

# DIFERENÇA DE TEMPERABILIDADE ENTRE AÇO ABNT 4340 E AÇO ABNT 1045 ATRAVÉS DO ENSAIO DE JOMINY

*Ariel dos Santos<sup>1</sup>*

*Edson Roberto da Silva<sup>2</sup>*

## RESUMO

O tratamento térmico consiste em um grupo de operações que inclui a manipulação de aquecimento e, por conseguinte, resfriamento com determinados requisitos para o material, pretendendo assim, modificar sua estrutura mecânica. São três as etapas para um tratamento térmico em aços: austenitização, têmpera e revenimento. Inicialmente, o foco principal foi a têmpera, que é definida como a capacidade de certo aço conseguir martensita. Neste sentido, o objetivo deste estudo foi submeter o aço liga ABNT 4340 e o aço carbono ABNT 1045 em um ensaio para determinar suas temperabilidades através do método de Jominy. Desse modo, foi possível definir a temperabilidade de dois diferentes modelos de aços. Posteriormente foi realizado o ensaio de dureza ao longo dos corpos de provas para verificar se haveria mudanças em suas características mecânicas. O resultado obtido foi que o aço liga ABNT 4340 tem sua curva de temperabilidade mais uniforme, sua dureza decai pouco ao longo do corpo de provas, e o aço ABNT 1045 decai muito logo no início e estabiliza rapidamente.

Palavras-chave: Aço Liga. Aço Carbono. Resistência Mecânica. Têmpera. Tratamento Térmico.

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica pela Universidade de Rio Verde, campus Rio Verde, GO.

<sup>2</sup> Orientador, mestre em Engenharia Mecânica.

# 1 INTRODUÇÃO

Não se sabe exatamente quando e onde o tratamento térmico surgiu, mas em aproximadamente 1000 anos antes de Cristo os ancestrais do homem já aqueciam e resfriavam metais para torná-los melhores. Eles não sabiam o que mudava estruturalmente no metal, mas comprovaram que esse procedimento o tornava superior (VALE, 2011).

Sabe-se que os materiais tratados termicamente são melhores mecanicamente que os não tratados, fazendo com que possam ser utilizados nas mais diversas situações. Por esse motivo que, com o decorrer do tempo, o aço se tornou cada vez mais essencial. Com isso, as técnicas dos tratamentos térmicos foram sendo aprimoradas. Um tratamento base para grande maioria dos materiais é a têmpera (chamada também de end-quench test) (SMITH, 1991), no qual determinado aço é aquecido até a sua austenitização e depois resfriado rapidamente fazendo com que a dureza do material aumente e que a microestrutura desejada nesse processo seja a martensita. Como geralmente a têmpera é um processo severo, é realizado posteriormente outro tratamento térmico para alívio de tensões do material, para que o risco de trincar ou empenar seja remediado (CHIAVERINI, 1985).

Com uma demanda crescente por metais com propriedades melhores e diferenciadas, adicionou-se elementos de liga ao aço e observou-se o que eles faziam com as propriedades mecânicas. Foi então que surgiram os aços liga que levam o nome da liga com maior quantidade em sua composição. Com uma variedade cada vez maior no mercado, era necessário um meio economicamente viável que pudesse fazer testes e ensaios para determinar algumas propriedades, como por exemplo, a temperabilidade (SOUZA, 2008). Foi daí que surgiu o Ensaio de Jominy.

O Ensaio de Jominy é prático e tem um custo relativamente baixo. Atualmente é o método mais popular quando se quer ter conhecimento da temperabilidade de determinado aço. Ele é padronizado internacionalmente pelas normas da ASMT, e no Brasil pela ABNT. O método é simples, consiste em utilizar corpos de prova de determinado tamanho e diâmetro do material desejado, então esse material é aquecido até a austenitização e logo após resfriado com um jato d'água em uma extremidade do corpo de provas. Depois é medida ao longo do comprimento sua dureza (NUNURA, 2009; XAVIER, 2009).

É abordado neste trabalho um ensaio de temperabilidade, cujos materiais foram aquecidos a uma temperatura de em média 900°C. Através do método de Jominy, foi feito o resfriamento. Os aços utilizados foram o SAE 4340 e SAE 1045, ambos com médio teor de

carbono e com boa resistência mecânica. Posteriormente, mediu-se a dureza de ambos ao longo de todo o corpo de prova.

O objetivo do presente trabalho é de submeter o aço liga ABNT 4340 e o aço carbono ABNT 1045 a um ensaio para determinar suas temperabilidades através do ensaio de Jominy, para que seja possível ver se há mudanças na dureza mecânica dos modelos e demonstrar o gráfico de dureza através da distância Jominy. E, além disso, comparar a temperabilidade dos aços testados.

## 1.1 TRATAMENTO TÉRMICO

O tratamento térmico foi descoberto há muito tempo (em torno de 1000 a.C.). Na época, descobriram que aquecer e resfriar metais os modificava de várias maneiras. Com o passar do tempo, o homem descobriu o aço e obteve características particulares como grande dureza. Porém, apenas em 1820 que Karsten apresentou que a diferença entre ferro e aço se baseava na quantidade de carbono (VALE, 2011).

