



## PLANO DE TRABALHO

### PROJETO PARA BOLSA PÓS-DOCTORADO – EDITAL 6

Nome do(a) Bolsista: **Dr. Luiz Alberto Tavares Pereira**

Código do Projeto vinculado: **2020.06.IPEN.40**

#### DESCRIÇÃO DO PROJETO

Título do Projeto

CONSOLIDAÇÃO DA TECNOLOGIA PARA A OBTENÇÃO DE LINGOTES MACIÇOS A PARTIR DA ESPONJA DE ZIRCÔNIO POR MEIO DE FUSÃO A ARCO ELÉTRICO SOB VÁCUO PARA A ELABORAÇÃO DE LIGAS PARA USO EM REATORES NUCLEARES

**Prazo Execução (meses): 36**

#### Objetivo Geral

O presente projeto visa ocupar a consolidação da esponja de zircônio em lingotes, assim como a produção de componentes e peças em ligas de zircônio nacionais e manter vivo o conhecimento e o funcionamento de alguns laboratórios que estudam e pesquisam o zircônio como um importante insumo para a área nuclear, produção da esponja de zircônio e fusão para a consolidação da esponja e obtenção de lingotes de ligas de interesse nuclear, neste momento em que a energia nuclear terá papel importante no final desta década, com o esgotamento da sustentabilidade da geração hidroelétrica no Brasil.

#### Objetivos Específicos

O objetivo principal do trabalho é preencher parte da lacuna deixada ao longo do tempo no domínio da produção do combustível para reatores nucleares, que é a obtenção de lingotes de zircônio e suas ligas, para posterior processamento mecânico, utilizando a tecnologia VAR (em escala de laboratório) e ISM (de pequeno porte), gerando conhecimento para que a tecnologia seja escalada para produção. O objetivo será alcançado mediante a montagem e funcionamento do forno ISM (Induction Skull Melting).

#### Palavras-chave

- 1 - combustíveis nucleares metálicos
- 2 - ligas de zircônio
- 3 - fusão a vácuo
- 4 - encapsulamento
- 5 - varetas e peças para combustível PWR

#### Metas Físicas

- 1 - Seleção de firmas para montagem mecânica, hidráulica e elétrica do ISM
- 2 - Montagem do equipamento ISM e suas utilidades
- 3 - Partida do equipamento e testes de funcionamento
- 4 - Fusão de ligas de zircônio e de esponja de zircônio
- 5 - Fusão de ligas de titânio



## PLANO DE TRABALHO

### PROJETO PARA BOLSA PÓS-DOCTORADO – EDITAL 6

#### Justificativa Resumida:

No Brasil, no ciclo do combustível nuclear, uma das poucas etapas ainda a ser vencida, é a do uso do zircônio e de suas ligas. Apesar de inúmeros esforços desde a década de 1980, não foram logradas a consolidação da esponja de zircônio em lingotes; nem a produção de componentes e peças em ligas de zircônio nacionais. Houve vários projetos importantes que foram descontinuados e com conseqüente desmantelamento e desmobilização de laboratórios e equipes. Neste sentido, em meados da década de 1990 desenvolveu-se no IPEN, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, um projeto de construção de um protótipo de forno VAR (Vacuum Arc Remelting).

#### CRONOGRAMA FÍSICO

##### META FÍSICA 1 – Seleção de firmas para montagem e comissionamento do ISM

ATIVIDADES:	INDICADOR FÍSICO DE EXECUÇÃO	Duração Prevista	
		Início	Fim
Consulta ao fabricante Consarc/Inductotherm	Proposta de execução	1	3
Consulta a interessado 1 em executar serviço	Proposta de execução	1	3
Consulta a interessado 2 em executar serviço	Proposta de execução	1	3
Consulta a interessado 3 em executar serviço	Proposta de execução	1	3

##### META FÍSICA: 2 – Montagem do ISM e suas utilidades

ATIVIDADES:	INDICADOR FÍSICO DE EXECUÇÃO	Duração Prevista	
		Início	Fim
Contrato de execução	Contrato	4	4
Compra de materiais	Chegada dos materiais	5	7
Adequação do sistema circulação e resfriamento de água existente	Funcionamento	8	8
Execução da montagem	Forno ligado	9	10

##### META FÍSICA: 3 – Partida do ISM e testes de funcionamento

ATIVIDADES:	INDICADOR FÍSICO DE EXECUÇÃO	Duração Prevista	
		Início	Fim
Verificação de funcionamento da fonte, testes e ligação	Funcionamento do equipamento	11	12
Verificação de funcionamento da controladora, testes e ligação	Funcionamento do equipamento	11	11



## PLANO DE TRABALHO

### PROJETO PARA BOLSA PÓS-DOCTORADO – EDITAL 6

Verificação de funcionamento do forno com carga metálica	Funcionamento do equipamento	11	11
Relatório	Relatório	12	12

