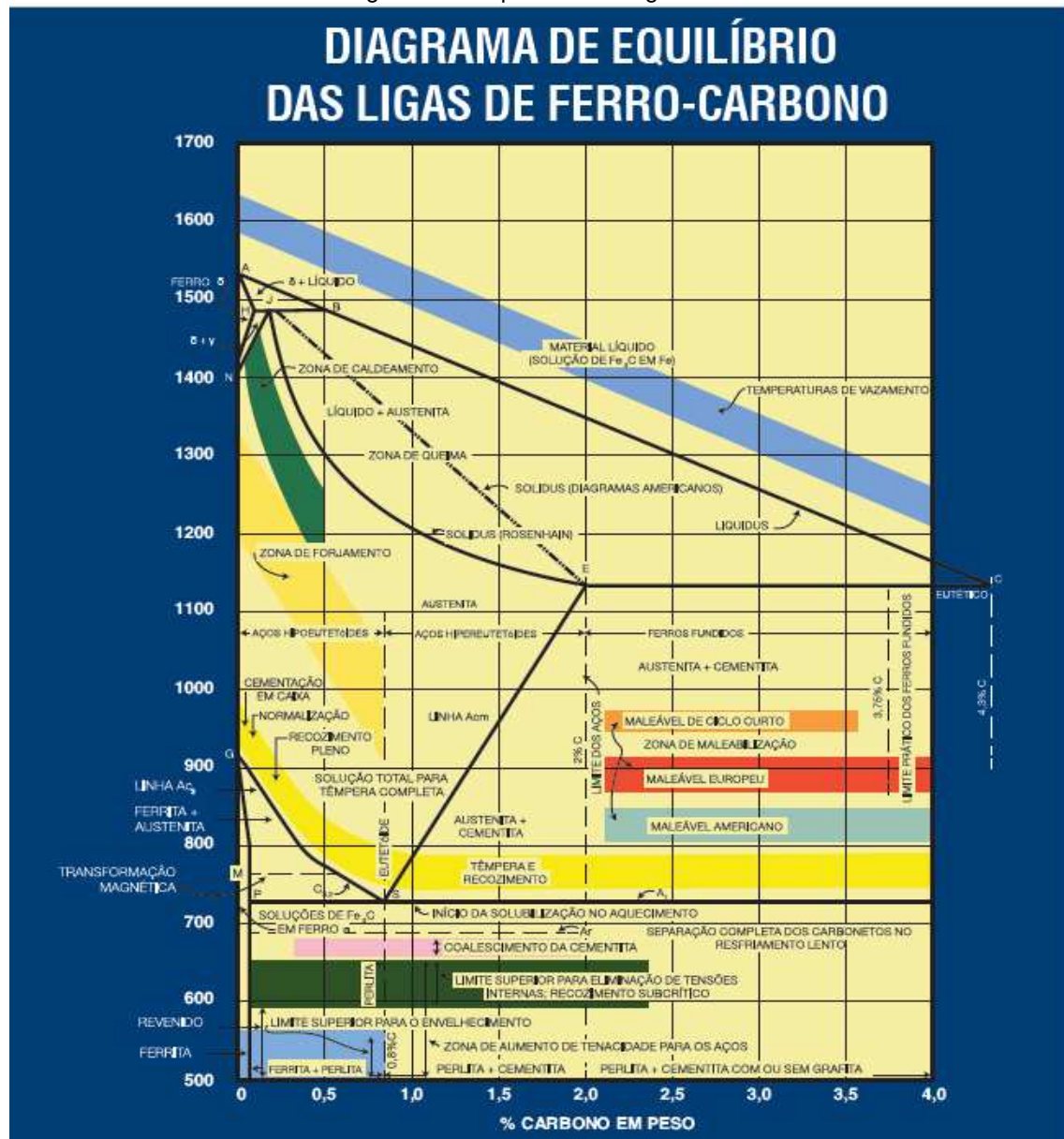
- Remoção de tensões;
- Aumento ou diminuição de dureza;
- Aumento da resistência mecânica;
- Melhora na ductibilidade;
- Melhora na usinabilidade;
- Melhora da resistência ao desgaste;
- Melhora nas propriedades de corte;

Essas entre outras propriedades citadas pelo autor, que ainda explica que a modificação causada por um determinado tratamento térmico altera outra propriedade do aço, sendo necessário que a escolha desses tratamentos deva ser criteriosa para minimizar os inconvenientes dessas alterações.

Todas essas alterações de propriedades mecânicas dos aços ocorrem por conta de alterações em suas microestruturas, sendo que com a alteração na temperatura ocorrem mudanças de fases nos aços.

Esses tratamentos devem levar em consideração tanto a finalidade de uso e a composição química dos aços utilizados, o Gráfico 2 - diagrama de equilíbrio das ligas de ferro carbono demonstra as faixas dessas alterações e tratamentos térmicos aplicáveis.

Gráfico 2- Diagrama de equilíbrio das ligas de ferro-carbono



Fonte: <https://www2.gerdau.com.br/blog-acos-especiais/diagrama-de-equilibrio-fe-c>

Os principais tratamentos térmicos utilizados na cutelaria são explicados abaixo.

2.2.1 Recozimento

O termo recozimento refere-se a um tratamento térmico no qual um material é exposto a uma temperatura elevada durante um período de tempo prolongado e então é resfriado lentamente. Em geral, o recozimento é realizado para aliviar tensões; reduzir a dureza e aumentar a ductilidade e tenacidade; e/ou produzir uma microestrutura específica. (Callister & Rethwisch, 2016)

Ainda, segundo Callister e Rethwisch (2016) são três os estágios do recozimento:

- Aquecimento até a temperatura desejada;
- Manutenção ou “encharque” naquela temperatura e
- Resfriamento, geralmente até a temperatura ambiente.

Os tipos de recozimento mais comuns, conforme Callister e Rethwisch (2016) são:

Recozimento subcrítico, é usado para anular os efeitos do trabalho a frio, ou seja, diminuir a resistência e aumentar a ductibilidade de um metal que foi previamente encruado.

Para alívio de tensões, onde a peça é aquecida até uma temperatura recomendada, mantida nessa temperatura durante tempo suficiente para uma temperatura uniforme ser atingida e, finalmente, resfriada ao ar até a temperatura ambiente. A temperatura de recozimento é relativamente baixa, de forma a não afetar outros tratamentos térmicos.

Recozimento pleno, a peça é aquecida até aproximadamente 50 °C acima da linha A3 para formar a austenita em composições menores que a eutetóide, ou 50 °C acima da linha A1 para formar as fases de austenita e Fe₃C, e então é resfriada em um forno, que é desligado, que resfriam até a temperatura ambiente, só que em um tempo mais extenso.

Esferoidização, com a finalidade de desenvolver uma de cementita globulizada, os aços esferoidizados são moles e apresentam ductibilidade alta, esse processo pode ocorrer por métodos diferentes:

- a) Aquecimento até uma temperatura imediatamente abaixo da temperatura eutetóide (linha A1) e é mantida nessa temperatura entre 15 e 25 horas;

- b) Aquecimento até uma temperatura acima da eutetóide e ou um resfriamento muito lento dentro do forno, ou a manutenção da temperatura abaixo da eutetóide, e;
- c) Aquecimento e resfriamento alternados dentro de aproximadamente ± 50 °C da linha A1.

2.2.2 Normalização

O processo de normalização é um tipo de recozimento e conforme Callister e Rethwisch (2016) explica, é usado para refinar os grãos e produzir uma distribuição de tamanhos de tamanhos mais uniforme e desejável; os aços perlíticos com grãos mais finos são mais tenazes do que com grãos grosseiros.

E é obtida mediante o aquecimento até uma temperatura 55 °C acima da temperatura crítica superior (linha A3 ou Acm, conforme o tipo do aço), após um tempo suficiente para que a liga se transforme completamente em austenita, e depois é resfriada ao ar. É uma temperatura onde o aço perde suas propriedades magnéticas. Por esse motivo, vários cutedeiros trabalham com imãs ao lado de suas forjas.

Essa temperatura não magnética é conhecida como temperatura de Curie, ou ponto de Curie, onde o calor fornecido por uma fonte térmica causa uma desordem na disposição dos elétrons, ocasionando a perda momentânea das propriedades magnéticas dos aços. Esse ponto, ou temperatura é específico de cada tipo de metal.

2.2.3 Caldeamento e forjamento

O caldeamento pode ser definido como soldagem de duas ou mais peças de aço através de aquecimento e choque mecânico. E conforme Callister (2007), o forjamento consiste no trabalho mecânico ou na deformação de uma única peça de metal normalmente a quente; isso pode ser obtido pela aplicação de golpes sucessivos ou por compressões contínuas. É através desses processos de soldagem que obtemos o aço damasco.

O forjamento de um metal, conforme Helman & Cetlin (2015) consiste em deformá-lo por martelamento ou prensagem. É, possivelmente, a mais antiga operação de conformação mecânica, praticada pelos ferreiros com martelos e

bigornas. A operação de forjamento é classificada em forjamento em matrizes abertas e em matrizes fechadas.

No caso de uma matriz fechada, uma força atua sobre duas ou mais partes de uma matriz que possui a forma de uma peça acabada, de tal modo que o metal é deformado dentro da cavidade entre as partes da matriz. No caso de uma matriz aberta, são empregadas duas matrizes que possuem formas geométricas simples, normalmente sobre grandes peças de trabalho. Os itens forjados possuem estruturas de grãos excepcionais, e a melhor combinação de propriedades mecânicas. (Callister, 2007)

Na obtenção do aço damasco, e na cutelaria em geral, o método mais utilizado é o de matriz aberta, e é efetuado de forma manual, ou com a utilização de prensas e marteletes hidráulicos ou mecânicos.