Apesar dos materiais tratados termicamente terem qualidades superiores, este é um processo que pode muitas vezes ser vulnerável, pois envolve processos que não podem ser controlados facilmente, como sua fabricação, que envolve distorções no material onde não se pode prever (NUNES, 2012).

### 1.1.1 TÊMPERA

São três as etapas para um tratamento térmico dos aços: austenitização, têmpera e revenimento. Na têmpera o material é aquecido até uma temperatura que se torna homogeneamente austenítico. Logo após, o material deverá ser resfriado em meio líquido (água, salmoura, óleo, etc.). Com o resfriamento rápido, o material se torna extremamente mais duro e estruturalmente o arranjo se torna martensita. O quanto o material endurece e até que profundidade pode-se obter martensita depende do meio no qual foi submetido e o material com o qual se trabalha (PENHA, 2006).

Devem-se tomar alguns cuidados com a têmpera quando a peça for austenitizada, como evitar a oxidação, descarbonetação (perda de carbono) e procurar aquecê-la equitativamente (SMITH, 1991).

Quando se faz um tratamento de têmpera superficial, seja ela por indução ou métodos tradicionais, é acarretada uma mudança na estrutura local em martensita. Isso ocasiona expansão do material, originando tensões de compressão (VENTURA, 2006).

Pode-se imaginar que é apenas na fase de austenitização do material que é preciso ter precauções, mas no resfriamento também se deve ter cuidados com a qualidade do aço que está sofrendo o processo de têmpera, pois devido à alta rigorosidade do processo alguns tipos de aços podem vir a empenar ou até mesmo trincar. Nesses casos, é aconselhável realizar uma têmpera mais moderada (CHIAVERINI, 1985).

O processo de têmpera em geral é rápido (exceção de alguns aços-liga que podem ser temperados ao ar). Por essa razão, o material trabalhado deve ser austenitizado homogeneamente e sucessivamente resfriados. Existem vários exemplos de meios que se podem utilizar, cada um retira o calor da peça de forma diferenciada. Dependendo da temperatura no início do resfriamento e de sua característica, em geral são usados óleos para um processo de têmpera mais moderada, onde se pode ocorrer tricas, tensões internas e empenamentos (CASTRO, 2007).

## 1.2 AÇOS LIGA

O aço é uma das ligas metálicas mais multifuncionais e essenciais. Atualmente, devido ser mais barato comparado a outras ligas: pois se tem inúmeras jazidas de minerais de ferro de fácil exploração, além de boa capacidade de reciclagem: o processo de fabricação é simples e suas propriedades mecânicas modificam-se. Essa modificação depende dos tratamentos térmicos que podem ser incluídos e dos elementos que podem ser adicionados (CURADO, 2007).

O aço é uma das ligas metálicas mais multifuncionais. Pode-se vê-lo em várias formas e diversas aplicações, sendo eficaz na maioria delas. Este, assim como os demais metais, solidifica-se constituindo cristais onde se desenvolvem em diferentes orientações, que são chamados de eixos de cristalização. Os eixos partem de um eixo principal até que todo o material se torne sólido. Esse composto é chamado de dentrita, e no momento em que elas se encontram, se formam os grãos do metal de maneira que, após o fim da solidificação do metal, existem inúmeros grãos que estão ligados e sobrepostos (REBECHI, 2011; CHIAVERINI, 2005).

Há apenas um meio de aperfeiçoar conjuntamente a tenacidade e resistência mecânica de um metal, e esta forma é o refino de grão. Conseqüentemente a granulação fina é sempre demandada (COUTINHO, 1992).

De acordo com as necessidades de utilização, adiciona-se intencionalmente elementos de liga, fazendo com que as propriedades mecânicas do material fiquem superiores. Foi então que surgiram os aços-liga, que podem ser categorizados como aços de baixa, média e alta liga, dependendo da quantidade de elementos de liga introduzidos ao material. Os elementos que podem ser adicionados são diversos. Eles promovem alterações diversas. As mais comuns são alterações da propriedade mecânica do material, como aumentar a dureza, facilitar a têmpera e etc (SOUZA, 2008).

A quantidade de elementos de liga e carbono faz com que a temperabilidade se eleve, originando assim a martensita no resfriamento. Quando essas duas condições estão saturadas na austenita, a quantidade dos carbonetos que são produzidos aumentará no resfriamento (CUNHA, 2012).

A adição de elementos de liga no aço tem um efeito considerável sobre a cinética  $\delta \rightarrow \alpha$  de conversão e inclusive da reação da perlita. Os elementos de liga mais habituais deslocam a curva de transformação tempo-temperatura para a direita, prolongando o tempo e fazendo com que seja mais simples conceber uma têmpera. Isto dá uma maior capacidade de endurecimento, já que estruturas como a martensita podem ser atingidas através de resfriamentos mais lentos. Os elementos de liga também desaceleram a taxa de amolecimento durante a têmpera, estabilizando ambos os carbonetos de transição e a estrutura martensítica supersaturada à maior temperatura de têmpera e ao adiar substancialmente a precipitação e crescimento de cementita (MAALEKIAN, 2007).

