

Formação de precipitados em aço AISI 316L sob

irradiação de íons de Au

Franciele Silva Mendes de Oliveira

Paulo Fernando Papaleo Fichtner

MOTIVAÇÃO

Neste projeto foi utilizada a técnica de implantação e irradiação de íons energéticos para simular os danos causados em materiais expostos a ambientes nucleares sujeitos à irradiação de nêutrons e subprodutos de fissão. O projeto possibilita estimar, em pouco tempo, o que acontece num material exposto a ambiente nuclear por muitos anos. Em relação à segurança, estabilidade e resistência dos materiais utilizados em reatores nucleares, é importante conhecer e desenvolver materiais mais resistentes à radiação. O projeto está sendo desenvolvido em colaboração com o Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo como atividade de pesquisa permitida pelo tratado de não proliferação de armas nucleares.

OBJETIVOS

O objetivo deste projeto é estudar os efeitos de danos por irradiação sobre a estabilidade dos materiais estruturais de revestimento do combustível nuclear (Figura A) dos futuros reatores de propulsão naval da Marinha do Brasil. A contribuição da UFRGS no projeto é utilizar íons energéticos gerados no acelerador TANDETRON, do Laboratório de Implantação Iônica do Instituto de Física para simular os danos por irradiação de nêutrons e utilizar a infraestrutura do Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS para analisar os danos.

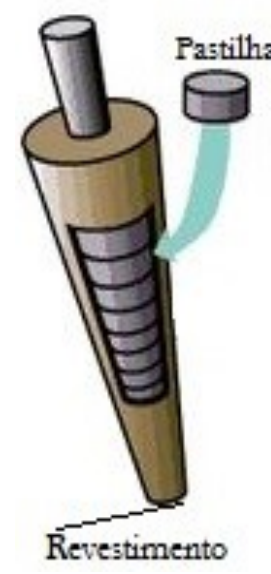
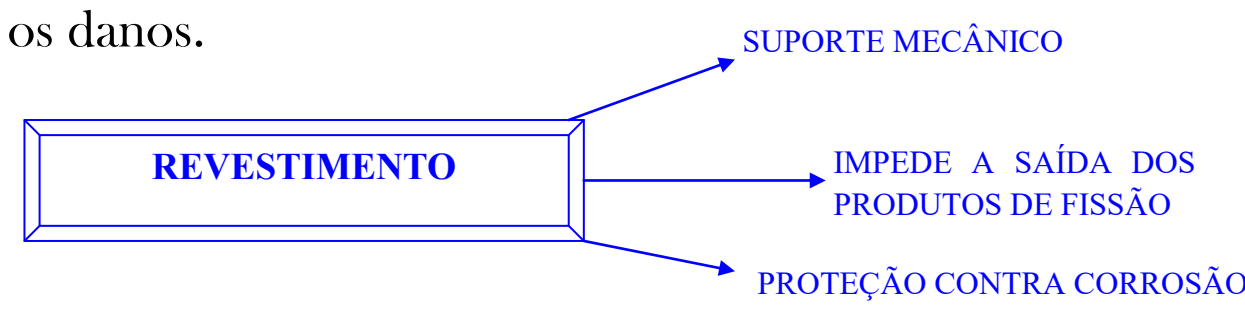


Figura A: Vareta de combustível exibindo pastilhas e revestimento.

METODOLOGIA



- 1) Polimento com lixas e pastas de diamante (1 e 0,25 µm de diâmetro) + recozimento (1100 °C, 2 h) para alívio de tensões e solubilização de carbonetos. Figuras B, C, D e E.
- 2) Implantação de Ar em um lote de amostras. Figura F.
- 3) Recozimento do lote de amostras implantadas (550 °C, 2 h) para formação de bolhas.
- 4) Irradiação com íons de Au acelerados a 5 MeV. Figura F.
- 5) Microscopia Eletrônica de Transmissão: difração de elétrons (identificação das fases). Figura G.

