

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO  
CURSO DE TECNOLOGIA EM MATERIAIS

**PRODUÇÃO DE ARTEFATO DE CUTELARIA PELO  
PROCESSO DAMASCO MODIFICADO**

Rong Rong Yang

SÃO PAULO

2021

Rong Rong Yang

**PRODUÇÃO DE ARTEFATO DE CUTELARIA PELO  
PROCESSO DAMASCO MODIFICADO**

Monografia apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Tecnólogo em Materiais pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Domingos Xavier

SÃO PAULO

2021

## **Agradecimentos**

Primeiramente agradeço à minha família: Angela Ding (mãe), Yang Ke (pai), Ding Kai Hua (avô), Zhang Xiu Lan (avó) e Lisa Rong Qian Yang (irmã), por me apoiarem sempre.

Agradeço ao meu orientador Professor Dr. Marcos Domingos Xavier pela sua dedicação, orientação e paciência em ensinar-me os seus conhecimentos extremamente profissionais.

Agradeço aos cuteleiros Roger, Fábio e Freed, por suas ajudas no processo de produção, pelas paciências de me ensinarem e tirarem minhas dúvidas.

Agradeço aos meus amigos da faculdade: Beatriz, Bruna, Carina, Karina, Vitória, Fernando e Vinícios por me ajudarem e apoiarem não somente nos estudos, mas também na minha vida.

Agradeço às minhas amigas: Stephanie, Krystal e Sabrina, longe, mas sempre comigo em todos os momentos.

Agradeço aos todos professores da faculdade por me ajudarem a concluir os meus estudos. Os conhecimentos que recebi dos professores tornaram aos meus anos na faculdade muito enriquecedores e gratificantes.

Agradeço à Fatec São Paulo por criar um ambiente de aprendizagem tão bom e por me dar esta oportunidade de estudar com tantas pessoas maravilhosas.

*“The Answer to Life, the Universe and Everything is 42.”*

*Douglas Adams*

## RESUMO

*Este trabalho teve como objetivo inicial produzir artefato de corte tipo Damasco modificado utilizando os aços SAE 1095 e 15N20 e aplicando parâmetros práticos de cutelaria. Basicamente, o processo seguiu as etapas de forjamento a quente e tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, culminando com itens de acabamento do produto.*

*Adicionalmente, foi efetuada a comparação dos dados práticos e portanto, artesanais com dados tecnológicos, mostrando boa aproximação entre ambos exceto quanto à temperatura de encharque na tempera, com indicação de uso e experimento de valores térmicos mais baixos no processo produtivo de modo a avaliar queda de consumo energético e maior qualidade dos produtos.*

**Palavras-chave:** SAE1095, 15N20, cutelaria, forjamento, tratamentos térmicos



## **ABSTRACT**

This work had as its initial objective to produce a modified Damascus type cutting artifact using SAE 1095 and 15N20 steels and applying practical cutlery parameters. Basically, the process followed the stages of hot forging and quenching and tempering heat treatments, culminating with product finishing items.

Additionally, the comparison of practical, and therefore handcrafted, data with technological data was carried out, showing a good approximation between both, except for the soaking temperature during tempering, with the indication of use and experimentation with lower thermal values in the production process in order to evaluate a decrease in energy consumption and higher product quality.

**Keywords:** SAE1095, 15N20, cutlery, forging, heat treatment

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	17
1.1 OBJETIVO GERAL .....	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	18
2.1 Tipos das facas.....	18
2.1.1 Facas de cozinha chinesas .....	18
2.1.2 Facas de cozinha japonesas .....	21
2.1.3 Facas de cozinha alemãs.....	22
2.2 Tipos dos materiais .....	24
2.3 Aço de Damasco: aspectos históricos, superficiais e microestruturais .....	25
2.3.1 Aço forjado em camadas: complementos tecnológicos.....	27
2.4 Estrutura cristalina.....	28
2.5 Diagrama de equilíbrio Fe-C.....	30
2.6 Têmpera.....	31
2.6.1 Têmpera por chama .....	32
2.6.2 Têmpera por indução .....	32
2.7 Revenido.....	34
2.8 Curvas TTT .....	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	37

3.1 Composições químicas e propriedades dos aços.....	37
3.2 Montagem e forjamento do bloco .....	39
3.3 Lixamento .....	40
3.4 Tratamentos térmicos.....	40
3.4.1 Têmpera .....	40
3.4.2 Revenimento .....	41
3.5 Fosfatização .....	41
3.6 Guarda .....	42
3.7 Cabo.....	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
4.1 Faca produzida.....	45
4.2 Forjamento .....	45
4.3 Tratamentos térmicos.....	46
5 CONCLUSÕES .....	48
6 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS.....	49
REFERÊNCIAS.....	50

## ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

### Lista de Tabelas

Tabela 1: Composição química de um aço SAE 1095. Fonte: LUZ, Gelson. Aço SAE 1095.....	37
Tabela 2: Aço SAE 1095 Propriedades Mecânicas e Composição Química. Blog Materiais, [s. l], 2017 .....	38
Tabela 3: Composição química de um aço 15N20. Fonte: MAXIEM FERRUM. ....	38
Tabela 4: equiparação de cores versus temperaturas. Fonte: TecnoHard. Serviço de tratamento térmico. ....	45
Tabela 5: Tratamentos térmicos do aço. Fonte: <a href="https://maximeferrum.com.br/aplicacoes/MF-15N20.pdf">https://maximeferrum.com.br/aplicacoes/MF-15N20.pdf</a> .....	46

## Lista de Figuras

Figura 1: Faca de fatia. Fonte: Victorinox.....	18
Figura 2: Faca de amora. Fonte: Shibazi. ....	19
Figura 3: Faca para ossos. Fonte: Victorinox. ....	19
Figura 4:Faca Jiujiang. Fonte: Shibazi. ....	20
Figura 5: Faca para pele. Fonte: Yujia. ....	20
Figura 6: Pato Pequim. Fonte: East West bank, Kristie Hang. ....	20
Figura 7: Deba. Fonte: Kai Corporation.....	21
Figura 8: Yanagiba. Fonte: Curated by Akimitsu Oguro. ....	21
Figura 9: Usuba. Fonte: Curated by Akimitsu Oguro. ....	22
Figura 10: Faca do Chefe. Fonte: Victorinox. ....	22
Figura 11: Faca de esculpir. Fonte: Victorinox. ....	23
Figura 12: Faca de filete. Fonte: Wüesthof.....	23
Figura 13: Faca de corte. Fonte: Wüesthof. ....	24
Figura 14: Faca de pão. Fonte: Wüesthof. ....	24
Figura 15: a lâmina tem um padrão de rosa. Fonte: John Verhoeven. The Mystery of the Damascus Sword.....	26
Figura 16: o interior de uma lâmina de Damasco, ampliada 370 vezes, mostrando as partículas de carboneto alinhadas como fileiras. Fonte: John Verhoeven. The Mystery of the Damascus Sword.....	26
Figura 17: os grãos sob o microscópio. Fonte: SENAI. Tratamento térmico. ....	28
Figura 18: Empacotamento cúbico de face centrada. Fonte: André Paulo Tschiptschin. Tratamento térmico de aços.....	29
Figura 19: Diagrama de equilíbrio Fe-C. Fonte: André Paulo Tschiptschin. Tratamento térmico de aços. ....	30
Figura 20: Diagrama esquemático de transformação para normalização, comprovando a possibilidade de obtenção do constituinte bainita. Fonte: Vicente Chiaverini. Aços e ferros fundidos.....	31
Figura 21: dispositivo para têmpera por indução. Fonte: SENAI. Tratamento térmico. ....	33
Figura 22: Curvas TTT Fe-C. Fonte: André Paulo Tschiptschin. Tratamento térmico de aços.....	36
Figura 23: Curvas TTT Fe-C. Fonte: André Paulo Tschiptschin. Tratamento térmico de aços.....	36
Figura 24: a) forno a gás; b) pedaço de aço com cabo fundido. Fonte: Acervo do autor.....	39
Figura 25: área onde o cabo se encontra com a lâmina para a aplainar. Fonte: Acervo do autor. ....	40

Figura 26: a) forno para revenir; b) a faca depois do revenimento. Fonte: Acervo do autor. ....	41
Figura 27: a) faca preparado para fosfatização, b) faca durante fosfatização, c) faca depois da fosfatização. Fonte: Acervo do autor. ....	42
Figura 28: a) pedaço de latão marcado, b) faca e guarda fixado juntos. Fonte: Acervo do autor. ....	43
Figura 29: a) madeira marcada com a largura da faca; b) madeira marcada com o modelo de faca. Fonte: Acervo do autor. ....	44
Figura 30: faca produzida. Fonte: Acervo do autor. ....	45
Figura 31: curva de revenimento aço 15N20. Fonte: Suministros Para Cuchillos. Aço 15N20. ....	48
Figura 32: curva de revenimento aço SAE 1095. Fonte: Suministros Para Cuchillos. SAE 1095. ....	48

## Lista de Siglas e Abreviaturas

a.C	Antes de Cristo
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
C	Carbono
Cr	Cromo
d.C	Depois de Cristo
Fe	Ferro
FATEC-SP	Faculdade de Tecnologia de São Paulo
Fe <sub>3</sub> C	Cementita
Fe <sub>5</sub> C <sub>2</sub>	Variante da cementita
Fe <sub>2-3</sub> C	Carboneto épsilon
Mo	Molibdênio
Mi	temperatura de início de transformação martensítica
Mf	temperatura de fim de transformação martensítica
Nb	Nióbio
SAE	Society of Automotive Engineers
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
Ti	Titânio
TTT	Tempo-Temperatura-Transformação
V	Vanádio
W	Tungstênio

