



IV Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica  
IV EnICT  
ISSN: 2526-6772  
IFSP – Câmpus Araraquara  
24 e 25 de outubro de 2019



## ESTUDO DA DUREZA SUPERFICIAL DO AÇO SAE 1045 EM DIFERENTES CONDIÇÕES METALÚRGICAS

JHONY WELITON ANTONIO<sup>1</sup> SÍLVIO APARECIDO VERDÉRIO JÚNIOR<sup>2</sup> CELIO CAMINAGA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduando em Engenharia Mecânica, Programa PIVICT, IFSP Câmpus Araraquara - jhonywa88@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Docente, Instituto Federal de São Paulo Câmpus Araraquara - silvioverderio@ifsp.edu.br (Coorientador)

<sup>3</sup> Docente, Instituto Federal de São Paulo Câmpus Araraquara - caminaga@ifsp.edu.br (Orientador)

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.03.04.03-2

**RESUMO:** O aço SAE 1045 é bastante utilizado em diversas aplicações de engenharia, devido a sua boa usinabilidade e razoável temperabilidade. Esse aço é facilmente encontrado em distribuidores de aços em várias formas (circular, tubular, chapa, retangular, perfil, etc.) e diferentes condições metalúrgicas. Os estudos das propriedades mecânicas nos aços são de grande importância, pois a partir dessas propriedades é que são definidos parâmetros e características para projetos e processos de fabricação. O processo de tratamento térmico de têmpera nos aços é utilizado para aumentar a dureza (consequentemente a resistência mecânica), a partir de mudanças drásticas em sua estrutura. O tratamento térmico de revenimento é realizado para aliviar as tensões providas do tratamento de têmpera e fornece ao aço propriedades mecânicas viáveis dependendo da dureza obtida. Sendo assim, este trabalho visa estudar a dureza superficial do aço SAE 1045 em quatro condições metalúrgicas diferentes, sendo trefilado a frio, laminado a quente, normalizado e temperado e revenido. Este estudo se mostrou satisfatório, visto que os resultados obtidos foram bastante semelhantes aos da literatura especializada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Dureza Superficial; Propriedades Mecânicas; Aço SAE 1045.

### INTRODUÇÃO

As propriedades mecânicas constituem as características mais importantes dos metais para sua aplicação no campo da engenharia, visto que o projeto e a execução das estruturas metálicas, quer móveis, quer fixas, assim como a confecção dos componentes mecânicos são baseados no conhecimento das propriedades mecânicas (Chiaverini, 1986).

Os materiais metálicos possuem uma enorme variação de propriedades mecânicas, conforme o tratamento: mecânico, térmico ou superficial, a que foram submetidos (Souza, 1982). Quando submetidos a esforços mecânicos, são as propriedades mecânicas que irão definir a maneira como o material irá reagir a esses esforços, que podem ser os mais variados. As propriedades mais importantes para um projeto são: resistência (tensão de escoamento e limite de resistência a tração), ductilidade, dureza e rigidez.

Para determinação das propriedades mecânicas de um material, são realizados ensaios mecânicos, que na grande maioria das vezes são classificados como destrutivos. Para que os resultados obtidos sejam comparáveis, é preciso que o ensaio seja realizado de acordo com normas técnicas (Chiaverini, 1986).

Este trabalho de pesquisa estudou especificamente uma dessas propriedades mecânicas, a dureza superficial do aço SAE 1045 em quatro condições metalúrgicas diferentes (trefilado a frio, laminado a quente, normalizado e temperado e revenido). O objetivo foi comparar os resultados obtidos através de ensaios de dureza Rockwell com os resultados fornecidos nas literaturas de referência.

Além dos ensaios de dureza Rockwell, foram realizados previamente processos de tratamentos térmicos de normalização, têmpera e revenimento em algumas amostras.

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A propriedade mecânica denominada dureza é largamente utilizada na especificação de materiais, nos estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas e na comparação de diversos materiais (Souza, 1982). A

dureza de um material é um conceito relativamente complexo de definir, dadas as diferentes interpretações que lhe podem ser atribuídas (Chiaverini, 1986).

A resistência à deformação plástica permanente, resistência à penetração, resistência ao desgaste, resistência ao corte, são algumas das diversas definições utilizadas por profissionais, de diversas áreas, para definir o conceito físico da dureza. Sob esse ponto de vista, pode-se dividir o ensaio de dureza em três tipos principais, que dependem da maneira com que o ensaio é conduzido, 1) por penetração; 2) por choque e 3) por risco (Souza, 1982).

