

## **CARACTERIZAÇÃO DO AÇO COMERCIAL SAE 9254 COM MATRIZ NANOESTRUTURA DE MARTENSITA E BAINITA, CORRELACIONANDO COM A MICRODUREZA**

Mateus Lizardo Pessoa Barbosa <sup>1</sup>; Alan Patrick <sup>2</sup>; José Alberto da Cruz Junior <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Mateus Lizardo Pessoa Barbosa, Engenharia metalúrgica, IFMG Campus Ouro Branco, Ouro Branco-MG; [mateuslizardo@hotmail.com](mailto:mateuslizardo@hotmail.com)

<sup>2</sup> Alan Patrick, Bolsista (IFMG), Engenharia metalúrgica, IFMG Campus Ouro Branco, Ouro Branco-MG; [alan-pps@hotmail.com](mailto:alan-pps@hotmail.com)

<sup>3</sup> Orientador: José Alberto da Cruz Junior, Campus Ouro Branco; [jose.alberto@ifmg.edu.br](mailto:jose.alberto@ifmg.edu.br)

### **RESUMO**

A indústria automotiva busca constantemente aprimorar os materiais utilizados na construção de veículos, visando alcançar a combinação ideal de resistência e leveza. Nesse contexto, os aços avançados de alta resistência (AHSS) têm se destacado como uma opção. Dentre os diferentes tipos de AHSS, os aços submetidos aos processos de têmpera e partição (Q&P) e os aços TRIP-assistidos por ferrita bainítica (TBF) têm despertado grande interesse. Os aços TBF apresentam um aumento no equilíbrio entre dureza e ductilidade devido à presença de uma matriz composta por ferrita intercrítica, bainita, martensita e austenita retida, o que provoca o efeito (TRIP). O presente trabalho teve como objetivo tratar isotermicamente um aço SAE 9254 nas temperaturas de 270°C e 340°C nos tempos de 5, 10, 15 e 20 min. Além disso, buscou-se correlacionar esses resultados com a microdureza das amostras. Após tratamento isotérmico foi realizada a preparação das amostras utilizando lixas de alumina de diferentes granulometrias e pasta de diamante com grãos de diferentes tamanhos para o polimento. Em seguida, foram realizados ataques químicos na superfície das amostras utilizando o reativo Nital 2%, a fim de permitir a distinção dos constituintes do aço. Após o ataque químico, as amostras foram analisadas em um microscópio ótico para obtenção de imagens e observação dos diferentes constituintes presentes com o microscópio ótico metalográfico. Além disso, foi empregado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) para uma análise microestrutural mais precisa e identificação dos constituintes presentes. Foi realizado ainda 20 testes de microdureza em cada amostra de forma aleatória para o cálculo de média e desvio padrão. Os resultados obtidos revelaram que, no tratamento isotérmico a 270°C, uma microestrutura mais refinada consistiu em uma matriz de martensita, ferrita bainítica e austenita retida. Por outro lado, no tratamento isotérmico a 340°C, uma microestrutura mais grosseira por feixes de ferrita bainítica com filmes de austenita retida e a presença de blocos deste último constituinte. É importante ressaltar que, devido à temperatura mais alta, não foram encontradas evidências de martensita na microestrutura do aço tratado a 340°C. A comparação dos resultados de microdureza revelou que as amostras tratadas a 270°C apresentaram valores mais elevados em relação às amostras tratadas a 340°C. Esse comportamento pode ser atribuído, principalmente, à maior presença de martensita nas amostras tratadas a 270°C, além de uma microestrutura mais refinada o que contribuiu para uma maior dureza do material. Os resultados deste estudo evidenciaram a influência crucial da temperatura e do tempo de tratamento isotérmico na formação da microestrutura e na microdureza do aço SAE 9254.

### **INTRODUÇÃO:**

A indústria automotiva está em busca de aços mais resistentes e leves para manter a segurança dos veículos sem comprometer seu peso. Dessa forma, a produção de aços com alta resistência mecânica e boa ductilidade tem aumentado nos últimos anos.