## Lista de Unidades

%	Porcentagem
cm	Centímetro
mm	Milímetros
°	Grau
°C	Grau Célsius
$g/cm^3$	Gramas por centímetro cúbico
MPa	Mega Pascal
GPa	Giga Pascal
HRC	Escala de medida de dureza Rockwell C
W/mK	Watt por metro por kelvin
$\mu m/m^{\circ}C$	Micrômetro por metro graus célsius



## **1. INTRODUÇÃO**

As facas eram um instrumento comum na vida cotidiana da humanidade. Nas sociedades primitivas, o homem antigo fazia facas de várias formas a partir de pedras, conchas de mexilhão e ossos de animais. A maioria das pedras utilizadas eram quartzitos, arenitos, mas também pedra de sílex e pedra de cristal. As facas feitas a partir destas pedras eram relativamente duras e faziam boas ferramentas de corte. Em segundo lugar, as facas feitas de conchas de mexilhão e ossos de animais eram mais leves e afiadas e eram utilizadas para cortar objetos. Estas facas não só eram utilizadas como ferramentas de trabalho, como também eram transportadas como arma de autodefesa.

No mundo de hoje existem mais de dez tipos diferentes de facas, incluindo apenas as facas de cutelaria. Este artigo apresentará brevemente alguns dos tipos de facas de cozinha, os diferentes aços e focará o processo de fabrico de uma faca de cozinha utilizando um processo damasco modificado.

O processo de produção de chapas de Damasco consiste no processo de soldagem por caldeamento de lâminas de dois aços diferentes previamente austenitizados e de tratamentos térmicos têmpera e o revenimento.

Os artefatos de cutelaria tipo Damasco contemplam no mínimo 50 camadas de dois tipos de aço. Convencionou-se denominar esta pesquisa como processo Damasco modificado em decorrência da aplicação de camadas laminares abaixo deste mínimo.

### **1.1 OBJETIVO GERAL**

Produzir artefato de Cutelaria com dois aços caldeados a quente, basicamente, SAE 1095 e 15N20.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Aplicar parâmetros de processos estabelecidos pela empresa de cutelaria para produção da faca artesanal;

Discutir resultados considerando dados tecnológicos da literatura.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1 Tipos das facas

Existem três tipos de facas de cozinha no mundo, classificadas por região: facas de cozinha chinesas, facas de cozinha japonesas, e facas de cozinha alemãs, que são normalmente utilizadas nos países ocidentais.

#### 2.1.1 Facas de cozinha chinesas

**Faca de fatia (Slice knife):** como foi mostrada na figura 1, é a faca principal da culinária chinesa, a faca tem um corpo retângulo 5:3, a espessura da parte mais grossa é geralmente 4 mm. É usado principalmente para fatiar os alimentos macios, não pode cortar ossos. A característica é que a faca tem uma grande área e um peso adequado. Sob a ação da aceleração da gravidade quando a faca cai, a habilidade de corte pode ser bastante melhorada.



Figura 1: Faca de fatia. Fonte: **Victorinox**

**Faca de amora (Mulberry knife):** a superfície da faca é muito longa, a lâmina é muito plana, o corpo da faca é preto e branco, pode cortar carne e vegetais, é usada principalmente para fatiar e cortar os alimentos macios em filamentos, mas ela é mais fina e leve, não é adequado para cortar com muita força e danifica-se facilmente.



Figura 2: Faca de amora. Fonte: **Shibazi**.

**Faca para ossos (Bone knife):** o objetivo é cortar ossos. A lâmina é pesada e cega, é especializada no trabalho pesado de cortar ossos grandes na cozinha. Quanto mais pesada a faca pode cortar os ossos maiores. As facas de osso são mais grossas e pesadas que as facas de corte, o ângulo da lâmina é maior. Para garantir que elas não quebrem, a dureza não será muito alta, ao cortar ossos, uma vez que o cabo esteja solto, nunca o use novamente.



Figura 3: Faca para ossos. Fonte: **Victorinox**.

**Faca Jiujiang (Jiujiang knife):** O formato desta faca assemelha-se ao rio chinês Jiujiang. É usada principalmente para cortar pequenos ossos, como costelas, frango, pato, ganso, cabeça de peixe etc. O dorso desta faca é relativamente grosso, sendo bom para abater frutos do mar e para passar por ossos finos comuns.



Figura 4:Faca Jiujiang. Fonte: **Shibazi**.

**Faca para pele (Skin knife):** Esta faca, ilustrada na figura 5, é especialmente usada para cortar a pele de pato. Há um alimento muito famoso em Pequim chamado Pato Pequim mostrado na figura 6.



Figura 5: Faca para pele. Fonte: **Yujia**.



Figura 6: Pato Pequim. Fonte: East West bank, Kristie Hang.

### 2.1.2 Facas de cozinha japonesas

**Deba:** a lâmina tem um lado, é relativamente grossa e pesada, especialmente a extremidade posterior da lâmina, que é forte e durável. É usado principalmente para o processamento bruto de peixes e ossos de peixes, também pode lidar com o processamento de frango e pato, pode remover peixes dos ossos. Mas não pode ser usado para ossos grandes e mais duros, como costela de porco.



**Figura 7:** Deba. Fonte: **Kai Corporation**.

**Yanagiba:** o nome em japonês significa folha de slgueiro, devido ao seu formato. A sua lâmina é estreita e longa como uma folha de slgueiro. É uma das facas de sashimi mais comumente usadas. O comprimento da faca é geralmente de 21-24 cm e sua a lâmina é unilateral e tem extrema nitidez, podendo reter o brilho do próprio sashimi.



**Figura 8:** Yanagiba. Fonte: **Curated by Akimitsu Oguro**.

**Usuba:** a lâmina é fina e afiada. Adequa-se ao corte de legumes e para descascar etc. Os Chefes japoneses costumam usá-la para fatiar rabanete em fatias finas como papel. Não pode ser usada para cortar osso.



**Figura 9:** Usuba. Fonte: **Curated by Akimitsu Oguro.**

### 2.1.3 Facas de cozinha alemãs

**Faca do Chefe (Chef's Knife):** A faca do chefe é uma faca de uso geral com uma lâmina larga e uma secção curva para cortar carne, peixe e vegetais.



**Figura 10:** Faca do Chefe. Fonte: **Victorinox.**

**Faca de esculpir (Carving knife):** é o principal instrumento de afiação. O seu uso diário é necessário para manter o fio das lâminas. Outro recurso para essa finalidade é a pedra para afiar. A diferença entre ambas é que a chaira apenas endireita a lâmina, sem desgastar o material (daí a recomendação de usá-la diariamente), enquanto a pedra faz o contrário.



Figura 11: Faca de esculpir. Fonte: **Victorinox**.

**Faca de filete (Fillet knife):** a lâmina muito estreita e flexível torna-a uma ferramenta ideal para desossar e esfoliar carne fresca, permitindo que a sua ponta seja suficientemente controlada mesmo em ângulo de 180°, de modo a cortar em profundidade a carne. Permite deslizar a faca ao longo das curvas dos ossos (TOJIRO).



Figura 12: Faca de filete. Fonte: **Wüesthof**.

**Faca de corte (Paring knife):** faca pequena com cerca de 7cm - 9cm. É utilizada principalmente para descascar legumes podendo ser aplicada para descascar várias frutas.



Figura 13: Faca de corte. Fonte: **Wüsthof**.

**Faca de pão (Bread knife):** uma faca de pão, como o nome sugere, é uma faca usada para cortar pão, mas a sua utilização não se limita a cortar pão, mas também pode ser usada para cortar lanches. Como o pão tem muitos buracos de ar e é muito fofo, é necessária uma faca de pão serrilhada para cortar a superfície suavemente sem deixar cair migalhas.



Figura 14: Faca de pão. Fonte: **Wüsthof**.

## 2.2 Tipos dos materiais

**Faca de cozinha chinesa:** As facas de cozinha tradicionais chinesas usam diretamente aço com alto teor de carbono, que tem a vantagem da alta dureza. A desvantagem é a facilidade de enferrujar. Todavia, as facas de cozinha chinesas de melhor qualidade são produzidas pelo processo de soldagem por caldeamento conhecido como cladding (sanduíche), no qual camadas de aço inoxidável sobrepõem-se a camada interna de aço de alto carbono e, portanto, de alta dureza.

**Faca de cozinha japonesa:** Há três tipos principais de aços para produzir as facas. O primeiro deles é o aço inoxidável VG10, produzido pela empresa japonesa "Takefu Special Steel". Possui 1,0% de carbono; 15% de cromo além de molibdênio e cobalto para aumentar a resistência do gume de corte. A dureza é superior a 60 HRC, mas apresenta como desvantagem a tenacidade baixa. Assim, há produtos no mercado onde o VG10 fica entre aço inoxidável externo macio, gerando balanço entre



tenacidade e a dureza (XIAO NIANGRE, 2017). O segundo aço japonês para produção de facas é chamado Yasugi, caracterizado por ser do tipo carbono ou comum e ter melhor retenção de dureza do que o VG10, mas é fácil de enferrujar e requer maior uso e manutenção. É amplamente utilizado em restaurantes japoneses. (XIAO NIANGRE, 2017). O terceiro aço japonês para facas é todo aço feito com tecnologia de metalurgia do pó e é geralmente o mais caro, com produção anual global de apenas cerca de 50.000 toneladas (XIAO NIANGRE, 2017).