Dependendo do tratamento térmico e da composição química, os aços de baixa liga podem sofrer com fraturas intergranulares em seus contornos de grão. Como essa fratura pode ocorrer sem o revenimento, concluiu-se que essa ocorrência pode sobrevir durante a austenitização ou da própria têmpera (BANERJI, 1978; HYDE, 2004).

### 1.2.1 SAE 4340 E SAE 1045

Segundo a empresa (Tenax, 2016), o aço ABNT 4340, da família dos aços-Molibdênio, tem como característica uma boa temperabilidade e boa combinação de resistência, ductibilidade e tenacidade. É usado na fabricação de virabrequins e árvores de

manivela de caminhões, bielas, engrenagens, braços e pontas de eixo, peças temperadas de seções grandes em geral e indústria petrolífera. Sua têmpera em óleo deve atingir 855°C e revenimento a 230°C. Já o aço ABNT 1045 tem um médio teor de carbono e é utilizado em uma vasta aplicação na indústria mecânica, reunindo boa resistência e baixo custo. É utilizado em eixos, cubos de roda, balancins, engrenagens, árvore de manivelas, pinos, parafusos e etc. A normalização deve ser a 900°C, aquecimento a 830 – 845°C e têmpera em água, revenimento por 2 horas a 260°C.

A composição química dos aços ABNT 4340 e do ABNT 1045 pode ser conferida na Tabela 1.

**TABELA 1** – Composição química dos Aços ABNT 4340 e 1045, valores em %

<b>Aços (ABNT)</b>	<b>C (Carbono)</b>	<b>Mn (Manganês)</b>	<b>P (Fósforo)</b>	<b>S (Enxofre)</b>	<b>Si (Silício)</b>	<b>Cr (Cromo)</b>	<b>Ni (Níquel)</b>	<b>Mo (Molibdênio)</b>
4340	0,38 - 0,43	0,60 - 0,80	0,03	0,04	0,15 - 0,35	0,70 - 0,90	1,65 - 2,00	0,20 – 0,30
1045	0,43 - 0,50	0,60 - 0,90	0,04	0,05	-	-	-	-

Fonte: adaptado de Tenax: Aços Especiais (2016)

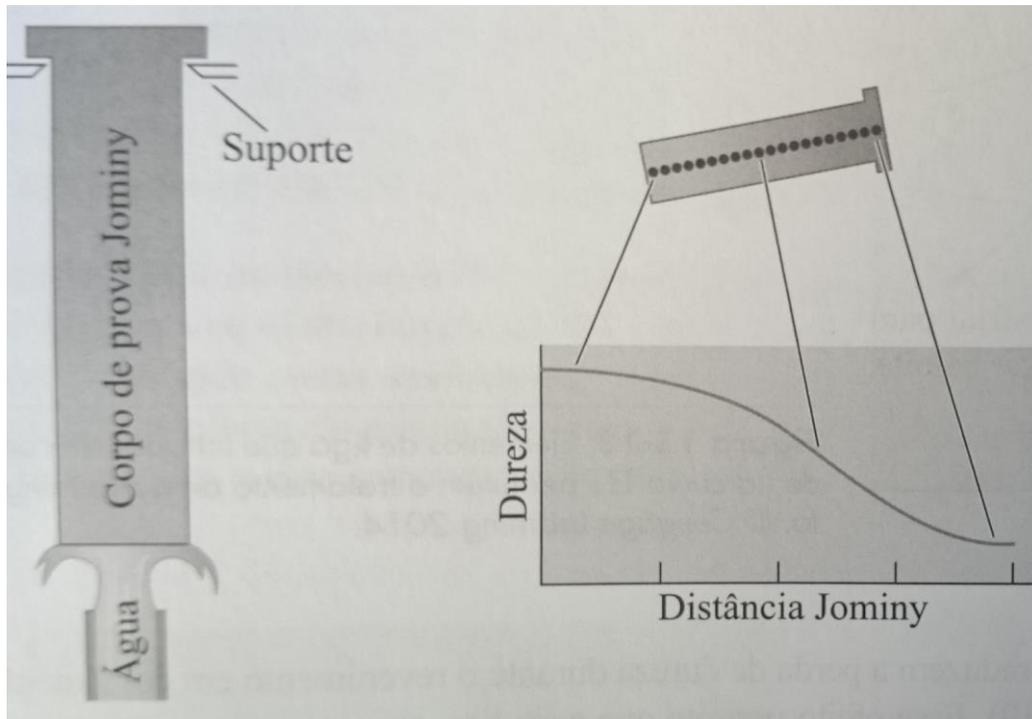
### 1.3 ENSAIO DE JOMINY

É constituído de um corpo-de-prova que depois de aquecido até sua austenitização é arrefecido imediatamente por meio de um jato de água (FARENZENA, 2010).

