

# CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DE AÇOS PARA APLICAÇÃO EM ALTAS TEMPERATURAS

Guilherme Arruda Basso<sup>1</sup>, Daniella Caluscio dos Santos<sup>2</sup>  
<sup>1,2</sup> Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Universitário FEI  
guibasso1999@gmail.com dcaluscio@fei.edu.br

**Resumo:** Dentre as aplicações para aços inoxidáveis, existe a fabricação de tubos sem costura para trocadores de calor, como em recuperadores de siderúrgicas, em que a alta temperatura de trabalho leva à formação de fases deletérias que comprometem o desempenho das ligas. Foram caracterizadas as microestruturas das ligas AISI 446, AISI 409 e 253 MA em diferentes condições. Foram encontrados, provavelmente, carbonetos de Cr e fase sigma na liga AISI 446, carbonetos de Ti na liga AISI 409 (após uso) e inclusões na 253 MA (sem uso).

## 1. Introdução

Aços inoxidáveis são aqueles que apresentam teores mínimos de Cr entre 12% e 13%, o que lhes confere resistência à corrosão quando comparados a outros aços [1]. O teor de cromo gera no aço a capacidade de formar uma película superficial aderente, não porosa e auto regenerativa chamada de película passiva, que protege o aço da ação de agentes corrosivos, conferindo a este tipo de aço uma grande resistência à corrosão. Além disso, é possível melhorar ainda mais a resistência à corrosão pela adição de elementos de liga ao aço, como níquel, molibdênio e nitrogênio [2].

Se por um lado a presença de elevados teores de elementos de liga nos aços inoxidáveis pode trazer benefícios, com a obtenção de melhores propriedades mecânicas e de corrosão, por outro, existem consequências negativas relacionadas à estabilidade microestrutural do material. A exposição de aços inoxidáveis, a elevadas temperaturas, pode causar a precipitação de fases intermetálicas, carbonetos, nitretos e boretos. Na maioria dos casos, a precipitação dessas fases afeta negativamente as propriedades do material, e por isso, sua presença é indesejável [3].

Na faixa de temperaturas típica de 600-1000°C, existe a formação, nos aços inoxidáveis, de fases intermetálicas como fase sigma, fase chi e Laves. Em comum, todas essas fases apresentam altos teores de Cr e fragilidade. Isso significa que grandes quantidades de precipitação dessas fases levam a reduções na tenacidade e resistência à certos tipos de corrosão [4].

Uma das aplicações de aços inoxidáveis é em trocadores de calor de altas temperaturas (arbitrariamente, temperaturas acima de 650°C [5]. Na área de laminação à quente de placas e tarugos em plantas siderúrgicas, denominam-se recuperadores de calor os equipamentos utilizados para aumentar a eficiência energética durante o pré-aquecimento destas placas. Estes recuperadores são empregados em larga escala para aquecer o ar fornecido aos queimadores dos fornos de reaquecimento [6].

O objetivo deste trabalho é caracterizar a microestrutura de aços inoxidáveis, em diferentes

condições para utilização em recuperador de calor de siderúrgica.

## 2. Metodologia

Os tubos dos recuperadores de calor estavam em operação em indústria siderúrgica e foram obtidos a partir de manutenções realizadas em janeiro de 2020 após falha.

Foram recebidas amostras das ligas de aços inoxidáveis ferríticos AISI 409 e AISI 446 após utilização em recuperador de calor de usina siderúrgica desde 2006 e 2011, respectivamente. Além disso, foram também obtidas amostras das ligas de aços inoxidáveis ferrítico AISI 446 e austenítico 253 MA sem tempo em operação, sendo este último material um possível candidato para substituição das ligas ferríticas atualmente empregadas.

Foram realizadas simulações de equilíbrio no software ThermoCalc®, na base de dados TCFE9, a fim de se obter gráficos que indicassem as fases presentes em equilíbrio nas ligas em estudo nas temperaturas próximas àquelas dos materiais em aplicação, principalmente na faixa 600-700°C.

A caracterização microestrutural das amostras consistiu principalmente na preparação metalográfica, com embutimento em resina termofixa de cura a quente (superfície de observação corresponderá à seção transversal dos tubos), lixamento até 600 mesh e polimento até 1 µm, observação em microscópio óptico e quantificação das fases intermetálicas. A revelação da microestrutura se deu com ataque eletrolítico seletivo com solução de 10% de hidróxido de potássio, a 2 Vcc de diferença de potencial durante um minuto.

As frações volumétricas das fases foram obtidas por metalografia quantitativa em microscopia óptica utilizando os microscópios Leica DMLM e Zeiss para posterior análise de imagens utilizando o software Image J. A quantificação de fases secundárias, com no mínimo 20 campos por amostra, é feita a partir do contraste entre fases secundárias e matriz. Além disso, foram realizadas análises de DRX, em difratômetro de raios X Shimadzu XRD-7000 do CDMatM-FEI, com radiação de Cu-K $\alpha$  e monocromador de Ni, varrendo-se ângulos de difração  $35^\circ < 2\theta < 120^\circ$ , a velocidade de 1°/min e amostragem a cada 0,04°. A fonte de raios-X será excitada a 30 kV e 30 mA.

