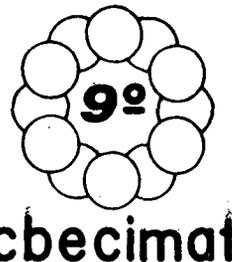




"Características do Urânio Metálico Bruto de Fusão
Produzido no IPEN".



Maria da Conceição B. V. Soares.
Sadamu Koshimizu
Comissão Nacional de Energia Nuclear/CNEN-SP
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/IPEN
C.P. 11049 - Pinheiros / 05499 - São Paulo - Brazil



A separação isotópica para obtenção de urânio enriquecido gera uma grande quantidade de um subproduto denominado urânio empobrecido, que futuramente poderá ser aproveitado em setores não nucleares. A propriedade mais importante do ponto de vista de utilização industrial é a alta densidade. Entre alguns exemplos de aplicação pode-se citar: contra-peso em aeronaves e satélites, projéteis de impacto, blindagem para radiação, giro-rotadores e barras de perfuração de poços de petróleo. O presente trabalho visa a caracterização da microestrutura e a avaliação das propriedades mecânicas do lingote de urânio natural, cujo processo de obtenção vem sendo desenvolvido no IPEN.

INTRODUÇÃO

Através do beneficiamento e procedimentos químicos do minério de urânio é obtido o tetrafluoreto de urânio, UF₄. O UF₄ é então reduzido com magnésio em altas temperaturas para produzir o urânio metálico em forma de "botões". Estes botões são refundidos e vazados em forma de lingote ou outras formas desejadas para aplicação como componentes ou para posterior processamento metalúrgico ou mecânico.

O lingote de urânio metálico pode também ser obtido diretamente da redução, sem refusão. Este lingote obtido diretamente da redução é chamado "dingote" e possui qualidade superior aos lingotes obtidos pela refusão de botões. Isto é uma decorrência do fato de que o urânio é um metal altamente reativo. A experiência acumulada na obtenção de urânio metálico tem demonstrado que a refusão em fornos convencionais, por exemplo forno de indução com cadinho de grafita com ou sem revestimento cerâmico, não melhora a qualidade final do lingote [1]. Assim o método de obtenção do lingote de urânio metálico que vem sendo utilizado e aperfeiçoado é o de redução direta.

O urânio metálico exibe três formas alotrópicas (polimorfismo):

- (a) Fase γ , com estrutura cúbica de corpo centrado, entre as temperaturas de 771°C e 1132°C (ponto de fusão);
- (b) Fase β , com estrutura tetragonal complexa com 30 átomos por célula unitária, entre as temperaturas de 665°C e 771°C; e
- (c) Fase α , com estrutura ortorrômbica com 4 átomos por célula unitária, abaixo da temperatura de 665°C.

O urânio exibe ainda transições eletrônicas e/ou magnéticas, sem mudança cristalográfica, na região de baixas temperaturas, entre 43K e 23K [2].

A fase γ é a fase na qual o urânio metálico exibe caráter metálico verdadeiro. Já, as

fases β e α , apresentam algumas características não metálicas, similares, por exemplo, das aquelas observadas em antimônio e bismuto. A fase β apresenta baixa ductilidade e não é recomendável efetuar deformação plástica nesta fase. A fase α apresenta propriedades físicas e mecânicas altamente anisotrópicas e de uma maneira geral é frágil, principalmente a baixas temperaturas. Independente das características inerentes à estrutura cristalina, as impurezas desempenham um papel fundamental nas propriedades mecânicas. Por exemplo, na fase α , as impurezas de Fe, Al, C e H elevam a temperatura de transição dútil-frágil a temperaturas bem acima da ambiente, diminuindo a ductilidade do material. Em vista disso, a conformação mecânica do urânio, assim como das ligas à base de urânio, é feita na fase γ ou a altas temperaturas da fase α , onde maior número de sistemas de escorregamento se torna ativo [3]. Devidas precauções devem ser tomadas quando o urânio é aquecido por causa da alta reatividade com o ar. Uma maneira de se precaver contra esta reatividade é trabalhar em ambiente protetor, por exemplo, atmosfera de argônio, ou a utilização de um revestimento de proteção, metálico ou viscoso, sobre o urânio.