Com o ensaio de Jominy é possível determinar a temperabilidade de um aço. O ensaio se compõe no aquecimento de uma barra (corpo de provas) para se formar austenita. Logo após o aquecimento, uma de suas extremidades será alvejada com um jato d' água fazendo assim com que ela seja temperada. O restante do corpo não irá ter contado com a água, fazendo assim com que a outra extremidade do corpo de provas seja resfriado ao ar. É então estabelecido um valor de comprimento para que se meça a dureza ao longo do modelo (CARDOSO, 2011).

Exemplo do que foi dito acima pode ser visualizado na Figura 1.

**FIGURA 1** – Ensaio Jominy usado para determinar a temperabilidade de aços



Fonte: adaptado de ASKELAND, D.R.; WRIGHT, W.J. Crédito: Cengage Learning (2016).

O ensaio Jominy pode ser realizado com outros fluidos, não necessariamente apenas água, além da análise ser comum para o enrijecimento do aço e sendo um dos mais fundamentados para isso. Pois, com apenas um corpo-de-prova pode-se concluir o decréscimo da quantidade de martensita (ZENG, 2008; MARTINS, 2002).

De acordo com a Norma ASTM A225-10, o método para temperabilidade é descrito correspondente à composição química do material listado na Tabela 2, e a seguir, na Tabela 3, as temperaturas padronizadas para austenitização de diversos tipos de aços dependendo de sua concentração de carbono.

**TABELA 2** – Composição química em porcentagem de peso

Elemento	Composição máxima em % de peso
Carbono	0,10 - 0,70
Manganês	0,50 - 1,16
Silício	0,15 - 0,60
Níquel	1,50
Cromo	1,35
Molibdênio	0,55
Cobre	0,35
Vanádio	0,20

Fonte: adaptado de ASTM A225-10 (2010).

**TABELA 3** – Temperatura de Normalização e Austenitização segundo ASTM A225-10

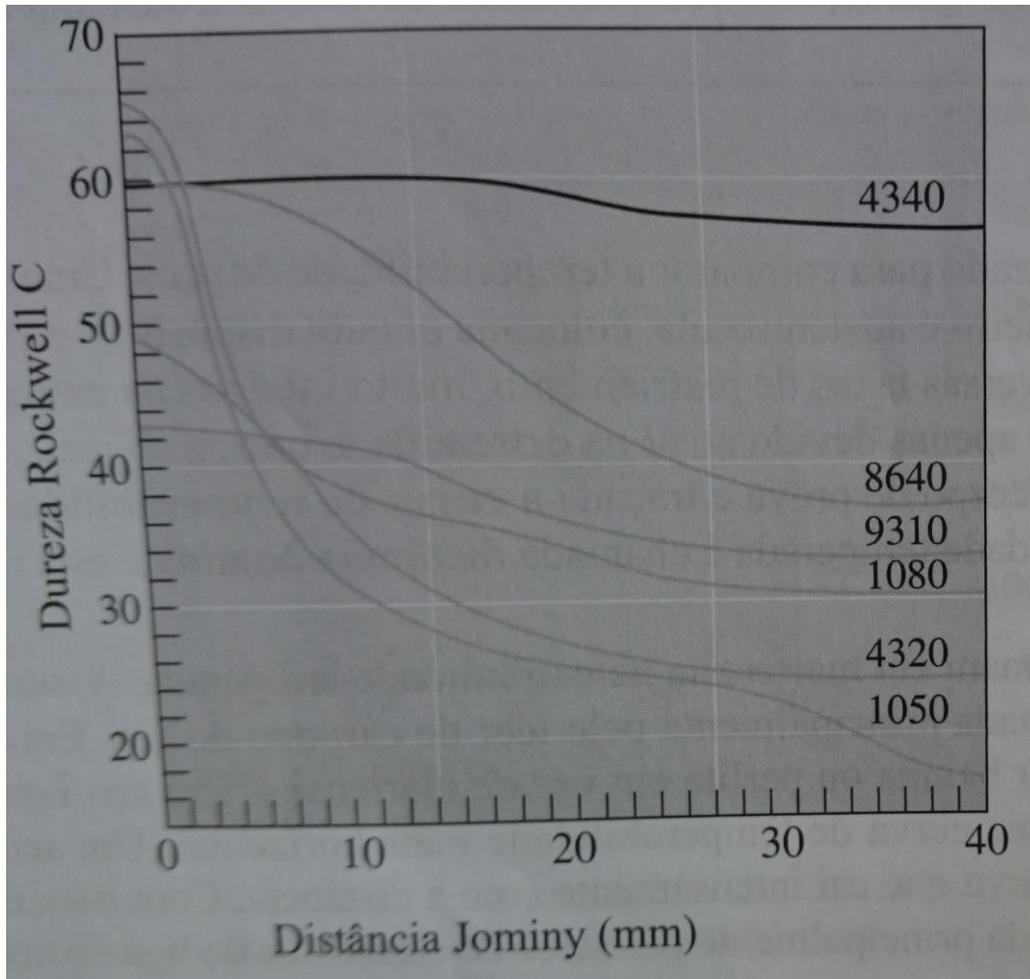
Série do aço	Máxima quantidade de carbono (%)	Temperatura de Normalização (°C)	Temperatura de Austenitização (°C)
1000, 1300, 1500, 3100, 4000, 4100, 4300, 4400, 4600, 4700, 5000, 5100, 6100, 8100, 8600, 8700, 8800, 9400, 9700, 9800	Até 0,25	925	925
	0,26 – 0,36	900	870
	Igual ou maior que 0,37	870	845
2300, 2500, 3300, 4800, 9300	Até 0,25	925	845
	0,26 – 0,36	900	815
	Igual ou maior que 0,37	870	800
9200	Igual ou maior que 0,50	900	870

Fonte: adaptado de ASTM A225-10 (2010).