A operação de aquecimento e forjamento do damasco vai promover um caldeamento entre as camadas de 15N20 e o outro aço. Esse caldeamento é como uma pequena “penetração” de um aço no outro devido ao que chamamos de fusão incipiente, ou seja, alguns grãos fundem-se com a temperatura e a pressão unindo os dois materiais, porém apenas superficialmente. (Leirião Filho, 2019)

Colpaert(2008) diz que é importante salientar que o processo de caldeamento, através de forjamento, não leva, por si, a material de qualidade inferior, relatando que:

As famosas espadas japonesas “*nippon-tô*”, por exemplo, são obtidas pelo forjamento controlado de pedaços de aço de alta pureza (*tamahagane*) obtido em um forno de redução (*tatara*). As peças resultantes do caldeamento de vários pedaços são sucessivamente dobradas e forjadas, resultando em um material com propriedades extraordinárias, até hoje difíceis de atingir por outro roteiro de processamento. Por fim, uma “chapa” de teor de carbono mais alto, que constituirá o gume e as faces externas da lâmina, é dobrada em torno de outra mais tenaz, que constituirá o núcleo da lâmina. O tratamento térmico também é feito de forma diferencial, de modo a conferir o máximo de dureza no gume e tenacidade ao conjunto. (Colpaert, 2008)

2.2.4 Têmpera

A têmpera consiste basicamente em um processo de aquecimento acima da zona crítica, ou seja, da fase de austenização, resfriando rapidamente na sequência, para esse resfriamento pode ser utilizado água, óleo ou um banho de sais.

A finalidade desse tratamento é a de aumentar a dureza do aço. Com o aumento da temperatura, ocorre a austenização do aço, e com o início do resfriamento se obtém a martensita, e a rapidez desse resfriamento impede que

essa estrutura se modifique para outras estruturas que pioram as propriedades do aço.

Segundo Chiaverini (2008), temos alguns fatores que afetam a temperabilidade, os que diminuem a temperabilidade, como a granulação fina da austenita e inclusões não dissolvidas (carbonetos, nitretos e inclusões não metálicas) e os que aumentam a temperabilidade, como a granulação grosseira e a homogeneidade da austenita e com alguns elementos de liga.

A têmpera pode ser realizada em fornos ou em forjas a carvão, e através de fornos por indução, e pode ser aplicada tanto na peça inteira, têmpera integral, ou em partes dela, geralmente na lâmina, têmpera seletiva, onde se deseja manter o dorso da lâmina mais maleável e o fio com uma dureza maior, melhorando assim as características gerais do que se esteja produzindo.

Para descobrir se o processo de têmpera funcionou, os cuteleiros passam uma lima no fio da faca. A lima deve escorregar sem arrancar material, deslizando suavemente. Caso a lima cause algum desgaste ou tenha um atrito maior para deslizar significa que a têmpera não funcionou ou foi incompleta, sendo necessário repetir o processo.

Após a têmpera o aço ficará muito duro, no entanto muito quebradiço, por isso, é essencial realizar após a têmpera o procedimento de revenimento, que pode ser simples, duplo ou triplo conforme a necessidade do aço que você estiver usando, para diminuir a dureza excessiva da lâmina e garantir mais tenacidade e elasticidade para o aço.

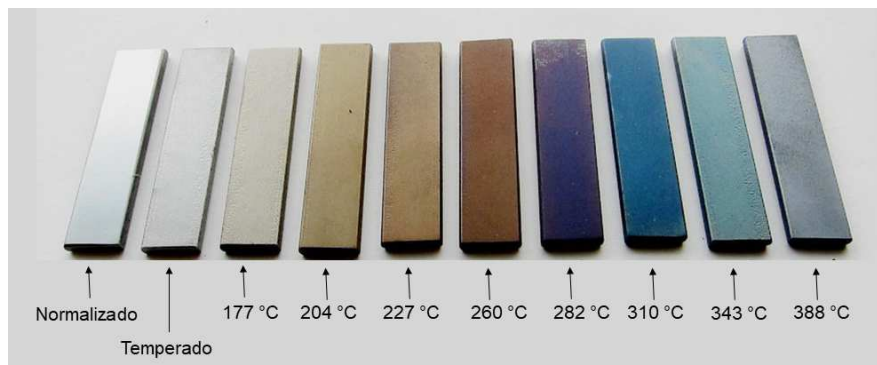
2.2.5 Revenimento

A têmpera aumenta a dureza do aço, mas também aumenta a sua fragilidade, para reduzir essa fragilidade, após a realização da têmpera, é realizado o revenimento, que reduz um pouco a sua dureza, enquanto aumenta a sua tenacidade. Como a maioria dos tratamentos térmicos, o revenimento consiste em aquecer a peça, neste tratamento, até uma temperatura abaixo da temperatura crítica, mantendo essa temperatura por um tempo e a deixando resfriar lentamente até a temperatura ambiente. Como não atinge uma temperatura muito alta, o revenimento pode ser realizado até em fornos normais e domésticos, tanto a gás, elétricos ou por indução.

Na têmpera, se forma uma estrutura martensítica, que segundo explica Colpaert (2008) é um constituinte metaestável, e que mesmo com o aquecimento abaixo da zona crítica favorece a transformação em fases mais próximas do equilíbrio, podendo atingir microestruturas compostas por ferrita e cementita, ou até carbonetos de elementos de liga, conforme a composição química dos aços.

Ainda, conforme Colpaert (2008), geralmente no revenimento, ocorre a redução da dureza, resistência mecânica e aumento da ductilidade. E até pode ocorrer aumento da dureza no revenido, causado principalmente por endurecimento por precipitação, o endurecimento secundário. Entretanto, é difícil generalizar o comportamento da tenacidade no revenido, a tendência geral é que o aumento da temperatura de revenimento cause o aumento de tenacidade, isto não ocorre uniformemente e, em algumas faixas de temperatura, fenômenos de redução de tenacidade (fragilização) podem ser observados, esses fenômenos são especialmente importantes por não se manifestarem, normalmente em nenhuma outra propriedade do aço nem através de alterações microestruturais facilmente identificáveis. Na Figura 2 temos uma referência para a temperatura de revenimento desejada pela cor apresentada pela peça em revenimento.

Figura 2- Referências de cor do aço nas faixas de temperatura de revenimento



Fonte: Os autores, adaptado de <https://berardofacascustom.blogspot.com/p/tabelas.html>

Com a variação da temperatura de revenido, ocorrem as transformações mostradas na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Faixa de temperatura de revenido e transformações

Faixa de temperatura de revenido	Transformações	dureza	observação
25 °C e 100 °C	segregação ou distribuição do carbono em direção a discordâncias	pouco afetada	
100 °C e 250 °C	precipitação de carboneto de ferro do tipo épsilon ($\text{Fe}_2\text{-3C}$), reticulado hexagonal (pode estar ausente em aços de baixo carbono e baixo teor em liga)	começa a cair, chegando a 60 HR	1º estágio do revenido
200 °C e 300 °C	austenita se transforma em bainita	continua a cair	2º estágio do revenido
250 °C e 350 °C	forma carboneto metaestável (Fe_5C_2), aços de alto carbono; a estrutura visível ao microscópio é uma massa escura, que era chamada "troostita", denominação não mais utilizada;	continua a cair, podendo chegar a pouco mais de 50HR	3º estágio do revenido
400 °C e 600 °C	recuperação da subestrutura de discordância; os aglomerados de Fe_3C passam a forma esferoidal, mantida uma estrutura de ferrita fina acicular	cai, variando de 45 HR a 25HR	
500 °C e 600 °C	somente nos aços com Ti, Cr, Mo, V, Nb ou W ocorre a precipitação de carbonetos de liga, chamada de endurecimento secundário		4º estágio do revenido
600 °C e 700 °C	recristalização e crescimento de grão; cementita precipitada esferoidal; ferrita aqui-axial; estrutura tenaz	baixa dureza, entre 5 e 20 HRC	

Fonte: Os autores, adaptado de (Chiaverini, 1988)

2.3 ENSAIO DE TEMPERABILIDADE JOMINY

A influência da composição da liga sobre a habilidade de um aço transformar-se em martensita para um tratamento por têmpera específico está relacionada a um parâmetro chamado temperabilidade. Para cada aço diferente existe uma relação específica entre as propriedades mecânicas e a taxa de resfriamento. (Callister & Rethwisch, 2016)

E conforme complementa Chiaverini (1988), a capacidade do aço endurecer, ou a profundidade de endurecimento é chamada de temperabilidade, e que ela não se refere à máxima dureza que pode ser obtida, pois essa é a função quase que exclusiva do carbono, e também não deve ser tratado somente como a respeito da obtenção da máxima dureza, em várias profundidades, em

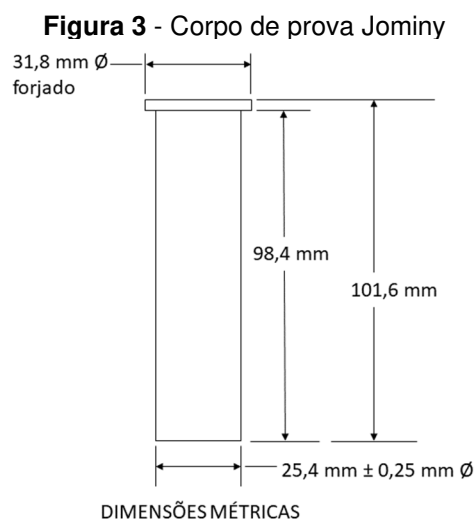
função da velocidade de resfriamento, pois a temperabilidade deve ser associada à obtenção da máxima tenacidade, em função da microestrutura formada durante o resfriamento.

Método de Jominy, também chamado de ensaio do resfriamento da extremidade. Este método foi desenvolvido por Jominy e Boegehold é atualmente o mais usado, tendo sido mesmo padronizado pelas ASTM, SAE e AISI e no Brasil pela ABNT. (Chiaverini, 1988)

O ensaio foi realizado conforme especificado na norma ASTM A255, e a sua principal finalidade é a de se determinar a temperabilidade dos materiais.

