

PROPRIEDADES FÍSICAS DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 348 L*

**Celso Antonio Teodoro, Georgi Lucki, José Eduardo Rosa da Silva, Luís Antônio Albiac Terremoto,
Myrthes Castanheira e Margaret de Almeida Damy**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN – SP)
Av. Professor Lineu Prestes 2242
05508-000 São Paulo, SP
cteodoro@ipen.br

RESUMO

O estudo dos danos da radiação em metais e ligas metálicas utilizadas como materiais estruturais em reatores nucleares tem um significado estratégico para a tecnologia nuclear, pois trata da avaliação através de simulação do desempenho destes materiais em condições de trabalho em reatores de potência. Para tal, torna-se necessário o conhecimento de propriedades físicas relevantes destes materiais, propriedades estas sensíveis às mudanças microestruturais. O objetivo do presente trabalho é apresentar algumas propriedades mecânicas, tais como, tração e microdureza e resistividade do aço inoxidável AISI 348 L*, que é empregado como material estrutural nos tubos de revestimento das varetas de elementos combustíveis em reatores PWR, e sua comparação com o aço AISI 304.

1. INTRODUÇÃO

Os materiais utilizados em reatores nucleares além de estarem sujeitos a condições agressivas, tais como, ambientes corrosivos, esforços mecânicos, altos gradientes térmicos, etc. suportam uma condição adicional de altas fluências de partículas energéticas, que causam mudanças em sua estrutura cristalina, alterando conseqüentemente suas propriedades mecânicas. H. Ullmaier e W. Schilling [1] revisam alguns aspectos mais importantes relacionados com os danos da radiação em materiais metálicos, que implicam em operações de segurança e de economia em reatores nucleares. Desta maneira, é essencial adquirir o máximo possível de conhecimento dos mecanismos dos danos de radiação e usar estas informações no sentido de desenvolver ligas mais resistentes à radiação.

Deste ponto de vista, a Divisão de Engenharia do Núcleo do IPEN-CNEN/SP vem desenvolvendo um programa de caracterização de aços inoxidáveis austeníticos para aplicações em reatores PWR. O estudo dos danos da radiação no ambiente do reator constitui uma das etapas deste programa, além do efeito do gás Hélio, que é criado em materiais estruturais pela reação (n,α) e, por causa de sua solubilidade extremamente baixa [2], tende a aglomerar em bolhas em altas temperaturas, causando a fragilização, que leva à ruptura prematura do material [3].

A escolha do aço AISI 348L* no lugar do AISI 304 como candidato à utilização como material estrutural em reatores se deve às adições de Nb e N em sua composição como uma possibilidade de aumento da resistência mecânica e uma diminuição da corrosão intergranular. Isto se deve ao fato do aço AISI 304 ter um teor normal de C (0,058% em peso), o que contribui para a precipitação de $Cr_{23}C_6$ nos contornos de grão, evidenciando uma forte corrosão intergranular, o que é extremamente prejudicial do ponto de vista estrutural. Daí, a necessidade de se produzir um material com boas propriedades mecânicas e diminuir a

precipitação desses carbonetos indesejáveis nos contornos de grão. Optou-se inicialmente por um material com baixo teor de C, o que diminuiria a precipitação do $Cr_{23}C_6$. A diminuição do teor de C levaria a uma perda significativa da resistência mecânica, sendo então proposto um novo material, que teria um baixo teor de C (para a diminuição dos precipitados $Cr_{23}C_6$), e possuiria uma resistência maior do que a do aço AISI 304. Então, adicionou-se Nb (%Nb = 10%C), que em solução sólida aumentaria significativamente a resistência mecânica. Além disso, adicionou-se N, para compensar, ainda mais, a perda de resistência mecânica, devido à diminuição do teor de C, conforme já comentado anteriormente. Então o aço AISI 348 L*, sendo um aço modificado, tem provavelmente, além de baixa precipitação de carbonetos do tipo $Cr_{23}C_6$ uma resistência mecânica maior do que ao aço AISI 348 L (sem a adição de N).

