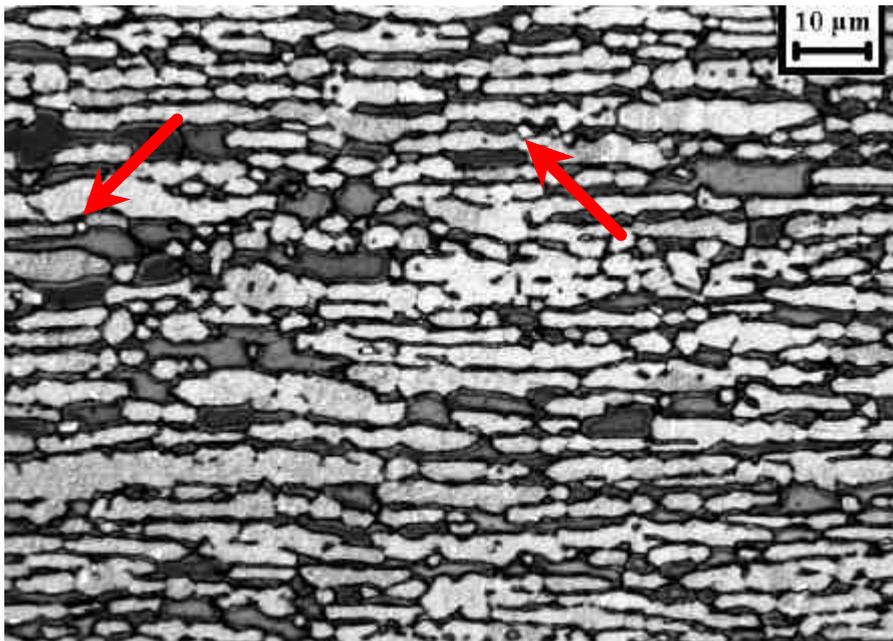
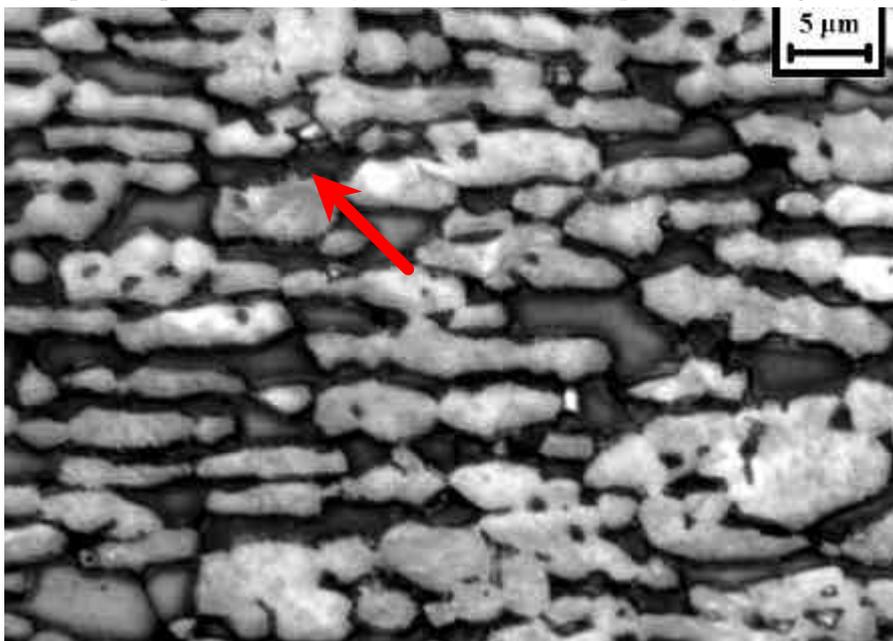


Finalmente são mostradas as micrografias referentes a série de amostras envelhecidas a 700°C, a começar pela micrografia 5.50 referente a amostra envelhecida por 10 minutos onde é possível notar que a presença de sigma é praticamente imperceptível utilizando um aumento de 500X, e essa situação segue-se até a micrografia 5.52 referente a amostra envelhecida por 20 minutos, fato esse devido a diminuição da temperatura de envelhecimento que ocasionou uma difusão mais lenta. Para tanto foram feitas micrografias complementares com 1000X de aumento, intercaladas para que fosse possível identificar a formação de sigma nas amostras supra-citadas. Assim observando as micrografias 5.51 e 5.53 é possível notar que realmente há formação de pequenos pontos de sigma que vão aumentando de maneira progressiva. Nas micrografias subsequentes já é possível identificar a formação de sigma com 500X de aumento; especialmente nas micrografias 5.58, 5.59, 5.60 e 5.61 é possível observar fortes indícios de decomposição eutetóide lamelar, como era esperado para baixas temperaturas. Mais uma vez ao final do consumo de toda a fase ferrita, sigma começa a se formar a partir da austenita sendo observada no interior das lamelas de austenita seguindo o mesmo mecanismo $\gamma \rightarrow \sigma + \gamma_{(\text{empobrecida})}$, porém de forma mais lenta comparada a série de 750°C, dada a diminuição da velocidade de difusão, sendo destacada essa formação nas micrografias 5.66 e 5.67.

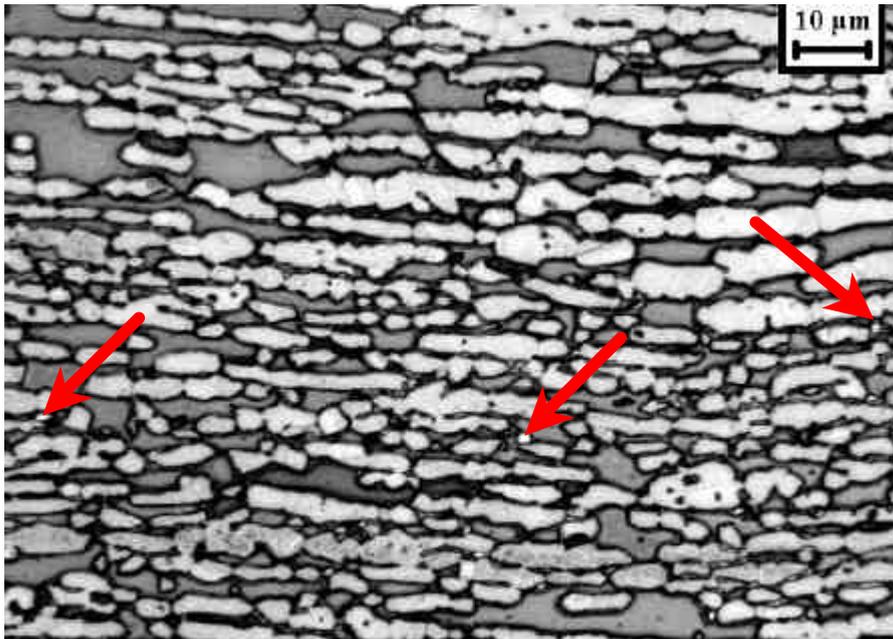


Micrografia 5.50. Amostra envelhecida a 700°C por 10 minutos. Ferrita (escura), austenita (cinza) e sigma sem ataque. Ataque: Behara Modificado. As setas indicam pontos de formação de fase sigma.