O corpo de prova Jominy padrão consiste em uma barra cilíndrica de 102 mm de comprimento e 25 mm de diâmetro. O corpo de prova é primeiramente aquecido a uma temperatura de austenização adequada e nela mantido por um tempo suficiente para a obtenção de uma estrutura austenítica uniforme. A seguir ele é colocado num suporte, e um jato d'água incide numa das suas extremidades. A vantagem do ensaio Jominy é que, num único corpo de prova, pode-se obter uma gama de velocidades de resfriamento, variando desde um resfriamento rápido em água numa extremidade até um resfriamento lento ao ar na outra extremidade. Após a completa transformação da austenita, duas superfícies planas e opostas são retificadas longitudinalmente e numa delas é feita uma série de impressões de dureza, cobrindo todo o comprimento da superfície retificada. Os resultados obtidos, quando colocados em gráfico, formam a curva Jominy de temperabilidade. (Reed-Hill, 1982)

O corpo de prova e suas dimensões é mostrado na Figura 3.



Fonte: Os autores, adaptado da norma ASTM A 255- 02

2.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Uma das características mais importantes dos aços, e das ligas metálicas, são as propriedades mecânicas, pois desde o projeto até a sua utilização são baseadas nestas propriedades.

Segundo Callister (2007), torna-se necessário conhecer as características do material e projetar o membro a partir do qual ele é feito, tal que qualquer deformação resultante não seja excessiva e não cause fratura.

As principais propriedades mecânicas são:

- Resistência mecânica- capacidade dos materiais de resistir a esforços de natureza mecânica, como tração, compressão, cisalhamento, torção, flexão e outros sem romper e/ou deformar.
- Elasticidade - é a capacidade que o material apresenta de deformar elasticamente. A deformação elástica de um material, acontece quando o material é submetido a um esforço mecânico e ele tem suas dimensões alteradas, e quando o esforço é cessado o material volta as suas dimensões iniciais.
- Ductilidade e/ou Plasticidade – perecida com a elasticidade, é a capacidade que o material apresenta de deformar plasticamente, com a diferença de que essa deformação agora é permanente e anterior a sua ruptura.
- Dureza – é uma medida da resistência do material a deformações plásticas localizadas, como uma indentação ou um risco.
- Resiliência – é a capacidade do material absorver e devolver energia mecânica sem deformação permanente. Quanto mais resiliente, menor a fragilidade.
- Tenacidade – é a capacidade do material de absorver energia antes de sua ruptura. Representa também a resistência do material ao choque mecânico.

Durante o uso, os materiais são submetidos aos mais diversos esforços mecânicos, podendo estes serem combinados ou não. Assim é extremamente importante conseguir prever o comportamento do material por meio do carregamento aplicado a ele. Para conseguir prever esse comportamento são utilizados os ensaios mecânicos.

A determinação das propriedades mecânicas de um material metálico é realizada por meio de vários ensaios. Geralmente esses ensaios são destrutivos, pois promovem a ruptura ou a inutilização do material. Existem ainda os ensaios chamados não-destrutivos, utilizados para determinação de algumas propriedades físicas do metal, bem como para detectar falhas internas do mesmo. Na categoria dos ensaios destrutivos estão classificados os ensaios de tração, dobramento, flexão torção, fadiga, impacto, compressão e outros. O ensaio de dureza, que, embora possa, em certos casos, não inutilizar a peça ensaiada, também está incluído nessa categoria. (Souza, 1982)

Alguns dos ensaios serão realizados de acordo com a norma ASTM A370 / ASME SA 370 e os principais ensaios mecânicos que serão utilizados neste trabalho são:

- Ensaio de Dureza: obtém informações através do resultado da profundidade de penetração, que acontece por meio da aplicação de uma carga leve e logo seguida outra de maior intensidade.
- Ensaio de Impacto: nesse ensaio, o corpo em questão é submetido a uma flexão provocada por impacto por um martelo pendular.

Os ensaios mecânicos simulam a aplicação dos diferentes tipos de forças externas. Assim, a correta interpretação dos resultados dos ensaios nos fornece os valores das diversas propriedades mecânicas do material, o que nos auxilia na escolha desses materiais, conforme o seu uso e pelas solicitações mecânicas a que serão submetidos.

Os corpos de prova seguem padrões de dimensões estabelecidas por normas técnicas. Dessa forma, os efeitos dos ensaios nos corpos de prova podem ser comparados de ensaio para ensaio.

Um método descreve o correto procedimento para se efetuar um determinado ensaio mecânico. Desse modo, seguindo-se sempre o mesmo método, os resultados obtidos para um mesmo material são semelhantes e reprodutíveis onde quer que o ensaio seja executado. O método de ensaio fornece ainda os requisitos exigidos para o equipamento que vai ser usado, além do tamanho e forma dos corpos de prova a serem ensaiados. O método de ensaio define também os conceitos importantes relacionados ao ensaio em questão e menciona como os resultados devem ser fornecidos em um relatório final. (Souza, 1982)

2.4.1 Impacto – Charpy

Segundo Callister (2007), o ensaio Charpy com entalhe em “V” (CVN – *Charpy V-notch*) é a mais comumente utilizada nos Estados Unidos. Tanto na técnica Charpy quanto na técnica Izod, o corpo de prova possui o formato de

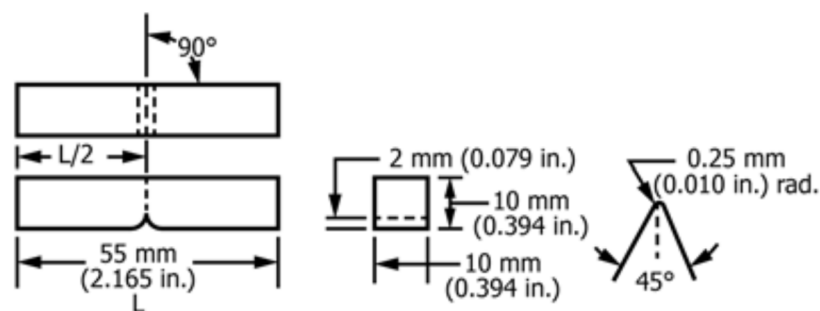
uma barra com seção transversal quadrada na qual é usinado um entalhe em “V”.

No ensaio Charpy, o corpo de prova é bi apoiado horizontalmente e recebe o impacto de um pêndulo de peso especificado. O corpo de prova sofre uma flexão sob impacto e fratura com uma alta taxa de deformação (aproximadamente 10^3 s^{-1}). Na região próxima ao entalhe, aparece um estado triaxial de tensões. Este estado triaxial de tensões e a alta taxa de carregamento propiciam uma tendência para ocorrência de fratura frágil.

Os resultados do ensaio de impacto são geralmente apresentados como a energia absorvida no processo de fratura do corpo de prova. A energia absorvida no processo de fratura varia muito com a temperatura de ensaio. Por esta razão são realizados ensaios em várias temperaturas. (Padilha, 2006)

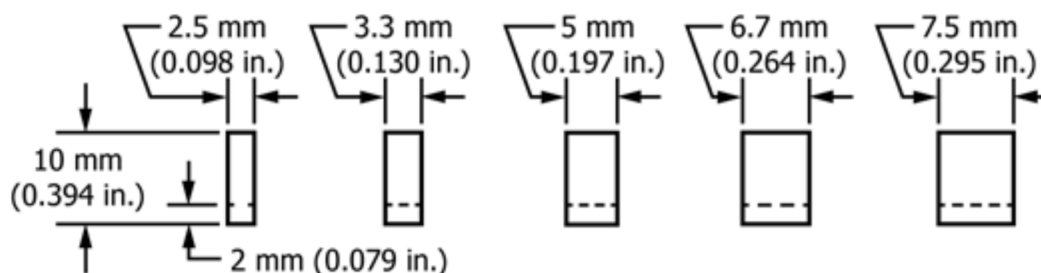
Conforme a norma ASTM A370 / ASME SA 370, as medidas do corpo de prova de tamanho padrão são demonstradas na Figura 4, e dos corpos de prova de tamanho reduzido são demonstrados na Figura 5 com medidas em milímetros, os valores entre parênteses estão expressos em polegadas (*inches*).

Figura 4 - Corpo de prova – Amostra de tamanho padrão real



Fonte: norma ASTM A370 / ASME SA 370

Figura 5 - Corpo de prova – Amostra de tamanho padrão reduzido



Fonte: norma ASTM A370 / ASME SA 370

Segundo Souza (1982), não é recomendável efetuar apenas um ensaio de impacto para se tirar alguma conclusão do material ensaiado, como os resultados obtidos com vários corpos de prova de um mesmo metal são muito

diversos entre si, torna-se necessário realizarmos, no mínimo três ensaios para obtermos uma média aceitável como resultado.

Souza (1982) ainda diz que nos ensaios de impacto, não existe a possibilidade de correlacionar resultados obtidos com corpos de prova de tamanhos diferentes. Expressar a energia absorvida por unidade de área como resultado de ensaio não tem significado prático, pois os valores obtidos não são os mesmos, como no caso da tensão de tração, por exemplo, que independe do tamanho do corpo de prova.

2.4.2 Dureza

Segundo Souza (1982), a propriedade dureza é amplamente utilizada na especificação de materiais, nos estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas e na comparação de vários materiais. É que essa propriedade tem diferentes significados.

Essa conceituação divergente da dureza depende da experiência de cada um ao estudar o assunto. Para um metalurgista, dureza significa resistência à deformação plástica permanente; um engenheiro mecânico define a dureza como a resistência à penetração de um material duro no outro; para um projetista, a dureza é considerada uma base de medida para o conhecimento da resistência e do tratamento térmico ou mecânico de um metal e da sua resistência ao desgaste; para um técnico em usinagem de metais, a dureza é uma medida da resistência ao corte do metal; e para um mineralogista, a dureza tem um significado diferente, ou seja, o de medir a resistência ao risco que um material pode fazer em outro. (Souza, 1982)

Com essa diversidade de conceitos, os ensaios de dureza são separados em três tipos principais, que dependem da maneira com que o ensaio é conduzido, ou seja, por penetração; por choque e por risco, sendo este último o menos utilizado em metais. Neste trabalho utilizaremos os métodos baseados em penetração.