O objetivo do presente trabalho é caracterizar o aço inoxidável AISI 348 L*, empregado como material estrutural nos tubos de revestimento de varetas dos elementos combustíveis em reatores PWR e sua comparação com o aço inoxidável AISI 304, também utilizado para este propósito. São apresentados resultados experimentais correspondentes ao material antes de ser irradiado, considerado como condição padrão. Foram acompanhadas algumas propriedades mecânicas, tais como, tração e microdureza. A morfologia da zona de fratura do corpo-de-prova após os ensaios de tração foi verificada através de microscopia eletrônica de varredura.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A composição química dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e 348 L* utilizados no presente trabalho pode ser vista na tabela 1.

Tabela 1. Composição Química dos Aços (% em peso)

Elemento	AISI 304	AISI 348 L*
C	0,058	0,029
Si	1,01	0,38
Mn	0,7	1,74
P	0,016	0,003
S	<0,01	0,003
Cr	18,80	17,81
Ni	8,46	10,12
Nb + Ta		0,36
N		0,069
Co		0,02

O material original foi recebido em forma de barras forjadas retangulares, de dimensões (4x6x20) cm, com acabamento bruto. Destas barras, foram cortadas, no sentido longitudinal, amostras de aproximadamente 1 mm cada, que foram laminadas a uma espessura de 100 μ m, sendo retiradas fitas de 17 mm de largura e 60 mm de comprimento. Durante a laminação, para aliviar as tensões internas devido ao encruamento do material, foram feitos recozimentos

intermediários a 900°C durante 3 horas em vácuo dinâmico de 10^{-5} Torr. A seguir, foram cortadas amostras, por eletroerosão (evitando-se, desta maneira, a introdução de deformações no material) e os corpos-de-prova resultantes foram submetidos a um tratamento térmico inicial a 900°C durante 3 horas em vácuo dinâmico de 10^{-5} Torr. Os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios de tração, microdureza e microscopia eletrônica de varredura (MEV) na região da fratura.

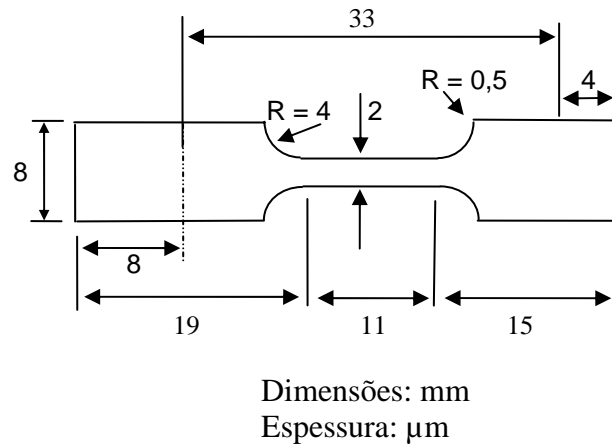


Figura. 1. Esquema do corpo-de-prova utilizado no presente trabalho.

Ensaio de Tração. O desenho esquemático dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de tração pode ser visto na Fig. 1. O comprimento útil do corpo-de-prova foi considerado como 11 mm. Os ensaios foram realizados em uma máquina Kratos, modelo DEK200 MP, com célula de carga de 200 kgf.

Microdureza. As medidas de microdureza foram realizadas em um microdurômetro Otto Wolpert Werke, com carga de 100 g. Para tal, os corpos-de-prova, embutidos em resina epoxi, foram lixados na sequência, desde a lixa de grana 240 até a de 600. Em seguida, foram polidos em pasta de diamante, na sequência de 6, 3 e 1 μm . Após o polimento, eles foram atacados eletroliticamente na solução de ácido oxálico (10% em peso) durante 1,5 min, na corrente de 1 A/cm².

