

## **INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE REVENIMENTO NA DUREZA E NA TENACIDADE DO AÇO AISI H13**

LEONARDO DOS S. FRANQUILINO<sup>1</sup>, JOSÉ EDUARDO NUCCI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Campus Piracicaba, leonardo.franquilino@aluno.ifsp.edu.br.

<sup>2</sup> Professor orientador Ms. José Eduardo Nucci, IFSP, Campus Piracicaba, eduardo.nucci@ifsp.edu.br.

3.03.03.06-0 Tratamento Térmicos, Mecânicos e Químicos

**RESUMO:** Na indústria metalmeccânica é cada vez mais exigido materiais com melhores características mecânicas, tais como, maior durabilidade contra corrosivos e uma boa combinação entre a resistência mecânica e tenacidade. Tais propriedades são exigidas em moldes para extrusão de alumínio, moldes de injeção de polímeros e metais não ferrosos e matrizes de forjamento a quente. Estas ferramentas para trabalho a quente, em aplicações reais, estão sujeitas a aplicações em processos com impactos repetitivos e ciclos térmicos com aquecimento e resfriamento. Um dos principais materiais utilizado para a fabricação de moldes e matrizes para trabalho a quente é o aço ferramenta AISI H13. O objetivo desse trabalho foi analisar a influencia da temperatura de revenido nas propriedades mecânicas de dureza e tenacidade do aço AISI H13. Inicialmente realizou-se uma revisão bibliográfica abordando as classes dos aços ferramentas, tratamento térmico de têmpera e revenimento e tipos de microestrutura geradas após os tratamentos. Nos laboratórios do IFSP – campus Piracicaba realizou-se todo o desenvolvimento experimental do trabalho e as amostras foram caracterizadas por ensaio de dureza e ensaio de impacto Charpy. Como resultado, foi plotado o gráfico da temperatura de revenimento pela dureza e pela tenacidade (energia de impacto), sendo identificado a presença uma faixa de endurecimento secundário entre as temperaturas de revenido de 480 °C a 520 °C, com a maior dureza em 500 °C, corroborando com a literatura disponível atualmente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Revenimento, Aço ferramenta, H13, endurecimento secundário.

### **INFLUENCE OF TEMPERING TEMPERATURE ON HARDNESS AND IN THE TENACITY OF AISI H13 STEEL**

**ABSTRACT:** In the metal-mechanic industry, materials with better mechanical characteristics are increasingly required, such as greater durability against corrosives and a good combination of mechanical strength and toughness. Such properties are required in molds for aluminum extrusion, injection molds of polymers and non-ferrous metals and hot forging dies. These tools for hot work, in real applications, are subject to applications in processes with repetitive impacts and thermal cycles with heating and cooling. One of the main materials used for the manufacture of molds and dies for hot work is AISI H13 tool steel. The objective of this work was to analyze the influence of tempering temperature on the mechanical properties of hardness and toughness of AISI H13 steel. Initially, a bibliographic review was carried out addressing the classes of tool steels, tempering and tempering heat treatment and types of microstructure generated after the treatments. In the IFSP's laboratories - campus Piracicaba all the experimental development of the work was carried out and the samples were characterized by hardness test and Charpy impact test. As a result, the tempering temperature graph by hardness and toughness (impact energy) was plotted, with the presence of a secondary hardening range between tempering temperatures of 480 °C to 520 °C, with the greatest hardness at 500 °C., supporting the currently available literature.

