

## Estudo comparativo de aços ferramentas após o processo de tratamento térmico

Felipe da Rosa Lima<sup>1</sup>, Gabriel Domingos do Prado<sup>1</sup>, Luciano Jung Venâncio<sup>1</sup>

felipe.rlima98@gmail.com  
gabrielpradod@gmail.com  
luciano.jung96@hotmail.com

Professora orientadora: Daniele da Silva Domingos

Coordenação do curso de Engenharia Mecânica

### Resumo

Os aços ferramentas são utilizados na indústria metal mecânica, e devido sua alta demanda em condições adversas, precisam passar pelo processo de tratamentos térmicos para atender todas as suas necessidades. Para ferramentais são muito utilizados os aços VND e D2, logo que ambos têm como principais funções obterem elevadas durezas. Com a busca por melhores custo-benefícios, analisaram-se os mesmos, temperados e revenidos. Para estudo de comparação foi utilizado o ensaio impacto de Charpy, isto porque simula condições reais e busca identificar a energia absorvida. Contudo, para garantir a dureza de cada material, antes dos ensaios foram feitos estudos com durômetros. No ensaio de Charpy foram obtidas as seguintes médias em Joule: 4,00 e 3,33 para VND e D2, respectivamente. Além disso, buscou-se analisar por meio da metalografia as propriedades, com a utilização de ataque de nital 3,5% e aumentos em até 1000 vezes. Desse modo, foram constatadas microestrutura constituída de martensita revenida e carbonetos secundários, em ambos os aços, mas no D2 também carbonetos primários, logo essa concentração de carbonetos primários gera tensões no material, e também a má distribuição registrada, formatos de laminação, espinhas de peixe ligeiramente alongadas reduz a tenacidade. O custo do VND foi mais viável, isto quando D2 não obteve os parâmetros adequados. A partir desses resultados podem ser estudados as qualidades das matérias-primas e métodos de tratamentos térmicos, como alívio de tensões para garantir a distribuição adequada dos carbonetos, fatores que influenciaram nas suas propriedades, evitando falhas de componentes durante sua aplicabilidade.

Palavras-chave: Aços ferramentas. Tratamentos térmicos. Ensaio de Charpy. Metalografia.

### 1. INTRODUÇÃO

Os metais são utilizados em diversos setores da indústria, do qual são requisitados para cumprir aplicações específicas, porém, muitas vezes o componente não é capaz de exercer uma determinada função, e para atender as necessidades de um determinado projeto, são utilizados tratamentos térmicos e superficiais para alterar as propriedades necessárias da peça para que ela atinja o desempenho previsto. Os componentes são fabricados geralmente com ligas à base de cobre, níquel, alumínio e ferro (PINEDO, 2021).

As propriedades das ligas podem ser divididas em composição química, microestrutura e condições de fabricação. Na composição química o carbono é o

elemento de liga básico que interfere na estrutura do material, e por consequência nas suas propriedades. Já na forma de fabricação, os métodos de fundição, conformação mecânica a frio ou a quente, tratamentos térmicos e termoquímicos também alteram as suas propriedades (CHIAVERINI, 2005).

Os tratamentos térmicos são processos de aquecimento e resfriamento, com condições de tempo, temperatura, atmosfera e velocidade de esfriamentos controlados submetidos em aços, de modo a melhorar as suas propriedades físicas e químicas, ou conferir-lhes determinadas características para sua futura aplicação (CHIAVERINI, 2005). Após a realização dos tratamentos térmicos em aços é comumente realizados ensaios de dureza ou até mesmo estudos de metalografia, com o intuito de compreender o comportamento dos materiais, alterações das microestruturas ou determinar possíveis falhas.

O método mais empregado para determinar a dureza do aço submetido ao tratamento térmico é o Rockwell, devido a sua simplicidade de utilização, sem a necessidade de muito treinamento por parte do operador, e por avaliar faixas de dureza desde materiais mais dúcteis aos mais duros (CALLISTER et al., 2013).

A metalografia é o estudo que caracteriza o comportamento microestrutural e os elementos presentes nos metais, ligas e outros materiais. O estudo é determinado como a técnica mais importante para análises microestruturais, logo que é possível analisar as orientações cristalográficas dos grãos e definir suas fases (VOORT, 2004).

Com base nisso, o principal objetivo deste trabalho é realizar um estudo em dois aços ferramentas que trabalham a frio, sendo eles AISI 01 (VND) e AISI D2, a fim de desconsiderar qualquer custo de usinagem, será utilizado materiais com as mesmas dimensões, os processos de tratamento térmico serão iguais para fim de comparação, definidos como têmpera e revenimento, mas as durezas seguirão as usuais no âmbito industrial. Ademais, a proposta do tratamento térmico é melhorar suas propriedades físicas resultando em um cenário real de uso, seguidamente da análise da microestrutura, ensaio de dureza Rockwell e por fim ensaio de impacto Charpy, desse modo, com os resultados obtidos são possíveis verificar a vantagem e desvantagens de cada material, quais as melhores condições de uso e comparar custo de aço com a sua aplicabilidade.

O setor industrial de ferramentarias e usinagens em Joinville e Região vem crescendo constantemente, e com a diversidade de aços para aplicações em moldes, ferramentas e dispositivos mecânicos no mercado, variados métodos de tratamentos térmicos fica cada vez mais difícil selecionar o ideal para caso, apesar de sempre ser usado materiais com características similares para determinadas funções, é fundamental realizar estudos pensando na vida útil, custo-benefício, melhor aplicabilidade e confiabilidade.

## **2. AÇOS FERRAMENTAS**

Os aços ferramentas são materiais destinados principalmente à fabricação de moldes e matrizes para conformação mecânica, e como propriedades fundamentais pode-se destacar a dureza e resistência ao desgaste. Além disso, em determinadas aplicações a tenacidade torna-se uma qualidade obrigatória (CHIAVERINI, 1995).

### **2.1.1 Características fundamentais dos aços ferramentas**

A seleção dos materiais utilizados em ferramentas e matrizes tem que obedecer uma quantidade de requisitos mínimos, porque cada função exercida

requer propriedades específicas, e quando definido aumentam o tempo de utilização a longo prazo a um custo mais baixo (CHIAVERINI, 1995).

Os requisitos necessários são os seguintes: dureza à temperatura ambiente, como passam por processos de corte, conformação, usinagem ou penetração os materiais devem obter estas propriedades; resistência ao desgaste, devido às mesmas razões anteriores, e o material também necessita de durabilidade para se tornar econômico, isto porque a fabricação é complexa e delicada, logo, com custo elevado; tenacidade, característica desejável em cavidades, matrizes e ferramentas, entretanto, é muito difícil conciliar com a elevada dureza, neste caso deve-se manter relação entre as duas características, a fim de atender as condições de serviço; resistência mecânica, tem que ser a mais alta possível para cada trabalho realizado; dureza à quente, considerado como o requisito mais importante, o mesmo está na capacidade de o material manter suas propriedades junto com a resistência ao amolecimento em altas temperaturas, como cada ferramenta se comporta de maneira diferente nessas condições, esse é um fator primordial na sua seleção; usinabilidade, característica de difícil conciliação com a elevada dureza, mas deve-se levar em consideração antes de selecionar o material, junto ao custo e necessariamente causando processos mais sofisticados de fabricação e usinagem (CHIAVERINI, 1995).

### **2.1.2 Composições químicas dos aços ferramentas**

Assim como os requisitos citados anteriormente, exige-se ainda elevada temperabilidade e tamanho de grão, e para alcançar essas características os dois fatores básicos são composições químicas e tratamentos térmicos (CHIAVERINI, 1995).

Os aços ferramentas podem ser simplesmente de carbono, ou como na maioria dos casos, aços-liga, com a presença de elementos tais como silício, manganês, cromo, vanádio, tungstênio, cobalto e molibdênio, tornando sua estrutura mais complexa e de difíceis operações de tratamento térmico e fabricação (CHIAVERINI, 1995).

Cada composição química é controlada para manter as propriedades e atender as condições necessárias, sendo elas: carbono, é o elemento essencial que mantém a dureza em temperatura ambiente, dureza à quente e resistência ao desgaste; manganês e silício, são elementos desoxidantes, quanto maior o teor de manganês como desoxidantes melhor a temperabilidade; cromo, auxilia na melhora da temperabilidade e aumenta a dureza, resistência mecânica e ao desgaste; vanádio, atua como desoxidante também, controlando a temperabilidade e o tamanho do grão, assim como deixando os carbonetos mais duros, fornecendo a dureza em elevadas temperaturas; tungstênio, considerado um dos elementos mais importantes nos aços ferramentas, devido a aumentar a dureza a quente em até 600 °C e à temperatura ambiente com teores muito elevados, com isso melhora muito a resistência ao desgaste; cobalto, presente em alguns aços, ajuda a contribuir com a dureza à quente; molibdênio, é utilizado para substituir parcialmente o tungstênio devido a apresentar efeitos parecidos (CHIAVERINI, 1995).

A tabela 1 mostra os principais elementos de liga adicionados aos aços utilizados em matrizes, cavidades e ferramentas, com suas principais características.

**Tabela 1 - Habilidade dos elementos de liga em conferir certas características aos aços ferramentas**

| Característica                 | Elementos de liga                  |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Dureza a quente                | W, Mo, Co (com W ou Mo), V, Cr, Mn |
| Resistência ao desgaste        | V, W, Mo, Cr, Mn                   |
| Profundidade de endurecimento  | Mn, Mo, Cr, Si, Ni, V              |
| Empenamento mínimo             | Mo (com Cr), Cr, Mn                |
| Tenacidade pelo refino de grão | V, W, Mo, Mn, Cr                   |

Fonte: (CHIAVERINI, 2008)

### 2.1.3 Aço ferramenta AISI 01 (VND)

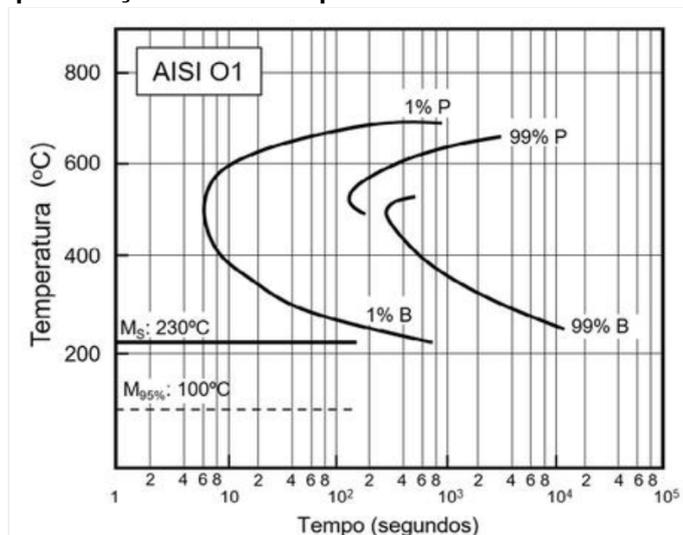
O aço ferramenta AISI O1 é utilizado para trabalho a frio, possui aproximadamente 1,0% de carbono e com pouca adição de elementos de liga, conforme tabela 2. Este aço normalmente é aplicado em ferramentas que necessitam de dureza entre 58 a 61 HRC, e para atingir essa elevada dureza o aço deve ser temperado e revenido com os parâmetros corretos garantindo suas melhores respostas de propriedades após o tratamento térmico. Devido seu alto teor de carbono possui ótima temperabilidade, quando comparado a outros aços. Entretanto, conforme a Figura 1, a curva TTT do AISI O1, mostra a formação da bainita e da perlita em tempos relativamente curtos, desse modo obriga que os materiais seja resfriado em óleo no processo de têmpera e quando se trata de peças com espessuras menores, restringe o endurecimento total (PINEDO, 2021).