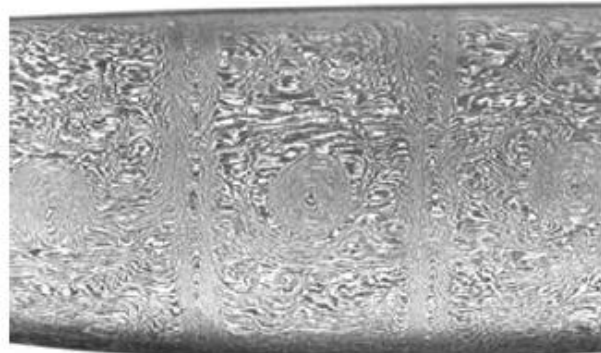
**Faca de cozinha alemã:** O material comumente usado para facas de cozinha alemãs é o aço inoxidável 1.4116 / X50CRMOV15. Seu conteúdo de carbono é de cerca de 0,5% e sua dureza está geralmente entre HRC 54 e 57. Suas características são: bom processamento, baixa dureza; boa tenacidade, boa prevenção à ferrugem; baixo custo, facilidade de laminar a borda (XIAO NIANGRE, 2017).

### **2.3 Aço de Damasco: aspectos históricos, superficiais e microestruturais**

Existem muitos tipos de aços disponíveis para fazer facas de cozinha, como aço carbono, aço inox, aço SAE 6150, aço SAE 1020, aço SAE 1045, aço SAE1070, aço SAE 1095, aço SAE 5160, aço SAE 52100, aço damasco etc. O tipo de aço escolhido para fazer a faca é aço forjado em camadas, que é um tipo de aço padrão.

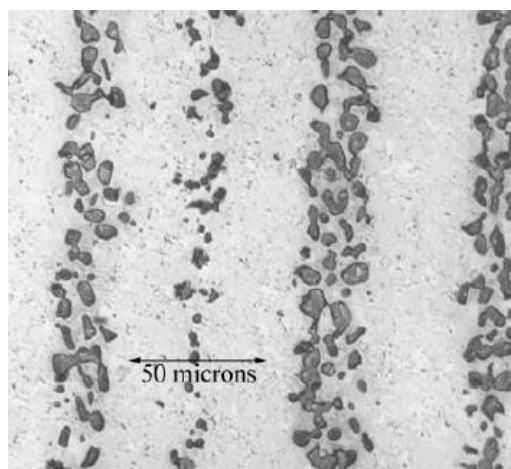
Os relatos sobre o aço de Damasco remontam a cerca de 540 d.C., mas acredita-se que a sua utilização tenha começado sob Alexandre o Grande em 323 a.C. Chama-se faca de Damasco porque foi em Damasco que os europeus encontraram pela primeira vez a cimitarra utilizada pelos árabes durante as Cruzadas. A faca era forjada a partir de lingotes de aço ultra alto carbono obtidos por fusão em cadinho na Índia antiga. Os lingotes de aço ultra-alto-carbono desta região eram por vezes referidos historicamente como "aço wootz" (SHERBY O D, 1985).

A característica distintiva da faca de Damasco é o padrão "aquoso" na superfície da faca. Algumas vezes, os padrões formavam redemoinhos circulares chamados rosas. Caso não houvesse o padrão ondulado na lâmina então não era possível considerar uma verdadeira espada ou forjado de Damasco (VERHOEVEN, 1998).



**Figura 15:** a lâmina tem um padrão de rosa. Fonte: John Verhoeven. **The Mystery of the Damascus Sword.**

Um dos maiores problemas enfrentados ao fazer uma espada de Damasco é conseguir o padrão certo de relevo na superfície. E para obter este padrão correto na parte externa da espada é preciso ter a estrutura correta dentro da espada. No aço, parte do carbono combina-se com o ferro para formar um novo tipo de produto químico chamado carboneto de ferro ou cementita. Estas partículas de carboneto de ferro são cercadas por metal que é quase ferro puro. A disposição destas partículas de carboneto causa o famoso padrão de Damasco. O fato interessante é que estas partículas de carboneto não estão espalhadas aleatoriamente pela lâmina de Damasco. A análise metalográfica de uma lâmina de espada de Damasco cortada transversalmente mostra o alinhamento das partículas de carbonetos. Estas faixas de partículas de carboneto formam o padrão superficial nas espadas de Damasco. Quando o aço é batido com um martelo arredondado, as faixas de carbonetos perto da superfície são empurradas para cima e para baixo até parecerem ondas em vez de faixas (VERHOEVEN, 1988).



**Figura 16:** o interior de uma lâmina de Damasco, ampliada 370 vezes, mostrando as partículas de carboneto alinhadas como fileiras. Fonte: John Verhoeven. **The Mystery of the Damascus Sword.**

### 2.3.1 Aço forjado em camadas: complementos tecnológicos

Essa família é, talvez, a preferida por 90% dos colecionadores. São aços nobres, de alto valor agregado e de grande beleza. O aço forjado em camadas é a união de dois ou mais aços de particularidades distintas, unidos pela técnica de caldeamento. Uma lâmina desse tipo de aço pode ter diversas camadas, que variam de 50 a 600. A vantagem da família, além da beleza da lâmina, é a flexibilidade que ela proporciona, pois o cutedeiro que forja aço forjado em camadas mistura um aço de alto teor de carbono com um de médio ou abaixo. Ou seja, é de difícil obtenção, o que faz encarecer o produto, porém é muito valorizado por colecionadores.

Desde os tempos antigos, o aço forjado em camadas tem consistido em uma estrutura de aço de alto/baixo carbono de várias camadas, fabricado por métodos de recozimento e forjamento repetidos. A alta deformação plástica durante o recozimento e forjamento múltiplo não só remove as impurezas e o endurecimento severo do trabalho, mas também refina o tamanho do grão e melhora a força de ligação interfacial (LIU BAOXI, 2021).

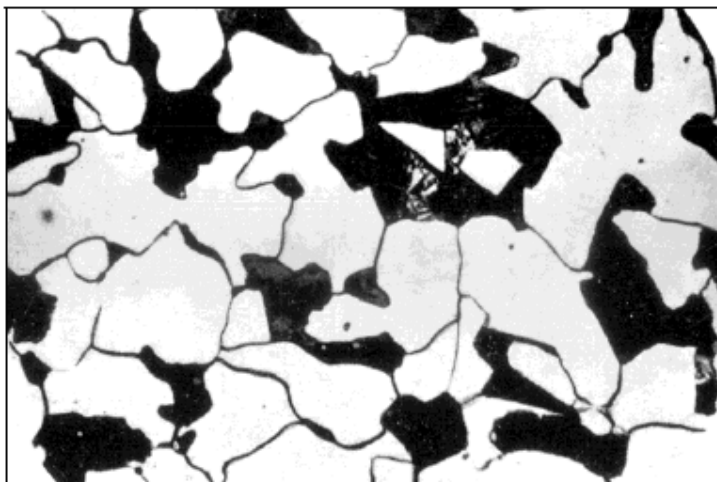
Foi demonstrado que maiores reduções de pressão laminadas a quente irão melhorar a interface através da quebra de óxidos interfaciais, tensões compressivas residuais elevadas e difusão adequada de elementos interfaciais (LIU BAOXI, 2021).

No processo de recozimento, os grãos de ambos os lados se cruzarão através da interface entre camadas, mostrando a mesma relação de orientação dos grãos, que é causada pelo embrutecimento dos grãos e pela difusão dos elementos durante o processo de recozimento. A transformação da austenita em ferrite muda de comportamento nos limites dos grãos, o que se deve à difusão total de elementos ao longo dos limites e interfaces dos grãos. Nenhuma fratura grave de delaminação ocorre na fratura de tração através do tratamento de recozimento a alta temperatura, o que indica que a difusão de elementos de liga facilita a melhoria da resistência da ligação interfacial (LIU BAOXI, 2021).

## 2.4 Estrutura cristalina

Os metais são constituídos por um aglomerado compacto de átomos, arranjados ordenadamente, denominado estrutura cristalina. Na siderurgia, com a oxidação do ferro-gusa, produz-se o aço no estado líquido. Na passagem do estado líquido para o sólido, os átomos que compõem o aço vão se agrupando, à medida que a temperatura diminui. Nesse processo de agrupamento, os átomos vão se organizando de modo a assumir posições definidas e ordenadas, formando figuras geométricas tridimensionais que se repetem. A esse conjunto de átomos, que ocupam posições fixas e formam uma estrutura, denominamos célula unitária. As células unitárias se organizam em três dimensões, apresentando um contorno de agregado de cristais irregulares. Esses cristais recebem o nome de grãos, que são formados por milhares de células unitárias (SENAI).

