

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

BRUNO FELIPE DOS SANTOS TEIXEIRA

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE TEMPERABILIDADE DO AÇO 1045
ATRAVÉS DO ENSAIO DE JOMINY**

**CASCADEL - PR
2019**

BRUNO FELIPE DOS SANTOS TEIXEIRA

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE TEMPERABILIDADE DO AÇO 1045
ATRAVÉS DO ENSAIO DE JOMINY**

Trabalho apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Professor Orientador: Me. Eng. Mec.
Eliseu Avelino Zanella Júnior**

**CASCADEL - PR
2019**

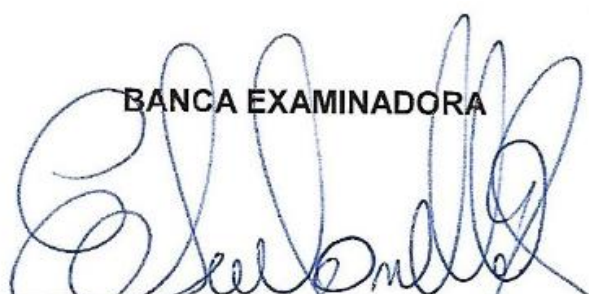
CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

BRUNO FELIPE DOS SANTOS TEIXEIRA

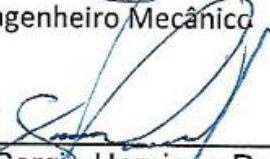
**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE TEMPERABILIDADE DO AÇO 1045
ATRAVÉS DO ENSAIO DE JOMINY**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do Professor Me. Eng. Mec. Eliseu Avelino Zanella Junior.

BANCA EXAMINADORA



Orientador Prof. Me. Eliseu Avelino Zanella Junior
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico



Prof. Me. MBA. Sergio Henrique Rodrigues Mota
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico



Prof. MBA. Geovane Duarte Pinheiro
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Controle e Automação

Cascavel, 27 de junho de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que, de alguma forma,
apoiaram-me e me incentivaram nesta jornada,
em busca do sucesso e do conhecimento,
para a conclusão deste momento ímpar em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família, que sempre me deu o aporte e entendimento necessários, durante esses longos cinco anos batalhados, para chegar a este momento.

Meu agradecimento também a todos amigos e colegas de faculdade, pelo apoio durante a graduação.

Igualmente, agradeço aos professores do Curso de Engenharia Mecânica da FAG que não mediram esforços para transmitir conhecimento e pelo apoio nas multidisciplinariedades das matérias.

Com grande estima, meu agradecimento especial ao meu orientador, Mestre Eliseu Avelino Zanella, por dispor de seu tempo e por toda a dedicação no desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

A temática temperabilidade do aço está em constante renovação. Por essa razão, jamais será considerada como algo estático na área da Engenharia. Diante disso, as pesquisas relacionadas ao tema vêm ganhando, cada vez mais, destaque, pois constituem um campo de inúmeras possibilidades de investigação. Sendo assim, o propósito da presente pesquisa se volta à análise da capacidade de temperabilidade, de modo especial, de aço SAE 1045, por intermédio do ensaio Jominy. Com o objetivo de desenvolver um equipamento experimental para a realização de ensaios pelo método Jominy, também conhecido como ensaio de resfriamento da extremidade, associa-se a este objetivo a análise dos pontos de dureza no material, antes e após o processo, fundamentais para a identificação de mudanças. Sob essa perspectiva, o propósito foi o de construir um sistema prático, confiável e eficaz, a fim de analisar a temperabilidade do aço SAE 1045. Para a eficácia do procedimento metodológico, foi utilizada a norma NBR 6339/89 da ABNT na qual são descritos os passos para realização do ensaio Jominy. Semelhantemente a todas as pesquisas já realizadas no mesmo seguimento, foram utilizados corpos de prova cilíndricos, bem próximos aos utilizados nos estudos de referência, visando à obtenção de um melhor aproveitamento do método Jominy. Com os resultados de dureza, pôde-se realizar a comparação com os já referidos na literatura para o aço SAE 1045, podendo-se, igualmente, comparar as curvas que, desde o princípio da pesquisa, corresponderam ao interesse primário e ao foco principal desta, juntamente com a validação do equipamento desenvolvido.

Palavras-chave: Ensaio Jominy. Dureza. Temperabilidade.

ABSTRACT

The temperamental theme of steel is in constant renewal. For this reason, it will never be considered as something static in the area of Engineering. Faced with this, the researches related to the subject have been gaining, more and more, prominence, since they constitute a field of numerous possibilities of investigation. Thus, the purpose of this research is to analyze the temperability capacity, especially of SAE 1045 steels, through the Jominy Assay. In order to develop experimental equipment for the Jominy test, also known as the end-cooling test. The objective of this study is to analyze the fundamental hardness points in the material, before and after the process to identify changes. From this perspective, the purpose was to build a practical, reliable and efficient system to analyze the temperability of SAE 1045 steels. For the effectiveness of the methodological procedure, ABNT Standard NBR 6339/89 was used in which they are described the steps for performing the Jominy Assay. Similar to all the research already carried out in the same follow-up, cylindrical specimens were used, very close to those used in the reference studies, in order to obtain a better use of the Jominy method. With the results of hardness, the SAE 1045 steel can be compared with those already mentioned in the literature, and it is also possible to compare the curves that, from the beginning of the research, corresponded to the primary interest and the main focus of this research, along with the validation of the equipment developed.

Keywords: Jominy test. Hardness. Temperability.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1:	Fluxograma dos principais tratamentos térmicos aplicados aos aços.....	17
FIGURA 2:	Produtos providos das velocidades de resfriamento da Austenita.....	18
FIGURA 3:	Efeitos do tratamento térmico no diagrama TTT.....	19
FIGURA 4:	Curva de temperabilidade pelo ensaio Jominy.....	19
FIGURA 5:	Curva de temperabilidade de diferentes aços.....	20
FIGURA 6:	Dimensões padronizadas do corpo de provas Jominy.....	21
FIGURA 7:	Dispositivo de têmpera do ensaio Jominy; Medidas de dureza na amostra após a têmpera.....	22
FIGURA 8:	Posição na curva versus diâmetro das barras.....	23
FIGURA 9:	Fluxograma dos procedimentos utilizados.....	24
FIGURA 10:	Corpo de prova.....	25
FIGURA 11:	Início da execução do aparato.....	25
FIGURA 12:	Adaptação e melhorias no aparato.....	26
FIGURA 13:	Finalização do aparato.....	27
FIGURA 14:	Temperaturas de temperabilidade garantida.....	27
FIGURA 15:	Corpo de prova no dispositivo em resfriamento.....	28
FIGURA 16:	Corpo de prova retificado e medições para realização de testes.....	28
FIGURA 17:	Durômetro Mitutoyo.....	29
FIGURA 18:	Curva de temperabilidade obtida.....	30
FIGURA 19:	Curva de temperabilidade da literatura.....	30