A escala de dureza mais antiga é a escala Mohs, de 1822, e que é baseada na capacidade de um material riscar o outro.

A próxima é a escala Brinell, que foi proposta em 1900 por J.A. Brinell., possui como símbolo HB, do inglês *Hardness Brinell*, ou *dureza Brinell*.

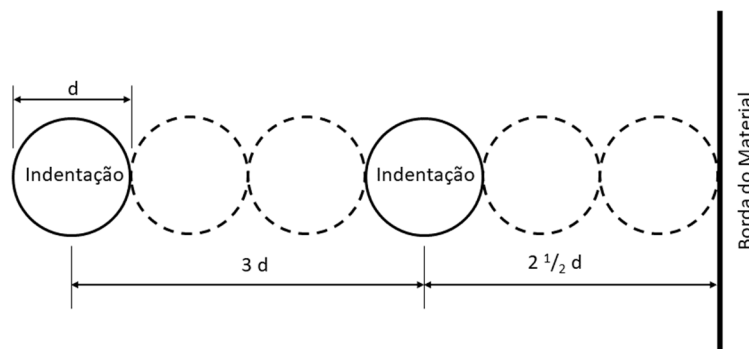
Conforme Souza (1982), a dureza Vickers foi introduzida em 1925 por Smith e Sandland, mas recebeu seu nome porque a Companhia Vickers-Armstrong Ltda fabricou as máquinas mais conhecidas para operar com esse tipo de dureza.

Ainda há a dureza Rockwell, que foi introduzida em 1922 por Stanley Rockwell, e suas vantagens fazem deste método um dos mais utilizados atualmente.

A dureza Rockwell, simbolizada por HR, elimina o tempo necessário para medição de qualquer dimensão da impressão causada, pois o resultado é lido direta e automaticamente na máquina de ensaio, sendo, portanto, um ensaio mais rápido e livre de erros pessoais. Além disso, utilizando penetradores pequenos, a impressão pode muitas vezes não prejudicar a peça ensaiada e pode ser usada também para indicar diferenças pequenas de dureza numa mesma região de uma peça. (Souza, 1982)

O ensaio de Dureza Rockwell é regido pela norma ASTM – E18 – 15, e conforme essa norma, as indentações devem possuir uma distância mínima das bordas do material, bem como entre si que corresponde a 2,5 vezes o diâmetro (d) da indentação da borda do material para a primeira indentação e de 3 vezes o diâmetro (d) da indentação entre indentações, conforme demonstra a Figura 6

Figura 6 - Distância mínima entre indentações



Fonte: Os autores, adaptado da norma ASTM E 18 - 15

Como explica Souza (1982), os penetradores podem ser esféricos com uma esfera de aço temperado, ou cônicos com cone de diamante com uma conicidade de 120° , que também é conhecido como penetrador - Brale.

O ensaio consiste em duas etapas, a primeira na aplicação de uma pré-carga que causa uma melhor fixação do CP, e posteriormente é aplicada a carga principal do ensaio.

Com qualquer desses dois penetradores, a carga menor é então aplicada para fixar bem o corpo de prova, ou seja, para garantir um contato firme com a superfície do corpo de prova. Depois de aplicada e retirada a carga maior, a profundidade de impressão é dada diretamente no mostrador da máquina, em forma de um número de dureza, após voltar a carga ao valor menor. (Souza, 1982)

Segundo Callister e Rethwisch (2016), existem várias escalas que são utilizadas a partir de diferentes indentadores e a aplicação de cargas variadas, que permitem que o ensaio seja realizado praticamente em todas as ligas metálicas.

A dureza Rockwell apresenta várias escalas, conforme demonstrado por Souza (1982) na Tabela 4.

Tabela 4 - Escala de dureza Rockwell e aplicações

Símbolo de escala	Penetrador	Carga maior (kgf)	Cor da escala	Aplicações
A	Diamante	60	Preta	Carbonetos cementados, aço fino, aços endurecidos de baixa camada de endurecimento.
C	Diamante	150	Preta	Aço fofo duro, fofo malável perlítico, titânio, aço endurecido e outros metais mais duros que HRB = 100.
D	Diamante	100	Preta	Aplicações de aços com camada de endurecimento entre os dois casos acima mencionados, fofo maleável perlítico.
B	Esfera de 1,59 mm Ø	100	Vermelha	ligas de cobre, aços molles, ligas de alumínio, ferro maleável, etc.
E	Esfera de 3,17 mm Ø	100	Vermelha	Fofo, ligas de Al e Mg, metais para mancais.
F	Esfera de 1,59 mm Ø	60	Vermelha	Ligas de Cu recozidas, chapas finas de metais moles.
G	Esfera de 1,59 mm Ø	150	Vermelha	Fofo maleável, liga Cu-Ni-Zn, cupro níqueis, aplicações até HRG = 92 para evitar achatamento da esfera
H	Esfera de 3,17 mm Ø	60	Vermelha	Metais para mancais e outros metais muito moles ou finos, usar a menor esfera e maior carga possíveis.
K	Esfera de 3,17 mm Ø	150	Vermelha	
L	Esfera de 6,35 mm Ø	60	Vermelha	
M	Esfera de 6,35 mm Ø	100	Vermelha	
P	Esfera de 6,35 mm Ø	150	Vermelha	
R	Esfera de 12,70 mm Ø	60	Vermelha	
S	Esfera de 12,70 mm Ø	100	Vermelha	
V	Esfera de 12,70 mm Ø	150	Vermelha	

Fonte: os Autores, adaptado de Souza (1982)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O método utilizado foi o experimental baseado no projeto de Pazini (2011), o qual executou um corpo de prova para o ensaio de impacto, outro para um ensaio de tração e realizou também um ensaio de dureza. Porém os resultados alcançados não podem ser comparados, primeiro pela diferença na quantidades de camadas e forma de caldeamento do damasco, além das possíveis diferenças entre os equipamentos utilizados nos ensaios. A seguir é feita a descrição de todos os materiais e procedimentos adotados.

Foram adquiridas 4 barras do aço 5160 de 400mm x 50,80 mm x 4,76 mm e 3 barras do aço 15N20 de 600mm x 50 mm x 3 mm para a confecção dos corpos de prova em aço damasco. E mais duas barras cilíndricas do aço SAE 5160, uma com diâmetro de 31,75 mm x 300 mm de comprimento e a outra com diâmetro de 19,05 mm x 500 mm de comprimento

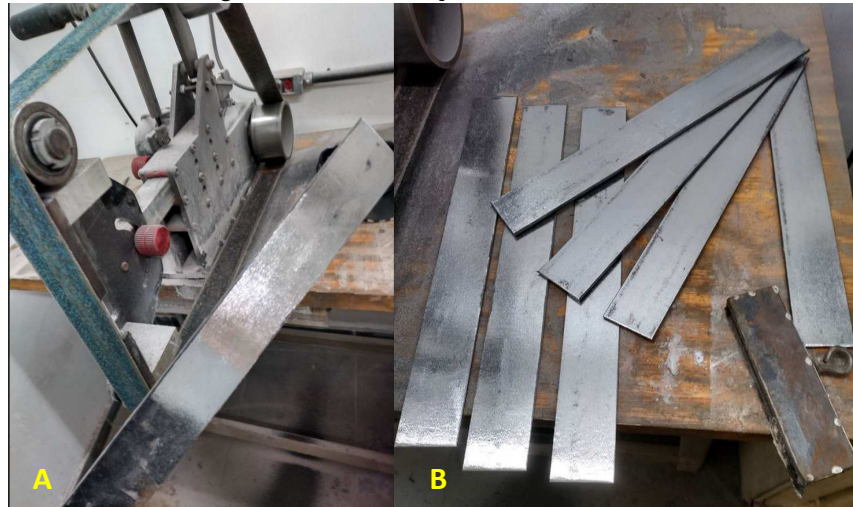
3.1 CONFECÇÃO DO AÇO DAMASCO

O aço damasco foi confeccionado na oficina da Escola Brasileira de Cutelaria, através de forjamento por caldeamento.

Para o forjamento do aço damasco foram utilizadas sete chapas de aço, sendo 4 chapas de aço SAE 5160 de 50 mm x 4,76 mm x 600 mm e 3 chapas de aço 15N20 de 50 mm x 3 mm x 400 mm. Das chapas do aço 15N20 foram extraídos 200 mm no comprimento para ficarem nas mesmas medidas das chapas do aço SAE 5160, o corte foi realizado em uma ferramenta policorte.

Após o corte foi efetuada a remoção de oxidações e outras impurezas superficiais por abrasão em uma lixadeira de cinta (Figura 7 A), ficando as chapas conforme mostra a Figura 7 B.

Figura 7 - Barras de aço 15n20 e SAE 5160



Fonte: os Autores

Após a inspeção das chapas, optou-se por fazer um *billet* com 7 camadas de 300 mm, que foi soldado utilizando o processo de eletrodo revestido (Figura 8), e em seguida foi soldada também uma pequena barra de aço para servir de apoio, facilitando o manuseio do *billet* na forja.

Anteriormente, foi utilizada uma barra maior que, devido ao peso do *billet*, revelou-se ineficiente.

Figura 8 - Soldagem do *billet*



Fonte: os Autores

Com a forja acesa e aquecida o *billet* foi inserido e após atingir uma temperatura próxima a de forjamento foi retirado da forja para adição do borato de sódio, um fundente conhecido como boráx, que auxilia na eliminação de

oxigênio no interior das camadas do damasco, facilitando o caldeamento e evitando a formação de inclusões, sendo recolocado novamente na forja.

Após algum tempo, ao atingir a temperatura de forjamento, o *billet* foi retirado da forja e caldeado em uma prensa hidráulica, e novamente levado à forja, os equipamentos são mostrados na Figura 9

Figura 9 - Prensa e forja utilizadas



Fonte: os Autores

Foram efetuadas várias etapas de caldeamento na prensa hidráulica, até o *billet* ser estirado, atingindo uma dimensão de 560 mm, um acréscimo de 260 mm, foi resfriado no ar até uma temperatura próxima da temperatura ambiente.