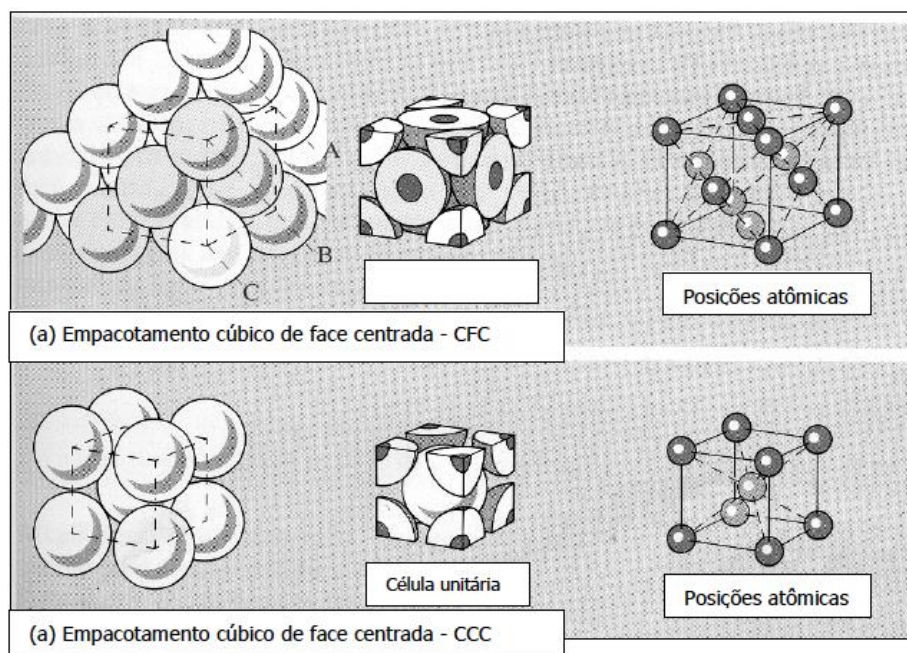
Os grãos podem ser observados melhor com auxílio de um microscópio metalográfico. A figura, abaixo, ilustra uma peça de aço de baixo teor de carbono, com a superfície polida e atacada quimicamente ampliada muitas vezes. As regiões claras e escuras, todas com contornos bem definidos como se fossem uma colmeia, são os grãos (SENAI).



**Figura 17:** os grãos sob o microscópio. Fonte: SENAI. **Tratamento térmico.**

No estado sólido, os átomos de um metal apresentam posições diferentes, com a aparência de uma figura geométrica regular. Cada metal tem uma estrutura específica. Mas pode acontecer de vários metais apresentarem a mesma estrutura (SENAI).

Em temperaturas elevadas o aço apresenta uma estrutura, denominada cúbica de faces centradas - CFC, mostrada na parte superior da figura abaixo. É formada por 8 átomos de ferro, situados nos vértices de uma célula unitária cúbica e por 6 átomos de ferro, situados nas faces do cubo. Veja que somente 1/8 de cada átomo situado nos vértices do cubo faz efetivamente parte da célula unitária. Da mesma forma, somente 1/2 de cada átomo situado no centro das faces fica no interior da célula unitária. Em temperaturas mais baixas os átomos de ferro se organizam de outra maneira formando uma estrutura cúbica e um único átomo no centro do cubo, como mostrado na parte inferior da figura abaixo (ANDRÉ PAULO).

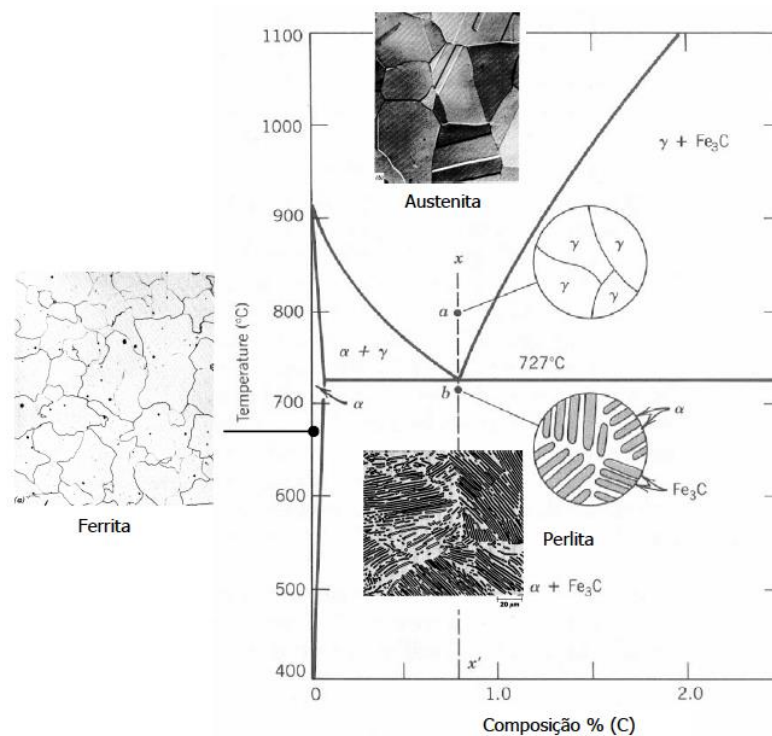


**Figura 18:** Empacotamento cúbico de face centrada. Fonte: André Paulo Tschiptschin. **Tratamento térmico de aços.**

A estrutura CFC - denominada austenita ou fase  $\gamma$  - é estável desde temperaturas muito altas, logo após a solidificação do aço, passando pelas temperaturas de laminação ou forjamento (1000 a 1200°C), até a temperatura de 912°C. A 912 °C ocorre a transformação do ferro CFC para a estrutura CCC (Cúbico de corpo centrado) - denominada ferrita ou fase  $\alpha$  - estável até a temperatura ambiente (ANDRÉ PAULO).

## 2.5 Diagrama de equilíbrio Fe-C

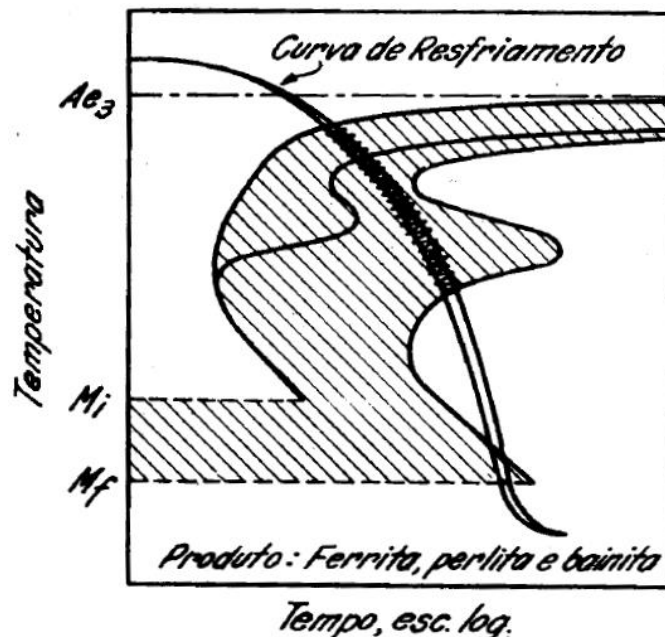
Existem diagramas que descrevem, para as ligas Fe-C, as faixas de temperaturas em que as fases ferrita, austenita e cementita são estáveis e as temperaturas em que ocorrem as transformações. Esses diagramas são chamados diagramas de equilíbrio. Através desse diagrama é possível prever quais fases se formam quando o aço é resfriado lentamente (no equilíbrio). Na figura abaixo o diagrama de equilíbrio Fe-C mostra que a ferrita é uma fase que aparece isolada somente para teores muito baixos de carbono menor que 0,1% C. Nos aços em que o teor de carbono é maior que 0,1%, ocorre precipitação de cementita ( $Fe_3C$ ). A precipitação de cementita ocorre de forma alternada com a ferrita formando uma estrutura lamelar denominada perlita. Pode-se dizer que a perlita é um material compósito natural pois é constituída de lamelas alternadas de ferrita e cementita (ANDRÉ PAULO).



**Figura 19:** Diagrama de equilíbrio Fe-C. Fonte: André Paulo Tschiptschin. **Tratamento térmico de aços.**

## 2.6 Têmpera

A têmpera é um processo de tratamento térmico do aço destinado à obtenção de dureza. Uma têmpera feita corretamente possibilita vida longa à ferramenta, que não se desgasta nem se deforma rapidamente. O objetivo da têmpera é a obtenção da estrutura martensita, para o que se deve, portanto, fazer com que a curva de esfriamento passe à esquerda do cotovelo da curva em "C", evitando-se assim a transformação da austenita (CHIAVERINI).



**Figura 20:** Diagrama esquemático de transformação para normalização, comprovando a possibilidade de obtenção do constituinte bainita. Fonte: Vicente Chiaverini. **Aços e ferros fundidos.**

O processo consiste em aquecer o aço num forno com temperatura acima da zona crítica. Para o aço-carbono, a temperatura varia de 750°C a 900°C. A peça permanece nessa temperatura o tempo necessário para se transformar em austenita. O que distingue essa forma de tratamento é o seu processo de resfriamento. A peça é retirada do forno e mergulhada em água. A temperatura cai de 850°C para 20°C. Trata-se de um resfriamento brusco (SENAI).

Quando a austenita é resfriada muito rapidamente, não há tempo para que se transforme em ferrita, cementita ou perlita. A austenita se transforma num novo constituinte do aço chamado martensita (SENAI).