Em geral, a maioria dos aços formam martensita em sua extremidade que entra em contato com o jato d'água no resfriamento. Sendo assim, a dureza nessa extremidade é dada pela quantidade de carbono que esse aço possui. Aumentando-se a distância no corpo-de-prova, pode-se ter como composto a bainita e/ou perlita ao invés da martensita. Um aço-liga com uma boa temperabilidade irá fazer com que a curva de dureza do ensaio de Jominy permaneça mais na horizontal (Exemplo na Figura 2). Isto quer dizer que ele não vai perder tanta dureza se for comparado com um aço não ligado onde a curva tenderá verticalmente ao

longo do corpo de prova. Com isso, conclui-se que a temperabilidade do aço está diretamente proporcional à quantidade de elementos de liga existente no aço (ASKELAND; WRIGHT, 2016).

**FIGURA 2** – Curvas de temperabilidade de diversos aços



Fonte: adaptado de ASKELAND, D.R.; WRIGHT, W.J. Crédito: Cengage Learning (2016).

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para realização deste trabalho foram quatro corpos de prova, dois do aço ABNT 4340 e dois do aço ABNT 1045 com 25 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento.

Um durômetro Rockwell modelo HR 150C, um forno elétrico e uma máquina de ensaio Jominy, equipamentos localizados no laboratório de Materiais e Processos de

Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Rio Verde – UniRV foram utilizados neste estudo.

## 2.2 MÉTODOS

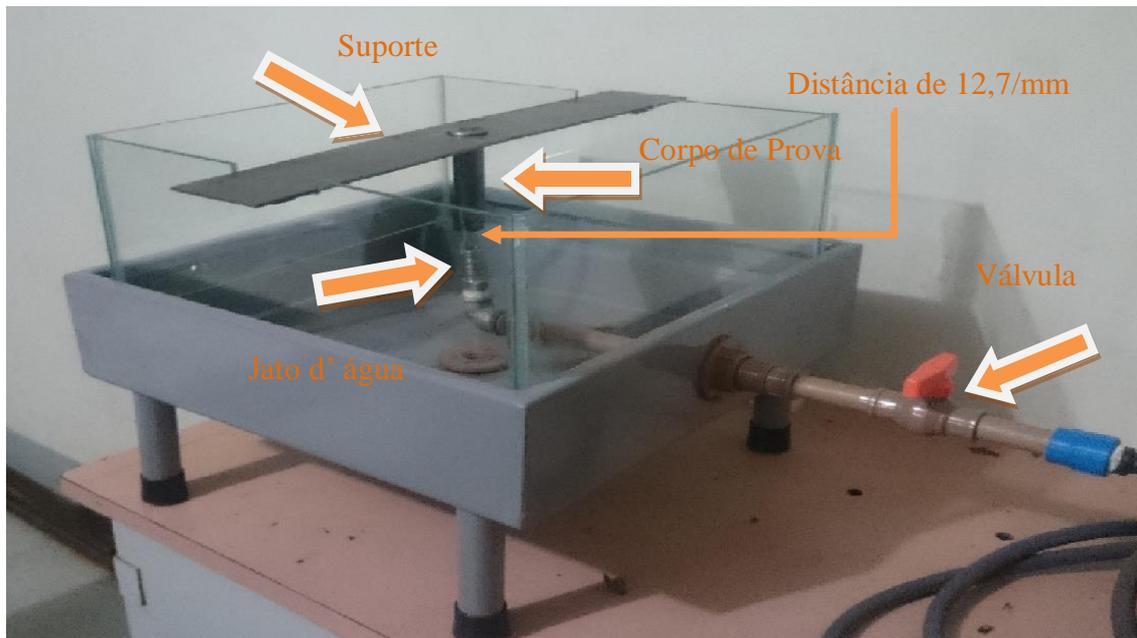
Os corpos de provas tiveram suas durezas medidas anteriormente do processo de tratamento térmico. Para constatação, foi utilizado o durômetro Rockwell modelo HR 150C, localizado no laboratório de Processos de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Rio Verde – UniRV.

Para o tratamento térmico nos corpos de provas, o forno foi ligado a uma temperatura de 900°C, temperatura suficiente para austenitização dos corpos de prova. Em seguida, foi inserido um corpo de prova de cada vez a cada 10 minutos, permanecendo no forno durante uma hora cada. A defasagem de 10 minutos foi necessária para que o corpo de prova, ao ser retirado, permanecesse na máquina de ensaio Jominy. Com isso, a cada dez minutos um corpo de prova era retirado do forno e imediatamente colocado no suporte da bancada Jominy (Figura 3). Estes foram resfriados com um jato d'água a uma distância de aproximadamente 12,7 mm abaixo do corpo de provas, por um período de 10 minutos. A seguir foram retirados do equipamento, garantindo-se assim o mesmo tempo exposto à alta temperatura e o mesmo tempo exposto ao ensaio. O jato d'água entrou em contato apenas na parte inferior da peça, o restante do corpo da peça resfriou ao ar, e por condução pelo próprio corpo de prova.