Essa demanda levou ao desenvolvimento da terceira geração de aços avançados de alta resistência (AHSS). Essa geração de AHSS inclui os aços que passam pelo processo de têmpera e partição (Q&P) e os aços TRIP-assistido por ferrita bainítica (TBF). O tratamento térmico para obtenção desses aços consiste em uma completa austenitização seguida de um tratamento isotérmico, no qual a temperatura de tratamento determina o tipo de aço obtido <sup>(1,2)</sup>.

Os aços TBF apresentam um aumento no equilíbrio entre dureza e ductilidade devido à presença de uma matriz composta por ferrita intercrítica, bainita, martensita e austenita retida, o que provoca o efeito (TRIP) <sup>(3)</sup>. A austenita retida em temperatura ambiente é resultado da alta concentração de silício nessas ligas (1,5~2%), que tem a função de evitar a precipitação de carbonetos durante a formação da bainita no tratamento isotérmico. Por não ocorrer a precipitação de carbonetos, o carbono permanece na austenita e a mantém estável em temperatura ambiente <sup>(1,4)</sup>.

O objetivo deste estudo é analisar a influência do tempo de transformação nos tratamentos isotérmicos de baixa temperatura (200-300°C) na formação de uma microestrutura composta por martensita, bainita nanoestruturada e austenita retida em aço SAE 9254. Os resultados obtidos tem como objetivo comparar a

microestrutura resultante das temperaturas de 270°C e 340°C, bem como após o processo de têmpera e revenimento, e correlacioná-la com a microdureza.

#### METODOLOGIA:

O aço utilizado para este trabalho possui uma composição química correspondente ao SAE 9254, conforme a Tabela 1. Este aço é geralmente usado para fabricação de eixos, molas helicoidais, hastes de amortecedores e etc.

Carbono	Silício	Manganês	Cromo	Fósforo	Enxofre
0,51-,59	1,2-1,6	0,6-0,8	0,6-0,8	<0,03	<0,04

Tabela 1 – composição química do aço SAE 9254 em % peso.

As temperaturas de transformação do aço foram estimadas segundo as equações de Andrews<sup>(5)</sup>. As equações fornecem valores para as temperaturas de início da formação austenítica ( $A_{c1}$ ); temperatura para o fim da transformação austenítica ( $A_{c3}$ ); temperatura para início da formação da bainita ( $B_s$ ) e temperatura para o início da formação martensítica ( $M_s$ ).

Para o aço usado neste trabalho, as temperaturas encontradas foram  $A_{c1} = 743,75^\circ\text{C}$ ;  $A_{c3} = 812,83^\circ\text{C}$ ;  $B_s = 541^\circ\text{C}$  e  $M_s = 274^\circ\text{C}$ .

Os corpos de prova foram austenitizados a 900°C por 5min. Após o tempo de austenitização eles foram transferidos para um banho térmico de temperatura fixa.

O banho térmico foi feito por meio de uma liga Sn60-Pb40, cuja temperatura de fusão é inferior a 200°C. Durante o tratamento não foram feitas agitações mecânicas e a temperatura foi monitorada por meio de um termopar. A Tabela 2 apresenta as temperaturas e tempos para os tratamentos isotérmicos.

Temperatura (°C)	Tempo (min)
270/340	5
270/340	10
270/340	15
270/340	20

Tabela 2 - condições de tempo e temperatura dos tratamentos isotérmicos.

#### Ensaio de microdureza

Foram realizados 20 testes de microdureza em cada amostra. Os resultados foram utilizados para calcular o valor médio e o desvio padrão de dureza de cada amostra.