**KEYWORDS:** Temper, Tool steel, H13, secondary hardening

### **INTRODUÇÃO**

Os tratamentos térmicos consistem em operações de aquecimento e resfriamento controlados, que geram modificações na microestrutura dos aços. Eles podem ser utilizados na otimização de propriedades físicas e mecânicas dos materiais, tornando-os adequados às exigências do produto a ser fabricado (CALLISTER JR., 2012). O processo de têmpera consiste no aquecimento do aço até a temperatura de

austenitização, permanecendo nesta temperatura por um tempo definido, seguido de resfriamento brusco até atingir a temperatura ambiente. Esse resfriamento rápido impede que haja difusão do carbono, o que ocasiona a formação de uma fase metaestável denominada martensita, conhecida por sua alta dureza e fragilidade. Para conseguir um aumento na tenacidade do material, a têmpera deve ser seguida do revenido, esse tratamento é responsável pelo alívio de tensões na microestrutura (KRAUSS, 2005). Na literatura encontram-se as especificações de dureza e tenacidade dos aços em geral. Os aços ferramentas para trabalho a quente, em destaque o aço AISI H13, apresentam como propriedades mecânicas excelentes resistência a impacto em altas temperaturas, resistência ao amolecimento quando submetido a altas temperaturas e boa resistência a clivagem térmica (PENG et al, 2020). Os processos de fabricação dos aços estão em constantes aprimoramentos com o avanço da tecnologia, assim, neste trabalho realizou-se uma análise da influência da temperatura de revenimento na dureza e na tenacidade do aço ferramenta para trabalho a quente AISI H13, comparando os resultados com a literatura atual. O aço AISI H13 é usado na fabricação de muitos tipos de moldes e matrizes, como: matrizes de forjamento, extrusão e fundição sob pressão.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Material e corpo de prova

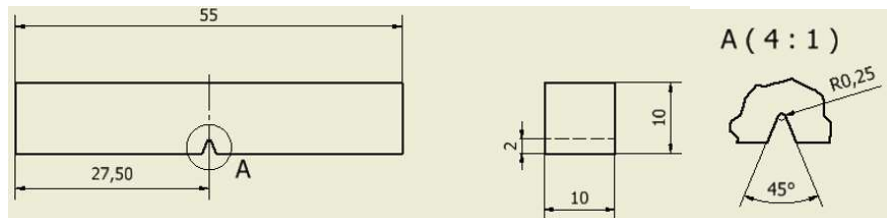
Para a realização do trabalho utilizou-se duas barras do aço AISI H13, recozido com dureza de 11,8 HRC com as seguintes dimensões: Ø19,0 mm x 1.000 mm de comprimento, fornecida pela empresa TecCar Usinagem de Precisão Ltda.

A composição química do aço foi confirmada por espectroscopia de emissão óptica, realizado pela empresa TM Service Laboratório Metalúrgico conforme mostra a Tabela 1. O resultado da análise da composição química, onde os valores estão em porcentagem em massa, atende a norma ASTM A681 –08.

**Tabela 1** - Análise química do aço AISI H13 utilizado no trabalho, % em massa.

| Elementos | C    | Si   | Mn    | P     | S     | Cr   |
|-----------|------|------|-------|-------|-------|------|
| Obtido    | 0,39 | 0,92 | 0,38  | 0,02  | 0,006 | 4,90 |
| Elementos | Ni   | Mo   | Al    | Cu    | V     | Fe   |
| Obtido    | 0,10 | 1,16 | 0,232 | 0,103 | 0,85  | Base |

Os corpos de prova, para o ensaio de impacto Charpy, foram fabricados conforme as dimensões especificadas na norma ASTM E23-18 2018. A Figura 1 mostra o desenho do corpo de prova com as respectivas dimensões em milímetros.



**Figura 1** - Dimensões em mm do corpo de prova para ensaio de CHARPY, tipo A (ASTM E23-18, 2018)

A usinagem dos corpos de prova foi realizada no laboratório de processos de fabricação / usinagem do IFSP - campus Piracicaba, seguindo as seguintes etapas de processo:

- Usando uma serra de fita com refrigeração, cortou-se a barra de aço em blanks com 60 mm de comprimento;
- Os blanks (corpo de prova) foram fresados, sem refrigeração, com as dimensões de 10,3 x 10,3 x 55 mm;
- Os corpos de prova foram retificados, com refrigeração em abundância para evitar o aquecimento do material, nas dimensões de 10 x 10 x 55 mm, conforme especificado pela norma ASTM E23-18, 2018;
- A usinagem do entalhe em V foi realizada em uma máquina de eletroerosão a fio.