Em seguida o *billet* teve as suas partes superior e inferior limpas por abrasão através de uma esmerilhadeira.

Efetuada a remoção das carepas, o *billet* foi então dividido em 06 partes iguais, por sugestão do Cutedeiro Roger Glasser, que foram empilhadas e soldadas novamente, repetidas todas as fases de caldeamento com novas adições de boráx.

Como resultado parcial, ao final de todos esses procedimentos, que foram realizados em um turno de aproximadamente 10 horas, foi obtida uma barra de damasco com 42 camadas, com aproximadamente 300 mm e 30 mm de altura, demonstrada na Figura 10.

Figura 10 - Barra de damasco com 42 camadas.



Fonte: os Autores

Os trabalhos do 1º dia de forja terminaram as 22 horas.

A seguir a barra de damasco foi novamente limpa em suas faces por abrasão, foi aquecida e forjada para ser feito um ajuste no alinhamento, atingindo o comprimento de 405 mm. Foi então dividida em 04 partes de 102 mm que foram empilhadas e soldadas, chegando a um total de 168 camadas no damasco conforme demonstra a Figura 11

Figura 11 - *Billet de damasco com 168 camadas*



Fonte: os Autores

Após mais etapas de caldeamento e forjamento, ao atingir medidas ideais o *billet* foi separado em partes, e forjado nas medidas próximas para a usinagem de corpos de prova, uma para o ensaio de temperabilidade Jominy, conforme a Figura 12.

Figura 12 - Corpo prova Jominy de damasco



Fonte: os Autores

Outra parte do material passou por mais etapas de caldeamento e forjamento, até atingir as proporções ideais para confeccionar entre 3 e 4 corpos de prova para o ensaio de impacto Charpy-V, e por fim, o material restante será utilizado no ensaio de dureza, tendo as suas extremidades extraídas para utilização em ensaios de metalografia

Os trabalhos do 2º dia de forja terminaram por volta das 20 horas, sempre com o apoio e orientação do Sr. Fábio.

3.2 CORPOS DE PROVA PARA ANÁLISES METALOGRAFICAS

Os corpos de prova foram embutidos no laboratório de ensaios mecânicos da FATEC Itaquerá, sob a supervisão do professor Edgar Dutra.

Para o material separado para metalografia foi realizado o embutimento em resina epóxi de duas amostras do aço damasco, uma com 168 camadas e a segunda com 42 camadas, Figura 13, e duas amostras dos aços base do damasco, uma do aço 15n20 e a última do aço SAE 5160, respectivamente, como mostra a Figura 14.

Figura 13 - Damasco para ensaios de metalografia



Fonte: os Autores

Figura 14 - Aços UHB15n20 e SAE 5160



Fonte: os Autores

Para cada uma das amostras foram utilizadas a resina epóxi SQ-2004 de diglicidil éter de bisfenol a modificado e endurecedor Epóxi SQ 3154 para resina epóxi a base de poliamida (Figura 15).

Figura 15 - Endurecedor e Resina Epóxi.



Fonte: os Autores

Conforme orientação foi utilizada a proporção de duas partes de resina para uma de endurecedor, totalizando 34 g por amostra (22,6 g de resina e 11,3 g de endurecedor) conforme demonstra a Figura 16.

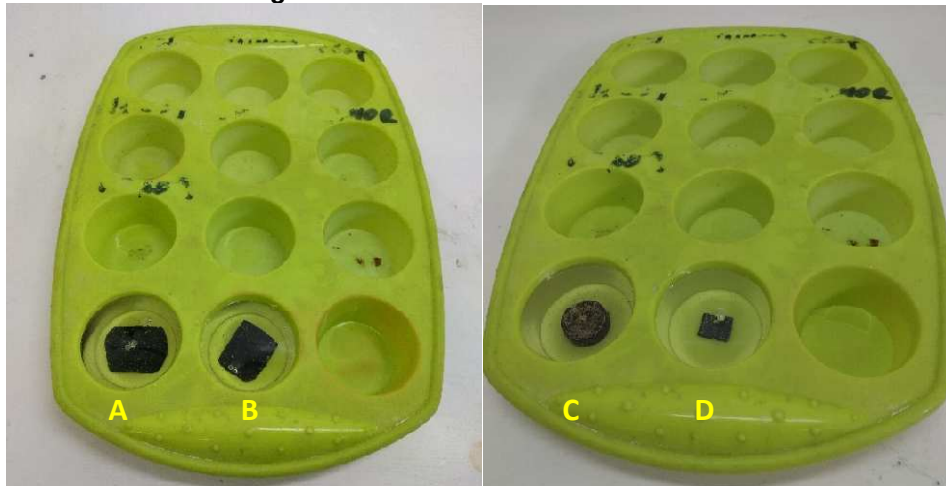
Figura 16 - Pesagem da resina



Fonte: os Autores

As amostras foram embutidas em uma forma de silicone de cozinha, na Figura 17 temos as amostras, sendo a amostra A de aço damasco com 168 camadas, a amostra B de aço damasco com 42 camadas, a amostra C do aço SAE 5160 e amostra D do aço UHB 15n20.

Figura 17 - Embutimento das amostras



Fonte: os Autores

Após um período de cura de 3 dias as amostras foram retiradas das formas para serem preparadas para análise metalográfica.

O preparo inicial consistiu em um lixamento manual com lixa de grãos 180, para remoção de rebarbas e marcas de corte, após foram utilizadas lixas de grão 220 e 320, e no laboratório de ensaios mecânicos da FATEC Itaquera o lixamento ocorreu nas lixadeiras metalográficas (Figura 18) com lixas 400, 600, 800 e 1200.

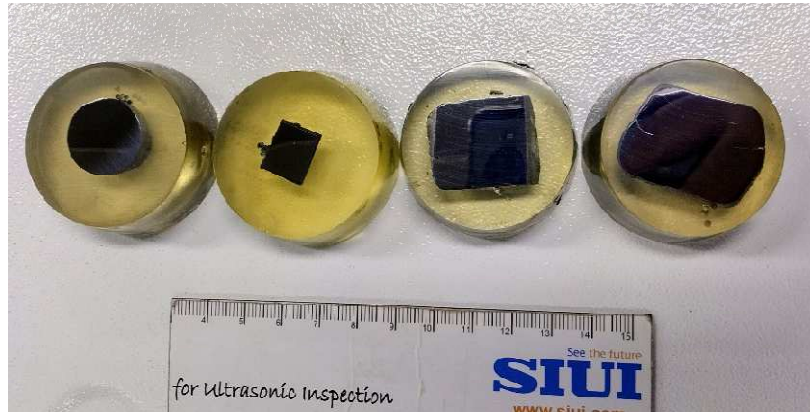
Figura 18 - Lixadeira e politriz



Fonte: os Autores

No laboratório de micrografia e metalografia da FATEC Itaquera foi efetuado o polimento em uma lixadeira metalográfica, com pasta de diamantes de 6 μm e de 1 μm para o acabamento ficando as amostras conforme demonstra a Figura 19.

Figura 19 - Amostras após o polimento



Fonte: os Autores

Após o polimento, as amostras foram atacadas com uma solução de 3 % de nital em álcool isopropílico, o que resultou na revelação das camadas das amostras de damasco como é visto na Figura 20

Figura 20 - Amostras após o ataque com nital



Fonte: os Autores

3.3 CORPOS DE PROVA - ENSAIO DE IMPACTO CHARPY-V

Os corpos de prova para o ensaio Charpy-V foram usinados no laboratório de mecânica de precisão da Fatec São Paulo, sob orientação do Professor Silvestre da Silva Neto, em uma fresa Vecker modelo VK-406V, e cortados em uma serra da marca Ronemag.

De uma barra cilíndrica do aço SAE 5160 com diâmetro de 19 mm foram usinados três corpos de prova, de uma chapa do aço 15n20 de 3 mm de espessura foram cortados quatro corpos de prova subdimensionados e da barra de aço damasco de 200 mm x 12mm x 12 foram extraídos mais três corpos de prova, conforme demonstra a Figura 21.

Figura 21 - Corpos de prova Charpy-V

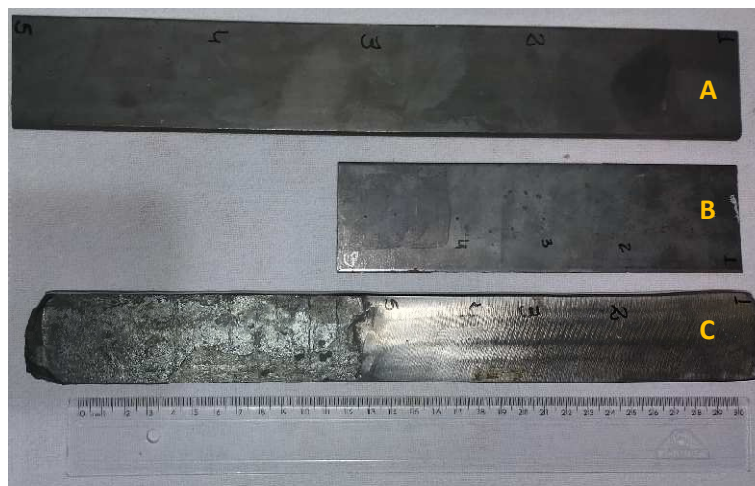


Fonte: os Autores

3.4 CORPOS DE PROVA – DUREZA ROCKWELL

O restante do aço damasco (Figura 22 C), uma chapa do SAE 5160 com 50 mm X 6,35 mm x 330 mm (Figura 22 A) e uma parte da chapa do aço 15n20 (Figura 22 B) com 50 mm X 3 mm X 185 mm foram utilizados como CP para o ensaio de dureza Rockwell, conforme mostra a figura 22, abaixo.

