



Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco – Departamento de Engenharia Mecânica  
[rodrmagn@fei.edu.br](mailto:rodrmagn@fei.edu.br) - Centro Universitário da FEI – <http://www.fei.edu.br/~rodrmagn>  
Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972 – Bairro Assunção  
São Bernardo do Campo – SP – Brasil – 09850-901  
tel: +55 11 43532900 ext. 2173 - fax: +55 11 41095994

## PROJETO DE PESQUISA

# INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO ENTRE 400 E 300°C NA MICROESTRUTURA DE AÇO UNS S32750

**Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco<sup>#</sup>**

**Candidato: Caio Cesar Magliano Silva**

n° FEI: 11.107.711-1

[caiomaglianosi@gmail.com](mailto:caiomaglianosi@gmail.com)

*Início: fevereiro de 2010*

*Provável conclusão: janeiro de 2011*

**Centro de Desenvolvimento de Materiais Metálicos - CDMatM**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

**Centro Universitário da FEI**

Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros

---

<sup>#</sup> Engenheiro metalurgista – EPUSP – 1993.  
Mestre em engenharia – EPUSP – 1996.  
Doutor em engenharia – EPUSP – 2001.  
Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da FEI, [rodrmagn@fei.edu.br](mailto:rodrmagn@fei.edu.br)



## RESUMO DO PROJETO

Durante envelhecimento isotérmico, determinadas seqüências de tratamento térmico, conformação a quente ou soldagem, pode ocorrer nos aços inoxidáveis superdúplex a precipitação de fases indesejáveis, que causam tanto redução de propriedades mecânicas quanto afetam a resistência à corrosão. Particularmente, pode ocorrer fase sigma e nitretos de cromo, com transformações de fase extensamente estudadas entre 700°C e 900°C, e formação de fase alfa linha em temperaturas inferiores a 500°C. No entanto, considerando a ausência de dados detalhados da cinética das transformações de fase no aço UNS S32750, o presente projeto de pesquisa tem por objetivo estudar a influência do tempo de envelhecimento entre 400 e 300°C na microestrutura deste aço.

**Palavras-chave:** 1. Aço inoxidável superdúplex.  
2. Fase alfa linha.  
4. Transformação de fases.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os aços inoxidáveis dúplex são freqüentemente utilizados em aplicações onde é necessária grande resistência mecânica combinada a resistência à corrosão<sup>[1-4]</sup>. O UNS S31803, apresentando composição química típica 22% Cr - 5% Ni - 3% Mo - 0,15% N – 0,02% C<sup>[2]</sup>, tem limite de escoamento próximo de 515 MPa (praticamente o dobro do encontrado em aços inoxidáveis austeníticos como os AISI 304 e 316<sup>[2]</sup>) aliada a resistência à corrosão superior a dos aços austeníticos, mesmo os de baixo teor de carbono. De maior resistência à corrosão, o UNS S32750 (SAF 2507, cuja composição química típica é 25%Cr-7%Ni-4%Mo-0,27%N) apresenta 900 MPa de limite de resistência, 550 MPa de limite de escoamento, e alongamento em 50 mm mínimo de 25%. A maior resistência mecânica do aço UNS S32750 (SAF 2507) é associada ao maior teor de nitrogênio, que em sua maioria se encontra em solução sólida intersticial na austenita, e do maior teor de elementos substitucionais, como cromo, níquel e molibdênio<sup>[2,5,6]</sup>. A estrutura típica destes aços é composta em média por 40 a 45% de ferrita e 55 a 60% de austenita, obtidas após solubilização entre 1000°C e 1200°C e resfriamento brusco<sup>[6]</sup>.

De modo geral, afirma-se<sup>[7]</sup> que a resistência à corrosão por pite nos aços dúplex solubilizados é, sem dúvida, função da composição química; de fato, a resistência à corrosão por pite (ou a modificação do potencial de início destes para valores mais nobres) cresce com o aumento do “índice de pite”, dado normalmente por  $IP = (\%Cr + 3,3.\%Mo + 16.\%N)$ . A composição química típica do UNS S32750 fornece a este aço valor de  $IP=42,5$ ; como  $IP$  ultrapassa 40, o UNS S32750 é considerado um aço inoxidável superdúplex<sup>[8]</sup>.