Os corpos de provas foram escovados no motor elétrico esmeril de bancada no laboratório de Processos de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Rio Verde – UniRV para retirar a oxidação dos corpos de prova após o ensaio.

Posteriormente, os corpos de provas foram marcados ao longo de todo o comprimento com uma distância de 1,5/mm entre cada ponto. Essas marcações serviram de referência para as medidas do ensaio de dureza.

Com os dados retirados, foi feito um gráfico para demonstrar a diferença de dureza ao longo do corpo de provas.

**FIGURA 3** – Bancada de ensaio Jominy

Fonte: Ariel dos Santos, 2016.

A ordem de funcionamento da máquina de ensaio Jominy segue os seguintes passos:

- 1 – O corpo de provas é retirado do forno e colocado no suporte da bancada que tem diâmetro de  $25/\text{mm} + 0,3/\text{mm}$  de folga;
- 2 – A válvula é aberta para que o jato d'água, que vem de uma mangueira conectada a uma torneira, atinja a base do corpo de provas a uma distância de aproximadamente  $12,7/\text{mm}$ ;
- 3 – O corpo de prova vai sendo resfriado conforme o tempo (durante 10 minutos). A água utilizada é expelida pela parte inferior por meio de uma mangueira até um ralo;
- 4 – Depois de 10 minutos, o suporte é retirado manualmente para a retirada do corpo de provas. Logo em seguida, coloca-se outro corpo de provas no suporte e repete-se o ensaio.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

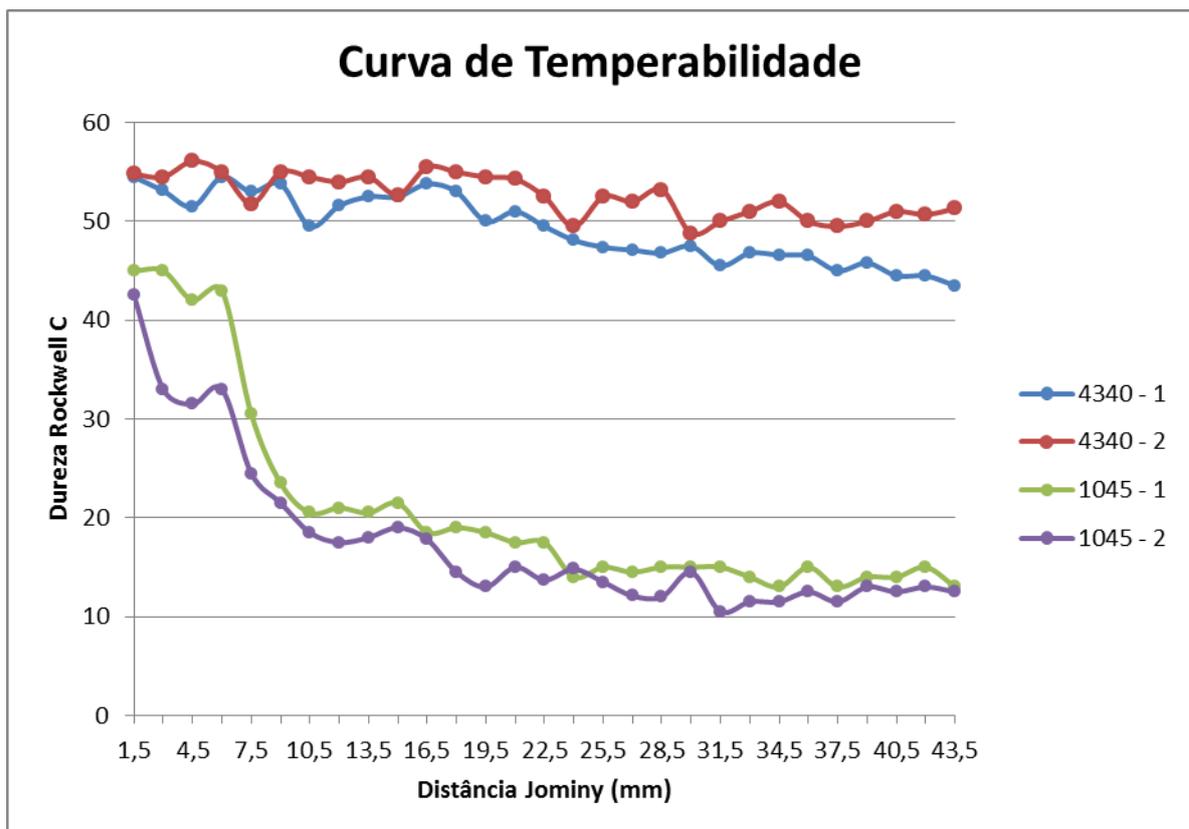
Neste tópico são apresentados os resultados e discussões do ensaio Jominy. Os valores de dureza obtidos antes do tratamento térmico podem ser observados na Tabela 4.

