

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**BERNARDO FIORENZA SIQUEIRA**

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM APARATO JOMINY PARA  
ENSAIOS DE TEMPERABILIDADE**

**Alegrete 2018**

**BERNARDO FIORENZA SIQUEIRA**

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM APARATO JOMINY PARA  
ENSAIOS DE TEMPERABILIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ana Claudia Costa de Oliveira

Coorientador: Eng.<sup>º</sup> Dieison Fantineli

**Alegrete 2018**

**BERNARDO FIORENZA SIQUEIRA**

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM APARATO JOMINY PARA  
ENSAIOS DE TEMPERABILIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

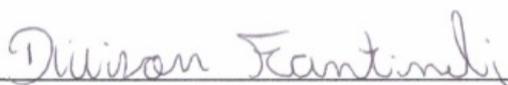
Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 06 de dezembro de 2018.

**BANCA EXAMINADORA:**



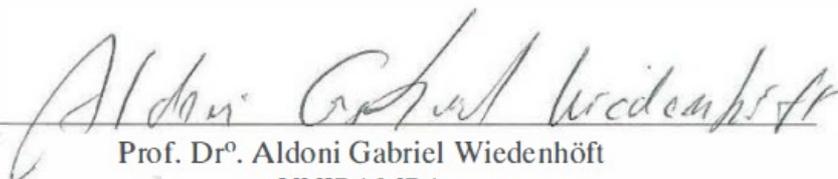
---

Prof.ª. Dr.ª. Ana Claudia Costa Oliveira  
Orientadora  
UNIPAMPA



---

Eng.º Dieison Fantineli  
Coorientador:  
UNIPAMPA



---

Prof. Dr.º. Aldoni Gabriel Wiedenhöft  
UNIPAMPA

*“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.”*

Henry Ford

Dedico este trabalho aos meus pais e à minha filha, razões de uma motivação pessoal e infinita. Motivação essa que me faz sair de casa todos os dias a fim de ser alguém melhor, alguém que lhes desperte orgulho.

## **AGRADECIMENTOS**

A UNIPAMPA que através do seu corpo docente e dos seus laboratórios disponibilizou conhecimentos necessário para o desenvolvimento do tema.

A Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup> Ana Claudia Costa, pela orientação, ensinamentos, auxílio e confiança depositada em mim para desenvolvimento do tema.

Ao Eng.<sup>o</sup> Dieison Fantineli pela orientação e apoio laboratorial durante todo o desenvolvimento do tema.

Ao técnico Ivan Mangini pela disposição, sugestões e apoio na realização das atividades práticas desenvolvidas.

A todos meus amigos que de forma direta ou indiretamente me apoiaram durante o período de graduação.

A toda minha família, em especial aos meus pais Fábio e Gislaine que sempre estiveram comigo, me apoiando nessa etapa do início até o fim. Sem eles nada disso seria possível.

E a todos que de uma maneira ou outra ajudaram na realização desse trabalho.

A todos, meu MUITO OBRIGADO!

## RESUMO

Este projeto tem por finalidade a construção de um dispositivo Jominy para ensaios de temperabilidade, segundo as normas ABNT NBR 6339 e ASTM A 255, com finalidade de fornecer aos laboratórios da UNIPAMPA (Universidade Federal do Pampa) campus Alegrete, um meio de medir a temperabilidade ou endurecibilidade em aços, ou seja, a capacidade de medir o endurecimento em função da profundidade em materiais de alta e baixa liga. O processo proposto utiliza um tarugo de metal com comprimento de aproximadamente 101 mm e com diâmetro 25,4 mm, que será aquecido até a zona de austenitização, em seguida o material tem uma de suas extremidades submetida a resfriamento brusco por meio de um jato d'água constante, enquanto as demais extremidades permanecem expostas a atmosfera em temperatura ambiente, tal método permite que se tenha uma progressão de dureza a partir da extremidade que teve resfriamento forçado. Para análise desse resfriamento o material é submetido a testes de dureza Rockwell, obtendo assim a dureza do seu corpo ao longo do eixo axial, seguindo padrões de medida impostos pelas normas citadas acima, tais resultados são utilizados para gerar uma curva de temperabilidade Jominy. O dispositivo é composto por válvulas para controle da vazão d'água, suporte ajustável para corpos de prova, bocal dimensionado de acordo com a norma, recipiente para armazenagem e bombeamento d'água, sistema de coleta e retorno da água utilizada, tudo fixado a uma estrutura metálica com regulagem de nível. Todo o sistema foi montado nos laboratórios da UNIPAMPA/campus alegrete, e utilizou materiais e equipamentos dispostos no local. O funcionamento do aparato já foi testado e validado, sendo que o mesmo, já se encontra operante na aula de Tratamentos térmicos e Superficiais nos laboratórios da UNIPAMPA.

**Palavras chave:** Jominy, Temperabilidade, Endurecimento.

## **ABSTRACT**

This project is based in constructing a device for temperature testing, according to ABNT NBR 6339 and ASTM A 255 standards, to provide UNIPAMPA (Federal University of the Pampa) Alegrete campus' laboratories, a mean of measuring temperability or hardenability in steels, ie the ability to measure hardening as a function of depth in high and low alloy materials. It consists of a metal plunger with approximately 101 mm in length and 25.4 mm in diameter which will be heated to the austenitizing zone. Then one of it's ends is subjected to a sudden cooling by a constant water jet, while the ends are exposed to ambient temperature. This method allows for a hardening progression from the end which has been cooled. For the cooling to be analyzed, Rockwell hardness testing are performed, by this means we obtain axial hardness alongside it's body. By following aforementioned standards we plot Jominy's temperability curve. The device consists of valves controlling water flow, a bracket for test specimens, a standard following nozzle, water storage and pumping system, everything fastened to a metal structure with height adjustment. The working of the apparatus has already been tested and validated, and the same, is already working in the class of Thermal and Surface Treatments in UNIPAMPA laboratories.

**Keywords:** Jominy, Temperament, Hardening.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de tratamentos térmicos comumente utilizados em aços. ...	4
Figura 2: Produtos resultantes das velocidades de resfriamento da Austenita .....	5
Figura 3: Coeficiente de transferência de calor ( $W/m^2K$ ).....	6
Figura 4: Diagrama de equilíbrio Fe-Fe <sub>3</sub> C. ....	7
Figura 5: Detalhe do diagrama Fe-Fe <sub>3</sub> C, com suas diferentes microestruturas. ....	7
Figura 6: Exemplo diagrama de resfriamento contínuo.....	8
Figura 7: Diagramas de transformação TTT, para aços com elementos de liga.....	9
Figura 8: Dureza em função da concentração de carbono .....	10
Figura 9: Dureza estimada para % de martensita versus % C.....	11
Figura 10: Invenção de Walter E. Jominy em 1939.....	12
Figura 11: Dimensões padronizadas para a confecção do corpo de provas a ser ensaiado. ....	12
Figura 12: (a) Dispositivo de têmpera do ensaio Jominy; (b) Medidas de dureza na amostra após a têmpera. ....	13
Figura 13: Distribuição de dureza barra Jominy .....	15
Figura 14: Exemplo da distribuição da dureza em um ensaio Jominy.....	15
Figura 15: Curvas de temperabilidade .....	16
Figura 16: Posição na curva Jominy versus diâmetro em diferentes meios de resfriamento.....	19
Figura 17: Influência dos erros nos ensaios de temperabilidade.....	20
Figura 18: Organograma dos procedimentos executados. ....	21
Figura 19: Projeto aparato Jominy .....	22
Figura 20: Suporte e recipiente para coleta d'água. ....	23
Figura 21: Suporte para os corpos de prova.....	24
Figura 22: Sistema hidráulico e válvulas de regulação. ....	25
Figura 23: Sifão para retorno d'água. ....	25
Figura 24: Gabaritos para regulação do aparato .....	26
Figura 25: Sistema montado para execução dos testes. ....	27
Figura 26: Corpos de provas retificados para o ensaio de dureza.....	29
Figura 27: Distâncias a partir da extremidade resfriada para medição de dureza. 30	
Figura 28: Execução do ensaio de temperabilidade para o corpo de provas "A". 33	
Figura 29: Execução do ensaio de temperabilidade para o corpo de provas "B". 33	
Figura 30: Execução do ensaio de temperabilidade para o corpo de provas "C". 34	
Figura 31: Curva de temperabilidade encontrada para corpo de provas "A" .....	35
Figura 32: Curva de temperabilidade encontrada para corpo de provas "B".....	35
Figura 33: Curva de temperabilidade encontrada para corpo de provas "C" .....	36

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Tolerâncias de concentração de elementos de liga. ....	13
Tabela 2: Composição química dos aços apresentados na Figura 14. ....	17
Tabela 3: Especificações de bocal segundo a norma NBR 6339, 1989. ....	23
Tabela 4: Passo a passo detalhado para ensaio Jominy. ....	28
Tabela 5: Composição química dos aços em estudo.....	31
Tabela 6: Temperaturas de austenitização e tempera para os aços especificados. ....	32

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CTT	Continuous Temperature Transformation
CNC	Comando Numérico Computadorizado
HRC	Rockwell C - escala de dureza
NBR	Norma Brasileira
SAE	Society of Automotive Engineers
TTT	Tempo Temperatura Transformação
UNIPAMPA	Universidade Federal do Pampa
°C	Graus célsius
Fe	Ferro
“	Polegada
%	Porcentagem
Ø	Diâmetro
mm	Milímetros
C	Carbono
Si	Silício
Mn	Manganês
Cr	Cromo
Ni	Níquel
Mo	Molibdênio
Ti	Titânio
V	Vanádio
Nb	Nióbio
W	Potássio
P	Fósforo
S	Enxofre
Sn	Estanho
B	Boro
Pb	Chumbo
Al	Alumínio
Cu	Cobre

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1.	Motivação .....	2
2.	OBJETIVOS .....	2
2.1.	Objetivos secundários .....	3
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1.	Tratamentos térmicos dos aços .....	3
3.2.	Têmpera .....	4
3.2.1.	Severidade da têmpera.....	5
3.3.	Diagramas de Transformação .....	6
3.4.	Temperabilidade .....	9
3.5.	Ensaio de temperabilidade Jominy .....	11
3.5.1.	Curvas de temperabilidade .....	14
3.5.2.	Prós e contras do método Jominy .....	17
3.5.3.	Aplicação prática do ensaio Jominy .....	18
3.6.	Possíveis erros a serem considerados para ensaio de temperabilidade .....	19
4.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	20
4.1.	Estratégia dos experimentos .....	20
4.2.	Aparato Jominy .....	21
4.2.1.	Projeto do dispositivo .....	21
4.2.2.	Execução do projeto .....	23
4.2.3.	Corpo de provas.....	26
4.2.4.	Execução do ensaio para ajustes no dispositivo .....	27
4.2.5.	Ensaio de dureza .....	29
5.	RESULTADOS .....	30
5.1.	Análise química .....	30
5.2.	Execução do ensaio de temperabilidade Jominy .....	32
5.3.	Curvas de temperabilidade obtidas nos ensaios.....	34
5.3.1.	Corpo de provas “A”:	35
5.3.2.	Corpo de provas “B”:	35
5.3.3.	Corpo de provas “C”:	36
6.	DISCUSSÕES .....	36
6.1.	Corpo de provas “A”:	36
6.2.	Corpo de provas “B”:	37
6.3.	Corpo de provas “C”:	37
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	38
8.	BIBLIOGRAFIA.....	i
9.	ANEXOS.....	iii

## 1. INTRODUÇÃO

Peças de alto desempenho quase em sua totalidade, são utilizadas após processos de tratamentos térmicos, representando assim, fundamental importância em diversas áreas da construção mecânica, sendo que, seu desempenho em serviço depende diretamente da microestrutura do material. A alta versatilidade quanto a resistência mecânica, ductilidade, resiliência, tenacidade entre outras, faz com que as ligas metálicas, em especiais os aços, sejam aplicadas em larga escala na indústria.

A constante evolução do mercado e a maior demanda, faz com que as exigências por maiores índices de produtividade aumentem, dessa forma torna-se essencial conhecer e manejar com eficiência as propriedades das matérias-primas para maior qualidade de resultados e redução nos custos do processo. Os aços associados aos tratamentos térmicos de têmpera e revenido, proporcionam um melhor desempenho do material de forma relativamente barata e eficaz.

Os tratamentos consistem basicamente no processo de aquecimento e resfriamento de forma controlada de um material metálico, modificando assim sua microestrutura e propriedades mecânicas (CANALE, 2004). Podemos definir de forma simplificada a temperabilidade dos aços como sendo a capacidade ou habilidade do aumento de resistência mecânica. A alta temperabilidade de uma liga pode ser vista pela sua capacidade de formar martensita em toda a extensão da peça, incluindo seu interior e comprimento (CIMM, 2016).

Dentre a metodologia mais comumente utilizada para estimar a endurecibilidade dos aços, pode-se destacar os ensaios de Jominy e Grossmann. Conhecido também por resfriamento de extremidades o método Jominy é o mais utilizado na indústria, e foi padronizado internacionalmente por normas ASTM, SAE, AISI e no Brasil pela ABNT. Como será estudado posteriormente neste trabalho, o método consiste em expor apenas uma extremidade do corpo de provas ao resfriamento rápido, obtendo assim, diferentes taxas de resfriamento ao longo deste corpo. Esse método permite estudar e acompanhar a propagação microestrutural das fases presentes no aço em análise. Tendo como conceito básico que se a dureza for homogênea do longo do corpo de provas, o material possui elevada temperabilidade, porém, se ocorrer índice elevado de diminuição de dureza na extremidade oposta ao resfriamento, a temperabilidade é considerada baixa.

