

**INSTITUTO FEDERAL  
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
Bahia

Campus  
Salvador

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA**

**CAMPUS SALVADOR**

**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA**

**SILVIA LUZIA DA CRUZ FERREIRA DA SILVA**

**ESTUDO DA MICROESTRUTURA DE UM AÇO MOLA APÓS PASSAR POR  
TRATAMENTOS TÉRMICOS E FORJAMENTO ATRAVÉS DA TÉCNICA DE  
CUTELARIA**

**SALVADOR**

**2024**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA**

**CAMPUS SALVADOR**

**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA**

**ESTUDO DA MICROESTRUTURA DE UM AÇO MOLA APÓS PASSAR POR  
TRATAMENTOS TÉRMICOS E FORJAMENTO ATRAVÉS DA TÉCNICA DE  
CUTELARIA**

Trabalho de conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Industrial Mecânica do Instituto Federal da Bahia como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Moacir Bispo

Salvador, Bahia 2024

SILVIA LUZIA DA CRUZ FERREIRA DA SILVA

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO IFBA, COM OS  
DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

S586e Silva, Silvia Luzia da Cruz Ferreira da

Estudo da microestrutura de um aço mola após passar por tratamentos térmicos e forjamento através da técnica de cutelaria / Silvia Luzia da Cruz Ferreira da Silva; orientador Moacir Bispo -- Salvador, 2024.

98 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) -- Instituto Federal da Bahia, 2024.

1. Forjamento. 2. Mola. 3. Cutelaria. 4. Tratamentos térmicos. I. Bispo, Moacir, orient. II. TÍTULO.

CDU 621.7

**ESTUDO DA MICROESTRUTURA DE UM AÇO MOLA APÓS PASSAR POR  
TRATAMENTOS TÉRMICOS E FORJAMENTO ATRAVÉS DA TÉCNICA DE  
CUTELARIA**

Trabalho de conclusão de Curso de Graduação  
em Engenharia Industrial Mecânica do  
Instituto Federal da Bahia como requisito para  
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia  
Mecânica.

Aprovado em: 09/ 09/ 2024.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Moacir Bispo Ramos

---

Prof. MSc. Francisco Souza Almeida

---

Prof. MSc. João Batista Barbosa

---

Prof. Dr. Ilder Bastos dos Santos

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela companhia em todos os momentos.

Agradeço a meu esposo e aos meus pais, pelo apoio, paciência e orações ao longo dessa jornada.

Agradeço ao Prof. Dr. Moacir Bispo por aceitar ser meu orientador na execução deste trabalho, sem ele não existiria Tcc, a dedicação dele ao trabalho e a atenção a cada detalhe.

Um grande mestre que vou levar para toda minha vida, guardado em meu coração.

Agradeço a Quésia e Dariana, por ter permitido que em grupo, acontecesse a confecção desse trabalho, uma jornada de aprendizagem e compromisso, onde construímos história de superação a cada linha.

Ao técnico do IFBA, senhor Everaldo, que sua dedicação nos proporcionou momentos únicos durante a fabricação da faca e sempre com um sorriso largo nos ajudando.

SILVIA LUZIA DA CRUZ FERREIRA DA SILVA

## **RESUMO**

Esta atividade de conclusão de curso teve como principal objetivo análise da microestrutura de uma mola helicoidal veicular, que passou pelo processo de transformação para obtenção de uma lâmina através de uma técnica chamada cutelaria, essa técnica faz uso do forjamento, têmpera e revenimento como meios de obtenção de instrumentos de corte.

O instrumento de corte do presente trabalho é uma faca. O resultado final esperado da microestrutura é uma martensita revenida.

A martensita revenida proporciona uma dureza com toque de ductilidade e proporciona a peça de cutelaria um instrumento duradouro e resistente ao uso.

As peças obtidas por esse processo exigem um alto grau de técnica e conhecimento, pois as temperaturas que serão utilizadas variam de acordo com a composição química.

Palavras chave: Forjamento, mola, cutelaria e tratamentos térmicos.

## **ABSTRACT**

The main objective of this course completion project was the analysis of the microstructure of a vehicle coil spring, which underwent a transformation process to obtain a blade using a technique called cutlery making. This technique involves forging, tempering, and annealing as means of producing cutting instruments.

The cutting instrument discussed in this work is a knife. The expected final result of the microstructure is tempered martensite. Tempered martensite provides hardness with a touch of ductility and makes the cutlery piece a durable and resistant tool for use.

The pieces obtained through this process require a high level of skill and knowledge, as the temperatures used vary according to the chemical composition.

**Keywords:** Forging, spring, cutlery and heat treatments.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Descarte Inadequado de Veículos.....	17
Figura 2: Curva de deformação para diferentes tipos de mola.....	20
Figura 3: Mola de compressão cônica de passo constante.....	20
Figura 4: Comparação do comportamento mecânico de um aço mola e um aço estrutural.....	24
Figura 9: Faca produzida pelo aço SAE 5160.....	38
Figura 10: Gráfico de tratamento Térmico.....	44
Figura 11 : Gráfico de tempera.....	47
Figura 12: Processo de transformação da estrutura por resfriamento rápido.....	48
Figura 13: Penetrador de Diamante.....	49
Figura 14: Detalhes do Penetrador de Diamante.....	50
Figura 15: Mola Helicoidal Cônica.....	53
Figura 16: Esmerilhadeira de bancada.....	54
Figura 17: Mola presa na morsa para utilização da esmerilhadeira angular.....	55
Figura 18: Thinner.....	55
Figura 19: Mola após o thinner.....	56
Figura 20: Mola sob o efeito do líquido penetrante.....	56
Figura 21: Mola com revelador D70 da marca Metalchek.....	57
Figura 22: Obtenção de amostra da mola.....	58
Figura 23: Amostra da mola embutida.....	58
Figura 24: Lixas usadas para o acabamento da superfície da amostra.....	59
Figura 25: Lixadeira e Politriz.....	60
Figura 26: Amostra sendo atacada por nital 2%.....	60
Figura 27: Microscópio Metalográfico.....	61
Figura 28: Microestrutura após o ataque com Nital 2%.....	62
Figura 29: Durômetro.....	63
Figura 30: Mola presa na morsa sendo cortada.....	65
Figura 31: Partes da mola cortada com 200 mm de comprimento.....	65
Figura 32: Instrumentos para ser utilizado no forjamento (marreta e tenaz).....	66
Figura 33: Mola cortada sendo aquecida a 900 °C.....	67
Figura 34: Peça sendo martelada após o aquecimento.....	67
Figura 35: Mola planas após o forjamento.....	68
Figura 36: Mola oxidada.....	69
Figura 37: Mola sendo desbastada no esmeril.....	69

Figura 38: Peça após ser desbastada.....	70
Figura 39: Furadeira de bancada.....	70
Figura 40: Peça furada após o forjamento.....	71
Figura 41: Marcadores.....	72
Figura 42: Forno câmara com as peças dentro.....	73
Figura 43: Balde com água e tijolos cerâmicos.....	74
Figura 44: Balde com a peça em água.....	74
Figura 45: Óleo para realização da têmpera.....	75
Figura 46: Lata com óleo sendo realizada a têmpera.....	76
Figura 47: Peça após o revenimento.....	77
Figura 48: Peça após a têmpera e revenimento.....	78
Figura 49: Faca pronta com cabo.....	79
Figura 50: Microestrutura temperada em água.....	80
Figura 51: Microestrutura temperada em óleo.....	81
Figura 52: Microestrutura obtida pelo MEV aumento de 3000x (água).....	82
Figura 53: Microestrutura obtida pelo MEV aumento de 3000x ( óleo).....	83
Figura 54: Amostra pós-têmpera e revenido em óleo.....	84
Figura 55: Ponta da faca cortada, depois da têmpera e do revenimento ( óleo).....	84
Figura 56: Amostra pós-têmpera e revenido em água.....	85
Figura 57: Amostra pós-têmpera e revenido em água óleo.....	87
Figura 58: Amostra pós-têmpera e revenido em água óleo.....	89
Figura 59: Faca após todo o processo de afiação e pronta para uso.....	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Aços de mola de liga e alto carbono.....	26
Tabela 2: Porcentagem e tipos de aços usados em mola.....	27
Tabela 3: Influência de alguns elementos adicionados aos aços de mola.....	28
Tabela 4: Aços para obtenção de facas.....	34
Tabela 5: Escala de Dureza Rockwell Normal e Aplicações.....	47
Tabela 6: Escala de Dureza Rockwell Superficial e Aplicações.....	48
Tabela 7: Primeiros valores obtidos pelo ensaio de dureza.....	59
Tabela 8: Valores obtidos durante os ensaios Rockwell C (HRC).....	60
Tabela 9: Média dos resultados em óleo.....	81
Tabela 10: Média dos resultados em água.....	82
Tabela 11: Dados obtidos do ensaio de dureza Rockwell C.....	86
Tabela 12: Dados obtidos pelo aço do presente trabalho.....	86

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASM- Automatic Storage Management

ASTM- American Society for Testing and Materials

MEV- Microscópio Eletrônico de Varredura

NBR-Norma Brasileira Regulamentadora

NR- Norma Regulamentadora

RHC- Rockwell C

SAE- Society of Automotive Engineers

TCC- Trabalho de Conclusão de curso

DENATRAN- Departamento Nacional de Trânsito

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
3.1. Impacto ambiental do descarte indevido de peças veiculares.....	15
Baterias.....	16
Óleos de Motor.....	16
Pneus.....	16
Filtros de óleo e Filtros de ar.....	16
Componentes Eletrônicos ( ECUs, Sensores).....	16
Molas Veiculares.....	17
<b>2. Molas.....</b>	<b>18</b>
2.2 Lei de Hooke.....	19
2.3 Molas lineares e não lineares de acordo com a Lei de Hooke.....	20
2.4 Mola Helicoidal Cônica de Compressão.....	21
2.5 Importância das molas helicoidais cônicas de compressão em diversos campos da engenharia.....	21
2.6 Estrutura das Molas Helicoidais Cônicas de Compressão.....	22
2.7 Funcionamento das Molas Helicoidais Cônicas de Compressão.....	23
2.8 Propriedades Mecânicas das Molas Helicoidais Cônicas de Compressão.....	23
2.9 Experimentação e teste de molas helicoidais cônicas de compressão em ambiente laboratorial.....	24
2.10 Tipos de materiais para fabricação de molas helicoidais cônicas de compressão.....	26
2.11 Aços para molas helicoidais de grande seção para serviços pesados.....	28
2.12 Microestrutura dos aços mola.....	31
2.12 Vantagens da mola helicoidal cônica de compressão.....	34

<b>3. Técnicas de Trabalho com Mola Helicoidal Cônica.....</b>	<b>35</b>
<b>4. Cutelaria.....</b>	<b>35</b>
4.1 História da Cutelaria.....	35
4.2. Aços mais utilizados na confecção de uma faca para Cutelaria.....	36
4.3 Determinação do valor de uma faca por cutelaria:.....	37
4.4 Técnicas e Processos de Fabricação de Utensílios Cortantes.....	39
4.5. Ética e Segurança na Cutelaria.....	40
4.6. Vantagens da Cutelaria.....	40
4.7 Desvantagens da Cutelaria.....	41
4.8 Processo de Cutelaria em Molas Cônicas:.....	41
<b>5. Tratamento Térmico.....</b>	<b>42</b>
<b>6. Forjamento.....</b>	<b>43</b>
6.1 Vantagens do forjamento em relação aos outros processos de fabricação.....	45
6.2 Têmpera.....	46
<b>7. Ensaio de Dureza Rockwell C.....</b>	<b>47</b>
7.1 Processo de teste.....	48
7.2 Descrição do processo.....	48
<b>8. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>50</b>
8.1 Introdução.....	50
8.2 Limpeza da mola helicoidal cônica.....	51
8.3 Esmerilhadeira de bancada.....	52
<b>9. Obtenção de amostras para a realização da Metalografia.....</b>	<b>55</b>
9.1. Corte da mola.....	55
<b>10. Análise Microestrutural.....</b>	<b>84</b>
10.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V.).....	84
10.2 Comparação entre a microestrutura e a dureza do aço mola do presente trabalho e o aço SAE 5160.....	86

<b>11. CONCLUSÃO.....</b>	<b>89</b>
---------------------------	-----------

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo da microestrutura é a parte mais importante dentro da engenharia na fabricação de peças metálicas, a estrutura interna do material influencia diretamente em suas propriedades mecânicas, a compreensão da microestrutura ajuda a otimizar esse processo e garantir que as peças atendam aos requisitos de desempenho e durabilidade. Se tratando de peças recicladas é especialmente relevante, pois é visado a qualidade de tais peças, uma técnica que utiliza aços reciclados e se baseia na parte microestrutural de aços, tema do presente trabalho é a cutelaria.

A cutelaria, é uma técnica que transforma metais em instrumentos de corte, trabalha com peças recicladas de uma forma artesanal, dá vida à peças que possivelmente iriam ser descartadas muitas vezes de forma irregular no meio ambiente, o que causaria danos não só a fauna e flora quanto ao ser humano.

Para obtenção de peças de qualidade e duradouras através da cutelaria, além de utilizar alguns métodos inerentes, se faz necessário estudo da microestrutura, e da composição química do metal, pois os tratamentos térmicos são essenciais para obtenção de materiais de alto padrão. Geralmente os tratamentos térmicos utilizados nessa técnica são: têmpera, revenimento e normalização, e o forjamento como processo de fabricação.

O forjamento é o processo de fabricação que dá início à cutelaria, pois algumas peças recicladas necessitam de uma mudança na forma física, como uma mola, que possui curvas e necessita dessa mudança para o tratamento térmico ser capaz de alcançar a parte interna da peça.

O presente trabalho se destina ao estudo da microestrutura de uma lâmina de corte, obtida pela técnica de cutelaria a partir de uma mola helicoidal reciclada, o conhecimento da microestrutura é especialmente relevante devido às complexidades adicionais que envolvem a reutilização de materiais. A reciclagem de metais pode introduzir variabilidades na composição e estrutura, que podem afetar as propriedades finais do instrumento. A cutelaria é o campo que se dedica à fabricação e design de facas e outros utensílios de corte, este campo combina aspectos de engenharia de materiais e técnicas tradicionais de fabricação e por conta dessa gama de variedades para estudo, ela foi escolhida para ser abordada.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar a microestrutura do aço mola após passar pelo tratamento térmico de têmpera e revenimento através do microscópio eletrônico de varredura e comparar com o aço SAE 5160.

#### **2.1.1 Objetivo Específico**

Descrever as etapas de produção até a obtenção da lâmina;

Executar ensaios mecânicos de dureza Rockwell e testes de fio de afiação, conforme as técnicas de cutelaria;

Observação do comportamento da do aço mola a cada processo, como fissuras e trincas;

Para este trabalho foi utilizada uma mola helicoidal cônica de compressão encontrada em um ferro velho. Esse tipo de mola é um dos componentes do sistema de suspensão de veículos.

### **2.2 JUSTIFICATIVA**

Embora não seja uma técnica amplamente divulgada e seu mercado não seja muito promissor, ou seja, é um mercado pequeno, porém é um bom laboratório para colocar em prática toda a teoria abordada em sala de aula, como tratamento térmico, estudo sobre oxidação em aços, os danos causados ao meio ambiente pelo descarte irregular de peças veiculares, além da microestrutura do aço após os tratamentos.