Figura 22 - Corpos de prova - dureza Rockwell



Fonte: os Autores

3.5 CORPO DE PROVA – ENSAIO DE TEMPERABILIDADE JOMINY

Os corpos de prova para o ensaio de temperabilidade Jominy foram usinados no laboratório de Usinagem da Fatec Itaquera em um torno mecânico Nardini, modelo NODUS 220 para o do aço SAE 5160 onde foi utilizada uma barra cilíndrica de 33 mm de diâmetro, Figura 23 A. O corpo de prova do aço damasco foi usinado de uma barra cilíndrica de 33mm de diâmetro, forjada pelos autores, Figura 23 B. Foi utilizada uma furadeira de bancada S.A. Yadoya, modelo FY-S 25, para realização de furos guia para torneamento e usinada no mesmo torno.

Figura 23 - Material para corpos de prova do ensaio Jominy



Fonte: os Autores

A Figura 24 demonstra os corpos de prova após a usinagem, sendo o corpo de prova superior do aço SAE 5160 e a inferior do aço damasco com 168 camadas, ainda sem a revelação do seu padrão.

Figura 24 - Corpos de prova - Jominy



Fonte: os Autores

Como não foi possível adquirir uma barra do aço 15n20 de dimensões apropriadas, não foi feito corpo de prova para o ensaio de temperabilidade.

Após o término da fabricação e usinagem dos corpos de prova, os fabricados em aço damasco sofreram um ataque químico em percloroeto de ferro

para que o padrão de linhas do damasco fosse revelado, conforme demonstra a Figura 25

Figura 25 - Corpos de prova em aço damasco



Fonte: os Autores

3.6 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY-V

O ensaio Charpy-V foi realizado no Laboratório de Materiais para Construção Mecânica da Fatec SP, sob orientação do professor Edson Gomes Barbosa. Inicialmente foi utilizada uma brochadeira para a realização dos chanfros em “V” em todos os nove corpos de prova preparados para o ensaio (Figura 26).

Figura 26 - Brochadeira para entalhe em "V"



Fonte: os Autores

O ensaio foi realizado na máquina para ensaios Charpy convencional, da marca Heckert, com capacidade de 300 Joules (J).

Figura 27 - Máquina Charpy



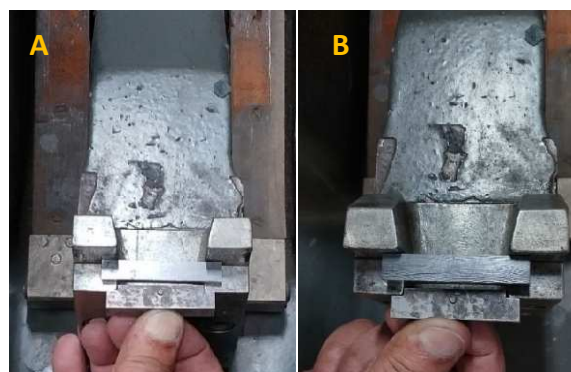
Fonte: os Autores

A máquina consiste em um pêndulo com um martelo que atingem a amostra que fica bi apoiada na base do equipamento, inicialmente é efetuada uma liberação do pêndulo sem corpos de prova para coletar a energia absorvida pelo atrito do eixo do martelo, sendo aferido a energia de 2,8 Joules, que deve ser descontada nos ensaios carregados.

Os CP foram numerados como CP 1, CP 2 e CP 3 para cada um dos materiais testados, ou seja, aço damasco de 168 camadas, aço UHB 15N20 e aço SAE 5160. Destacamos que o CP 2 do damasco teve o chanfro usinado no sentido longitudinal das camadas, detalhe que foi observado apenas após a revelação do padrão.

Os corpos de prova foram alinhados e centralizados na base da máquina de Charpy, na Figura 28 A observamos o CP de aço UHB 15N20 e na Figura 28 B observamos o CP em aço damasco.

Figura 28 - Alinhamento dos corpos de prova - ensaio Charpy



Fonte: os Autores

Após cada alinhamento o martelo é liberado, atingindo as amostras, registrando a energia absorvida a cada impacto, e todos os CP sofreram fraturas. Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente.

A dimensão lateral e a expansão lateral foram medidas utilizando um paquímetro Digimess com precisão de 0,02 mm.

3.7 ENSAIO JOMINY

O ensaio Jominy foi realizado na sala de preparação de amostras, do departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP, sob a supervisão do professor Dr. Eduardo Franco de Monlevade.

Os CP de aço damasco e do aço SAE 5160 foram acondicionados em cadinhos, com uma mistura de carvão e bário carbonato, essa mistura reduz a decarbonetação das amostras, conforme demonstra a Figura 29, no cadinho maior foi acondicionado o CP de aço SAE 5160, e no cadinho menor, à direita está o CP de aço damasco, já completamente coberto pela mistura.

Figura 29 - CP Jominy sendo preparados



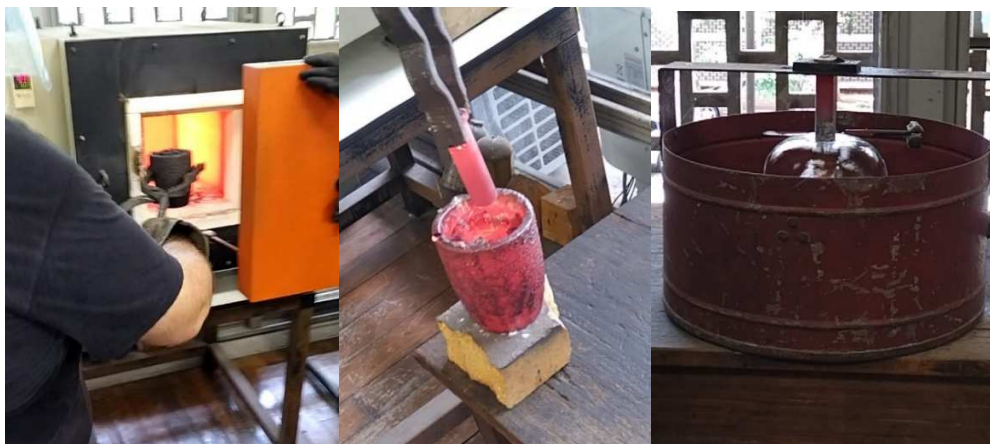
Fonte: os Autores

Para o ensaio foi utilizado um forno Brasimet e um dispositivo Jominy, ambos mostrados na Figura 30, o dispositivo consiste em um suporte para o CP, uma válvula para água, uma trava de proteção para que a água somente atinja o CP após a sua correta fixação no suporte, e um tambor para contenção e escoamento da água.

Figura 30 - Equipamentos para o ensaio Jominy

Fonte: os Autores

O forno foi ligado, e ao atingir 803°C foi inserido o cadinho com o CP de aço damasco, quando alcançou a temperatura de austenização, 850°C , o CP permaneceu por mais 30 minutos, foi retirado do forno e imediatamente acondicionado no suporte do dispositivo Jominy, com o fluxo de água já ativado, o CP deveria permanecer com o resfriamento pela água por 10 minutos, mas por uma limitação do dispositivo Jominy utilizado (estava com uma vazão insuficiente para o escoamento da água), ele permaneceu por apenas 3 minutos, todo esse procedimento, inclusive o tempo curto de têmpera, se repetiu para o CP do aço SAE 5160, sequência demonstrada na Figura 31

Figura 31 - Sequência do ensaio Jominy

Fonte: os Autores

O ensaio Jominy exige ainda a medição da dureza Rockwell dos CPs, esse segundo ensaio foi realizado na FATEC SP, no Laboratório de Materiais para Construção Mecânica da Fatec SP, sob orientação do professor Edson Gomes Barbosa.

Os CP foram marcados, a partir da extremidade de resfriamento inicialmente a cada 1,6 mm para as 16 marcas iniciais, as próximas 8 com 3,2 mm e as 2 últimas com 6,35 mm. Todas as marcas foram efetuadas com a utilização de um graminho, ou traçador de altura Digimess, a Figura 32 mostra o aparelho e a sua utilização.

Figura 32 - Graminho e sua utilização



Fonte: os Autores

3.8 ENSAIO DE DUREZA

Como já foi descrito, os ensaios de dureza foram realizados na Fatec SP, onde foi utilizado um durômetro de bancada Galileo D 200 (Figura 33), para dureza Rockwell.

Figura 33 - Durômetro Galileo D-200



Fonte: os Autores

Foram impressas cinco indentações em cada um dos CP anteriormente descritos e visualizados pela Figura 22, onde inicialmente foi aplicada uma pré-carga de 10 kg de forma manual e após 10 segundos foi aplicada automaticamente a carga principal de 150 kg.

Figura 34 - Ensaio de dureza - CP 15N20



Fonte: os Autores

3.9 ANÁLISE METALOGRAFICA

Com o preparo e o ataque químico da solução de nital a 3 % nas amostras, foram feitas micrografias no Laboratório de Microscopia e Metalografia da Fatec Itaquera, sob a supervisão do professor Me Edgar de Souza Dutra, utilizando um microscópio Zeiss Axio Vert.A1 acoplado a uma câmera digital AxioCam ERC-5s, e ligado a um microcomputador, equipamento mostrado na Figura 35.

Figura 35 - Microscópio Zeiss Axio Vert.A1



Fonte: os Autores

Foram feitas micrografias nas amostras com ampliações de 50 X, 100 X, 200 X, 500 X e 1000 X.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Do ensaio de impacto, como ensina Souza (1982), que quanto menor for a energia absorvida, mais frágil será o comportamento do material, e conforme Callister & Rethwisch (2016), os materiais frágeis são considerados, de maneira aproximada, como aqueles que possuem uma deformação de fratura menor que cerca de 5%. Entretanto, conforme foram analisados os resultados obtidos na Tabela 5, e as macrografias (Figura 36), foi notado que o material que obteve a menor absorção de energia foi o UHB 15N20, e a sua macrografia apresenta a maior área de fratura dúctil, Souza (1982) explica que pode-se ainda empregar corpos de prova de tamanho reduzido, caso não seja possível obter os de tamanho normal, mas os resultados obtidos não podem ser comparados com os resultados obtidos dos corpos de prova de tamanho normal.