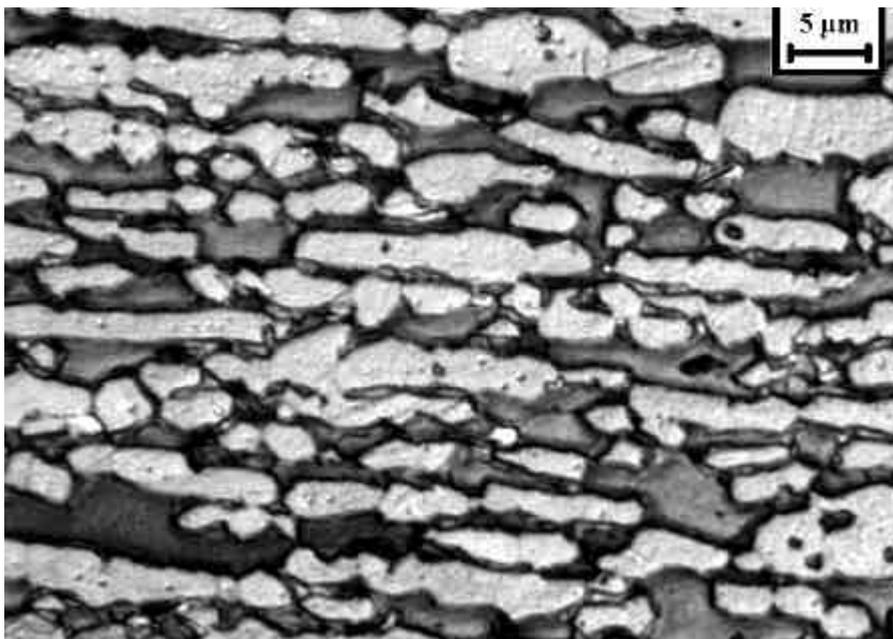


Micrografia 5.51 Amostra envelhecida a 700°C por 10 minutos. Ferrita (escura), austenita (cinza) e sigma sem ataque. Ataque: Behara Modificado. 1000X. As setas indicam pontos de formação de fase sigma.



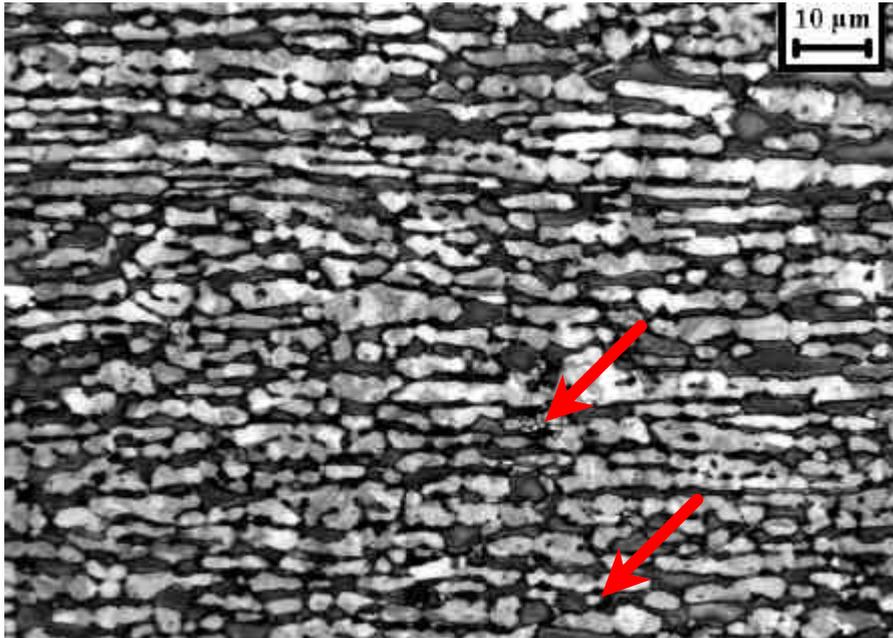


Micrografia 5.52. Amostra envelhecida a 700°C por 20 minutos. Ferrita (escura), austenita (cinza) e

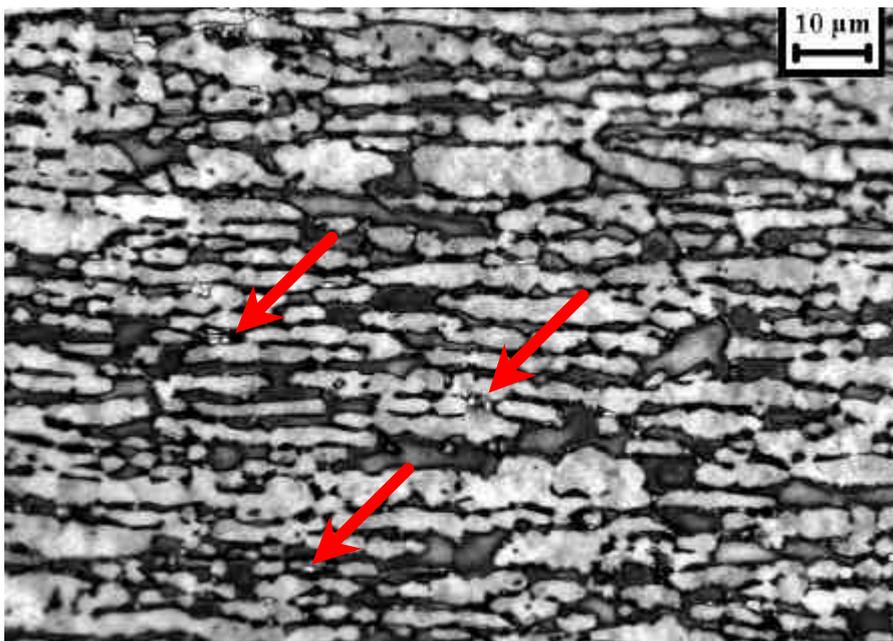


sigma sem ataque. Ataque: Behara Modificado. As setas indicam pontos de formação de fase sigma.
Micrografia 5.53 Amostra envelhecida a 700 °C por 20 minutos. Ferrita (escura), austenita (cinza) e
sigma sem ataque. Ataque: Behara Modificado.1000X. A seta indica um ponto de formação de fase
sigma.