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Dimensões de proporções de elementos de liga.....	21
TABELA 2: Durezas encontradas no corpo de prova.....	29

LISTA DE SIGLAS

- ABNT –** Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ASTM –** American Society for Testing and Materials
- CIMM –** Capability Im-Maturity Model
- NBR –** Norma Brasileira
- SAE –** Society of Automotive Engineers
- TTT –** Tempo-temperatura-transformação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	OBJETIVOS.....	12
1.1.1	Objetivo Geral.....	12
1.1.2	Objetivos Específicos.....	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	12
1.3	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1	SEVERIDADE DE TÊMPERA.....	15
2.2	IMPORTÂNCIA DO MÉTODO JOMINY.....	16
2.3	TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS.....	16
2.4	TÊMPERA.....	17
2.5	EFEITOS DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA DUREZA.....	18
2.6	ENSAIO DE TEMPERABILIDADE JOMINY.....	19
2.7	APLICAÇÃO PRÁTICA DO ENSAIO JOMINY.....	22
3	METODOLOGIA.....	24
3.1	Materiais.....	24
3.1.1	Fabricação do dispositivo.....	24
3.1.2	Execução do ensaio.....	27
3.1.3	Teste de dureza.....	29
4	RESULTADO E DISCUSSÕES.....	30
4.1	CURVA DE TEMPERABILIDADE OBTIDA NO ENSAIO.....	30
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	32
	REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

Os materiais estão inseridos em nossa cultura muito mais do que imaginamos, nos transportes, na habitação, no vestuário, na comunicação, na recreação e na produção de alimentos. Nossas vidas, diariamente, são influenciadas pelos materiais com maior ou menor usualidade. Desde o início dos tempos, o desenvolvimento e o avanço estão interligados com a habilidade de produção e manipulação de materiais, satisfazendo, com isso, as necessidades da civilização. De fato, as civilizações passadas, a exemplo da Idade da Pedra, Idade do Bronze, entre outras, eram designadas pelo seu nível de manipulação dos próprios materiais (CALLISTER, 1999).

Com base nessas premissas, os aços e inúmeras outras ligas ferrosas possuem uma grande importância na construção mecânica, o que favorece uma manipulação mais versátil, pelo fato de apresentarem durabilidade, ductibilidade e resistência mecânica. Sendo assim, a escolha do material para determinadas operações deve passar por uma seleção criteriosa de suas propriedades mecânicas, adequando-se às necessidades de seu respectivo emprego. De modo especial, no tratamento térmico, denominado têmpera, ocorre uma maneira diferente para cada material.

A partir disso, a temperabilidade dos aços é definida como capacidade ou habilidade de aumento de resistência mecânica, por exemplo, aumento da dureza, através da forma martensítica, que é uma estrutura que apresenta dureza elevada. Uma liga que possui uma alta temperabilidade constitui uma forma martensítica, não apenas na superfície, mas em elevado grau também em todo seu interior e comprimento, conforme estudos de Chiaverini (1986). e da Capability Im-Maturity Model (CIMM, 2016).

Entre os métodos para avaliar a temperabilidade dos aços estão o Grossmann e o Jominy. Como já mencionamos, o ensaio Jominy também pode ser chamado de ensaio de resfriamento de extremidade. Esta última denominação é a mais utilizada na avaliação de temperabilidade na indústria, o que comprovaremos mais adiante.

Ao fazermos o resfriamento do corpo de prova em uma das extremidades, podemos obter diferentes taxas ao longo do comprimento do mesmo. Caso a dureza no corpo de prova seja homogênea, a temperabilidade do material será elevada. No entanto, caso a dureza diminua na extremidade oposta ao resfriamento, então, podemos detectar uma temperabilidade baixa.

Com a realização do ensaio Jominy e a obtenção de durezas, através do resfriamento nos diferentes pontos do corpo de prova, podemos identificar a dureza no interior dos corpos de prova resfriados nas mesmas condições. A partir disso, as curvas de Jominy podem ser utilizadas nas distribuições de dureza em aços de diferentes dimensões, inclusive, através de outros meios de resfriamento não abordados neste estudo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Construir e analisar um equipamento para realização do ensaio Jominy, utilizando aço SAE 1045, com base na NBR 6339/89 da ABNT.

1.1.2 Objetivos Específicos

Fabricar bancada para realização do ensaio Jominy.

Analisar os resultados obtidos através da realização do ensaio de dureza.

Avaliar e validar o equipamento com base na literatura.

1.2 JUSTIFICATIVA

Em todos os segmentos da indústria, os aços são considerados instrumentos fundamentais desde a matéria-prima até os produtos processados. Esses materiais, ao longo dos anos, vêm incorporando inúmeros processos. Para tanto, tem sido de extrema importância a realização de métodos de temperabilidade, a exemplo do Jominy.

A partir deste método, podemos determinar uma boa aproximação de mudança de propriedade e de dureza e selecionar os melhores materiais para utilizar na indústria. Esta mudança de propriedades mecânicas ocorre de maneira diferente para cada material, pois a taxa de resfriamento depende diretamente da dimensão, do modo de resfriamento utilizado e da temperatura de austenização do material. Logo, peças grandes possuem baixas taxas de resfriamento.

Segundo Callister (1999), a noção de propriedade merece destaque, uma vez que, em uso, todos os materiais estão expostos a estímulos externos que provocam algum tipo de resposta, por exemplo, uma amostra sujeita a forças pode experimentar uma deformação, ou se o material usado for de superfície metálica polida pode refletir a luz. Propriedade é, portanto, uma peculiaridade do material que corresponde ao tipo e à intensidade de resposta, isto é, um estímulo específico que lhe é imposto.

Geralmente, as definições das propriedades são feitas de maneira independente da forma e do tamanho do material, o que possibilita a seleção mais adequada e econômica do aço em processos. Sendo assim, a utilização do ensaio Jominy, na realização de temperabilidade em aços, é uma alternativa viável, confiável e econômica.

1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa caracterizada como qualitativa foi realizada nas dependências do Centro Universitário Assis Gurgacz, na região oeste do Paraná, na cidade de Cascavel.

Para a sua delimitação, consideramos o desenvolvimento de testes, focando o tema temperabilidade dos materiais. Sendo assim, realizamos a construção do equipamento e a utilização do forno para aquecimento do material utilizado nos testes com o devido recolhimento dos resultados para análise.

Importante salientar que, para as medições, foi necessário utilizarmos um durômetro. Já para a fabricação do aparato, utilizamos materiais dispostos por empresas parceiras, assim como todos os serviços de usinagem e solda. Vale ressaltarmos que, nas análises, levamos em consideração apenas a utilização do material SAE 1045 (Society of Automotive Engineers).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta contemporaneidade, muitas empresas do setor de metal mecânica e tratamento térmico estão passando por processos de atualização, o que justifica a necessidade e a importância da escolha de materiais adequados.