No entanto, durante envelhecimento isotérmico, determinadas seqüências de tratamento térmico, conformação a quente ou soldagem, pode ocorrer nos aços inoxidáveis dúplex a precipitação de fases indesejáveis, que causam tanto redução de propriedades mecânicas quanto afetam a resistência à corrosão. Particularmente entre 700°C e 900°C, pode ocorrer a formação de fase sigma, e outra importante transformação de fases ocorre entre 300°C e 500°C, onde a ferrita presente pode se decompor em fase  $\alpha$  rica em ferro e fase  $\alpha'$

enriquecida em cromo<sup>[10]</sup>, através de decomposição espinodal ou de mecanismos de nucleação e crescimento da fase  $\alpha'$  a partir da ferrita originalmente presente.

A decomposição espinodal de ferrita em  $\alpha$  e  $\alpha'$  influencia fortemente o comportamento de aços inoxidáveis dúplex, notadamente devido a endurecimento por partículas finamente dispersas de  $\alpha'$  na ferrita original, e a redução de tenacidade por esta provocada. No trabalho de SOLOMON e DEVINE<sup>[7]</sup> encontram-se dados que permitem a construção da Figura 1, onde se nota a drástica redução de tenacidade (avaliada por energia absorvida no ensaio *Charpy* à temperatura ambiente) e o aumento de dureza decorrentes da formação de  $\alpha'$ .

Trabalho recente<sup>[11]</sup> destaca que a formação de fase  $\alpha'$  em aços inoxidáveis dúplex semelhantes ao UNS S31803 se dá por decomposição espinodal da ferrita, considerando-se aços que originalmente apresentavam frações volumétricas semelhantes de  $\alpha$  e  $\gamma$ , e que estes foram envelhecidos a 475°C por 1000 h, sendo o principal indicativo desta formação a ocorrência de fase  $\alpha'$  coerente com a ferrita presente e finamente dispersa nesta fase original, sendo possível distinguir  $\alpha$  e  $\alpha'$  apenas por microscopia eletrônica de transmissão. Neste envelhecimento de 1000h, todavia, não se observou alteração na austenita presente no material.

Outro trabalho<sup>[12]</sup> discute a formação de fase  $\alpha'$  em aço UNS S31803 a 475°C, e apesar de não se ter evidências do exato mecanismo de formação de fase  $\alpha'$  (decomposição espinodal ou nucleação e crescimento) esta transformação de fase é indiretamente indicada pelo aumento de dureza observado a partir de 2 h de envelhecimento a 475°C. De fato, a formação finamente dispersa de fase  $\alpha'$  pode levar a aumento de dureza, atingindo-se o máximo de endurecimento em 96 h de envelhecimento, provavelmente quando a formação da fase se completa. Além disso, outra evidência desta formação é a diminuição de dureza a partir deste máximo, como mostra a Figura 2, provavelmente relacionado ao coalescimento da fase  $\alpha'$  inicialmente formada.

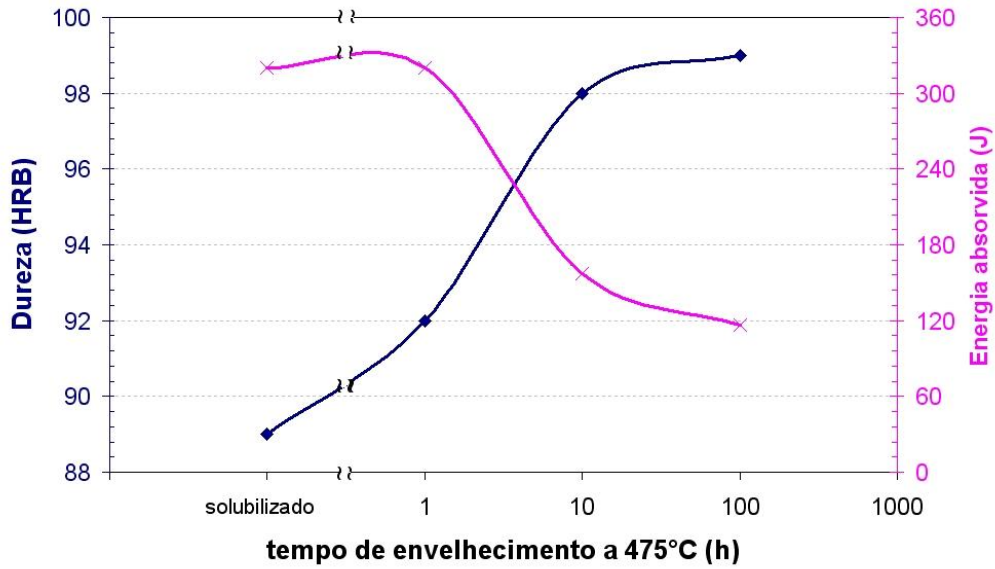


Figura 1. Energia absorvida em ensaio de impacto Charpy a temperatura ambiente e dureza *Rockwell B* de amostras de aço inoxidável dúplex U50 solubilizado e envelhecido a 475°C nos tempos indicados [7].