Vimos que ao aquecer o aço acima da zona crítica, o carbono da cementita ( $Fe_3C$ ) dissolve-se em austenita. Entretanto, na temperatura ambiente, o mesmo carbono não se dissolve na ferrita. Isso significa que os átomos de carbono se

acomodam na estrutura CFC de austenita, mas não se infiltram na estrutura apertada - CCC - da ferrita. No resfriamento rápido em água, os átomos de carbono ficam presos no interior da austenita. Desse modo, os átomos produzem considerável deformação no retículo da ferrita, dando tensão ao material e aumentando sua dureza (SENAI).

### 2.6.1 Têmpera por chama

Para que a têmpera por chama apresente bom resultado é necessário que o material passe, antes, por um tratamento de normalização. Assim, a peça terá uma granulação fina (grãos pequenos) e ficará homogênea (SENAI).

O tratamento aplica-se, geralmente, a peças de tamanho grande ou de formato complexo, que não podem ser temperadas em forno de câmara ou em banho de sal. A principal característica desse tratamento é que o aquecimento se faz com maçarico oxiacetilênico com chama semicarburante. A temperatura deve ficar acima da zona crítica. Após o aquecimento, a peça é resfriada por jato d'água ou por imersão em óleo (SENAI).

A têmpera superficial pode ser feita pelos métodos estacionário, progressivo ou combinado.

O **método estacionário** consiste em aplicar a chama na peça, até que ela alcance uma temperatura de cerca de 800°C. A chama move-se sobre a área que será endurecida. O resfriamento é imediato na água ou no óleo. Todo o processo é manual (SENAI).

Com o **método progressivo**, a peça se move e o maçarico permanece fixo. O resfriamento é feito logo após a chama ter aquecido a superfície da peça (SENAI).

No **método combinado**, a peça e o maçarico movem-se simultaneamente. Este método requer o uso de máquinas ou dispositivos especiais. É aplicado, geralmente, em peças cilíndricas e de grande tamanho (SENAI).

### 2.6.2 Têmpera por indução

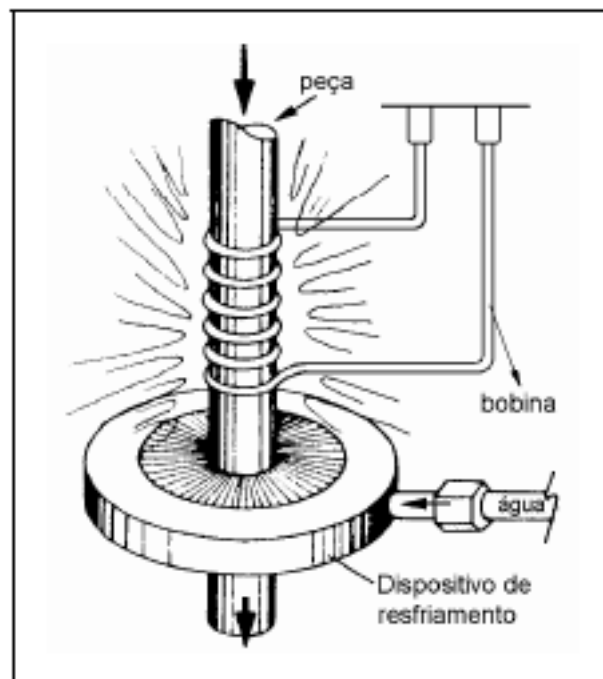
O aquecimento indutivo baseia-se no princípio da indução eletromagnética. Segundo esse princípio, um condutor de eletricidade (no caso, a peça metálica que será aquecida) é colocado sob a ação de um campo eletromagnético e desenvolve



uma corrente elétrica induzida. O aquecimento é feito por meio da corrente que circula através da peça e da resistência que o material oferece à sua passagem (SENAI).

Basicamente, uma unidade para aquecimento indutivo compõe-se de um aparelho de alta frequência e de uma bobina de trabalho. A bobina é feita de tubo fino de cobre, com uma ou mais espiras, e toma a forma da área da peça que se deseja aquecer. A frequência da corrente alternada, aplicada à bobina de trabalho, influi no grau de aquecimento. Por exemplo: alta frequência, pequena profundidade; baixa frequência, grande profundidade. Na prática, emprega-se a frequência de 450Khz na maioria das aplicações (SENAI).

A peça é colocada numa bobina em que circula uma corrente elétrica de alta frequência. Dentro da bobina indutora, é gerado um forte campo eletromagnético. A resistência que a peça oferece à passagem desse campo provoca o aquecimento da superfície até uma temperatura acima da zona crítica. Imediatamente após o aquecimento, a peça é resfriada por jatos de água ou de óleo. Na superfície, forma-se martensita (SENAI).



**Figura 21:** dispositivo para têmpera por indução. Fonte: SENAI. **Tratamento térmico.**

Após a têmpera superficial, é necessário revenir a camada endurecida. O revenido pode ser feito, também, com aquecimento por indução, seguido de resfriamento lento.

## 2.7 Revenido

O tratamento de têmpera provoca mudanças profundas nas propriedades do aço, sendo que algumas delas, como a dureza, a resistência à tração, atingem valores elevados. Porém, outras propriedades, como a resistência ao choque e o alongamento, ficam com valores muito baixos, e o material adquire uma apreciável quantidade de tensões internas. Um aço nessa situação é inadequado ao trabalho. Para corrigir suas tensões, é preciso revenir o material. O revenido tem a finalidade de corrigir a dureza excessiva da têmpera, aliviar ou remover as tensões internas. O revenido é, portanto, um processo sempre posterior à têmpera. (SENAI).

O revenido é o tratamento térmico que normalmente sempre acompanha a têmpera, pois elimina a maioria dos inconvenientes produzidos por esta; além de aliviar ou remover as tensões internas, corrige as excessivas dureza e fragilidade do material, aumentando sua ductilidade e resistência ao choque (CHIAVERINI).

Logo após a têmpera, a peça é levada ao forno, em temperatura abaixo da zona crítica, variando de 100°C a 700°C, dependendo da futura utilização do aço. Decorrido algum tempo (de uma a três horas), retira-se a peça do forno e deixa-se que ela resfrie por qualquer meio (SENAI).

Conforme a temperatura de revenido, verificam-se as seguintes transformações:

- Entre 25 e 100°C, ocorre segregação ou uma redistribuição do carbono em direção a discordâncias; essa pequena precipitação localizada do carbono pouco afeta a dureza. O fenômeno é predominante em aços de alto carbono.

- Entre 100 e 250°C - às vezes chamado primeiro estágio do revenido - ocorre precipitação de carboneto de ferro do tipo epsilon, de fórmula  $Fe_{2-3}C$ , e reticulado hexagonal; este carboneto pode estar ausente em aços de baixo carbono e de baixo teor em liga; a dureza Rockwell começa a cair, podendo chegar a 60;

- Entre 200 e 300°C - às vezes chamado segundo estágio do revenido - ocorre transformação de austenita em bainita; a transformação em aços-carbono de médio e alto teor de carbono; a dureza Rockwell continua a cair;

- Entre 250 e 350°C - às vezes chamado de terceiro estágio do revenido - forma-se um carboneto metaestável, de fórmula  $Fe_5C_2$ ; quando ocorre essa transformação, verifica-se em aços de alto carbono; a estrutura visível ao microscópio é uma massa escura, que era chamada "troostita", denominação não mais utilizada; a dureza Rockwell continua caindo, podendo atingir, valores pouco superiores a 50;

- Entre 400 e 600°C, ocorre uma recuperação da subestrutura de discordância; os aglomerados de  $Fe_3C$  passam a uma forma esferoidal, ficando mantida uma estrutura de ferrita fina acicular; a dureza Rockwell cai para valores variando de 45 a 25;

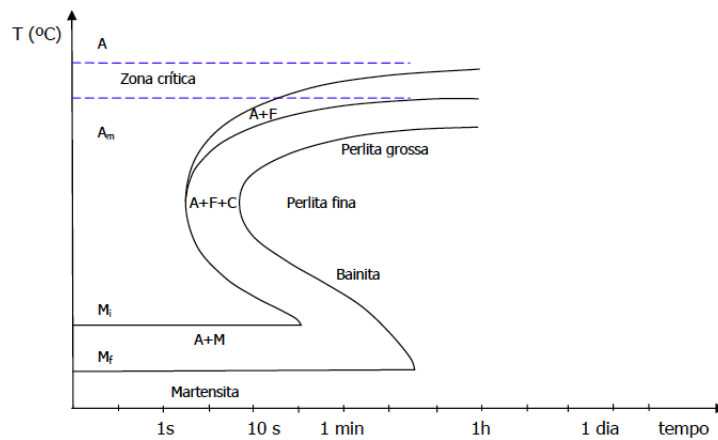
- Entre 500 e 600°C, somente nos aços contendo Ti, Cr, Mo, V, Nb ou W, há precipitação de carbonetos de liga; a transformação é chamada de "endurecimento secundário" (como se verá no estudo dos tratamentos térmicos dos aços rápidos) ou quarto estágio do revenido;

- Finalmente, entre 600 e 700°C, ocorre recristalização e crescimento de grão; a cementita precipitada apresenta a forma nitidamente esferoidal; a ferrita apresenta forma aqui-axial; a estrutura é frequentemente chamada "esferoidal" e caracteriza-se por ser muito tenaz e de baixa dureza, variando de 5 a 20 Rockwell C.