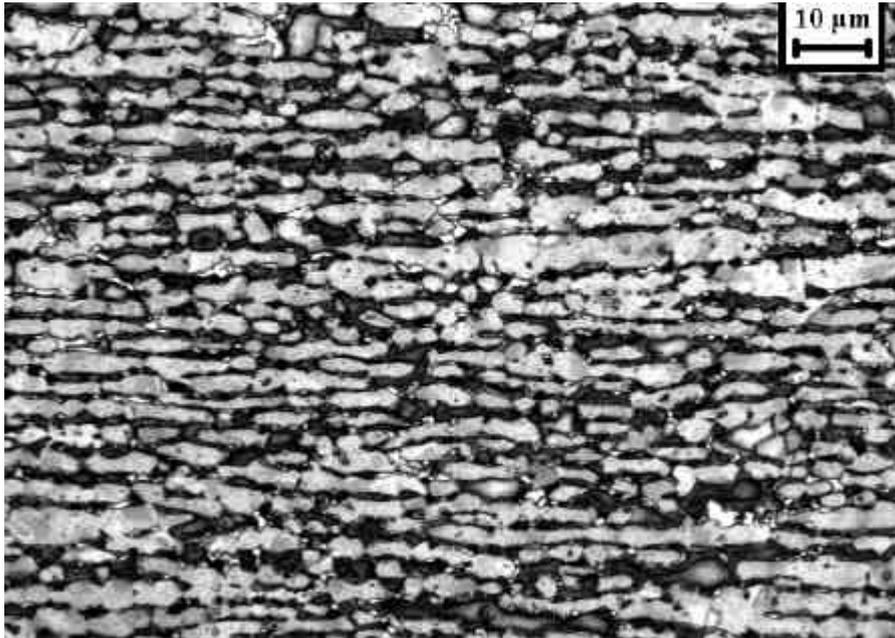




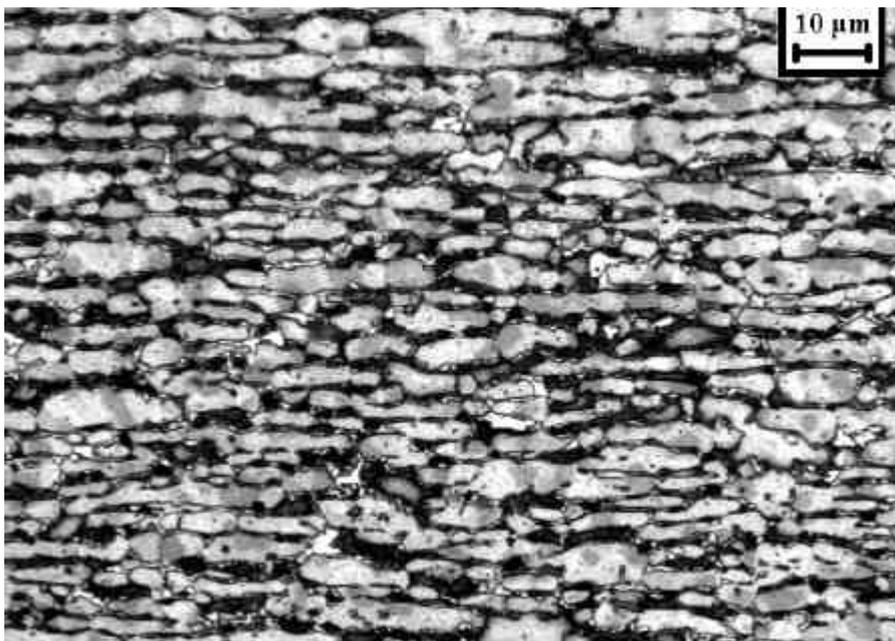
Micrografia 5.54. Amostra envelhecida a 700°C por 40 minutos. Ferrita (escura), austenita (cinza) e sigma sem ataque. Ataque: Behara Modificado. As setas indicam pontos de formação de fase sigma.



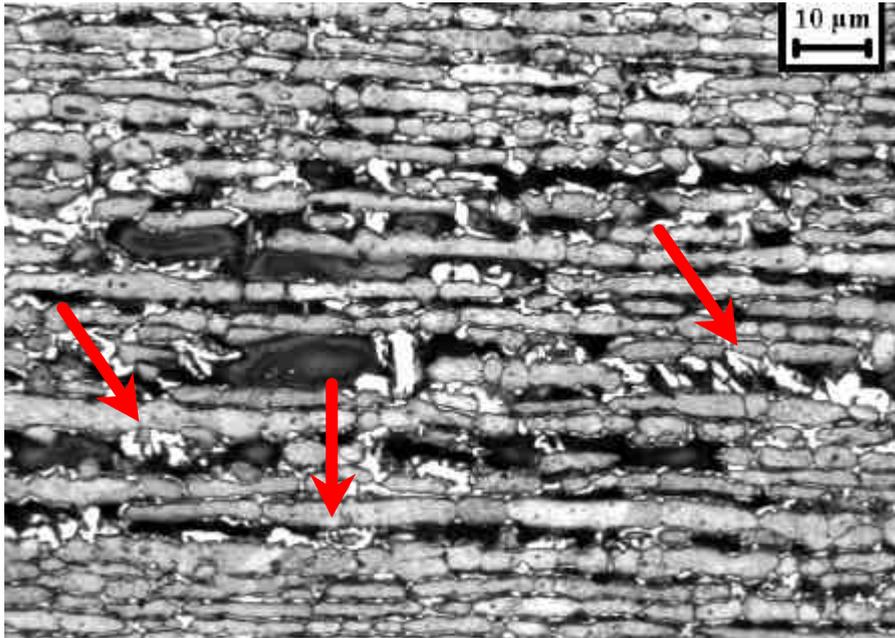
Micrografia 5.55. Amostra envelhecida a 700°C por 1 hora. Ferrita (escura), austenita (cinza) e sigma sem ataque. Ataque: Behara Modificado. As setas indicam pontos de formação de fase sigma.