**TABELA 4** – Medições de Dureza Sem o Tratamento Térmico

Material	Dureza 1 (HRC)	Dureza 2 (HRC)	Média de Dureza (HRC)
Aço ABNT 4340 - 1	28,5	29,5	29
Aço ABNT 4340 - 2	29,5	31	30,25
Aço ABNT 1045 - 1	13,5	13,5	13,5
Aço ABNT 1045 - 2	15,5	16,5	16

Fonte: Próprio autor.

Os valores obtidos após o ensaio Jominy foram expostos na Figura 1, em que a coluna vertical significa a dureza em RockWell C (HRC), e a coluna horizontal o comprimento do corpo de prova em milímetros (mm).

**FIGURA 4** – Curva de Temperabilidade Jominy

Fonte: Ariel dos Santos, 2016.

Como visto no gráfico, os aços liga ABNT 4340 antes do ensaio de temperabilidade possuíam uma média de dureza de 29,63 HRC. Ambos, após o tratamento térmico, obtiveram

54 HRC, um aumento considerável de dureza de 82,25%. No decorrer da distância, há algumas variações entre eles, porém, até o final do teste a diferença de dureza não ultrapassou 8 HRC. Comparando-se com a Figura 2, o comportamento do aço ABNT 4340 fica bem parecido, pois a dureza no decorrer do tempo permanece mais na horizontal.

O aço ABNT 1045 possuía uma média de dureza de 14,75 HRC. Ambos na primeira medida de 1,5/mm tiveram valores aproximados, respectivamente de 45 e 42,5 HRC, um aumento de dureza de em média 196,61%, proporcionalmente um ganho de dureza superior ao aço ABNT 4340. A diferença foi que o modelo 1 do aço ABNT 1045 a partir da medida de /6mm diminui muito a dureza, chegando próximo a 20 HRC, aos 10,5/mm. Enquanto o modelo 2 teve um leve aumento da terceira medição (4,5/mm) para a quarta (6/mm). Então, ele diminui bem aproximado ao modelo 1, chegando a ficar um pouco menor de 20 HRC aos 10,5/mm.

O aço carbono ABNT 1045 tem uma baixa temperabilidade, aumentou-se muito sua dureza com a têmpera, porém, apenas na parte que teve contato direto com o jato d'água. Tanto que é possível ver nitidamente no gráfico a perda de dureza na parte onde o metal não foi temperado. A parte onde é normalizado fica menos dura que inicialmente, sem o tratamento térmico. Essa condição não ocorreu com o aço ABNT 4340 que mesmo normalizado permaneceu com dureza superior à inicial.

Pode-se concluir então que o aço ABNT 4340, simplesmente por ter elementos de liga, faz o aço ter uma temperabilidade superior a do aço ABNT 1045 que não possui elementos de liga além do Carbono. Mesmo que esses aços possuam uma quantidade mínima ou razoável de carbono superior ao aço ABNT 4340, poderia ser possível até obter uma têmpera com dureza mais elevada, mas como consequência, não iria manter essa dureza ao longo do corpo de prova.

## **4 CONCLUSÃO**

Em resposta ao objetivo do trabalho e de acordo com os testes, pode-se concluir que o aço liga ABNT 4340, apesar de ter 0,05 de carbono a menos que o aço ABNT 1045, possui uma temperabilidade superior, perdendo pouca dureza ao longo do corpo de prova, mesmo nas partes resfriadas ao ar. O aço ABNT 1045 possui baixa temperabilidade, pois apenas a parte do corpo de prova que foi resfriada na água possui apreciável dureza. A distribuição da dureza ao longo do corpo de prova caiu bruscamente nas partes logo adjacentes às resfriadas em água.

*DIFFERENCE IN HARDENABILITY BETWEEN STEEL ABNT 4340 AND STEEL  
ABNT 1045 THROUGH JOMINY TEST*

The heat treatment consists in a group of operations that includes the heating handling and, therefore, cooling with certain requirements for the material, aiming to modify its mechanical structure. There are three steps to the heat treatment in steels: austenitization, cooling and tempering. Initially, the focus was tempering, which is defined as the ability to achieve certain steel martensite. In this sense, the objective of this study was to submit alloy steel ABNT 4340 and carbon steel ABNT 1045 in a test to determine their temperabilidades by Jominy method. Thus, we can define the hardenability of the two different steel models. Thereafter, a hardness test was performed over the test samples to verify if there were changes in their mechanical characteristics. The result was that the alloy steel ABNT 4340 has a more uniform curve hardenability, its hardness decays a bit along the sample, and carbon steel ABNT 1045 decays very early on test and stabilizes quickly.