## **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **3.1. Impacto ambiental do descarte indevido de peças veiculares**

Com o crescimento populacional em áreas urbanas, os problemas relacionados à poluição no meio ambiente aumentam cada vez mais. Essa poluição muitas vezes surge em decorrência do descarte irregular dos bens de consumo, como veículos. Quando chegam ao

final da vida útil (de 15 a 20 anos), ou quando há troca de peças e as peças são liberadas de forma indevida na natureza.

Segundo o DENATRAN (Departamento Nacional de Trânsito), no Brasil existem aproximadamente 70 milhões de veículos e 215 milhões de pessoas, uma média de 0,33 veículos por pessoa. A vida útil média dos carros no Brasil varia muito, porém são considerados fora de uso após cerca de 15 a 20 anos de operação.

De acordo com o IBGE ( Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), a quantidade de veículos sucateados é significativa e traz graves consequências para o meio ambiente.

A seguir estão listados alguns dos muitos impactos que o descarte indevido de peças veiculares causam:

### **Baterias**

- Contaminação do solo e da água: as baterias possuem ácidos fortes, como ácido sulfúrico e metais pesados, como chumbo e cádmio que podem vazar e como consequência contaminar o solo e os corpos d' água, prejudicando a flora e fauna e podendo afetar a saúde humana (Gordon, R. B., & Graedel, T. E. 2010);

### **Óleos de Motor**

- Poluição da água e solo: na composição do óleo pode conter hidrocarbonetos tóxicos e metais pesados, em contato com o solo podem afetar a vida aquática e o crescimento das plantas (Leahy, J. G., & Colwell , R. R. 1990) ;

### **Pneus**

- Poluição por produtos químicos: por possuírem aditivos químicos, eles contaminam solo e água, e por ser difícil de se decompor se acumulam em aterros e quando queimados liberam substância tóxicas como dioxinas e furanos (Crocker, C. 2000);

### **Filtros de óleo e Filtros de ar**

- Impacto na qualidade do solo: resíduos de filtros podem afetar a qualidade do solo e a saúde das plantas e resíduos de óleos e partículas tóxicas podem poluir o solo e as fontes de água (Kuczynski, T. A. 2013);

### **Componentes Eletrônicos ( ECUs, Sensores)**

- Poluição por metais pesados : praticamente todos os componentes eletrônicos podem conter metais pesados e produtos tóxicos, como o mercúrio e chumbo e o descarte ilegal libera todas as substâncias no meio ambiente gerando sérios impactos na biodiversidade e saúde humana (Baldé, C. P., Wang, F., & Kuehr, R. 2015).

### **Molas Veiculares**

- Contaminação química: as molas geralmente são feitas de aço e podem ter revestimento ou tratamentos químicos que podem liberar substâncias tóxicas no solo e na água;
- Oxidação e ferrugem: o aço pode sofrer corrosão quando exposto a ambientes úmidos ou ácidos, liberando óxidos metálicos e contaminando o solo (Liu, Y., Wang, Y., & Zhao, H. 2016).;
- Liberação de poeira tóxica : caso as molas tenham revestimento que se deterioram, podem liberar poeiras que, inaladas, prejudicam a saúde humana (Reddy, M. M., & Smith, M., 2012).

**Figura 1: Descarte Inadequado de Veículos**



Fonte: descarte-inadequado

O presente trabalho tem a finalidade de reciclar a mola veicular através da cutelaria. Logo essa técnica será o foco do trabalho.

A seguir será apresentado as características de uma mola veicular, assim como o processo de fabricação que ela irá passar e sua microestrutura.

## **2. Molas**

A mola pode ser definida como elemento de máquina que apresenta deformação elástica quando são carregadas e depois recuperam a sua forma inicial, logo após a remoção da carga (Collins, 2006).

A mola possui deformação reversível ou elástica, pois não ocorre deslocamento permanente de átomos ou moléculas, ou seja, as ligações não são quebradas.

A classificação da mola pode ser em relação a carga ou configuração física.

Quanto a carga:

- compressão;
- tração;
- torque.

Quanto a configuração física:

- molas de fio (ou arames): podem ser helicoidais de fio redondo ou quadrado;
- molas planas: podem ser vigas em balanço;
- molas arruela ou prato ( ou Belleville);
- molas enroladas planas ( MARGHITU, 2005).

Geralmente as molas são produzidas para atender grandes solicitações de esforços. Logo elas devem ser produzidas com materiais que atendam características como:

- alta resistência à tração, compressão e torque;
- alto ponto de escoamento;
- bom armazenador de energia;
- alto limite de elasticidade (grande deflexão);
- grande resistência a esforços elásticos;
- resistência alta à fadiga.

Independente do seu formato ou tipo, segundo os conceitos clássicos da resistência dos materiais, as molas são componentes que trabalham sempre dentro da zona elástica determinada pela Lei de Hooke (1). Essa lei afirma que a deformação é proporcional à tensão. Numa descrição simplificada, as molas armazenam energia e a devolvem sem se deformarem plasticamente (MOLAS HOESCH, 2015).

## 2.2 Lei de Hooke

A lei de Hooke estabelece que, quando uma mola é deformada por alguma força externa, uma força elástica restauradora passa a ser exercida na mesma direção e no sentido oposto à força externa. Essa força elástica, por sua vez, é variável e depende do tamanho da deformação que é sofrida pela mola.

$$F_{el} = -k \cdot \Delta x \quad (\text{Eq.1})$$

Sendo:

- $F_{el}$  = força elástica aplicada (N);
- $k$  = constante da mola (N/m);
- $\Delta x$  = deflexão (m).

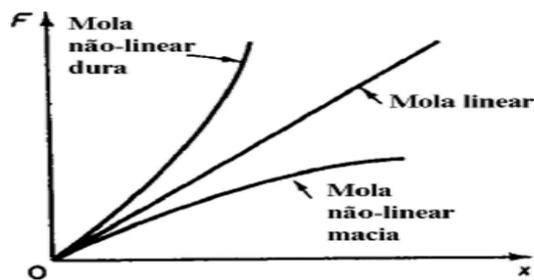
A constante elástica  $k$ , corresponde à rigidez da mola, logo quanto maior seu valor, mais rígida será a mola, e vice-versa,  $\Delta x$  corresponde a diferença no comprimento da mola à medida que é comprimida ou tracionada. Sendo definida como *elongação*, ou seja, é a coordenada que denota o afastamento de uma partícula ou de um corpo em relação a uma posição de equilíbrio. O sinal negativo corresponde ao sentido da força elástica, que é sempre oposto à variação de comprimento sofrida pela mola, logo se a variação é positiva a força é negativa, ou seja, como a força é um vetor, o sinal negativo é utilizado para indicar que a força elástica é sempre contrária à força aplicada sobre a mola.

## 2.3 Molas lineares e não lineares de acordo com a Lei de Hooke

A mola tem seu comportamento linear quando a deformação sofrida é diretamente proporcional à força (ou carga) a que ela é submetida. Nesse caso obedece a Lei de Hooke (1). Por outro lado, as molas não lineares apresentam diferentes valores de  $k$ , dependendo da força aplicada. A não linearidade pode ser obtida através do número de espirais, quando a mola deflete.

A mola linear, é representada por uma reta, enquanto as molas não lineares tem dois tipos de comportamentos, algumas “endurecem” à medida que aumenta a sollicitação, são chamadas molas duras, outras são deformadas com mais facilidade e são chamadas molas macias, como na representação gráfica a seguir:

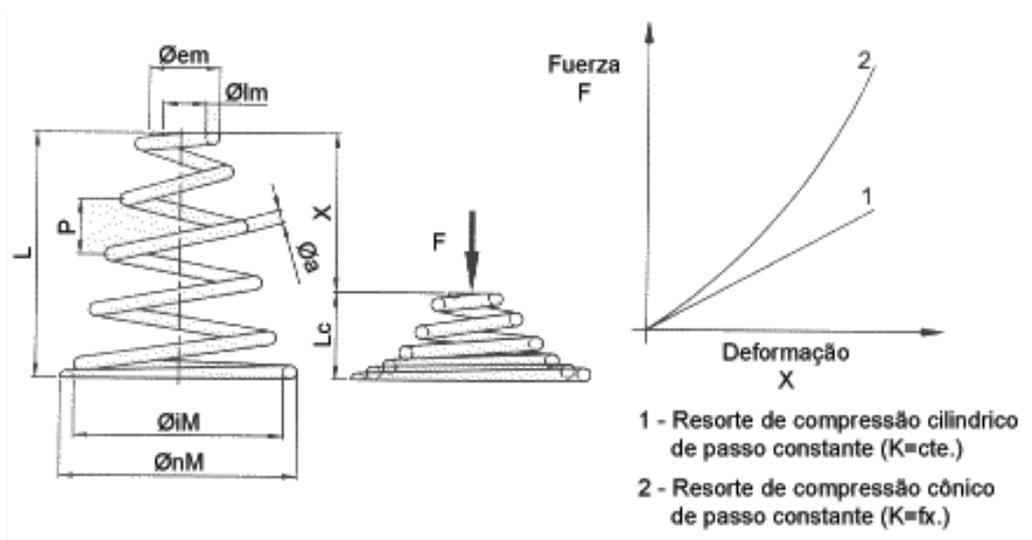
**Figura 2: Curva de deformação para diferentes tipos de mola**



Fonte: gruposenac.

A seguir podemos observar o comportamento da mola tema do presente trabalho:

**Figura 3: Mola de compressão cônica de passo constante**



Fonte: molas

Na figura acima, o comportamento da mola cônica é indicado pela curva 2 no gráfico.

## **2.4 Mola Helicoidal Cônica de Compressão**

Uma mola helicoidal cônica de compressão é um tipo de mola feita de arame enrolado em forma de hélice, com espaçamento entre as espirais diminuindo gradualmente em direção a uma extremidade. Essas molas são projetadas para suportar carga axial quando comprimidas, e sua forma cônica permite uma distribuição uniforme da carga ao longo do comprimento da mola (Hibbeler,2012).

## **2.5 Importância das molas helicoidais cônicas de compressão em diversos campos da engenharia**

Esse tipo de mola desempenha um papel importante em diversos campos da engenharia devido a sua capacidade de fornecer características de compressão progressiva, resistência a cargas axiais e espaço eficiente de instalação. Abaixo estão algumas áreas em que essas molas são amplamente utilizadas:

- **Indústria Automotiva** : são encontradas em sua grande maioria em sistema de suspensão de veículos, pois proporcionam amortecimento e suporte de carga em uma variedade de condições de estrada;
- **Indústria Aeroespacial** : são utilizadas em sistemas de trem de pouso de aeronaves e em outras aplicações onde é necessária uma combinação estrutural e peso leve;
- **Equipamentos Industriais** : são empregadas em máquinas industriais, nos sistemas de amortecimento, sistema de válvulas;
- **Engenharia civil e Estrutural**: são usadas em sistemas de absorção de choque e sistemas de portões (John Wiley & Sons, 2018).

## **2.6 Estrutura das Molas Helicoidais Cônicas de Compressão**

São molas compostas por um fio metálico de alta resistência, como aço carbono ou aço inoxidável, enrolado em espiral de modo que as espirais estejam espaçadas

uniformemente ao longo do comprimento da mola. A seção transversal da mola é cônica significando que o diâmetro da espiral diminui gradualmente de uma extremidade para outra. As extremidades da mola geralmente são retificadas (Juvinal,2012).

De acordo com os princípios de design estrutural da mola helicoidal temos:

- **Resistência:** garante a capacidade de suportar cargas e deformações sem falhar;
- **Flexibilidade:** determina a sua capacidade de deformação elástica sob carga e sua capacidade de retornar à sua forma original;
- **Durabilidade:** é influenciada por vários fatores, incluindo a quantidade do material, o projeto da mola e as condições de operação;
- **Desempenho:** avaliado com base em sua capacidade de fornecer a força necessária para uma aplicação específica, mantendo-se dentro dos limites de deformação elástica e garantindo uma vida útil adequada ( Shigley,2020).

## 2.7 Funcionamento das Molas Helicoidais Cônicas de Compressão

Quando uma força axial é aplicada para comprimir a mola, as espirais são pressionadas umas contra as outras, causando uma deformação elástica no material do fio. A característica cônica da mola proporciona uma taxa de compressão variável, ou seja, à medida que a mola é comprimida, a rigidez aumenta progressivamente, o que pode ser útil em aplicações onde é necessário um amortecimento progressivo ou uma resposta de carga variável. A rigidez da mola é determinada pelo material do fio, diâmetro do fio, diâmetro médio da espiral, número de espirais e constante de mola do material (Juvinal,2012).

## 2.8 Propriedades Mecânicas das Molas Helicoidais Cônicas de Compressão

As propriedades das molas cônicas são fundamentais para entender seu comportamento e desempenho em diversas aplicações, são elas:

- **Rigidez:** a rigidez refere-se a sua capacidade de resistir à deformação quando submetida a uma carga axial; é definida pela relação entre a força aplicada à mola e a

deflexão resultante, porém ela é influenciada por vários fatores, incluindo o diâmetro do fio, o diâmetro médio da espiral, o número de espirais e as propriedades do material do fio. Quanto maior a rigidez da mola, menor será a sua deflexão para uma dada carga aplicada;

- **Carga:** é a força que a mola pode suportar sem sofrer deformação permanente. É determinada pela capacidade de carga do material do fio e pela geometria da mola. A carga máxima que uma mola pode suportar antes de sofrer deformação permanente é conhecida como carga de ruptura ou carga de falha;
- **Deflexão:** é referente à quantidade de compressão que ela experimenta quando sujeita a uma carga axial; ela é medida pela distância que a extremidade da mola se desloca quando comprimida; a deflexão é diretamente proporcional à carga aplicada, conforme descrito pela Lei de Hooke para materiais elásticos (Shigley, 2014).

## **2.9 Experimentação e teste de molas helicoidais cônicas de compressão em ambiente laboratorial**

Esses testes envolvem vários procedimentos para avaliar propriedades mecânicas e vida útil. Abaixo seguem algumas metodologias comuns para esses testes:

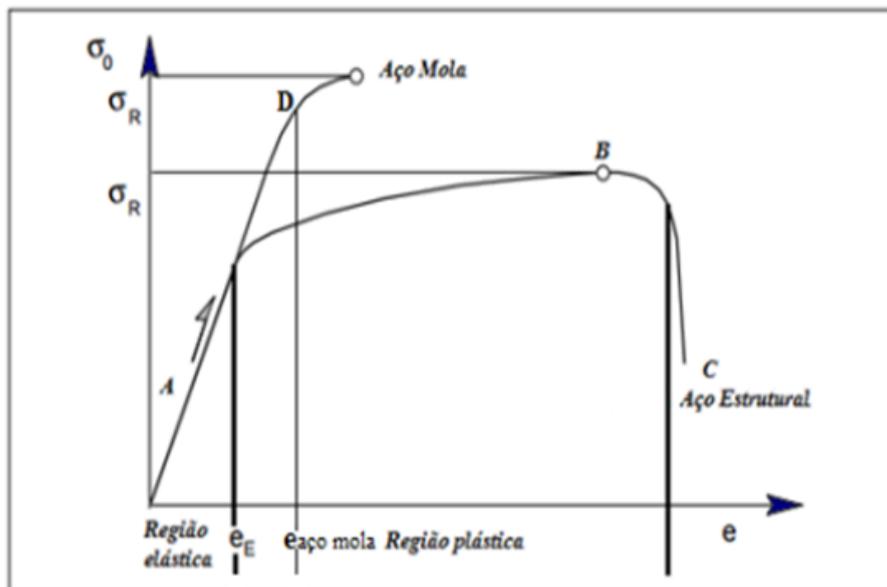
- **Ensaio de carga estática:** teste que envolve aplicação gradual de uma carga axial e a medição da deflexão resultante em intervalos de carga e pré-determinados; a partir dos dados coletados, é possível determinar a rigidez da mola, sua carga máxima suportada antes da deformação permanente e sua capacidade de retorno à sua forma original após a remoção da carga;
- **Ensaio de carga dinâmica:** teste que envolve aplicação gradual de uma carga cíclica em frequência específicas para simular condições de uso real. É usado para avaliar a capacidade de fadiga da mola, ou seja, sua capacidade de resistir a um grande número de ciclos de carga sem falhar;
- **Ensaio de Vida útil:** teste que envolve aplicação de cargas cíclicas em diferentes níveis de carga para determinar sua vida útil sob condições de operação específicas.