Dentre os ensaios de dureza por penetração, o ensaio de dureza Rockwell é o ensaio universalmente mais utilizado, devido sua rapidez, facilidade de execução, minimização de erros humanos, capacidade de distinguir pequenas diferenças de dureza em aço temperado e ainda porque as impressões obtidas apresentam pequenas dimensões (Chiaverini, 1986).

O ensaio de dureza Rockwell consiste na aplicação de uma carga na superfície do material empregando um penetrador padronizado, produzindo uma marca superficial ou impressão (Garcia, 2012). A dureza Rockwell, simbolizada por HR elimina o tempo necessário para a medição de qualquer dimensão da impressão causada, pois o resultado é observado de forma direta e automaticamente na máquina de ensaio (Souza, 1982).

Em relação aos aços, uma das características mais importantes é a possibilidade de obter-se boas combinações de resistência e tenacidade, sendo assim submetidos a processos de tratamentos térmicos visando modificar as propriedades do material sobretudo as mecânicas (aumentar a dureza e conseqüentemente a resistência mecânica), ou para aliviar as tensões internas ou ainda para reestabelecer a estrutura cristalina do material (processo de recozimento). A estrutura martensítica revenida permite uma boa combinação de resistência e tenacidade. Para resultar em uma estrutura martensítica deve-se realizar o processo de tratamento térmico de têmpera. Esse processo consiste em elevar até a temperatura de austenização e resfriar a uma velocidade suficiente rápida para evitar as transformações perlíticas e bainíticas na peça (Silva & Mei, 2006).

As propriedades ótimas de um aço que foi temperado e revenido só podem ser obtidas se, durante o tratamento térmico por têmpera, a microestrutura da amostra tiver sido convertida em um alto teor de martensita. Durante o tratamento por têmpera, é impossível resfriar toda a amostra em uma taxa uniforme – a superfície sempre resfriará mais rapidamente que as regiões internas. Portanto, a austenita irá se transformar ao longo de uma faixa de temperaturas, produzindo uma possível variação de microestrutura e das propriedades em função da posição no interior de uma amostra (Callister, 2012).

Para realizar o tratamento térmico nos aços a temperatura de homogeneização (patamar) deve ser superior a temperatura de transformação da microestrutura em austenita. A formação da austenita é uma ocorrência inevitável durante os processos de tratamentos termomecânicos e soldagem dos aços, pois ambos processos estão com temperaturas superior à de transformação austenítica (Stein et al., 2005).

Além das taxas de resfriamento empregadas nos processos de tratamento térmico, o comportamento das propriedades mecânicas dos aços depende também da cinética de austenização no tratamento térmico (se a fase autenítica está homogênea ou heterogênea), do tamanho de grão prévio, da taxa de aquecimento, da presença de inclusões não metálicas e da distribuição de fases (Stein et al. 2005).

O processo de têmpera é empregado para obter a martensita, aumentando a dureza e a resistência mecânica à tração. A ductilidade e a tenacidade da martensita podem ser melhoradas e as tensões internas aliviadas por um tratamento térmico denominado revenido (Carvalho et al. 2015). Para obter os valores desejados de resistência mecânica e tenacidade, deve-se logo após o processo de têmpera, realizar o processo de revenimento no aço. Esse processo de revenimento consiste em aquecer o aço até uma temperatura abaixo da temperatura de austenitização e manter por um tempo para homogeneização da temperatura na peça e obter-se as propriedades mecânicas desejadas (Silva & Mei, 2006).

O tratamento térmico de normalização é normalmente empregado para homogeneização da microestrutura após o processo de forjamento (Silva & Mei, 2006 e Bresciani et al. 2011). O processo de normalização é usado para o refino de grão (através da recristalização) e homogeneização da estrutura para ter-se um melhor resultado no processo de têmpera e no processo de revenimento posterior. Também o processo de normalização melhora a usinabilidade do aço, refina as estruturas brutas de peças fundidas e pode-se obter propriedades mecânicas desejadas (Silva & Mei, 2006).

## METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho de pesquisa, foram utilizadas duas barras circulares maciças de aço SAE 1045 com diâmetro de 3/8" (9,53mm). As condições metalúrgicas dessas barras foram: uma barra trefilada a frio e outra barra laminada a quente. As composições químicas dos materiais empregados dessa pesquisa estão apresentadas na Tabela 1.