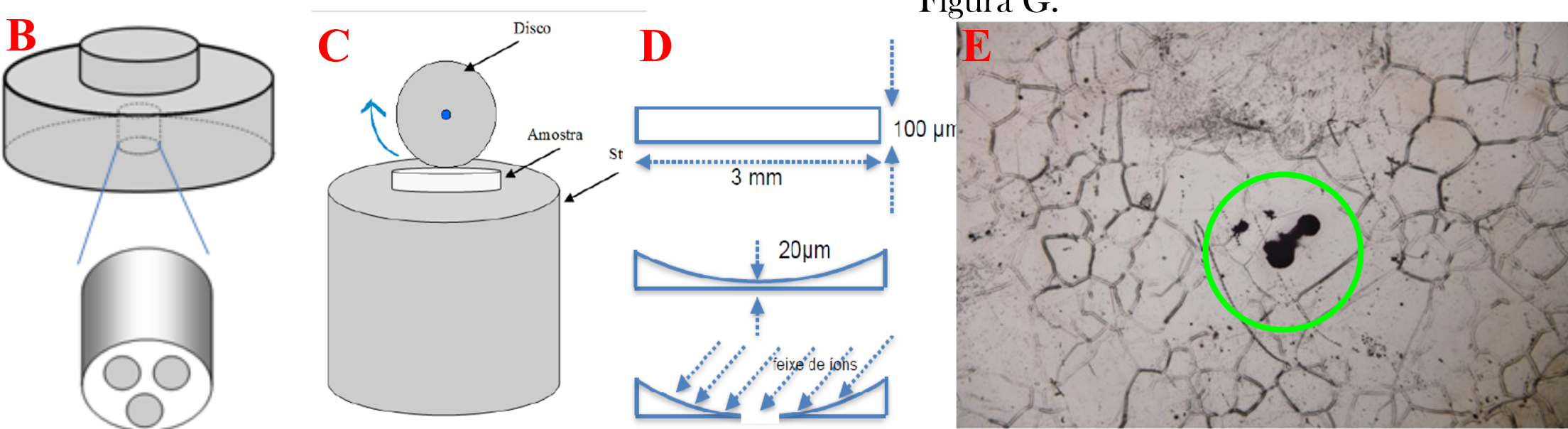


Figura B: Esquema de grinder mostrando o stub (onde as amostras são fixadas com resina). Figura C: Esquema de dimple-grinder mostrando stub, amostra e disco. Figura D: Dimensões (fora de escala) de uma amostra após ser afinada na primeira etapa; esquema de amostra mostrando afinamento mecânico em forma de cova; esquema mostrando desbaste por feixe de íons formando orifício. Figura E: amostra com orifício.

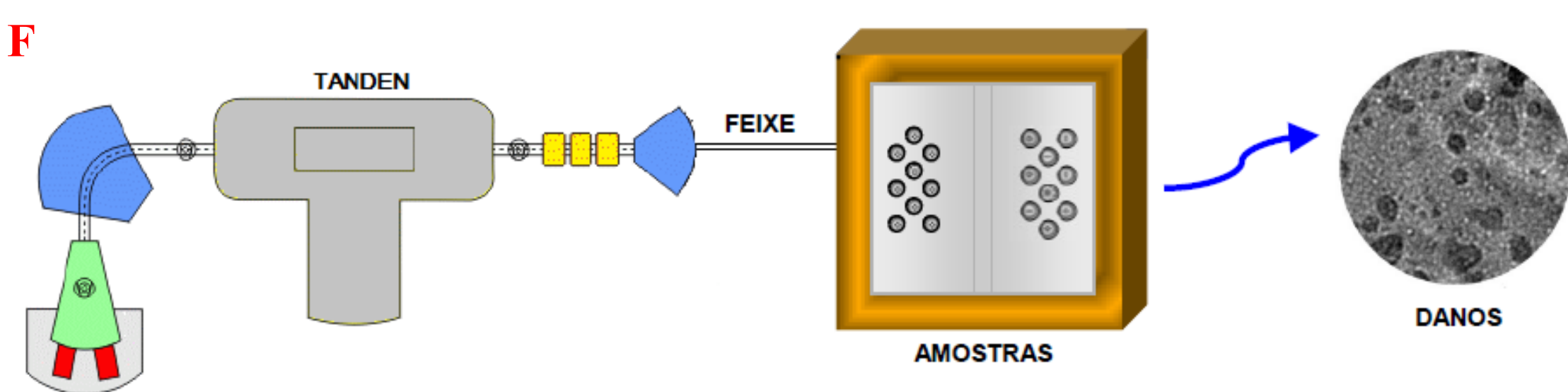
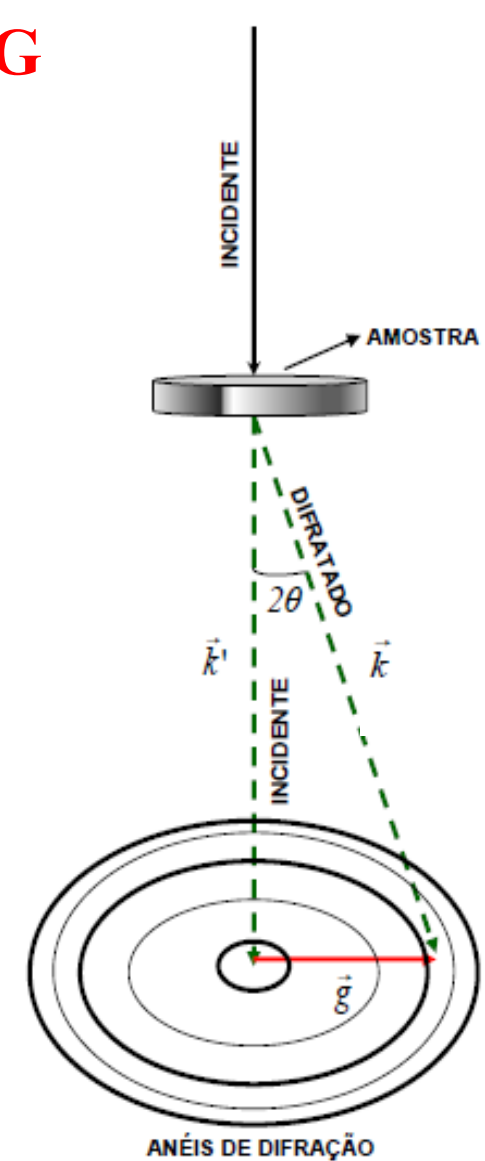


