

TÉCNICAS ESTATÍSTICAS DE CONTROLE DE PROCESSO PARA PLACAS COMBUSTÍVEIS TIPO MTR PARA ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS TIPO MTR

* Oliveira F. S. ; * Ferrufino F. B. J. ; * Santos G. R. T. ; * Lima R. M.

* Centro de Combustíveis Nucleares - CCN
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP
Av. Prof. Lineu Prestes 2.242
05508-000 Butantã, São Paulo, SP, Brasil
e-mail: fsolivei@net.ipen.br ; fbferr@net.ipen.br ; grsantos@net.ipen.br ; rmlima@net.ipen.br

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de implementar melhorias no processo de “Controle da Qualidade” da fabricação de placas combustíveis nucleares tipo MTR, utilizando-se técnica estatística de controle de processos (C.E.P.).

Para tanto este foi dividido em 4 (quatro) etapas distintas onde foram analisados dados de:

- fabricação de placas combustíveis de U_3O_8 -Al;
- fabricação de placas combustíveis de U_3Si_2 -Al;
- lotes de laminação de placas (C.E.P. para pequenos lotes);
- aplicação de ferramentas estatísticas e normas para o estudo comparativo dos processos supracitados.

Keywords: MTR type fuel plates, quality guarantee, statistic process control

I. INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é de implementar melhorias no controle de processo [1] da fabricação de elementos combustíveis tipo MTR, enfocando a análise dimensional das placas combustíveis, conforme “Plano de Inspeção” para placas combustíveis utilizando como material estrutural Al ASTM 1060 ou Al ASTM 6061.

O Centro de Combustíveis Nucleares - CCN do IPEN, tem sido responsável pela fabricação dos elementos combustíveis tipo MTR, utilizados na operação do Reator IEA-R1m do IPEN, que é um reator multipropósitos, com aplicações na medicina, biologia, indústria, entre outras.

A partir de 1985, intensificaram-se os esforços para a produção destes combustíveis no IPEN, culminando na concepção de projetos e especificações técnicas do produto e a montagem de uma linha de produção para suprir as necessidades do Reator IEA-R1.

Através de consecutivos experimentos foi desenvolvido e produzido o primeiro combustível padrão tipo MTR de U_3O_8 (parcial, com 2 placas combustíveis com revestimento de Al ASTM 1060 [2] e concentração de urânio por placa de $1,9 \text{ gU/cm}^3$ [3]) no IPEN.

Em 1988, a tecnologia de fabricação estava totalmente dominada e a linha de produção pronta para operação.

Para garantir a qualidade do produto foi desenvolvido um “plano de inspeção”, em consonância com os pontos de inspeção analisados por fabricantes qualificados do mercado internacional de combustíveis à base de U_3O_8 -Al, os quais utilizavam como material

estrutural para o revestimento dos núcleos das placas combustíveis o Al ASTM 1060, com dureza da matéria-prima em torno de 20 HB.

No ano de 1990, comprovou-se a capacidade de produção da linha em condições excepcionais, que além de suprir totalmente as necessidades do Reator IEA-R1, desenvolveu a tecnologia de fabricação do elemento combustível de controle, que permitiu a substituição com sucesso dos elementos importados.

Em seguida iniciaram-se trabalhos visando o desenvolvimento de elementos combustíveis com alta concentração de urânio, por meio do aumento da concentração do U_3O_8 por placa combustível ($2,3 \text{ gU/cm}^3$) [4] e da substituição do U_3O_8 por U_3Si_2 .

As tecnologias de fabricação foram comprovadas pela qualificação, por meio de irradiação no Reator IEA-R1 até a queima de $36,8 \pm 5,1$ (%) [5], do primeiro elemento combustível produzido no IPEN.

Até meados da década de 90 o alumínio estrutural empregado na fabricação das placas combustíveis, que são confeccionadas através da conformação mecânica (laminação) de conjuntos (revestimento; moldura-briquete; revestimento) era o Al ASTM 1060, mas o desenvolvimento de combustíveis de maiores concentrações de compostos de urânio por placa trouxe a necessidade de se substituir este alumínio estrutural por outro (alumínio-liga Al ASTM 6061) [2], com diferentes propriedades mecânicas e principalmente dureza mais elevada, em torno de 30 HB.