**Tabela 2 - Composição química nominal do aço AISI O1, % em massa**

| C    | Cr   | V    | W    |
|------|------|------|------|
| 0,95 | 0,50 | 0,12 | 0,50 |

Fonte: (PINEDO, 2021)

**Figura 1 - Curva TTT para o aço ferramenta tipo AISI O1**



Fonte: (PINEDO, 2021)

### 2.1.4 Aço ferramenta AISI D2

Os aços ferramentas denominados com “D” possuem alto teor de carbono e cromo: 1,00 a 2,25% de carbono, 12% de cromo, além disso, podem ter 1,0% de molibdênio, 3% de cobalto e 1,0% de tungstênio. Ademais, os aços são temperados entre 955 °C e 1040 °C, em óleo ou ao ar (CHIAVERINI, 1995).

O aço ferramenta AISI D2 é o mais utilizado pelo fato de apresentar uma ótima combinação de resistência mecânica, resistência ao desgaste e alta dureza (MEDANHA et al., 2011). A elevada resistência ao desgaste devido ao alto teor de carbono e de cromo neste material, acontece em virtude da presença de carbonetos de cromo, e baixa distorção durante o tratamento térmico (SILVA et al., 2006). Conforme a tabela 3, a composição química do aço AISI D2 é adicionado também manganês, silício e vanádio.

As aplicações são em matrizes e punções de conformação e corte, ferramentas para dobra, repuxo, extrusão, facas e pentes laminadores de roscas (GGD METALS, 2022).

**Tabela 3 - Composição química aço ferramenta AISI D2**

| <b>C</b> | <b>Mn</b> | <b>Si</b> | <b>Cr</b> | <b>Mo</b> | <b>V</b> |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 1,50     | 0,6       | 0,6       | 12,0      | 1,00      | 1,00     |

Fonte: (GGD METALS, 2022)

### 2.2 TRATAMENTO TÉRMICO

Os processos de produção geralmente não fornecem os materiais de construção com condições necessárias de serviço a que serão sujeitas, ou seja, surgem tensões na fundição, conformação mecânica e até mesmo na usinagem podem acontecer problemas de distorções e empenamento, afetando negativamente, as propriedades mecânicas (CHIAVERINI, 1995).

Os tratamentos térmicos são métodos empregados para modificar a estrutura interna da peça, tendo como intuito uma nova formação estrutural do material (CELESTINO et al., 2007). Conforme a necessidade é utilizado um processo específico, em função das propriedades que se pretende obter na superfície (FONTES et al., 2015). Esses procedimentos servem para controlar as microestruturas dos materiais, morfologia e tamanho de grão (ROCHA et al., 2015). São concebidos os micronutrientes conhecidos como ferrita, bainita, martensita e austenita no decorrer da utilização desses métodos (ANAZAWA et al., 2012). Esses micronutrientes permitem modificar as propriedades mecânicas dos materiais conforme a exigência necessária (BARROS et al., 2015).

Portanto, o processo de aquecimento e resfriamento, são realizados em condições controladas de temperatura. Desse modo, como objetivo do tratamento térmico podem ser destacados: remoção de tensões internas, aumento da dureza e da resistência mecânica, ao desgaste, a corrosão e ao calor, melhora da ductilidade, propriedades de corte e usinabilidade, e modificação das propriedades elétricas e magnéticas (CHIAVERINI, 1995).

### **2.2.1 Têmpera**

A têmpera, assim como os outros tratamentos térmicos são constituídos por três fases: o aquecimento (até uma completa austenitização completa da massa do aço), o estágio à temperatura de têmpera e o arrefecimento (transformar em martensita). Portanto, com um tratamento cuidadoso e apropriado que se pode pôr em evidência as prioridades parentes, que já existem no aço (SOARES, 1980).

### **2.2.2 Aquecimento**

Os aços com muita liga possuem uma baixa condutibilidade térmica, desse modo, devem ser aquecidos lentamente para evitar tensões devido às diferenças de temperaturas que podem causar distorções e até fraturas. (SOARES, 1980).

Então, como, a temperatura de têmpera é normalmente elevada, deve-se fazer um pré-aquecimento. O ideal é fazer o aquecimento de um, dois ou três degraus para temperaturas de 900, 1000 °C ou superiores, respectivamente. O objetivo principal desse método é garantir um aquecimento uniforme em toda seção da peça e evitar o superaquecimento da superfície (SOARES, 1980).

Dessa forma, a temperatura de têmpera deve ser observada com rigor, pois, se for ultrapassada tem o risco de aumentar desnecessariamente o tamanho do grão, e provocar descarbonização exagerada da superfície, definido como sobreaquecido. O excesso de elevação deixa o material com uma estrutura grosseira e frágil, em virtude das impurezas que cercam os grãos ao solidificarem apresentam em forma de uma película de vidro sem coesão, logo o aço está queimado sem recuperação (SOARES, 1980).

### **2.2.3 Estágio da temperatura de têmpera**

Este estágio tem a finalidade à obtenção de uma estrutura totalmente austenítica, para a operação de arrefecimento. No entanto, existem dois tipos de aços: os hipoeutetóides e os hipereutetóides (SOARES, 1980).

Os hipoeutetóides, ao serem aquecidos para a têmpera, devem elevar a sua temperatura acima da zona crítica (linha A3), pois, sua estrutura consiste apenas de austenita que se transformará em martensita, ao ser resfriado rapidamente. Entretanto, deve-se evitar temperaturas muito acima da zona crítica para não causar o superaquecimento, que gera propriedades muito grosseiras e frágeis (CHIAVERINI, 1995).

Os aços hipereutetóides, são aquecidos acima da linha A1 sem a necessidade de ultrapassar a zona crítica, com isso será constituído grãos de austenita e pequenas partículas de carbonetos. Logo, ao ser resfriado a estrutura apresentará martensita e os mesmos carbonetos secundários, que não será problema porque estes apresentam dureza superior à da martensita (CHIAVERINI, 1995).

Com relação ao tempo de estágio, depende dos seguintes fatores: composição química do aço, dimensão da peça, temperatura de têmpera e o modo como é feito o aquecimento (SOARES, 1980).

## 2.2.4 Arrefecimento

Após o aquecimento e o estágio à temperatura de têmpera vem o arrefecimento, logo que as estruturas do aço são constituídas por cristais de austenita, onde se tem carbonetos no caso dos aços hipereutetóides. Neste processo, a peça é arrefecida em determinada velocidade que a austenita se transforma em martensita, ou se preferir em bainita. Os meios utilizados para esses arrefecimentos são a água, a salmoura, o óleo e o ar (SOARES, 1980).

Na água a taxa de resfriamento é alta, os valores de dureza são alcançados nas temperaturas entre 15 e 25 °C. A partir dessas podem ocorrer formação de estruturas que deixam o aço ocioso (CANALE, 2014).

Os banhos de sais com cloreto de sódio em quantidades determinadas, tem uma taxa de resfriamento mais rápida que da água. Este fato ocorre porque primeiro acontece a evaporação da água, e então os pequenos cristais de NaCl se depositam na superfície da peça (CANALE, 2014).

No que se refere ao óleo é indicado em aços com alto teor de carbono e ligas complexas, possuem taxas inferiores à água e a salmoura, porém, o calor é retirado de forma uniforme e constante. A temperatura varia entre 40 e 95 °C, valores acima causam envelhecimento na peça, e abaixo, a viscosidade se elevaria resultando em possíveis riscos de fogo (CANALE, 2014).

Por fim, no ar é o método que tem menor custo, mas a dureza obtida com relação aos outros meios é menor, sua maior utilização é em aços-liga ou aços-ferramenta (CANALE, 2014).

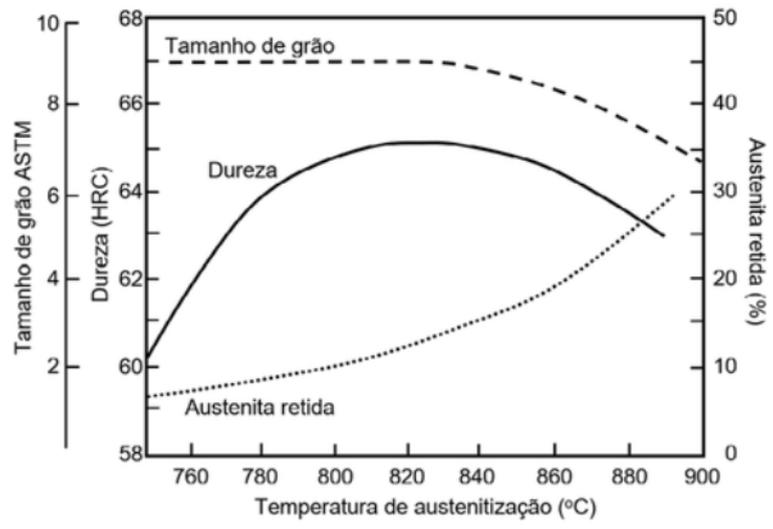
A quantidade de água, óleo ou salmoura deve ser o suficientemente grande para que sua temperatura não aumente demasiado durante o arrefecimento. Outro processo chamado, têmpera por histerese que consiste em abaixar a temperatura do forno, entre 100 a 200 °C, com a peça dentro até que toda sua massa tenha uma igualdade na quantidade de calor, depois segue o arrefecimento normal (SOARES, 1980).

## 2.2.5 Têmpera no AISI O1 (VND)

O aço AISI O1 apresenta uma grande quantidade de carbono e essa característica faz com que a sua transformação martensítica seja com elevada expansão do reticulado cristalino e gerando fortes tensões internas. Desse modo, é muito importante controlar a temperatura de aquecimento da têmpera, principalmente a de austenitização, e com isso atingir a melhor condição microestrutural após resfriamento (PINEDO, 2021).

No estado recozido o aço possui uma microestrutura composta por ferrita e carbonetos de ferro esferoidizados, no processo de austenitização esses carbonos são dissolvidos gradativamente à medida que a temperatura aumenta, e desse modo a matriz é enriquecida com carbono que ocasionam o aumento da dureza da martensita em temperaturas de austenitização até 820 °C. Quando as temperaturas são superiores decorre a dissolução total dos carbonetos, reduzem o tamanho do grão e aumentam constantemente a austenita retida, conforme a Figura 2 (PINEDO, 2021).

**Figura 2 - Características microestruturais e de endurecimento do aço ferramenta AISI O1 em diferentes temperaturas de austenitização**



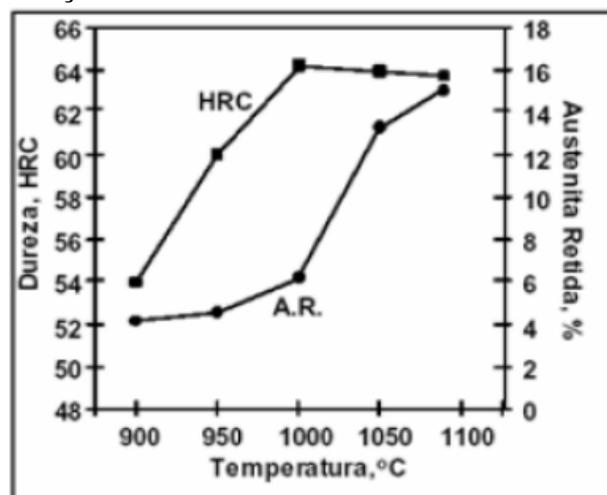
Fonte: (PINEDO, 2021)

### 2.2.6 Têmpera no AISI D2

O processo de têmpera no AISI D2 ocorre em temperaturas entre 1020°C a 1040°C para austenitizar, conforme a Figura 3, sendo aquecido por 1 hora para cada 25 milímetros de espessura e adicionado mais 1 hora para cada 25 milímetros adicionais. Ademais, para o resfriamento do material os meios são ao ar, óleo morno, banho de sal ou pressão de nitrogênio em forno à vácuo (GGD METALS, 2022).