Uma vez conhecida as durezas do material através do método Jominy, assim como as condições impostas durante o resfriamento em diferentes pontos do corpo de provas,

pode-se também conhecer a dureza que se obtém no interior de um corpo resfriado sobre as mesmas condições (Van Vlack, 1984). Através desses dados é possível estabelecer curvas Jominy, aonde é possível prever a distribuição de dureza em barras de aço de diferentes tamanhos, temperadas em diferentes meios de resfriamentos.

Conhecendo a velocidade de resfriamento desejada, é possível prever a dureza obtida em uma barra temperada através da utilização de um gráfico de ensaio Jominy, sem que haja necessidade do corte da mesma.

### **1.1. Motivação**

Resultados obtidos a partir do método Jominy, podem ser utilizados para determinar se um aço pode ser endurecido por diferentes meios em diferentes diâmetros. Através desse método é possível determinar com boa aproximação a dureza de cilindros de aço temperados, coincidindo dados obtidos no ensaio Jominy com dados de resfriamento contínuo de alta temperatura de cilindros de aço de várias espessuras. A taxa de resfriamento de uma peça depende diretamente da dimensão da mesma, do meio de resfriamento utilizado e da temperatura de austenitização do material. Sendo assim, peças de grandes dimensões possuem taxas de resfriamentos mais baixas, tanto em sua superfície quanto em seu interior. Analisando esses parâmetros é possível identificar que para um menor custo de produção é aconselhável que se escolha o aço com menor teor de carbono que seja capaz de produzir a dureza indicada. Pode-se evidenciar assim, a importância de um dispositivo Jominy para realização de ensaios de temperabilidade.

A construção do dispositivo visa um projeto totalmente funcional e de fácil manejo, uma vez que o aparato ficará disponível para uso nos laboratórios da UNIPAMPA/campus Alegrete. Visto que a instituição não dispõe de dispositivos para ensaios de temperabilidade, propondo assim, acrescentar uma nova alternativa para futuros estudos a serem realizados na área de materiais.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo principal desse trabalho visa construir e aferir um aparato para ensaio Jominy, seguindo a norma regulamentadora para ensaios de temperabilidade ABNT NBR 6339.

Testar o dispositivo obtendo curvas de resfriamento para os aços ABNT 1020, e 1045, a análise desses resultados comparados com dados literários, permitirá saber com precisão se o aparato desenvolveu corretamente o ensaio de temperabilidade.

## **2.1. Objetivos secundários**

- ❖ Determinação do dispositivo para ensaio Jominy;
- ❖ Desenvolvimento do dispositivo em SOLIDWORKS;
- ❖ Construção do aparato escolhido;
- ❖ Ensaio de temperabilidade a partir das amostras determinadas;
- ❖ Elaboração das curvas de resfriamento;
- ❖ Comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os dados literários;
- ❖ Aferição do aparato desenvolvido.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1. Tratamentos térmicos dos aços**

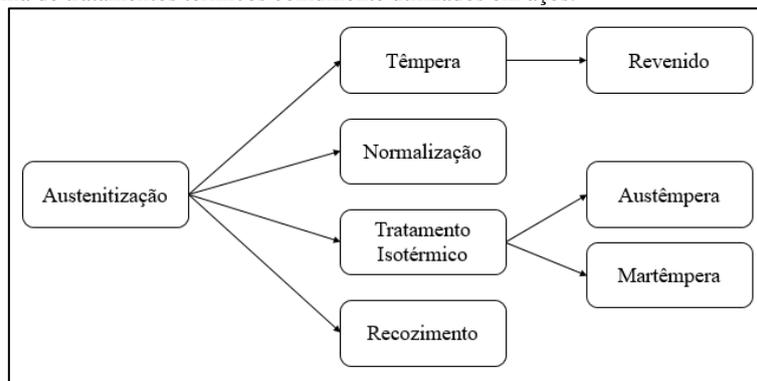
Pode ser definido com o conjunto de operação que altera as propriedades químicas e físicas de um determinado material, atribuindo-lhe características desejadas. O processo consiste basicamente no aquecimento e resfriamento do material através de ambiente controlado, alterando tempo, temperatura, velocidade de resfriamento e atmosfera, é possível atribuir ao material as propriedades mecânicas almejadas (UNTERWIESER et al., 1982).

Sabendo que a estrutura dos aços é caracterizada diretamente por suas propriedades, os tratamentos térmicos visam, em maior ou menor escala, alterar tais propriedades. Essas aplicações têm melhorias significativas para o material, e como principais razões de aplicação, pode se destacar a remoção de tensões internas, resultantes do processo de fabricação. Também são utilizados para aumento de resistência mecânica, melhoria da ductilidade, usinabilidade, resistência ao desgaste, redução ou aumento de dureza, entre outros.

Cada fase ou microconstituente do aço, equivale a um tipo de estrutura cristalina, sendo assim, cada fase almejada deve ser obtida através de um tratamento térmico específico (BORTOLETO, 2010).

O fluxograma da Figura 1, mostra alguns dos tratamentos térmicos mais comuns aplicados aos aços.

Figura 1: Fluxograma de tratamentos térmicos comumente utilizados em aços.



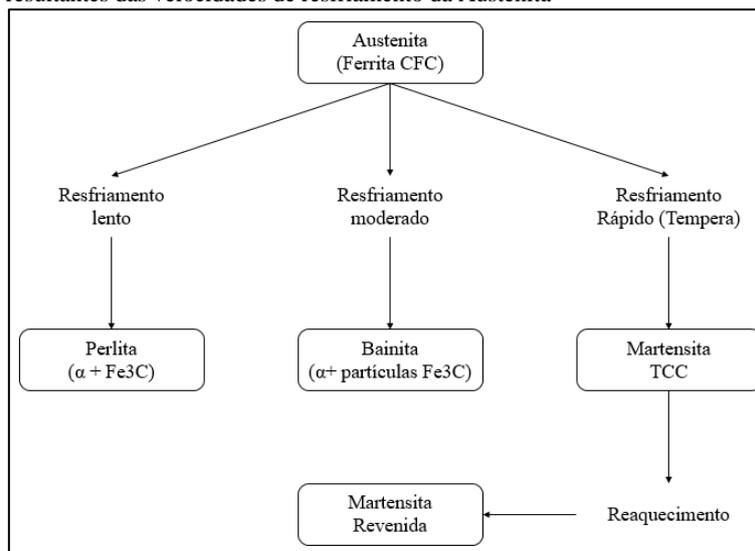
Fonte: Próprio autor.

### 3.2. Têmpera

O processo de têmpera é um dos mais utilizados dentre os tratamentos térmicos, consistindo em um método relativamente simples e eficaz, com baixo custo de produção, o material é aquecido até a zona de austenitização e então sofre um resfriamento rápido e controlado. O processo se sucede com o material sendo aquecido em forno até atingir a temperatura de austenitização, sendo mantido nessa temperatura até que os carbonetos oriundos dos elementos de liga se dissolvam, quando retirada do forno a peça é submergida em meio ao refrigerante adequado para o processo.

Pegando como base os aços hipoeutetóides (aqueles que possuem menos carbono que o previsto na composição eutetóide), e levando em consideração que o mesmo é mantido no aquecimento até a obtenção da homogeneidade das temperaturas, sendo essas acima da temperatura de austenitização, obtém-se então, um material totalmente austenítico. Posteriormente então, um resfriamento, de tal maneira que o material se transforme preferencialmente em martensita, evitando ao máximo que a austenita se transforme em ferrita ou cementita + perlita. As fases a serem formadas parciais ou em sua totalidade, dependem da velocidade de resfriamento, isso determinará as características mecânicas do material, nas quais pode-se destacar, dureza, tenacidade, ductilidade, entre outras (ASTM, 1990). A Figura 2 apresenta os produtos oriundos da transformação da austenita.

Figura 2: Produtos resultantes das velocidades de resfriamento da Austenita



Fonte: Próprio Autor.

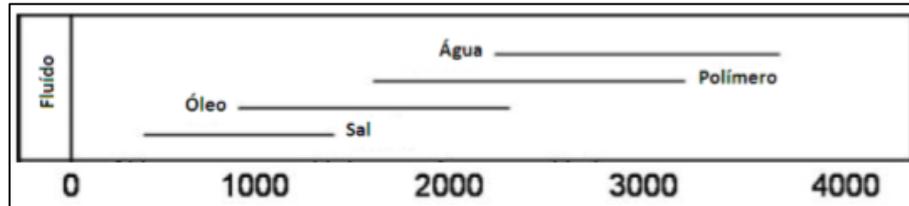
Segundo RAVNIK, 2010. O processo de têmpera visa principalmente distribuir a dureza do aço através do corpo da peça, sendo este dependente de vários fatores, como:

- ❖ Tipo de aço, geometria da peça, elementos de liga;
- ❖ Microestrutura anterior ao tratamento térmico;
- ❖ Tamanho de grão austenítico;
- ❖ Tipo de têmpera aplicada, severidade da têmpera, método adotado, o processo como um todo.

### 3.2.1. Severidade da têmpera

É a capacidade que o meio refrigerante tem de extrair calor da superfície do aço em questão. Utiliza-se como referência a água a uma temperatura de 18°C, a qual tem a severidade definida como H=1. Hoje 4 meios de têmpera são mais utilizados (salmoura, água, óleo e ar), sendo que a água é a que produz maior severidade no processo, seguida pelo óleo, pela salmoura e pelo ar. Outro fator que influencia a severidade da têmpera, e a agitação do refrigerante durante o processo.

Abaixo, na Figura 03, pode se ver a comparação dos diferentes fluidos de resfriamentos mais utilizados para o tratamento de têmpera por imersão e sua taxa de transferência de calor.

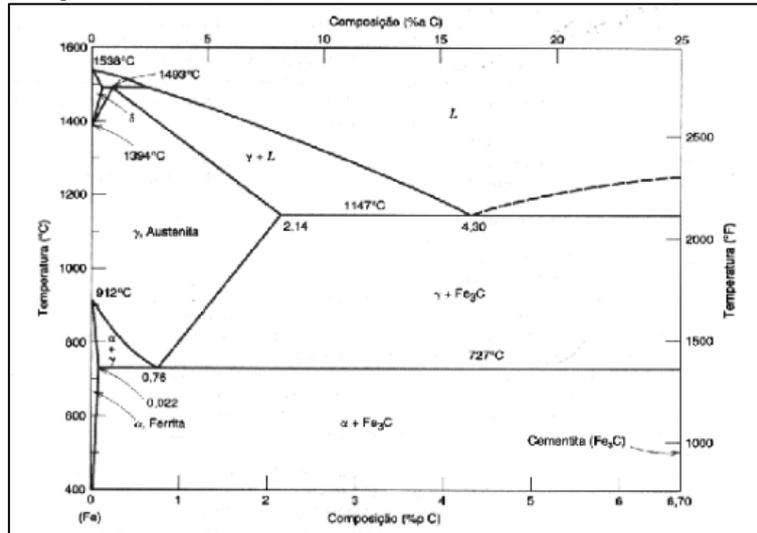
Figura 3: Coeficiente de transferência de calor ( $W/m^2K$ )

Fonte: SAHAY, 2009.

A água, mesmo apresentando as maiores taxas de resfriamento, seja por imersão, utilizando ou não agitação, ou por jato (SAHAY, 2009), não se mostra adequada para todos os tipos de materiais, por isso o óleo é utilizado em grande parte dos aços, aonde várias pesquisas vêm tentando caracterizar e classificar o óleo adequado para cada tipo de têmpera (PENHA et, al. 2006). Conhecer este parâmetro se faz importante porque muitas vezes o processo não visa apenas endurecer o aço, mas também controlar suas tensões residuais.

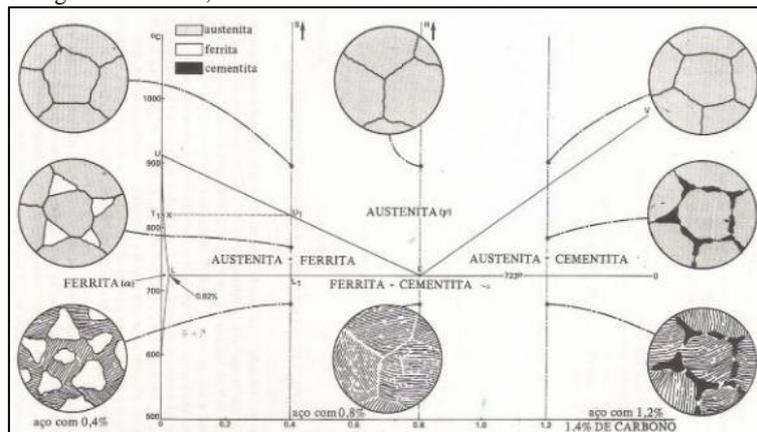
### 3.3. Diagramas de Transformação

A muito tempo a técnica de têmpera vem sendo utilizada, porém, essa técnica de endurecimento de metais era usada empiricamente, sem análise científica ou padrões de transformações. O progresso na área metalúrgica, em específico na área de materiais ferrosos, permitiu obter-se padrões para o processo de resfriamento de matérias de acordo com sua composição química, através dos diagramas de equilíbrio do Ferro (Figura 3 e 4), combinado com outros elementos químicos, tendo ênfase para a liga de Ferro – Carbono (Fe-C), tendo um teor máximo de Carbono de 2,0%, sendo essa liga chamada então de aço. O conhecimento desse diagrama permitiu obter quantidades relativas de microconstituintes, e diferentes temperaturas de equilíbrio, e assim proporciona um método para chegar em diferentes propriedades mecânicas. (ABBASCHIAN et. al., 2010).