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de tração foram examinados no microscópio eletrônico de varredura Philips XL-30/MEF, para verificação do tipo de fratura (intergranular ou transgranular). A observação foi feita na zona de fratura do corpo-de-prova após ensaio de tração e na direção transversal à direção de laminação.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

Na tabela 2 podem ser vistos os valores encontrados para a tensão de escoamento e tensão de ruptura, para os aços inoxidáveis AISI 304 e 348 L*. Cada valor experimental obtido representa a média em cinco corpos-de-prova.

Tabela 2. Tensão de escoamento e tensão de ruptura para os aços inoxidáveis AISI 304 e 348 L*.

Material	σ_e (Mpa)	σ_r (Mpa)
304	378 ± 29	675 ± 53
348 L*	400 ± 27	779 ± 42

Na tabela 3 podem ser vistos os valores de microdureza dos aços inoxidáveis 304 e 348 L*. Cada valor representa a média obtida de quatro corpos-de-prova, sendo que, em cada corpo-de-prova foram realizadas cinco medidas.

Tabela 3. Valores de microdureza para os aços inoxidáveis AISI 304 e 348 L*.

Material	Microdureza (HV _{0,1})
AISI 304	$189,7 \pm 2,4$
AISI 348 L*	$199,3 \pm 2,2$

Conforme visto na tabela 2, os valores da tensão de escoamento e de ruptura para o aço AISI 348 L*, são maiores que os do AISI 304. Isto indica uma maior ductilidade do aço AISI 304, confirmado também pelos valores de microdureza obtidos (tabela 3), que é menor para o aço AISI 304.

O aumento da microdureza foi também verificada no aço inoxidável austenítico AISI 321 devido à adição de pequenas quantidades de Nb (0,1% em peso) [4]. Contudo, o importante será a segunda etapa do presente trabalho, que é a comparação com o material: a) após a implantação de partículas alfa em ciclotron e b) irradiação com neutrons rápidos no reator de pesquisa IEA – R1.

As Fig. 2 e 3 mostram a morfologia da zona de fratura para os aços inoxidáveis AISI 304 e 348 L*, respectivamente.

Nota-se a presença de dimples nos dois aços, evidenciando uma fratura transgranular, o que, do ponto de vista de material estrutural em reatores, é desejável.

A maior quantidade de dimples observada no aço AISI 348 L* (Fig. 3) é provavelmente devido ao efeito do N, que age como refinador do tamanho de grãos.

As Fig. 4 e 5 mostram as microestruturas obtidas através de microscopia eletrônica de transmissão para o aço AISI 304. Observa-se uma quantidade razoável de discordâncias, principalmente nas proximidades do contorno de grão. Na Fig. 4, as discordâncias estão alinhadas em diversos grupos.

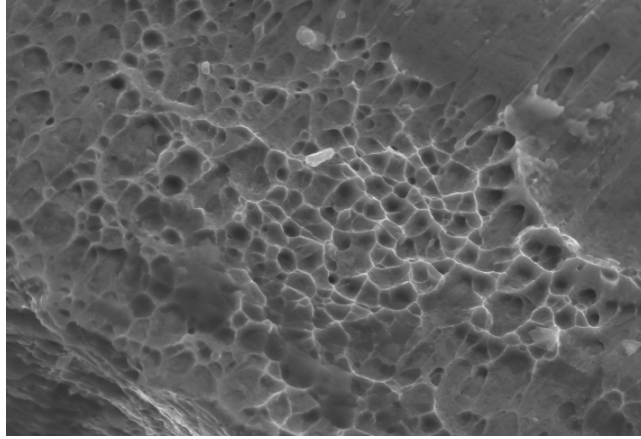


Figura 2. Aspecto morfológico da fratura do aço AISI 304, na direção transversal à laminação. 2000 X.

As Fig. 6 e 7 mostram as microestruturas obtidas através de microscopia eletrônica de transmissão para o aço AISI 348 L*. Observa-se uma quantidade de discordâncias semelhantes ao aço AISI 304, porém elas não estão alinhadas.