Em conformidade com Garcia, Spim e Santos (1999), todo projeto de um componente mecânico, ou mais amplamente, todos os projetos de Engenharia requerem, para sua viabilização, um vasto estudo das características, das propriedades e do comportamento dos materiais disponíveis. As especificações de escolha de cada material para realização dos ensaios devem seguir métodos normatizados que demonstrem as propriedades mecânicas e seus comportamentos em cada condição de esforço e uso.

Essa normalização é de extrema importância, pois, só assim, pode ser estabelecida uma linguagem comum entre usuários e fornecedores de materiais, já que a realização de ensaio de recebimento dos materiais encomendados, a partir de uma amostragem estatística representativa do volume recebido, é prática comum.

Com base nesse pressuposto, Callister (1999) afirma que o desenvolvimento de muitas tecnologias que tornam nossa existência tão confortável tem estado intimamente associado com a acessibilidade a materiais adequados. Desse modo, é admissível considerarmos que um avanço na compreensão de um tipo de material é frequentemente o precursor da progressão escalonada de uma tecnologia, a exemplo dos automóveis, haja vista que a existência destes não seria possível sem a disponibilidade de aço a baixo custo ou de algum outro material comparável.

Cientes da necessidade de escolha dos materiais adequados, torna-se imprescindível a utilização de tratamentos térmicos. Para Callister (1999) e Canale (2004), o desempenho dos metais e de suas ligas metálicas em suas funcionalidades depende não só de suas propriedades mecânicas, mas, principalmente, da composição química, da estrutura cristalina, do histórico de processamento e dos tratamentos térmicos realizados. Desse modo, podemos afirmar que os tratamentos são ciclos de aquecimento e resfriamento controlados que causam alterações em sua microestrutura.

De forma simplificada, a temperabilidade dos aços pode ser definida como a capacidade ou a habilidade do aumento de resistência mecânica. A alta temperabilidade de uma liga pode, assim, ser vista pela sua capacidade de formar

martensita em toda a extensão da peça, incluindo seu interior e comprimento (CIMM, 2016).

Complementarmente, Costa e Mei (2006) esclarecem que a temperabilidade tem como fundamento básico a habilidade do aço de obter dureza ao longo de sua seção transversal, bem como a capacidade de formar martensita em determinadas profundidades.

Consoante estudos de Colpaert (2008) e Costa (2006), temperabilidade ou profundidade de penetração equivale à característica que define a variação de dureza da superfície até o núcleo da peça após esta passar pelo processo de tratamento térmico. Por essa razão, associa-se à capacidade de determinado aço formar martensita e à velocidade crítica de têmpera.

Ademais, o tamanho de grão austenítico e a homogeneidade da microestrutura inicial (austenita) têm efeito sobre a temperabilidade do aço. Dessa forma, cada fase ou microconstituente do aço equivale a um tipo de estrutura cristalina. Em consequência, cada fase almejada deve ser obtida através de um tratamento térmico específico (BORTOLETO, 2010).

Para Kraus (2005), o conceito de temperabilidade diz respeito à susceptibilidade do endurecimento por resfriamento rápido ou à propriedade, em ligas ferrosas, que determina a profundidade e a distribuição de dureza produzida por têmpera, sendo que a principal causa do endurecimento é a formação e a presença de martensita. Nesse sentido, a temperabilidade também pode ser definida como a capacidade de um aço se transformar, parcial ou totalmente, de austenita para martensita a uma dada profundidade, quando resfriado sob certas condições.

2.1 SEVERIDADE DE TÊMPERA

A severidade de têmpera corresponde à capacidade de extração de calor que o meio refrigerante tem sobre as superfícies dos aços e sua referência é a utilização da água a uma temperatura de 18°C, com a severidade estabelecida em $H=1$. Nos dias atuais, existem quatro métodos de têmpera mais utilizados: salmoura, água, óleo e ar. A água produz maior severidade no processo, seguida pelo óleo, pela salmoura e pelo ar. Outro fator que merece destaque ao nos referirmos à severidade da têmpera é a agitação do refrigerante durante o processo (OLIVEIRA, 1994).

2.2 IMPORTÂNCIA DO MÉTODO JOMINY

A técnica de têmpera tem sido usada há muito tempo. Entretanto, esta técnica de endurecimento de metais sempre foi utilizada empiricamente, sem análise científica ou sob padrões de transformações. Por meio do ensaio Jominy, tornou-se possível determinarmos se um aço pode ser suficientemente endurecido em diferentes meios e diferentes diâmetros (MARTINS, 2002).

Com o avanço da indústria na utilização desse procedimento, podemos determinar com boa aproximação à dureza de cilindros de aço temperados. Contudo, a velocidade de resfriamento de uma peça depende do tamanho, do meio de resfriamento e da temperatura de têmpera, pois quanto maior for a peça, mais diminui a taxa de resfriamento na superfície e interior da mesma. Por isso, a vantagem de selecionarmos um aço mais econômico e de baixo teor de carbono que possa atender à dureza indicada. Da mesma forma, a importância da utilização do ensaio Jominy na temperabilidade dos aços.

2.3 TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS

Podemos definir tratamento térmico dos aços como o conjunto de operações usadas para alterar as propriedades físicas e químicas de um determinado material, alterando-o e deixando-o com características desejadas. O respectivo processo tem como premissa o aquecimento e o resfriamento de um material sob condições controladas de tempo, temperatura, atmosfera e velocidade de resfriamento, a fim de aquecer e resfriar controladamente um material, podendo modificar suas propriedades mecânicas (UNTERWIESER; HOWARD; JAMES, 1982).

As características dos aços estão ligadas diretamente a suas propriedades e à sua estrutura. Como sabemos, os tratamentos térmicos visam, em diferentes escalas, alterar essas propriedades, com o intuito de melhorar a capacidade de utilização do material. Isso porque há uma diminuição nas tensões internas, como também aumento de resistência mecânica, usinabilidade, resistência ao desgaste e ductibilidade, o que reduz ou aumenta a dureza.

Os diferentes arranjos da estrutura cristalina dos aços equivalem a diferentes fases ou microconstituintes. Nesse sentido, cada fase almejada deve ser obtida

através de um tratamento térmico específico (BORTOLETO, 2010). A Figura 1 representa alguns dos principais métodos de tratamento térmico dos aços.