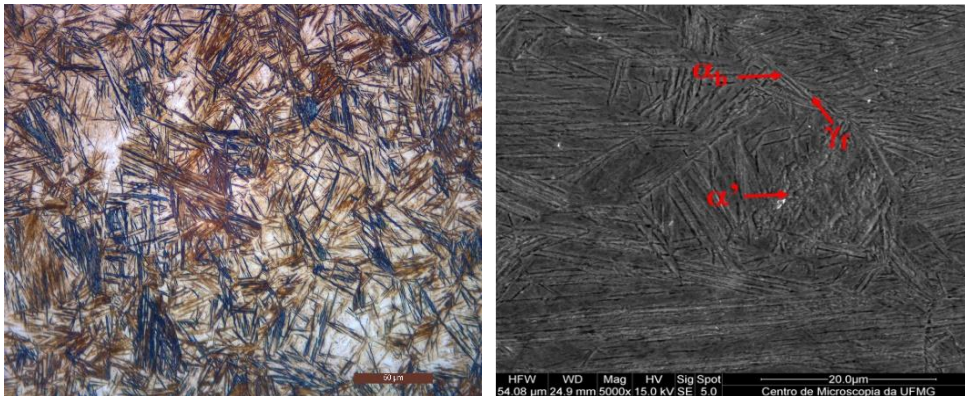
#### Metalografia

As amostras foram lixadas com a utilização de lixas de carbetto de silício (SiC) de granulometria 80 a 2500# e polidas com pasta de diamante de grãos de 9, 6, 3 e 1µm. Foram feitos ataques químicos na superfície das amostras com o objetivo de revelar a microestrutura e distinguir os constituintes do aço. Os ataques foram feitos com o reativo Nital 2%. Após ataque químico as amostras foram levadas ao microscópio ótico para a obtenção das imagens para observação dos diferentes constituintes presentes. Para isso, foi utilizado o microscópio ótico metalográfico Leica DM4500 e as imagens foram registradas. Para as imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi usado um microscópio eletrônico de varredura JEOL para fazer uma análise microestrutural e identificar de forma mais precisa os constituintes presentes.

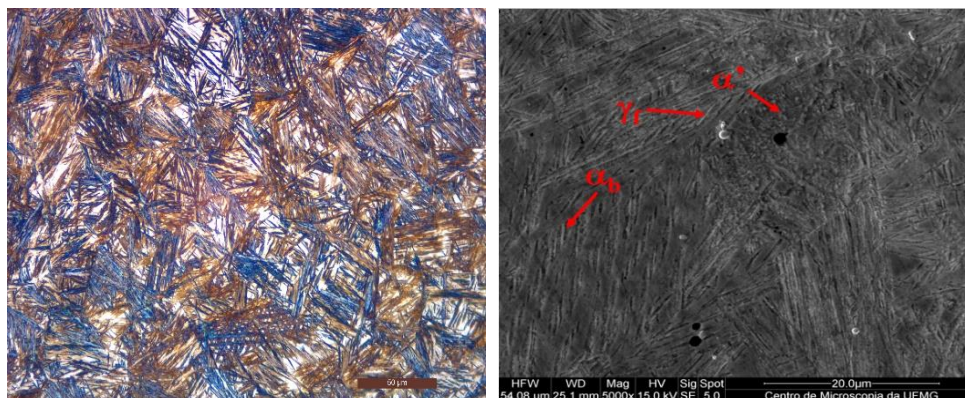
## RESULTADOS E DISCUSSÕES:

A figura 1 apresenta a microestrutura obtida pelo tratamento isotérmico a 270°C pelos tempos de 5, 10, 15 e 20min. A microestrutura multiconstituída formada por martensita ( $\alpha$ ), ferrita bainítica ( $\alpha_b$ ) e filmes de austenita retida intercaladas ( $\gamma_r$ ) pode ser observada nas imagens obtidas pelo MEV. Embora o tempo para uma completa transformação da austenita em bainita foi insuficiente, foi possível observa um aumento da fração de ferrita bainítica ( $\alpha_b$ ) com o aumento do tempo de tratamento. Segundo Bhadeshia <sup>(6)</sup>, quanto maior o tempo de tratamento maior é a fração formada de bainita. Como consequência do aumento da fração de bainita na microestrutura há o um aumento da fração de austenita retida na forma de filmes finos <sup>(7)</sup>.