Figura 4: Diagrama de equilíbrio Fe-Fe<sub>3</sub>C.

Fonte: William D. Callister Jr.; “Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução”, 5ª edição.

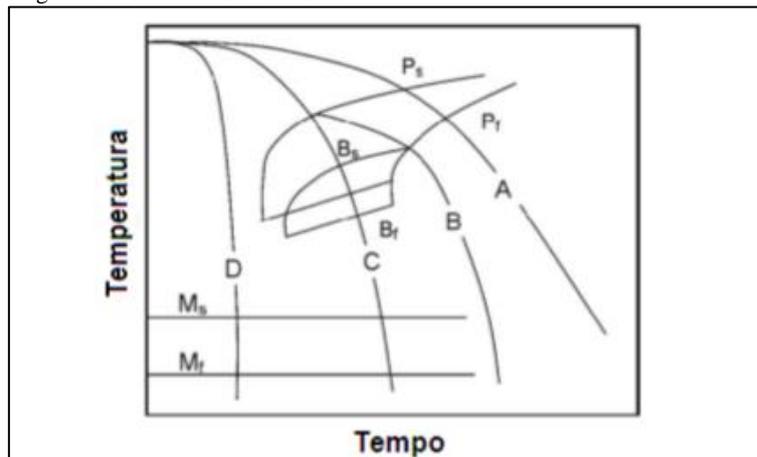
A Figura 05 mostra à nível microscópico a estrutura formada por cada fase, durante o processo de transformação.

Figura 5: Detalhe do diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C, com suas diferentes microestruturas.

Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgE1AAC/cm-curvas-ttt>. Acessado em Fevereiro de 2018.

O processamento de aços também conta com os diagramas TTT (Temperatura, Transformação e Tempo) e CTT (*Continuous Temperature Transformation*), para condições de resfriamento contínuo sendo que os mesmos são de extrema importância para elaboração de processos termomecânicos em aços. (SAHAY, 2009 e SAUNDERS, 2011). A Figura 06 exemplifica um diagrama de resfriamento contínuo.

Figura 6: Exemplo diagrama de resfriamento contínuo.



Fonte: SAHAY, 2009.

Segundo SAHAY, 2009, analisando a Figura 5, pode-se notar que as microestruturas de perlita bainita e martensita, possuem temperaturas iniciais de formação ( $P_s$ ,  $B_s$ ,  $M_s$ ) e finais ( $P_f$ ,  $B_f$ ,  $M_f$ ) assinaladas. Ao sobrepor as curvas de resfriamento em relação ao diagrama de transformação, pode-se estimar as fases que serão formadas no término do processo de resfriamento.

Observando as curvas de A até D, observa-se a microestrutura constituinte de acordo com a taxa de resfriamento aplicada. Sendo que, quando realizamos um resfriamento rápido, como exemplificado em C e D, os mesmos chegarão a estrutura martensítica, porém, o caminho D torna-se mais frágil (GARCIA-MATEO C. et. al., 2004), devido as altas tensões residuais resultantes das elevadas taxas de resfriamento.

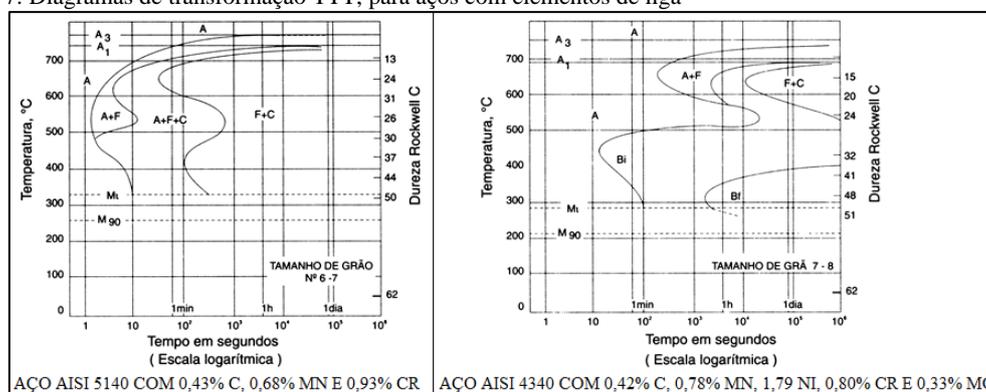
Diagramas de resfriamento contínuo, indicam que transformações são controladas pela difusão de carbono e de outros elementos de liga na austenita quando sólida, caracterizados principalmente pelo fenômeno de nucleação e crescimento de novas fases. As transformações da austenita que ocorrem nessas temperaturas foram ilustradas no fluxograma da Figura 02. Os diagramas dessas transformações são caracterizados por apresentar curvas em formato de “C”, sendo que para uma determinada temperatura o tempo de transformação a partir da austenita são relativamente baixos. Quando aumentado o teor de carbono e elementos de liga na austenita sólida, assim forçando a curva para a direita do gráfico, permitindo que haja um aumento de tempo para as transformações controladas pela difusão da austenita serem realizadas. (ABBASCHIAN et. al., 2010), (BROOKS, 1996).

Deslocar o cotovelo (maiores tempos para transformação) corresponde a uma estabilização da austenita até temperaturas mais baixas, onde alcança-se o valor crítico

para início da transformação em martensita (Ms). Assim teremos um valor crítico de resfriamento à esquerda do cotovelo, a martensita nada mais é que a supersaturação de carbono em solução sólida intersticial e uma elevada densidade de discordâncias. A transformação da austenita para martensita se dá por completo quando atingir o ponto inferior do diagrama (Mf), a uma temperatura específica, podendo chegar abaixo da temperatura ambiente, o que resulta em austenita retida. As temperaturas Ms e Mf, estão diretamente relacionadas ao teor de carbono e elementos químicos presentes no aço. (ABBASCHIAN et. al., 2010), (BROOKS, 1996).

Nos gráficos da Figura 07, é apresentado o efeito do teor de carbono e de elementos de liga nos digramas TTT/CTT.

Figura 7: Diagramas de transformação TTT, para aços com elementos de liga



Fonte: [http://www.inda.org.br/curva\\_ttt.php](http://www.inda.org.br/curva_ttt.php). Acessado em Fevereiro de 2018.

Quando a composição química do aço é conhecida, bem como os parâmetros do tratamento térmico em questão (temperatura de austenitização e velocidade de resfriamento), é possível estimar a sua microestrutura final.

### 3.4. Temperabilidade

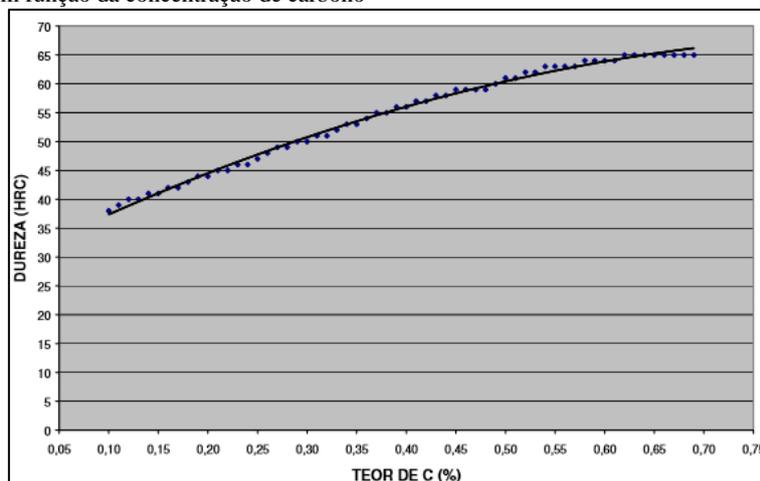
“A temperabilidade ou endurecibilidade é definida como a propriedade que determina a capacidade de endurecimento do aço verificada através da profundidade e distribuição da dureza obtida por tratamento térmico de têmpera” (NBR 8653, 1998).

Dependendo principalmente dos seguintes elementos estruturais:

- ❖ Composição química do aço;
- ❖ Processo de fabricação do aço;
- ❖ Tamanho do grão;
- ❖ Microestrutura presente antes da têmpera;
- ❖ Homogeneidade da austenita.

Porém, não podemos confundir temperabilidade com dureza máxima alcançada por uma liga de aço através do processo de tempera. A dureza máxima depende predominantemente da porcentagem de carbono presente no material, já a temperabilidade está ligada a outros fatores. Analisando a Figura 08, observa-se um gráfico que nos mostra a dureza da martensita em função do teor de carbono.

Figura 8: Dureza em função da concentração de carbono



Fonte: ASTM A255, 1989

Esse parâmetro é analisado na área metalúrgica predominantemente pelos ensaios de Jominy e Grossmann.

A seleção dos aços para construção mecânica leva em consideração a temperabilidade da matéria prima em questão (CRUZ, 2005). Sendo que sua microestrutura está diretamente relacionada as propriedades mecânicas.

Para Costa e Mei (2006), temperabilidade se define pela capacidade de o aço adquirir dureza ao longo da seção transversal, ou seja, formar martensita no interior da peça em questão.

Colpaert (2008), fala de temperabilidade ou profundidade de penetração da têmpera, como a variação de dureza do aço da superfície até o núcleo, quando submetida a resfriamento rápido. Sendo associada diretamente a habilidade de um aço específico formar martensita, influenciado pela velocidade crítica de resfriamento. Segundo Costa (2006), o tamanho de grão e a homogeneidade da microestrutura austenítica tem influência sobre a temperabilidade do aço.

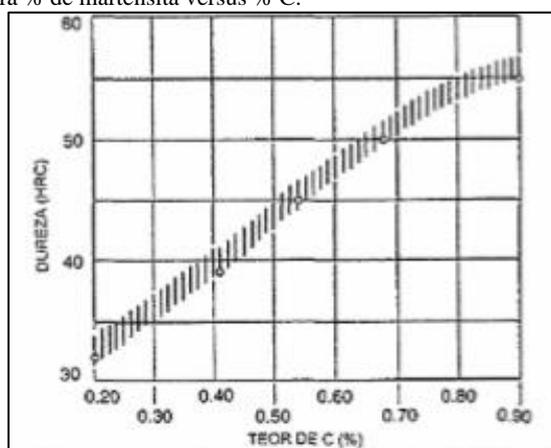
O conceito apresentado por Krauss (2005), se refere a temperabilidade como a suscetibilidade de um determinado material ao endurecimento rápido quando submetido ao processo de têmpera, ou ainda, a propriedade que determina a distribuição da dureza quando sujeito a esse processo. Tendo como principal objetivo para aumento de dureza a

formação de martensita. Assim define-se temperabilidade pela capacidade de um material ferroso se transformar total ou parcialmente de austenita para martensita a uma determinada profundidade, quando submetido a resfriamento rápido em condições controladas.

Dobrzanski, et al, 1998, apresenta a temperabilidade como uma das principais propriedades analisadas quando se escolhe um aço para tratamento térmico de componentes estruturais de máquinas. Aços de liga compõem o principal material utilizado na indústria de máquinas, associando alta resistência, ductilidade e tenacidade quando submetidos a esforços cíclicos. Conhecer as propriedades de trabalho a qual os componentes irão ser submetido, são critérios para escolha do material em questão, sendo definidos a partir das condições de serviço do elemento. As propriedades de trabalho dos elementos estruturais muitas vezes são específicas para cada tipo de serviço, como resistência a tração, tensão de escoamento e dureza. Também pode ser necessário que o material tenha uma boa resistência ao impacto, boa ductibilidade e endurecibilidade.

A Figura 09 mostra a porcentagem de carbono pela dureza, para um material que formou 50% de martensita. Deixando claro a variabilidade da dureza quando afetada pelas microestruturas não martensíticas.

Figura 9: Dureza estimada para % de martensita versus % C.



Fonte: Krauss, 1990.

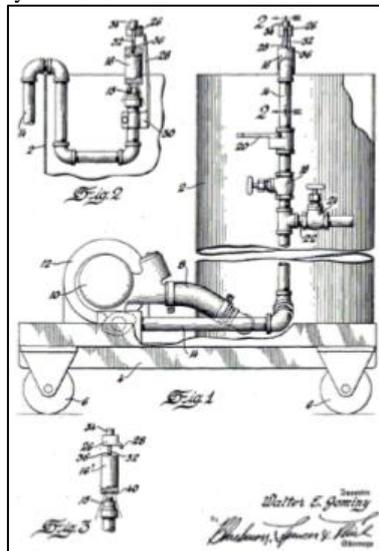
### 3.5. Ensaio de temperabilidade Jominy

Segundo Callister, 1997, o método carrega esse nome porque foi desenvolvido por Walter Jominy e seus colaboradores, e é o ensaio mais utilizado na área metalúrgica, permitindo que de forma prática se defina o aumento do teor de martensita no aço,

utilizando apenas um corpo de provas, no qual, temos a ação de diferentes taxas de resfriamento ao decorrer do seu comprimento.