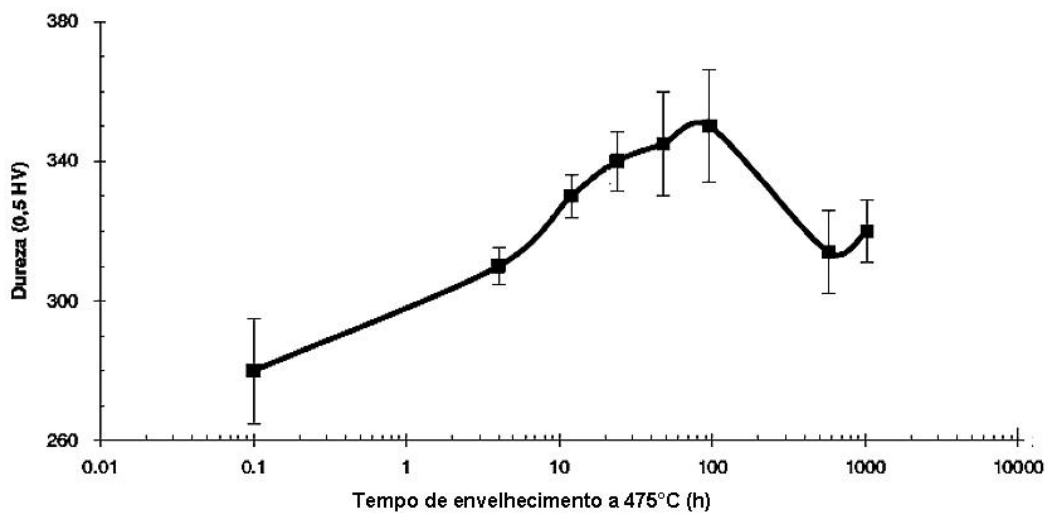


Figura 2. Dureza das amostras de aço UNS S31803 em função do tempo de envelhecimento a 475°C. O tempo de 0,1 h representa as amostras solubilizadas [12].

## PROJETO DE PESQUISA

### Objetivos

Considerando a ausência de dados detalhados da cinética das transformações de fase no aço UNS S32750, o presente trabalho de pesquisa tem por objetivo estudar a influência do tempo de envelhecimento a 400°C, 350°C e 300°C na microestrutura deste aço.

### Motivação

Este trabalho é parte integrante do projeto “Cinética das Transformações de Fase em Aço Inoxidável Superdúplex”, aprovado no Edital MCT/CNPq 14/2008 – Universal, Projeto 478447/2008-6, disponível para consulta em [http://www.fei.edu.br/~rodrmagn/mestrado/Universal-2008\\_projeto.pdf](http://www.fei.edu.br/~rodrmagn/mestrado/Universal-2008_projeto.pdf).

### Metodologia

Além da dedicação do professor-proponente como orientador (que trabalha em regime de tempo integral nesta Instituição), será necessária uma bolsa de iniciação científica, pelo período de um ano, para aluno pré-selecionado.

O material em estudo (UNS S32750) já é de propriedade do Centro de Desenvolvimento de Materiais Metálicos – CDMatM-FEI – e foi adquirido como barra cilíndrica de 20 mm de diâmetro laminada a quente e posteriormente tratada a 1100°C por 30 minutos e resfriada em água. A composição química do material pode ser constatada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química (% em massa) do aço em estudo.

Elemento	Cr	Ni	Mo	Mn	N	C	Si	Cu	P	S	Fe
% em massa	24,95	6,91	3,79	0,43	0,263	0,015	0,26	0,083	0,017	0,001	Balanco

A partir do material como recebido, envelhecimento isotérmico a 400°C, 350°C e 300°C será conduzido por tempos variando de 20 minutos a 1920 horas (em

dez diferentes intervalos<sup>#</sup>), seguido de resfriamento em água, com o objetivo de produzir microestruturas com diferentes frações de fases. Os tratamentos serão conduzidos em forno tubular (com variação máxima de temperatura de 2°C), sob atmosfera de nitrogênio puro (99,99% N<sub>2</sub>) para evitar oxidação excessiva da superfície nos tratamentos mais longos, e impedir a perda de nitrogênio das amostras, como constatado em trabalhos anteriores <sup>[21]</sup>.