Por fim, são utilizados dois pré-aquecimentos durante o aquecimento de austenitização para garantir a homogeneidade de temperatura e minimizar as distorções, também é recomendável fazer o processo de alívio de tensões antes da têmpera quando ocorrem muita remoção de material durante a usinagem de desbaste, ferramentas de formas complexas, mudanças bruscas de seções, entre outros (GGD METALS, 2022).

**Figura 3 - Têmpera para o aço AISI D2**



Fonte: (MEDANHA, 2011)

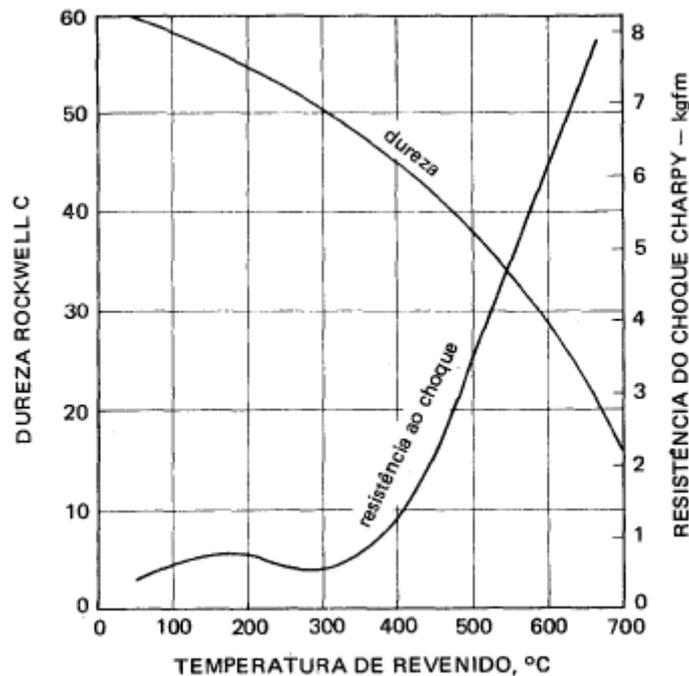
## 2.2.7 Revenimento

O revenido é um tratamento térmico que normalmente é utilizado após a têmpera, pois consegue eliminar totalmente ou pelo menos a maioria dos defeitos produzidos por esta. Além disso, possui a capacidade de aliviar ou remover algumas tensões internas, assim como corrige a dureza e a fragilidade excessiva do material, melhorando sua ductilidade e resistência ao choque condizente com o que mostra a figura 4. É recomendável revenir após a têmpera, caso seja aguardado muito tempo para realizar o revenido, pode ocorrer perdas de peças por ruptura (CHIAVERINI, 2005).

Conforme ilustra a figura 5, o tratamento térmico de revenimento é de baixa temperatura, inferior à temperatura crítica  $A_{c1}$  (temperatura onde se inicia a formação da austenita), é realizada no aço temperado (CHIAVERINI, 1995).

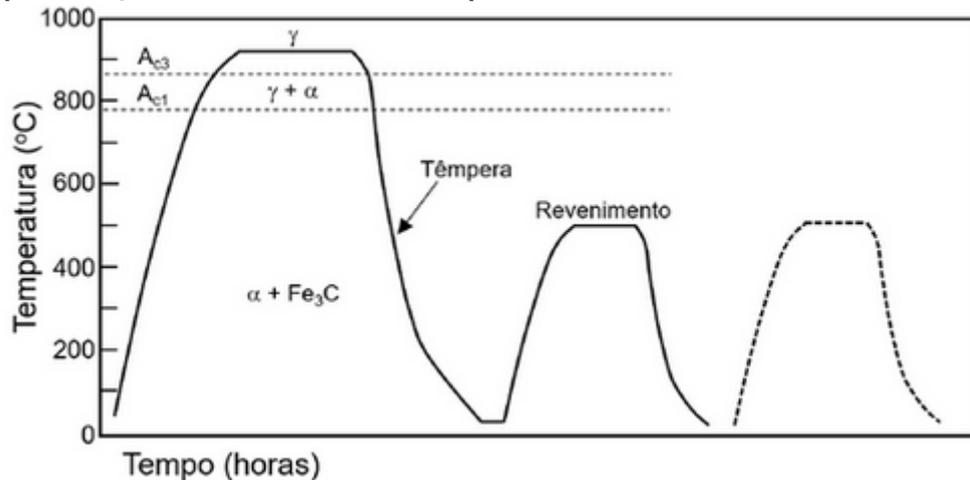
Após a têmpera, as peças devem ser deslocadas para o revenimento depois de atingir uma temperatura de  $70^{\circ}$  à  $90^{\circ}\text{C}$ . O nível de aquecimento será decidido de acordo com os resultados desejados, seja aliviar as tensões ou eliminá-las por completo. Em aços de alta liga são realizados pelo menos dois revenimentos com uma duração mínima de duas horas para cada. Já em aços de baixa e média ligas é realizado apenas um revenimento com uma duração mínima de uma hora na temperatura desejada. (PINEDO, 2021).

**Figura 4: Efeito da temperatura de revenido na dureza e resistência ao choque de um aço 1045 temperado**



Fonte: (CHIAVERINI, 1995)

Figura 5 - Representação do ciclo térmico da têmpera e revenimento



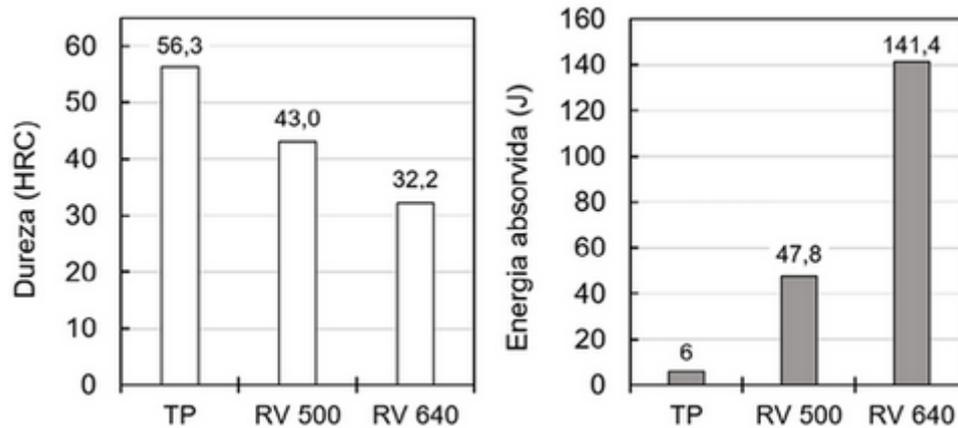
Fonte: (PINEDO, 2021)

Conforme a temperatura atingida no revenido, verificam-se as seguintes transformações:

- Entre 25° e 100°C ocorre uma redistribuição do carbono em direção a inconformidades, essa precipitação do carbono pouco afeta a dureza;
- Entre 100° e 200°C, também ocasionalmente chamado de primeiro estágio do revenido, ocorre a precipitação de um carboneto de ferro de reticulado hexagonal cujo pode estar ausente em aços de baixo carbono e baixa liga. A dureza começa a cair até aproximadamente 60 Rockwell;
- Entre 200° e 300°C, às vezes chamado de segundo estágio do revenido. Em aços de médio ou alto carbono e levemente ligados, possivelmente haverá alguma austenita retida na têmpera, que tenderá a se transformar em bainita. A dureza Rockwell continuar a cair;
- Entre 250° e 350°C, às vezes chamado de terceiro estágio do revenido, forma-se um outro tipo de carboneto, notado principalmente em aços de alto carbono, ao observar no microscópio, nota-se uma massa escura, que anteriormente era chamada de "troostita". A dureza Rockwell continua caindo, agora em torno de 50 RC;
- Entre 400° e 600°C, os carbonetos precipitados adquirem uma nova forma esferoidal sendo mantida uma estrutura de ferrita fina acicular. A dureza Rockwell cai para valores entre 45 e 25 RC;
- Por último, entre 600° e 700° C, começa a ocorrer recristalização e crescimento de grão, a cementita precipitada de apresenta de forma claramente esferoidal, sobre um fundo de ferrita. Essa estrutura é muito tenaz e mole, variando sua dureza entre 5 a 20 RC (CHIAVERINI, 2005).

Ao final do revenimento, independente da temperatura selecionada, a estrutura obtida pode ser chamada de "martensita revenida" (CHIAVERINI, 2005). A figura 6 exemplifica como geralmente a dureza HRC dos aços respondem ao tratamento de têmpera e revenido, em específico a resposta do aço SAE 4140, utilizado na fabricação de alguns componentes mecânicos, alguns tipos de matrizes simples, moldes e porta moldes.

Figura 6: Resposta do aço SAE 4140 ao tratamento de têmpera e revenido a 500°C e a 640°C



Fonte: (PINEDO, 2021)

### 2.2.8 Fragilização ao revenido

Vários tipos de aços, principalmente os aços-liga com baixo teor em liga quando revenidos entre as temperaturas de 200° a 400°C, caracterizam-se por adquirirem fragilidade. A mesma pode ser causada pela presença de impurezas na região dos contornos do grão. Possui uma superfície com aspecto intergranular (PINEDO, 2021).

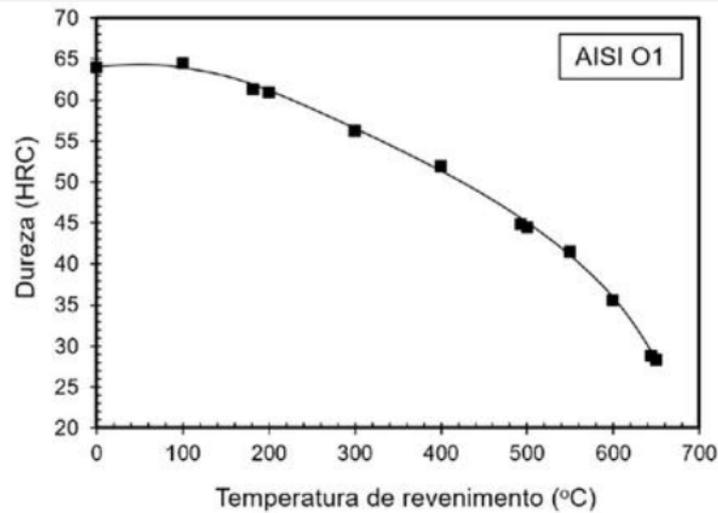
Os aços que contém quantidades notáveis de manganês, níquel e cromo, além de mais impurezas como antimônio, fósforo, estanho ou arsênio, estão suscetíveis ao fenômeno (CHIAVERINI, 2005).

### 2.2.9 Revenimento no AISI O1

Os aços AISI O1 precisam ter uma dureza relativamente alta, porque são fabricados para suportar elevados esforços em prensas, ferramentas de dobradas e cortes, ou como componentes deslizantes exigindo elevada resistência a desgaste. Logo, com o processo de têmpera o endurecimento máximo é de 65 HRC, e no revenimento é alcançada a dureza de trabalho entre 58 a 61 HRC (PINEDO, 2021).