O ensaio condiz basicamente com aquecer o aço até o campo austenítico e então resfria-lo rapidamente em condições padronizadas, por meio de um jato de água. A Figura 10, mostra a invenção de Walter E. Jominy, no ano de 1939.

Figura 10: Invenção de Walter E. Jominy em 1939.

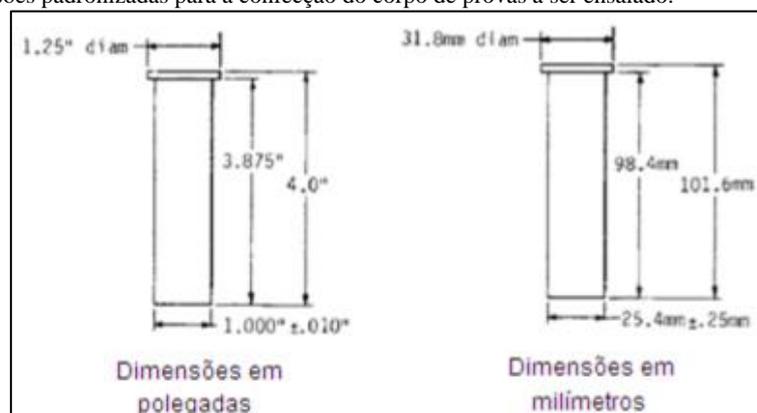


Fonte: WALTER E. JOMINY, Número de Patente 2,266,322, 1941.

Essa ideia surgiu quando se buscava simplificar o teste de temperabilidade, de modo que se tornou mais prático que outros testes utilizados para esse fim.

O ensaio Jominy é regido pela norma ASTM A255, utilizando uma amostra com dimensões pré-estabelecidas, a qual deverá ter 1,0 polegada (25,4 mm) de diâmetro por 4,0 polegadas (101,6) de comprimento, com disponibilidade de ser fixada na vertical durante a etapa de resfriamento, através de um jato d'água disposto a 0,5 polegadas (12,7 mm) abaixo da extremidade inferior da amostra. Como ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Dimensões padronizadas para a confecção do corpo de provas a ser ensaiado.



Fonte: ASTM A255-10.

A mesma norma também especifica os limites mínimos e máximos para concentração de elementos de liga, como descrito na Tabela 1. Manter as ligas metálicas dentro dessas proporções se faz importante para padronização dos resultados, o que permite a comparação dos mesmos com dados literários e resultados obtidos em ensaios anteriores.

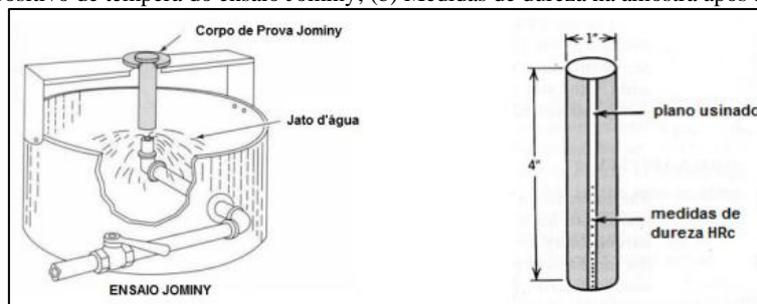
Tabela 1: Tolerâncias de concentração de elementos de liga.

Elemento	Varição em massa %
Carbono	0,10 - 0,70
Manganês	0,50 - 1,65
Silício	0,15 - 60
Níquel	0 - 1,35
Cromo	0 - 1,50
Molibdênio	0 - 0,55

Fonte: ASTM A255, 2004.

Como a estrutura inicial afeta diretamente os resultados dos testes, é necessário que o tarugo seja submetido ao processo de normalização antes de ser ensaiado. Após preparado o corpo de provas, o ensaio consiste basicamente em aquecer o material até a zona de austenitização, e logo após submeter o mesmo a um resfriamento rápido. Na Figura 12, é possível analisar um esquema do aparato utilizado neste processo. O mesmo dispõe de um reservatório para fluido de resfriamento, que por meio de uma bomba hidráulica irá incitar o resfriamento forçado em uma das extremidades do corpo de provas, a norma prevê o fluxo e a pressão necessária para padronização dos resultados, bem como uma rápida abertura da válvula.

Figura 12: (a) Dispositivo de têmpera do ensaio Jominy; (b) Medidas de dureza na amostra após a têmpera.



Fonte: Callister, 1997.

Uma vez que a peça encontra-se resfriada até a temperatura ambiente é necessário que a seção longitudinal do corpo de provas seja retificada a uma profundidade de 0,5 a 0,9 mm, posteriormente serão feitas medições de dureza ao longo da seção retificada,

utilizando como ponto de partida a extremidade que foi resfriada a água, as durezas deverão ser medidas no intervalo de 1/16” para os primeiros 12,8 mm, seguindo a um passo de 1/8” para os próximos 38,4 mm de distância, totalizando um comprimento de 50 mm a ser analisado.

Para o sucesso dos resultados é necessário que algumas precauções sejam tomadas durante o processo de tratamento térmico, tais como:

- ❖ A retirada do tarugo do forno e o início do resfriamento não deve exceder o intervalo de cinco segundos;
- ❖ O aparato Jominy deve estar seco;
- ❖ O acionamento da válvula de abertura deve ser feito de forma rápida, dando início imediato ao processo de têmpera;
- ❖ Deve-se evitar ao máximo que agentes internos interfiram no resfriamento, como por exemplo, correntes de vento.
- ❖ A água deve ser bombeada contra o corpo de provas por no mínimo 10 minutos;

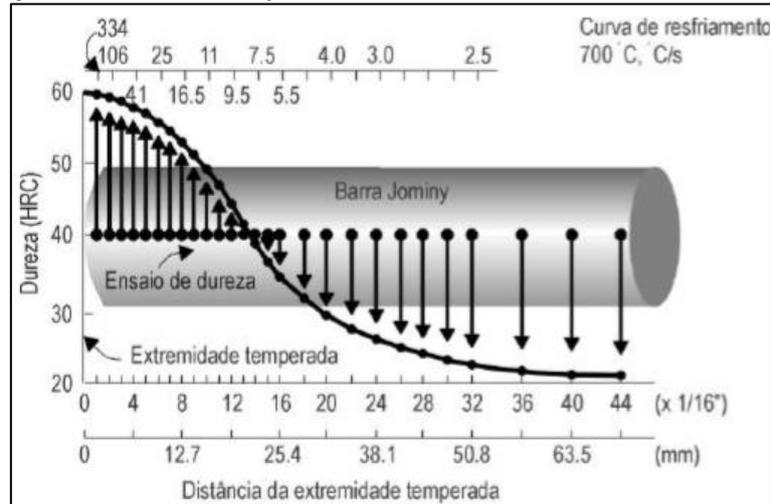
Uma vez que o tempo de dez minutos for atingido, considera-se terminado o processo de têmpera, ficando de livre escolha a submersão do tarugo em água ou deixar ao ar livre até que atinja a temperatura ambiente (NBR 6339, 1989).

### **3.5.1. Curvas de temperabilidade**

Segundo MARTINS, 2002, as curvas de temperabilidade dos ensaios Jominy, são a relação entre a dureza do material em análise com o seu comprimento da seção longitudinal. Os resultados apresentados apresentam originariamente uma transformação martensítica pura, e sofrem um decaimento até obtermos uma estrutura perlítica ou ferrito-perlítica.

A Figura 13 permite a observação dessas curvas sobrepostas ao corpo de provas de qual foram originadas.

Figura 13: Distribuição de dureza barra Jominy

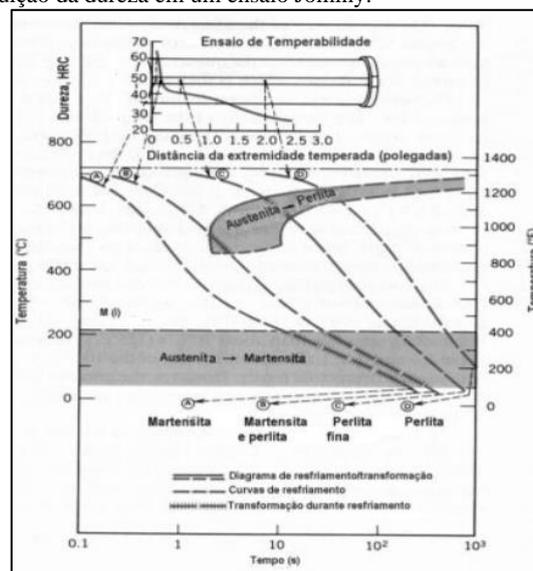


Fonte: Callister, 1997.

A velocidade em que o tarugo é resfriado afeta diretamente as fases que o aço irá formar, sendo assim a extremidade exposta ao jato de água resfria bruscamente, formando uma estrutura martensítica, onde se encontra a maior dureza no corpo de provas, com o decaimento da velocidade de resfriamento consequentemente ocorre diminuição da dureza no material, isso ocorre porque, devido ao maior intervalo de tempo no resfriamento, o material fica suscetível a formação de outras fases cristalinas, como bainita, perlita e ferrita, além da estrutura principal almejada, a martensita.

Callister 2002, nos fornece um diagrama CCT correlacionado com as curvas de ensaio Jominy, partindo de diferentes velocidades de resfriamento obtidas a diferentes regiões da seção longitudinal do corpo de provas, como observado na Figura 14.

Figura 14: Exemplo da distribuição da dureza em um ensaio Jominy.



Fonte: Callister, 2002.

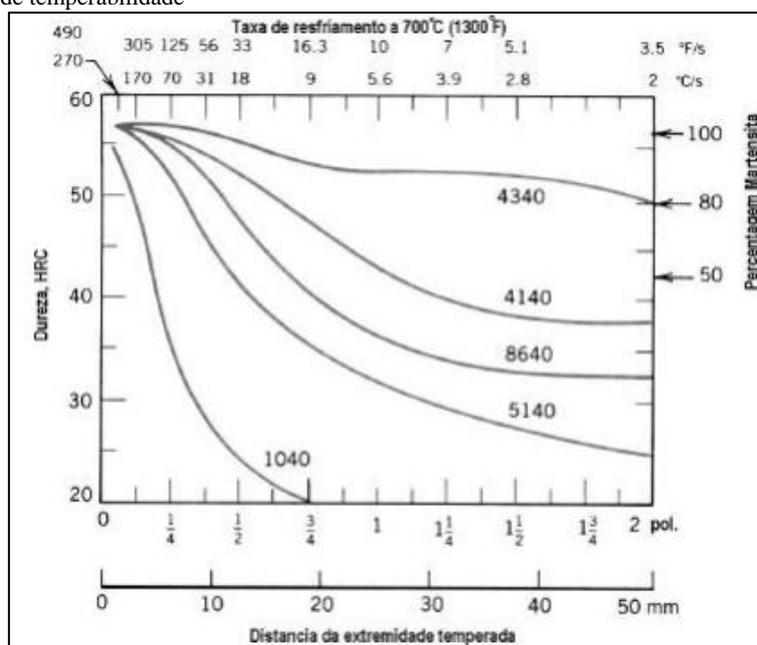
Ainda analisando a Figura 14, observa-se que a curva 'A' não passa pelo campo de transformação austenita-perlita, resultando no alto valor de dureza, como é observado na curva resultante do ensaio Jominy, já as demais curvas que passaram pelo campo de transformação da austenita para a perlita, sofreram uma queda na quantidade de martensita formada no final do processo, conseqüentemente gerando valores de dureza inferiores aos encontrados na primeira curva.

Considera-se um aço de alta temperabilidade, aquele que é capaz de manter dureza elevada em distâncias afastadas da zona de resfriamento, certos componentes requerem que o material não deforme plasticamente em serviço, como aços utilizados na fabricação de matrizes, para isso é necessário que o material possua elevada temperabilidade.

Ao se determinar curvas de ensaio Jominy em diferentes tipos de materiais, observa-se que estas são características próprias de cada material. Cujo fato está relacionado a composição química que envolve cada tipo de aço.

Comprovando essa teoria pode-se observar a Figura 15, que apresenta a curva de temperabilidade Jominy originária de cinco aços com mesmo teor de carbono, sendo que quatro deles tiveram adição de elementos de liga, apesar disso, nota-se que a dureza máxima é praticamente a mesma, porém, a adição dos elementos de liga desloca a curva em "C" para a direita, resultando em predominância martensítica a distâncias consideravelmente maiores a longo do corpo de provas.

Figura 15: Curvas de temperabilidade



Fonte: Callister Jr., 1997.

Tabela 2: Composição química dos aços apresentados na Figura 14.

Tipo de aço	Composição Química							
	C	Si	Mn	P <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>	Cr	Mo	Ni
ABNT 1040	0,37 - 0,44	-	0,60 - 0,90	0,03	0,05	-	-	-
ABNT 4140	0,38 - 0,43	0,15 - 0,35	0,75 - 1,00	0,03	0,04	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25	-
ABNT 4340	0,38 - 0,43	0,15 - 0,35	0,60 - 0,80	0,03	0,04	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30	1,65 - 2,00
ABNT 5140	0,38 - 0,43	0,15 - 0,35	0,70 - 0,90	0,03	0,04	0,70 - 0,90	-	-
ABNT 8640	0,38 - 0,43	0,15 - 0,35	0,75 - 1,00	0,03	0,04	0,40 - 0,60	0,15 - 0,25	0,40 - 0,70

Fonte: Gerdau S.A., 2002.