### Têmpera e Revenimento

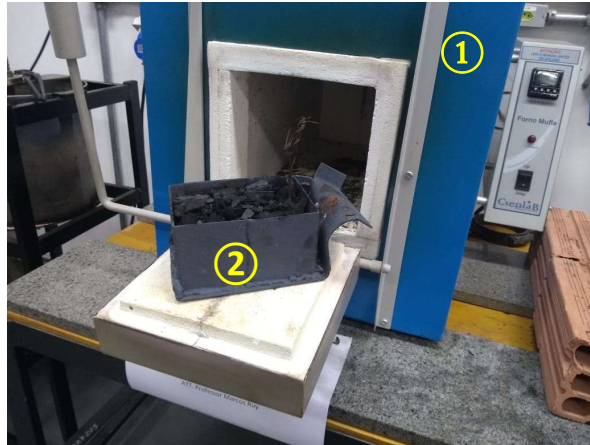
Os parâmetros de processo, para a realização da têmpera, foram extraídos da literatura, como exemplo, os dados recomendados pela empresa GGD Metals (2019).

Para a realização da têmpera usou-se um forno Mufla, marca CIENLAB, (Figura 2) do laboratório de tratamento térmico do IFSP – campus Piracicaba. Para evitar descarbonetação dos corpos de prova durante o aquecimento, colocou-se os corpos de prova dentro de uma caixa metálica repleta de carvão mineral (Figura 2).

Os corpos de provas foram aquecidos até a temperatura de 1030 °C, permanecendo nesta temperatura por 1 hora. Após atingir o tempo de encharque, tirou-se os corpos de prova do forno resfriando rapidamente em óleo à temperatura ambiente. Foram temperados 30 corpos de prova.

Os 30 corpos de provas temperados foram divididos em 10 grupos com 3 corpos de provas. Cada grupo de corpos de provas foram revenidos em temperaturas diferentes, tais como: 300 °C, 400 °C, 460 °C, 480 °C, 500 °C, 520 °C, 540 °C, 560 °C, 600 °C e 650 °C. Para cada ciclo (temperatura) de revenido, os corpos de prova foram colocados na mesma posição dentro do forno, diminuindo assim a variação de temperatura entre os experimentos.

Após atingir a temperatura de revenimento, os corpos de provas permaneceram dentro do forno por 2 horas. Em seguida, retirou-os do forno deixando-os resfriar até atingir a temperatura ambiente.



**Figura 2** - ① Forno mufla usado no tratamento térmico de têmpera e revenimento. ② caixa metálica com carvão mineral

### Dureza e ensaio de impacto

Para a medição da dureza superficial dos corpos de prova foi utilizado um durômetro. A escala de medição utilizada para a obtenção dos dados foi a Rockwell C (HRC). As medições de dureza foram executadas após o processo de têmpera e após o revenimento. Em cada corpo de prova foram realizadas três medidas de dureza, cada uma delas em superfície diferente.

No Laboratório de ensaios mecânicos do IFSP – campus Piracicaba, foi realizado o ensaio de impacto do tipo Charpy. A máquina registra a energia absorvida em kgf \* m, como pode ser visto na Figura 3.



**Figura 3** – Máquina para ensaio de impacto Charpy

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Têmpera e Revenimento

O processo de têmpera na temperatura de austenitização (1030 °C) obteve os resultados esperados conforme Wei et al. (2011), onde a dureza média de todos corpos de prova foi de 56,8 HRC, com desvio padrão de 1,83 HRC. Devido à utilização do carvão mineral no processo, os corpos de provas não apresentaram decarbonetização superficial.