Assim como os demais aços para construção mecânica o AISI O1 também reduz a sua dureza à medida que a temperatura de revenimento aumenta, conforme a Figura 7, e para atingir as durezas de trabalho recomendadas a temperatura deve ser obrigatoriamente próxima de 200 °C. O procedimento de resfriamento do revenimento pode ser ao ar, ou diretamente no óleo (PINEDO, 2021).

Figura 7- Curva de revenimento do aço AISI O1 temperado a partir de 820 °C



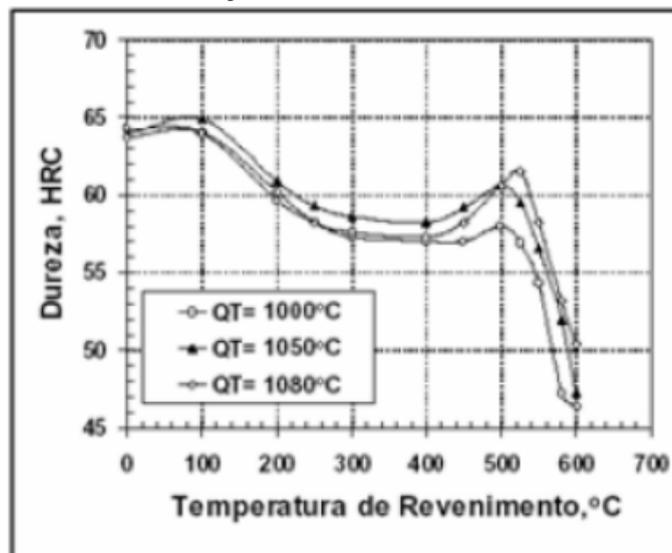
Fonte: (PINEDO, 2021)

### 2.2.10 Revenimento no AISI D2

O aço AISI D2 deve ser revenidas imediatamente após a têmpera, quando a temperatura chegar a 70 °C aproximadamente e para atingir dureza típicas de uso entre 58 a 60 HRC, podem ser selecionados duas faixas de temperaturas de revenimento conforme a Figura 8, sendo elas 200 °C ou 500 °C. Os ciclos de tratamento térmico devem ser escolhidos conforme a aplicação do aço ferramenta, mas é necessário que sejam realizados no mínimo dois revenimentos, e entre eles, o material deve ser resfriado lentamente até a temperatura ambiente (GGD METALS, 2022).

Bem como, cada ciclo de revenimento deve ser de 2 horas no mínimo, e para peças com medidas maiores que 70 milímetros, o tempo de revenimento deve levar em consideração o cálculo em função das suas dimensões, desse modo aplica-se uma hora para cada 25 milímetros (GOBBI, 2009).

Figura 8- Curva de revenimento do aço AISI D2



Fonte: (MEDANHA, 2011)

## **2.3 ENSAIO DE DUREZA**

A dureza é uma propriedade mecânica muito importante e utilizada para caracterização dos materiais, estudos metalúrgicos e mecânicos, e na análise comparativa de variados tipos de materiais (CHIAVERINI, 1995).

O ensaio de dureza é realizado aplicando uma força sobre a superfície do corpo de prova a ser estudado, no teste é usado um penetrador cônico ou esférico a sua função é furar o material, e com isto o equipamento mede a profundidade que a ponteira causa no material definindo assim a dureza, que são informadas em diferentes escalas dependendo o tipo do instrumento de medição. Desse modo, as metodologias mais usadas para a aferição de dureza são os ensaios de dureza Rockwell, Brinell e Vickers (GARCIA, 2014).

### **2.3.1 Ensaio de dureza Rockwell**

O ensaio de dureza Rockwell foi incluído por Rockwell em 1922, é o método mais utilizado em materiais temperados, e possui algumas vantagens significativas quando comparados com outros ensaios de dureza, determinando assim o extenso uso internacional. No procedimento Rockwell a leitura de medição é realizada diretamente no equipamento reduzindo assim o tempo de medição das marcações causadas pelas ponteiros, e com isso diminuindo o erro de leitura humana. Ademais, outra vantagem é a utilização de ponteiros menores que evitam danificar o material a ser analisado (GARCIA, 2014).

A medição de dureza é realizada pela profundidade que a ponteira penetrador esfera cônico com ângulo de  $120^\circ$ , e material de diamante avança sobre a peça, seguida de dois estágios, sendo elas em ensaio de dureza Rockwell comum pré-carga de 10 kgf, e carga suplementar de 60 kgf, 100 kgf e 150 kgf, e para ensaio de dureza superficial pré-carga de 3 kgf, e carga suplementar de 15 kgf, 30 kgf e 45 kgf. Ademais, a necessidade da aplicação de pré-carga é para evitar defeitos superficiais e auxiliar da fixação do material no suporte, além eliminar erros causados na recuperação do material devido à deformação elástica (GARCIA, 2014).

### **2.3.2 Ensaio de dureza Brinell**

O ensaio de dureza Brinell foi proposto por J. A. Brinell em 1900, sendo o método mais utilizado na Engenharia até os dias atuais, o método é comumente aplicado em latão, cobre e aço recozido (SHACKELFORD, 2008). O ensaio consiste em comprimir uma esfera de tungstênio ou aço temperado, contra uma superfície plana e polida do aço a ser estudado, com uma carga e tempo determinado produzindo uma marcação no material (RODRIGUES, 2010).

Apesar de existirem diversos durômetros portáteis e de bancadas no mercado que permitem praticidade na utilização, a esfera no método de Brinell quando comparado a outros métodos provocam uma marcação mais profunda e mais larga com porção de material, logo uma média de medição mais precisa quando se trata de possíveis estruturas policristalinas e heterogeneidades do material (RODRIGUES, 2010).

A identificação da dureza de Brinell é seguido do símbolo HB, sem sufixo quando se tratar de ensaio padronizado e com tempo de carga de 15 segundos. Ademais, ao aplicar outras condições são necessários especificar com números nas

seguintes ordens: diâmetro da esfera, carga e tempo de aplicação da carga (RODRIGUES, 2010).

### **2.3.3 Ensaio de dureza Vickers**

O ensaio de dureza Vickers foi desenvolvido por Sandland e Smith em 1925, o nome é devido à companhia Vickers-Armstrong Ltda. ser a fabricante dos equipamentos mais conhecidos a utilizar esse tipo de dureza, e é aplicado a diversos tipos de materiais (CHIAVERINI, 1995). O ensaio consiste na aplicação de uma força com uma ponteira de formato piramidal, base quadrada e ângulo de 136° entre as faces, o material é de diamante (GARCIA et. al., 2000).

Este ensaio tem como vantagens: escala contínua; a marcação na peça ser muito pequena; alta precisão de medida; praticamente nula a deformação do penetrador; e a existência de apenas uma escala de medida de dureza. No método de Vickers o valor da dureza é o mesmo independente da força utilizada em materiais homogêneos, e a força aplicada pode variar entre 1 a 120 kgf, de modo que é ajustada para obter uma impressão regular (SOUZA, 1982). Por fim, após a marcação do material a ser estudado, utiliza-se um microscópio que é acoplado ao equipamento para fazer a medição das diagonais impressas, logo como a magnitude de força e a média das diagonais, é possível encontrar o valor da dureza (MCCOLM, 1990).

## **2.4 METALOGRAFIA**

O principal intuito da metalografia é conhecer as características dos aços para garantir que o material cumpra as exigências necessárias para executar uma determinada função. São observados aspectos como a microestrutura, propriedades, composição, formação de poros, entre outros (LABTESTE, 2022).

### **2.4.1 Macrografia**

Macrografia consiste no exame das características de uma peça ou amostra metálica corretamente polida e atacada por um reativo apropriado para a informação que se deseja. A mesma é feita a olho nu ou com uma ampliação baixa de até 50x. Através desse processo se reproduz a macroestrutura, do qual se obtém noções sobre o aspecto do material, impurezas, a distribuição das falhas e sua natureza, profundidade dos tratamentos térmicos realizados e outras características (COLPAERT, 2008).

### **2.4.2 Micrografia**

Micrografia se trata do estudo dos produtos metalúrgicos com o auxílio do microscópio, onde pode-se observar as fases presentes e identificar a granulação do material, assim como o teor aproximado de carbono no aço, a forma, a natureza e a distribuição dos constituintes. Dentre as diversas formas de análise, a mais comum é a microscopia ótica que fornece uma ampliação de 1400x. Existem microscópios óticos que atingem aumentos superiores a esse valor, porém não fornecem informações adicionais a aquelas obtidas com um aumento de 1400x (COLPAERT, 2008).

Existem técnicas de preparação para as amostras no microscópio ótico. A seção escolhida do material para os estudos precisa conter uma superfície plana e polida, após isso, atacar a superfície com o reagente químico adequado e examiná-lo no microscópio para a observação da microestrutura (COLPAERT, 2008).

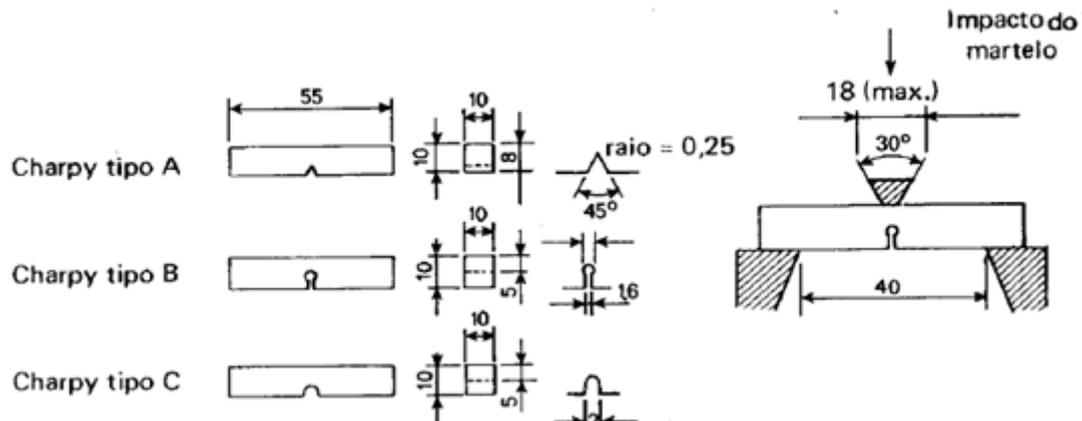
## 2.5 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

O ensaio de impacto possui a capacidade de avaliar o comportamento dúctil-frágil dos materiais sob condições específicas. O impacto desses ensaios é obtido por meio da queda de um pêndulo, de uma determinada altura, sobre a peça a examinar. Como resultado do ensaio, adquire-se a energia absorvida pelo material 'até a fratura. Através desse procedimento também é possível observar a transição da propriedade dúctil para frágil em função da temperatura, determinando a faixa de temperatura do qual um material muda de dúctil para frágil (GARCIA, 2000).

As dimensões do corpo de prova são padronizadas de acordo com as normas que descrevem a metodologia do ensaio de impacto charpy, tais como ASTM E23, ISO 148, e entre outras (LABTESTE, 2022).

Os corpos de prova para o ensaio de impacto podem ser divididos em tipo A, B e C, sendo o que muda é a forma de seu entalhe. Todos os corpos utilizados possuem uma seção quadrada de 10mm de lado por 55mm de comprimento. Conforme ilustra a figura 9, o entalhe é feito do meio do corpo de prova, no tipo A tem uma forma de V, no tipo B, a forma de uma fechadura e no tipo C, a forma de U.