Este trabalho tem por objetivo a caracterização da micro-estrutura e a avaliação das propriedades mecânicas do urânio quem vem sendo obtido e aperfeiçoado no IPEN. As observações metalográficas foram efetuadas em amostras nos estados bruto de fusão, encruado e recristalizado. Em termos de propriedades mecânicas foram realizados medidas de microdureza e testes de tração. A microdureza foi medida em amostras nos estados bruto de fusão, encruado, recristalizado e temperado. Os testes de tração foram realizados em amostras nos estados bruto de fusão e temperado.

OBSERVAÇÕES METALGRÁFICAS

Os resultados de análise química por espectrografia semi-quantitativa e análise residual de gases, típicas de um dingote, são mostrados na tabela 1.

TABELA 1. Principais impurezas em ppm.

Fe	Ni	Si	Al	Mn	Mg	Pb	Cu	C
120	4	260	210	200	30	4	16	300

A figura 1 mostra a macrografia de um lingote cortado longitudinalmente. Pode-se ver nesta figura, uma estrutura irregular e mal definida de grãos, típicos do urânio bruto de fusão. A figura 2 mostra a macrografia da seção transversal, onde é nítida a estrutura colunar com grãos equiaxiais menores no centro.

A figura 3 mostra uma micrografia, com luz polarizada, do urânio bruto de fusão. Pode-se observar grãos grandes e irregulares, subgrãos e maclas de acomodação de contração térmica. Estas maclas são típicas da fase α . A presença de carbeto e hidreto no urânio pode ser observada na micrografia de campo claro, mostrada na figura 4. Nesta figura os carbeto aparecem na forma equiaxial ou poligonal e os hidreto na forma alongada.

DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

Os testes de deformação plástica foram realizados com a utilização de um laminador do tipo ourives, sem nenhuma preocupação quanto aos parâmetros de laminação tais como redução por passe e número de passes por recozimento. A única preocupação foi a de verificar se o urânio metálico obtido no IPEN pode ser deformado plasticamente a temperatura abaixo de 400°C, sem precisar recorrer às técnicas sofisticadas de recobrimento do urânio com cobre ou aço, ou tratamentos em banhos de sais fundidos, necessários para prevenção contra a oxidação. Sabe-se que a graxa de silicone funciona bem para tratamento térmico e conformação mecânica até 300°C [4]. Neste trabalho utilizou-se graxa de silicone estendendo a temperatura de tratamento térmico até 400°C, para assegurar a temperatura de laminação na faixa de 300 a 350°C. Apesar de tudo ter funcionando bem, houve perda de massa da ordem de 3 a 5%. A escolha do intervalo de temperatura de trabalho deveu-se ao fato de que apesar do sensível progresso na obtenção do urânio, o teor de impurezas é ainda grande, principalmente do carbono. O teor de hidrogênio nem sequer foi analisado.

As figuras 5 e 6 mostram a micrografia do urânio encruado e recristalizado, respectivamente. Estas micrografias correspondem ao urânio cuja seção transversal foi reduzida de 8mm x 8mm para 6,5mm x 6,5mm ($\Delta A/A_0 = 33,9\%$). O tratamento de recristalização foi efetuada a temperatura de 500°C por uma hora.

PROPRIEDADES MECÂNICAS

As medidas de microdureza Vickers foram realizadas em amostras nos estados bruto de fusão, encruado (33,9%), temperado e recristalizado. A tempera efetuada consistiu de um tratamento térmico de 2 horas a 700°C (campo β) seguida de resfriamento rápido em água. Este tratamento é feito para refinar os grãos do estado bruto de fusão. Os grãos refinados desta maneira, são irregulares e apresentam arestas

dentadas.

A tabela 2 mostra os valores de microdureza Vickers (HV) das diversas amostras. Não houve diferenças nos valores do bruto de fusão e do temperado. Por outro lado o valor da microdureza da amostra no estado encruado é, como esperado, elevado.