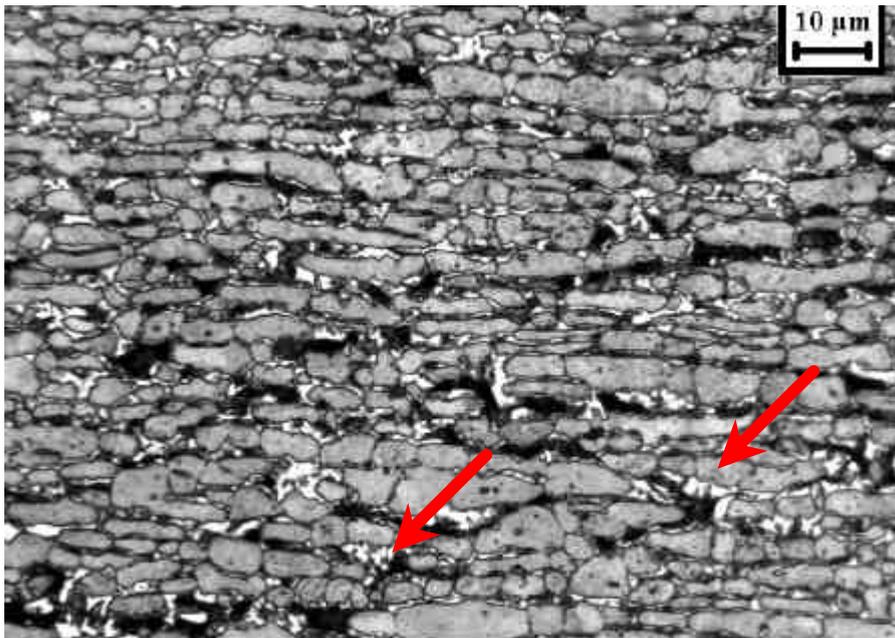
Micrografia 5.56. Amostra envelhecida a 700°C por 2 horas. Ferrita (escura), austenita (cinza) e sigma sem ataque. Ataque: Behara Modificado.



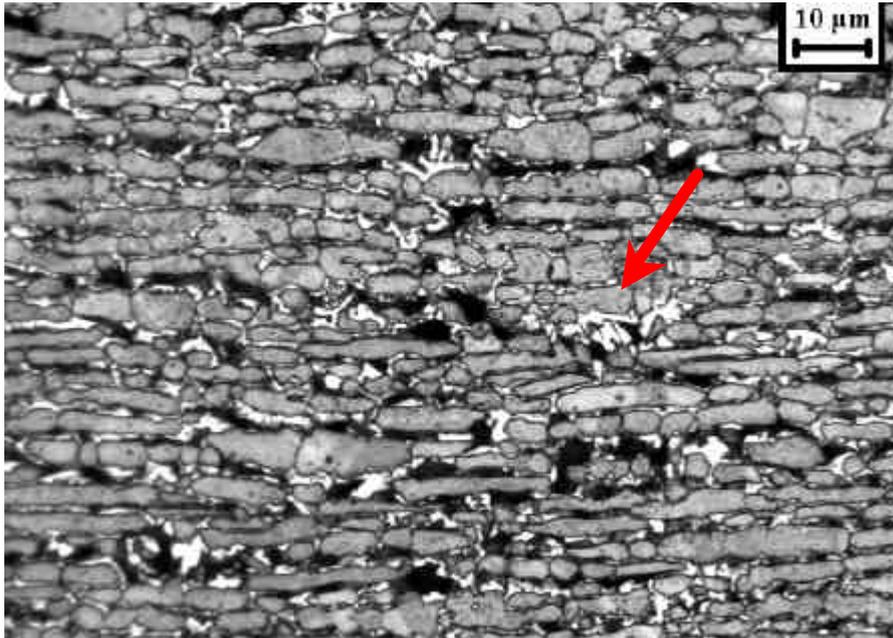
Micrografia 5.57. Amostra envelhecida a 700°C por 4 horas. Ferrita (escura), austenita (cinza) e sigma sem ataque. Ataque: Behara Modificado.



Micrografia 5.58. Amostra envelhecida a 700°C por 8 horas. Ferrita (escura), austenita (cinza) e sigma sem ataque. Ataque: Behara Modificado. As setas indicam regiões de decomposição eutetóide da ferrita.



Micrografia 5.59. Amostra envelhecida a 700°C por 10 horas. Ferrita (escura), austenita (cinza) e sigma sem ataque. Ataque: Behara Modificado. As setas indicam regiões de decomposição eutetóide da ferrita.



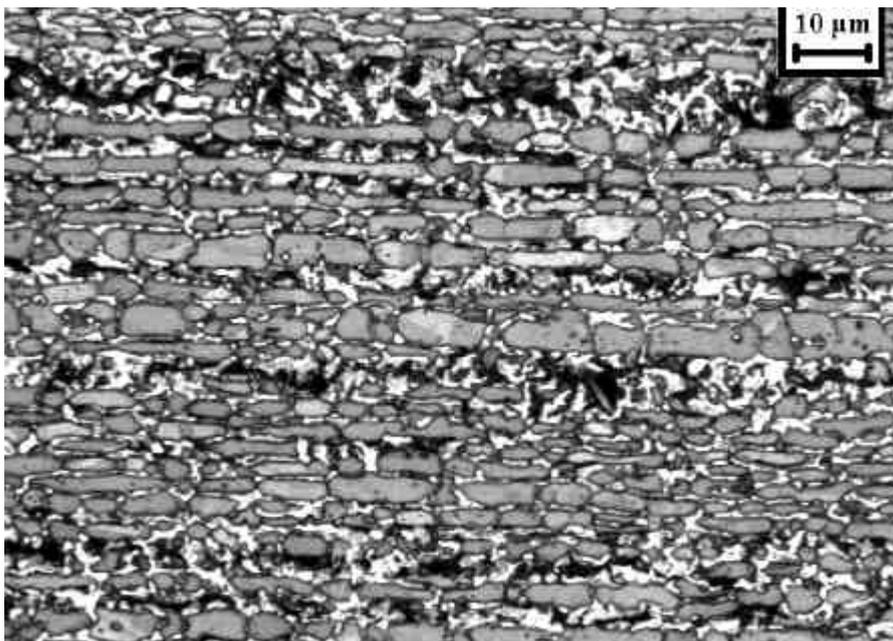
Micrografia 5.60. Amostra envelhecida a 700°C por 12 horas. Ferrita (escura), austenita (cinza) e sigma sem ataque. Ataque: Behara Modificado. A seta indica uma região de decomposição eutetóide da ferrita.