Figura F: Esquema de acelerador TANDETRON mostrando feixe incidindo no porta-amostra e danos ocasionados por irradiação e implantação iônica.



A técnica de implantação iônica consiste em ionizar átomos ou moléculas, e acelerá-los através de um campo elétrico, fazendo com que sejam implantados em um material alvo (Figura F). Quando íons energéticos penetram em um sólido, colidem com os átomos de sua estrutura cristalina. As colisões acabam causando deslocamentos de átomos da posição de equilíbrio da rede cristalina do material alvo (dpa) resultando na formação de vacâncias, discordâncias e até aglomerados como bolhas e precipitados.

A difração é descrita pela Lei de Bragg. Através da Figura G é possível deduzir a equação:

$$\vec{g} = \vec{k}' - \vec{k} = \Delta\vec{k} = \frac{1}{d} = \frac{2 \sin \theta}{\lambda} \quad \text{com } n=1 \quad \text{e } 2d \sin \theta = n\lambda$$

Na Figura H, os pontos mais intensos resultam do espalhamento causado pelos planos de átomos da matriz e os menos intensos representam os espalhamentos causados pelos planos atômicos dos precipitados. A partir dos pontos as fases são determinadas utilizando parâmetros como os índices de Miller (hkl) e a distância interplanar (d).

Figura G: Esquema para dedução da Lei de Bragg através de \vec{g} .

RESULTADOS, CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

GRUPO	TEMPERATURA DE IRRADIAÇÃO	DOSE	FASES IDENTIFICADAS
Impl Ar + Irr Au	450 °C	40 dpa	MC, M ₂₃ C ₆ e/ou M ₆ C
Impl Ar + Irr Au	500 °C	40 dpa	MC, M ₂₃ C ₆ e/ou M ₆ C
Impl Ar + Irr Au	550 °C	40 dpa	MC
Impl Ar + Irr Au	550 °C	20 dpa	MC, M ₂₃ C ₆ e/ou M ₆ C

Tabela 1: Fases identificadas conforme temperatura e dose de irradiação.