Figura 9 – Corpos de prova charpy, recomendados pela ASTM e ABNT para ensaio de impacto

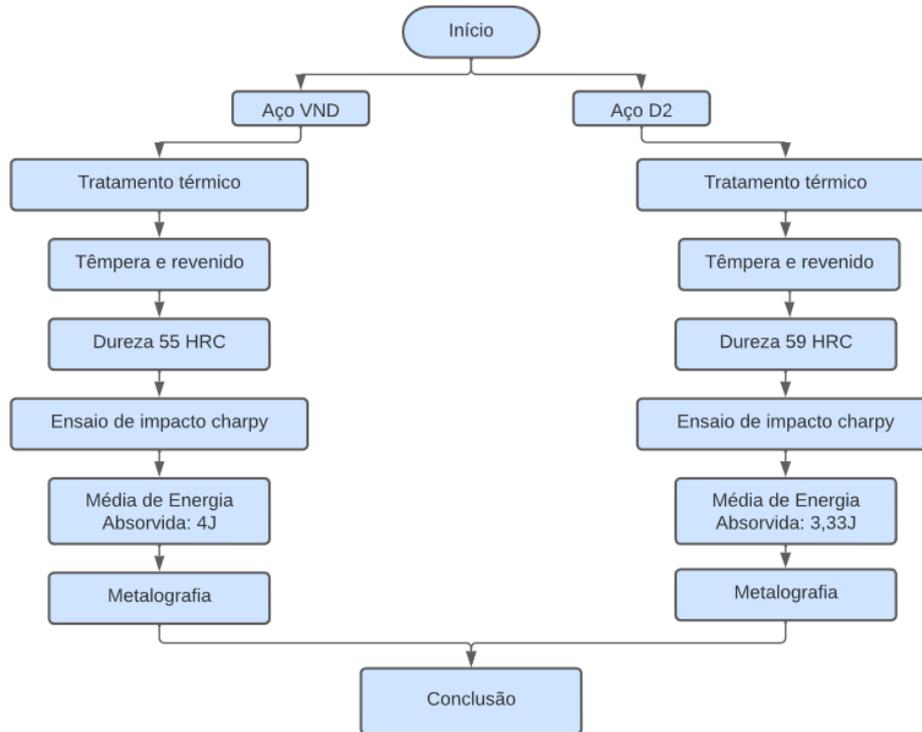


Fonte: (SOUZA, 1982.)

## 3. METODOLOGIA

A metodologia do estudo consiste em avaliar a resistência ao impacto de dois corpos de provas de materiais distintos com aplicações similares no ramo da ferramentaria, o processo segue o fluxograma da figura 10. Entretanto, para definir a utilização usual de cada material foram submetidos a tratamentos térmicos, assim melhorando suas propriedades, e por fim foram realizados ensaios de durezas e análises metalográficas para entender o possível resultado do ensaio de impacto, e estudos de custo de modo a encontrar o melhor custo benefício para cada aplicação.

**Figura 10 - Fluxograma dos processos desenvolvidas**

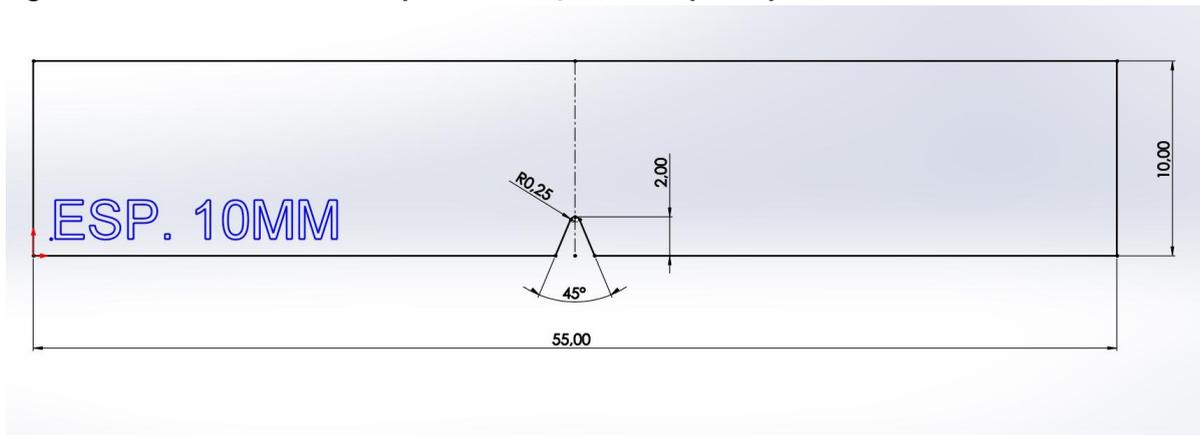


Fonte: (OS AUTORES, 2022.)

### 3.1 Preparação do corpo de prova

Para o desenvolvimento do estudo foram utilizados seis corpos de provas iguais, sendo eles: três peças de VND e D2. O padrão dimensional foi totalmente determinado para atender ao equipamento de impacto Charpy, conforme a figura 11.

**Figura 11 - Modelo 2D utilizado para fabricação do corpo de prova**



Fonte: (OS AUTORES, 2022).

A usinagem dos materiais brutos foi em uma fresadora CNC, utilizando um sobremetal de 3 décimos de segurança em todas as medidas de contorno caso ocorram variações geométricas na peça no processo de têmpera e revenimento. Após o retorno do tratamento térmico o material foi encaminhado para retífica plana de modo a garantir uma precisão de 1 centésimo em todas as dimensões do

contorno, conforme a figura 12. Por fim, os entalhes passantes de altura de 2 milímetros, raio de 0,25 milímetros e ângulo de 45° foram feitos em uma eletroerosão a fio, devido ao seu alto grau de precisão e elevada dureza do material temperado e revenido, atendendo todas as necessidades do método de Charpy.

**Figura 12 - Corpo de provas antes da usinagem do entalhe**



Fonte: (OS AUTORES, 2022.)

### **3.2 Tratamentos térmicos**

Para o tratamento térmico do aço VND, primeiramente os materiais foram pré-aquecidos a uma temperatura de aproximadamente, 645° C e posteriormente aquecido a aproximadamente 800° C. Em seguida, o aço deve ser mantido na mesma temperatura por cerca 30 minutos e, finalmente, temperado com óleo. O revenido foi realizado a uma temperatura de aproximadamente 350 °C.

Para o aço D2, foram realizados dois pré-aquecimentos e depois o aquecimento até uma temperatura de 1020° C, por cerca de 30 minutos, e depois temperados em óleo, e posteriormente o revenimento realizado em uma temperatura de aproximadamente 200°C.

Para a medição da dureza, foi utilizado um durômetro para testes de dureza rockwell, tendo como endentador um cone de diamante. Inicialmente foi aplicada uma pré-carga e posteriormente, uma segunda carga é aplicada, aumentando a penetração no material. A profundidade resultante e permanente da aplicação e remoção da carga foi utilizada para medir a dureza rockwell.

Figura 13 - Certificado de tratamento térmico do aço VND

Página: 1 Hora: 16:32:50 Data: 07/11/22



**CERTIFICADO DE TRATAMENTO TÉRMICO**  
(HEAT TREATMENT CERTIFICATE) **EMPRESA CERTIFICADA ISO 9001**  
(ISO 9001 CERTIFIED COMPANY)

**N°:** 975756

|   |                            |
|---|----------------------------|
| <b>Cliente:</b> 3089<br><small>(Customer)</small> | PARKFER FERRAMENTARIA LTDA |
|---|----------------------------|

**Nota do Cliente:** 10559 (Customer Note)      **Pedido do Cliente:** 9857 / 0 (Customer Order)  
**Material:** VND (Material)      **Peça:** ENSAIO DE PECAS VND - PP; (Part)

**Especificações:** OS 76 POS 414 (Specifications)  
**Quantidade:** 3.0000 (Quantity)      **Peso:** 1,0000 (Weight)  
**Tratamento:** **TEMPERA + REVENIDO** (Treatment)  
 QUENCHING + TEMPERING

| Propriedades Solicitadas<br><small>(Request properties)</small> | Propriedades Obtidas<br><small>(Obtained properties)</small> | Nr. Peças Testadas<br><small>(N° of measured parts)</small> | Observações<br><small>(Observation)</small> |
|---|--|---|---|
| Camada (mm):<br><small>(Layer Thickness)</small>                | Camada (mm):<br><small>(Layer Thickness)</small>             | 3   |   |
| Dureza: 54/56HRC<br><small>(Hardness)</small>                   | Dureza: 55,0HRc.<br><small>(Hardness)</small>                |   |   |

|   |   |
|---|---|
| <p><b>Durômetro:</b><br/><small>(Durometer)</small><br/> <b>Cód.:</b> D10 Microdurômetro Vickers Digimes<br/><small>(Code)</small><br/> <b>Empresa Certificadora:</b> DUROCONTROL INDUSTRIA E COME<br/><small>(Certified by)</small><br/> <b>N° Certificado Calibração:</b> CAL-3722.1022.06<br/><small>(N° of calibration certificate)</small><br/> <b>Data de Calib.:</b> 20/10/22      <b>Próxima Calib.:</b> 19/10/23<br/><small>(Date of calibration)</small>      <small>(Next calibration)</small><br/> <b>IT.:</b> 16,61<br/><small>(Measurement Uncertainty)</small></p> | <p><b>Controle:</b><br/><small>(Control)</small><br/> <b>Data:</b> 26/10/2022      <b>Hora:</b> 09:28<br/><small>(Date)</small>      <small>(Hour)</small><br/> <b>Controlador:</b><br/><small>(Controller)</small><br/> <br/> <b>JEAN CARLO JOSE</b></p> |
|---|---|

Fonte: (OS AUTORES, 2022.)