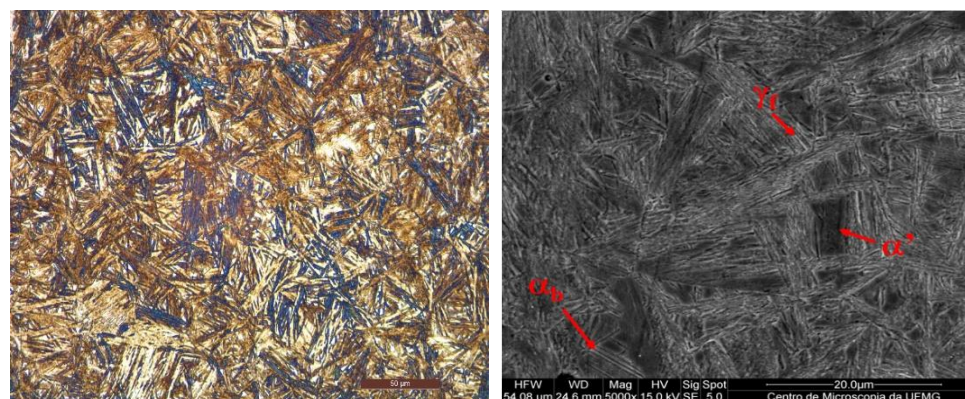
(a)



(b)



(c)



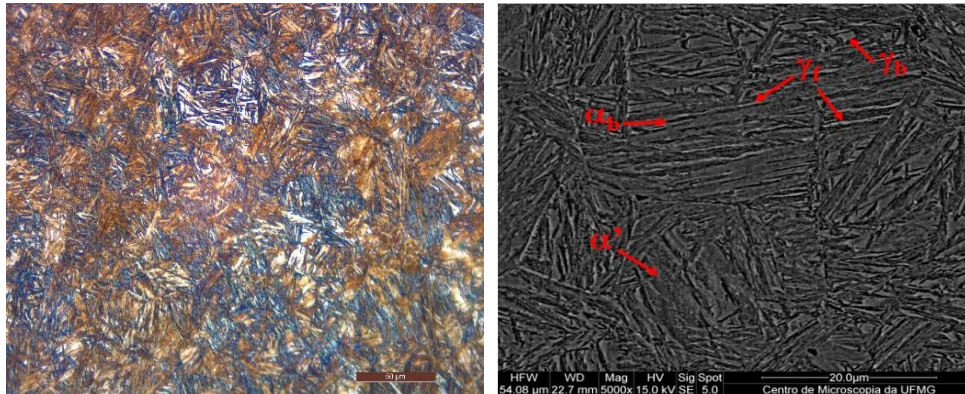
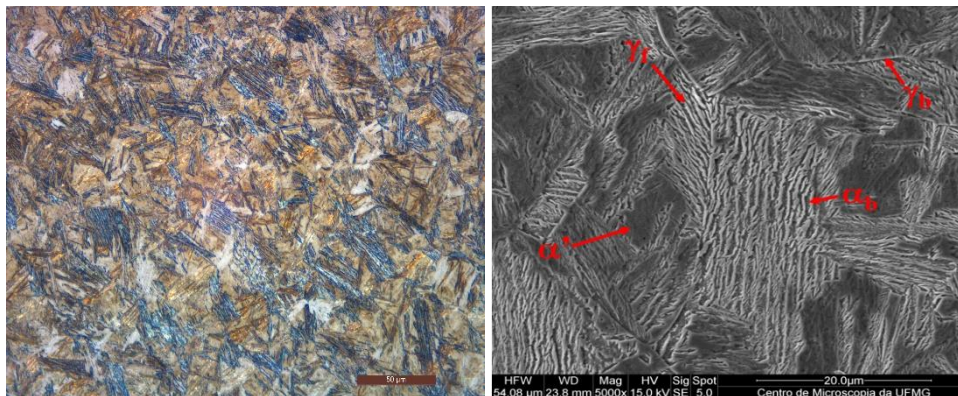