Atualmente o Al ASTM 6061 é também empregado na fabricação de placas de U_3O_8 -Al, por apresentar

características e desempenho superiores ao Al ASTM 1060, e entre outras, por apresentar uma diminuição nas ondulações da superfície da placa combustível.

II. AMOSTRAGEM

Tendo em vista os fatores expostos, este estudo é aplicado à verificação da influência dos dois tipos de Al na análise da espessura das placas combustíveis, utilizando-se técnica estatística de controle de processos, no sentido de aumentar o grau de confiabilidade no controle de dados e variáveis do processo de fabricação (laminação) e de se diminuir a frequência de inspeções aplicadas a estas.

Definiu-se como amostragem dados de fabricação de 100 placas combustíveis de :

- núcleo de U_3O_8 -Al e revestimento de Al ASTM 1060
- núcleo de U_3Si_2 -Al e revestimento de Al ASTM 1060 (amostragem disponível de 20 placas)
- núcleo de U_3O_8 -Al e revestimento de Al ASTM 6061
- núcleo de U_3Si_2 -Al e revestimento de Al ASTM 6061

III. CONTROLE DIMENSIONAL DE PLACAS COMBUSTÍVEIS TIPO MTR

As placas foram inspecionadas no laboratório de metrologia da linha de produção de elementos combustíveis e em condições normatizadas para a execução de tais atividades.

A especificação dimensional para a espessura das placas é de $1,52^{+0,10}_{-0,05}$ mm [3-4] e o “plano de inspeção” utilizado para a análise da espessura das placas determina que sejam medidos 21 pontos de espessura em 7 seções transversais, conforme o desenho esquemático a seguir.

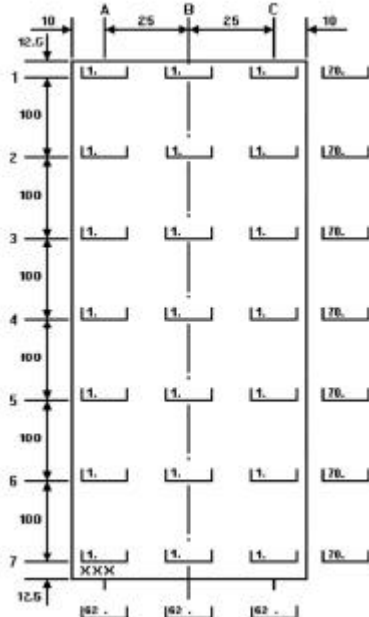


Figura 1. Plano de Inspeção de Placas tipo MTR.

IV. TÉCNICA ESTATÍSTICA

A variabilidade de processo das amostragens dos produtos definidos no item II é verificada através de testes de hipóteses e gráficos de controle.

O processo sob controle supõe, portanto, que o característico de qualidade do conjunto dos itens analisados possua distribuição normal [6]. Além disso supõe também que essa distribuição permaneça estável, isto é, que seus dois parâmetros, a média e o desvio padrão permaneçam constantes, através da verificação periódica pela extração de uma seqüência de amostras.

Os itens de uma distribuição normal (de média μ e desvio padrão σ) se distribuem em torno da média nas seguintes proporções aproximadas:

- 68% dos valores no intervalo $\mu \pm \sigma$ (1)
- 95% dos valores no intervalo $\mu \pm 2\sigma$ (2)
- 99,7% dos valores no intervalo $\mu \pm 3\sigma$ (3)

Conseqüentemente, diferenças entre um valor observado x e a média μ , maiores do que $\pm 3\sigma$ são esperadas, apenas, três vezes em cada mil observações. Por isso, a faixa de variabilidade normal de um processo sob controle é a do intervalo $\mu - 3\sigma$ e $\mu + 3\sigma$.

A aplicação do intervalo acima determina o limite inferior (LIC) e superior (LSC) de controle do processo, que estão distribuídos em torno da média (μ) do processo, constituindo a linha média (LM), elementos estes utilizados para a construção de gráficos de controle [4] conforme mostra a figura 2.