A grande diferença de temperabilidade se dá ao fato de os aços terem adição de níquel, cromo e molibdênio como elementos de liga (Tabela 2). Estes agem de forma que atrasam a transformação da austenita para perlita ou bainita, permitindo que uma maior parte se transforme em martensita para dada velocidade de resfriamento, justificando assim o aumento de dureza observado no gráfico.

### 3.5.2. Prós e contras do método Jominy

Como todo método experimental para obtenção de dados, o ensaio Jominy apresenta vantagens e desvantagens em sua prática. Podemos citar como vantagens:

- ❖ Facilidade de realização do ensaio;
- ❖ Custos relativamente baixos quando comparado a ensaios que propõem resultados similares;
- ❖ Fornece os dados de dureza correlacionados com a taxa de resfriamento, o que facilita o desenvolvimento de projetos mecânicos;
- ❖ Possibilidade de com um só ensaio se caracterizar a resposta de um aço a uma gama muito extensas de velocidades de resfriamento;
- ❖ Reprodutibilidade de resultados muito boa, mesmo para variações significativas das condições de execução.

Desvantagens:

- ❖ Não é aplicável para aços de reduzida temperabilidade, que apresentam curvas Jominy com uma queda muito rápida da dureza.
- ❖ Não é aplicável para aços de elevada temperabilidade, que apresentam curvas de Jominy com reduzida variação de dureza ao longo da geratriz.
- ❖ Não fornece dados aprofundados quanto a transformações intermediárias;

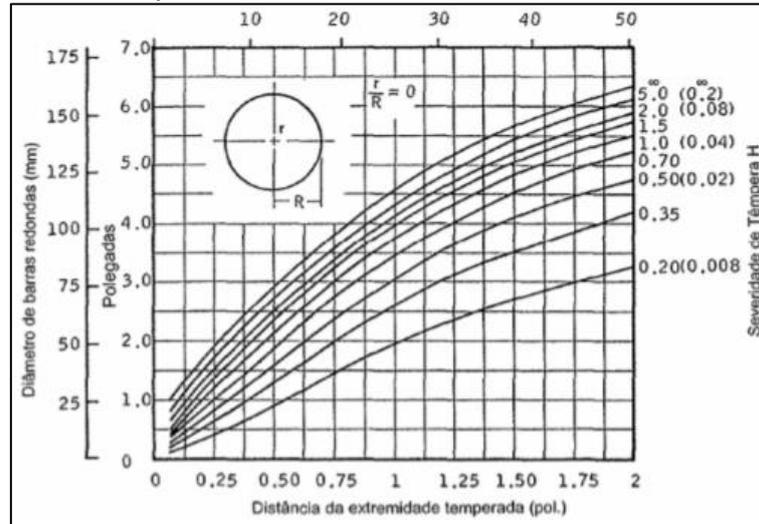
- ❖ As curvas produzidas não levam em consideração as condições de uso do material, que seria o processo de têmpera seguido de revenido;
- ❖ A utilização do método Vickers para medição de dureza, forneceria curvas mais precisas para o ensaio, através da continuidade das medições. Levando em consideração que o método Rockwell mostra-se mais preciso para valores superiores a 20 HCR.

### **3.5.3. Aplicação prática do ensaio Jominy**

Os conhecimentos adquiridos através do experimento, associados as teorias estudadas, permite que o engenheiro selecione materiais que possuam bom desempenho mecânico aliado a um menor custo para produção.

Conhecendo as condições de resfriamento de um aço assim como as durezas obtidas pelo ensaio Jominy, pode-se estipular a dureza resultante no interior das peças resfriadas sob as mesmas condições. Como já é conhecido, curvas Jominy permitem predizer a distribuição de dureza em cilindros de aço de diferentes dimensões que tenham passado por diferentes meios de resfriamento, através da comparação das velocidades de resfriamento dos vários pontos do corpo de prova, com o resfriamento em barras de diferentes tamanhos desde que tenham sofrido o mesmo processo de têmpera. Esta comparação pode ser realizada com o auxílio do “*gráfico de Lamont*”, ilustrado na Figura 16, e servem para que se possa encontrar as velocidades de resfriamento em diversas posições de uma barra, do centro até a superfície, isso quando resfriadas em condições normais, ou seja, totalmente submersa em refrigerante. Quando conhecida a velocidade de resfriamento em determinada posição, faz-se o uso dos gráficos de ensaios Jominy para um aço em específico, e assim conhecer a dureza almejada.

Figura 16: Posição na curva Jominy versus diâmetro em diferentes meios de resfriamento.



Fonte: Siebert et. al., 1977.

### 3.6. Possíveis erros a serem considerados para ensaio de temperabilidade

Existem fatores que contribuem para a discrepância de resultados, quando levados em consideração podem esclarecer o fato da diferença que há nas curvas encontradas na literatura quando obtidas por diferentes fontes. Alguns fatores podem ser característicos de cada material, como:

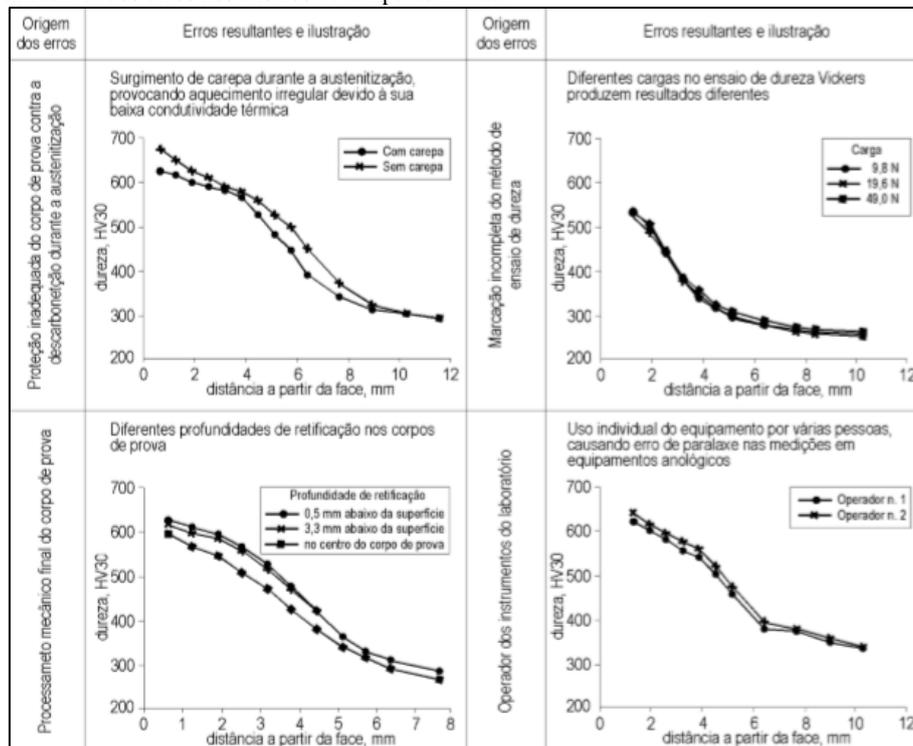
- ❖ Composição química;
- ❖ Tamanho de grão.

Erros de operação podem ser induzidos por outros fatores como:

- ❖ Presença de carepa, impureza resultante do tratamento térmico esta camada se forma ao redor da peça e dificulta a homogeneidade do resfriamento ao decorrer do processo.
- ❖ Profundidade removida da superfície para os testes de dureza, uma retífica não homogênea causa diferença nos resultados obtidos, pois, quanto maior a espessura retificada, menor será a dureza encontrada.
- ❖ Erro de seleção de carga quando o durômetro for operado em escala Vickers.
- ❖ Medições obtidas por mais de um operador tentem a não manterem um padrão de coleta.
- ❖ Erros decorrentes do processo de medição e da má aferição do durômetro.
- ❖ Tempo de retirada do forno até o início do ensaio.

DOBRZANSKI nos traz um estudo relacionado aonde são tratados esses possíveis erros, levando em consideração o surgimento de carepa, a diferença de cargas nos ensaios de dureza Vickers, diferentes profundidades de retifica e o erro de paralaxe, quando mais de uma pessoa opera o equipamento. Os gráficos da Figura 17 nos mostram a influência desses em através de curvas de temperabilidade.

Figura 17: Influência dos erros nos ensaios de temperabilidade.



Fonte: Dobrzanski, 1998.

Existe uma maneira usual de determinar a discordância dos resultados encontrados, através do estabelecimento do desvio padrão para um dado número de medições.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

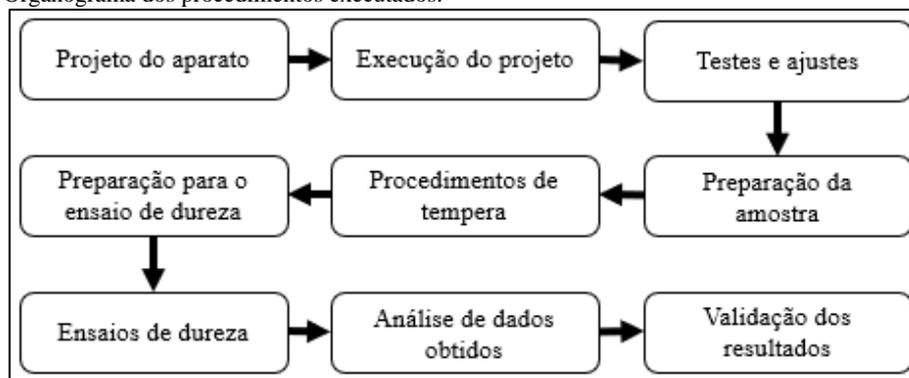
### 4.1. Estratégia dos experimentos

A análise experimental adotou como estratégia a execução de ensaios de temperabilidade Jominy em diferentes tipos de aço carbono dispostos nos laboratórios da UNIPAMPA (campus Alegrete), e que são diariamente utilizados por técnicos e alunos para diversas aplicações. Em uma segunda etapa, os tarugos procedentes dos ensaios de temperabilidade serão submetidos a ensaios de dureza Rockwell, tais ensaios são padronizados, e sua coleta de dados segue o que é previsto na norma para ensaio Jominy. Em uma terceira etapa serão desenvolvidas as curvas de temperabilidade Jominy. O

principal objetivo desses experimentos é a aferição do aparato Jominy, que foi desenvolvido nesse projeto, assim, validando o dispositivo e o deixando apto para funcionamento nos laboratórios do campus.

O organograma da Figura 18 abaixo nos mostra a ordem de execução dos experimentos realizados.

Figura 18: Organograma dos procedimentos executados.



Fonte: Próprio Autor

Os procedimentos relatados são detalhadamente descritos a seguir.

## 4.2. Aparato Jominy

### 4.2.1. Projeto do dispositivo

A escolha de cada item na etapa de projeto, foi realizada de forma que se aproveitasse os materiais disponíveis no local, minimizando os custos de produção sem deixar de lado a qualidade do dispositivo, visando sempre um produto final eficiente e duradouro, de modo que se mantenha operacional por um longo período de tempo. O desenvolvimento dessa etapa utilizou os seguintes componentes de construção:

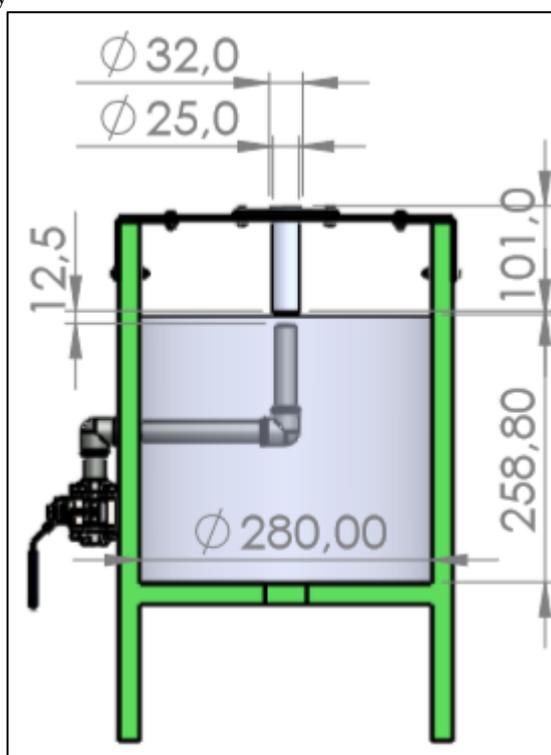
- ❖ 1 válvula esférica de abertura rápida de 1/2 ";
- ❖ 1 válvula globo para regulagem da vazão de 3/4";
- ❖ Tubos galvanizados de 3/4 ";
- ❖ Adaptadores de 3/4" para 1/2";
- ❖ Tudo de 3/4" usinado em alumínio com diâmetro interno de 12,5 mm;
- ❖ Perfis retangulares de 20/40 mm em aço;
- ❖ Chapas de aço com espessura de 5 mm e de 3 mm;
- ❖ Reservatório de coleta de água com capacidade para 6,15 litros;
- ❖ Rebites;

- ❖ Parafusos;
- ❖ Abraçadeiras.