Com os ensaios, obtivemos os valores demonstrados na Tabela 5. A coluna “Energia absorvida” corresponde a subtração da “Energia de atrito” e “Energia registrada”.

Tabela 5 - Resultados do ensaio Charpy

material	corpo de prova	Energia em Joules (J)			dimensão (mm)	expansão lateral (mm)	% deformação do CP	% deformação do material
		energia registrada	energia atrito	energia absorvida				
UHB 15N20	1	8,0	2,8	5,2	3,12	3,38	8,33%	7,37%
	2	7,4	2,8	4,6	3,10	3,28	5,81%	
	3	7,2	2,8	4,4	3,14	3,39	7,96%	
	Média	7,5		4,7				
SAE 5160	1	9,9	2,8	7,1	10,22	10,41	1,86%	1,88%
	2	10,7	2,8	7,9	10,00	10,21	2,10%	
	3	9,2	2,8	6,4	10,10	10,27	1,68%	
	Média	9,9		7,1				
Damasco	1	14,3	2,8	11,5	10,06	10,21	1,49%	1,16%
	2 *	12,0	2,8	9,2	10,10	10,10	0,00%	
	3	14,1	2,8	11,3	10,06	10,26	1,99%	
	Média	13,5		10,7				

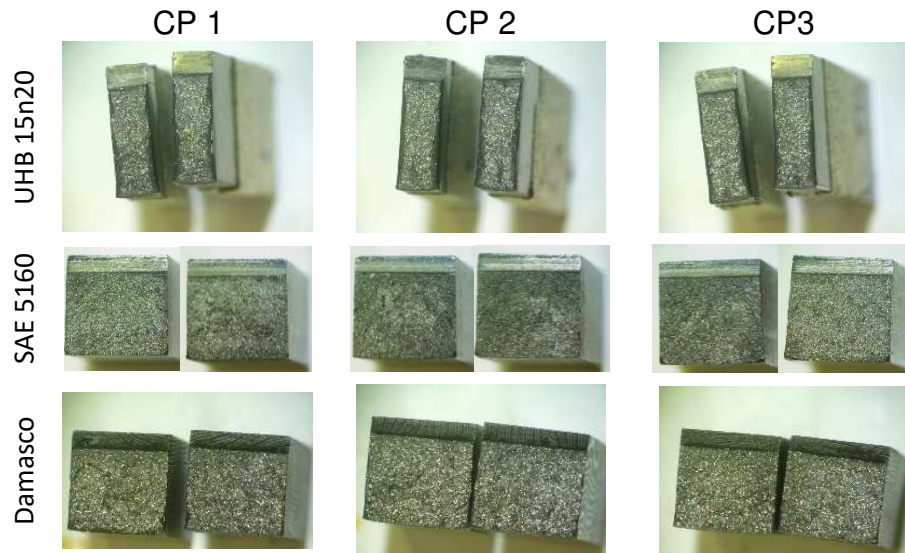
Fonte: Os autores.

Com as macrografias abaixo (Figura 36), constata-se que os CP de 15N20 apresentam a maior área de fratura dúctil, a borda em um tom mais escuro é mais acentuada, no restante das amostras, essa área foi menor, e praticamente

inexistente no aço damasco, cujos CP apresentaram também a menor expansão lateral.

Vale lembrar ainda que o baixo valor do CP 2 do aço damasco se deve ao alinhamento do sentido de caldeamento, que teve o chanfro usinado em um sentido diferente dos outros dois CP.

Figura 36 - CP Charpy - 15N20, SAE 5160, damasco



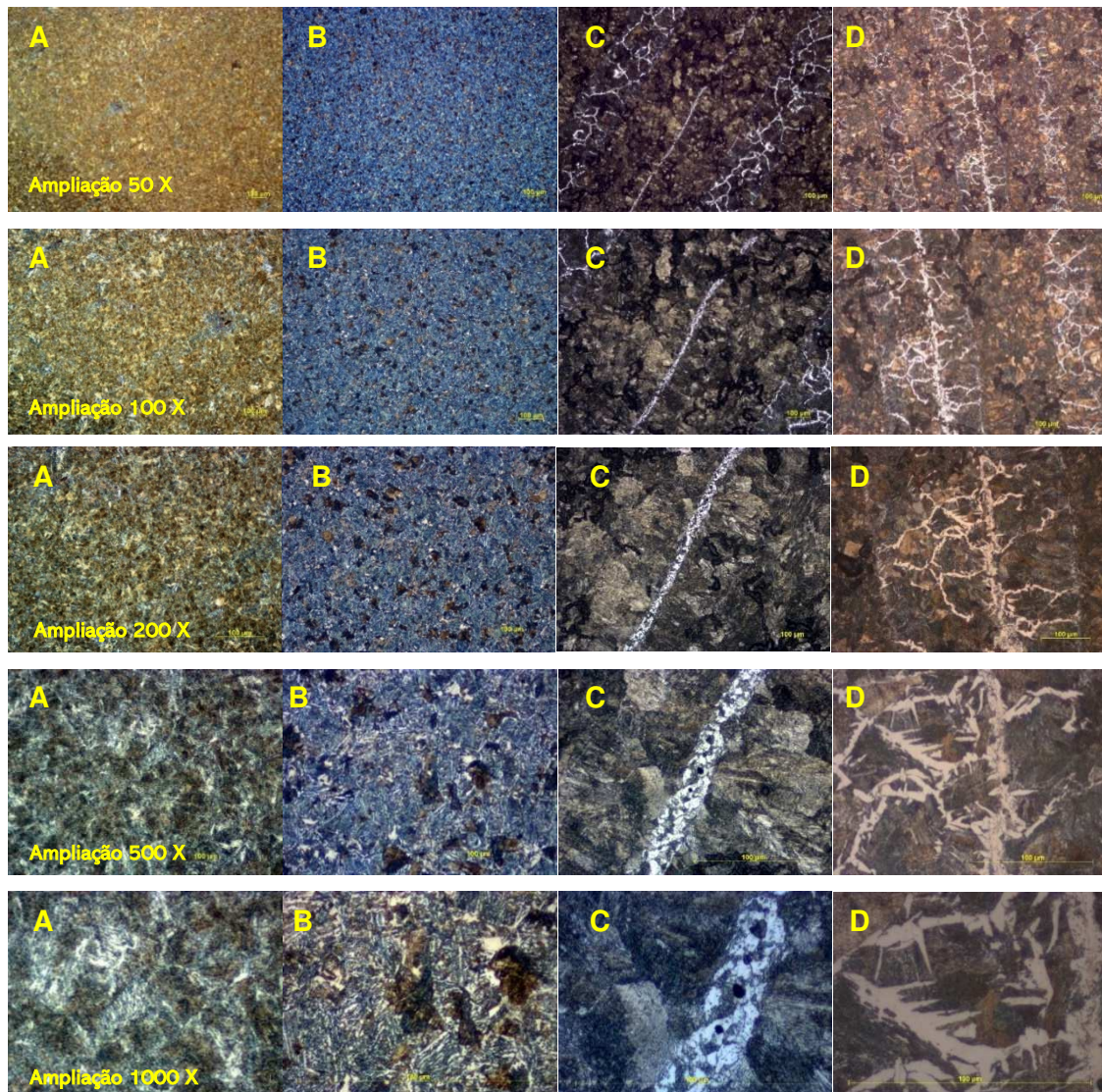
Fonte: os Autores

Na Figura 37, todas as amostras A correspondem ao aço SAE 5160, as amostras B ao aço UHB 15N20, as amostras C ao aço damasco com 42 camadas e as amostras D ao aço damasco com as 168 camadas nas ampliações de 50X, 100X, 200X, 500X e 1000X.

Pode se notar a formação de ferrita, linha branca, na Figura 37 C e D, onde a linha de ferrita contínua e central é resultado do caldeamento das camadas do damasco quando cortado o billet e empilhamos novamente.

Na Figura 37 D, nas ampliações de 500X e 1000X, fica destacada a ferrita de widamnstätten, caracterizado pelas partes claras e pontiagudas.

Figura 37 - Amostras SAE 5160, 15N20, damasco com 42 e com 168 camadas



Fonte: Os autores.

As únicas inclusões percebidas são vistas na Figura 37 C, do damasco ainda com 42 camadas, nas ampliações de 500X e 1000X.

No ensaio Jominy, as medições de dureza estão demonstradas na Tabela 6, e segundo o ASM Handbook Volume 1, os limites de dureza recomendados para o aço SAE 5160 são os demonstrados no Gráfico 3, onde percebe-se que uma parte das medições ficaram abaixo do recomendado para o aço SAE 5160. O aço damasco apresentou apenas dois pontos onde a sua dureza foi superior ao SAE 5160. Essas medições devem ser consequência do tempo de tempera inferior aos 10 minutos estabelecidos em norma, conforme já foi anteriormente relatado. Com uma avaliação visual, durante a realização da têmpera, foi

constatado que o CP de aço damasco sofreu um resfriamento mais rápido do que o CP de SAE 5160.