## 2.8 Curvas TTT

Quando os aços são resfriados com velocidades intermediárias outras microestruturas se formam. Para descrever o que ocorre durante o resfriamento dos aços submetido a tratamentos isotérmicos, utilizam-se as curvas TTT - Temperatura, Tempo, Transformação. São diagramas que relacionam as temperaturas e os tempos

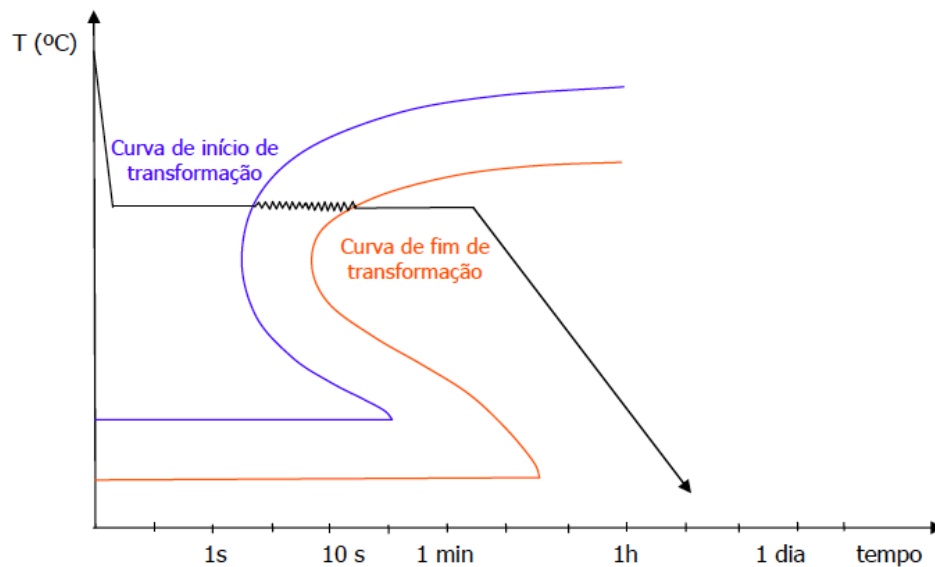
de início e fim de transformação. É possível localizar nas curvas as regiões em que se formam ferrita, perlita, bainita e martensita.



**Figura 22:** Curvas TTT Fe-C. Fonte: André Paulo Tschiptschin. **Tratamento térmico de aços.**

A curva mais à esquerda (azul) corresponde ao início das transformações e a mais à direita (laranja) ao fim das transformações. Nas duas curvas existem duas retas horizontais denominadas respectivamente  $M_i$  e  $M_f$ . São as temperaturas de início e fim de transformação martensítica.

Quando uma curva de resfriamento cruza a curva TTT a transformação ocorre na região assinalada por um serrilhado. A determinação da estrutura é feita analisando-se em região da curva TTT ocorreu a transformação.



**Figura 23:** Curvas TTT Fe-C. Fonte: André Paulo Tschiptschin. **Tratamento térmico de aços.**

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O tipo de faca de cozinha escolhido foi a de chef. Aplicou-se o forjamento em camadas por caldeamento a quente para produzi-la. Os tipos de aço utilizados são SAE1095, de alto carbono, e 15N20 de baixo carbono.

#### 3.1 Composições químicas e propriedades dos aços

##### Aço 1095

O aço SAE 1095 é um aço carbono com alto teor de carbono. Possui valores elevados de dureza e de resistência à tração. Por outro lado, apresenta energia absorvida no ensaio de impacto relativamente baixa. É indicado para molas, limas, facas e outros itens de cutelaria.

Elemento	Concentração (%)
Manganês, Mn	0,30 a 0,50
Carbono, C	0,90 a 1,03
Enxofre, S	0,05 (max)
Fósforo, P	0,04 (max)
Ferro, Fe	O que sobra

Tabela 1: Composição química de um aço SAE 1095. Fonte: LUZ, Gelson. **Aço SAE 1095**

Densidade	7.87 g/cm <sup>3</sup>
Limite de escoamento	525 MPa
Resistência a tração	685 MPa
Módulo elasticidade	190 GPa - 210 GPa
Coefficiente de Poisson	0,27 - 0,30
Alongamento base de medida de 50 mm	10%

Redução de área	40%
Dureza Brinell	197
Dureza Rockwell B	92
Dureza Vickers	207
Condutividade térmica	49,8 W/mK
Coefficiente de expansão térmica	11 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$

Tabela 2: Aço SAE 1095 Propriedades Mecânicas e Composição Química. **Blog Materiais, [s. l], 2017**

### Aço 15N20

O nome 15N20 é originário da marca comercial Uddeholm para o aço DIN 75Ni8 (W.Nr. 1.5634). O aço de alto conteúdo de Níquel é usado principalmente em combinação com os aços 1095, 1075, O1 e 5160 na fabricação de Aço Damasco. (MAXIME FERRUM).

#### **COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA** (% em peso):

C	Mn	Si	Ni
0,72/0,78	0,30/0,50	0,15/0,35	1,90/2,10

Tabela 3: Composição química de um aço 15N20. Fonte: **MAXIEM FERRUM**.

As principais características do aço 15N20 são:

- Elevada tenacidade;
- Microestrutura muito homogênea, e tem um nível de inclusões extremamente baixo, o que proporciona grande resistência ao impacto e à fadiga;
- Acabamento de superfície de excelente qualidade (brilhante), não apresenta falhas que poderiam concentrar tensões e servir como pontos de partida para a quebra por fadiga.
- Permite ao fabricante produzir lâminas com baixo custo de produção (MAXIME FERRUM).

### 3.2 Montagem e forjamento do bloco

A elaboração do bloco de aços em camadas para forjamento obedeceu às seguintes etapas: os aços 1095 e 15N20 foram cortados em seis pedaços em um tamanho único, cada um com três pedaços, e lixados para não oxidar, considerando a necessidade de lixar todos os pedaços juntos para não oxidar rápido. A seguir, os pedaços foram dobrados obedecendo a seguinte ordem: aço de alto carbono (aço 1095) → aço de baixo carbono (aço 15N20) → aço de alto carbono → aço de baixo carbono → aço de alto carbono → aço de baixo carbono. Para forjamento, foi necessário soldar um cabo metálico ao bloco para facilitar o movimento, conforme figura 24.

O bloco foi aquecido a cerca de 1100°C aproximadamente no forno, com estimativa pela sua cor amarela a branca já que não havia termopar. Posteriormente, o bloco foi retirado do forno e polvilhado com bórax para remover o oxigênio ou óxidos nele contidos. A seguir, o bloco voltou ao forno e quando a cor tornou a ficar branca foi retirado novamente do forno e então, prensado. Houve a orientação para prensar o mais lentamente possível para evitar fissuras. Esta operação repetiu-se até o bloco atingir a espessura desejada. Em sequência, o bloco foi forjado à mão, usando um martelo, de modo a ser ainda mais densificado. Após o término do forjamento, o bloco foi resfriado ao ar por duas horas. Após o resfriamento foi executada a remoção de relevos da superfície por simples lixamento com uma mó, seguida da eliminação inicial das partes negras da lâmina com uma lixadeira de cinta.

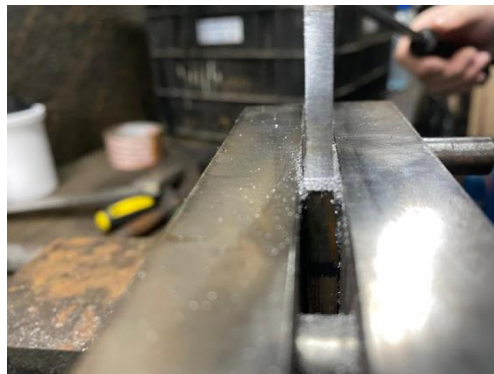


**Figura 24:** a) forno a gás; b) pedaço de aço com cabo fundido. Fonte: **Acervo do autor.**

### 3.3 Lixamento

Após o forjamento com resfriamento a ar foi executada a remoção de relevos da superfície por simples lixamento com uma mó, seguida da eliminação inicial das partes negras da lâmina com uma lixadeira de cinta. Um ponto importante durante o processo de lixar foi o resfriamento do material em água de vez em quando para esfriar antes de continuar a lixar para evitar danos superaquecimento, por exemplo, um enfraquecimento pontual da resistência.

A primeira ferramenta usada foi a guia, utilizada para lixar a área de encontro do cabo com a lâmina de modo a aplainá-la, conforme figura 25. O próximo passo foi lixar a lâmina na lixadeira de cinta.



**Figura 25:** área onde o cabo se encontra com a lâmina para a aplainar. **Fonte:** Acervo do autor.

### 3.4 Tratamentos térmicos

#### 3.4.1 Têmpera

O método escolhido foi o progressivo no qual a faca é mantida no forno com uma pinça e movimentada para a frente e para trás à temperatura mais alta no forno para uniformizar o calor e a seguir, retirada do forno quando começou a ficar branca, mergulhando-a verticalmente no óleo de têmpera. Este passo é repetido duas vezes.



### 3.4.2 Revenimento

Após a têmpera, a faca torna-se quebradiça. O objetivo de revenir é diminuir a dureza e reduzir a sua fragilidade. A faca foi mantida no forno na temperatura de 200°C por 45 minutos. O processo de revenimento foi repetido duas vezes também.