TABELA 2. Microdureza (HV)

Amostra	Carga HV 1KgF
Bruto de fusão	279 ± 21
Temperado	280 ± 18
Encruado	425 ± 20
Recristalizado	302 ± 10

Os testes de tração foram realizados na máquina Instron, a temperatura ambiente, em amostras nos estados bruto de fusão e temperado. Os valores do limite de escoamento a 0,2% (σ_{esc}), resistência à tração (σ_{max}) e alongamento estão sumarizados na tabela 3. A tempera produziu um aumento sensível no limite de escoamento e na resistência à tração. O material temperado possui grãos bem refinados com arestas

TABELA 3. Propriedades de Tração

Amostra	σ_{esc} MPa	σ_{max} MPa	Along. %
Bruto de fusão	197	340	3,8
Temperado	319	379	1,6

irregulares e dentadas. Além disso a tempera desenvolve altas tensões internas no material, provenientes da contração volumétrica durante a transformação de β para α e do gradiente de temperatura. Isto justifica os valores do limite de escoamento e da resistência à tração maiores do que do estado bruto de fusão.

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Embora o teor de impurezas ainda seja um pouco alto, é notório o progresso que vem sendo feito, no IPEN, para obtenção do urânio metálico. As observações metalográficas qualitativas apresentadas neste trabalho, revelam que a qualidade do urânio metálico é boa em relação a presença de porosidades e fissuras. Por outro lado, a quantidade de inclusões ou precipitados é grande, mas isto era esperado devido ao teor de impurezas. Embora uma análise mais precisa de identificação das inclusões não tenha sido realizada, infere-se que a maioria delas está na forma de carbonetos, por causa do alto teor de carbono [1].

Vale destacar aqui que é a primeira vez que se consegue deformar plasticamente o urânio metálico no IPEN. Os principais fatores que impossibilitavam anteriormente a deformação plástica eram: fragilidade devido ao teor de impurezas muito mais alto do que o atual e dificuldades em efetuar trabalho a temperatura média ou a quente. A deformação plástica realizada neste trabalho pode ser considerada como trabalho a frio, já que a mesma foi efetuada no intervalo



FIGURA 1 - Macrografia da seção longitudinal de lingote de urânio metálico bruto de fusão. Ataque: HNO_3 .

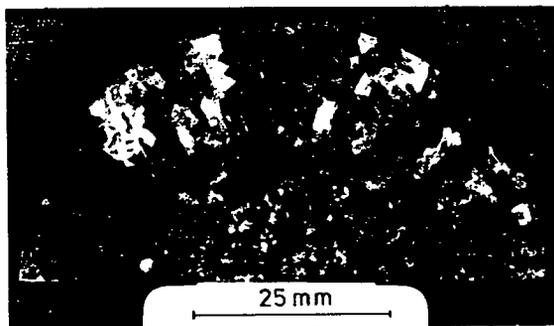


FIGURA 2 - Macrografia da seção transversal do lingote bruto de fusão. Ataque: HNO_3 .



FIGURA 3 - Micrografia em luz polarizada do urânio bruto de fusão. Procedimento: coloração térmica. Aumento 160X.

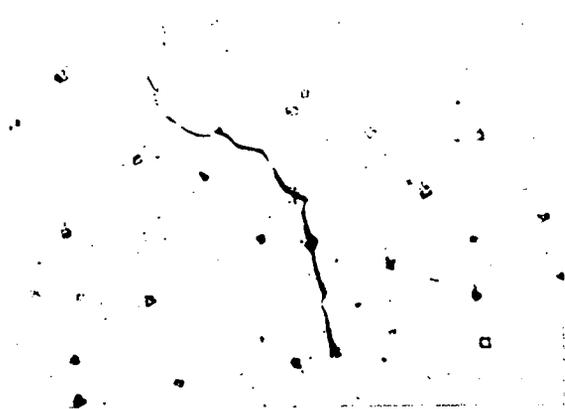


FIGURA 4 - Micrografia de campo claro do urânio bruto de fusão. Ataque: solução 50% de HNO_3 . Aumento: 400X.