Ele é usado para estimar a vida útil da mola em serviço e pode incluir ensaios acelerados para reduzir o tempo de teste;

- **Medição de Geometria e propriedades Materiais:** além dos testes de carga é importante medir a geometria da mola, incluindo diâmetro médio da espiral e número de espirais; a avaliação das propriedades materiais do fio, como resistência à tração e módulo de elasticidade, também é essencial para uma caracterização completa da mola (ASM International, 2008).

A figura abaixo exemplifica melhor o comportamento de um aço mola comparado a um aço estrutural ( aço destinado à estruturas estáticas).

**Figura 4: Comparação do comportamento mecânico de um aço mola e um aço estrutural**



Fonte: COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS, (GUIA..., p. 64), ADAPTADO

Na figura acima pode-se observar duas regiões distintas, onde a elástica é definida pela tensão e deformação específicas de escoamento do material, e a região plástica definida a partir do final da região elástica. E esta por sua vez é dividida em três regiões bem

diferenciadas: uma sendo o patamar de escoamento, onde as deformações se processam sem incremento das tensões, outra região endurecimento do material e uma região caracterizada por um estrangulamento localizado ou estrição da seção transversal do material, logo após uma tensão máxima.

O aço mola possui uma maior resiliência (capacidade de absorver energia no campo elástico).

## **2.10 Tipos de materiais para fabricação de molas helicoidais cônicas de compressão**

O material mais comum usado nas molas é o aço. O aço é a liga ferro-carbono contendo 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, contendo também alguns elementos residuais, como consequências de processos de fabricação, abaixo de 0,008% corresponde a máxima solubilidade do carbono ferro à temperatura ambiente e o limite superior, superior à 2,11% é a máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro à temperatura de 1148°C, sendo que essa porcentagem pode variar de 2,00% a 2,11% dependendo da presença de elementos de liga ou de elementos residuais contendo teores maiores que os normais (Chiaverini 1988).

O aço para mola é designado como aço liga, pois dependendo das solicitações, o aço deve apresentar características que estejam de acordo com o projeto.

Segundo PLENTZ (2009), as principais características do aço mola são:

- Elevada resistência ao impacto, obtido através do controle do grão e encruamento, adição de carbono, tratamento térmico, elemento de liga, etc. ;
- Elevado limite de resistência à fadiga, através de tratamento térmicos e mecânicos;
- Superfície perfeita (isentas de irregularidades, como descarbonetação superficial, marcas de ferramenta, riscos de matrizes de trefilação e pequenas trincas);
- Dureza superficial elevada.

Existe uma gama de materiais que podem ser usados na fabricação da mola, cada um com propriedades mecânicas específicas que influenciam diretamente em seu desempenho, eles podem ser aço carbono, aço inoxidável, ligas de aço de alta resistência e ligas de cobre.

A seguir podemos observar a influência de cada um deles:

- **Aço carbono:** é amplamente utilizado na fabricação de molas devido a sua boa combinação de resistência, ductilidade e custo relativamente baixo; pode ser tratado termicamente para melhorar suas propriedades mecânicas e sua capacidade de resistir à fadiga;
- **Aço Inoxidável:** é usado pois possui resistência à corrosão e sua capacidade de manter suas propriedades mecânicas em uma ampla faixa de temperatura;
- **Ligas de Aço de Alta Resistência:** aços de mola ligados ao silício, cromo ou manganês oferecem uma combinação excepcional de resistência e elasticidade. Essas ligas são usadas em aplicações que exigem molas com alta capacidade de carga e rigidez;
- **Ligas de Cobre :** como o bronze e o latão são conhecidas por sua excelente condutividade elétrica e resistência à corrosão, elas são utilizadas em aplicações que exigem molas com propriedades elétricas ou que estarão expostas a ambientes corrosivos (ASM International,2001).

Aproximadamente 90% dos aços para construção são destinados à indústria de automóveis. Os aços com mais interesses são os de aplicação em molas de suspensão automotiva, podendo ser os aços SAE 5160 e SAE 9254 . O SAE 9254 é utilizado em molas que necessitam de resistência ao choque e em temperaturas elevadas.

Na tabela a seguir pode-se observar os materiais utilizados para fabricação de mola, variação de composição e tipos de aplicações.

**Tabela 1: Aços de mola de liga e alto carbono**

<i>Nome do material</i>	<i>Especificações similares</i>	<i>Descrição</i>
Fio musical 0,80-0,95C	UNS G10850 AISI 1085 ASTM A228-51	Este é o melhor, o mais tenaz e o mais amplamente usado entre todos os materiais de mola para molas pequenas. Ele tem a maior resistência à tração e pode suportar tensões mais elevadas sob carregamento repetido que qualquer outro material de mola. Disponível em diâmetros 0,12 a 3 mm (0,005 a 0,125 in). Não deve ser usado acima de 120°C (250°F) ou a temperaturas abaixo de zero.
Fio revenido em óleo 0,60-0,70C	UNS G10650 AISI 1065 ASTM 229-41	Este aço de mola de propósito geral é usado para muitos tipos de molas de espira nas quais o custo do fio musical é proibitivo e em tamanhos maiores que os disponíveis em fio musical. Não recomendada para carregamento de choque e impacto. Disponível em diâmetros de 3 a 12 mm (0,125 a 0,500 in), mas tamanhos maiores e menores podem ser obtidos. Não recomendado para uso acima de 180°C (350°F) ou em temperaturas abaixo de zero.
Fio repuxado duro 0,60-0,70C	UNS G10660 AISI 1065 ASTM A227-47	Este é o aço de mola mais barato de propósito geral e deve ser usado somente quando vida, acurácia e deflexão não são muito importantes. Disponível em diâmetros de 0,8 a 12 mm (0,031 a 0,500 in). Não recomendado para uso acima de 120°C (250°F) ou a temperaturas abaixo de zero.
Cromo-vanádio	UNS G61500 AISI 6150 ASTM 231-41	Este é o aço liga de mola mais popular para condições envolvendo tensões mais elevadas que pode ser usado com aços de alto-carbono e nas quais resistência à fadiga e resistência longa são necessárias. Também bom para cargas de choque e impacto. Amplamente usado para molas de válvulas de motor de aeronaves e para temperaturas até 220°C (425°F). Disponível em tamanhos recozidos ou pré-revenidos de 0,8 a 12 mm (0,031 a 0,500 in) de diâmetro.
Cromo-silício	UNS G92540 AISI 9254	Esta liga é um material excelente para molas altamente tensionadas que requerem vida longa e estão sujeitas a carregamento de choque. Durezas Rockwell de C50 a C53 são muito comuns, e o material pode ser usado a até 250°C (475°F). Disponível de 0,8 a 12 mm (0,031 a 0,500 in) de diâmetro.

Fonte: Shigley, Mishke e Budynas (2005)

Na tabela acima é observado que para cada tipo de aplicação utiliza-se um determinado material, podendo ter a variação de sua composição no seu processamento. O fio musical é o (nome comercialmente) mais vendido.

### **2.11 Aços para molas helicoidais de grande seção para serviços pesados**

As molas para serviço pesado são feitas com aços-carbono de alto teor de C ( tipo SAE 1085 ou 1095) ou aço Cr-V (tipo SAE 6150) ou Si-Mn (tipo SAE 9260) etc.

A grande seção ( diâmetro maior da mola) é necessária para suportar as cargas pesadas de serviço, logo essas molas são fabricadas pelo enrolamento a quente de barras de aço. É preciso esmerilhar as barras de aços antes de serem conformadas, para obter o máximo valor de limite de fadiga.

Em caso de aço de alto carbono para molas de compressão as cargas permissíveis são:

- 57 kg/mm<sup>2</sup> para serviço leve;
- 49 kg/mm<sup>2</sup> para serviço médio;
- 39 kg/mm<sup>2</sup> para serviço pesado.

A seguir podemos ver a porcentagem aproximada de cada elemento nos aços para mola:

**Tabela 2: Porcentagem e tipos de aços usados em mola**

Aço SAE	C %	Mn %	Si %	Cr %	V %	Mo %	Ni %
1045	0,43—0,50	0,60—0,90	—	—	—	—	—
1065	0,60—0,70	0,60—0,90	—	—	—	—	—
1085	0,80—0,93	0,70—1,10	—	—	—	—	—
1095	0,90—1,05	0,30—0,50	—	—	—	—	—
4068	0,63—0,70	0,75—1,00	0,20—0,35	—	—	0,20—0,30	—
6150	0,48—0,53	0,70—0,90	0,20—0,35	0,80—1,10	0,15 min	—	—
8650	0,48—0,53	0,75—1,00	0,20—0,35	0,40—0,60	—	0,15—0,25	0,40—0,70
9260	0,55—0,65	0,70—1,00	1,80—2,20	—	—	—	—

Fonte: poli.usp.br/geologiaemetalurgia

A seguir a tabela 3 mostra a influência de alguns elementos quando adicionado ao aço mola:

**Tabela 3: Influência de alguns elementos adicionados aos aços de mola**

<b>Elemento</b>	<b>Propriedade</b>
Silício	Aumenta a resistência à oxidação; Aumenta a resistência de aços de baixo teor em liga.
Cromo	Aumenta a resistência à corrosão e à oxidação; Melhora a resistência À altas temperaturas; Melhora a resistência ao desgaste ( com alto carbono).
Vanádio	Eleva a temperatura de crescimento de grãos da austenita (promove refinamento do grão)
Molibdênio	Eleva a temperatura de crescimento de grão da austenita Produz maior profundidade de endurecimento (temperabilidade)
Níquel	Aumento da temperabilidade em aços hipoeutetoides
Manganês	Aumento da temperabilidade em aços hipoeutetoides

Fonte: poli.usp.br/geologiaemetalurgia

## 2.12 Microestrutura dos aços mola

Em sua grande maioria os aços mola fazem parte da família dos aços hipoeutetoides. A resposta para essa característica está em sua composição química, ou seja, são os materiais que possuem um teor de carbono abaixo de 0,76% no diagrama ferro-carbono são compostos principalmente de ferro e carbono, e sua microestrutura é composta de ferrita e perlita (Krautkramer, J., & Krautkramer, H., 1990).

Os aços hipoeutetoides, são amplamente utilizados na indústria automotiva, mas antes passam por processo de laminação à quente e tratamento térmico, para obtenção de uma microestrutura heterogênea. (Santos,2018)

Figura 5: Propriedades e aplicações dos aços mola

### Aços Mola



- Alta Resistência Mecânica
- Boa Tenacidade
- Maior Limite Elástico



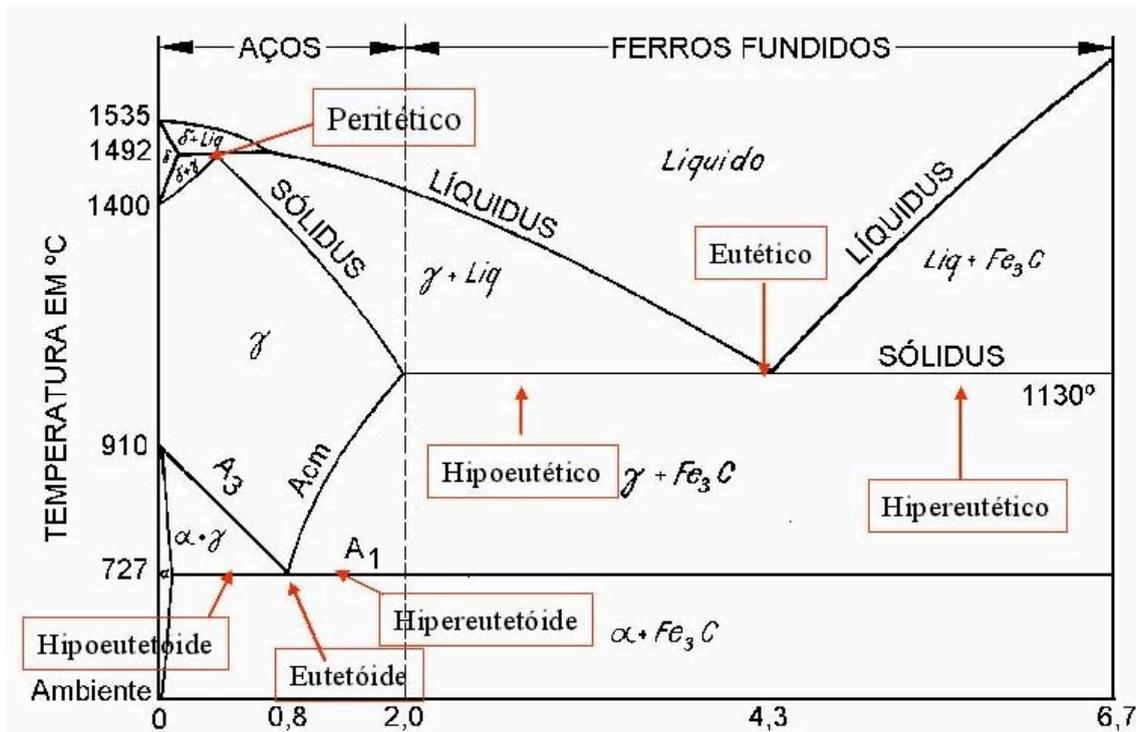
- Conforto
- Estabilidade ao veículo
- Segurança ao usuário
- Esforços cíclicos
- Altas tensões de trabalho



Fonte: (Santos, 2018)

Um aço considerado hipoeutetóide tem uma microestrutura composta predominantemente por ferrita e, em menor proporção, por perlita. A contribuição da ferrita serve para uma maior ductilidade e tenacidade em comparação com os aços eutetóides ou hipereutetóides (Callister, 2021).

Figura 6: Diagrama de equilíbrio das ligas de ferro-carbono

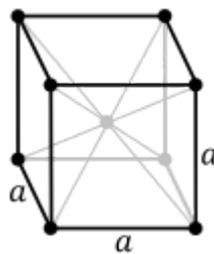


Fonte: [blogspot](#)

A microestrutura de um aço mola tem sua variação de acordo com a composição química específica e do tratamento térmico aplicado, porém em sua grande maioria consiste em grãos de ferrita, martensita e perlita (Verhoeven, 2007).