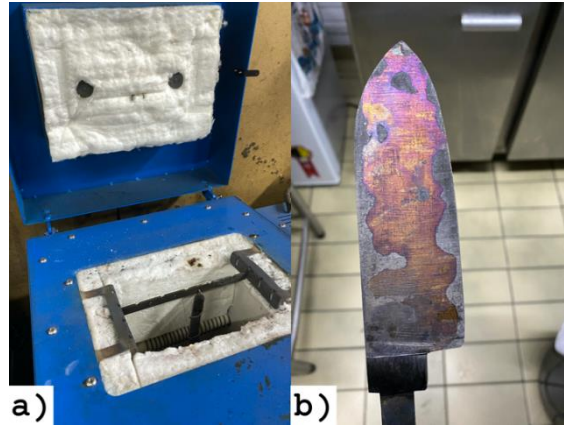


Figura 26: a) forno para revenir; b) a faca depois do revenimento. Fonte: **Acervo do autor**.

### 3.5 Fosfatização

A faca foi inicialmente lixada a mão até a superfície tornar-se lisa, brilhante e sem abrasões visíveis. O processo seguinte chama-se fosfatização, onde uma solução de fosfato de manganês é vertida numa panela onde é aquecida e mantida a cerca de 90°C. A faca é colocada na panela e cozida durante meia hora antes dos padrões de superfície começarem a aparecer na lâmina, sendo os mais claros de níquel e os mais escuros de carbono. A superfície é ligeiramente lixada com grana de 2000 microns para tornar o padrão mais visível. Para reduzir a oxidação, a faca foi preservada em óleo e papel filme.

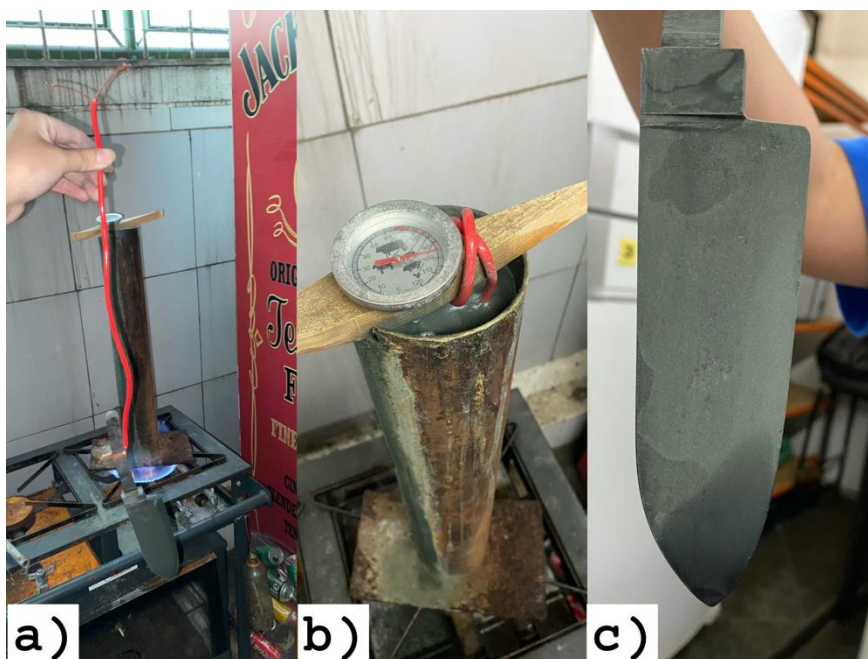


Figura 27: a) faca preparado para fosfatização, b) faca durante fosfatização, c) faca depois da fosfatização.  
Fonte: Acervo do autor.

### 3.6 Guarda

A faca precisou uma guarda para proteger a mão e a liga escolhida para a mesma foi o latão. Houve a necessidade de cortá-la em um tamanho ligeiramente maior que o fundo da faca. Foi encontrado o ponto médio e posterior marcação da largura da haste usando o ponto médio como origem. Foram feitos três furos ligados na mesma linha horizontal com a mini retificadora e depois aberta a parte onde se juntam para que a haste poder passar. A segurança ao utilizar a faca foi considerada e para isto, o lado da guarda perto da lâmina foi polido em um arco para facilitar a manutenção dos dedos no lugar. O guarda e a faca foram ligados com cola JB WELD, e deixados durante seis horas para que a cola secasse.



Figura 28: a) pedaço de latão marcado, b) faca e guarda fixado juntos. Fonte: **Acervo do autor**.

### 3.7 Cabo

O material utilizado foi a madeira. Marcou-se o tamanho e a forma da haste na madeira. A sequência posterior resumiu-se nas etapas: execução de três furos e perfurar as aberturas da mesma forma; escarimento para perfurar manualmente o interior da madeira para que a faca se possa encaixar; produção do cabo considerando uma cavidade do mesmo tamanho no cabo e um buraco na faca do mesmo diâmetro que o fio latão, de modo a ligar o cabo e a faca com o fio para reforçar a fixação e dificultar a sua soltura e finalmente; antes de colar o cabo na faca foram cortados pedaços de papel do mesmo tamanho que a secção transversal do cabo do papel vulcanizado, colamo-los entre o cabo e o guarda e utilizamos cola EPOX para os manter no lugar até secarem naturalmente.

O acabamento superficial do cabo foi decorrente do lixamento com lixa 800 mesh para remover rebarbas e para tornar a curvatura do cabo mais ergonômica e confortável de utilizar. Finalmente, foi aplicado óleo de tungue especial para madeira e utilização de uma pedra de afiar para gerar o gume cortante.

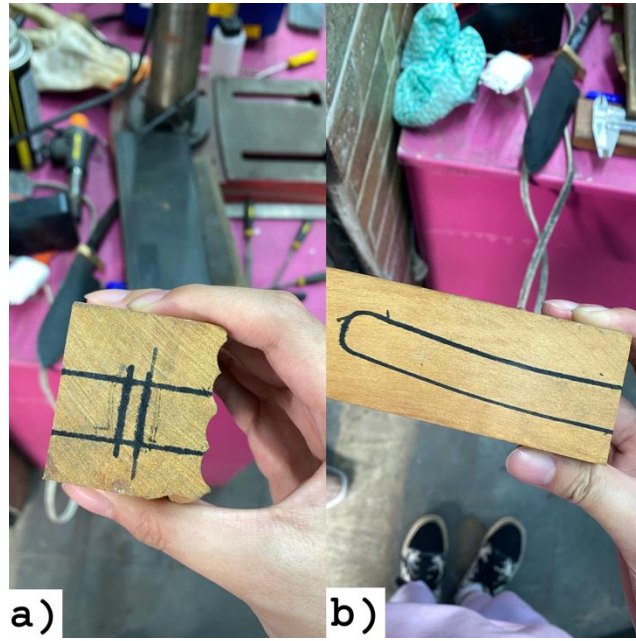


Figura 29: a) madeira marcada com a largura da faca; b) madeira marcada com o modelo de faca. Fonte: **Acervo do autor.**

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Faca produzida



Figura 30: faca produzida. Fonte: **Acervo do autor.**

### 4.2 Forjamento

A tabela 4 traz uma tabela que associa cores de radiação fotônica com temperaturas. A descrição do processo de forjamento destaca o uso de temperaturas cujas cores do material tem uma transição do amarelo para o branco. A comparação de cores conforme a tabela 4 sugere a aplicação de temperaturas da ordem de 1200 a 1300 graus Celsius, permitindo considerar um valor médio de 1250°C, usual nos processos de conformação mecânica do aço.

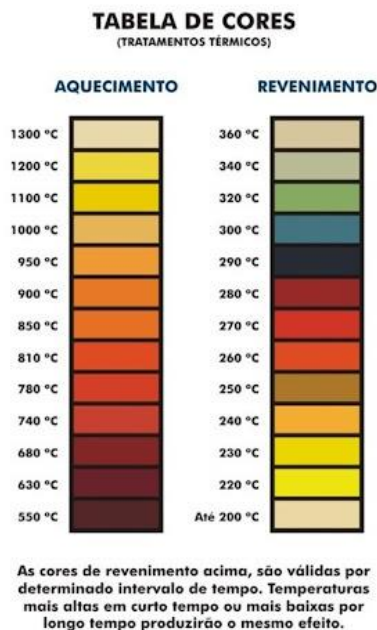


Tabela 4: equiparação de cores versus temperaturas. Fonte: **TecnoHard. Serviço de tratamento térmico.**

É interessante citar aqui que o forjamento a quente para união de peças é tratado nos livros de soldagem como soldagem por forjamento. Neste sentido, a soldagem por forjamento é um tipo de soldagem cujo aquecimento responsável pela união entre as peças é gerado mecanicamente através dos golpes sofridos pelas peças a serem soldadas. As vantagens da soldagem por forjamento são: 1) menor custo de fabricação de peças, pois se tem a mínima perda de material e 2) controlando a deformação durante o forjamento, pode-se melhorar as propriedades mecânicas da peça. As desvantagens são: 1) as peças a serem forjadas necessitam de usinagem antes do processo; 2) há possibilidade do uso de equipamentos, mas os tipos usados altamente têm custo elevado e 3) produzir peças em grande escala torna o processo custoso e difícil.

Foi utilizado o bórax no processo de forjamento, também conhecido por borato de sódio, a fórmula dele é  $\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ . O Bórax é um pó cristalino branco que atua principalmente como um fluxo na forja. Os fluxos ajudam e facilitam a soldadura dos metais no processo de soldadura e previnem reações de oxidação. Os princípios específicos de ação incluem ajudar na transferência de calor, remover óxidos, reduzir a tensão superficial do material a ser soldado, remover óleo da superfície do material a ser soldado, aumentar a área de soldadura e evitar a reoxidação. As mais importantes são "remoção de óxidos" e "redução da tensão superficial do material a ser soldado". Num ambiente de alta temperatura, o bórax derrete contém o trióxido de boro de óxido ácido, que dissolve os óxidos metálicos.