Keywords: Alloy Steel. Carbon Steel. Mechanical Strength. Tempering. Heat Treatment.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard test Methods for Determining Hardenability of Steel, A225-10**. Pennsylvania, United States, 2010.
- ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais 3ª edição**. Tradução Solange Aparecida Visconti. São Paulo: Cengage Learning, 2016.
- BANERJI, S. K. et al. **Intergranular Fracture in 4340-Type Steels: Effects of Impurities and Hydrogen**. Metallurgical Transactions A, V.9A, p.237-247. EUA, 1978.
- CARDOSO, Gabriel B. M. G. **Modelamento da temperabilidade jominy por regressão linear múltipla para aços ao boro**. Porto Alegre: UFRGS, 2011.
- CASTRO, D. B. V. **Influência da temperatura de austenitização para têmpera e de revenimento na tenacidade e na vida em fadiga do aço SAE 5160 com diferentes teores de fósforo**. São Carlos: USP, 2007.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. Editora: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais ABM. São Paulo, 2005.
- \_\_\_\_\_. **Tratamentos térmicos das ligas ferrosas**. Associação Brasileira dos Metais. São Paulo, 1985.
- COUTINHO, C. B. **Materiais metálicos para engenharia**. Ed. Fundação Christiano Ottoni. Escola de Engenharia UFMG, 1992.
- CUNHA, A. E. A. **Estudo do tratamento térmico de um aço ferramenta obtido por fundição**. Porto: FEUP, 2012. Disponível em: < <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/68166/1/000154724.pdf>>. Acesso em: 05/06/2016.
- CURADO, J. F. **Medidas de nitrogênio profundo em aços especiais**. São Paulo: USP, 2007.
- FARENZENA, B. A.; HAUSER, E. B. **Resolução de um Modelo Matemático das Condições de Resfriamento de um Corpo de Prova Submetido ao Ensaio Jominy por Elementos Finitos e Separação de Variáveis**. In: XXXIII Congresso Nacional de Matemática aplicada e Computacional, CNMAC: PUCRS, 2010.
- HYDE, R. S. et al. **Quench Embrittlement of hardened 5160 Steel as a Function of Austenitizing Temperature**. Metallurgical and Materials Transactions A, V.35A, p.153,154. EUA, 2004.
- MAALEKIAN, M. **The Effects of Alloying Elements on Steels (I)**. Graz University of Technology, 2007. Disponível em: < [https://online.tugraz.at/tug\\_online/voe\\_main2.getvolltext?pCurrPk=32837](https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.getvolltext?pCurrPk=32837)>. Acesso em: 05/06/2016.

- MARTINS, M. **Temperabilidade Jomyni e influencia do revenido sobre a dureza – Um estudo em aços estruturais nacionais**. Florianópolis: UFSC, 2002. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/82731/184887.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 05/06/16.
- NUNES, R. M. **Estudo de distorção de barras cilíndricas de aço ABNT 1045 em uma rota de fabricação envolvendo trefilação combinada e têmpera por indução**. Porto Alegre: UFRGS, 2012. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/75893/000877798.pdf?sequence=1>. Acesso em: 08/06/2016.
- NUNURA, C.R. **Correlação numérico-experimental da microestrutura, taxa de resfriamento e características mecânicas do aço ABNT-1045**. Pág 124, dissertação para mestrado em Engenharia Mecânica. Porto Alegre: UFRGS, 2009.
- PENHA, R. N. **Simulação da transferência de calor e das tensões residuais térmicas obtidas em estudos de têmpera**. São Carlos: USP, 2006.
- REBECHI, J. G. **Correlações numéricas entre faixas de resfriamento, microestruturas e propriedades mecânicas para o tratamento térmico do aço AISI/SAE 4140**. Porto Alegre: UFRGS, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/37383>>. Acesso em: 05/06/16
- SMITH, Y. E. et al. **Quenching of Steel**. ASM Handbook: Heat Treating (prepared by the ASM Committee on Quenching of Steel): EUA, 1991.
- SOUZA, G. A. **Caracterização microestrutural de um aço médio carbono e baixa liga (com estrutura bainítica/martensítica) via microscopia óptica**. Guaratinguetá: UNESP, 2008. Disponível em: <[http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/beg/33004080027P6/2008/souza\\_ga\\_me\\_guara.pdf](http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/beg/33004080027P6/2008/souza_ga_me_guara.pdf)>. Acesso em: 05/06/2016.
- TENAX AÇOS ESPECIAIS. **Aços especiais**. Disponível em: <http://www.tenax.com.br>. Acesso em: 05/06/16.
- VALE, A. R. M. do. **Tratamento térmico**. Santa Maria: UFSM, 2011. Disponível em: <[http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifpa/tecnico\\_metalurgica/tratamento\\_termico.pdf](http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifpa/tecnico_metalurgica/tratamento_termico.pdf)>. Acesso em: 05/06/2016.
- VENTURA, J. M. **Desenvolvimento de aços para conformação a frio de elemento de fixação do feixe de molas**. São Carlos: USP, 2006.
- XAVIER, C.R. **Projeto e construção do aparato Jominy: Uma contribuição para a pesquisa UniFOA**. Cadernos UniFOA, Edição nº 10, pág 15-18. Volta Redonda: UniFOA, 2009.
- ZENG, G. **Test of Quenching Media**. Journal of ASTM International, Vol. 5, No, 2008.