Figura 14 - Certificado de tratamento térmico do aço D2

Página: 1 Hora: 16:36:21 Data: 07/11/22



**CERTIFICADO DE TRATAMENTO TÉRMICO**  
(HEAT TREATMENT CERTIFICATE) **EMPRESA CERTIFICADA ISO 9001**  
(ISO 9001 CERTIFIED COMPANY)

**N°:** 975764

|   |                            |
|---|----------------------------|
| <b>Cliente:</b> 3089<br><small>(Customer)</small> | PARKFER FERRAMENTARIA LTDA |
|---|----------------------------|

**Nota do Cliente:** 10559 (Customer Note)      **Pedido do Cliente:** 9857 / 0 (Customer Order)  
**Material:** D2 (Material)      **Peça:** ENSAIO DE PECAS D2 - PP; (Part)

**Especificações:** OS 76/401 POS 415 (Specifications)  
**Quantidade:** 3,0000 (Quantity)      **Peso:** 1,0000 (Weight)  
**Tratamento:** **TEMPERA + REVENIDO** (Treatment)  
 QUENCHING + TEMPERING

| Propriedades Solicitadas<br><small>(Request properties)</small> | Propriedades Obtidas<br><small>(Obtained properties)</small> | Nr. Peças Testadas<br><small>(N° of measured parts)</small> | Observações<br><small>(Observation)</small> |
|---|--|---|---|
| Camada (mm):<br><small>(Layer Thickness)</small>                | Camada (mm):<br><small>(Layer Thickness)</small>             | 2   |   |
| Dureza: 58/60HRC<br><small>(Hardness)</small>                   | Dureza: 59HRC<br><small>(Hardness)</small>                   |   |   |

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Durômetro:</b><br/><small>(Durometer)</small><br/> <b>Cód.:</b> D07 DUROMETRO WOLPERT HT1a<br/><small>(Code)</small><br/> <b>Empresa Certificadora:</b> DUROCONTROL INDUSTRIA E COME<br/><small>(Certified by)</small><br/> <b>N° Certificado Calibração:</b> CAL-3722.1022.07<br/><small>(N° of calibration certificate)</small><br/> <b>Data de Calib.:</b> 20/10/22      <b>Próxima Calib.:</b> 19/10/23<br/><small>(Date of calibration)</small>      <small>(Next calibration)</small><br/> <b>IT.:</b> 1,16<br/><small>(Measurement Uncertainty)</small></p> | <p><b>Controle:</b><br/><small>(Control)</small><br/> <b>Data:</b> 26/10/2022      <b>Hora:</b> 19:47<br/><small>(Date)</small>      <small>(Hour)</small><br/> <b>Controlador:</b><br/><small>(Controller)</small><br/> <br/> <b>EDNALDO JESUS NETO</b></p> |
|--|--|

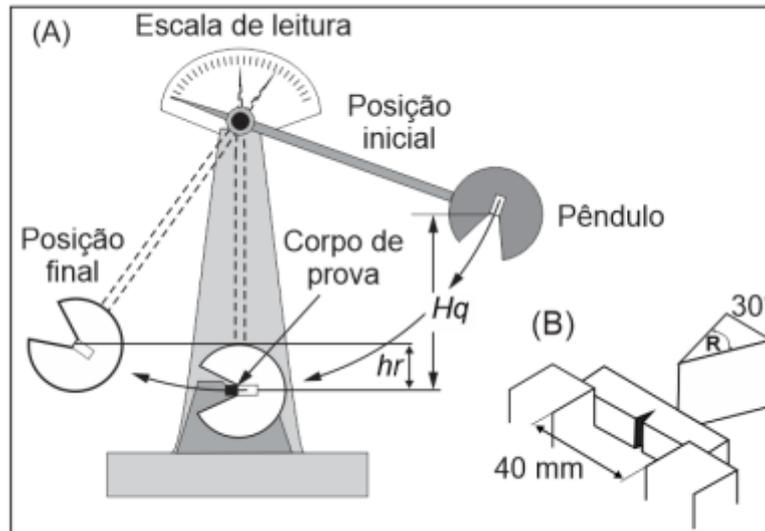
Fonte: (OS AUTORES, 2022.)

### 3.3 Ensaio de impacto Charpy

No ensaio de impacto Charpy os corpos de prova na temperatura ambiente de 21° C com dimensões de 55x10x10 milímetros foram apoiados horizontalmente

no centro da bigorna que serve de apoio, conforme pode ser observado no detalhe (B) da figura 15. A carga de impacto é aplicada diretamente através de um martelo de movimento pendular que é liberado sem adição de força a partir de uma posição inicial ( $H_q$ ) conhecida previamente conforme a norma ASTM A370. Após o martelo ser liberado, sua ponta colide com o corpo de prova tendo o entalhe no sentido contrário, proporcionando a concentração de tensões. O pêndulo continua o movimento após o choque até uma altura ( $h_r$ ) menor que a altura inicial de liberação do martelo pendular ( $H_q$ ). A diferença das alturas  $H_q$  e  $h_r$  determina a quantidade de energia absorvida pelo material em análise.

.Figura 15 - (A) Representação do equipamento de ensaio de impacto e do (B) corpo de prova.



Fonte: (GARCIA. *et al.* 2012.)

### 3.4 Metalografia

Para a realização do estudo da microestrutura, foram reaproveitados os materiais utilizados no ensaio de impacto Charpy, foi necessário a preparação da amostra metalográfica através de um polimento das peças e a inserção do material em baquelite.

A superfície da amostra foi submetida a um ataque metalográfico químico através do reagente nital 3,5% que é composto de ácido nítrico e álcool etílico absoluto, cujo objetivo é identificação dos contornos do grão e as diferentes fases na microestrutura.

Foram realizadas análises metalográficas das amostras em ampliação de 100x, 500x, e 1000x para ambos os materiais (VND e D2), utilizando microscópio Zeiss. A preparação metalográfica e as análises foram realizadas no laboratório de engenharia de materiais Metalab, localizado em Joinville.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme o capítulo anterior, após realizar todos os estudos com auxílio das empresas fornecedoras, sendo elas: TecnoTêmpera e Metalab. Neste capítulo apresentaremos todos os resultados obtidos e informações relevantes de cada um dos estudos em relação aos tratamentos térmicos, ensaios de durezas, metalografia, ensaios de charpy e custos.

#### 4.1 Durezas obtidas após o tratamento térmico

Após o processo de tratamento térmico de têmpera e revenimento dos aços VND e D2, foram realizados os ensaios de dureza com o microdurômetro Vickers Digimes e o durômetro Wolpert, respectivamente, em cada peça. As durezas solicitadas para os aços de VND eram entre 54 a 56 HRC, e foi obtido com os tratamentos térmicos 55 Rockwell, conforme o certificado da figura 13. Ademais, para o aço D2 foram solicitadas durezas entre 58 a 60 HRC, e após os processos foi obtido 59 Rockwell, conforme o certificado da figura 14, ambos os certificados foram enviados pela empresa fornecedora dos serviços, sendo a mesma a Tecnotêmpera.

#### 4.2 Metalografia e microestrutura dos materiais

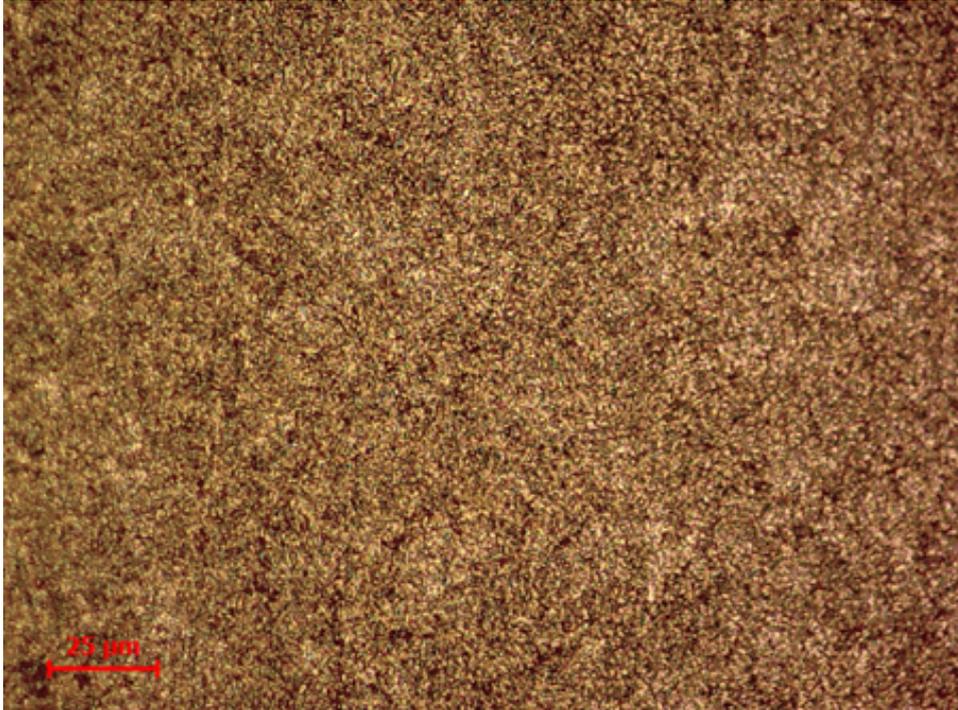
Das análises metalográficas realizadas na amostra VND, foi constatada: microestrutura constituída de martensita revenida e carbonetos secundários bem refinados. A microestrutura da martensita revenida consiste em partículas de cementita extremamente pequenas e uniformemente distribuídas. Ademais, com relação a distribuição de carbonetos secundários refinados quando estão finos e bem mais distribuídos, influenciam diretamente na tenacidade ao impacto, ensaio que foi realizado posteriormente no método de Charpy. Para poder destacar os carbonetos secundários refinados de forma mais detalhada, seria necessário uma ampliação maior, como uma microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Figura 16 - aumento de 100x. Aço VND. Ataque nital 3,5%



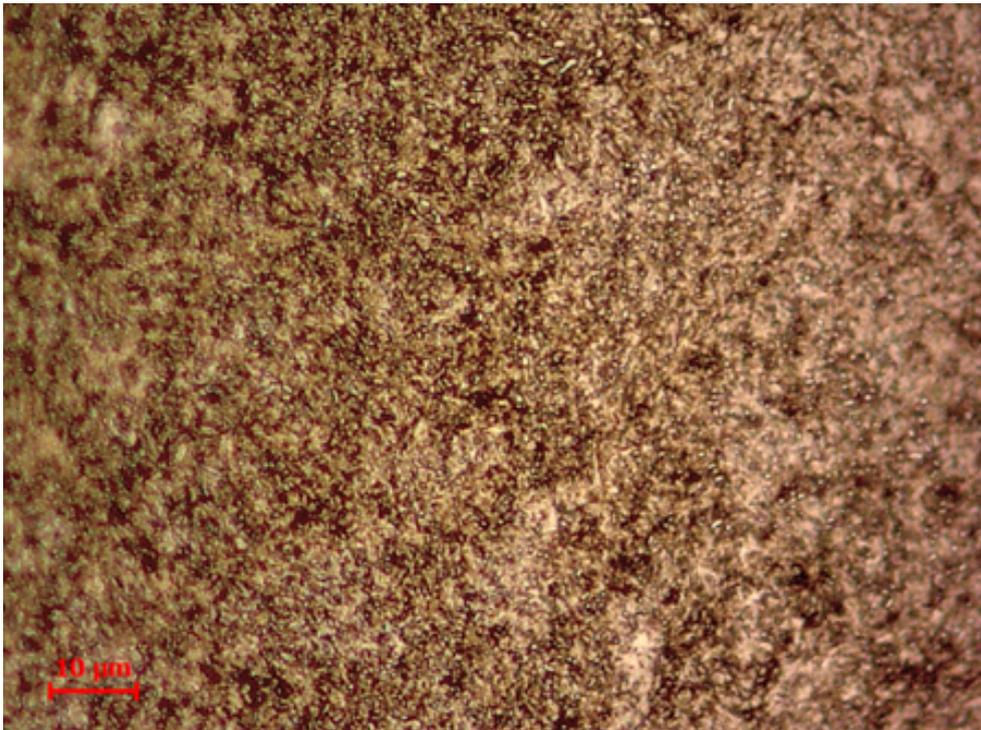
Fonte: (OS AUTORES, 2022.)

**Figura 17 - aumento de 500x. Aço VND. Ataque nital 3,5%**



Fonte: (OS AUTORES, 2022.)