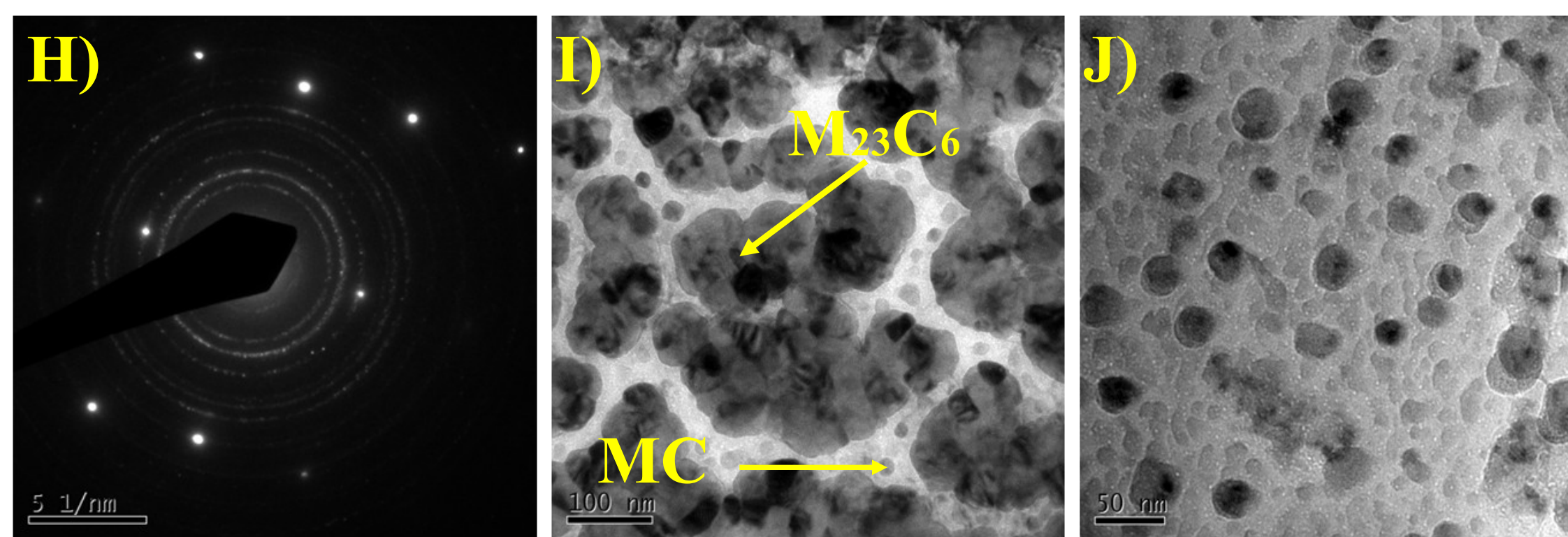


Figura H: Imagem de campo claro da amostra irradiada a 500 °C e 40 dpa. Figura I: Padrão de difração da amostra irradiada a 500 °C e 40 dpa. Figura J: Imagem de campo claro da amostra irradiada a 550 °C e 40 dpa.

Na Tabela 1 são exibidas as fases identificadas através da análise do padrão de difração das amostras. Nas fases, a letra M simboliza um metal. Nas Figuras I e J são indicadas as fases.

Os detalhes de distribuição em tamanho das bolhas e dos precipitados mostram que a temperatura de irradiação das amostras é o fator que mais influencia no crescimento destes sistemas dispersos. Nas amostras sem Ar irradiadas com Au houve formação de cavidades e defeitos induzidos por irradiação. Em amostras implantadas com Ar e irradiadas com Au foi observada a formação de bolhas e de precipitados. Amostras implantadas com Ar e irradiadas com Au a 40 dpa e 450 °C apresentaram precipitados disformes e esféricos. Amostras implantadas com Ar e irradiadas com Au a 40 dpa e 500 °C apresentaram maior densidade de precipitados e a nucleação de uma nova fase (Figura I). Em amostras implantadas com Ar e irradiadas com Au a 40 dpa e 550 °C não houve mudança significativa na densidade e tamanho de precipitados (Figura J). Amostras implantadas com Ar e irradiadas com Au a 20 dpa mostraram um aumento da densidade numérica de precipitados com o aumento da temperatura de irradiação (500 °C à 550 °C), porém, os precipitados não apresentaram crescimento.

Conclui-se que a presença de Ar é essencial para a formação de precipitados. Devido à falta de dados na literatura sobre a nucleação de fases, espera-se em breve realizar outras análises a fim de determinar o que ocasionou a nucleação e o crescimento das fases. Também é interessante ressaltar que não foram feitas análises utilizando outros gases, outras temperaturas e outras energias de irradiação. Sendo assim, em breve também espera-se ampliar os ensaios e obter dados referentes a diferentes gases, energias e temperaturas.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, à Pró-Reitoria de Pesquisa, ao Laboratório de Implantação Iônica, em especial aos colegas Ítalo Martins Oyarzabal, Mariana de Mello Timm, Willian Martins Pasini e Francine Tatsch e ao Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS.

REFERÊNCIAS

- Murty, K. L. Charit, I. *An Introduction to Nuclear Materials: Fundamentals and Applications*.
- Oyarzabal, I. M. *Efeitos da implantação de Ar e da irradiação com íons de Au sobre a formação de precipitados em aço AISI 316L utilizado como revestimento de combustível nuclear*. (Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017).
- Reimer, L. Kohl, H. *Transmission Electron Microscopy: Physics of Image Formation*. Fifth Edition.
- Pasini, W. M. *Fenômenos de precipitação assistidos por irradiação nos aços inoxidáveis austeníticos AISI 348 e AISI 316L AISI 348 e AISI 316L*. (Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016).