**TABELA 1. Composição química (em porcentagem de massa) dos Aços Ensaçados.**

**Fonte: Certificado de Qualidade do Fornecedor.**

Material	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Cu	Fe
SAE 1045 Trefilado a frio	0,47	0,69	0,01	0,015	0,26	0,025	0,01	0,015	98,505
SAE 1045 Laminado a quente	0,47	0,65	0,014	0,013	0,2	0,08	0,03	0,07	98,473

As amostras foram cortadas no comprimento de 200mm e agrupadas em quatro tipos de amostras com cinco corpos de prova cada.

- **Amostra 1:** 5 corpos de prova na condição metalúrgica **trefilado a frio**.
- **Amostra 2:** 5 corpos de prova na condição metalúrgica **laminado a quente**.
- **Amostra 3:** 5 corpos de prova na condição metalúrgica **temperado e revenido** (tratadas termicamente posteriormente).
- **Amostra 4:** 5 corpos de prova na condição **metalúrgica normalizado** (tratadas termicamente posteriormente).

Com as amostras já separadas e identificadas, realizaram-se os processos de tratamentos térmico. Foram utilizados dois fornos tipo mufla com capacidade de até 1200°C. A amostra 3 (inicialmente na condição metalúrgica trefilado a frio) foi submetida ao processo de tratamento térmico de têmpera e revenimento. Para o processo de têmpera o forno foi aquecido e mantido numa temperatura de 890 °C, os corpos de prova ficaram um tempo de encharque de 24 minutos dentro do forno (para a transformação austenítica e homogeneização da temperatura). Em seguida os corpos de prova foram resfriados rapidamente em água até a temperatura ambiente, e assim foram levados para o outro forno para fazer o processo de revenimento.

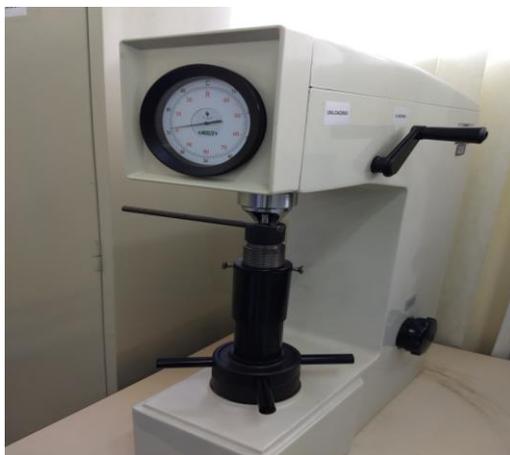
Para o processo de revenimento, o forno foi aquecido e mantido numa temperatura de 280°C onde os corpos de prova ficaram um tempo de encharque de 20 minutos e em seguida resfriados ao ar calmo até a temperatura ambiente como mostra a Figura 1. A amostra 4 (inicialmente na condição metalúrgica laminado a quente) foi realizado o tratamento de normalização. Nesse processo, o forno é aquecido e mantido numa temperatura de 890°C e as amostras ficam dentro do forno por tempo de encharque de 24 minutos e foram resfriadas ao ar calmo até a temperatura ambiente.



**FIGURA 1 - Amostras resfriando ao ar calmo após o processo de revenimento.**  
**Fonte: Próprio Autor, 2019.**

Os parâmetros para os processos de tratamento térmico (temperatura, tempo de patamar, e taxas de resfriamentos) foram baseados conforme literatura técnica disponibilizada pela GGD Metais (2019).

Com as amostras já tratadas termicamente, realizou-se os ensaios de dureza, este ensaio foi realizado utilizando um Durômetro Insize – Code ISH-NR150 mostrado na Figura 2. A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados na realização do ensaio para cada amostra.



**Figura 2 - Equipamento utilizado para o ensaio de dureza.**  
**Fonte: Próprio Autor, 2019.**

**Tabela 2. Parâmetros utilizados no ensaio de dureza.**  
**Fonte: Próprio Autor, 2019.**

Amostra	Tipo de penetrador	Carga principal (Kgf)	Pré- carga (Kgf)	Escala
1	Ponta de diamante	150	10	HRC
2	Esférico 1/16”;	100	10	HRB
3	Ponta de diamante	150	10	HRC
4	Esférico 1/16”;	100	10	HRB

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos nos ensaios de dureza com a correção do raio de curvatura conforme a norma ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008 e também a dureza encontrada na literatura para cada condição metalúrgica do aço estudado. As Figuras 3 e 4 apresentam a variação da dureza devido aos tratamentos térmicos realizados nas amostras nas escalas Rockwell B e Rockwell C.