**Figura 18 - aumento de 1000x. Aço VND. Ataque nital 3,5%**



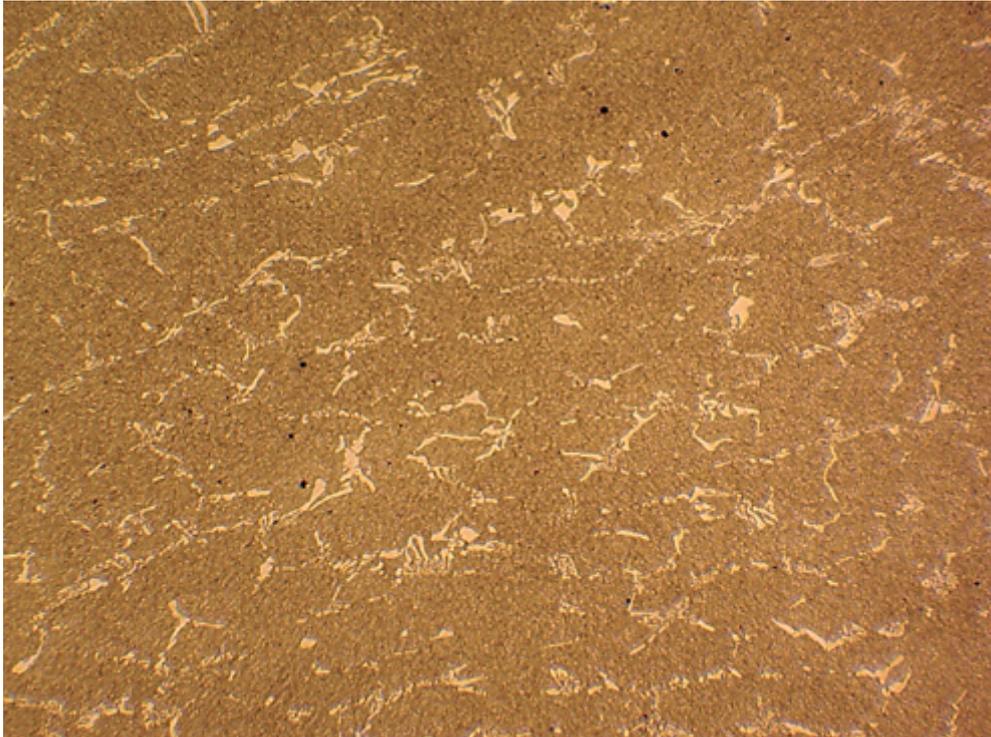
Fonte: (OS AUTORES, 2022.)

Das análises metalográficas realizadas na amostra D2, foi constatada: microestrutura constituída de martensita revenida, carbonetos primários e secundários. Logo, com a presença de carbonetos primários confere ao material alta resistência ao desgaste abrasivo, de modo que dificultam a remoção de material pela partícula abrasiva, entretanto, essa concentração de carboneto primário gera

tensões no material, assim reduzindo sua tenacidade. Conforme a Figura 19, com aumento em 1000x é possível visualizar bem a presença de carbonetos primários.

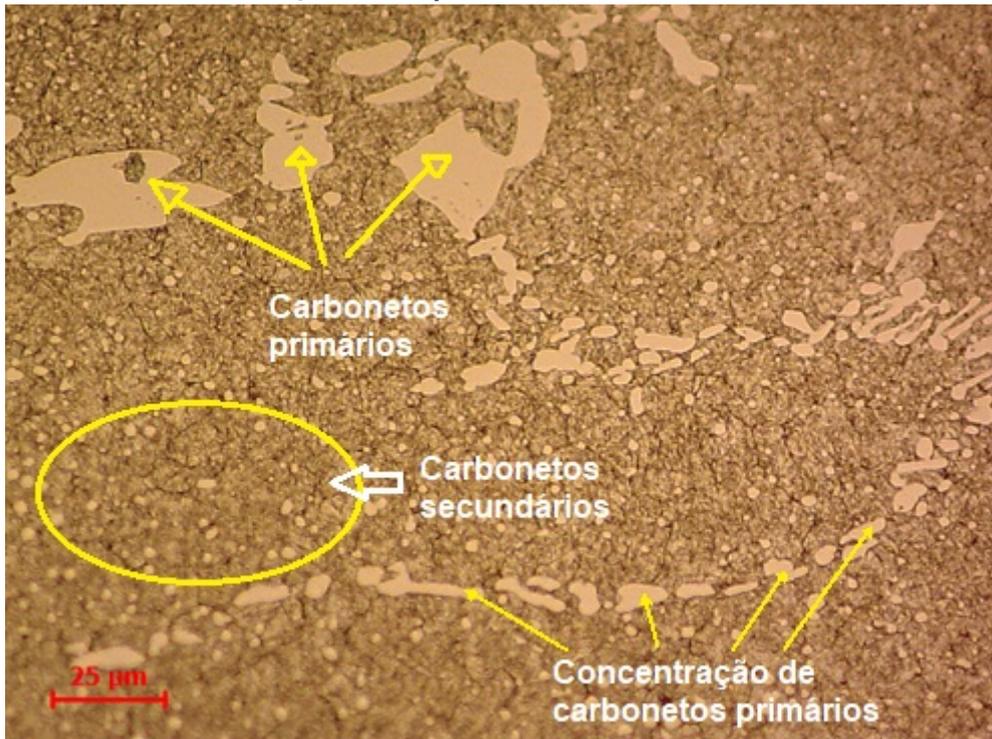
Ademais, conforme os aumentos realizados no material de D2 é possível ver pequenos carbonetos secundários em um formato arredondado, e carbonetos primários no formato de laminação, espinha de peixe e ligeiramente alongados (figura 20). Portanto, essa má distribuição dos carbonetos, regiões com carbonetos em quantidades maiores de precipitados e em sentidos de lâminas, reduz a tenacidade do material quando são exigidas solicitações mecânicas.

**Figura 19 - aumento de 100x. Aço D2. Ataque nital 3,5%**



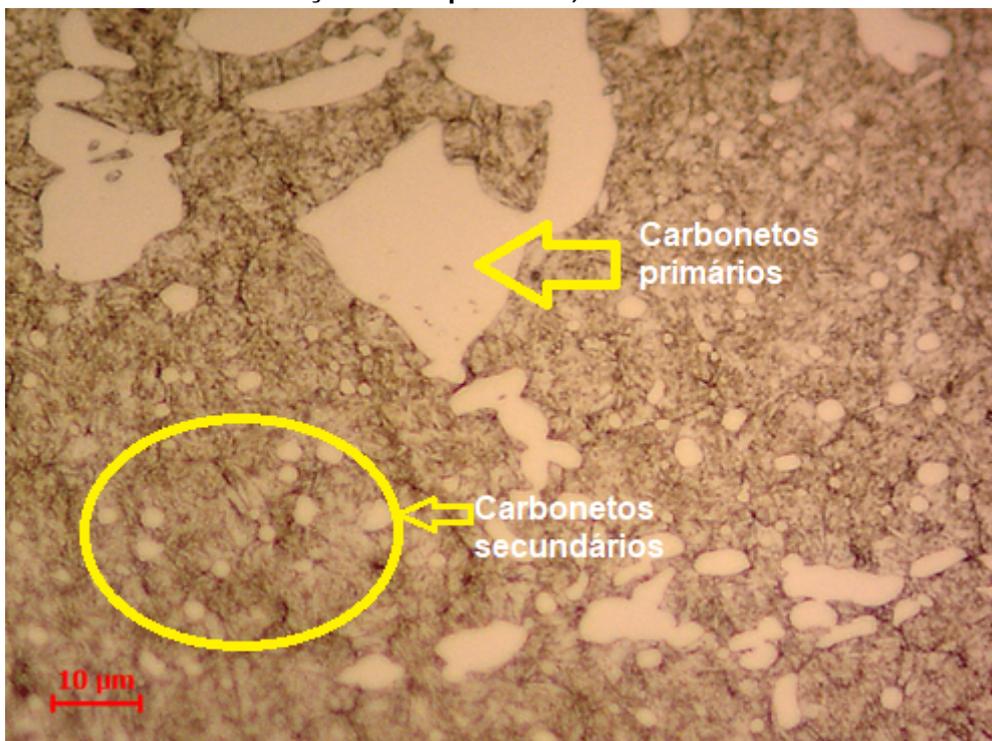
Fonte: (OS AUTORES, 2022.)

Figura 20 - aumento de 500x. Aço D2. Ataque nital 3,5%



Fonte: (OS AUTORES, 2022.)

Figura 21 - aumento de 1000x. Aço D2. Ataque nital 3,5%



Fonte: (OS AUTORES, 2022.)

### 4.3 Custos de materiais e processos

O material para o estudo foi comprado com a empresa Favorit Aços Especiais, sendo o valor do quilo dos aços VND e D2, R\$29,00 e R\$42,06,

respectivamente. Entretanto, temos o custo de processo do tratamento térmico para beneficiar a eficácia dos materiais, o valor de custo também é por quilo (kg), sendo R\$13,05 para a têmpera e revenimento dos aços de VND, e R\$17,07 para o mesmo processo nos aços de D2. Logo, conforme a tabela 4, o custo total para compra da matéria e tratamento térmico de cada peça de VND, considerando uma das três peças que foram utilizadas, o valor final foi de R\$6,94 por peça e o custo do D2 foi de R\$9,98. Portanto, o custo de compra e tratamento da matéria-prima de VND foi R\$3,04 mais barato em relação ao D2, pelo fato de utilizar três peças a economia é de R\$9,12. Ademais, apesar de serem definidas durezas diferentes, após o ensaio de Charpy será analisado o melhor custo benefício para cada aplicação.

**Tabela 4 - Tabela de informações de custos dos materiais e processos por peça**

| Material | Dimensões brutas (mm) | Massa bruta (kg) | Custo do Material (R\$) | Dimensões acabada (mm) | Massa acabada (kg) | Custo da Têmpera e Revenimento (R\$) | Custo total (R\$) |
|----------|-----------------------|------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------------|
| VND      | 20x20x70              | 0,22             | 6,38                    | 10x10x55               | 0,043              | 0,56                                 | 6,94              |
| D2       | 20x20x70              | 0,22             | 9,25                    | 10x10x55               | 0,043              | 0,73                                 | 9,98              |

Fonte: (OS AUTORES, 2022.)

#### 4.4 Média de energia absorvida

Ao realizar o ensaio de Charpy, pode-se visualizar através da escala de leitura da máquina que os materiais obtiveram os seguintes resultados:

**Tabela 5 - Resultados obtidos do ensaio de impacto charpy**

| Corpo de prova | Identificação | Energia (J) | Média (J) | Desvio Padrão( $\sigma$ ) |
|----------------|---------------|-------------|-----------|---------------------------|
| 01             | VND1          | 4           | 4,00      | 0,00                      |
| 02             | VND2          | 4           |           |                           |
| 03             | VND3          | 4           |           |                           |
| 04             | D2.1          | 4           | 3,33      | 0,58                      |
| 05             | D2.2          | 3           |           |                           |
| 06             | D2.3          | 3           |           |                           |

Fonte: (OS AUTORES, 2022.)

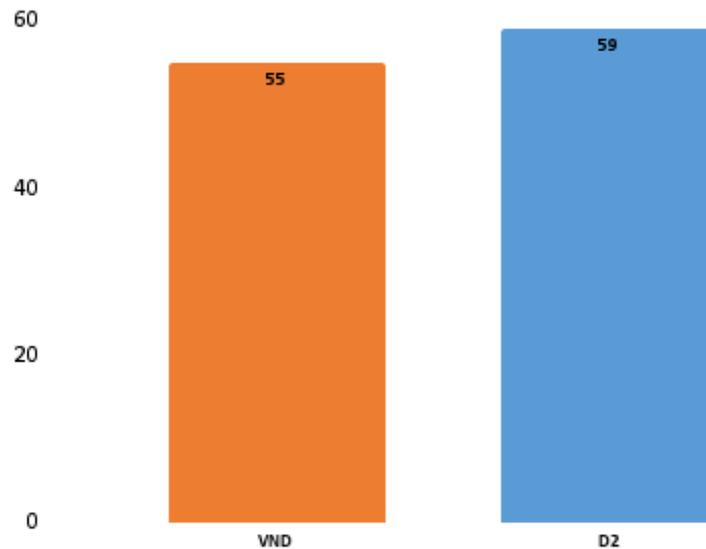
Logo, com relação a tabela 5, pode-se observar que o VND obteve uma resistência média à fratura maior que o D2, desse modo é possível destacar que a elevada dureza do corpo de prova de D2 obtida no tratamento térmico, ocasionou em uma maior fragilidade e redução de sua tenacidade e, com isso, uma menor capacidade de absorção de energia. Além disso, a formação de carbonetos primários influenciou na menor tenacidade do D2.