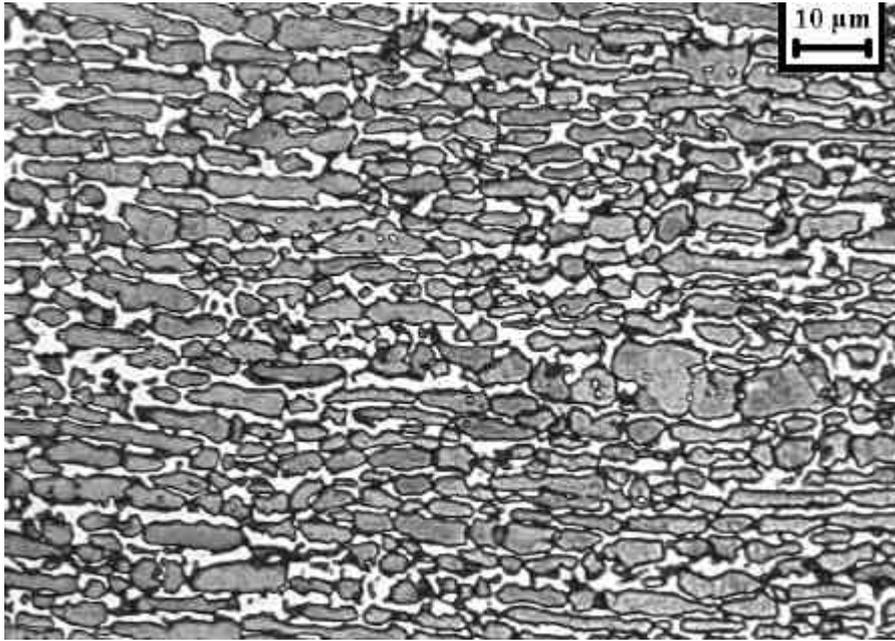
Micrografia 5.61. Amostra envelhecida a 700°C por 24 horas. Ferrita (escura), austenita (cinza) e sigma sem ataque. Ataque: Behara Modificado. A seta indica uma região de decomposição eutetóide da ferrita.



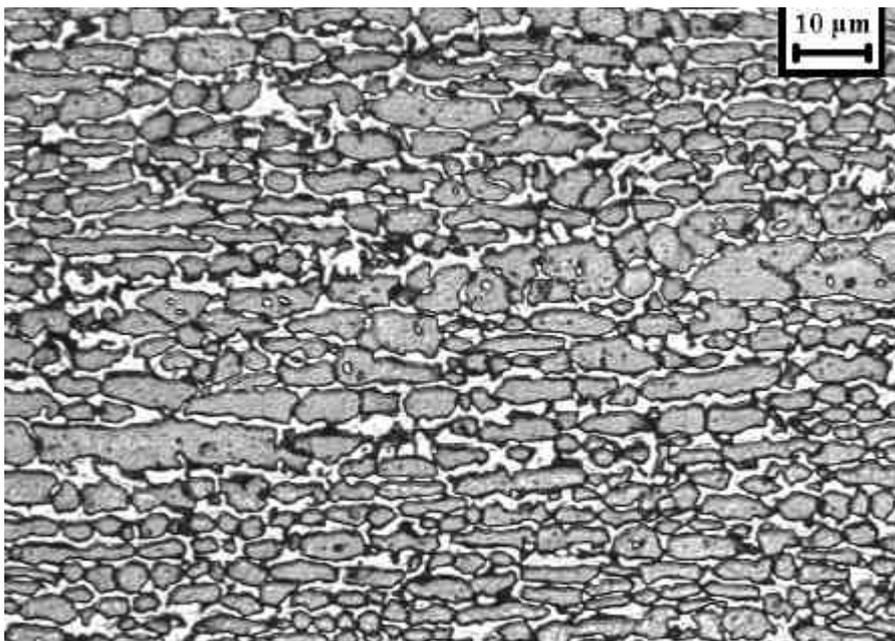
Micrografia 5.62. Amostra envelhecida a 700°C por 48 horas. Ferrita (escura), austenita (cinza) e sigma sem ataque. Ataque: Behara Modificado.



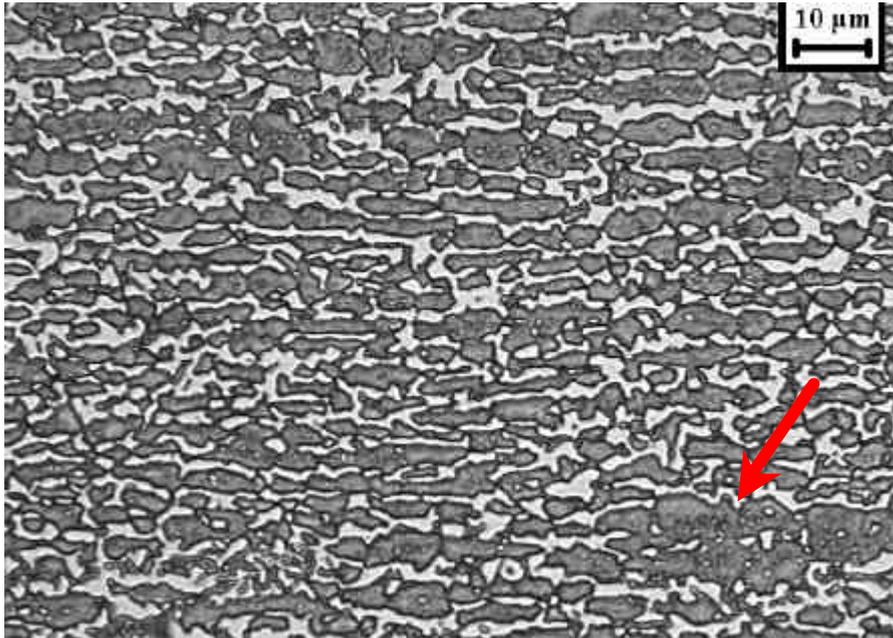
Micrografia 5.63. Amostra envelhecida a 700°C por 96 horas. Ferrita (escura), austenita (cinza) e sigma sem ataque. Ataque: Behara Modificado.