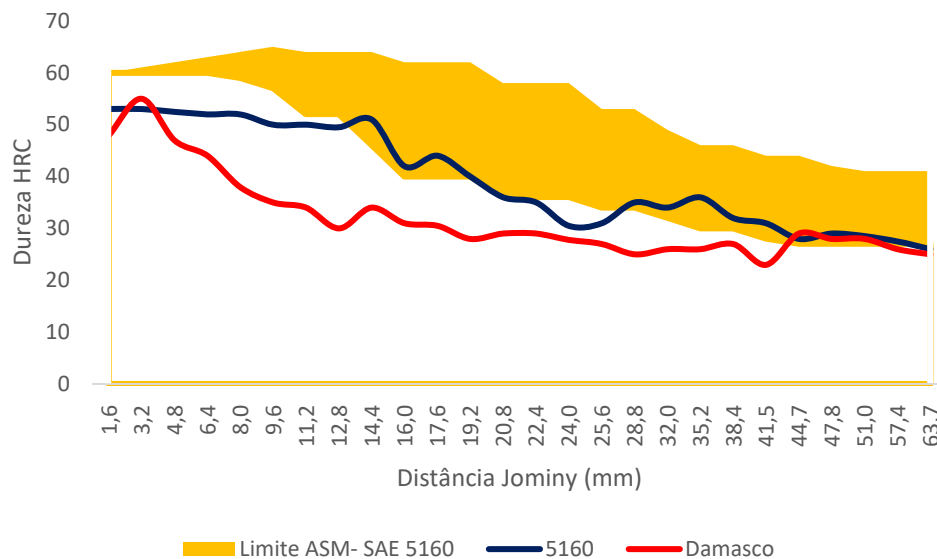
Tabela 6 - Jominy - Dureza HRC

Distância (mm)	1,6	3,2	4,8	6,4	8,0	9,6	11,2	12,8	14,4	16,0	17,6	19,2	20,8
5160	53	53	52,5	52	52	50	50	49,5	51	42	44	40	36
damasco	48	55	47	44	38	35	34	30	34	31	30,5	28	29

Distância (mm)	22,4	24,0	25,6	28,8	32,0	35,2	38,4	41,5	44,7	47,8	51,0	57,4	63,7
5160	35	30,5	31	35	34	36	32	31	28	29	28,5	27,5	26
damasco	29	27,8	27	25	26	26	27	23	29	28	28	26	25

Fonte: Os autores.

Gráfico 3 - Ensaio Jominy, dureza (HRC) x distância (mm)



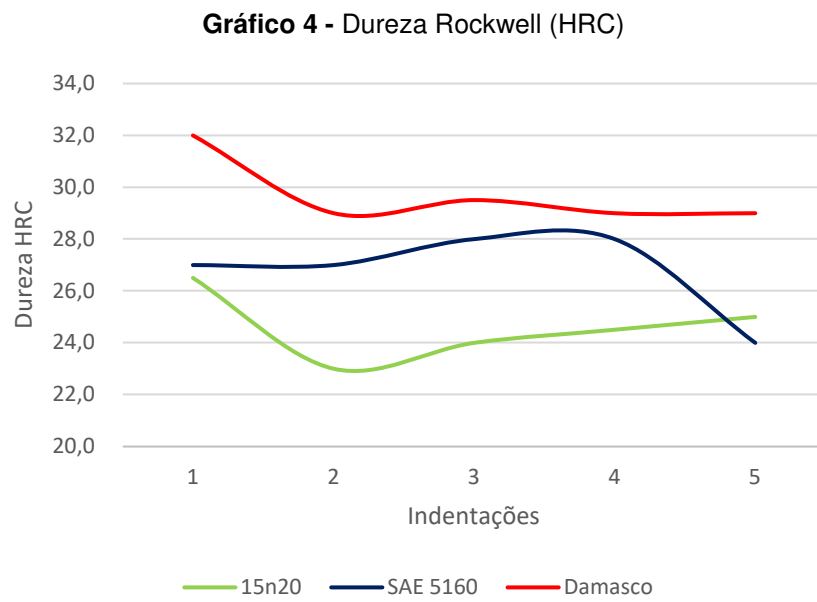
Fonte: Os autores.

Os aços SAE 5160 e UHB 15N20 foram testados como adquiridos, sem qualquer tratamento térmico adicional, o aço damasco foi resultado do forjamento desses dois aços. A Tabela 7 e o Gráfico 4 demonstram que o aço damasco apresentou a maior dureza entre os três materiais ensaiados.

Tabela 7 - Dureza Rockwell (HRC)

Indentações	Dureza HRC					Dureza Média
	1	2	3	4	5	
UHB 15n20	26,5	23,0	24,0	24,5	25,0	24,6
SAE 5160	27,0	27,0	28,0	28,0	24,0	26,8
Damasco	32,0	29,0	29,5	29,0	29,0	29,7

Fonte: Os autores.



Fonte: Os autores.

Observa-se no Gráfico 4 acima que o damasco apresentou uma dureza superior aos aços componentes e que nas impressões 1 e 5 tanto o SAE 5160 como o UHB 15n20 obtiveram valores próximos.

5 CONCLUSÕES

Pode-se afirmar que o objetivo geral de avaliar as propriedades do aço damasco comparativamente aos seus aços componentes através de ensaios mecânicos foram alcançados, mas por limitações nos procedimentos e equipamentos utilizados, não de forma plena.

Com base nos ensaios efetuados pode-se afirmar que o aço damasco apresentou maior tenacidade e apresentou uma dureza superior que os seus aços componentes.

Além destas informações, cabe destacar que uma grande vantagem e diferencial do aço damasco é a sua exclusividade, e que a experiência e habilidade do artesão, são um diferencial que agrega um grande valor ao produto, que termina por se transformar em objeto de desejo de usuários e colecionadores.

A realização deste trabalho foi muito gratificante e bem difícil de concluir, a princípio, conseguir um local para forjar o damasco, depois em realizar os ensaios; a usinagem dos CP foi efetuada em duas Fatec s, o ensaio Charpy foi realizado na Fatec SP, e entre equipamentos que foram declarados como não adequados para a realização do ensaio Jominy de acordo com as normas técnicas, foram percorridos caminhos que chegaram até a escola politécnica da USP, onde foi realizada uma parte do ensaio Jominy, a parte de têmpera, a parte da leitura da dureza foi realizada novamente na Fatec SP. Para a conclusão desta atividade foi essencial o apoio de vários professores, que disponibilizaram tempo, conhecimento e contatos em outras unidades da Fatec, e até da USP.

O caldeamento, como processo de união de materiais dissimilares, pode ser objeto de pesquisas futuras por apresentar similaridade metalúrgica ao processo de soldagem por fricção.

6 REFERÊNCIAS

- ASM International - American Society for Metals. (1993). *ASM Handbook Volume 1 - Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys* (10ª ed.). Ohio - US: ASM International.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. (01 de 02 de 2015). *ASTM E18-15: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. Fonte: https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2680/3/ASTM_E18-15.pdf
- ASTM - American Society for Testing and Materials. (12 de 2017). *ASTM A370: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Test os Stell Products*. Acesso em 18 de 09 de 2021, disponível em <http://www.metalspiping.com/wp-content/uploads/2017/12/astm-a370-asme-sa-370.pdf>
- ASTM - American Society for Testing and Materials. (16 de 11 de 2020). *ASTM A255-20A: Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel*. Acesso em 06 de 12 de 2021
- Callister, W. D. (2007). *Ciência e engenharia de materiais - Uma Introdução* (7ª ed.). Rio de Janeiro: LTC - Livros técnicos e científicos Editora LTDA.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2016). *Ciência e Engenharia de Materiais - Uma introdução*. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA.
- Chiaverini, V. (1988). *Aços e Ferros Fundidos - 6ª edição*. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração.
- chiaverini, v. (2008). *Tratamento térmico das ligas metálicas* ((2ª impressão) - 1ª ed.). São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM.
- Colpaert, H. (2008). *Metalografia dos produtos siderurgicos comuns* (4ª ed.). São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA.
- Cunha, L. C., & Cravenco, M. P. (2006). *Manual prático do mecânico*. São Paulo: Hemus.
- Gasco, D. (27 de 06 de 2020). *Os Mistérios por trás do aço de Damasco*. Acesso em 18 de 09 de 2021, disponível em <https://historiamilitaronline.com.br/index.php/2020/07/27/os-misterios-por-tras-do-aco-de-damasco/>
- GERDAU S/A. (19 de 10 de 2020). *Tabela Gerdau de Composição Química*. Acesso em 17 de 10 de 2021, disponível em https://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/2020-10/Tabela_Composicao_Quimica.pdf
- Helman, H., & Cetlin, P. R. (2015). *Fundamentos da conformação mecânica dos metais* (2ª ed.). São Paulo: Artliber Editora LTDA.
- Leirião Filho, S. (2019). *O 15N20 e o Aço Damasco*. Acesso em 09 de 11 de 2021, disponível em <https://maximeferrum.com.br/artigos.php>
- MAXIME FERRUM. (2019). *AÇO 15n20*. Acesso em 17 de 10 de 2021, disponível em <https://maximeferrum.com.br/aplicacoes/MF-15N20.pdf>

- O Couteleiro - Cutelaria CIMO. (2020). *Qual o uso do Aço 5160 na cutelaria?* Acesso em 11 de 10 de 2021, disponível em <https://blog.cutelariacimo.com.br/cutelaria-outdoor/qual-o-uso-do-aco-5160-na-cutelaria/>
- O Couteleiro - Cutelaria CIMO. (20 de 11 de 2022). *O que é cutelaria? Conheça a criação das lâminas*. Fonte: <https://blog.cutelariacimo.com.br/estilo-afiado/o-que-e-cutelaria/>
- Padilha, A. F. (2006). *Materiais de Engenharia - microestrutura - propriedades* (1 ed.). Curitiba - PR: Hemus Livraria, Distribuidora e Editora S/A.
- Pazini, H. (2011). *Propriedades mecânicas da liga de aço damasco SAE 5160 + UHB 15n20*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ, Engenharia mecânica, Panambi.
- Reed-Hill, R. E. (1982). *Princípios de metalurgia física* (2 ed.). Rio de Janeiro: Editora Guanabara dois S.A.
- Slaughter, C. (2014). *Espada de damasco: um produto da civilização islâmica*. Dissertação (mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Souza, S. A. (1982). *Ensaaios mecânicos de materiais metálicos - fundamentos teóricos e práticos* (5ª ed.). São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA.

VOSS GIOPATO, Hubert Richard. GONÇALVES, Edivaldo Ananias. **Aço damasco de aços SAE 5160 e UHB 15n20:** Uma avaliação comparativa das propriedades mecânicas entre o aço damasco e seus componentes. 2022. 61 folhas. Trabalho de Conclusão do curso de Tecnologia em Mecânica – Processos de Soldagem – FATEC Itaquera – Prof. Miguel Reale, São Paulo, 2022.