



## Análise das propriedades mecânicas de um aço baixo carbono envelhecido artificialmente a 200 °C em regime intermitente

Luis Paulo da Silva Vitorino<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica

Palavras-chave: aço baixo carbono; tratamento térmico; ensaios mecânicos; envelhecimento.

### INTRODUÇÃO

O efeito do envelhecimento artificial nos aços, em geral, está relacionado a um aumento na dureza, na qual está associado a maiores dificuldades em lidar com os precipitados, oriundo do aquecimento deliberado, acelerando o processo de envelhecimento natural já recorrente dos aços<sup>1</sup>. Uma discordância deve ou cortar as partículas precipitadas em sua passagem ou fluir entre elas. Em ambas as circunstâncias, um aumento de tensão é necessário para transferir as discordâncias através de uma rede que compreende partículas precipitadas<sup>2</sup>. O envelhecimento desempenha um papel fundamental na evolução das microestruturas das ligas de aço, moldando suas propriedades finais<sup>1</sup>. Compreender como o carbono (C) afeta as propriedades mecânicas dos aços é crucial para otimizar o desempenho em diversas aplicações industriais. O objetivo foi verificar as alterações nas propriedades mecânicas do aço ao longo do tempo, simulando o envelhecimento artificial. O estudo também comparou mecanismos e resultados observados por diferentes pesquisadores.

### METODOLOGIA

A Tabela 1 demonstra a composição química da liga usada neste estudo. A liga foi laminada a frio obtendo uma redução de espessura acima de 90%, seguida por um recozimento contínuo afim de gerar recristalização no material a uma temperatura de 660 °C. Após isso foi seguido por duas etapas de resfriamento sendo lento e rápido. Após o recozimento, o material passou por um passe na laminação de encruamento aplicando uma pequena redução de espessura seguido de um revestimento a base de cromo.

Tabela 1 - Composição química da liga (massa %)

C	Mn	P	Si	S	Al	Cr	N
0,06	0,35	0,02	0,02	0,023	0,06	0,06	0,006

Fonte: Próprio autor (2024).

As amostras após processadas foram recolhidas e envelhecidas de forma artificial em uma estufa de secagem da marca Quimis com temperatura controlada de 200°C em 5 faixas de tempo específicas para simulação litográfica sendo elas de 10, 20, 40 (20+20) e 60 (20+20+20) min e não envelhecida para o tempo de 0 minutos.

Para a realização dos ensaios mecânicos, a escala superficial Rockwell foi a utilizada para as medições de dureza. Foi utilizada uma máquina Wilson Rockwell 38 com penetrador de tungstênio para medir a dureza para as amostras envelhecidas e não envelhecidas, medidas em temperaturas ambiente seguindo a norma NBR ISO 6508-1<sup>3</sup>. Foi aplicada uma pré carga de 3 Kgf e uma carga final de 15 Kgf na superfície da amostra. O teste de tração foi conduzido para corpos de prova (CP) de tração seguindo a norma NBR ISO 6892-1<sup>4</sup> com comprimento útil de 50 mm usando a máquina de tração Instron 5965. A velocidade de deslocamento (taxa de deformação) foi de 1,5 mm/min na temperatura ambiente. Dentre as variáveis medidas, o alongamento (AL), limite de resistência (LR) e o limite de escoamento (LE) foram as variáveis avaliadas para o projeto.

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

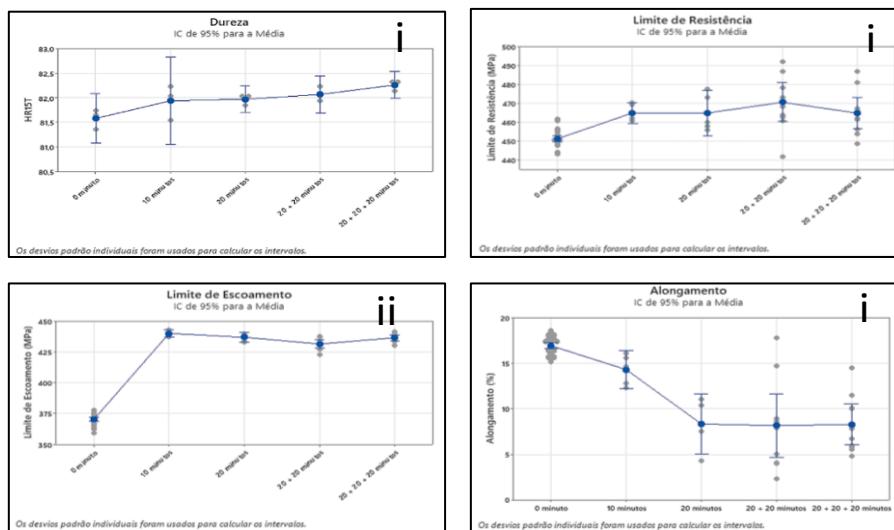
De acordo com a Figura 1 (i) , é possível observar o ganho de aproximadamente 0,7 HR para amostra. A amostra sem o processo de envelhecimento apresentou uma dureza média aproximadamente de 81,6 HR, enquanto no seu pico, 20+20+20 min apresentou 82,3 HR. Podemos observar que para os valores de dureza, o ganho desta propriedade não foi tão efetivo para proporcionar um aumento considerável para esta variável.