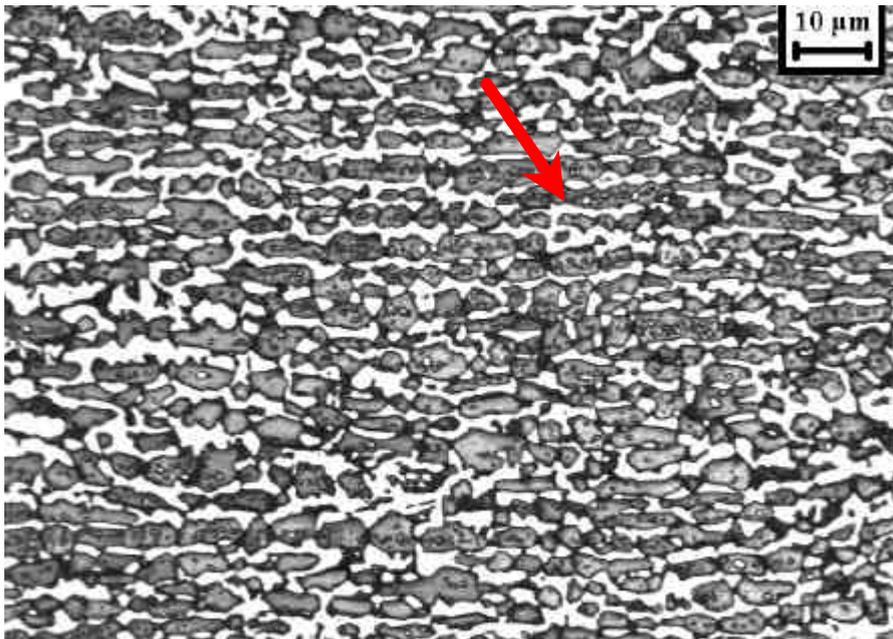
*Micrografia 5.64. Amostra envelhecida a 700°C por 192 horas. Austenita (cinza) e sigma sem ataque.
Ataque: Behara Modificado.*



*Micrografia 5.65. Amostra envelhecida a 700°C por 384 horas. Austenita (cinza) e sigma sem ataque.
Ataque: Behara Modificado.*



Micrografia 5.66. Amostra envelhecida a 700°C por 768 horas. Austenita (cinza) e sigma sem ataque. Ataque: Behara Modificado. A seta indica formação de fase sigma (**s**) no interior das lamelas de austenita (**g**).



Micrografia 5.67. Amostra envelhecida a 700°C por 1032 horas. Austenita (cinza) e sigma sem ataque. Ataque: Behara Modificado. A seta indica formação de fase sigma (**s**) no interior das lamelas de austenita (**g**).

5.2. Gráficos de evolução da dureza

A dureza das amostras também foi medida, utilizando microdurômetro *Vickers* com carga de 500 g; os resultados destas medições (40 pontos por amostra) são mostrados na Figura 5.68, 5.69, 5.70 e 5.71 comprovando o aumento de dureza com o aumento do tempo de envelhecimento, consequência do aumento da fração volumétrica de sigma. Para a série de amostras envelhecidas a 900°C, como era de se esperar, a dureza foi crescente e se estabiliza a partir de 48 horas de envelhecimento a 900°C, com posterior queda de dureza devido ao aumento de tamanho das lamelas de austenita (γ).

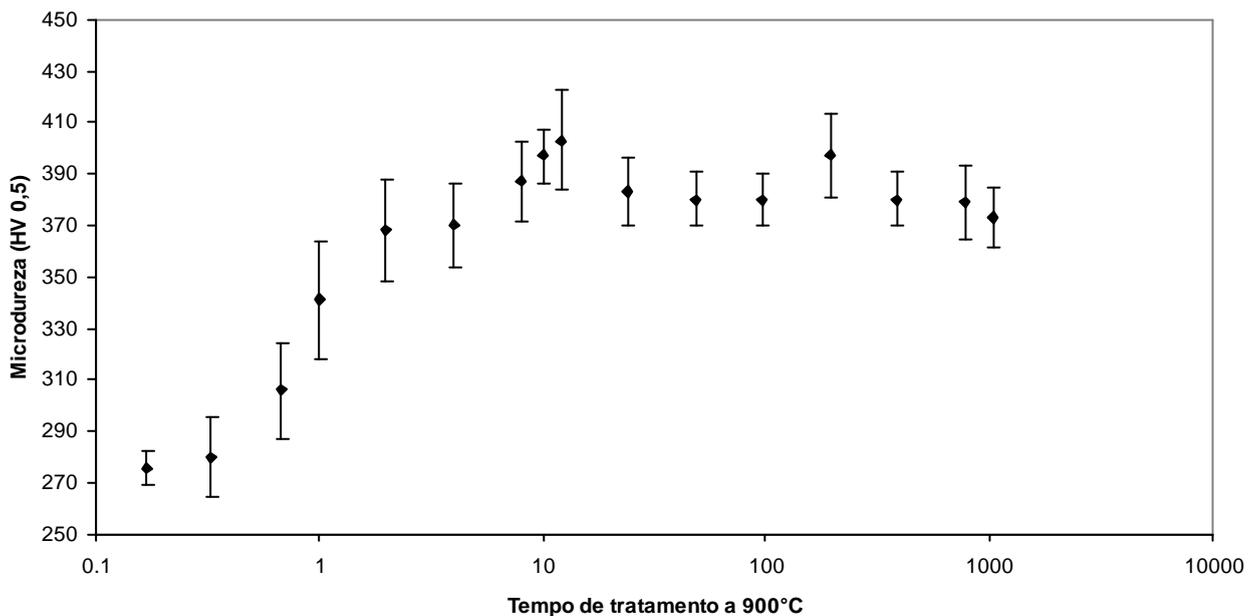


Figura 5.68 Evolução da dureza no aço SAF 2205 em função do tempo de envelhecimento a 900°C.

Na Figura 5.69, é possível observar, com o resultado das medições de dureza nas amostras de 800°C, que a dureza também aumentou mas de maneira mais significativa alcançando valores maiores em tempos menores de tratamento térmico, evidenciando também o aumento da fração volumétrica da fase sigma. É notório ainda que não houve queda de dureza após a sua estabilização em 48 horas de tratamento térmico como na série de 900°C, pois não houve aumento de tamanho das lamelas de austenita (γ).