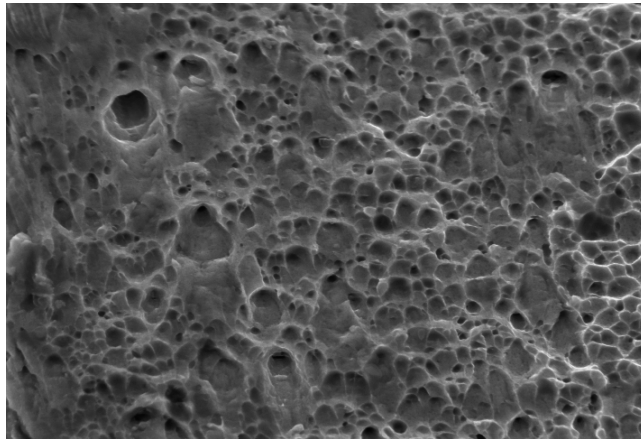


Figura 3. Aspecto morfológico da fratura do aço AISI 348 L*, na direção transversal à laminação. 2000 X.

Numa segunda fase, estes resultados serão comparados aos obtidos após a implantação de partículas alfa em cíclotron, simulando, desta maneira, a presença de hélio gerada pela reação (n,α) em reatores nucleares e os danos da radiação (deslocamentos por átomos – dpa); bem como comparados com amostras irradiadas com neutrons rápidos em condições de trabalho de reatores PWR (alta temperatura e atmosfera controlada) no reator de pesquisa IEA – R1.

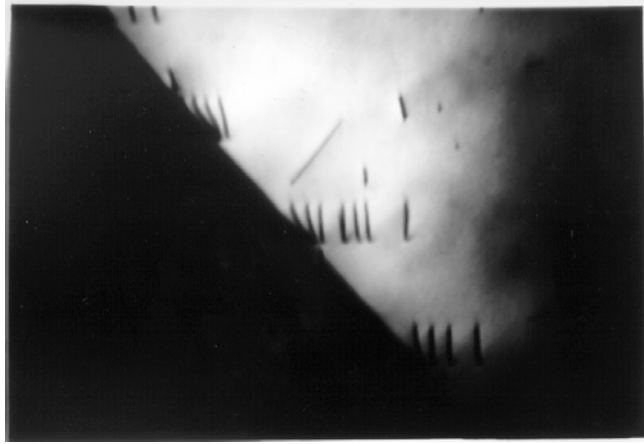


Figura 4. Microestrutura do aço AISI 304, na direção transversal à laminação. 13400 X.

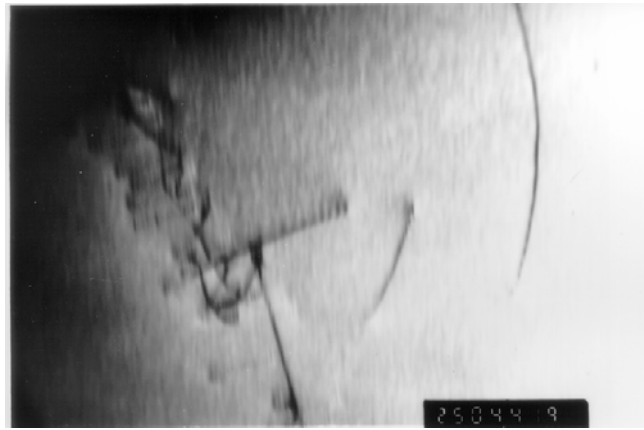


Figura 5. Microestrutura do aço AISI 304, na direção transversal à laminação. 20700 X.