Segundo Colpaert (2008) o comportamento geral dos aços após o revenimento é a redução de dureza, redução da resistência mecânica e aumento da ductilidade. Nos aços ferramenta pode ocorrer um aumento de dureza, causado principalmente por endurecimento por precipitação (endurecimento secundário), com o

aumento da temperatura de revenido.

Analisando os resultados das medições de dureza na Tabela 2 e o gráfico da Figura 4 é possível identificar que o aço ferramenta H13 apresenta o pico de endurecimento secundário na temperatura de revenido de 500 °C. Os valores obtidos estão condizentes com o Medvedeva et al. (2009), Wei et al. (2011) e Morais, (2019).

**Tabela 2** - Dureza média e energia de impacto média com os respectivos desvio padrão para cada temperatura de revenimento, com tempo de encharque de 2h.

| TEMPERATURA DE REVENIMENTO °C | DUREZA MÉDIA (HRC) | DESVIO PADRÃO (HRC) | MÉDIA DA ENERGIA IMPACTO (J) | DESVIO PADRÃO (J) |
|-------------------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|-------------------|
| 300                           | 51,56              | 0,88                | 6,86                         | 0,00              |
| 400                           | 51,11              | 2,42                | 7,19                         | 0,21              |
| 460                           | 54,61              | 1,23                | 6,05                         | 0,25              |
| 480                           | 55,06              | 1,84                | 5,56                         | 0,42              |
| 500                           | 55,33              | 1,29                | 4,17                         | 0,11              |
| 520                           | 51,11              | 3,18                | 4,25                         | 0,15              |
| 540                           | 48,89              | 1,45                | 7,84                         | 0,14              |
| 560                           | 46,33              | 2,12                | 11,93                        | 0,44              |
| 600                           | 40,11              | 2,76                | 15,03                        | 0,21              |
| 650                           | 28,44              | 1,88                | 28,76                        | 0,66              |

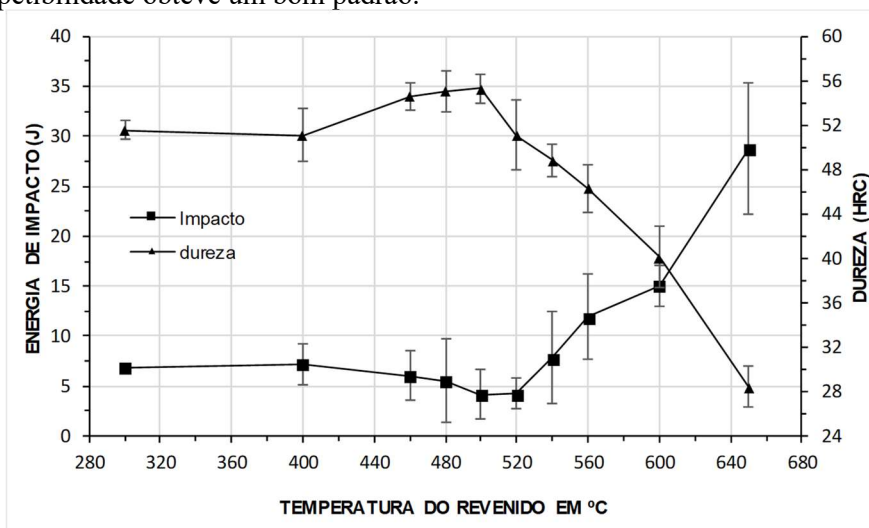
Algumas variações na dureza entre as faixas de temperaturas fez com que o desvio padrão seja elevado, tal como para 520 °C onde o desvio padrão foi 3,18 (HRC), um dos maiores contribuintes para a variação do mesmo, se deve ao fato de o forno não ter um controlador de temperatura com alta precisão, no qual como exemplo, para a faixa de 520 °C o forno variava de 510 °C a 530 °C.