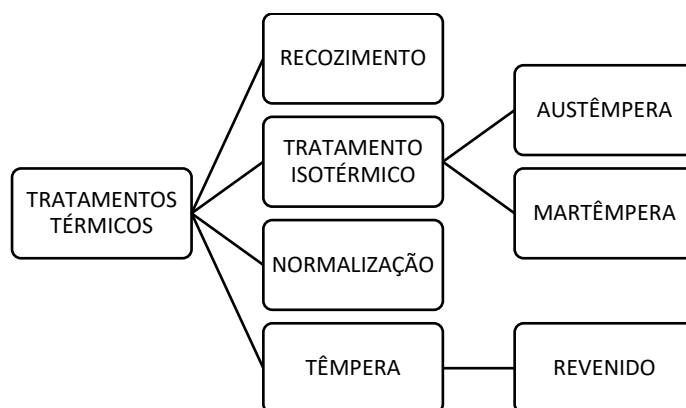


Figura 1: Fluxograma dos principais tratamentos térmicos aplicados aos aços

(Fonte: O autor, 2019)

2.4 TÊMPERA

A têmpera é um processo de tratamento térmico que tem como premissa o aumento da dureza e da resistência dos aços. Podemos dividir a têmpera em duas etapas: aquecimento e esfriamento rápido. O aquecimento tem o objetivo de reorganizar os cristais do metal. Esta fase é denominada austenitização. Já o resfriamento brusco tem o objetivo de atingir a estrutura martensita na qual os cristais ficam muito mais próximos do que antes (OLIVEIRA, 1994).

Na têmpera, o aquecimento é superior à temperatura crítica, que se aproxima de 727°C e sua finalidade é a de conduzir o aço para um melhor arranjo dos cristais, aproximando-o ainda mais, para obtenção da dureza desejada. Caso necessário, ao passar pela fase de arranjo, o aço pode ser submetido novamente a novos métodos.

A temperatura utilizada varia de aço para aço em virtude de suas composições. Pelo fato da têmpera de diferentes peças ser obtida em distintas temperaturas, devem ser levados em considerações vários fatores que podem interferir no processo. Um dos fatores corresponde ao tempo em que a peça fica exposta à temperatura de austenitização, o que é relevante no processo de têmpera.

A segunda etapa que se dá pelo resfriamento deve ser ligeiramente rápida em óleo ou água. Quanto mais rápido o resfriamento, melhor o resultado, pois, assim, há garantia de que o aço não mude para uma fase diferente daquela obtida na

temperatura de austenização (obtenção da estrutura martensítica). Após a têmpera, a maioria dos processos passam pela utilização do revenimento, conforme Figura 2.

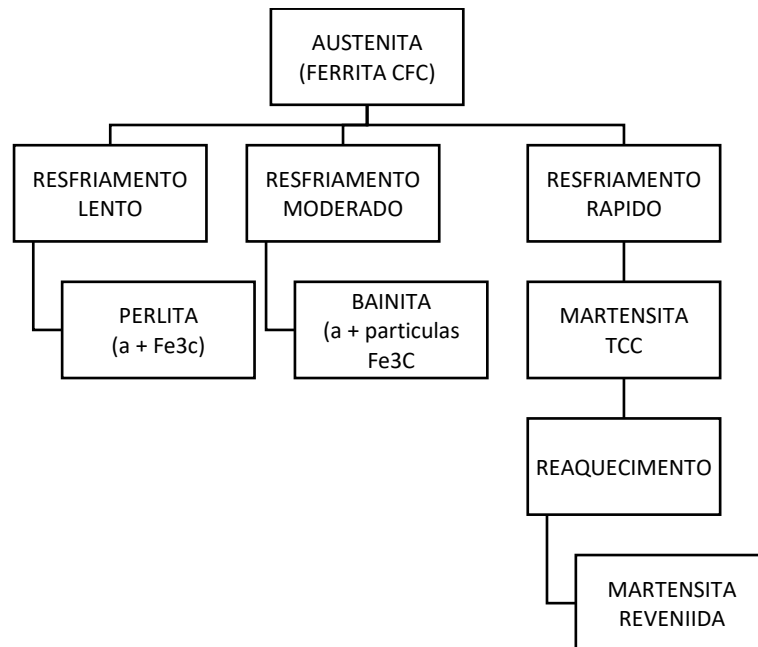


Figura 2: Produtos providos das velocidades de resfriamento da Austenita

(Fonte: O autor, 2019)

2.5 EFEITOS DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA DUREZA

No setor industrial, os tratamentos mais utilizados são a normalização, o recozimento, a têmpera e o revenimento. A normalização busca refinar os grãos, garantindo um material mais homogêneo em suas propriedades e uma maior tenacidade. No recozimento, geralmente, a busca é por uma estrutura mais dúctil de menor resistência e dureza e com maior tenacidade, possibilitando também o alívio das tensões (MARTINS, 2002).

A têmpera, principal processo utilizado industrialmente, serve para aumentar a resistência dos aços, deixando-os com elevada dureza. Essa maior resistência é causada pela formação de martensita após realização do resfriamento brusco. Ao passar pela têmpera, o material adquire elevadas tensões internas e defeitos na microestrutura. Com isso, torna-se essencial a realização do revenimento, aplicado com o propósito de realizar o aumento da ductibilidade e alívio das tensões, formando, assim, a martensita revenida. A Figura 3 ilustra os efeitos do tratamento térmico no diagrama tempo-temperatura-transformação (TTT).

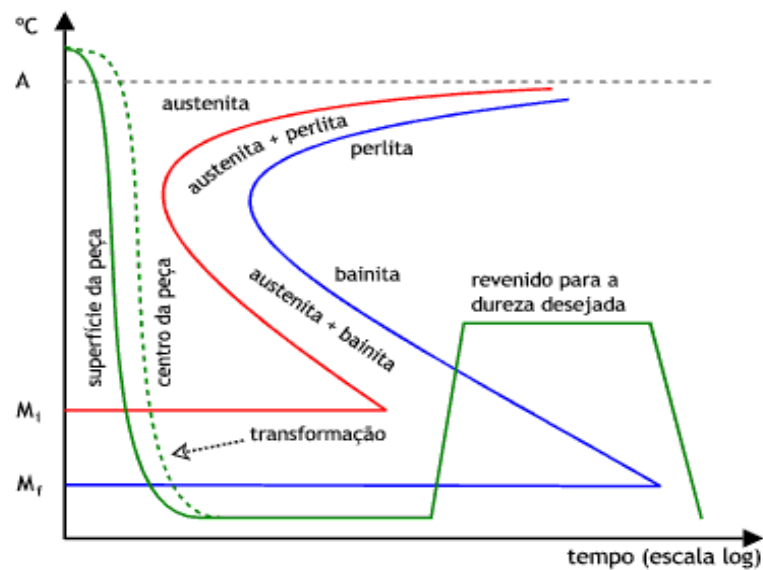


Figura 3: Efeitos do tratamento térmico no diagrama TTT

(Fonte: UNISANTA, 2016)

2.6 ENSAIO DE TEMPERABILIDADE JOMINY

De acordo com Callister (1999), o ensaio de temperabilidade recebe este nome por ter sido desenvolvido por Walter Jominy e é método mais utilizado na indústria metalúrgica. Com ele, podemos definir, de forma prática, o aumento de martensita no aço, utilizando como corpo de prova uma barra redonda de tamanho determinado, com ação de variadas taxas de resfriamento no decorrer de seu comprimento.