O limite de resistência conforme a Figura 1 (ii) foi uma variável na qual apresentou acréscimo de resistência, entretanto, o aumento não foi significativo como para o limite de escoamento. O aumento da média para o material envelhecido a partir de 10 minutos foi de aproximadamente 15 MPa chegando até o máximo de 20 MPa para o tempo de 20 minutos. Ao analisar valores individuais para o LR é possível observar que há uma grande dispersão



dos dados para as amostras que foram envelhecidas por 20+20 minutos e 20+20+20 minutos. Esse comportamento pode estar relacionado a dispersão de precipitados na matriz ferrítica visto que a concentração de carbono na amostra ser baixa, de forma que a resistência máxima do material seja pouca afetada pela precipitação.

Figura 1- Valores de Dureza (A), LR (B), LE (C) e AL (D) para as amostras tratadas termicamente



Fonte: Próprio autor (2024).

A Figura 1 (iii) nos demonstra os valores de LE para o envelhecimento 200 °C. Assim como a dureza, é possível observar o aumento da variável, porém esta de maneira mais acentuada em relação a dureza. Com o envelhecimento de 10 minutos é possível observar um ganho aproximadamente de 70MPa em relação à amostra virgem. Após 10 minutos, é possível observar uma leve oscilação para os valores de LE em relação aos demais tempos de envelhecimento. A amplitude dos dados ensaiados é baixa, mostrando assim a constância observada.

O comportamento do LE para os demais tempos de envelhecimento pode estar relacionado com a precipitação máxima do material fazendo de tal forma que os precipitados estejam provavelmente de forma coerente na rede cristalina, dessa forma alcançando o máximo de ganho de propriedade<sup>1</sup>.

Na Figura 1 (iv) pode-se perceber que a amostra inicial possui o alongamento de 17% até a sua falha. Consequentemente, ao longo do tempo, é possível observar que há um decréscimo do AL ao longo do maior tempo de exposição à temperatura, chegando ao seu menor valor com o tempo de 20+20 minutos. De acordo com os estudos de Kawahara *et al* a formação de clusters de carbono e a formação de precipitados de carbono fino podem afetar o alongamento<sup>5</sup>. O espécime do cluster C é especulado para mostrar o alongamento mais baixo, porque uma parte do cluster C, que são dissolvidos como soluto C devido ao cisalhamento por deslocamento, bem como o soluto inicial relativamente alto C causam a ocorrência de envelhecimento por deformação dinâmica durante o teste de tração, o que resulta na aceleração da localização da deformação. O carboneto fino exibe um alongamento relativamente alto, porque C é fixado como o carboneto de ferro estável, bem como menos soluto inicial<sup>5</sup>.

## CONCLUSÕES

Os ensaios de tração mostraram que a dispersão dos dados para o mesmo tempo de tratamento térmico pode estar ligada à formação de carbonetos ou aglomerados de carbono, que alteram o comportamento do aço, aumentando a tensão para contornar o carboneto ou os obstáculos<sup>5</sup>. O alongamento foi a variável mais afetada, refletindo a capacidade de conformação do material antes da ruptura. O limite de escoamento não variou significativamente após 10 minutos de exposição, pois a energia para atravessar os precipitados permaneceu similar. A dureza teve pouco aumento, e a amostra apresentou variabilidade e comportamento heterogêneo, evidenciando falta de homogeneidade nas propriedades mecânicas.

## REFERÊNCIAS

- 1 REED-HILL, R. E. **Princípios de metalurgia física**. 2. ed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois S.A., 1982.
- 2 NOVIKOV, Vladimir. **Concise dictionary of materials science: structure and characterization of polycrystalline materials**. CRC Press, 2002.
- 3 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-ISO 6508-1: Materiais metálicos—Ensaio de dureza Rockwell-Parte 1: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)**. 2008.
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Metallic materials-Tensile testing Part 1: Method of test at room temperature**. NBR ISO 6892-1. 2013.
- 5 KAWAHARA, Yasuhito et al. Characterization of age hardening mechanism of low-temperature aged low-carbon steel by transmission electron microscopy. **Materials Characterization**, v. 183, p. 111579, 2022.