Para construção do aparato Jominy, é necessário obedecer os requisitos exigidos pela NBR 6339, um dos detalhes mais importantes é a necessidade de se manter o fluxo d'água constante e alinhado diretamente com a parte inferior do corpo de provas, também é necessário respeitar a altura mínima entre a saída do bocal e o ponto de contato entre a água e a superfície a ser refrigerada que é de 12,5 mm.

O projeto e dimensionamento do dispositivo foi realizado através do software SOLIWORS, e está ilustrado na Figura 19.

Figura 19: Projeto aparato Jominy



Fonte: Próprio autor

Dentre as opções disponíveis na norma, o dispositivo foi projetado para ensaiar corpos de prova do tipo convencional ( $\varnothing 25,4$  mm x 101 mm), e corpo de prova reduzido ( $\varnothing 19$  mm x 101 mm), comprimento e diâmetro respectivamente, conforme mostrado na Tabela 03, a escolha desses dois tamanhos permite a utilização da mesma estrutura e diâmetro de bocal, sem que haja mudanças significativas na estrutura principal.

Tabela 3: Especificações de bocal segundo a norma NBR 6339, 1989.

Unidade: mm			
Diâmetro do corpo-de-prova	Orifício para saída de água	Distância da saída de água até a superfície de tampa do corpo-de-prova	Altura livre da coluna de água
25,5	12,5	12,5	65 <sup>(A)</sup>
19,0	12,5	12,5	65 <sup>(A)</sup>
12,7	6,4	9,5	102 <sup>(B)</sup>
6,4	3,2	6,4	203 <sup>(C)</sup>

Fonte: NBR 6339, 1989.

#### 4.2.2. Execução do projeto

A construção do dispositivo foi realizada na Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), nos laboratórios de sistemas mecânicos e de construção, parte da infraestrutura do curso de Engenharia Mecânica, aproveitando-se, das devidas adaptações e estruturas disponíveis no local.

Inicialmente foi adaptado um galão de óleo como recipiente para coleta d'água, o mesmo possui diâmetro de aproximadamente 280 mm, e foi cortado há uma altura de 258.8 mm, também foram realizadas as furações necessárias. Para fixação dos componentes foi construída uma estrutura com barras de perfil retangular, unidas por solda, de forma que desse estabilidade para o dispositivo. A Figura 20 nos mostra a primeira parte da execução do projeto.

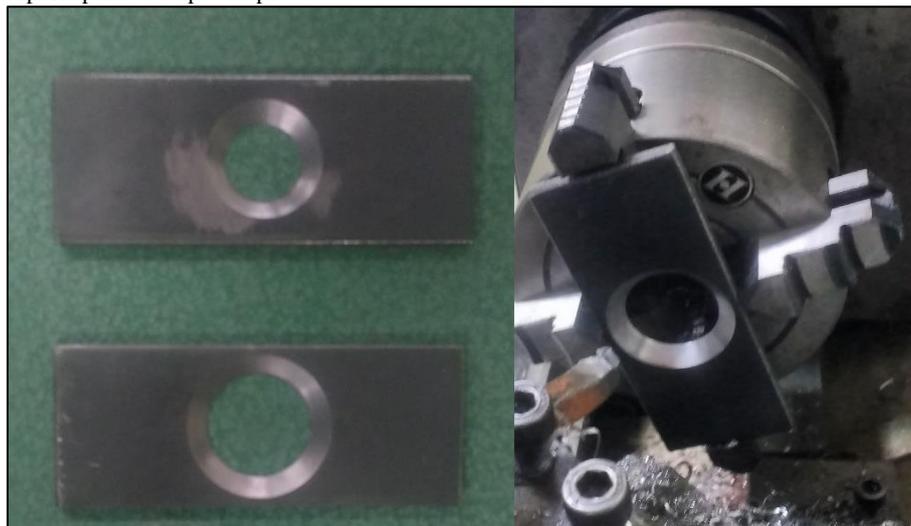
Figura 20: Suporte e recipiente para coleta d'água.



Fonte: Acervo do autor.

Segundo passo foram construídos o suporte para os corpos de prova. Como o dispositivo foi projetado para ensaiar mais de um tipo de corpo de prova, foram construídos dois suportes, que são instalados na máquina de acordo com o tipo de tarugo a ser ensaiado, duas barras de menor comprimento feitas a partir de uma chapa de aço de 5 mm, são facilmente posicionadas sobre uma chapa de aço de 3 mm soldada horizontalmente sobre a estrutura.

Figura 21: Suporte para os corpos de prova.

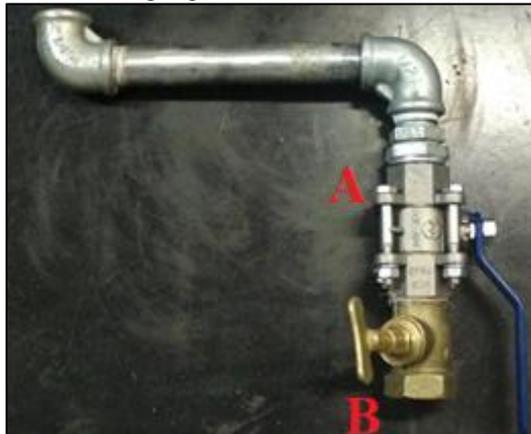


Fonte: Acervo do autor

Conforme determinação da norma, foi dado um ângulo de  $45^\circ$  no furo central, aonde será inserido o corpo de provas.

Na construção do sistema hidráulico de alimentação da máquina, foram utilizados canos galvanizados de  $1/2''$ , cotovelos de mesmo diâmetro e adaptadores de  $3/4''$  para  $1/2''$ , o ajuste do fluxo constante de água foi feito através do uso de uma válvula do tipo globo (Figura 22 - B), que permite o aumento gradual de vazão. O fluxo d'água é interrompido então, por uma segunda válvula ligada em série com a primeira (Figura 22-A), está por sua vez é do tipo de esfera, que caracteriza uma abertura rápida e total do fluxo d'água quando acionada.

Figura 22: Sistema hidráulico e válvulas de regulação.



Fonte: Acervo do autor.

O bocal de 12,5 mm, conforme determinado pela norma, foi usinado a partir de uma barra maciça de alumínio, visto que não dispúnhamos de canos com essas regulamentações.

Para o sistema de escape da água foi aproveitado o bocal original do barril de óleo, aonde foi conectado um sifão maleável, que permite fácil manuseio e armazenagem do dispositivo. Como ilustrado na Figura 22.

Figura 23: Sifão para retorno d'água.



Fonte: Acervo do Autor.

O sistema hidráulico foi fixado na estrutura com abraçadeiras metálicas e rebites, o dispositivo ainda conta com um sistema de nivelamento, realizado através da instalação de pés de altura regulável e antiderrapantes que minimizam as vibrações provenientes do

fluxo de água. Para prevenir contra a corrosão a estrutura recebeu duas camadas de tinta óleo.

Com intuito de facilitar o alinhamento do suporte do corpo de provas com o bocal, foram usinados dois gabaritos, um para o ensaio reduzido e outro para o ensaio convencional, este possui as mesmas dimensões do corpo de provas na parte superior, e diâmetro inferior igual ao diâmetro interno do bocal de saída d'água. A Figura 24 mostra os gabaritos descritos anteriormente.

Figura 24: Gabaritos para regulagem do aparato



Fonte: Próprio autor.

Quando inserido no suporte, o gabarito força o alinhamento do sistema através do encaixe no bocal, mantendo a estrutura alinhada para que o aperto dos parafusos seja realizado.

#### 4.2.3. Corpo de provas

O estudo em questão foi realizado em dois tipos de aço carbono, o primeiro aço SAE ABNT 1045 considerado de média temperabilidade, e o segundo aço SAE ANBT 1020 considerado de baixa temperabilidade. Os dois tipos de aço foram escolhidos por serem largamente utilizados na indústria para fabricação de peças em geral.

Este material foi adquirido em barras maciças e cilíndricas com diâmetro de Ø35 mm, para preparação das amostras foi necessária a utilização de um torno mecânico manual e uma cortadora metalográfica.

Foram fabricados 3 tarugos para ensaio de temperabilidade, dois corpos de prova utilizaram as dimensões do tipo convencional (Ø25,4 mm x 101 mm), e foram usinados a partir de duas barras distintas de aço ABNT 1045, a primeira proveniente dos laboratórios da UNIPAMPA, e a segunda adquirida de um fornecedor local. Um terceiro corpo de provas foi fabricado nas dimensões de modelo reduzido (Ø19 mm x 101 mm),

que foi usinado a partir de uma barra de aço ABNT 1020, proveniente dos laboratórios da UNIPAMPA.

Para confirmar com precisão a composição química de cada aço, amostras foram levadas a um espectrômetro de emissão ótica. A análise desses resultados permite a adequação precisa da temperatura de austenitização e de tempera para o ensaio. Diminuindo a margem de erro, e permitindo uma melhor compreensão das curvas de temperabilidade Jominy, que vierem a ser obtidas.

#### 4.2.4. Execução do ensaio para ajustes no dispositivo

Para execução do ensaio foi necessário a instalação de uma bomba d'água do tipo submerso para fornecimento constante de água, posicionada dentro de um reservatório de aproximadamente 40 litros. O sistema montado e pronto para execução do ensaio pode ser visualizado na Figura 25.

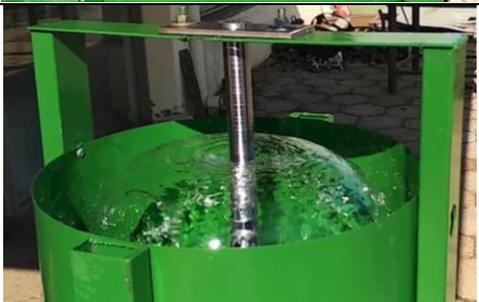
Figura 25: Sistema montado para execução dos testes.



Fonte: Acervo do Autor.

O passo a passo para execução dos testes de ensaio Jominy realizados nesse experimento é exemplificado na tabela a seguir.

Tabela 4: Passo a passo detalhado para ensaio Jominy.

<p>Posicionamento do gabarito e alinhamento do suporte de fixação com o bocal de saída d'água.</p>	
<p>Fixação do suporte do corpo de provas através do aperto das porcas M6.</p>	
<p>Com a válvula esférica totalmente aberta regula-se a altura da coluna d'água através do aumento gradual de vazão da válvula globo, com auxílio de um paquímetro mede-se a altura desejada.</p>	
<p>Mantendo a válvula de regulagem na posição atual, interrompe-se o fluxo de água por meio da válvula esférica.</p>	
<p>Inserção do corpo de provas no suporte e abertura total da válvula esférica.</p>	

Fonte: Próprio autor.

O funcionamento do aparato ocorreu conforme planejado, o sistema hidráulico não apresentou vazamento e forneceu a vazão necessária para realizar o ensaio, o escape também atendeu ao esperado, não permitindo o acúmulo de água dentro do recipiente de

coleta, os únicos ajustes necessários ficam por conta do alinhamento para centralização do suporte do corpo de provas e o bocal.

#### 4.2.5. Ensaio de dureza

Anteriormente ao ensaio de temperabilidade, foram providenciadas uma medida de dureza prévia para cada material.

Os testes foram realizados nos laboratórios da UNIPAMPA campus alegrete, e utilizar um equipamento da marca BUEHLER modelo MicroMet 6010.

Para conhecer se os resultados obtidos são de acordo com o esperado, é necessário a realização de um ensaio de dureza. Para execução desse ensaio é preciso usinar a superfície, assim, os corpos de prova são retificados a uma profundidade de 0,5 a 0,9 mm, a retirada de material foi realizada em ambas as extremidades dos corpos de prova, conforme a Figura 26. Foram utilizados para esse procedimento, uma fresadora CNC, e um durômetro.

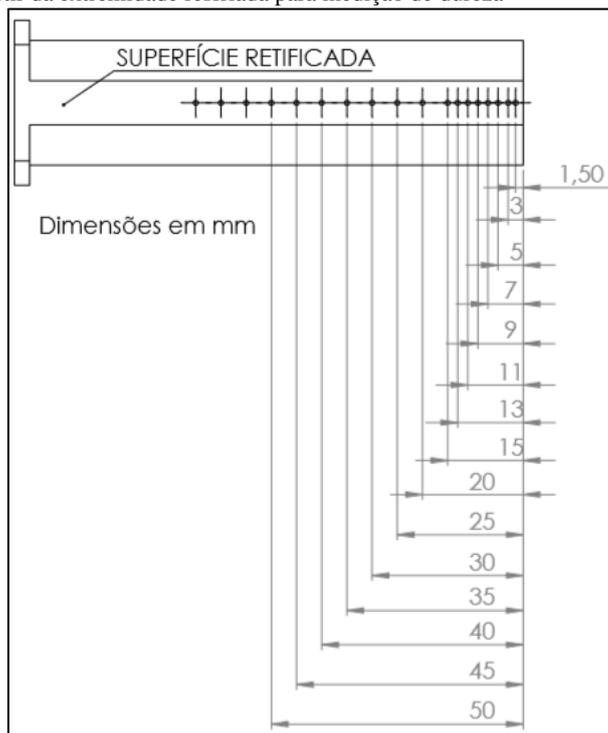
Figura 26: Corpos de provas retificados para o ensaio de dureza.



Fonte: Próprio Autor.

A norma especifica as distâncias que devem ser executadas as medidas de dureza, começando sempre pela base que sofreu resfriamento forçado. Sendo assim os pontos medidos bem como suas distâncias são ilustrados na Figura 27.