Para realização do ensaio, é preciso, primeiramente, o aquecimento do aço, a fim de atingir o campo austenítico, para, então, resfriá-lo rapidamente através de uma corrente de água em uma das extremidades em condições padronizadas. Após o resfriamento, são feitas medições de dureza ao longo do corpo de prova. A Figura 4 ilustra devidamente a curva de temperabilidade no corpo de prova.

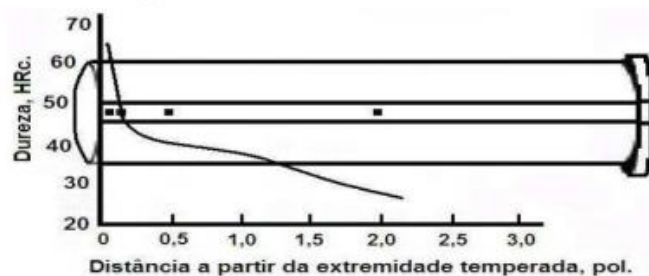


Figura 4: Curva de temperabilidade pelo ensaio Jominy

(Fonte: Adaptação de COSTA; MEI, 2006)

Na Figura 4, podemos perceber que há uma diminuição na dureza. Conforme o aumento da distância das extremidades, pode-se notar uma queda acentuada na dureza devido ao resfriamento unidirecional. Com esse padrão, percebemos que diferentes aços podem ser comparados quanto à sua temperabilidade. Os aços com maior número de carbono tendem a se manter com maior dureza, mesmo para posições distantes da extremidade temperada, como é o caso do aço AISI 4340 da Figura 5.

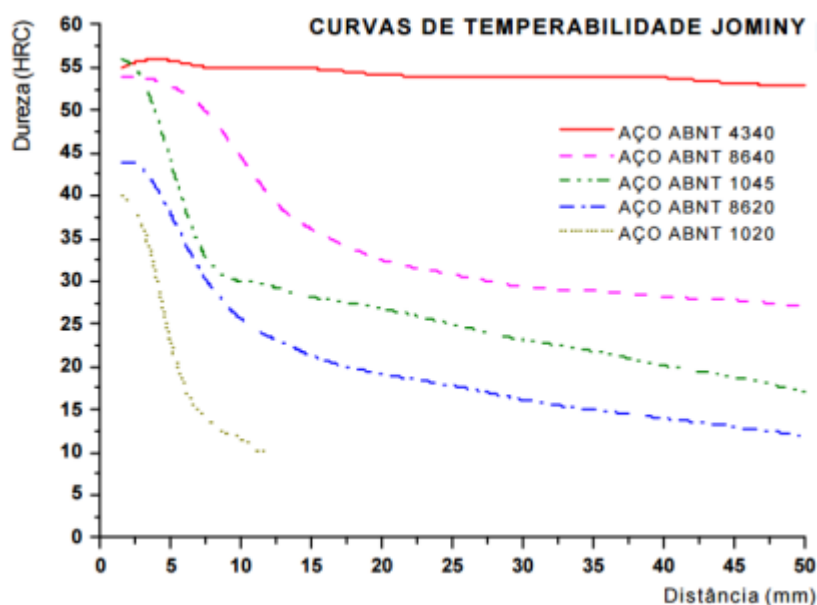


Figura 5: Curva de temperabilidade de diferentes aços
(Fonte: ABM Week, 2015)

A maior vantagem da utilização do ensaio Jominy é que podemos obter, em um único corpo de prova, velocidades de resfriamento variadas, o que deixa a peça com diferentes durezas no decorrer do seu comprimento. Assim, cada posição da barra tem uma taxa de resfriamento conhecida.

O ensaio Jominy é regido pela norma ASTM A255, da American Society for Testing and Materials. Ao utilizarmos um corpo de prova com dimensões normatizadas, a amostra deve ter 1 polegada (25,4 mm) de diâmetro e possuir um comprimento de 4 polegadas (101,6 mm), com um jato de água localizado abaixo do referido corpo de prova com 0.5 polegadas (12,7 mm) de diâmetro, como podemos verificar na Figura 6.

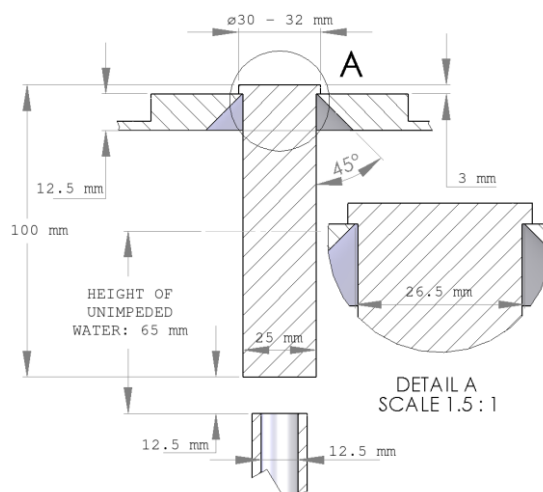


Figura 6: Dimensões padronizadas do corpo de provas Jominy

(Fonte: Norma ASTM A255, 2014)

A norma também define limites máximos e mínimos para os elementos de liga, como podemos ver na Tabela 1. É fundamental que as proporções das ligas metálicas para padronização dos resultados sejam mantidas, podendo ser comparadas com pesquisas e dados da literatura, bem como com resultados obtidos em outros ensaios já realizados.

Tabela 1: Dimensões de proporções de elementos de liga

Elemento	Variação 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: Norma ASTM A255, 2014)

O ensaio Jominy consiste, basicamente, em aquecer o corpo de prova até alcançar sua zona de austenitização. Após o aquecimento, é submetido a um resfriamento ligeiramente rápido. A Figura 7 demonstra perfeitamente o aparato utilizado no processo o qual possui um reservatório para onde é enviado o fluido refrigerante através de tubulação e registro. Neste, é enviado um jato de fluido em uma das extremidades do corpo de provas. Importante enfatizarmos que o fluxo é previsto pela norma, assim como a abertura da válvula.

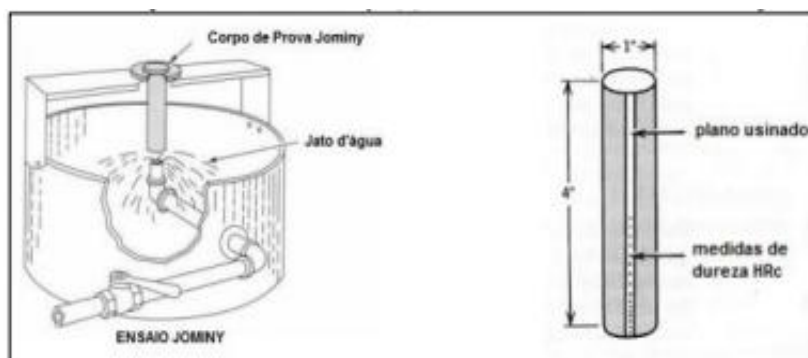


Figura 7: Dispositivo de têmpera do ensaio Jominy; Medidas de dureza na amostra após a têmpera

(Fonte: CALLISTER, 1999)

Após o resfriamento completo da peça, é necessário que a seção longitudinal do corpo de provas passe pelo processo de retífica e tenha uma profundidade de 0,5 a 0,9 mm, para que sejam realizadas as medições de durezas ao longo da seção de retífica.