### 4.3 Tratamentos térmicos

Pesquisa realizada no site da empresa Maxime Ferrum traz a seguinte tabela 5, referente a tratamentos térmicos do aço 15Ni20 da marca comercial Uddeholm, equivalente ao aço DIN 75Ni8 (WNR1.5634)

Tratamento Térmico	Temperatura de encharque (°C)	Meio de resfriamento	Aplicações
Recozimento	950	forno	*
Tempera	820 – 850	óleo	**
Revenimento	350	Ar	***

Tabela 5: Tratamentos térmicos do aço. Fonte: <https://maximeferrum.com.br/aplicacoes/MF-15N20.pdf>

\* eliminação de tensões estruturais decorrentes de forjamento ou desbaste

\*\* Aquecimento lento e progressivo. Tempo de encharque 1 min./mm de espessura. A estrutura final após a têmpera é de martensita e austenita retida e a dureza neste estado varia entre 58 a 62 HRC

\*\*\* para espessuras de até 6mm. Durezas de 55 a 59 HRC

Em relação ao aço SAE 1095, pesquisa realizada junto ao site da Aços Roman Ltda indicou sua temperatura da austenitização para têmpera na faixa de 790 a 820°C, certamente no interior da zona crítica do diagrama ferro x cémentita. Adicionalmente, esta mesma fonte cita a temperatura de encharque para forjamento deste aço como sendo 1190°C.

#### **4.3.1 Tempera**

Confrontando a temperatura de têmpera de ambos os aços com aquela aplicada na prática para a tempera do bloco para produzir a faca de Damasco, aproximadamente 1250 °C , percebe-se um valor superestimado com possível crescimento dos grãos austeníticos e queda de dureza em função da probabilidade da presença mais intensa de austenita retida e possibilidade de trincas. Ensaios de líquidos penetrantes não foram realizados para averiguação da presença destes defeitos.

#### **4.3.2 Revenimento**

A faca foi revenida com a temperatura de 200°C por 45 minutos, conforme pela tabela 4, a cor é amarela pálida.

A figura 31 traz a curva de revenimento do aço 15N20. Como pode ser visto pela curva, a sua dureza começa a diminuir com o aumento da temperatura de revenimento. Considerando-se aplicação de cerca de 200 °C na prática da produção da faca de cutelaria desta pesquisa, estima-se a dureza final deste aço na mesma em torno de 62 a 63 HRC, tendo em vista também uma dureza de têmpera da ordem de 65 HRC.



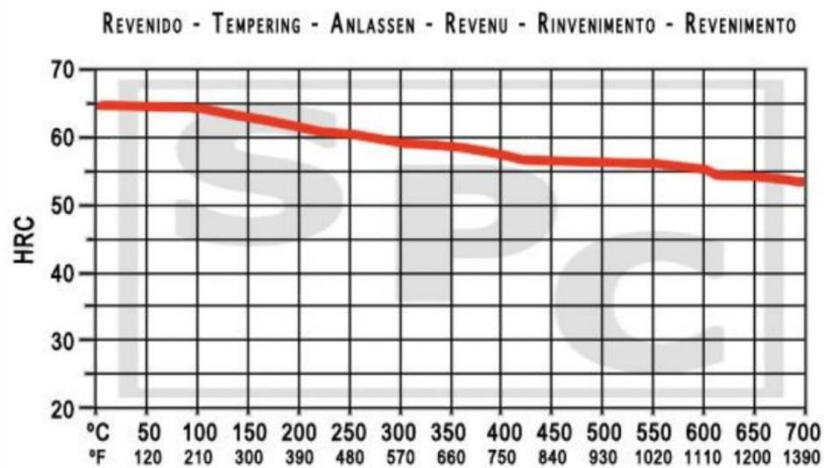


Figura 31: curva de revenimento aço 15N20. Fonte: Suministros Para Cuchillos. **Aço 15N20.**

A figura 32 traz a curva de revenimento do aço SAE 1095. Considerando-se a dureza de têmpera na ordem de 65 HRC pode-se inferir que a dureza após o revenimento de 200 o C também seja da ordem de 62 a 63 HRC.

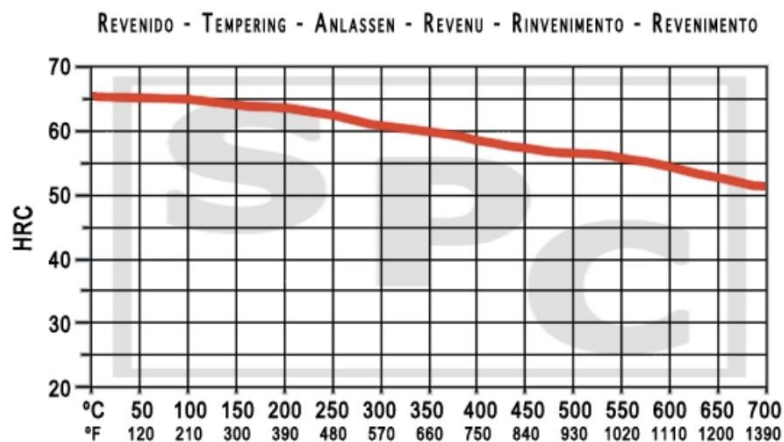


Figura 32: curva de revenimento aço SAE 1095. Fonte: Suministros Para Cuchillos. **SAE 1095.**

## 5 CONCLUSÕES

O forjamento foi realizado considerando encharque térmico da ordem de 1250°C, ou seja, dentro da faixa de usualmente aplicada em processos de conformação mecânica dos aços. Todavia, o encharque térmico aplicado na prática para a têmpera foi realizado além dos valores de temperaturas estabelecidos tecnologicamente conforme a literatura podendo implicar em problemas tais como trincas,



empenamentos, dureza variável etc. Os revenimentos a 200 °C em ambos os aços SAE 1095 e 15N20 indicaram proximidade de durezas.

## **6 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS**

Este por se tratar de um tema bastante abrangente, abre-se espaço para campos de pesquisas futuras para dar continuidade ao trabalho, tais como:

- Realizar a tempera considerando temperaturas mais baixas, considerando a tabela de cores de temperatura. Há aqui o reforço de que isto significa uma economia de insumos tais como energia elétrica; óleo combustível etc.
- Efetuar ensaios de líquidos penetrantes após os tratamentos térmicos para avaliar a presença de trincas.

## REFERÊNCIAS

- XIAO NIANGRE. Disponível em: < <https://www.163.com/dy/article/D6CPC1760522HCG8.html>>. Acesso em: 24 jun. 2021.
- TOJIRO JAPAN. Disponível em: < <http://www.tojirobuy.com/faq/info30.html>>. Acesso em: 24 jun. 2021.
- CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 9. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2016. p. 2-810.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1996. p. 21-574.
- Oleg D. Sherby and Jeffrey Wadsworth. **Ancient Blacksmiths, the Iron Age, Damascus Steels, and Modern Metallurgy**. Thermec 2000, Las Vegas, Nevada, December 4-8, 2000.
- J.D. Verhoeven, A.H. Pendray, and W.E. Dauksch. **The Key Role of Impurities in Ancient Damascus Steel Blades**. The Minerals, Metals & Materials Society, 1998.
- Luo H W, Qian W, Dong H. **Theoretic analysis on the mechanism of particular pattern formed on the ancient Damascus steel blades (in Chinese)**. Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 833-842, doi: 10.1360/972013-1172.
- LIU Baoxi, YANG Mingxu, GENG Lin, YIN Fuxing. **Research progress on formation mechanism and fracture behavior of laminated composites**. Journal of University of Science and Technology Liaoning, doi: 10.13988/j.ustl.2016.05.008.
- John Verhoeven and Alfred Pendray. **The Mystery of the Damascus Sword**. Appeared in Muse, Volume 2, Number 2, pp. 35-43, April 1998.
- Divisão de Recursos Didáticos da Diretoria de Educação do Departamento Regional do SENAI-SP. **Tratamento térmico**. p. 3-70.
- Prof. André Paulo Tschiptschin, EPUSP, Engenharia Metalúrgica e de Materiais. **Tratamento térmico de aços**. p. 1-51.
- Blog do cutedeireiro. **Temperatura para tratamento térmico de aços**. Disponível em: <<https://blog.lojadocutedeireiro.com.br/temperatura-para-tratamento-termico-de-acos/>>. Acesso em: 17 out. 2021.
- Suministros Para Cuchillos. **Aço 1095**. Disponível em: <<https://suministrosparacuchillos.com/pt/acos-carbono-facas/aco-1095>>. Acesso em: 18 out. 2021.

Suministros Para Cuchillos. **Aço 15N20**. Disponível em:  
<<https://suministrosparacuchillos.com/pt/acos-carbono-facas/aco-15n20>>. Acesso em:  
18 out. 2021.

MAXIME FERRUM. **Aço 15N20**. Disponível em:  
<<https://maximeferrum.com.br/aplicacoes/MF-15N20.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2021.

Gelson Luz. **Aço SAE 1095 Propriedades Mecânicas e Composição Química**. Acesso em: <<https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1095-propriedades-mecanicas.html?m=1>>. Acesso em: 20 out. 2021.