Figura 27: Distâncias a partir da extremidade resfriada para medição de dureza



Fonte: Próprio autor.

## 5. RESULTADOS

Concluída a realização dos ensaios e a coleta de dados, serão realizados os procedimentos de temperabilidade Jominy para os aços em questão, visto que o bom funcionamento da máquina é um dos principais resultados almejados, posteriormente esses valores serão submetidos a análises e utilizados para a elaboração das curvas de temperabilidade Jominy. Serão realizados nas próximas etapas desta seção, a análise e avaliação dos aços de construção mecânica analisados anteriormente.

### 5.1. Análise química

A concentração química de cada elemento foi determinada a partir do espectrômetro de emissão ótica, e seus resultados podem ser observados na Tabela 05.

Tabela 5: Composição química dos aços em estudo

		TIPO DE AÇO		
		(A) ABNT 1045	(B) ABNT 1045	(C) ABNT 1020
<b>COMPOSIÇÃO</b>	<b>C</b>	0,5224	0,5167	0,1829
	<b>Si</b>	-	-	-
	<b>Mn</b>	0,1489	0,0879	0,1374
	<b>Cr</b>	0,5468	0,0329	0,056
	<b>Ni</b>	0,0513	0,4817	0,0526
	<b>Mo</b>	0,0075	0,0642	0,0092
	<b>Ti</b>	0,0175	0,0199	0,0725
	<b>V</b>	1,4934	0,4134	1,725
	<b>Nb</b>	0,0444	0,0152	0,0313
	<b>W</b>	0,076	0,0772	0,1135
	<b>P</b>	0,0959	0,0149	0,491
	<b>S</b>	0,0388	0,1394	0,0276
	<b>Sn</b>	0,0342	0,0088	0,0832
	<b>B</b>	0,0029	0,0066	0,015
	<b>Pb</b>	0,025	0,002	0,0024
	<b>Al</b>	0,5224	0,0171	0,0203
<b>Cu</b>	0,3286	0,055	0,1094	

Fonte: Próprio autor.

Observação: as porcentagens encontradas para o elemento Silício (Si), são incondizentes com a realidade, devido a esse fato foram desconsideradas. Essa anormalidade deve-se possivelmente a mau funcionamento ou calibração da máquina em questão, visto que todos os resultados apresentaram alteração de suba significativa independente do corpo de provas que foi ensaiado.

Constata-se através desse teste que os aços adquiridos como ABNT 1045 não condizem com as porcentagens para tal, aonde os corpos de prova “A” e “B” apresentaram um teor de carbono superior a um aço ABNT 1050, apesar das discrepâncias apresentadas os aços em questão estão condizentes com a faixa de valores exigida pela norma, porém, o corpo de provas “C” adquirido como um aço ABNT 1020, apresentou um teor de carbono abaixo do esperado, o que pode afetar os testes por possuir uma temperabilidade inferior a solicitada pela norma. Mesmo fora das condições exigidas o material será submetido ao teste de temperabilidade Jominy, com intuito de ser mais uma variável na validação do aparato em questão.

Todos os matérias também apresentam mesmo que em baixa quantidade, elementos de liga, o que em alguns casos pode vir a aumentar a taxa de transferência de calor interna do corpo de provas, assim, aumentando a temperabilidade do aço.

## 5.2. Execução do ensaio de temperabilidade Jominy

Pode-se destacar esse tópico como o resultado mais importante a ser obtido nesse projeto, visto que a principal proposta era a montagem de um aparato totalmente funcional.

Com os corpos de prova já usinados e o dispositivo devidamente aferido, foi executado o ensaio de têmpera conforme a NBR 6339, a Tabela 06, consta nesta norma e prevê as temperaturas de austenitização para têmpera e normalização das amostras de acordo com seu diâmetro.

Tabela 6: Temperaturas de austenitização e têmpera para os aços especificados.

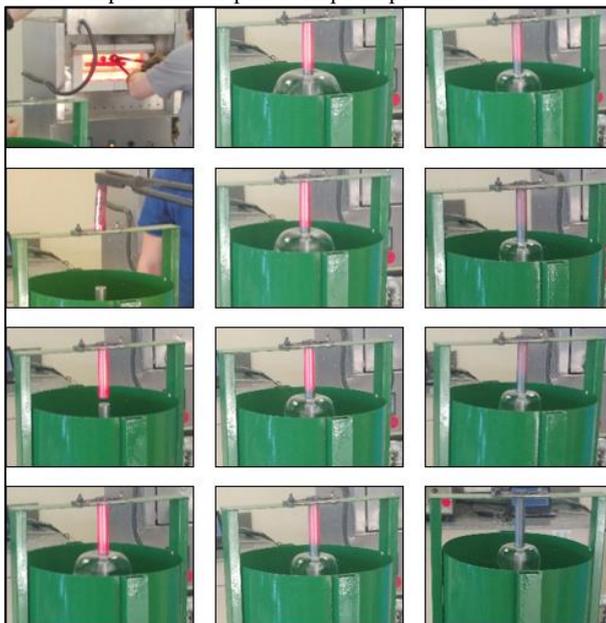
Série "H"	Carbono - C (%)	Temperatura de austenitização (°C) para normalização (A)	Temperatura de austenitização (°C) para têmpera (A)
10XX 13XX-15XX	$C \leq 0,25$	925	925
32XX-41XX-43XX	$0,25 < C < 0,36$	900	870
51XX-61XX (B) 86XX-87XX	$C > 0,36$	870	845
48XX (C)	$C \leq 0,25$	925	845
	$0,25 < C \leq 0,36$	900	815
	$0,36 < C < 0,50$	870	800
92XX	$C > 0,50$	900	870

Fonte: NBR 6339, 1989

O forno permaneceu ligado até atingir uma temperatura de 925°C, inseriu-se então o tarugo de tamanho reduzido, o mesmo permaneceu dentro do forno por um período de 45 minutos. Após o período de austenitização, o corpo de provas foi retirado e inserido no aparato, tomando o devido cuidado para que esse processo não ultrapasse o tempo de 5 segundos entre a saída do forno e abertura da válvula. O ensaio foi realizado durante 10 minutos, e posteriormente completou-se o resfriamento submergindo o corpo de provas em água.

As imagens do resfriamento progressivo do corpo de provas podem ser visualizadas na Figura 28.

Figura 28: Execução do ensaio de temperabilidade para o corpo de provas "A".

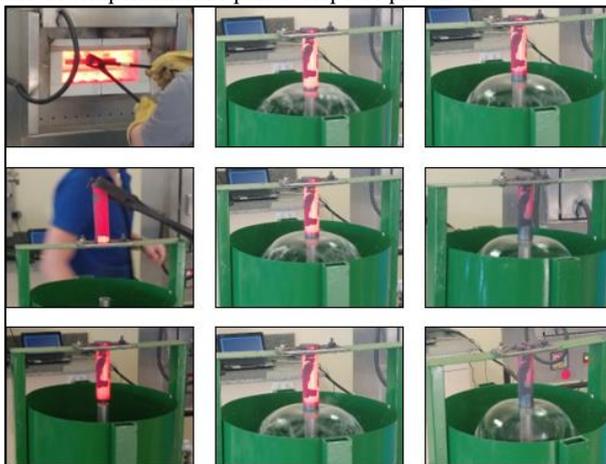


Fonte: Acervo do autor.

O segundo e o terceiro corpos de provas foram colocados no forno logo após a retirada do primeiro, assim que o forno reduziu sua temperatura para 845 °C.

O segundo tarugo ficou no forno por um período de 55 minutos para austenitização, repetiu-se então o processo realizado para o primeiro corpo de provas. Conforme ilustrado parcialmente na Figura 29.

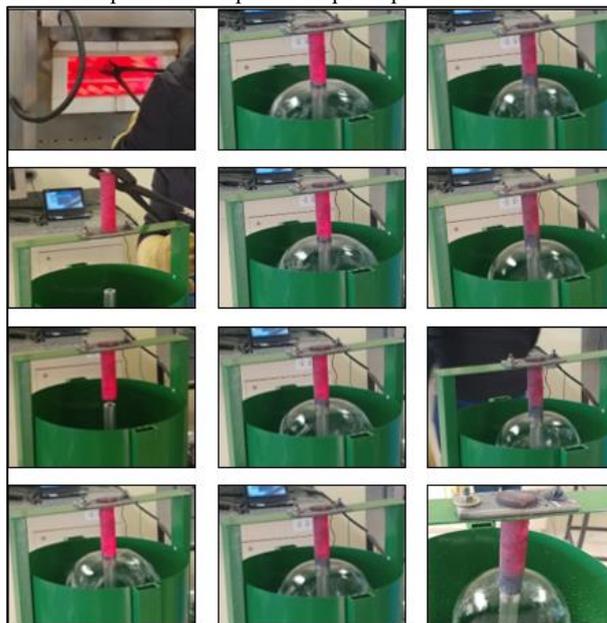
Figura 29: Execução do ensaio de temperabilidade para o corpo de provas "B".



Fonte: Acervo do autor.

A terceira amostra ficou no forno por um período de uma hora e seis minutos, para austenitização. Logo após foi retirada e introduzida no aparato, repetindo então, o ensaio realizado para os corpos de provas 1 e 2. A Figura 30 nos mostra um pouco do ensaio realizado.

Figura 30: Execução do ensaio de temperabilidade para o corpo de provas “C”.



Fonte: Acervo do autor.

Todos os procedimentos realizados ocorreram conforme o previsto, sem interferências externas ou falhas de funcionamento. Observa-se pela cor avermelhada do metal, que sua extremidade em contato com a água rapidamente reduz a temperatura de forma brusca, e assim progressivamente o resfriamento vai atingindo as regiões mais distantes da região de contato.

A água utilizada no resfriamento das amostras encontrava-se a temperatura ambiente, que no dia do ensaio se aproximava de 18 °C.

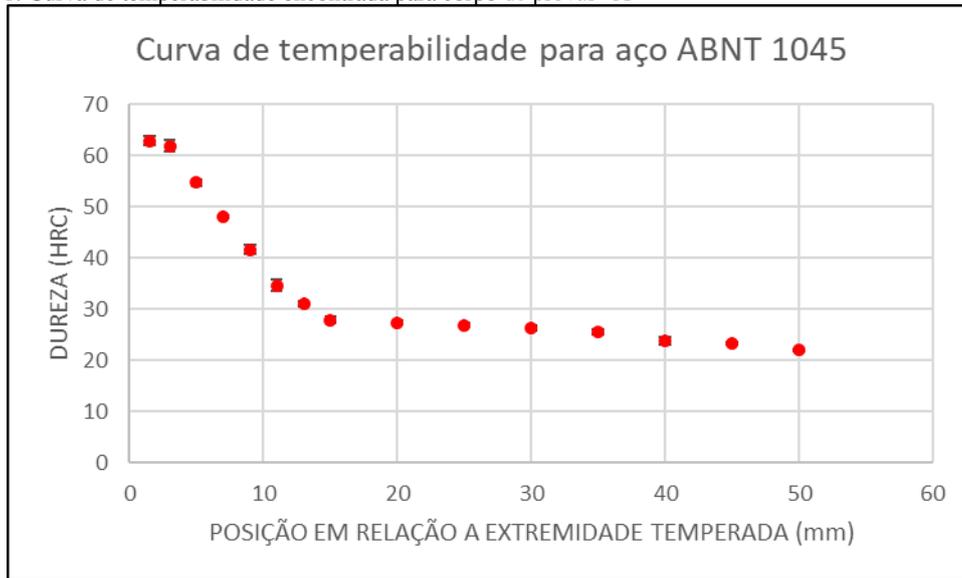
### 5.3. Curvas de temperabilidade obtidas nos ensaios

Através dos resultados ensaiados é possível obter as curvas de temperabilidade Jominy para os três corpos de provas citados anteriormente. as duas séries de medidas obtidas conforme descrito no item 4.2.5, resultaram uma média aritmética das durezas em questão, esses dados combinados com as distâncias expressas na Figura 27, geram as curvas de temperabilidade.

Todas as medidas de dureza foram obtidas em escala HRC, e as distâncias em mm.