#### META FÍSICA: 4 - Meta Física 4 - Fusão de ligas de zircônio e de esponja de zircônio no ISM ou VAR

ATIVIDADES:	INDICADOR FÍSICO DE EXECUÇÃO	Duração Prevista	
		Início	Fim
Fusão dos metais e ligas	Material consolidado	13	15
Caracterização microestrutural	Análise microestrutural	16	18
Análise de propriedades físicas e mecânicas	Obtenção das propriedades	19	21
Relatório	Relatório	22	24

#### META FÍSICA: 5 - Fusão de ligas de titânio e outros metais no ISM ou VAR

ATIVIDADES:	INDICADOR FÍSICO DE EXECUÇÃO	Duração Prevista	
		Início	Fim
Fusão dos metais e ligas	Material consolidado	25	28
Caracterização microestrutural	Análise microestrutural	29	30
Análise de propriedades físicas e mecânicas	Obtenção das propriedades	31	33
Relatório	Relatório	34	36

#### Resultados Esperados

1 - Montagem e funcionamento do forno ISM
2 - Fusão de ligas de zircônio
3 - Fusão de ligas de titânio
4 - Caracterização de propriedades
5 - Publicação de resultados
6 -
7 -
8 -
9 -
10 -

#### Grau de Inovação (se houver):

Entre as vantagens do tratamento por indução, pode-se destacar a alta eficiência energética comparada com os métodos convencionais de aquecimento e a baixa oxidação do material a ser aquecido devido ao curto período de aquecimento. Como o ISM utiliza um cadinho de cobre refrigerado não há necessidade de revestimento refratário eliminando a possibilidade de contaminação de inclusões e obtendo-se um material de elevada pureza. Utilização de zircônio esponja na consolidação de ligas de zircônio, por exemplo, ligas da família Zircaloy.

**Bibliografia:**

- [1] MUCSI, C. S.; Estudo sobre o processo V.A.R. (Vacuum Arc Remelting) escala de laboratório. Dissertação de Mestrado, IPEN/USP (1996).
- [2] REIS, L. A. M.; Desenvolvimento de processo para a reciclagem de cavacos de ligas de zircônio fundidas em forno a arco elétrico sob vácuo VAR. Início: 2017. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) - Universidade de São Paulo, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
- [3] MUCSI, C. S.; DOS REIS, L.A.M. ; GOMES, M. P. ; PEREIRA, L.A.T. ; ROSSI, J. L. . Study on the Viability of the Recycling by Electric Arc Melting of Zirconium Alloys Scraps Aiming the Scalability of the Process. MATERIALS SCIENCE FORUM (ONLINE), v. 930, p. 495-500, 2018.
- [4] SOUZA, A. C. ; ROSSI, J.L. ; TSAKIROPOULOS, P. ; MARTINEZ, L.G. ; GRANDINI, C. R. ; CEONI, F.C. ; MUCSI, C.S. ; CORREA, H.P.S. . Preparation and Melting of Zr-1.0Nb Alloy. Materials Science Forum (Online), v. 869, p. 578-584, 2016.
- [5] MUCSI, C. S.; FARIA JR, R. N. ; GALEGO, E. ; ROSSI, J. L. . Consolidação of compacted zircaloy chips via vacuum arc melting - Analysis of the electric arc. Materials Science Forum, Switzerland, v. 1, p. 258-263, 2005.
- [6] Política Nacional de Defesa - Estratégia Nacional de Defesa. Publicação do MD - Ministério da Defesa, Brasília, 2012 (disponível em [https://www.defesa.gov.br/arquivos/estado\\_e\\_defesa/END-ND\\_Optimized.pdf](https://www.defesa.gov.br/arquivos/estado_e_defesa/END-ND_Optimized.pdf)).
- [7] KRISHNAN, R.; ASUNDI, M.K. Zirconium Alloys in nuclear technology. Proc. Indian Acad. Sci, v. 4, n. April, p. 41-56, 1981.
- [8] BOHE, A.E.; ANDRADE GAMBOA, J.J.; LOPASSO, E.M.; PASQUEVICH, D.M. Zirconium recovery from Zircaloy shavings. Journal Material Science, v. 31, p. 3469-3474, 1996.
- [9] SHELTON, S.M. Zirconium production methods. In: LUSTMAN, B. and; KERZE Jr.,F. (Ed.). The Metallurgy of Zirconium. McGraw-Hill Book Co., p. 59-134, 1955.
- [10] Standard specification for hot-rolled and cold-finished zirconium and zirconium alloy bars, rod, and wire for nuclear application. ASTM: B351-08. ASTM-American Society For Testing And Materials.
- [11] Standard specification for hot-rolled and cold-finished zirconium and zirconium alloy bars, rod, and wire for nuclear application. ASTM: B352-08. ASTM-American Society For Testing And Materials.
- [12] YILMAZBAYHAN, A.; MOTTA, A.T.; et al. Structure of zirconium alloy oxides formed in pure water studied with synchrotron radiation and optical microscopy: relation to corrosion rate. Journal of Nuclear Materials, v. 324, n. 1, p. 6-22, 2004.
- [13] DURIEZ, C.; DUPONT, T.; et al. Zircaloy-4 and M5® high temperature oxidation and nitriding in air. Journal of Nuclear Materials, v. 380, n. 1-3, p. 30-45, 2008.
- [14] RAGHEB, M., Nuclear Naval Propulsion, Nuclear Power - Deployment, Operation and Sustainability, Dr. Pavel Tsvetkov (Ed.), ISBN: 978-953-307-474-0, 2011.
- [15] FROST, B.R.T. Nuclear Fuels Elements - Design, Fabrication and Performance. 1st Ed., Pergamon Press Inc., Oxford, GB, 1-49, 1982.
- [16] MUKHERJEE, P. Microstructural studies on lattice imperfections in deformed zirconium-base alloys by X-ray diffraction. Metallurgical and Materials Transactions, v. 31A, p. 2405-2409, 2000.
- [17] STEINBRÜCK, M. Hydrogen absorption by zirconium alloys at high temperatures. Journal of Nuclear Materials, v. 334, n. 1, p. 58-64, 2004.
- [18] [http://www.alleghenytechnologies.com/WahChang/pages/outlook/pdf/2001/q2/2Q2001\\_outlook.pdf](http://www.alleghenytechnologies.com/WahChang/pages/outlook/pdf/2001/q2/2Q2001_outlook.pdf). Acessado em novembro de 2005.
- [19] <http://en.wikipedia.org/wiki/Zircaloy>. Acessado em novembro de 2005.
- [20] <http://legal.european-patent-office.org/dg3/pdf/t000318eu1.pdf>. Acessado em novembro de 2005.
- [21] PEREIRA, L.A.T. Desenvolvimento de processos de reciclagem de cavacos de zircaloy via fusão em forno elétrico a arco e metalurgia do pó. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN. Tese (Doutorado), 2014.