- **Ferrita ( $\alpha$ -Fe):** essa fase possui estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (ccc), que confere ductilidade ao aço e assim contribui para flexibilidade. Possui solubilidade de 0,008% . Callister (2021).

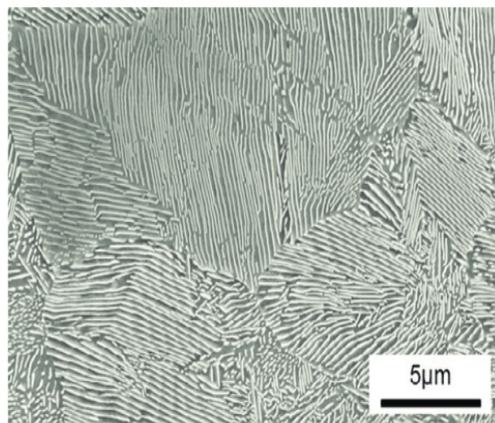
Figura 7: Estrutura Cristalina Cúbica de Corpo Centrado (CCC)



Fonte: microestrutura

- **Perlita ( $Fe_3C$ ):** mistura de camadas alternadas de ferrita e cementita, que proporciona resistência e ductilidade ao aço.

Figura 8: Perlita



Fonte: microestrutura

- **Martensita:** dependendo do tratamento térmico pode ocorrer a martensita, que é uma estrutura metaestável supersaturada de carbono em ferro. A martensita é extremamente dura e resistente, sua formação ocorre por têmpera rápida do aço a uma taxa suficientemente alta para evitar a transformação da austenita em perlita ou ferrita.

Outras fases podem aparecer em decorrência do tratamento térmico e da composição do aço (Lin Xie,2005).

### **2.13 Vantagens da mola helicoidal cônica de compressão**

As vantagens desse tipo de mola em comparação a outros tipos é referente à aplicação específica, a seguir veremos algumas dessas vantagens:

- Distribuição uniforme de carga: sua geometria permite uma distribuição uniforme da carga ao longo do comprimento, resultando em uma resposta mais suave e previsível;
- Menor altura livre: podem ser projetadas com uma altura livre menor em comparação com outras molas helicoidais, vantagem na qual ela possui quando o espaço é limitado;
- Redução do efeito “solidariedade” : ocorre quando as espirais adjacentes interferem umas com as outras durante a compressão, melhorando assim a estabilidade e o desempenho da mola;
- Resistência à fadiga: essas molas podem oferecer uma melhor resistência à fadiga em comparação com outros tipos de molas, devido à distribuição mais uniforme de tensões ao longo da mola;
- Adaptação a cargas variáveis: permite que as molas se adaptem melhor a cargas variáveis, proporcionando uma resposta mais consistente em diferentes condições de carga ( Wahl, 2007).

A seguir será feito um estudo sobre a cutelaria da mola helicoidal cônica de compressão, apresentando técnicas de trabalho com esse tipo de mola, vantagens e desvantagens e o passo a passo da fabricação de instrumentos cortantes.

## 2.14 Tipos de Aços Molas ( Geral)

No geral os aços molas são materiais com propriedades específicas que os tornam adequados para aplicações onde é necessário resistência, deformação e recuperação após carga; abaixo temos alguns tipos:

- Aço mola carbono;
- Aço mola de baixa liga;
- Aços mola de alta liga;
- Aços mola inoxidável;
- Aços mola para aplicação específica( ASM, Handbook).

## 3. Técnicas de Trabalho com Mola Helicoidal Cônica

- **Aquecimento Controlado:** o calor aplicado deve ser de maneira uniforme durante o processo de forjamento, evitando assim deformações indesejadas e garantir uma distribuição uniforme de tensões;
- **Forjamento Gradual:** realizar o forjamento da mola em etapas progressivas, moldando gradualmente a forma desejada para evitar rachaduras ou distorções excessivas.
- **Testes de Dureza:** Realize testes de dureza na lâmina ou ferramenta de corte após o processo de revenimento para garantir que ela atenda aos requisitos de resistência e tenacidade necessários para sua aplicação (Weygers ,1997).

## 4. Cutelaria

É a arte ou técnica de fabricar, afiar e trabalhar com facas, espadas, punhais e muitos outros instrumentos cortantes. Abrangendo tanto a produção quanto a manutenção desses objetos (Fernandes, 2001).

#### **4.1 História da Cutelaria**

O início dessa técnica remonta aos primórdios da civilização, abrangendo o tempo do desenvolvimento humano e evolução tecnológica desde que o homem começou a usar pedra lascada como ferramenta cortante, sendo essas ferramentas rudimentares; logo evoluíram gradualmente para instrumentos mais elaborados à medida que as técnicas de fabricação foram refinadas. Com o aumento das trocas comerciais e relações entre diferentes culturas, ocorreu um avanço de técnicas e estilos da cutelaria, tendo um padrão peculiar, como exemplo a lâmina de damasco, conhecida por sua durabilidade e padrões distintos, ficou conhecida através de rotas comerciais da Ásia para Europa (Petty, 2018).

Outro fato marcante para história da cutelaria foi a revolução industrial, pois com o surgimento de máquinas e métodos de produção em massa, resultou na padronização de produtos e variedades de utensílios cortantes. No século XX, além do avanço da cutelaria também ocorreu o desenvolvimento de ligas de aço de alta qualidade, sendo o aço inoxidável um dos primeiros a serem utilizados como matéria prima e também técnicas de fabricação usando essas ligas (Hartink, 2016).

#### **4.2. Aços mais utilizados na confecção de uma faca para Cutelaria.**

Para fabricação de facas existe uma variedade de aços que são utilizados, cada um oferecendo características específicas para atender as mais diversas necessidades, abaixo estão listado alguns aços carbono e suas características:

**Tabela 4: Aços para obtenção de facas**

<b>TIPO</b>	<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>USO</b>
<b>AÇO 1095</b>	<b>Alta dureza e excelente retenção de fio.</b>	<b>Faca de caça</b>

<b>AÇO 5160</b>	<b>Boa combinação de dureza e tenacidade, resistente ao choque e menos suscetível a quebra</b>	<b>Faca de uso geral.</b>
<b>AÇO 01</b>	<b>Boa capacidade de retenção de fio e fácil de afiar</b>	<b>Faca de cozinha e faca artesanal.</b>

Fonte: [aco-para-cutelaria](#) (adaptado)

Os aços carbonos são utilizados para produzir facas, pois a combinação de dureza, resistência ao desgaste e capacidade de retenção de fio é crucial para produzir uma faca de qualidade (RURAL,2019).

O aço SAE 5160 é utilizado geralmente na fabricação de molas helicoidais, possui alto teor de carbono (0,60%):pela porcentagem de carbono, possui boa dureza e apresenta uma resistência a fadiga e a tração, alta temperabilidade e ductilidade e uma boa tenacidade.

Após a têmpera apresenta uma dureza de até 60 HRC, e após o revenimento apresenta uma dureza de 55 ou 56 HRC.

Seu uso na cutelaria é bem aceito por conta de suas propriedades, e fácil obtenção, devido ao seu uso automotivo pode ser encontrado em ferros-velhos e desmanches (O couteleiro-Cutelaria CIMO, 2020).

#### **4.3 Determinação do valor de uma faca por cutelaria:**

Abaixo temos como é realizado o cálculo do preço estimado de uma faca artesanal:

- Valor do Aço (material para a faca);
- Valor do Disco de corte;
- Valor das Lixas;

- Madeira ( para o cabo);
- Pinos ( para prender o cabo) ;
- Cola ( para fixar o cabo);
- Couro;
- Mão de obra;
- Energia;
- Lima;
- Gás;
- Depreciação dos equipamentos ( hora máquina trabalhada).

A seguir temos o cálculo do salário do couteleiro:

Valor da diária (base de salário do mercado de um profissional);

Estabelecer salário por hora (quantas horas o profissional vai trabalhar)

1º passo definir a sua hora de trabalho

2º multiplicar pelas horas trabalhadas na faca

Ex: faca demorou 24 horas para ficar pronta

ganhar 9 reais por hora

$$24 \times 9 = 216,00$$

A seguir temos uma peça produzida à mão através da cutelaria, por um aço que também serve para produzir molas helicoidais.

**Figura 9: Faca produzida pelo aço SAE 5160**



Fonte: [mola-cutelaria](http://mola-cutelaria)

#### **4.4 Técnicas e Processos de Fabricação de Utensílios Cortantes**

Na fabricação de utensílios cortantes exigem-se processos e técnicas que garantem a qualidade, durabilidade e funcionalidade do produto final. Na escolha do material são seguidos alguns passos : o tipo do utensílio a ser fabricado, a seleção do material adequado, verificar características como dureza, tenacidade, e resistência à corrosão caso seja uma liga utilizada. Além dos materiais envolvidos é necessário também que a peça passe por alguns processos como, forjamento, têmpera, revenido, afiação e acabamento.

- **Forjamento:** etapa onde o material é aquecido em altas temperaturas e moldado em sua forma final, nessa etapa é utilizado o martelo para golpear a peça e assim, adquirir a forma desejada e melhorar suas propriedades mecânicas;

- **Têmpera:** etapa após o forjamento, onde o metal passa por um aquecimento controlado seguido de um resfriamento rápido para aumentar a sua dureza e resistência, ele tem a finalidade de garantir que a lâmina mantenha sua borda afiada e não se deforme ao passar do tempo com o uso;
- **Revenido:** etapa após a têmpera, onde a lâmina é aquecida novamente em uma temperatura mais baixa, reduzindo assim a fragilidade induzida pela têmpera, equilibrando a dureza e a tenacidade do metal, como consequência a peça se torna mais resistente ao impacto e à quebra;
- **Afiação:** depois de ter finalizado todas as etapas de tratamento térmico, a afiação entra em cena para tornar a borda da peça cortante, que é realizada manualmente ou com ferramenta de afiação elétrica;
- **Acabamento:** Depois da afiação, visando uma melhora na aparência e estética e também para proteger da corrosão a peça passa pela etapa de acabamento, etapa essa que pode envolver polimento, gravação, tratamento de superfície ou aplicação de revestimentos protetores (Richard 1987).

#### 4.5. Ética e Segurança na Cutelaria

Não existe uma NR específica para a cutelaria, porém existem orientações específicas sobre a segurança do ambiente de trabalho em indústrias de cutelaria e serviços.

A prática da cutelaria envolve várias questões éticas e de segurança que são importantes, como regulamentação governamental, responsabilidade do fabricante e precauções de segurança para os usuários.

- **Regulamentação Governamental :** cada país tem sua regulamentação específica que prioriza a fabricação, venda e posse de instrumentos de corte, podendo variar de acordo com o tipo de instrumento de corte e finalidade, ou seja, alguns instrumentos cortantes podem ser considerados armas e estão sujeito a leis mais rigorosas, enquanto

outros são designados para fins domésticos e tem regulamentações mais restritivas, Logo, é de vital importância que cada fabricante tenha conhecimento prévio e cumpram todas as leis de regulamentação aplicável.

- **Responsabilidade do Fabricante :** Os fabricantes de instrumentos de corte têm a responsabilidade e ética de garantir a segurança de seus produtos, incluindo uso de materiais de qualidade, projetar peças de forma segura e fornecer instruções corretas sobre seu uso, caso o produto ofereça defeito o fabricante pode ser responsabilizado legalmente;
- **Precauções de segurança para os usuários:** cada usuário tem a responsabilidade de usar os instrumentos de maneira segura e ética, observando a forma correta de uso pelo fabricante (Braga, 2019).

#### **4.6. Vantagens da Cutelaria**

As vantagens da cutelaria são as mais diversas, por conta do material de fabricação de alta qualidade e seu processo de fabricação. A seguir veremos algumas dessas vantagens:

- **Durabilidade e longevidade;**
- **Versatilidade;**
- **Precisão no corte;**
- **Valor estético;**
- **Tradição e artesanato;**
- **Personalização (Bernard,2011) .**

#### **4.7 Desvantagens da Cutelaria**

As desvantagens da cutelaria podem variar dependendo do contexto e das especificidades da produção. Alguns pontos que podem ser considerados incluem:

- **Custo de produção elevado;**
- **Competição acirrada no mercado;**
- **Flutuação no preço das matérias-primas;**
- **Necessidade de habilidades artesanais;**
- **Questões de segurança e regulamentação;**
- **Sazonalidade da demanda (Norman,2010).**

Como o foco do trabalho é a cutelaria em mola helicoidal cônica, a seguir veremos o conceito sobre a mola e os métodos de fabricação.

#### **4.8 Processo de Cutelaria em Molas Cônicas:**

A fabricação de instrumentos de corte envolve várias etapas e técnicas específicas, além do conhecimento prévio sobre o material que a mola foi fabricada para trabalhar dentro dos limites requeridos, como exemplo temos a temperatura limite. A seguir é observado algumas dessas etapas:

- **Desenho do projeto:** planejar o design da faca ou ferramenta de corte com base nas propriedades da mola cônica, considerando fatores como a forma da lâmina, o perfil da aresta de corte e o design do cabo;
- **Seleção do material:** etapa onde é estudado sobre o tipo de aço que a mola foi fabricada;
- **Aquecimento e Forja:** o aço da mola é aquecido a uma temperatura alta o suficiente para torná-lo maleável. Em seguida, é moldado através da forja, onde é batido e modelado na forma desejada da lâmina;
- **Recozimento:** Após a forja, o aço mola é recozido para aliviar o estresse e torná-lo mais maleável para futuras etapas de trabalho;
- **Têmpera:** A lâmina é aquecida a uma temperatura específica e rapidamente resfriada em um meio como óleo ou água. Isso aumenta a dureza do aço da mola, tornando-o adequado para o corte;

- **Revenido:** para evitar que o aço se torne excessivamente frágil após a têmpera, ele é aquecido novamente a uma temperatura mais baixa e depois resfriado lentamente. Isso equilibra a dureza com a tenacidade, tornando a lâmina mais resistente a quebras;
- **Afição e acabamento:** a lâmina é então afiada e polida para obter o acabamento desejado. Isso pode incluir gravação, tratamentos de superfície e aplicação de cabo (Karl,2001).

#### 4.9 Testes Para lâminas

São testes utilizados para verificar a qualidade de uma lâmina, em especial para o desempenho e adequação nas aplicações específicas. Esses testes geralmente incluem medição de propriedades mecânicas, resistência ao desgaste, entre outros critérios para o desempenho, logo abaixo estão alguns deles:

- Teste de dureza: avaliar a dureza do material, pois ela está relacionada a sua capacidade de manter o fio de corte e resistir ao desgaste.

Ex. : Ensaios Rockwell, Vickers e Brinell.

- Teste de resistência ao desgaste: medir a resistência ao desgaste durante o uso.

Ex. Ensaios de abrasão.

- Teste de impacto: avalia a tenacidade do material e sua capacidade de absorver impactos sem fraturar.

Ex. Ensaio Charpy ou Izod.

- Teste de resistência à corrosão: determina a resistência do material à corrosão em condições específicas.

Ex. Ensaio de câmaras de névoa salina ou exposição a ambientes corrosivos.

- Teste de microestrutura: analisar a estrutura micrográfica do material para verificar a uniformidade e a presença de fases indesejadas.

Ex. Metalografia com microscopia óptica ou eletrônica.