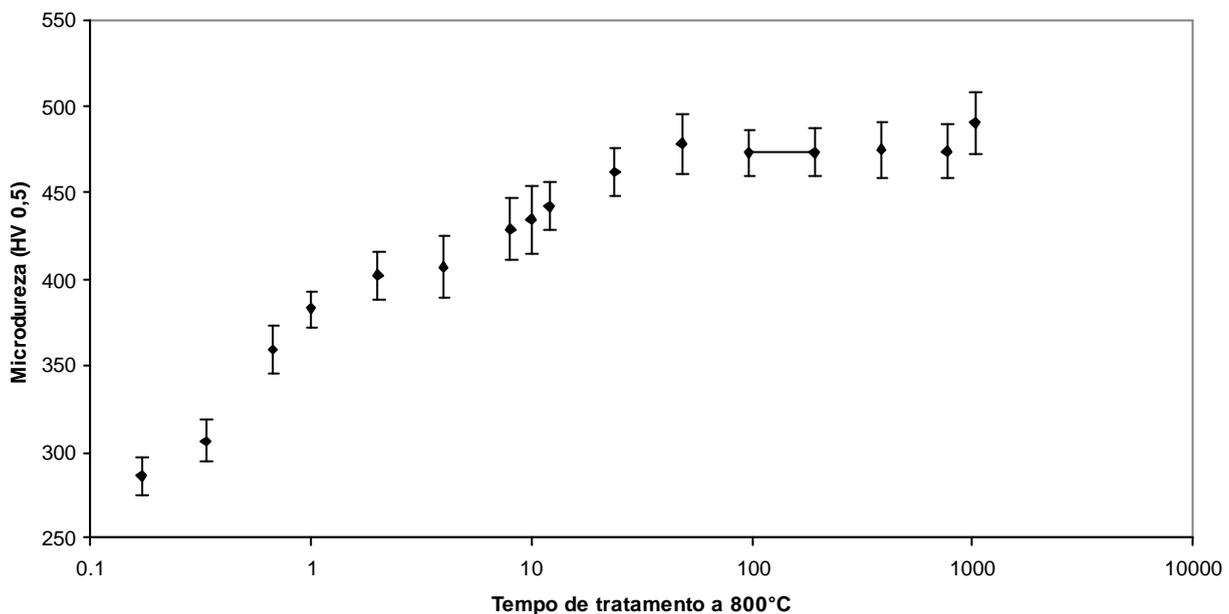


Figura 5.69 Evolução da dureza no aço SAF 2205 em função do tempo de envelhecimento a 800°C.

Na Figura 5.70, é possível observar com o resultado das medições de dureza das amostras de 750°C, que o aumento de dureza ocorreu de forma mais lenta se comparado as duas séries anteriores, levando também maior tempo para a estabilização. Isto se deve à queda de temperatura e conseqüente diminuição da velocidade de difusão. Ainda é possível notar que não houve queda de dureza após a estabilização da mesma, fato esse verificado por não ter ocorrido aumento de tamanho das lamelas de austenita (γ).

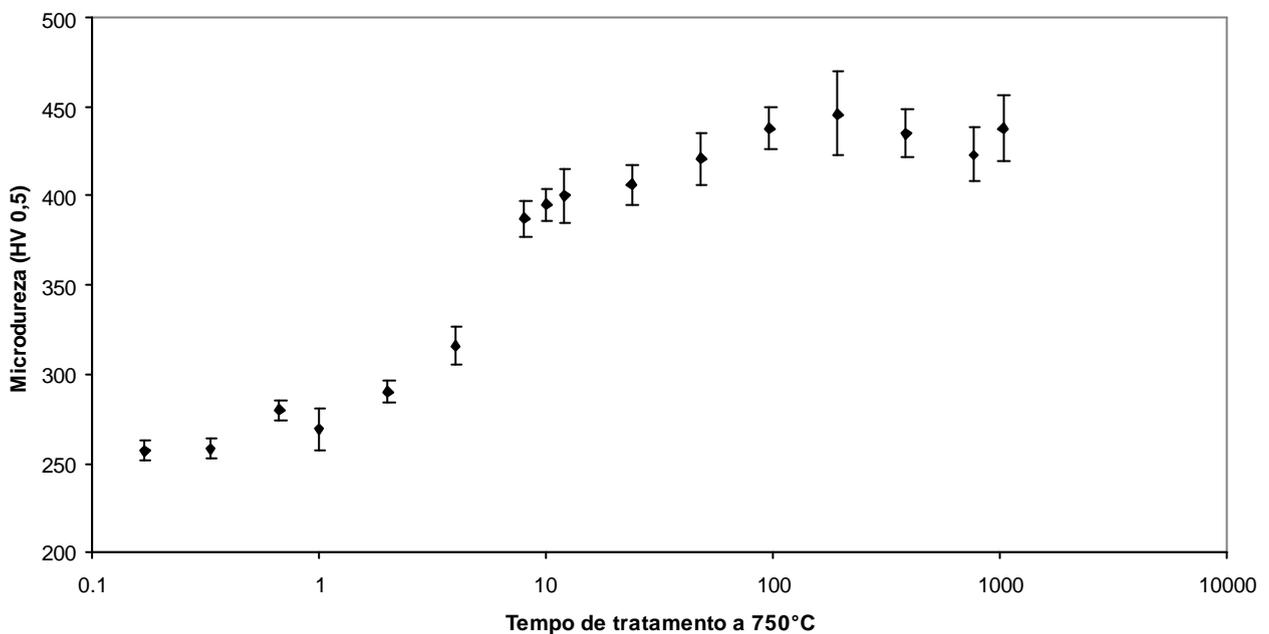


Figura 5.70 Evolução da dureza no aço SAF 2205 em função do tempo de envelhecimento a 750°C

Na Figura 5.71, é possível observar, com o resultado das medições de dureza nas amostras de 700°C, que o aumento de dureza foi o mais lento dentre as quatro séries, explicado pela diminuição da temperatura de tratamento térmico, responsável pela diminuição da velocidade de difusão, ocasionando grande lentidão na formação de sigma, como já havia sido verificado nas respectivas micrografias. É possível observar ainda que não houve queda de dureza após a estabilização dos valores da mesma, sendo também explicado pelo fato de que o tamanho das lamelas de austenita (γ) se mantiveram praticamente constantes.