- [22] INB - Indústrias Nucleares do Brasil. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br>>. Acesso em: 15 jan 2014.
- [23] DAYTON, R.W.; ALLEN, C.M.; EBERTS, W.U. The reclamation of zirconium machining chips to produce arc-melting feed stock. United States Atomic Energy Commission, n. AECD-3499, 1952.
- [24] MIMURA, K.; LEE, S.-W.; et al. Removal of alloying elements from zirconium alloys by hydrogen plasma-arc melting. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 221, n. 1-2, p. 267-273, 1995.
- [25] COLLINS, E.D.; DELCUL, G.D.; et al. Process development studies for zirconium recovery/recycle from used nuclear fuel cladding. *Procedia Chemistry*, v. 7, p. 72-76, 2012.
- [26] Sumário Mineral 2015. DNPN/MME Departamento Nacional de Produção Mineral/Ministério de Minas e Energia, vol. 35, ISSN: 0101 2053, 2016 (disponível em <http://www.anm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015/view>).
- [27] PAPIER, J. Aços e Ligas para a indústria Naval e Nuclear. Seminário proferido no dia 7 de Agosto de 1992, COPESP I, SP.
- [28] MOSHTAGHI, M.; ABBASI, S.M. Effect of vacuum degree in VIM furnace on mechanical properties of Ni-Fe-Cr based alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, v. 22, n. 9, p. 2124-2130, 2012.
- [29] ŠČEPANSKIS, M.; JAKOVIČS, A.; et al. Solid inclusions in an electromagnetically induced recirculated turbulent flow: simulation and experiment. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 64, p. 19-27, 2014.
- [30] CAMPOS FILHO, M.P.; DAVIES, G.J. Solidificação e fundição de metais e ligas, Editora da Universidade de São Paulo, 1978.
- [31] ISORE, A.J.; IVO, P.S. Produção de aços especiais e superligas através de refino por ESR e VAR. Níquel, Junho, 1990.
- [32] SIMS, c.T.; HAGEL, W.C. The Superalloys. Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons, New York (1972).
- [33] ASM Source Book on stainless steels. American Society for Metals, USA, 1976.
- [34] ANABLE, W.E. Purification of Vanadium by Vacuum Melting. *J. Vac. Sci. Technol.*, vol7, no. 6, p. 574 (1976).
- [35] AMMON, R.L.; BUCKMAN Jr., R.W. Vacuum Arc Melting of Tungsten-Hafniun-Carbon Alloy. *J. Vac. Sci. Technol.*, vol.1, no. 1., Jan/Feb 1974, p. 385.
- [36] MEHRABIAN R; W ADLEY, H.N.G. Needs for control in Advanced Processing of Materials. *Journal of Metals*, February 1985, p.51.