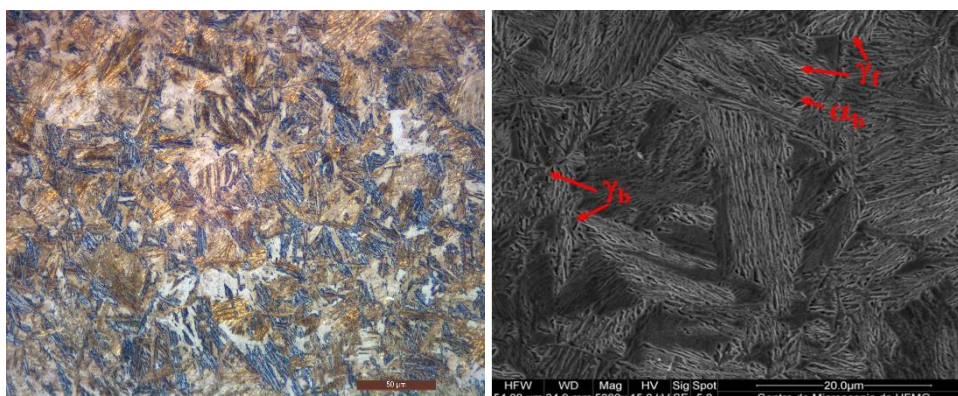
Figura 1: micrografia óptica (resolução 500 x) e MEV (resolução 5000x) do aço SAE 9254 tratado isotermicamente a 270°C 5min (a), 10min (b), 15min (c) e 20min (d); Martensita ( $\alpha'$ ); Ferrita Bainítica ( $\alpha_b$ ); Filmes de Austenita Retida ( $\gamma_f$ ); Blocos de Austenita Retida ( $\gamma_b$ ).

A figura 2 apresenta a microestrutura obtida pelo tratamento isotérmico a 340°C pelos tempos de 5, 10, 15 e 20min. A microestrutura apresenta, majoritariamente, feixes de ferrítica bainítica com alguns filmes de austenita retida entre os feixes e também a presença de blocos de austenita retida. Com o aumento do tempo do tratamento térmico, é possível notar um aumento da fração tanto dos feixes de ferrita bainítica quanto dos filmes de austenita retida. Devido a temperatura mais elevada, a presença de martensita não foi observada na microestrutura do aço. Por se tratar de uma temperatura de transformação acima da temperatura de formação da martensita ( $M_i$ ) neste aço, uma possível presença de martensita ocorre no resfriamento final após o tratamento isotérmico. Essa martensita formada ocorre devido a instabilidade química da austenita, uma vez que o tempo de tratamento foi insuficiente para que ocorresse a difusão dos átomos de carbono da ferrita bainítica para a austenita e assim tornando-a estável após o resfriamento <sup>(8)</sup>.

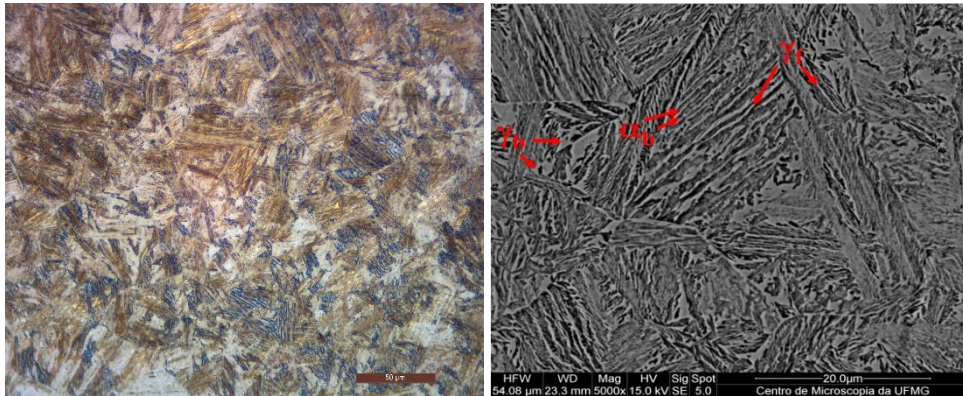
(a)



(b)



(c)



(d)