Corpos-de-prova metalográficos sofrerão lixamento até 500 *mesh*, para em seguida serem polidos utilizando pasta de diamante de granulação 6 μm, 3 μm e finalmente 1 μm, sempre utilizando como lubrificante das etapas de polimento álcool etílico, em equipamento de polimento semi-automático do CDMatM-FEI. Para a revelação da microestrutura será utilizado o reativo de *Behara modificado*, cuja composição é 20 mL de ácido clorídrico, 80 mL de água destilada e deionizada e 1 g de metabissulfito de potássio; a esta solução de estoque, são adicionados 2 g de bifluoreto de amônio, e o ataque pode então ser conduzido durante até dois minutos de imersão. O ataque é interrompido com água, e a superfície de observação seca através da evaporação de álcool etílico, auxiliada por jato de ar frio.

As transformações de fase nas amostras serão também acompanhadas indiretamente pela medição de microdureza *Vickers* das amostras, em microdurômetro Shimadzu HMV-2 do CDMatM-FEI. Serão realizadas 30 medições por amostra, utilizando carga de 0,5 kgf.

A fração volumétrica de ferrita (%α) será obtida com o auxílio de um ferritoscópio FISCHER modelo MP30 do CDMatM-FEI, calibrado com o auxílio de padrões, tendo como limite de detecção 0,1% de ferrita. Trinta medições serão realizadas em cada uma das séries de amostras.

### **Plano de trabalho e cronograma**

Para cumprir as metas anteriormente propostas, o trabalho será dividido conforme descreve o cronograma mostrado na Tabela 2.

---

<sup>#</sup> a saber, 20 min, 1h, 4h, 12h, 36h, 96h, 360h, 720h, 960h e 1920h.

Tabela 2. Cronograma global de atividades do projeto.

Atividade	meses											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Revisão bibliográfica	■	■	■		■			■	■	■		
Tratamentos térmicos		■	■	■				■	■	■		
Caracterização microestrutural		■	■	■	■			■	■	■	■	
Medições de dureza			■	■	■			■	■	■	■	
Qualificação microestrutural							■	■	■	■		
Análise dos resultados		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Elaboração de relatório parcial					■	■						
Elaboração do relatório final											■	■

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. M. L. ERBING, H. L. GROTH, *Duplex-un'alternativa all'acciaio inossidabile 316 per il risparmio di peso in applicazioni offshore*. L'Acciaio Inossidabile, n. 2, 1993, p. 10-13.
2. J. J. ECKENROD, K. E. PINNOW, *Effects of chemical composition and thermal history on the properties of alloy 2205 duplex stainless steel*, New Developments in Stainless Steel Technology, Detroit, 77-87, 1984.
3. J. NORDSTRÖM, B. RUNG, *Bollitori e torri di stoccaggio di pasta per carta in acciai inossidabili duplex consentono risparmio di peso e di costi*. L'Acciaio Inossidabile, v. 2, 1995, p. 7-12.
4. B. LEFFLER, *Alloy 2205 for marine chemical tankers*. Materials Performance, abr. 1990, p. 60-3.
5. D. C. AGARWAL, *Duplex stainless steels – The cost effective answer to corrosion problems of major industries*. Key Engineering Materials, n. 2, v. 20-28, 1988, p. 1677-92.
6. J. O. NILSSON, *Super duplex stainless steels*. Materials Science and Technology, ago. 1992, v. 8, p. 685-700.
7. H. D. SOLOMON, T. M. DEVINE Jr., *Duplex stainless steels – a tale of two phases*. In: Duplex stainless steels – conference proceedings. ASM Metals Park : Ohio, 1982, p. 693-756.



8. A. J. SEDRIKS, *Corrosion of stainless steels*. John Wiley : NY, 1996, 2. ed., p. 47-53.
9. R. MAGNABOSCO, *Formação de fase sigma no aço inoxidável dúplex UNS S31803 durante envelhecimento isotérmico entre 700°C e 900°C*. In: 60° Congresso Internacional Anual da ABM, 2005, BELO HORIZONTE. 60° Congresso Internacional Anual da ABM - anais. São Paulo : ABM, 2005.
10. R. MAGNABOSCO, *Influência da microestrutura no comportamento eletroquímico do aço inoxidável UNS S31803 (SAF 2205)*, Tese (doutorado em engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2001, 181 p.
11. A. F. IACOVELLO, F. CASARI, S. GIALANELLA, *Effect of “475 °C embrittlement” on duplex stainless steels localized corrosion resistance*. *Corrosion Science*, v. 47, 2005, p. 909
12. R. MAGNABOSCO, D. BRUNO, *Efeito do envelhecimento a 475°C na microestrutura e corrosão por pite do aço inoxidável dúplex UNS S31803 (SAF 2205)* 62° Congresso Internacional Anual da ABM - anais. Vitória : ABM, 2007.