- Teste de Flexão: avaliar a capacidade da lâmina de resistir a cargas aplicadas sem falhar.

Ex. Ensaio de flexão por três pontos ou quatro pontos.

- Teste de Qualidade do afiado: avalia a eficácia de corte através de testes práticos em diferentes materiais.

Ex.: corte em papel, tomate, carne entre outros (O cuteleiro-Cutelaria CIMO, 2020).

## **5. Tratamento Térmico**

É uma técnica utilizada para modificar as propriedades de um material, principalmente metais e ligas, por meio de aquecimento e resfriamento controlados. O objetivo é melhorar ou alterar características como dureza, tenacidade, resistência ao desgaste, e outras propriedades mecânicas.

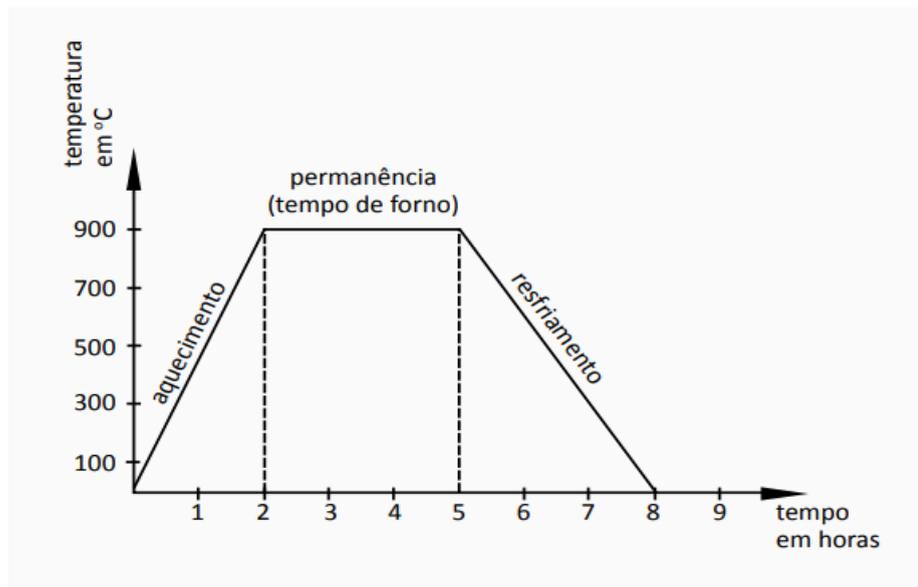
Os principais tratamentos térmicos utilizados neste trabalho foram:

- **Têmpera:** é um tratamento térmico aplicado para aumentar a dureza e a resistência de um metal, geralmente o aço. O processo envolve o aquecimento térmico para aumentar a dureza e a resistência do metal a uma temperatura elevada, sendo essa temperatura acima da temperatura de transformação, conhecida como austenitização, seguido pelo resfriamento rápido, geralmente em água ou óleo. Esse resfriamento rápido transforma a estrutura cristalina do aço, aumentando a sua dureza;
- **Revenimento:** é um tratamento térmico subsequente à tempera, destinado a reduzir a fragilidade do aço temperado e ajustar suas propriedades mecânicas, como a dureza e a tenacidade. O metal é aquecido a uma temperatura abaixo

da temperatura de austenitização e, em seguida, resfriado lentamente. Isso permite a formação de uma estrutura mais estável e menos frágil;

- Normalização: é um processo de tratamento térmico que visa refinar a estrutura cristalina do metal, melhorando a uniformidade das propriedades mecânicas. O metal é aquecido a uma temperatura acima da temperatura de austenitização e, em seguida resfriado ao ar. Este processo ajuda a melhorar a homogeneidade das propriedades do material e a reduzir a tensão interna (ASM International, 2006).

**Figura 10: Gráfico de tratamento Térmico**



Fonte: Tratamento

## 6. Forjamento

O forjamento é um processo de fabricação que envolve a deformação plástica do metal através da aplicação de pressão controlada. Durante o forjamento, o metal é moldado em uma

forma desejada por meio de compressão, impacto ou martelamento ocorre geralmente em altas temperaturas para facilitar a deformação ( Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. 2013).

Existem vários tipos de forjamento, cada um com suas características específicas e aplicações particulares.

A seguir veremos os tipo de forjamento:

- **Forjamento a Martelo (Hammer Forging):** processo no qual o metal é deformado por martelamento repetido e controlado, geralmente é realizado por prensas de martelos pneumáticos;
- **Forjamento por Prensa (Press Forging):** esse tipo envolve a aplicação de pressão gradual e controlada sobre o metal aquecido, sua realização pode ser por prensas hidráulicas ou mecânicas, ele é geralmente usado para produzir peças com geometria complexa e alta precisão dimensional;
- **Forjamento de Matriz Fechada (Closed Die Forging):** nesse tipo de forjamento o metal é conformado dentro da matriz fechada que dão a forma final da peça, ele é comprimido entre as matrizes, é muito utilizado na produção de peças de alta resistência e baixa tolerância dimensional;
- **Forjamento de Matriz Aberta (Open Die Forging):** nesse tipo de forjamento o material não é completamente contido pelas matrizes, ele é deformado entre as matrizes planas ou perfiladas resultando em peças com geometrias mais simples e dimensões variáveis;
- **Forjamento de Estampagem (Impression Die Forging):** as matrizes possuem cavidades, que definem a forma da peça, o metal é forjado em cavidades que definem a forma da peça, com detalhes intrincados e tolerância apertadas (Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. 2013)

A seguir veremos as etapas do forjamento:

- **Preparação do material:** etapa na qual é selecionado o material e verificação de possíveis defeitos superficiais, caso ocorra é necessário fazer uma remoção;
- **Aquecimento:** o aquecimento é adequado para facilitar a deformação plástica. Esse aquecimento é controlado para garantir a ductilidade do metal durante o processo de forjamento;
- **Deformação:** o metal aquecido é colocado em uma matriz e submetido a pressão controlada, geralmente é realizado por martelamento, prensagem ou outras técnicas de conformação mecânica, isso deve ocorrer ainda com o material em estado maleável;
- **Resfriamento:** após a deformação o metal é resfriado, esse resfriamento pode ocorrer em diferentes velocidades e ambientes, e essa escolha depende das propriedades do material e dos requisitos da peça final;
- **Acabamento:** etapa final onde a peça passa por usinagem, tratamento térmico, jateamento, polimento ou revestimento, para atingir as tolerâncias dimensionais finais e a qualidade superficial desejada ( Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. 2013).

### 6.1 Vantagens do forjamento em relação aos outros processos de fabricação

Esse processo de fabricação é amplamente utilizado por conta de suas vantagens sendo uma delas a capacidade de produzir lâminas com propriedades mecânicas superiores, como alta resistência a tenacidade. Esse processo permite a manipulação precisa da estrutura do material, e como resultado uma distribuição uniforme de grãos e na eliminação de imperfeições microscópicas, o que aumenta a durabilidade e o desempenho da lâmina. O forjamento também possibilita aos artesãos que trabalham com cutelaria criem lâminas com formas específicas e características estéticas desejadas (Godfrey, T.2019).

Abaixo seguem algumas vantagens do forjamento:

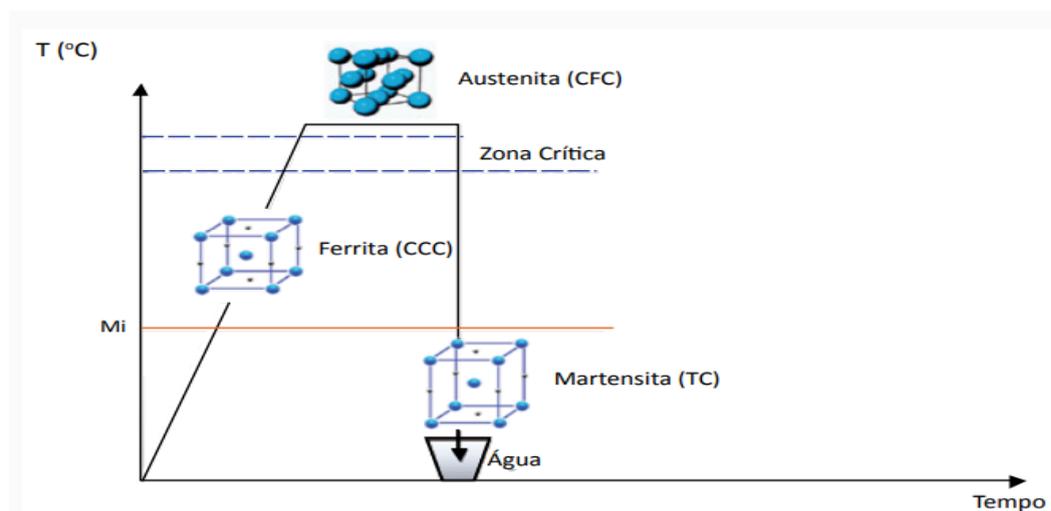
- **Melhor resistência e durabilidade:** o forjamento compacta a estrutura do metal, eliminando falhas e permitindo a obtenção de uma estrutura molecular mais uniforme, o que resulta em uma peça mais resistente e durável;

- **Maior integridade estrutural:** o forjamento ajuda a eliminar as impurezas no metal, logo reduz as chances de defeitos estruturais, como trincas e porosidade que comprometem a peça;
- **Maior precisão dimensional:** o forjamento permite maior precisão dimensional, em comparação com a fundição, resultando em peças com tolerância mais estreitas;
- **Melhoria das propriedades mecânicas:** o forjamento permite controlar as propriedades mecânicas do metal, como dureza, tenacidade, e resistência ao desgaste ( J. Beddoes e M. Bibby,1999).

## 6.2 Têmpera

A têmpera é um tratamento térmico, que tem por finalidade aumentar a dureza e a resistência de ligas metálicas, em especial os aços. Esse tratamento consiste no aquecimento do aço até uma temperatura acima da zona crítica (austenitização), mantê-lo nesta temperatura por um certo tempo e em seguida resfriá-lo bruscamente (McGraw-Hill, 1997).

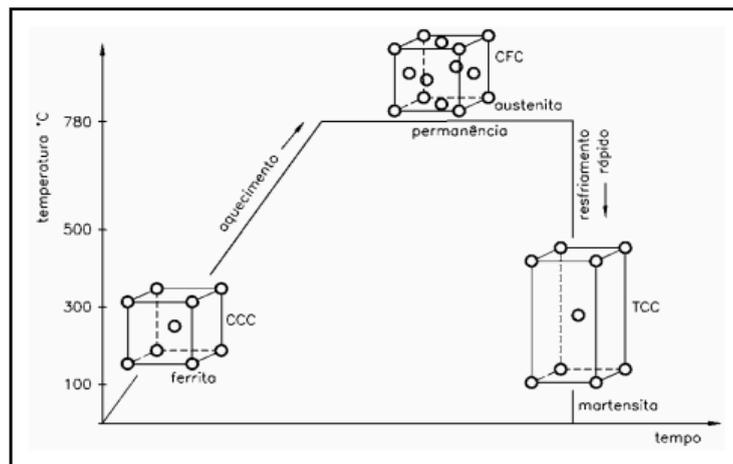
Figura 11 : Gráfico de tempera



Fonte : Tratamentos

Como a austenita é resfriada muito rápido, não há tempo de transformação em ferrita, cementita ou perlita. E um novo constituinte do aço é formado, chamado de martensita.

**Figura 12: Processo de transformação da estrutura por resfriamento rápido**



Fonte: Tratamento\_Termico

## 7. Ensaio de Dureza Rockwell C

É uma técnica que avalia a dureza do material, é utilizado um penetrador cônico de diamante com 120° de conicidade, o teste tem como base a medição da profundidade de penetração do penetrador sob uma carga específica. É usado para materiais com alta dureza o “C” é um tipo de escala utilizada no sistema Rockwell.

**Figura 13: Penetrador de Diamante**



Fonte: autora (2024)

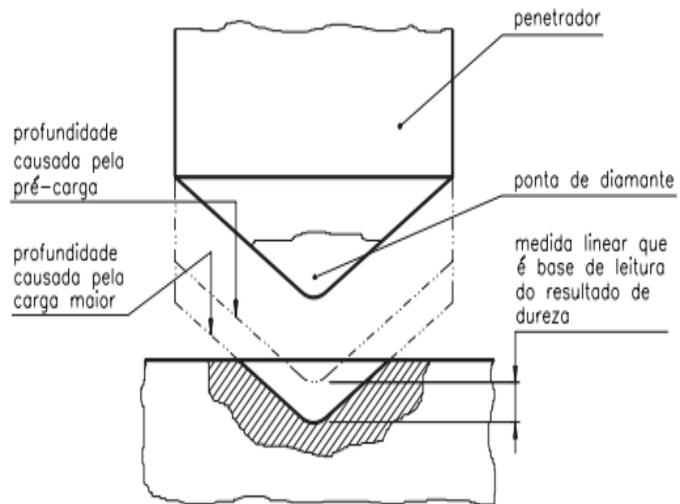
### **7.1 Processo de teste**

- **Pré- carga:** uma carga menor é aplicada para assentar o penetrador na superfície do material;
- **Carga Principal:** uma carga maior é aplicada e mantida por um tempo determinado. A profundidade de penetração do penetrador é então medida após a remoção da carga principal ( ASTM E18-22).

### **7.2 Descrição do processo**

1. Aproximar a superfície do corpo de prova do penetrador;
2. Submeter o corpo de prova a uma pré-carga( carga menor);
3. Aplicar a carga maior até o ponteiro parar;
4. Retirar a carga maior e fazer a leitura do valor indicado no mostrador, na escala apropriada.

**Figura 14: Detalhes do Penetrador de Diamante**



Fonte: rockwell

**Tabela 5: Escala de Dureza Rockwell Normal e Aplicações**

ESCALA	COR DA ESCALA	CARGA MAIOR	PENETRADOR	FAIXA DE UTILIZAÇÃO	CAMPO DE APLICAÇÃO
<b>A</b>	preta	60	diamante cone 120°	20 a 88 HRA	Carbonetos, folhas de aço com fina camada superficial endurecida
<b>C</b>	preta	150	diamante cone 120°	20 a 70 HRC	Aço, titânio, aços com camada endurecida profunda, materiais com HRB>100
<b>D</b>	preta	100	diamante cone 120°	40 a 77 HRD	Chapas finas de aço com média camada endurecida
<b>B</b>	vermelha	100	esfera aço 1,5875 mm	20 a 100 HRB	Ligas de cobre, aços brandos, ligas de alumínio, ferro maleável etc.
<b>E</b>	vermelha	100	esfera aço 3,175 mm	70 a 100 HRE	Ferro fundido, ligas de alumínio e de magnésio
<b>F</b>	vermelha	60	esfera aço 1,5875 mm	60 a 100 HRF	Ligas de cobre recozidas, folhas finas de metais moles
<b>G</b>	vermelha	150	esfera aço 1,5875 mm	30 a 94 HRG	Ferro maleável, ligas de cobre-níquel-zinco e de cobre-níquel
<b>H</b>	vermelha	60	esfera aço 3,175 mm	80 a 100 HRH	Alumínio, zinco, chumbo
<b>K</b>	vermelha	150	esfera aço 3,175 mm	40 a 100 HRK	Metais de mancais e outros muito moles ou finos

Fonte : [rockwell](#)

**Tabela 6: Escala de Dureza Rockwell Superficial e Aplicação**

ESCALA	COR DA ESCALA	CARGA MAIOR	PENETRADOR	FAIXA DE UTILIZAÇÃO	CAMPO DE APLICAÇÃO
15 N	preta	15	diamante cone 120°	65 a 90 HR 15N	Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD
30 N	preta	30	diamante	40 a 80 HR 30N	Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD
45 N	preta	45	diamante	35 a 70 HR 45N	Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD
15 T	vermelha	15	esfera aço 1,5875 mm	50 a 94 HR 15T	Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG
30 T	vermelha	30	esfera aço 1,5875 mm	10 a 84 HR 30T	Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG
45 T	vermelha	45	esfera aço 1,5875 mm	10 a 75 HR 45T	Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG

Fonte : rockwell

## **8. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **8.1 Introdução**

O desenvolvimento do presente trabalho foi realizado considerando os objetivos gerais e específicos.