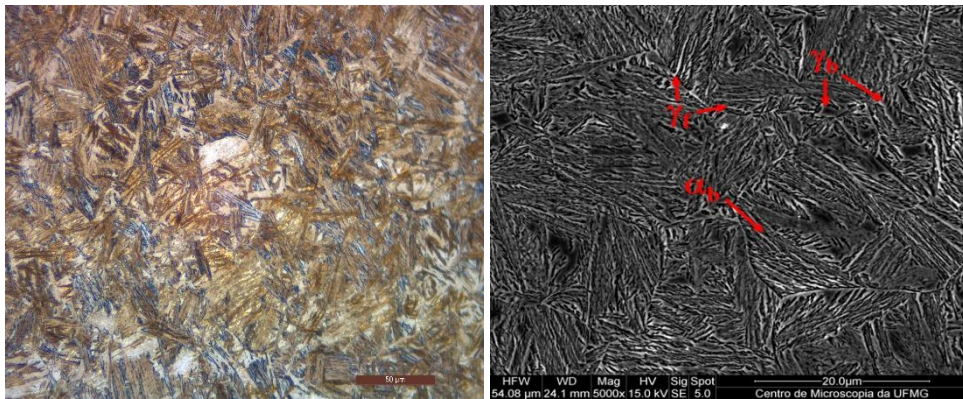


Figura 2 - micrografia óptica (resolução 500 x) e MEV (resolução 5000x) do aço SAE 9254 tratado isotermicamente a 340°C pelos tempos de 5min (a), 10min (b), 15min (c) e 20min (d); Martensita ( $\alpha'$ ); Ferrita Bainítica ( $\alpha_b$ ); Filmes de Austenita Retida ( $\gamma_f$ ); Blocos de Austenita Retida ( $\gamma_b$ ).

Comparando as imagens da Figura 1 e 3, observa-se uma microestrutura mais refinada para o aço tratado a 270°C. Isso se deve a dois fatores: a presença da martensita formada no resfriamento inicial devido ao super-resfriamento e o refinamento da ferrita bainítica provocada pelo aumento da taxa de nucleação devido a uma maior força motriz <sup>(8)</sup>.

A Figura 3 apresenta o aço após o processo de têmpera e revenimento. A têmpera foi realizada por meio de uma austenitização a 900°C por 5 min seguido de um resfriamento em óleo, e o revenimento foi feito a 500°C por 1 hora. Pode se notar que o aço apresenta uma matriz de martensita revenida com presença de carbonetos.

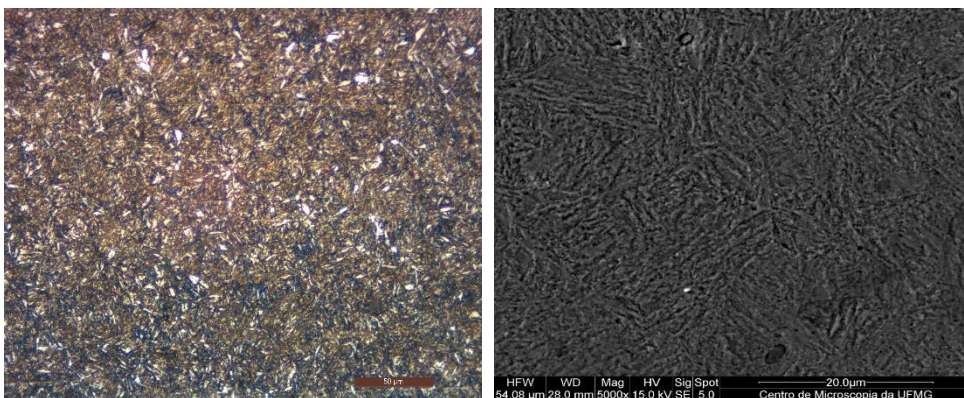


Figura 3- micrografia óptica (resolução 500 x) e MEV (resolução 5000x) do aço SAE 9254 austenitizado a 900°C e depois temperado em óleo, seguido de um revenimento a 500°C por 1h.

A Tabela 3 apresenta os resultados de microdureza e desvio padrão dos aços tratados isotermicamente a 270°C e 340°C. Os resultados foram obtidos através de 20 medidas feitas de forma aleatória em uma amostra para cada tempo de tratamento isotérmico. Observa-se um maior valor de microdureza para o aço tratado a 270°C comparado com o aço tratado a 340°C. Isso se deve a presença de martensita formada no resfriamento inicial. Este mesmo aço temperado e revenido a 500°C por 1h apresentou uma microdureza de 43,3HC.