O processo inicia pela extremidade com maior contato com o fluido refrigerante, e as durezas devem ser medidas no intervalo de $1/16''$ para os primeiros 12,8 mm e, após, seguir a um passo de $1/8''$ para os próximos 38,4 mm de distância de cada ponto. Após o tempo de dez minutos, com o processo de têmpera finalizado, torna-se possível a escolha entre mergulhar o corpo de prova na água ou deixá-lo resfriar ao ar livre de acordo com a ABNT NBR 6339.

2.7 APLICAÇÃO PRÁTICA DO ENSAIO JOMINY

Por intermédio das expertises adquiridas, após a realização do ensaio associado a teorias que fundamentam o estudo, materiais com melhor desempenho mecânico e baixo custo na sua produção tornam-se mais acessíveis. De maneira similar, com conhecimento das condições de resfriamento e durezas obtidas pelo ensaio Jominy, torna-se mais fácil a obtenção da dureza no interior da peça resfriada nas mesmas condições.

Desse modo e desde que tenha sido realizado o processo de têmpera, as curvas Jominy permitem prever a distribuição de dureza em diferentes tamanhos e dimensões de peças que tenham passado por outros meios de resfriamento, comparando com as velocidades em diferentes pontos da peça.

Tal comparação torna-se evidente com o auxílio do gráfico de Lamont, ilustrado na Figura 8. Este gráfico serve para localizar as velocidades de resfriamento em posições diferentes na barra, desde o centro até a superfície, apenas quando resfriadas em condições normais, através da submersão total em refrigerante. Conhecida a velocidade de resfriamento em cada posição, o uso do gráfico Jominy favorece a tomada de conhecimento da dureza.

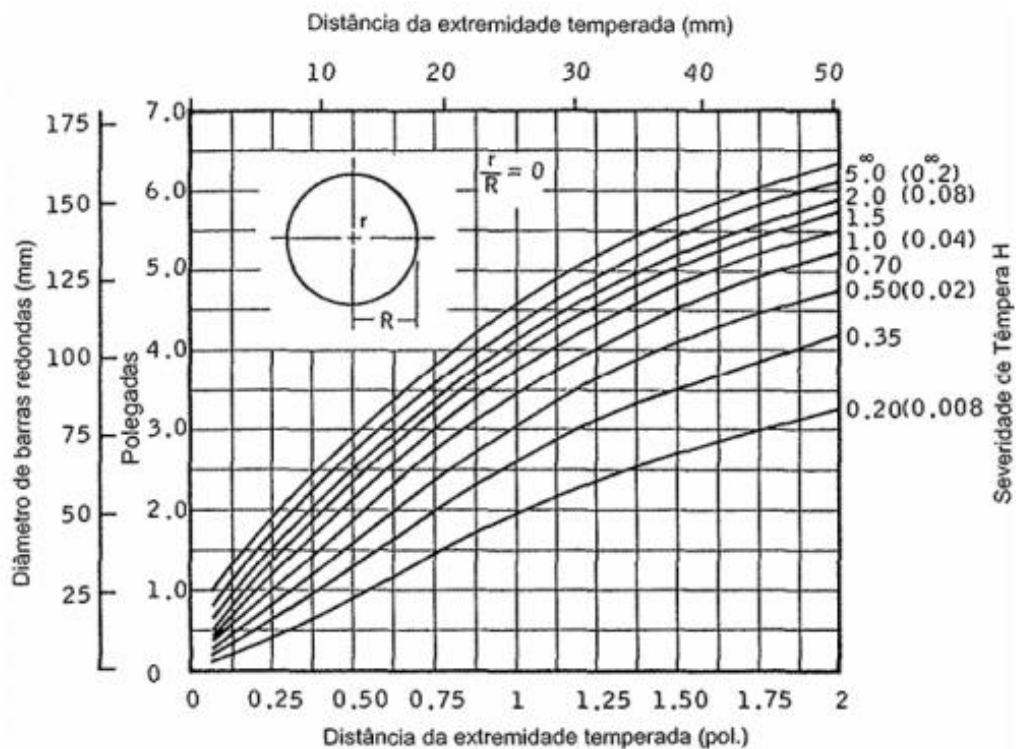


Figura 8: Posição na curva versus diâmetro das barras

(Fonte: SIEBERT; DOANE; BREEN, 1977)

3 METODOLOGIA

A metodologia usada na execução do trabalho segue, de forma sucinta, a relação estabelecida no fluxograma que estrutura a Figura 9.

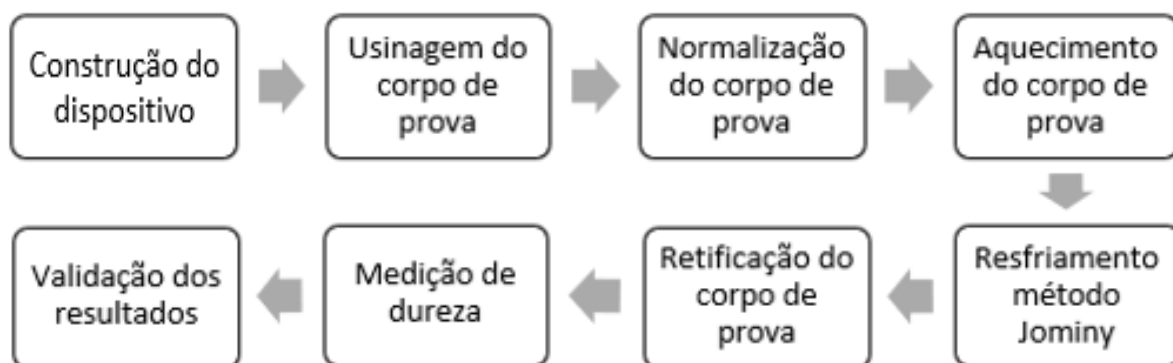


Figura 9: Fluxograma dos procedimentos utilizados

(Fonte: O autor, 2019)

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Fabricação do dispositivo

Para a fabricação do dispositivo Jominy, foram utilizados os seguintes materiais:

- a) galão de chapa fina;
- b) tubo de aço ½" para fluxo de água;
- c) mangueira polimérica utilizada para escapa e alimentação de água;
- d) chapa de 2mm para suporte;
- e) tubo retangular 40x20mm.

Para a realização do ensaio, foram necessários os seguintes itens:

- a) corpo de prova conforme mostrado na figura 6;
- b) forno para tratamento térmico com temperatura máxima de 1000°C;
- c) torno convencional;
- d) retífica plana;
- e) durômetro Mitutoyo;
- f) lixadeira;
- g) solda Mig Mag.