De início foi necessário realizar pesquisas sobre os assuntos relacionados ao trabalho envolvendo molas helicoidais cônicas, cutelaria, têmpera, forjamento e dureza, que auxiliaram na obtenção de conhecimento sobre o tema. A partir desses estudos foi possível identificar os

tipos de análises que deveriam ser feitas e possíveis de serem realizadas para a concepção do projeto, além de identificar os desafios impostos durante a realização.

Todas as etapas do trabalho foram realizadas no laboratório do IFBA campus Salvador.

O material utilizado foi uma mola helicoidal de formato cônico da suspensão veicular traseira encontrada em um ferro velho. Com dimensões de 384 mm de altura, diâmetro interno de 183 mm, diâmetro externo de 120 mm e com largura de fio de 12 mm.

## **8.2 Limpeza da mola helicoidal cônica.**

A mola foi encontrada em estado de oxidação, devido a fatores ambientais e materiais, como umidade, poluentes atmosféricos como dióxido de enxofre(SO<sub>2</sub>) e óxidos de nitrogênio(NO<sub>x</sub>), além de exposição a condições adversas, como sol e chuva etc.

Como no estado de oxidação que se encontrava a mola não foi possível verificar nenhuma falha, a limpeza com materiais específicos para aço se tornou de vital importância, conforme a figura abaixo:

**Figura 15: Mola Helicoidal Cônica**



Fonte: A autoria própria (2024)

### 8.3 Esmerilhadeira de bancada

Logo após as medições, foi utilizada uma esmerilhadeira de bancada para remover o excesso da ferrugem superficial e sujeira que estava presente na mola.

Esta ferramenta foi escolhida por possuir um disco que realiza acabamento, o disco abrasivo ou rebolo, gira em alta velocidade e é o responsável pelo acabamento da peça, ou seja, remove os detritos superficiais. Souza, J. C. (2020).

**Figura 16: Esmerilhadeira de bancada**



Fonte: Autoria própria (2024)

Após a utilização da esmerilhadeira de bancada foi utilizada uma esmerilhadeira angular, observou-se a necessidade pois ainda continham partes oxidadas que esse equipamento poderia remover, também foi utilizada uma morsa por medida de segurança para a peça não deslizar durante a utilização da esmerilhadeira (a esmerilhadeira é da marca Bosch).

**Figura 17: Mola presa na morsa para utilização da esmerilhadeira angular**



Fonte: Autoria própria (2024)

Como era impossível de verificar a presença de trincas e outras falhas mecânicas a olho nu, foi necessário realizar limpeza para remoção da ferrugem e impurezas que poderiam afetar nas etapas dos ensaios, foi utilizado um thinner, que é um solvente orgânico da marca Eucatex.

**Figura 18: Thinner**



Fonte: Autoria própria (2024)

Após a utilização do thinner, não foram encontradas falhas, possivelmente a mola não sofreu nenhuma fratura, o que se pode concluir, que a mesma tenha sido retirada em um possível desmanche de carro, abaixo está a foto da mola após a limpeza com o solvente.

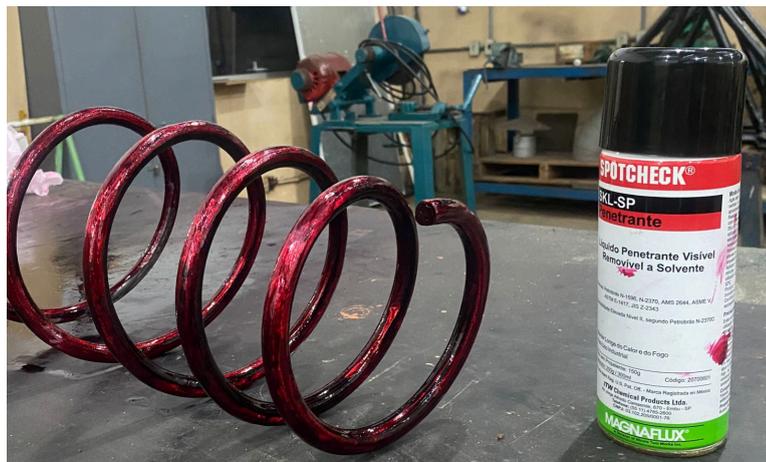
**Figura 19: Mola após o thinner**



Fonte: Autoria própria (2024)

Após as etapas anteriores, foi o momento da utilização do líquido penetrante, esse produto teve a finalidade de revelar fissuras, trincas ou qualquer outra descontinuidade na superfície, pois ele é projetado para penetrar em aberturas e defeitos muito finos, foi utilizado o líquido penetrante vermelho removível à solvente Spotcheck SKL-SP da marca Magnaflux.

**Figura 20: Mola sob o efeito do líquido penetrante**



Fonte: Autoria própria (2024)

Por último, para a realização do ensaio visual, foi utilizado um revelador que em combinação com o líquido penetrante, detecta descontinuidades superficiais em materiais metálicos como aço, o objetivo do revelador é absorver o líquido penetrante que ficou retido nas descontinuidades da superfície e, então realçar esses defeitos, tornando-os visíveis para inspeção.

**Figura 21: Mola com revelador D70 da marca Metalchek.**



Fonte: Autoria própria (2024)

## **9. Obtenção de amostras para a realização da Metalografia**

### **9.1. Corte da mola**

Com a ajuda da máquina metalográfica de corte de bancada da marca Panambra, foi realizado o corte de parte da mola para servir como amostra, para realização dos ensaio de dureza e também para ser observada no microscópio, esse equipamento foi utilizado por conta da precisão no corte de amostras, e também pela proteção que ela fornece durante o processo, além de possuir um sistema de resfriamento por refrigerantes líquidos para reduzir o calor durante o corte, evitando assim alterações na estrutura do material.

**Figura 22: Obtenção de amostra da mola**



Fonte: Autoria própria (2024)

Logo após a extração da amostra, foi realizada a etapa de embutimento/encapsulamento da amostra para suporte, pois seria inviável realizar o lixamento sem o auxílio do embutimento, o baquelite usado foi da cor preta, a temperatura utilizada foi 170 °C. foi realizado o embutimento através da máquina Teclago EM30D.

**Figura 23: Amostra da mola embutida**



Fonte: Autora (2024)

Para o lixamento foram utilizadas as lixas secas 100,120,220,320 e as lixas d' água 400,600, 800 e 1200,utilizadas para remover grandes imperfeições e aplainar a superfície para análise.

**Figura 24: Lixas usadas para o acabamento da superfície da amostra**



Fonte:teclago

Após o lixamento a etapa posterior foi o polimento na máquina lixadeira e politriz Fortel PFL, com alumina 3% e água destilada, essa etapa foi para adquirir um acabamento refinado na superfície, foi usado um disco de veludo. A politriz utilizada possui 4 velocidades, sendo duas para alumina e duas para utilização da pasta diamante. Para a alumina foram utilizados 300 e 600 RPM.

**Figura 25: Lixadeira e Politriz**



Fonte: Autoria própria (2024)

A próxima etapa após o polimento foi o ataque químico com Nital 2% ( $\text{HNO}_3$ ), que tem como principal função atacar a superfície do aço para destacar suas características estruturais.

**Figura 26: Amostra sendo atacada por nital 2%**



Fonte: Aatoria própria (2024)

Após as etapas anteriores foi realizado o ensaio metalográfico. Através do microscópio metalográfico, abaixo da marca Union pode-se observar a superfície da peça 400 x.

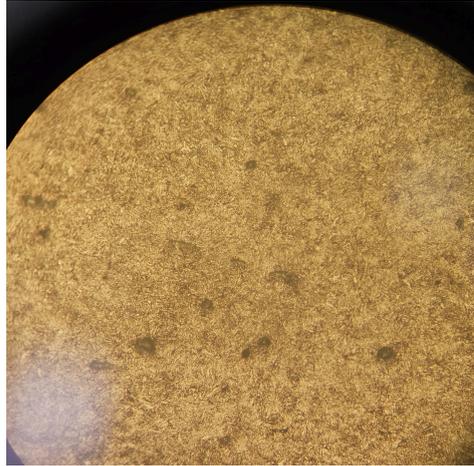
**Figura 27: Microscópio Metalográfico**



Fonte: Aatoria própria (2024)

A microestrutura apresentada é bainítica com martensita, essa imagem foi adquirida da mola sem tratamento térmico após o processo de limpeza.

**Figura 28: Microestrutura após o ataque com Nital 2%**



Fonte: Autoria própria (2024)

Em seguida foi realizado o ensaio de dureza do tipo Rockwell C (HRC) para ser medida a dureza do aço mola, com a máquina durômetro da marca Durotwin-d plus, foi utilizado o penetrador de diamante em formato de cone e ajuste da carga para a escala em C (150 kgf), o teste de dureza foi conduzido de acordo com a norma ASTM E18 e ISO 6508.

**Figura 29: Durômetro**



Fonte: Autoria própria (2024)

Logo após a utilização do microscópio para visualizar a microestrutura, foi realizado o ensaio de dureza, o ensaio 1 foi realizado na ponta da amostra.

**Tabela 7: Primeiros valores obtidos pelo ensaio de dureza.**

<b>ENSAIO</b>	<b>Dureza HRC</b>
<b>1</b>	<b>50.4</b>
<b>2</b>	<b>51.9</b>

Fonte: autoria própria (2024)

Foram realizados 7 ensaios e obtidos os valores abaixo, de acordo com a tabela:

**Tabela 8: Valores obtidos durante os ensaios Rockwell C (HRC)**

<b>ENSAIO</b>	<b>Dureza HRC</b>
<b>1</b>	<b>50.4 (ponta)</b>
<b>2</b>	<b>51.9</b>
<b>3</b>	<b>51.5</b>
<b>4</b>	<b>51.8</b>
<b>5</b>	<b>51.3 (ponta)</b>
<b>6</b>	<b>51.6</b>
<b>7</b>	<b>51.3</b>

Fonte: autoria própria (2024)

Em comparação com a literatura temos:

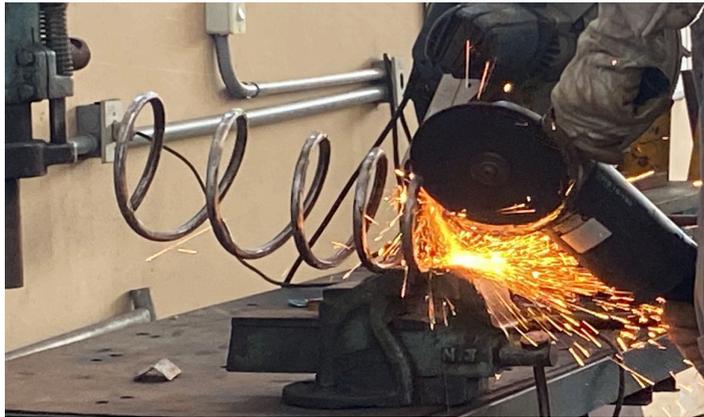
#### **Aço mola de baixo carbono**

- **Aço mola de baixo carbono:** dureza geralmente entre 40 HRC e 50 HRC. (Michael F. Ashby e David Cebon);
- **Aço mola de carbono médio:** dureza geralmente entre 50 HRC e 60 HRC. (Metals Handbook, Volume 1);
- **Aço mola de carbono alto:** dureza geralmente entre 55 HRC e 65 HRC. (William E. Bryson).

Conclui-se que o aço mola do presente trabalho é de médio carbono de acordo com os 7 ensaios realizados.

As próximas etapas foram para preparar a mola para o forjamento. A mola foi cortada com a esmerilhadeira.

**Figura 30: Mola presa na morsa sendo cortada**



Fonte: Autorial própria (2024)

Nessa etapa a mola foi cortada em três partes, para iniciar o forjamento, a têmpera e a cutelaria para iniciar a fabricação das facas.

**Figura 31: Partes da mola cortada com 200 mm de comprimento**



Fonte: Autorial própria (2024)

A peça após o corte, ficou no formato original (curvada), mas para não atrapalhar no processo do forjamento e têmpera ela teve que ser martelada para ficar reta, como vemos na figura abaixo, nesse processo ocorreu a deformação plástica, ou seja, ela não voltou mais para o seu estado original (curvada), não foi observado fadiga do material ao ponto de ocorrer microfissuras, nem trincas, ela respondeu bem a essa etapa.

**Figura 32: Instrumentos para ser utilizado no forjamento (marreta e tenaz)**



Fonte: Autoria própria (2024)

Após o corte, as peças foram para a etapa de aquecimento com gás oxiacetileno, o aquecimento foi para iniciar a produção da faca, dando o formato, pois a peça estava cilíndrica e as marteladas foram para achatar as peças. Etapa de início do forjamento, não foi observado nenhuma trinca nem microfissura na peça.

**Figura 33: Mola cortada sendo aquecida a 900 °C**



Fonte: Aatoria própria (2024)

Nessa etapa começou o forjamento para achatar a peça e transformá-la em um instrumento de corte, como apoio para a peça, a bigorna foi fundamental. A temperatura foi acima de 900° C, a ponta que está com a tonalidade mais clara, onde a temperatura mais elevada está sendo mais ativa, as partes subsequentes a temperatura está diminuindo.

**Figura 34: Peça sendo martelada após o aquecimento**



Fonte: Aatoria própria (2024)

Nesse processo a peça respondeu satisfatoriamente, não ocorrendo trincas nem fraturas, como observado a peça já adquiriu um formato achatado por conformação plástica e

um aumento de tamanho e diminuição da espessura por consequência do forjamento, a peça não foi totalmente achatada, consiste ainda uma parte cilíndrica para a colocação do cabo.

**Figura 35: Mola planas após o forjamento**



Fonte: Autoria própria (2024)

Como todo o processo não ocorreu no mesmo dia, a peça ficou guardada no laboratório com temperatura entre 16°- 22 °C, e como consequência a peça oxidou como mostra a figura abaixo, a mesma não sofreu choque de temperatura pois foi resfriada totalmente ao ar, para depois ser colocada no laboratório. Apresentou também partes com ferrugem, pode-se concluir que foi formado óxidos de ferro por conta da cor escura.

**Figura 36: Mola oxidada**



Fonte: autora (2024)

Para realizar o acabamento da peça foi realizado o desbaste com o esmeril industrial, pois ficaram com ondulações devido as marteladas e também fazer a limpeza das partes oxidadas.