### Ensaio impacto Charpy

Os dados obtidos após ensaio de Charpy, estão na Tabela 2. A unidade de medida fornecida pela máquina de Charpy é a Kgf, onde a mesma foi convertida para Joules (J), pois é a unidade de medida mais encontrada na revisão bibliográfica.

Após o endurecimento secundário há um ligeiro aumento na capacidade de absorção de impacto em 520 °C e com a elevação da temperatura de revenimento tem-se um aumento brusco na quantidade de absorção de energia de impacto no material, com estes dados é possível comparar com a bibliografia e observar que há congruência entre os dados.

Com os resultados é possível analisar que o desvio padrão obteve um valor consideravelmente baixo sendo o maior deles na faixa de temperatura de 560 °C com desvio padrão de 0,44, portanto, são dados confiáveis e sua repetibilidade obteve um bom padrão.



**Figura 4** - Gráfico da variação da dureza e absorção da energia de impacto para diferentes temperaturas de revenimento no aço H13.

## CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos pelo trabalho é possível concluir que o aço AISI H13 possui um endurecimento secundário, na faixa de 480 °C a 520 °C, atingindo seu pico em 500 °C com dureza de 55,33 HRC e com absorção de energia mínima de 4,17 J. Todos os pontos das curvas de energia absorvida quanto os de dureza superficial foram correspondentes ao encontrado na bibliografia.

É importante ressaltar a relevância da determinação correta da temperatura do revenimento, para fabricação de peças em aço H13, pois não há um comportamento semelhante aos demais aços, sejam eles com ou sem elementos de liga. Portanto ao requerer uma determinada dureza superficial é preciso estudar qual a faixa ideal de temperatura de revenido a ser aplicado devido este aço apresentar um aumento de dureza e a diminuição da tenacidade (endurecimento secundário) com o aumento da temperatura de revenido. Assim concluiu-se com êxito o objetivo da pesquisa.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial ao Professor Mestre José Eduardo Nucci, pela confiança e orientação do trabalho. Ao IFSP pela fomentação da bolsa auxílio e instalações para análise e produção da parte experimental. Ao Aparecido Carlos Arroyo, presidente da TecCAR Usinagem de Precisão, no qual forneceu o material e o processo de usinagem do corte a fio.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM), **ASTM A681 –08**: Standard Specification for Tool Steels Alloy. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM), **ASTM E23-18**: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018

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

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

GGD METALS. **Aço GGD H13. (Catálogo Técnico)**. Disponível em: . Acessado em: 28 de março de 2019.

KRAUSS, G. **Steels: processing, structure and performance**. Estados Unidos da América. Materials Park: ASM international, 2005.

MEDVEDEVA, A.; BERGSTROM, J.; GUNNARSSON, S.; ANDERSSON, J. **Hightemperature properties and microstructural stability of hot-work tool steels**. Materials Science & Engineering: A, ISSN 0921-5093, E-ISSN 1873-4936, Vol. 523, no 1-2, p. 39-46. 2009.

MORAIS, N. N. **Influência dos parâmetros de tratamento térmico na microestrutura e no comportamento mecânico de aços ferramenta para trabalho a quente**. 2019. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Belo Horizonte, 2019.

PENGA, T.; ZHAOA, X.; CHENA, Y.; TANGA, L.; WEIA, K.; HU, J. Improvement of stamping performance of H13 steel by compound-layer free plasma nitriding. **Surface Engineering**, v. 36, n.. 5, p. 492–497, 2020. doi: 10.1080/02670844.2019.1609172.

WEI, M. X.; WANG, S. Q.; WANG, L.; CUI, X. H.; CHEN, K. M. Effect of tempering conditions on wear resistance in various wear mechanisms of H13 steel. **Tribology International**, v. 44, Issues 7-8, p. 898–905. 2011. doi: 10.1016/j.triboint.2011.03.005