A construção do dispositivo Jominy deve obedecer aos requisitos dispostos na norma ABNT NBR 6339, atendo-se à manutenção do fluxo de água constante e alinhado à parte inferior do corpo de prova. Além disso, deve ser mantido a uma altura mínima entre a saída do tubo e da extremidade do corpo de prova.

O corpo de prova também deve ser fabricado em conformidade com a respectiva norma. Dessa forma, deve ser selecionado o tipo convencional de diâmetro de 25,4 por 101mm de comprimento, conforme Figura 10.



Figura 10: Corpo de prova

(Fonte: O autor, 2019)

Para a construção do dispositivo Jominy, inicialmente, adaptamos um galão de óleo como recipiente para coleta d'água, com diâmetro de aproximadamente 280 mm. Primeiramente, fizemos o lixamento das partes interna e externa, para melhor fixação da tinta. Logo após, soldamos uma pequena chapa de aço para sustentação na parte inferior. A Figura 11 reproduz a primeira parte da execução do projeto.



Figura 11: Início da execução do aparato

(Fonte: O autor, 2019)

Em um segundo momento, fizemos a soldagem dos pés para sustentação e elevação. Destacamos que foi necessário soldarmos quatro tubos de 20x40mm em ângulo para melhorar o equilíbrio. Na sequência, utilizamos uma chapa em formato U e a fixamos nas bordas do galão. A chapa passou por processo de furação na qual introduzimos o corpo de prova posteriormente, assim como retiramos partes para uma melhor visualização na hora do ensaio.

Relevante destacarmos que todos os processos de solda foram realizados por máquina do tipo Mig Mag e, antes mesmo de realizarmos a solda de todas as partes, ocorreu o processo de esmerilhamento, para que a solda pudesse ser mais eficaz à vista de um melhor acabamento em todas as partes. Utilizamos também lixas para a retirada do excesso de ferrugem e de partículas dispostas dentro do aparato. A finalização do processo pode ser conferida pela Figura 12.



Figura 12: Adaptação e melhorias no aparato

(Fonte: O autor, 2019)

Para a tubulação de alimentação de água, utilizamos um tubo de inox, com diâmetro de 12,7 mm em uma das extremidades onde conectamos a mangueira, disposta logo abaixo do corpo de prova. Instalamos também um pequeno tubo de mesmo diâmetro no fundo do galão, para que o refrigerante fosse retirado conforme a entrada no bocal. Por fim, realizamos a pintura de todo o aparato na cor verde escuro, cuja finalização pode ser observada na Figura 13.



Figura 13: Finalização do aparato

(Fonte: O autor, 2019)

3.1.2 Execução do ensaio

Para realização do ensaio, foi necessário utilizarmos o laboratório do Centro Universitário Assis Gurgacz, uma vez que neste há um forno de aquecimento e durômetro.

Inicialmente, foi feito o ligamento do forno e aguardado aproximadamente duas horas até que este atingisse aproximadamente 845°C. Atingindo esta temperatura, o corpo de prova se manteve dentro do forno por mais uma hora, definindo-se o diâmetro de 25,4 mm conforme prescreve a ABNT NBR 6339. Na Figura 14, podemos identificar a temperatura ideal para realização do ensaio Jominy.

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

Figura 14: Temperaturas de temperabilidade garantida

(Fonte: ABNT NBR 6339, 1989)

Após ceder o tempo de austenitização, foi retirado o corpo de prova do forno e colocado no dispositivo Jominy o qual foi resfriado através do jato de água em sua extremidade por aproximadamente dez minutos. Mantivemos o corpo de prova no dispositivo, resfriado em temperatura ambiente, conforme a ABNT NBR 6339.

O tempo decorrido entre a retirada do forno e o início do resfriamento no aparato foi de, no máximo, cinco segundos, para não haver interferências nos resultados do ensaio. A Figura 15 mostra os primeiros segundos do resfriamento do corpo de prova no dispositivo.



Figura 15: Corpo de prova no dispositivo em resfriamento

(Fonte: O autor, 2019)

No final do resfriamento, após retirar o material, foi necessário a retificação das partes necessárias para o ensaio, conforme Figura 16, para medição dos níveis de dureza do corpo de prova.

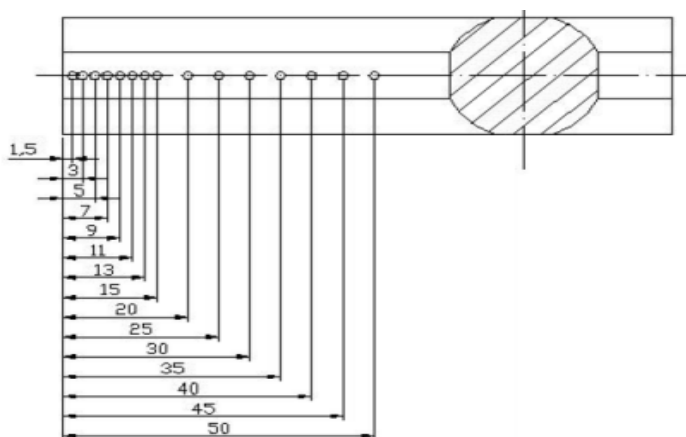


Figura 16: Corpo de prova retificado e medições para realização dos testes

(Fonte: ABNT NBR 6339, 1989)

3.1.3 Teste de dureza

Assim captando os níveis de dureza ao longo do comprimento do corpo de prova através de um durômetro do modelo Mitutoyo, como ilustra a Figura 17.



Figura 17: Durômetro Mitutoyo

(Fonte: O autor, 2019)

Foi realizado, igualmente, as medições de dureza em cada ponto definido previamente, tendo em vista a obtenção de resultados, dispostos na Tabela 2.

Tabela 2: Durezas encontradas no corpo de prova

Distância (mm)	Dureza (HRC)
1,5	51,4
3	47,4
5	43,8
7	35,8
9	34
11	29,8
13	29,4
15	28,1
20	25,4
25	22,6

(Fonte: O autor, 2019)

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1 CURVA DE TEMPERABILIDADE OBTIDO NO ENSAIO

De posse dos resultados dos ensaios realizados, foi criada a curva de temperabilidade do aço, proposta neste trabalho. A partir do corpo de prova ensaiado, demonstramos, na Figura 18, a curva de temperabilidade obtida, tendo como orientação as medições de durezas definidas na ABNT NBR 6339.