**Tabela 3. Resultados obtidos nos ensaios de dureza.**  
**Fonte: Próprio Autor, 2019.**

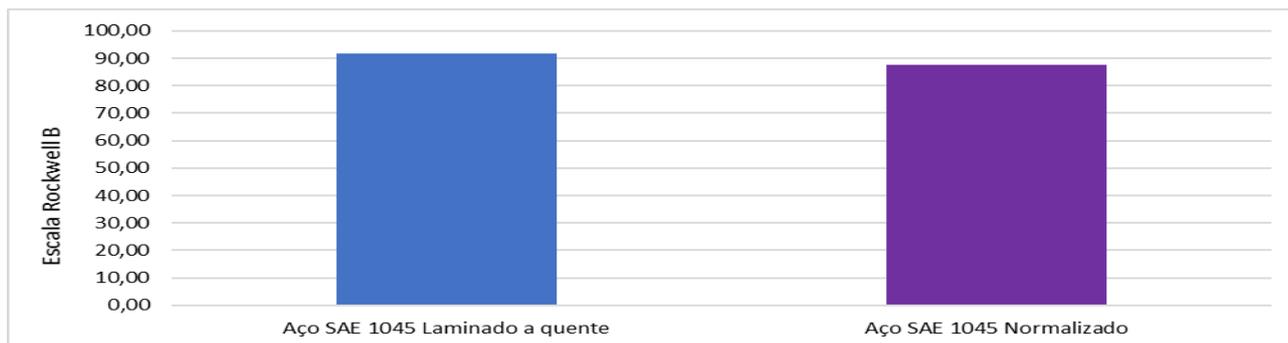
Amostra	Condição Metalúrgica	Média dos resultados	Desvio Padrão	Dureza obtida na literatura	Escala da dureza
1	Trefilado a frio	27,55	0,66	Abaixo de 20 <sup>1,2</sup>	C
2	Laminado a quente	94,55	1,66	84 <sup>1,2</sup>	B
3	Temperado e revenido	48,45	1,12	50 <sup>2</sup>	C
4	Normalizado	90,70	2,05	85 - 95 <sup>2</sup>	B

<sup>1</sup> ASM Handbook (1990)

<sup>2</sup> MatWeb (2019).

Segundo ASM Handbook (1990), os valores de dureza Brinell para o aço SAE 1045 laminado a quente e trefilado a frio são respectivamente, 163 HB e 179 HB. Os valores de dureza também são fornecidos pela MatWeb (2019) em diferentes condições metalúrgicas: 163 HB para o laminado a quente (com bitola de 19-32 mm); 187 HB para o trefilado a frio (com bitola de 16-22 mm); 450 HB para o temperado e revenido; e 167 à 229 HB para o normalizado. Foi utilizada uma tabela de conversão de dureza disponibilizada por Chiaverini (1986), já que os valores medidos neste trabalho foram na escala Rockwell. Então, realizada a conversão da dureza Brinell para Rockwell dos valores encontrados na literatura, os mesmos são apresentados na Tabela 3.

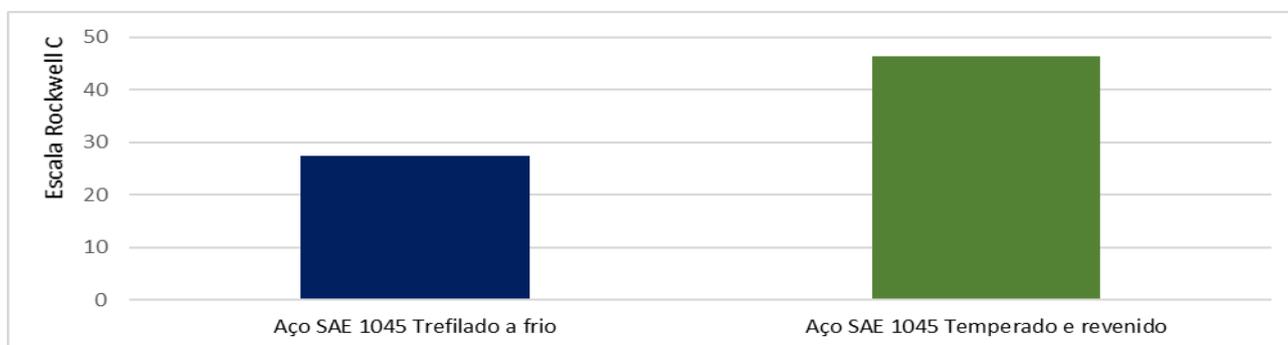
Os valores de dureza convertidos abaixo de 20 HRC para a amostra trefilada a frio, são devido a tabela de conversão não indicar a correspondência de escala Brinell para Rockwell C nessa faixa de valores.