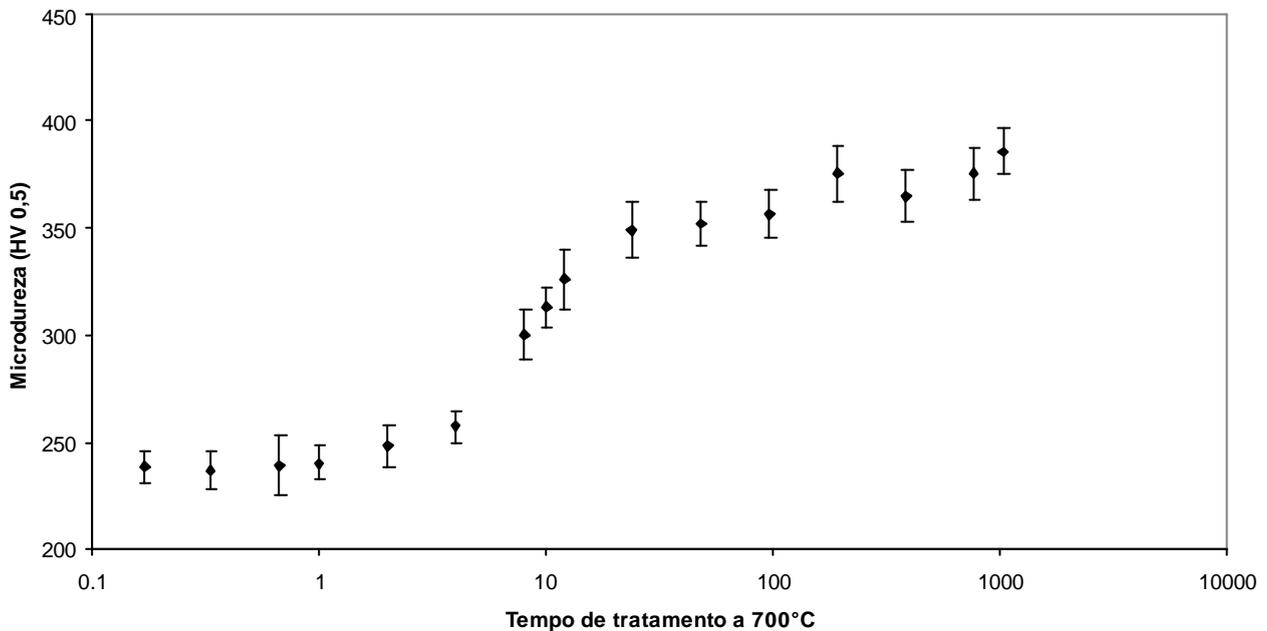


Figura 5.73 Evolução da microdureza no aço SAF 2205, em função do tempo de envelhecimento a 700°C.

6. Conclusões

Através do projeto aqui apresentado foi possível concluir que a formação da fase sigma (σ) se dá em todas as temperaturas aqui apresentadas diferenciando-se pelo tamanho, velocidade, disposição e quantidade de sigma formada. Todos esse fatores estão ligados diretamente a curva de dureza do material, influenciando a velocidade de aumento de dureza. Foi possível notar somente na série de amostras envelhecidas a 900°C que após a elevação e estabilização da dureza houve uma constante queda nos valores da mesma, queda essa explicada pelo aumento do tamanho das lamelas de austenita (γ) no decorrer do envelhecimento térmico. Nas outras três séries, após a estabilização dos valores de dureza, nada mais ocorreu uma vez que o tamanho das lamelas de austenita (γ) se manteve praticamente constante. É importante ressaltar ainda os valores de dureza obtidos estão diretamente ligados a fração volumétrica da fase sigma, sendo que quanto maior a fração volumétrica da mesma maior a dureza alcançada pelo material. Outro fator decisivo para a dureza do material é a temperatura de envelhecimento, uma vez que para baixas temperaturas a velocidade de difusão é menor ocasionando maior tempo para formação de sigma enquanto para altas temperaturas, devida à alta velocidade de difusão, a formação de sigma se dá rapidamente, elevando a dureza rapidamente também, mas não alcançando valores máximos de dureza, uma vez que em altas temperaturas há o crescimento das lamelas de austenita, responsável pela queda de dureza. A maior dureza obtida foi conseguida a 800°C, temperatura essa que ocasionou uma boa velocidade de difusão sem o aumento de tamanho das lamelas de austenita.



Nas quatro séries analisadas foi possível constatar que primeiramente toda a ferrita contida inicialmente no material foi consumida na formação da fase sigma, motivo pelo qual sigma está sempre associada a ferrita, indicando os seguintes mecanismos de precipitação contínua e descontínua : ferrita (α) \rightarrow sigma (σ) + ferrita ou eutetóide lamelar e divorciado : ferrita (α) \rightarrow sigma (σ) + austenita (γ_{nova}). Foi verificado também que nas temperaturas mais baixas, 750°C e 700°C, há claras evidências da decomposição eutetóide lamelar mostrada acima porém a reação de decomposição predominante permanece a eutetóide divorciado (σ maciça). Após todo o consumo da ferrita (α), sigma (σ) começa a se formar a partir da austenita sendo possível observar essa formação no interior das lamelas de austenita (γ), liberando o mecanismo: austenita (γ) \rightarrow sigma (σ) + austenita ($\gamma_{empobrecida}$). Porém, esse processo é tão mais lento quanto menor for a temperatura de envelhecimento, sendo esse o último processo de formação de fase sigma observado.



Referências Bibliográficas

- [1]. SEDRIKS, A. J., *Corrosion of stainless steels*. John Wiley : NY 1996 2.ed. p.1-22.
- [2]. SOLOMON, H. D. DEVINE Jr. T. M., *Duplex Stainless steels – a tale of two phases*.
In: Duplex stainless steels – conference proceedings. ASM Metals Park : Ohio 1982
p. 693-756.
- [3]. DAVIS, J. R., *ASM Specialty Handbook – stainless steels*. ASM : Metals Park 1994
p. 51-4.
- [4]. BRANDI, S. D., PADILHA, A. F., *Precipitação de fase sigma em aços inoxidáveis ferríticos-austeníticos com microestrutura dúplex*. INOX' 90 (seminário) p. 135-52.
- [5]. ASM Handbook Metallography, *Metallography Techniques and Microstructures Specific Metals and Alloys*. Vol 9, 1998, 2ed., p. 287-296.
- [6]. BARBOSA, C. A. MORI, F. Y. SOUZA, M. H. C. FALLEIROS I. G. S.
Formação de fase sigma em aço inoxidável austenítico-ferrítico. Metalurgia ABM n.227
v.32 out. 1976 p. 669-73.
- [7]. BARCIK, J. and BRZYCKA, B., *Chemical Composition of σ Phase Precipitated in Chromium-Nickel Austenitic Steels*, Met. Sci., Vol 17, May 1983, p. 256-60.
- [8]. MAGNABOSCO, R. *Influência da microestrutura no comportamento eletroquímico do aço SAF 2205*. Tese (Doutorado em engenharia) - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, 2001. 181 p.