**Figura 37: Mola sendo desbastada no esmeril**



Fonte: Aatoria própria (2024)

Nessa etapa a faca já adquiriu um formato mais característico de instrumento de corte por conta de sua borda mais afiada, ainda consistiu algumas partes oxidadas, porém sem presença de trincas ou microfissuras.

**Figura 38: Peça após ser desbastada**



Fonte: Autoria própria (2024)

Nessa etapa da furação para colocação do cabo, a mola recebeu mais marteladas para afinar a parte cilíndrica, a furadeira utilizada foi a S.A. Yadoya modelo FY-B25, utilizando a broca  $\frac{1}{8}$ " .

**Figura 39: Furadeira de bancada**



Fonte: autora (2024)

Resultado da peça furada e forjada, sem trincas e sem microfissuras, a peça respondeu bem às etapas anteriores.

**Figura 40: Peça furada após o forjamento**



Fonte: Autoria própria (2024)

Como as peças iriam para o processo de têmpera em água e óleo, foi necessário fazer as marcações para distinguir e analisar o comportamento de cada uma.

**Figura 41: Marcadores**



Fonte: Autoria própria (2024)

As etapas seguintes serão a realização da têmpera em água e óleo:

O forno utilizado foi o forno câmara da marca Brasimet, as peças foram colocadas em seu interior e chegaram a uma temperatura maior que 855 °C (medida com termômetro a laser), o tempo de espera para alcançar essa temperatura foi de 1 hora, logo em seguida por mais 40 minutos houve uma espera para que o aquecimento da peça fosse uniforme e atingisse seu interior.

**Figura 42: Forno câmara com as peças dentro**



Fonte: Autoria própria (2024)

Nessa etapa ocorreu a têmpera em água, como o balde era de plástico, houve a necessidade de colocar tijolos cerâmicos no seu interior para suportar a alta temperatura que a peça iria sair do forno. A têmpera em água teve o objetivo de um resfriamento rápido para uma transformação da austenita para martensita, para obtenção de uma peça com uma fase mais dura e resistente.

**Figura 43: Balde com água e tijolos cerâmicos**



Fonte: Autorial própria (2024)

A peça foi colocada com o auxílio de um instrumento longo para que houvesse o máximo de distanciamento, pois nesse processo houve uma fervura, já que sua temperatura de fervura é 100 °C.

**Figura 44: Balde com a peça em água**



Fonte: Autorial própria (2024)

Na etapa de têmpera em óleo, foi utilizada uma lata, onde foi colocado óleo suficiente para cobrir a peça e a têmpera ser realizada de forma efetiva em toda a peça.

**Figura 45: Óleo para realização da têmpera**



Fonte: Autoria própria (2024)

Nessa etapa ocorreu o resfriamento em óleo, esse óleo é aplicado em fluido de corte, como foi feita em uma lata, as pedras não foram mais necessárias.

**Figura 46: Lata com óleo sendo realizada a têmpera**



Fonte: Autorial própria (2024)

Após a têmpera em água e óleo, sendo duas peças em óleo e uma em água, foi o momento do revenimento, após a limpeza das peças, as mesmas foram colocadas de volta no mesmo forno, em uma temperatura mais baixa, chegando até 600 °C, por volta de 25 minutos, em seguida foi colocada para esfriar ao ar.

Na figura abaixo observa-se que a peça temperada em água (peça do meio) obteve um aspecto não retilíneo, onde sua ponta está com uma curva para cima. Essa parte foi a primeira a entrar em contato com a água, em seguida o restante do corpo da peça. O resfriamento rápido em água levou a peça a uma contração desigual, e assim criou uma tensão e essa resultou em deformação como a curvatura mostrada.

Pela figura, pode-se observar que a peça adquiriu uma tonalidade mais escura em sua superfície, para melhorar esse aspecto, as três foram lixadas.

**Figura 47: Peça após o revenimento**



Fonte: Autoria própria (2024)

Após algumas horas a curvatura ficou quase imperceptível, como abaixo está registrada:

**Figura 48: Peça após a têmpera e revenimento**



Fonte: autora (2024)

Essa etapa foi para colocar os cabos de madeira presos com um prego sem ponta e fixados por marteladas.

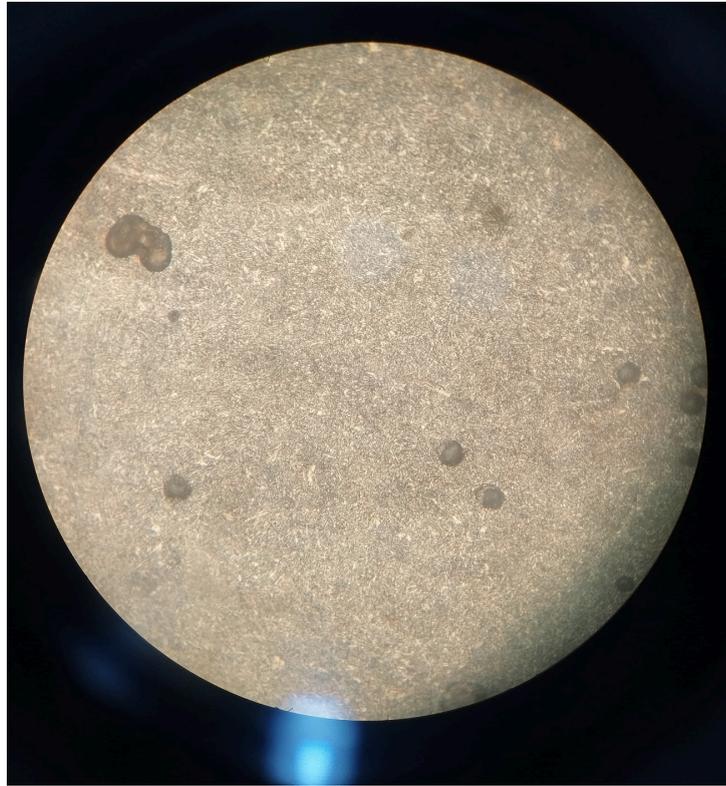
**Figura 49: Faca pronta com cabo**



Fonte: Autoria própria (2024)

Abaixo podemos observar a presença de martensita revenida, há traços de ferrita distribuídas homogeneamente. A presença de manchas na imagem não diz respeito a microestrutura e sim manchas adquiridas durante a secagem. Pode-se esperar dessa peça uma boa dureza e por conta do revenimento as tensões internas foram aliviadas para melhorar a tenacidade.

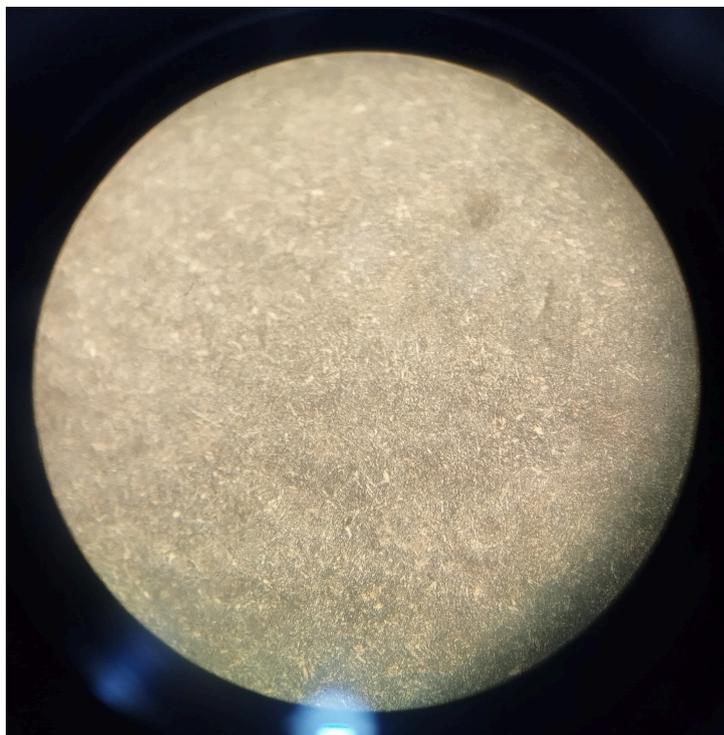
**Figura 50: Microestrutura temperada em água**



Fonte: Autoria própria (2024)

Abaixo podemos observar a presença de martensita revenida, assim como na têmpera em óleo, nessa secagem não ocorreram manchas e a imagem ficou mais nítida, o revenido em óleo geralmente resulta em uma microestrutura mais homogênea, com menos propensão a distorções.

**Figura 51: Microestrutura temperada em óleo**

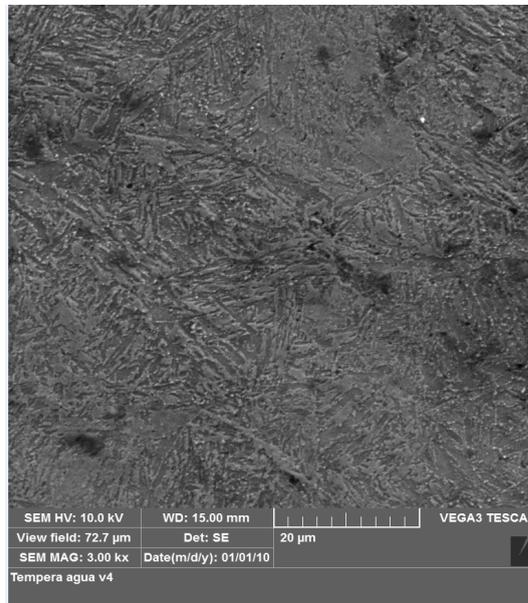


Fonte: Autorial própria (2024)

Depois das facas estarem prontas foi cortado amostras da ponta da faca temperada em óleo e da outra temperada em água, para realizar o ensaio de dureza e a amostra passou pelo processo de corte, embutimento, lixamento e ataque para o ensaio de dureza, já descritos anteriormente.

A seguir temos as microestruturas obtidas pelo MEV em água, é possível observar a presença de martensita em maior quantidade. Esse fato se deve ao próprio tipo de resfriamento, sendo brusco para água, pela amostra podemos observar a presença também de partículas de carbonetos finos e distribuídos uniformemente.

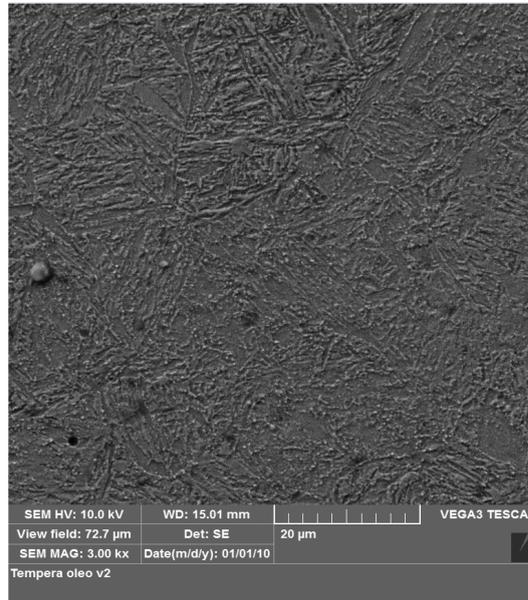
**Figura 52: Microestrutura obtida pelo MEV aumento de 3000x (água)**



Fonte: Autoria própria (2024)

A seguir temos as microestruturas obtidas pelo MEV em óleo, assim como na microestrutura em água, podemos observar a presença de martensita revenida, o resfriamento também é o responsável pela obtenção dessa microestrutura.

**Figura 53: Microestrutura obtida pelo MEV aumento de 3000x ( óleo)**



Fonte: Autora (2024)

Após o MEV, foi realizado um novo ensaio de dureza com a peça temperada em óleo e a têmpera em água,.

A seguir temos o ensaio da peça temperada em óleo, foram realizados 4 ensaios e feito uma média, 65,2. Nesse ensaio ocorreu do aparelho apresentar problemas de calibração, ou seja, o durômetro estava descalibrado e a peça embutida não ficou firmada, e houve a necessidade de retirá-la, como vemos na figura abaixo:

**Figura 54: Amostra pós-têmpera e revenido em óleo**



Fonte: Autorial própria (2024)

**Figura 55: Ponta da faca cortada, depois da têmpera e do revenimento ( óleo)**



Fonte: Autorial própria (2024)

Tabelas dos resultados após a têmpera e o revenimento em óleo.

**Tabela 9: Média dos resultados em óleo.**

<b>ENSAIO</b>	<b>Dureza HRC</b>
<b>1</b>	66.1
<b>2</b>	66.4
<b>3</b>	62.5
<b>4</b>	65.7
<b>MÉDIA</b>	65.2

Fonte: Autoria própria (2024)

A seguir temos o ensaio da peça temperada em água, nessa peça não ocorreu falha no embutimento, porém o problema de calibração no durômetro ainda persistia e isso foi o responsável pelo valor da peça feita com têmpera em óleo ser maior do que a têmpera em água, e a seguir veremos os resultados:

**Figura 56: Amostra pós-têmpera e revenido em água**



Fonte: autora (2024)

Tabelas dos resultados após a têmpera e o revenimento em água.

**Tabela 10: Média dos resultados em água**

<b>Nº</b>	<b>Dureza HRC</b>
<b>1</b>	56.9
<b>2</b>	63.4
<b>3</b>	64.6
<b>4</b>	62.0 (lâmina)
<b>Média</b>	61.7

Fonte: A autoria própria (2024)

## **10. Análise Microestrutural**

### **10.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V.)**

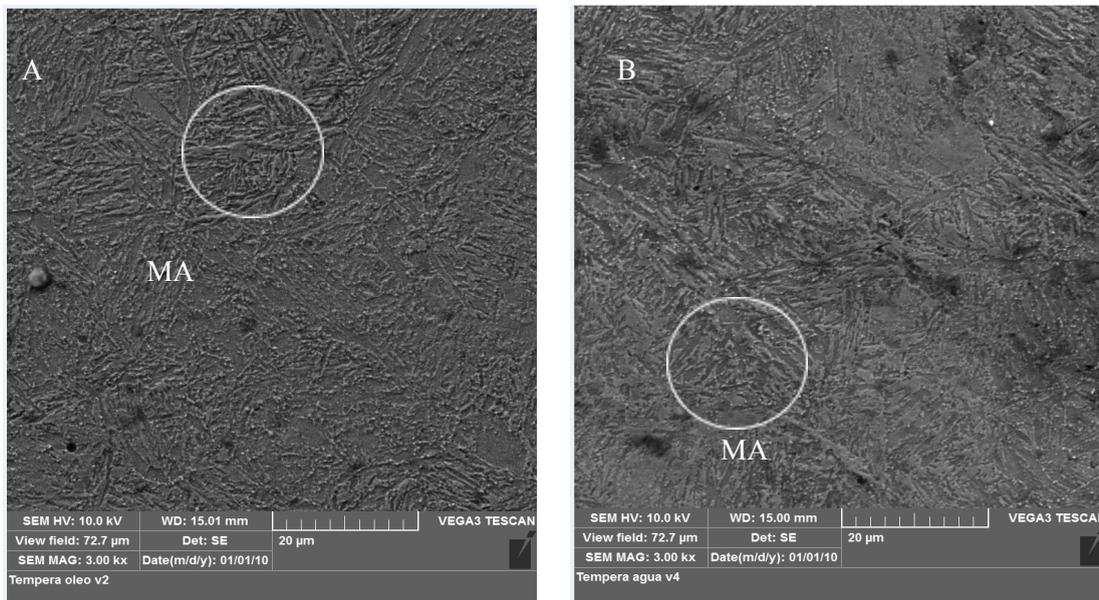
A figura 57 apresenta as análises com o microscópio eletrônico de varredura (MEV) em 3000 x. Foi utilizado esse aparelho, pois ele permite obter imagens de alta resolução nas amostras na escala nanométrica, também apresenta maior resolução que a microscopia ótica permitindo maior visualização de cada microconstituente obtido após os tratamentos térmicos.