## 3. Resultados

Os resultados das simulações de equilíbrio indicaram a presença de carbonetos de Ti do tipo TiC em matriz ferrítica para a liga AISI 409, e fase sigma, carbonetos e nitretos de Cr dos tipos M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> e Cr<sub>2</sub>N, respectivamente, em matriz ferrítica para a liga AISI

446. As mesmas fases secundárias da liga AISI 446 são de presença esperada, em equilíbrio, também na liga 253 MA a 700°C, mas em matriz austenítica.

A difração de raios-X indicou a presença apenas de ferrita na liga AISI 409, mas foram registrados, também, picos de fase sigma na liga AISI 446, ambas após anos de uso. A baixa fração volumétrica e o pequeno tamanho dos precipitados explicam o motivo da não-identificação de todas as fases secundárias.

As micrografias são mostradas nas Figuras 1 a 3 e os resultados das quantificações apresentados na Tabela 1.

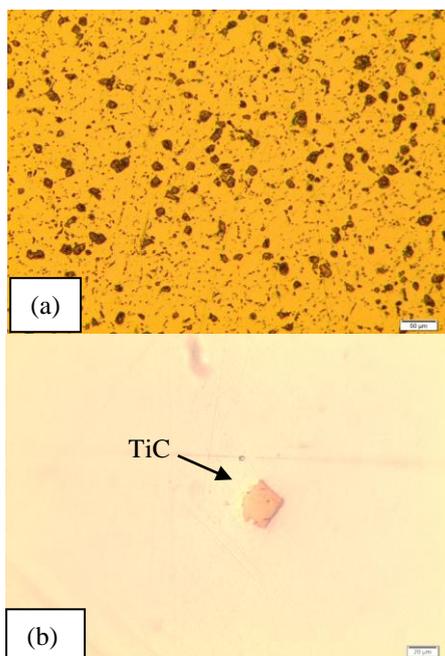


Figura 1 – Microestrutura das ligas (a) AISI 446, 100x, e (b) AISI 409, 200x, após anos de uso.



Figura 2 – Microestrutura da liga AISI 446 sem tempo de uso. 100x.



Figura 3 – Microestrutura da liga 253 MA sem tempo de uso. 100x.

Tabela 1 – Resultados das quantificações de fases.

Liga	Condição	Fases secundárias (%)	Desvio padrão (%)
AISI 446	Após uso	13,75	1,42
AISI 409	Após uso	0,17	0,04
AISI 446	Sem uso	6,74	1,33
253MA	Sem uso	----	----

#### 4. Conclusões

As principais conclusões do trabalho foram:

1. Acredita-se que a microestrutura da liga AISI 446 seja composta por fase sigma (partículas maiores), e carbonetos e nitretos de Cr (partículas menores);
2. Evidências mostram que a microestrutura da liga AISI 409 é composta por carbonetos de Ti (TiC) (precipitados amarelados, de morfologia facetada), com possível presença de nitretos de Ti (TiN);
3. A microestrutura da liga 253 MA sem tempo de uso, ao contrário da AISI 446, não apresenta fases secundárias precipitadas, apenas inclusões;
4. Houve precipitação de aproximadamente 7% de fases secundárias em 9 anos de operação da liga AISI 446;
5. Existe crescimento (aumento de tamanho) das fases secundárias na liga AISI 446 após anos de uso.

#### 5. Referências

- [1] DOS SANTOS, C. D. **Estudo da formação de sigma e sua influência no potencial de pite em solução 0,6M cloreto de sódio do aço UNS S31803 envelhecido a 850 e 900°C**. Centro Universitário FEI. São Bernardo do Campo, p. 24-38. 2010.
- [2] MAGNABOSCO, R. **Influência da microestrutura no comportamento eletroquímico do aço inoxidável UNS S31803 (SAF 2205)**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 1-18. 2001.
- [3] JUNIOR, F. C. P.; REICK, W.; PADILHA, A. F. **Estudo Comparativo entre a Precipitação da Fase Sigma em um Aço Inoxidável Superferrítico e em um Aço Inoxidável Dúplex**. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 14. São Pedro - SP: [s.n.]. 2000. p. 29302-29308.
- [4] OUTOKUMPU. **Handbook of Stainless Steels**. Avesta, Sweden: [s.n.], 2013.
- [5] AQUARO, D.; PIEVE, M. High temperature heat exchangers for power plants: Performance of advanced metallic recuperators. **Applied Thermal Engineering**, n. 27, p. 389-400, 2006.
- [6] SEONG, B. G.; HWANG, S. Y.; KIM, K. Y. High-temperature corrosion of recuperators used in steel mills. **Surface and Coatings Technology**, n. 126, p. 256-265, 2000.
- <sup>1</sup> Aluno de IC do Centro Universitário FEI. Projeto PBIC001/20 com bolsa CNPq. Vigência de 09/20 a 08/21.