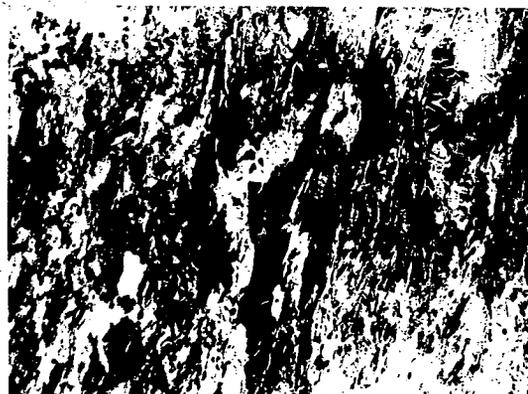


FIGURA 5 - Urânio encruado 33,9%. Polimento eletrolítico e oxidação ao ar. Aumento 120X.

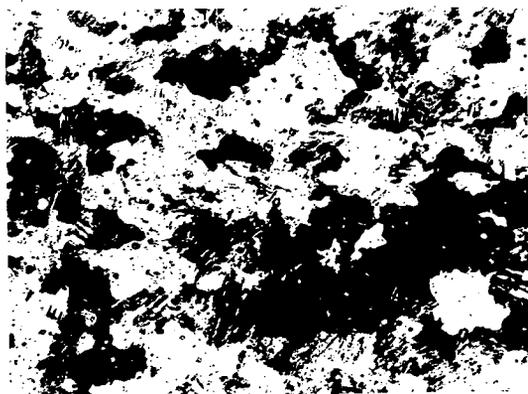


FIGURA 6 - Urânio encruado e então recozido por uma hora a 500°C . Ataque: oxidação ao ar. Aumento: 120X.

de temperatura menor do que $0,35T_m$ (T_m = temperatura de fusão).

Os resultados de medida de microdureza e dos testes de tração indicam que o urânio metálico pode adquirir propriedades mecânicas num amplo intervalo de valores, segundo os tratamentos térmicos e mecânicos submetidos. Os resultados do limite de escoamento e da resistência à tração assim como as medidas de microdureza estão em boa concordância com os valores encontrados na literatura [5].

As dificuldades em trabalhar com o urânio metálico são muitas pelo fato do U ser altamente reativo e pirofórico. Assim muitas análises e testes estão, ainda para serem efetuados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Srs. Rui M. de Lima e Roberto M. de Lima, responsáveis pelo processamento do urânio metálico, pelo apoio técnico indispensável para realizar este trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] AMBRÓZIO, F.F. e E.F.Gentile, "Observação Metalográfica de Urânio", Metalurgia- Revista da Associação Brasileira de Metais, vol. 27 (163), 1971, pp. 415-420.
- [2] VAN SMAALEN, S. e T.F.George, "Determination of the Incommensurately Modulated Structure of α -Uranium Below 37K", Physical Review B, vol. 35 (15), 1987, pp. 7939-7951.
- [3] DANIEL, J.; B.Lesage e P.Lacombe, "The Influence of Temperature on Slip and Twinning in Uranium", Acta Metallurgica, vol. 19, 1971, pp. 163-173.
- [4] WILKINSON, W.D., "Uranium Metallurgy", vol. 1, Cap. 3, pp. 255-389, Interscience Publishers, 1962.
- [5] GEARY, A.L.; N.C.Jessen, Jr e A. B. Townsend, "Heat Treating of Uranium and Its Alloys", Metals Handbook, ASM, 9ª edição, vol. 4, 1981, pp. 777-786.

SUMMARY

The natural uranium consists of two primary isotopes, the U^{235} (0,7%) and the U^{238} (99,3%). The isotopic separation carried out in order to obtain enriched uranium, generates a by-product called depleted uranium, which can be applied for industrial uses. The most singular property, from engineering standpoint, is its high density. When the density is the only important factor, the uranium has great advantage over other heavy metals related to economic and technical considerations. Among some applications of uranium are aircraft and missile counterweights, kinetic energy penetrators, radiation shielding, gyrorotors and oil-well sinker bars. The uranium ingot fabrication is done by direct reduction of UF_6 with magnesium, without remelting. The microstructure of as-cast uranium is, as in the other as-cast metals, formed by coarse and

irregular grains which frequently determine low mechanical strength and toughness. This paper deals with microstructure analysis and mechanical behavior of natural uranium ingots, which are in development at IPEN.