#### 4.5 Comparação dos resultados

Conforme as figuras 22, 23 e 24 abaixo, é possível fazer uma comparação dos resultados obtidos, sendo que as durezas dos materiais estiveram na margem solicitada para simular uma condição real de uso de cada aço, de modo que o VND

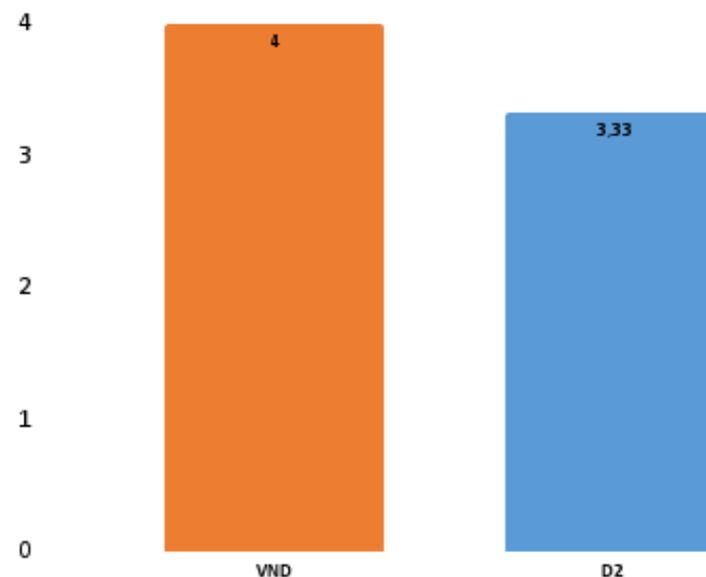
e D2 adquiriram, 55 e 59 HRC, respectivamente, conforme figura 22. Com relação à média de energia absorvida verificada na figura 23, os corpos de prova de VND obtiveram resultados superiores aos materiais de D2, sendo absorvidos 4,00 à 3,33 Joule, respectivamente. Por fim, todos os processos de compra de material e tratamentos térmicos a ser realizados no aço VND também tem um valor abaixo considerável, é possível visualizar na figura 24 que mostra as relações de custos, determinando o valor final do corpo de prova de VND por R\$6,94, e R\$9,98 no de D2, isto por unidade de peça.

**Figura 22 - durezas obtidas após tratamento térmico**



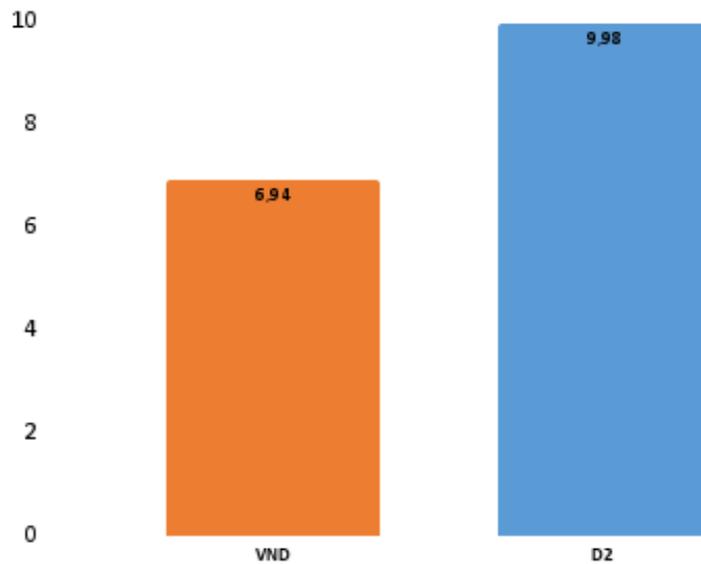
Fonte: (OS AUTORES, 2022.)

**Figura 23 - média de energias absorvidas**



Fonte: (OS AUTORES, 2022.)

**Figura 24 - custo total por peça (R\$)**



Fonte: (OS AUTORES, 2022.)

## **5. CONCLUSÃO**

Diante dos ensaios de Charpy realizados, os corpos de provas fabricados em aço VND apresentaram maior resistência média à fratura, sendo de 4,00 Joule. Contudo, destacando a metalografia do material onde apresentam à martensita revenida e carbonetos secundários bem refinados e uniformemente distribuídos, fatores extremamente importantes influenciados diretamente na tenacidade do material e conseqüentemente nos resultados do ensaio de Charpy.

Referente aos corpos de prova de D2 com resistência média à fratura de 3,33 Joule, a metalografia acusou alguns pequenos inconvenientes, como são constituídas de martensita revenida, carbonetos primários e secundários, os mesmos carbonetos para melhores condições de resistência mecânica, dureza e tenacidade devem estar arredondados e bem distribuído, em todas as faces. Entretanto, diferentemente do citado, foi constatado muitos carbonetos primários fragmentados em determinadas regiões, em formatos de laminação, espinhas de peixe, sendo esses fatores prejudiciais para a tenacidade do material e aumentando a chance de fratura.

Com relação à dureza pode-se destacar que não pode ser tomado como fator primordial para determinar a qualidade do material, logo que os corpos de prova de D2 com dureza 59 HRC absorveram menos energia que os de VND com 55 HRC, considerando as condições realizadas em estudo, de modo que é necessário se aprofundar em outros quesitos como tenacidade e resistência mecânica.

Ademais, como sugestão a fim de melhorar as propriedades dos materiais de D2, visto que tensões internas e trincas, causadas em processos de fabricação como usinagem ou soldagem, influenciam diretamente em sua resistência mecânica, fragilidade e tenacidade, é possível adicionar um processo anterior à têmpera e revenimento, determinado como alívio de tensões subcrítico, este nome porque é realizado em temperaturas abaixo da sua zona de transformação, para

não haver mudança de fase, e desse modo ajuda a reduzir os problemas citados como trincas e tensões internas.

Bem como, o custo benefício de compra e aplicação dos processos de têmpera e revenimento, no aço VND também é mais viável comparado com o material oposto de D2, isto quando o mesmo não obter todos os parâmetros adequados de tratamento térmico, sendo uma economia de R\$9,12 considerando os três corpos de provas.

Portanto, a partir desses resultados podem ser estudados as qualidades das matérias-primas antes da fabricação dos componentes e os métodos de tratamentos térmicos, como alívio de tensões para garantir a distribuição adequada dos carbonetos e controlar suas morfologias, fatores que influenciaram diretamente nas suas propriedades físicas e químicas, evitando perdas e falhas de componentes durante sua aplicabilidade.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, por nos proporcionar sabedoria, conhecimento e saúde ao longo da nossa caminhada na faculdade.

Aos familiares, amigos e namoradas que apoiaram e incentivaram a todo momento e compreenderam a ausência durante a realização deste trabalho.

Aos professores que durante todo o curso nos ensinaram a obter um melhor desempenho no processo acadêmico e profissional.

As empresas Parkfer, Tecnotempera, Metalab e Usiletro e seus colaboradores que nos auxiliaram com sua mão de obra e equipamentos necessários para a execução de todas as etapas deste trabalho.

A Professora Daniele, que nos orientou e guiou, enriquecendo o processo de aprendizado.

A instituição de ensino Unisociesc que foi essencial a todo o processo de formação e que nos proporcionou aprimorar nossos conhecimentos e qualificar nosso desenvolvimento pessoal e profissional.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Análise de metalografia.** Labteste. Disponível em:

<<https://www.labteste.com.br/analise-metalografia>>. Acesso em: 30 setembro. 2022.

**ANAZAWA, R. et al. Estudo comparativo das propriedades mecânicas em aços 4340 e 300 M submetidos a tratamentos térmicos isotérmicos e intercríticos.**

Revista brasileira de aplicações a vácuo. Vol. 31. n.1-2. p. 33. 2012.

**BARROS, R. et al. Caracterização de um aço AISI/SAE 4340 com diferentes microestruturas através da técnica de tríplice ataque.** Revista brasileira de aplicações a vácuo. Vol. 34. n. 2. p. 71-74. 2015.

**CALLISTER, W. D. et al. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** Rio de Janeiro. 8. ed. 2013.

**CELESTINO, A. et al. Análise comparativa entre tratamento térmico (têmpera) e o tratamento termoquímico (cementação).** 2007.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo. 7. ed. 2005.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: materiais de construção mecânica**. São Paulo. 2. ed. Vol. 3. 1995.

COLPAERT, H. **Metagrafia dos produtos siderúrgicos comuns**, 4ª ed. Edgarg Blücher Ltda. São Paulo. 2008.

**Fluidos de resfriamento para têmpera em metais**. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/vendramim/meios-de-resfriamento-lauraliceusp>>. Acesso em: 04 setembro. 2022.

FONTES, M. *et al.* **Caracterização das camadas formadas pela nitretação a plasma em amostras de ferro sinterizado com e sem tratamento de ferroxidação**. Revista brasileira de aplicações a vácuo. Vol. 34. n. 2. p. 55. 2015.

GARCIA, A. *et al.* **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro. 2. ed. 2014.

GARCIA, A. *et al.* **Ensaio de Materiais**. LTC. Rio de Janeiro. 2.ed. 2012.

GARCIA, A. SPIM, J. SANTOS, C. **Ensaio dos materiais**. LTC. Rio de Janeiro. 2000.

GGD, METALS. **Revista guia prático de aços e metais**. São Paulo. 2022.

GOBBI, V. J. **Influência da nitretação a plasma na resistência ao desgaste microabrasivo do aço ferramenta AISI D2**. Dissertação de mestrado em Ciências Mecânicas. Brasília/DF. 2009.

MEDANHA, A. *et al.* **Tratamentos térmicos do aço ferramenta AISI D2 para conformação e corte**. Disponível em: <[http://www.heattech.com.br/publicacoes/2005\\_Conf\\_Corte\\_Trabalho\\_Final\\_AISI\\_D2.pdf](http://www.heattech.com.br/publicacoes/2005_Conf_Corte_Trabalho_Final_AISI_D2.pdf)> Acesso em: 01 out. 2022.

MCCOLM, Ian J. **Ceramic hardness**. New York. 1990.

PINEDO, C. **Tratamentos térmicos e superficiais do aço**. São Paulo: Blucher, 2021.

ROCHA, O. *et al.* **Têmpera por indução eletromagnética aplicada em virabrequim de motocicleta**. Vol. 3. 2015.

RODRIGUES, J. *et al.* **Tecnologia mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica**. Portugal. 2. ed. 2010.

SILVA, A. L. V. C. *et al.* **Aços e ligas especiais**. 2ª ed. São Paulo. 2006.

SHACKELFORD, J. **Ciência dos materiais**. São Paulo. 6. ed. 2008.

SOARES, P. **Aços: características e tratamentos**. Porto. 3. ed. Livroluz, 1980.

SOUZA, S. **Ensaio mecânico de materiais metálicos**. Fundamentos teóricos e práticos. 5ª ed. Edgard Blücher Ltda. São Paulo. 1982.

VOORT, G. F. V. **Metallography and microstructures**. Vol. 9. 2004.