**Figura 3 - Diferença da dureza no aço SAE 1045 devido ao tratamento térmico de normalização.**  
Fonte: Próprio Autor, 2019.

Os resultados obtidos neste trabalho para a amostra 4, cujo condição metalúrgica está normalizada, foi muito semelhante com os apresentados pela literatura, devido aos resultados implícitos do tratamento térmico de normalização. Para a amostra 3, condição metalúrgica temperada e revenido, também está conforme os valores da literatura, visto que a dureza final após o processo de revenimento é dependente da temperatura do processo de revenimento.

A amostra 2 apresentou valores de dureza um pouco superior aos apresentados na literatura, isso pode ser devido as condições de processamento (tempo, temperaturas, taxa de resfriamento, etc.) do material durante o processo de laminação, visto que pelo MatWeb (2019) a bitola é maior que do material estudado neste trabalho. Contudo, a diferença de dureza fica mais explícito na Amostra 1, que pelos valores de dureza das literaturas consultadas estão bem diferentes. A dureza maior na Amostra 1 também pode ser devido as condições de processamento do material, como um maior grau de deformação a frio imposto ao material ou um maior número de passes de redução, consequentemente apresentando-se mais encruado e com maior dureza superficial. Infelizmente as literaturas consultadas não informam o grau de deformação, o nível de encruamento e nem os números de passes durante o processo de trefilação.



**Figura 4 - Diferença da dureza no aço SAE 1045 devido ao tratamento térmico de têmpera e revenimento.**  
Fonte: Próprio Autor, 2019.

## CONCLUSÕES

Este trabalho de pesquisa se mostrou satisfatório, visto que os objetivos foram alcançados e os resultados obtidos foram bastante condizentes com os da literatura, principalmente das amostras 3 e 4 que foram tratadas termicamente pelos processos de normalização, têmpera e revenimento. Em relação as diferenças encontradas nas amostras 1 e 2 em relação da bibliografia consultada, isso pode ter ocorrido devido as variáveis de processos, tanto no processo de laminação a quente e no processo de trefilação a frio; no entanto, maiores investigações e estudos mostram-se necessários para maiores esclarecimentos.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008 - Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell Parte 1: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T), 39 páginas.

ASM Handbook, Vol. 1, **Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance alloys**, 10ª ed., ASM International Handbook Committee, 1990.

BRESCIANI FILHO, E.; SILVA, I.B.; BATALHA, G.F.; BUTTON, S.T., **Conformação plástica dos metais**, São Paulo: EPUSP, 2011, 254p.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 8ª ed., LTC: Rio de Janeiro, 2012.

CARVALHO, T. U. S. et al. **Caracterização do aço SAE-4140 temperado em água, salmoura e óleo e, posteriormente, revenido**, 15º ENEMET – Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica de Materiais e de Minas, pg. 3034 – 3040, 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. 2ª ed., São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986.

DAVIM, J. P.; MAGALHÃES, A. G. **Ensaaios mecânicos e tecnológicos**. 3a. ed. Porto, Portugal: Publindustria, 2010.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaaios dos Materiais**. LTC: Rio de Janeiro, 2ª Edição, 2012.

GGD METALS. **AÇO SAE 1045**. Disponível em: <https://ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2015/07/A%C3%87O-1045.pdf>. Data de acesso: 10/04/2019.

MATWEB, **MATERIAL PROPERTY DATA. AISI 1045 Steel**, Disponível em: <http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=1045>, Data de Acesso: 05/09/2019.

DA COSTA SILVA, A. L. V.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 2ª ed., São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 646p.

SOUZA, S. A. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos**. 5ªed., São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

STEIN, C. R. et al. **Efeito da rápida austenitização sobre as propriedades mecânicas de um aço SAE1045**, Metalurgia e Materiais – Revista Escola de Minas, Volume 58(1), pg. 51-56, 2005.