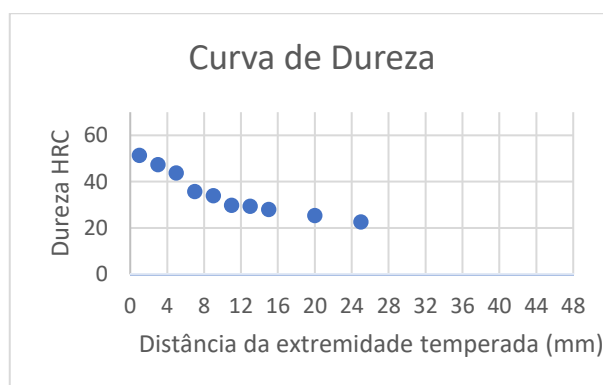


Figura 18: Curva de temperabilidade obtida

(Fonte: O autor, 2019)

Mediante o objetivo de relacionar o resultado obtido experimentalmente com resultados já explicitados na literatura, foi associado os dados com valores máximos e mínimos de temperabilidade do aço estudado. Definindo, portanto, durezas de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 70, como também de dureza HRC de 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44 e 48 de distância das extremidades. Para a referida comparação, destacamos os estudos de Costa e Mei (2006), conforme detalha a Figura 19.

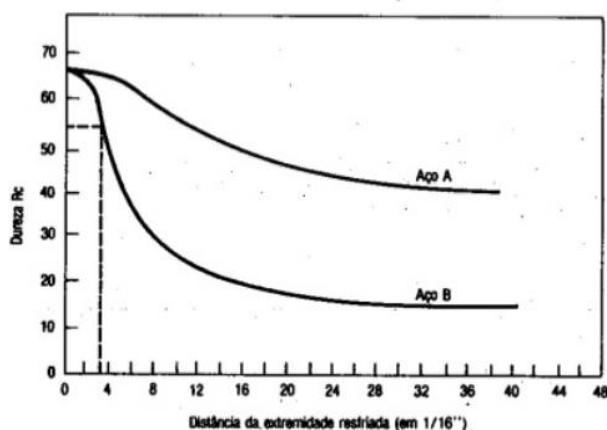


Figura 19: Curva de temperabilidade da literatura

(Fonte: Adaptação de COSTA; MEI, 2006)

Por intermédio dos valores da literatura, assim foi possível inferir que a amostra de aço SAE 1045 ensaiada apresentou valores de dureza bem próximos às faixas de temperabilidade publicadas. De igual maneira, os valores de dureza ficaram bem próximos aos limites mínimos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo propôs a construção de um dispositivo Jominy, visando à análise da dureza de amostras do aço SAE 1045, assim como a melhor compreensão do resfriamento dos aços quando submetidos a determinado tratamento térmico.

Assim, através da análise da capacidade de temperabilidade do aço SAE 1045 foi possível perceber as mudanças na estrutura cristalina do corpo de prova, pelo meio dos ensaios de dureza, aonde foi perceptivo o aumento de martensita na peça, comparando os valores retirados do próprio corpo de prova, pois conforme apresentamos no referido trabalho as durezas tendem a se reduzir conforme aumento de todo seu comprimento.

Com esse propósito definido, foi possível observarmos que os resultados de dureza encontrados no ensaio ficaram dentro das faixas de valores permissíveis ao serem comparados com os gráficos de estudos já publicados. Sob essa ótica, pode-se dizer que o dispositivo construído exerceu sua função com êxito.

Convém enfatizar que o referido dispositivo pode trazer inúmeras contribuições ao Centro Universitário, pois o mesmo se encontra à disposição no Laboratório de Tratamento Térmico. Desse modo, os acadêmicos podem complementar seus estudos na prática e estabelecer conexões com as teorias aplicadas nas disciplinas de materiais de construção mecânica. Ademais, pode estimular a proposição e o desenvolvimento de novas pesquisas no meio acadêmico.

Para trabalhos futuros recomenda-se fazer os mesmos ensaios com materiais de diferentes teores de carbono e analisando não somente suas durezas mais sim sua microestrutura e composições químicas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. Norma ASTM A255. Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel. In: **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6339. **Aço – Determinação da temperabilidade** (ensaio Jominy). 1989. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=361855>>. Acesso em: 15 abr. 2019.

UNISANTA. **Classificação dos aços**. 2016. Disponível em: <<https://www.ebah.com.br/content/ABAAAagaNkAK/ferro-acos-5>>. Acesso em: 18 abr. 2019.

BORTOLETO, E. M. **Modelamento numérico-computacional das transformações de fase nos tratamentos térmicos de aços**. 2010. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. São Paulo: LCT, 1999.

CANALE, L. **Temperabilidade**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2004.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. 2. ed. São Paulo, 1986.

COLPAERT, P. H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

COSTA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2006.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. dos **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos S.A, 1999.

KRAUSS, S. E. Paradigmas de Pesquisa e Criação de Significado: um Primer. **The Qualitative Report**, v. 10, n. 4, p. 758-770, jan. 2005. Disponível em: <<https://nsuworks.nova.edu/tqr/vol10/iss4/7>>. Acesso em: 4 maio 2019.

MARTINS, M. **Temperabilidade Jominy e influência do revenido sobre a dureza** - Um estudo em aços estruturais nacionais. 2002. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

OLIVEIRA, C. A. S. **Têmpera Direta de Aços Baixa Liga: Aspectos Cinéticos, Microestruturais e de Propriedades Mecânicas.** 1994. 245f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1994.

ROTHERY, W. H. **Estrutura das ligas de ferro.** São Paulo: Blücher, 1968.

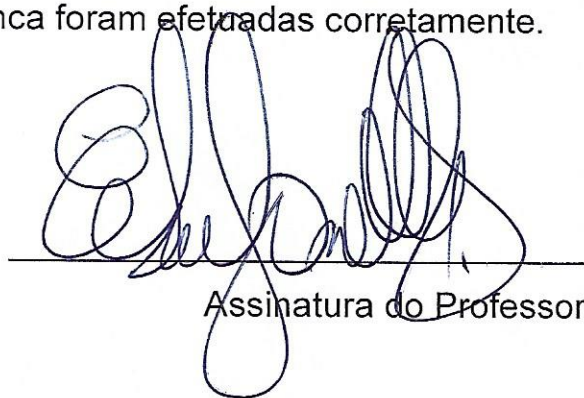
SIEBERT, C. A.; DOANE, D. V.; BREEN, D. H. **The Hardenability of Steels: Concepts, Metallurgical Influences and Industrial Applications.** ASM, Metals Park, Ohio, 1977.

CIMM. 2016. Disponível em: <<https://www.cimm.com.br/portal/tag/mecanica>>. Acesso em: 12 abr. 2019.

UNTERWIESER, P. M.; HOWARD, E. B.; JAMES, J. K. Heat Treaters Guide: Standard Practices and Procedures for Steel. **ASM International.** p. 141-143, 1982.

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Eu, ELISEU AVELINO ZANELLA JÚNIOR professor do Centro Universitário Assis Gurgacz e orientador do acadêmico BRUNO FELIPE DOS SANTOS TEIXEIRA no Trabalho de Conclusão de Curso, declaro que as correções solicitadas pela banca foram efetuadas corretamente.



Assinatura do Professor

Cascavel, 01 de julho de 2019.