Após a têmpera, a amostra que obteve maior dureza foi em água, atingindo uma temperatura de 850° C , a figura 57 (B) confirma o microconstituente mais duro que é a

martensita pela microscopia. O aço também passou pelo tratamento térmico de revenimento a 600°C. Com o revenimento, a estrutura ficou mais refinada.

A figura 57, tem constituintes semelhantes a ferrita bainítica, podendo ser observadas pela difusão do carbono. A ferrita encontra-se homogeneamente distribuída ao longo da microestrutura. É observado também grãos de martensita grosseiras e os pontos pretos indicam porosidade ou inclusões de oxidação.

**Figura 57: Amostra pós-têmpera e revenido em água óleo**



(A) - ataque químico com reagente Nital 3% aumento de 3000x, têmpera em óleo;

(B) - ataque químico com reagente Nital 3% aumento de 3000x, têmpera em água.

Fonte: Autorial própria (2024)

## 11. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aço AISI é um aço liga utilizado em diversas aplicações devido ao conjunto de dureza e tenacidade. São utilizados em peças automotivas ( molas e suspensões) e também em facas e facões. É um aço muito utilizado por cuteleiros por conta de suas propriedades, e por suportar uma variação e aplicações dos tratamentos térmicos (O cuteleiro- Cutelaria CIMO, 2020).

A seguir temos a comparação do aço do presente trabalho e o aço SAE 5160, com o objetivo de analisar as durezas e as microestruturas de cada um, pois ele é um dos aços utilizados em cutelarias e na indústria automobilística, logo um aço mais próximo do objetivo do trabalho

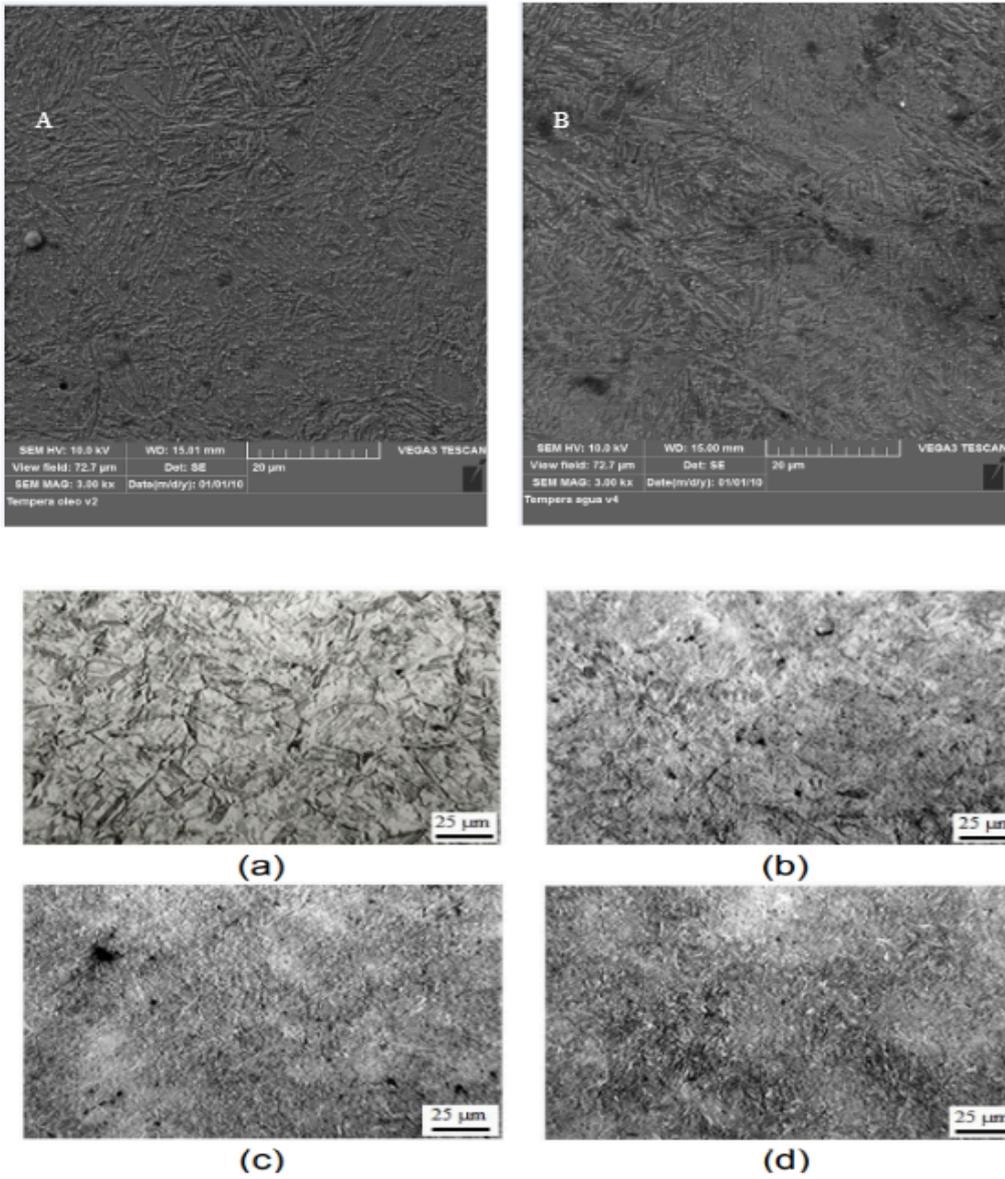
As fotos A, B, são do presente trabalho, as figuras a,b,c e d são do aço SAE 5160 a figura (a) ocorreu têmpera a 900 °C e normalização ao ar, as amostras b,c e d ocorre têmpera a 900° C e revenimento a 200°C, 300°C e 450°C respectivamente, todas em óleo.

Pela análise da microestrutura o aço temperado sem revenimento figura (a), apresenta uma microestrutura frágil pelo formato em ripas de martensita, nas figuras (b,c e d) revenidas apresenta uma microestrutura mais dúctil, por conta da difusão de carbonetos, que é característico da martensita revenida.

Na figura (A) ocorreu a têmpera a 850 °C em óleo e revenimento a 600°C , o revenimento nessa temperatura ocorreu pois não era possível obter a porcentagem da composição química da mola, e nessa temperatura consegue-se abranger o maior número de microconstituintes, assim obtendo uma microestrutura com pequenos precipitados na matriz martensítica e também pequenas quantidades de carboneto de ferro.

Na tabela obtida por comparação, os valores condizem das peças temperadas em óleo com revenimento, com as peças em têmpera e normalização sem revenimento.

Figura 58: Amostra pós-têmpera e revenido em água óleo



Fonte: (A e B) Autoria própria (2024); (a, b, c e d) IMPACTO E NA DUREZA DO ACO AISI 5160

Tabela 11: Dados obtidos do ensaio de dureza Rockwell C

Amostra	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Med 6	Média
T	46	48	45	47	46	48	46,7
200	44	46	47	47	48	49	46,8
300	41	44	43	39	39	42	41,3
450	37	37	34	38	39	41	37,7

Fonte: IMPACTO\_E\_NA\_DUREZA\_DO\_ACO\_AISI\_5160 (adaptado)

Tabela 12: Dados obtidos pelo aço do presente trabalho

Têmpera em água		Têmpera em óleo	
Nº	Dureza HRC	ENSAIO	Dureza HRC
1	56.9	1	66.1
2	63.4	2	66.4
3	64.6	3	62.5
4	62.0 (lâmina)	4	65.7
<b>Média</b>	61.7	<b>MÉDIA</b>	65.2

Fonte: Autoria própria (2024)

A imagem abaixo mostra a faca após ser amolada adquirindo um fio de corte que respondeu satisfatoriamente aos testes.

**Figura 59: Faca após todo o processo de afiação e pronta para uso**



Fonte: A autoria própria (2024)

## 12. CONCLUSÃO

Pode-se afirmar que o objetivo geral de transformação de uma mola veicular em uma peça útil, através de uma técnica pouco conhecida, a cutelaria, foi realizada com eficácia dentro das limitações nos procedimentos e nos equipamentos utilizados.

Durante todo o processo a mola não apresentou fraturas ou microfissuras mesmo sendo exposta a pancadas durante o forjamento e altas temperaturas durante a têmpera.

Houve uma comparação com um trabalho que utilizou aço carbono, o SAE 5160, fabricado tanto para molas de suspensão quanto para instrumentos de cortes na cutelaria, como facas e facões. Os resultados, mostram estruturas semelhantes de martensita e também a importância do revenimento após a têmpera para melhorar a microestrutura de frágil para dúctil.

A têmpera em óleo comparada a têmpera em água, resultou em uma peça sem deformação, com melhor tenacidade e sem curvatura, o que é essencial para lâminas.

A peça no seu estado final, ou seja, pronta, respondeu bem aos testes de impacto e ao teste de qualidade do afiado.

As facas produzidas usaram 200 mm, e seu tamanho final foi de 280 mm, o que resultaria em uma produção maior de facas, com uma simples mola.

O TCC proporcionou praticar o que a teoria explica, como o forjamento a têmpera e o revenimento.

Conclui-se do trabalho que as molas adquiridas responderam bem ao processo de transformação, aos tratamentos térmicos por conta de seu bom estado microestrutural, e obteve-se a martensita. A cutelaria também proporciona um novo estágio para transformação de sucatas em materiais artesanais e de boa qualidade.

### **Recomendações para futuros trabalhos**

Os objetivos do trabalho foram alcançados de acordo com a técnica utilizada e com os materiais disponíveis. Para recomendações futuras e complementares seria a realização de pesquisa sobre o mercado da cutelaria e implementação dessa técnica utilizando materiais que possam ser reciclados para diminuir os custos, como o próprio aço de peças veiculares, fazer um levantamento do custo de produção e quais equipamentos poderiam ser utilizados para a preparação da peça, uma recomendação propícia para área de administração, ou seja, um TCC sobre o mercado da cutelaria envolvendo reciclagem e gastos para alcançar uma produção viável e econômica.

## REFERÊNCIAS

- Oliveira, R. (2019). *Reuso de Componentes Automotivos: Benefícios Ambientais e Econômicos*. *Jornal de Tecnologia e Sustentabilidade*, 8(3), 45-59.
- Gontijo, L. (2020). *Reciclagem de Componentes de Veículos Automotores: Técnicas e Desafios*. *Revista Brasileira de Engenharia e Meio Ambiente*, 13(2), 121-134.
- Almeida, T. (2023). *Programas de Retorno e Incentivos para Veículos no Final de Vida Útil*. *Revista Brasileira de Economia Circular*, 5(1), 55-68.
- Reddy, M. M., & Smith, M. (2012). "Health Risks Associated with Metal Dusts and Their Environmental Impact." *Journal of Environmental Health*, 74(5), 40-45.
- Baldé, C. P., Wang, F., & Kuehr, R. (2015). "The Global E-Waste Monitor – 2014." United Nations University.
- Kuczynski, T. A. (2013). "Oil Filter Disposal: Environmental Impact and Best Practices." *Environmental Science & Technology*, 47(14), 7592-7600.
- Crocker, C. (2000). "Tires and the Environment: The Environmental Impacts of Used Tires." Environment Agency.
- Gordon, R. B., & Graedel, T. E. (2010). "Metal Stocks and Sustainability." Springer.
- TALY, D. et al. (2022). "Impact of Automotive Waste on the Environment: An Overview." *Environmental Management*.

FERNANDES, Maria Laura. "Diccionario de la Real Academia Española", Real Academia Española, 2001.

PETTY, Charles. "A History of the Knife". Reaktion Books, 2018.

HARTINK, A.E. "Complete Encyclopedia of Knives". Chartwell Books, 2016.

WATKINS, Harold. "The Complete Bladesmith: Forging Your Way to Perfection". Allen & Unwin, 2020.

Braga, L. Ética e segurança na cutelaria: normas e padrões para a fabricação de facas. Editora KnifeSafety, 2019.

Smith, J. Regulamentações governamentais e responsabilidade do fabricante na indústria de cutelaria. Journal of Knife Safety, vol. 15, nº 2, 2020, pp. 45-60.

Departamento de Saúde e Segurança Ocupacional. Guia de segurança para o uso de facas e outros instrumentos de corte. Governo Federal, 2018.

Hibbeler, R. C. (2012). Mecânica dos Materiais (7ª ed.). Pearson.

Juvinall, R.C., Marshek, K.M. "Fundamentals of Machine Component Design". John Wiley & Sons, 2012.

Shigley, J.E., Mischke, C.R., Budynas, R.G. "Shigley's Mechanical Engineering Design". McGraw-Hill Education, 2014.

SHIGLEY, J. Elementos de Máquinas de Shigley Projeto de Engenharia Mecânica. [S.l.]: Bookman, v. 8. 2011.

ASM International. "ASM Handbook, Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation". ASM International, 2000.

Juvinall, R.C., Marshek, K.M. "Fundamentals of Machine Component Design". John Wiley & Sons, 2012.

ASTM International. "ASTM E466 - Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials". ASTM International, 2015.

ASTM International. "ASTM E18 - Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials". ASTM International, 2019.

Kertzman, Joe. "Knife Collecting for Beginners." F+W Media, Inc., 2013.

Lewis, Jack. "The Gun Digest Book of Tactical Weapons Assembly/Disassembly." Gun Digest Books, 2009.

Caffrey, Norman. "Complete Guide to Edible Wild Plants, Mushrooms, Fruits, and Nuts: How to Find, Identify, and Cook Them." Skyhorse Publishing, Inc., 2010.

Levine, Bernard. "Knife Thrower: and Other Stories of the Old West." University of Nevada Press, 2011.

Lang, H. "How to Make Knives." Craig Publications, 2004.

Piergrossi, Tom. "Knife & Tomahawk Throwing: The Art of the Experts." Paladin Press, 2009.

Goddard, Wayne. "The \$50 Knife Shop: Creating Your Own Custom Knives". Krause Publications, 2001.

Landis, Jerry. "The Complete Bladesmith: Forging Your Way To Perfection". Paladin Press, 1987.

Hrisoulas, Jim. "The Complete Bladesmith: Forging Your Way To Perfection". Paladin Press, 1987.

Sachse, Karl. "Cutting Edge: Knife Sharpening Tips and Tricks". Krause Publications, 2001.

ARCANJO, E. P. Caracterização do comportamento à fadiga de molas. 2008. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008

ASTM E18 - Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials

ISO 6508 - Metallic Materials - Rockwell Hardness Test

Materials Science and Engineering: An Introduction” por William D. Callister Jr. e David G. Rethwisch

Souza, J. C. (2020). *Fundamentos da Engenharia de Processos de Fabricação*. LTC - Livros Técnicos e Científicos.

Krautkramer, J., & Krautkramer, H. (1990). *Ultrasonic Testing of Materials*. Springer.

CALLISTER, W. D., *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. John Wiley & Sons, Inc., 2002.