### 5.3.1. Corpo de provas “A”:

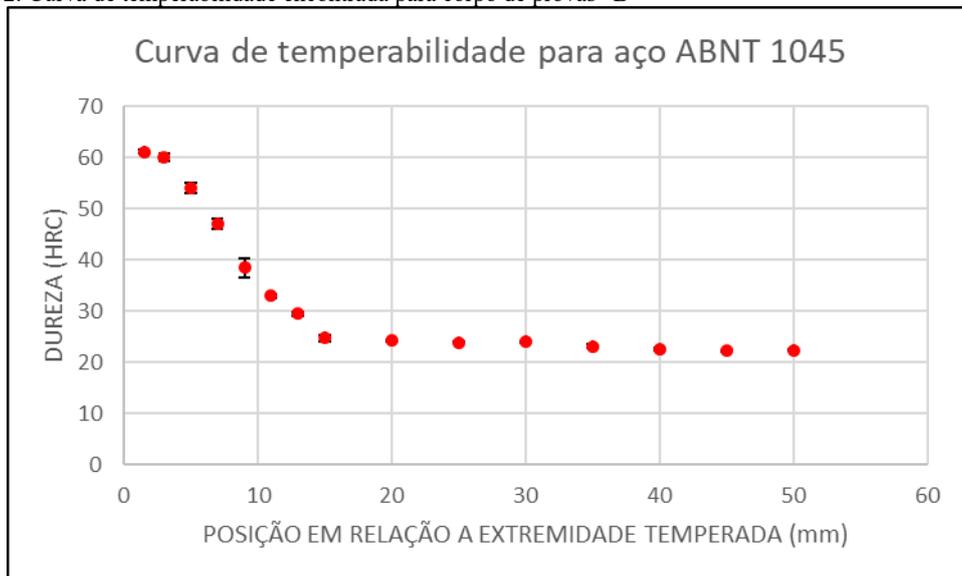
Figura 31: Curva de temperabilidade encontrada para corpo de provas “A”



Fonte: Autoria própria

### 5.3.2. Corpo de provas “B”:

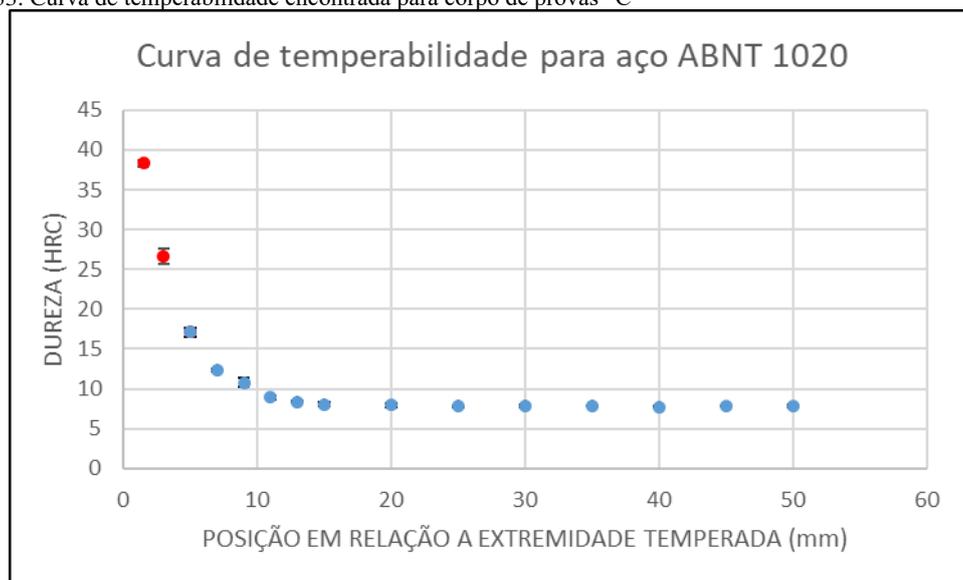
Figura 32: Curva de temperabilidade encontrada para corpo de provas “B”



Fonte: Autoria própria

### 5.3.3. Corpo de provas “C”:

Figura 33: Curva de temperabilidade encontrada para corpo de provas “C”



Fonte: Autoria própria

## 6. DISCUSSÕES

Os resultados obtidos a partir dos testes de dureza são bastante satisfatórios, pois as curvas de temperabilidade Jominy, observadas nas Figuras 31, 32, 33, nos mostram com nitidez um escalonamento decrescente, que representa por sua vez a diminuição da dureza a medida que aumenta a distância da extremidade em contato com a água.

Para uma análise individual do comportamento de cada material submetido aos ensaios anteriores, será utilizada a norma ASTM A255, que nos fornece relação de dureza e faixas de temperabilidade para determinados tipos de aço.

### 6.1. Corpo de provas “A”:

O corpo de provas “A”, foi adquirido como um aço com 0,45% de carbono, e apresentou uma dureza inicial máxima de 62,08 HRC, analisando a norma ASTM A255 para essas condições, temos que a dureza máxima estipulada é de 56 HRC, quando considerado para essa quantidade de carbono, observa-se que a dureza se encontra bem acima da dureza bibliográfica. Porém quando se compara a porcentagem de carbono encontrada a partir do espectrômetro que é de aproximadamente 0,52%, tem-se então, segundo a norma, que a dureza máxima a ser atingida é de 62 HRC, o que deixa os resultados encontrados condizentes com os limites estipulados pela norma.

Vale ressaltar que o presente material apresentou uma dureza relativamente alta nos primeiros 13 mm a partir da extremidade resfriada bruscamente, e estabilizando a partir dos 15 mm em uma dureza próxima a 25 HRC, e se mantendo estável nesses valores ao longo do corpo de provas.

### **6.2. Corpo de provas “B”:**

O corpo de provas “B”, também foi adquirido como aço com 0,45% de carbono, e apesar de apresentar características bem semelhantes ao corpo de provas “A”, foram extraídos de barras distintas.

Tendo apresentado 61,05 HRC de dureza, este material tem o mesmo comportamento do primeiro, quando comparado a um aço ABNT 1045, mostra-se ligeiramente acima da dureza literária, porém, quando comparado a porcentagem de carbono extraída do espectrômetro que é de 0,51%, temos uma dureza literária máxima de 61 HRC segundo a norma ASTM A 255, deixando assim o resultado obtido no limite da dureza máxima.

Ao analisarmos a curva de resfriamento do presente material, nota-se que o material apresentou comportamento praticamente idêntico ao primeiro corpo de provas, boa temperabilidade nos primeiros 13 mm do comprimento, caindo até uma dureza de aproximadamente 25 HRC e se mantendo estável ao longo do corpo de provas.

### **6.3. Corpo de provas “C”:**

Para que fosse realizado um ensaio em um aço de baixa temperabilidade, foi adquirido o corpo de provas “C”, apresentando 0,20% de carbono, apesar da baixa concentração de carbono, este material reagiu bem ao teste de têmpera e apresentou uma dureza inicial de 38,3 HRC, o que o deixa dentro dos limites impostos pela literatura que é de 44 HRC de dureza máxima para um aço ABNT 1020, e de 43 HRC de dureza máxima para um aço com 0,18% de carbono, dureza encontrada a partir do espectrômetro.

Apesar de apresentar uma dureza inicial alta, o material mostrou-se com baixíssima temperabilidade, apresentando uma queda brusca na dureza e atingindo valores inferiores a 20 HRC logo com 5 mm de distância a partir da extremidade resfriada, segundo a norma ASTM A 255, valores encontrados abaixo de 20 HRC, devem ser desconsiderados, sendo assim, o gráfico ilustrado na Figura 33, teve a curva expressa em duas seções, umas para os valores válidos pela norma (acima de 20 HRC) e outra para valores desconsiderados pela norma (abaixo de 20 HRC). Observando a segunda seção pode-se notar que o

tratamento térmico imposto sobre o corpo de provas não surtiu resultados, e a partir de 8 mm, a barra já estava com dureza próxima a 5 HRC, se mantendo assim ao longo de todo o corpo de provas.

## **7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Como principal objetivo esse trabalho propôs a construção de um dispositivo que auxiliasse a comunidade acadêmica a ter uma melhor compreensão do resfriamento dos aços quando submetidos a determinado ciclo térmico. Fenômenos que ocorrem nesses ciclos são debatidos e estudados em sala de aula, mas as análises laboratoriais são de grande valia para a consolidação dessa teoria.

A complementação desses estudos pode em partes ser adquirida com o uso do aparato Jominy, possibilitando o ensaio de vários tipos de aços e aplicações de elementos de liga, permitindo uma comparação sobre o comportamento implicado por cada combinação desses elementos.

Os resultados de dureza obtidos nesse experimento mostram valores condizentes com a norma, apesar dos corpos de prova obtidos a partir de aço ABNT 1045, estarem nos limites máximos impostos pela própria, esse fenômeno pode ser explicado devido a concentrações significativas de elementos de liga presentes em sua composição.

De modo geral as curvas de temperabilidade obtidas apresentaram comportamento característico do método Jominy encontrado na literatura. Também pode se observar que a mudança de cor das amostras durante a execução do ensaio acontece com maior velocidade na extremidade resfriada pelo jato d'água, e assim, aumentando gradativamente até que o corpo de provas seja resfriado por inteiro. Essas duas constatações mostram que o aparato desenvolveu sua função como esperado, deixando o mesmo apto para ser utilizado em aula, pesquisas e futuros estudos em geral, contribuindo assim, para o avanço da qualidade de ensino e de pesquisa na UNIPAMPA\campus Alegrete.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [A] ABNT NBR 6339/89 – Aço – Determinação da Temperabilidade Jominy. 1989.
- [B] ABNT NBR 6612/81 – Aços carbono e aços ligados com temperabilidade garantida.1981.
- [C] ABNT NBR NM 146/98 – Determinação da Dureza Rockwell. 1998.
- [D] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS , Pennsylvania, USA. A 255 89; Standard Method for End-Quench Test for Hardenability of Steel. Philadelphia, PA, 1989. 18p.
- [E] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS , A255 – – 10 (Reapproved 2014) 10 (Reapproved 2014). Standard Test Methods for Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel Determining Hardenability of Steel1
- [F] CALLISTER Jr, W. D. Materials Science and Engineering an Introduction. Fourth Edition. United States, 1997.
- [G] CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5ª Edição, LTC, São Paulo, 2002.
- [H] CHIAVERINI, V., Aços e Ferros Fundidos. 5a ed. ABM, São Paulo, 1984.
- [I] CANALE, L. Temperabilidade. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004
- [J] CIMM. Centro de Informação Metal Mecânica, 2016.
- [K] COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.
- [L] DOBRZANSKI, L.A., SITEK, W. Application of Neural Network In Modelling of Hardenability of Constructional Steels. Journal of Materials Processing Technology, 78 (1998) 59-66.
- [M] MARTINS, M. Temperabilidade jominy e influência do revenido sobre a dureza - Um estudo em aços estruturais nacionais. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 115. 2002.
- [N] KRAUSS, G. Hardness and Hardenability. In: KRAUSS, G. Steels: Heat Treatment and Processing Principles. 2nd ed. Ohio: ASM International, 1990. Chap. 6, pp. 145-178.
- [O] KRAUSS, Steels: Processing, Structure and Performance. Second Edition. ASM International, 2005.

[P] WALTER E. JOMINY, Detroit. Hardenability Test. United States Patent Office. Número serial 291,149. Data de aplicação: 21 de agosto de 1939. Número de Patente 2,266,322. Data de publicação 16 de dezembro de 1941.

## 9. ANEXOS

Anexo 1: Medidas de dureza encontradas para corpo de provas 'A'.

1045	posição (mm)	Medida 1	Medida 2	Média das Medidas	Desvio Padrão
1	1,5	60,8	61,3	61,05	0,353553391
2	3	59,4	60,5	59,95	0,777817459
3	5	53,2	54,6	53,9	0,989949494
4	7	47,7	46,4	47,05	0,919238816
5	9	39,8	37,1	38,45	1,909188309
6	11	32,7	33,2	32,95	0,353553391
7	13	29,7	29,2	29,45	0,353553391
8	15	24,3	25,2	24,75	0,636396103
9	20	24,3	24,1	24,2	0,141421356
10	25	24	23,8	23,9	0,141421356
11	30	24,1	24	24,05	0,070710678
12	35	23,4	22,9	23,15	0,353553391
13	40	22,3	22,7	22,5	0,282842712
14	45	22,3	22,1	22,2	0,141421356
15	50	22,3	22,4	22,35	0,070710678

Anexo 2: Medidas de dureza encontradas para corpo de provas 'B'.

1045	posição (mm)	Medida 1	Medida 2	Média das Medidas	Desvio Padrão
1	1,5	63,4	62,2	62,8	0,848528137
2	3	62,7	61	61,85	1,202081528
3	5	54,3	55,1	54,7	0,565685425
4	7	48,2	47,8	48	0,282842712
5	9	41	42,3	41,65	0,919238816
6	11	35,4	33,8	34,6	1,13137085
7	13	31,5	30,7	31,1	0,565685425
8	15	28,3	27,5	27,9	0,565685425
9	20	27,7	27,1	27,4	0,424264069
10	25	26,7	27,1	26,9	0,282842712
11	30	26,7	25,9	26,3	0,565685425
12	35	25,8	25,1	25,45	0,494974747
13	40	24,4	23,2	23,8	0,848528137
14	45	23,5	23,2	23,35	0,212132034
15	50	22,1	21,8	21,95	0,212132034

Anexo 3: Medidas de dureza encontradas para corpo de provas 'C'.

<b>1020</b>	<b>posição (mm)</b>	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Média das Medidas</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>1</b>	1,5	38,6	38	38,3	0,424264069
<b>2</b>	3	25,9	27,3	26,6	0,989949494
<b>3</b>	5	16,7	17,5	17,1	0,565685425
<b>4</b>	7	12,5	12,3	12,4	0,141421356
<b>5</b>	9	10,4	11,2	10,8	0,565685425
<b>6</b>	11	9,1	8,7	8,9	0,282842712
<b>7</b>	13	8,3	8,4	8,35	0,070710678
<b>8</b>	15	7,9	8,2	8,05	0,212132034
<b>9</b>	20	8,1	7,8	7,95	0,212132034
<b>10</b>	25	7,9	7,8	7,85	0,070710678
<b>11</b>	30	8	7,7	7,85	0,212132034
<b>12</b>	35	7,9	7,9	7,9	0
<b>13</b>	40	7,8	7,7	7,75	0,070710678
<b>14</b>	45	7,8	7,8	7,8	0
<b>15</b>	50	7,9	7,7	7,8	0,141421356