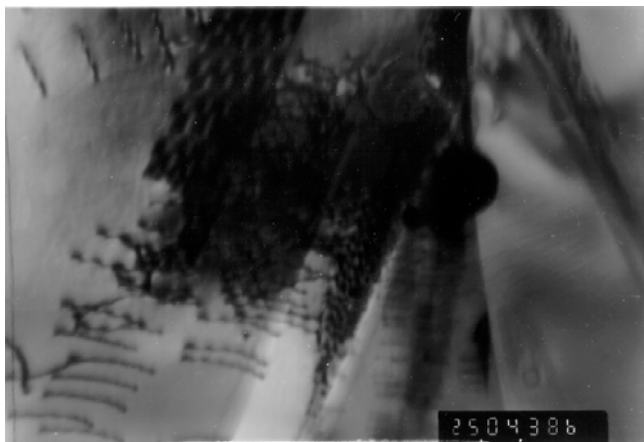


Figura 6. Microestrutura do aço AISI 348 L*, na direção transversal à laminação. 20700 X

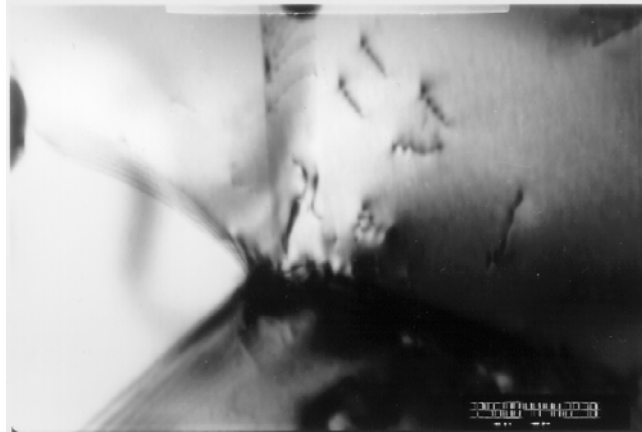


Figura 7. Microestrutura do aço AISI 348 L*, na direção transversal à laminação. 20700 X.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi feita uma caracterização das propriedades mecânicas, tais como, tração e microdureza dos aços AISI 304 e 348 L*. Também foi verificada a zona de fratura dos corpos-de-prova após o ensaio de tração na direção transversal à laminação por meio de microscopia eletrônica de varredura.

Após ensaio de tração, a microestrutura foi observada nos aços AISI 304 e 348 L* na direção transversal à laminação através de microscopia eletrônica de transmissão.

As propriedades mecânicas (tensões de escoamento e de ruptura e microdureza) do aço AISI 348 L* são maiores do que as do aço AISI 304. Isto ocorre provavelmente devido ao N adicionado no aço AISI 348 L*, que aumenta sua resistência mecânica.

A escolha do aço AISI 348 L*, em relação ao aço AISI 304, torna-se conveniente, pois o baixo teor de C, promove uma diminuição de precipitados de $Cr_{23}C_6$ nos contornos de grão, inibindo a corrosão intergranular. Por outro lado, a resistência mecânica foi melhorada em função da adição de Nb e N.

Numa segunda etapa, as propriedades dos aços AISI 304 e 348 L* serão caracterizadas na condição pós-irradiada e comparadas com as da condição pré-irradiada. A irradiação será realizada com a implantação de partículas α e prótons, em ciclotron, a qual ocasionará danos de radiação de interesse na estrutura do material. A irradiação deverá ser feita também com neutrons rápidos em condições de trabalho de reatores PWR (alta temperatura e atmosfera controlada) no reator de pesquisa IEA – R1.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ullmaier, H. & Schilling, W. *Radiation damage in metallic reactor materials*. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Nuclear fusion research: proceedings of the seminars...held in Vienna, 1-2 February, 1980. **vol. 1**, Vienna, 1980, p. 301-97.

(IAEA-SMR-46/105).

2. Driesch, H.J. von den & Jung, P. *An investigation of the solubility of helium in nickel*. High Temp.-High Press., **vol. 12**, p. 635-41, 1980.
3. Schroeder, H.; Kesternich, W. & Ullmaier, H. *Helium effects on the creep and fatigue resistance of austenitic stainless steel at high temperatures*. Nucl. Des./Fus., **vol. 2**, p. 65-85, 1985.
4. Camargo, M.U.C. Estudo de danos de radiação em um aço inoxidável austenítico tipo 321 com adições de Nb, submetido a tratamentos térmicos, mecânicos e irradiações com nêutrons rápidos. São Paulo: 1996. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-CNEN/SP, 1996.