270°C	5min	10min	15min	20min
Dureza (HC)	57,2	54,1	53,9	55,7
Desvio Padrão	1,57	1,24	1,56	2,93

(a)

340°C	5min	10min	15min	20min
Dureza (HC)	50,5	44,0	43,8	46,4
Desvio Padrão	1,33	1,29	0,88	1,83

(b)

Tabela 3: resultados de microdureza médio obtido através de 20 medições e o desvio padrão das medições para o aço SAE 9254 tratado isotermicamente a 270°C (a) e 340°C (b).

## CONCLUSÕES:

Com base nos resultados obtidos, pode se concluir que o tratamento isotérmico a 270°C com tempos de 5, 10, 15 e 20 minutos, uma microestrutura multiconstituída formada por martensita, ferrita bainítica e filmes de austenita retida foram observados. Foi observado uma maior fração de ferrita bainítica e filmes de austenita retida com o aumento do tempo de tratamento. Para as amostras tratadas isotermicamente a 340°C, a microestrutura predominante foi composta por feixes de ferrita bainítica, com filmes de austenita retida entre intercalados. Com o aumento do tempo de tratamento, tanto a fração volumétrica dos feixes de ferrita bainítica quanto dos filmes de austenita retida aumentaram. Para tempos maiores de tratamentos, a presença de blocos de austenita retida também foi observada. É importante notar que, devido à temperatura mais alta, não foram encontradas presença de martensita na microestrutura do aço tratado a 340°C.

Ao comparar os resultados de microdureza, foi observado que as amostras tratadas isotermicamente a 270°C apresentaram valores mais elevados do que as tratadas a 340°C. Isso se deve principalmente à maior presença de martensita nas amostras tratadas a 270°C, o que contribui para uma maior dureza do material. Esses resultados mostram a forte relação entre o processo de tratamento isotérmico, a temperatura, o tempo de tratamento e a formação das diferentes fases microestruturais no aço SAE 9254.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] HAUSMANN, K.; KRIZAN, D.; PICHLER, A.; WERNER, E. *Trip-aided bainitic-ferritic sheet steel: A critical assessment of alloy design and heat treatment*. Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2013.
- [2] KUMAR, A.; BLESSTO, B.; SINGH, A. Effect of austempering temperature on high cycle fatigue behaviour in nanostructured bainitic steels. *Materials Science and Engineering A*, 846, 1-8, 2022.
- [3] LU, J.; WANG, S.; YU, H.; WU, G.; GAO, J.; WU, H.; ZHAO, H.; ZHANG, C.; MAO, X. *Structure-property relationship in vanadium micro-alloyed TRIP steel subjected to the isothermal bainite transformation process*. *Materials Science and Engineering A*, 878, 1-14, 2023.
- [4] KOZESCHNIK, E.; BHADESHIA, H. K. D. H. *Influence of silicon on cementite precipitation in steels*. *Materials Science and Technology*, v. 24, n. 3, p. 343-347, 2008.

- [5] ANDREWS, K. W. *Empirical formulae for the calculation of some transformation temperatures.* Journal of Iron and Steel Institute, v. 203, p. 721-727, 1965.
- [6] BHADSHIA, H. K. D. H.; EDMONDS, D. V. *The Mechanism of Bainite Formation in Steels.* Acta Metallurgica, v. 28, p. 1265-1273, 1980.
- [7] GARCIA-MATEO, C.; CABALLERO, F. G.; CHAO, J.; CAPDEVILA, C.; GARCÍA DE ANDRÉS, C. *Mechanical Stability of Retained Austenite During Plastic Deformation of Super High Strength Carbide Free Bainitic Steels.* Journal of Materials Science, v. 44, p. 4617-4624, 2009.
- [8] MORAWIEC, M.; SKOWRONEK, A.; KOZŁOWSKA, A.; GARCIA-MATEO, C.; GRAJCAR, A. *Effect of prior martensite formation on the bainite transformation kinetics in high-strength 3% Mn multiphase steel.* Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 148, pp. 1365-1371, 2023.