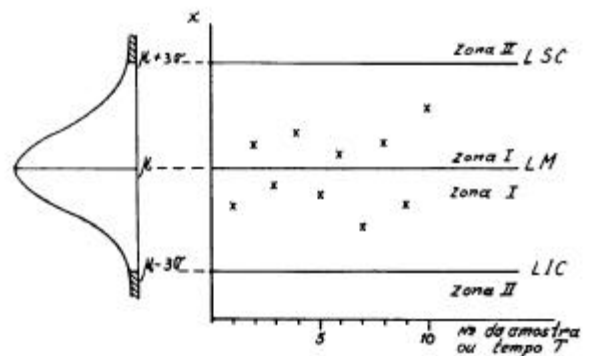


Figura 2. Gráfico de Controle [5].

V. ANÁLISE DE DADOS

Os dados das amostragens retiradas foram tabulados, para facilitar a análise estatística, que abrange 320 placas combustíveis, em quatro tabelas distintas (três com 100 e uma com 20 placas combustíveis), correspondentes aos quatro diferentes tipos de produtos, supracitados no item II, onde estão registrados os valores medidos em milímetros da

espessura das placas combustíveis, nas 7 seções determinadas no plano de inspeção, assim como os valores mínimo e máximo de espessura, mediana e desvio padrão, por placa, conforme descreve a Tabela 1, que para efeito de exemplificação contém apenas uma parte, com 10 placas, da tabela para placas de U₃O₈-Al ASTM 6061, de um total de amostragem de 100 placas combustíveis, retiradas de uma

população de 1114 placas combustíveis fabricadas pelo CCN.

A análise estatística das quatro diferentes amostragens estudadas, correspondente aos quatro tipos de placas combustíveis fabricadas é apresentada na Tabela 2, a qual discrimina como “Tópicos” os parâmetros estatísticos calculados e analisados.

TABELA 1. Análise Dimensional da Espessura das Placas Combustíveis de U₃O₈ Fabricadas com Al ASTM 6061

Placa ^a n ^o	Medidas da Espessura das Placas ^b							Mínimo ^c	Máximo ^c	Mediana ^c	Sigma ^c	3 Sigma ^c	
	Inspeção/Placa: 07 seções e 21 pontos												
1	894	1,47	1,49	1,50	1,51	1,48	1,51	1,51	1,47	1,51	1,50	0,0102	0,0307
		1,51	1,51	1,50	1,50	1,50	1,51	1,50					
		1,50	1,51	1,50	1,50	1,50	1,49	1,50					
2	895	1,50	1,48	1,50	1,50	1,51	1,50	1,49	1,48	1,51	1,50	0,0108	0,0323
		1,49	1,51	1,50	1,48	1,50	1,50	1,49					
		1,48	1,51	1,51	1,48	1,51	1,49	1,51					
3	896	1,48	1,51	1,51	1,51	1,49	1,49	1,49	1,48	1,51	1,50	0,0106	0,0319
		1,51	1,49	1,51	1,51	1,49	1,51	1,48					
		1,51	1,49	1,49	1,50	1,50	1,49	1,49					
4	897	1,50	1,51	1,50	1,50	1,50	1,50	1,49	1,48	1,51	1,50	0,0081	0,0243
		1,51	1,50	1,51	1,51	1,51	1,50	1,50					
		1,49	1,50	1,51	1,49	1,51	1,50	1,48					
5	898	1,48	1,47	1,48	1,51	1,52	1,51	1,51	1,47	1,52	1,50	0,0125	0,0374
		1,51	1,51	1,50	1,51	1,51	1,50	1,49					
		1,49	1,51	1,50	1,51	1,50	1,51	1,50					
6	899	1,49	1,51	1,50	1,50	1,51	1,50	1,50	1,48	1,52	1,50	0,0095	0,0286
		1,50	1,50	1,51	1,51	1,52	1,51	1,52					
		1,51	1,51	1,51	1,49	1,50	1,51	1,48					
7	900	1,49	1,49	1,49	1,50	1,51	1,51	1,51	1,49	1,51	1,50	0,0086	0,0258
		1,51	1,51	1,49	1,50	1,51	1,51	1,50					
		1,49	1,51	1,51	1,51	1,49	1,50	1,50					
8	901	1,49	1,49	1,48	1,49	1,51	1,49	1,49	1,47	1,51	1,50	0,0110	0,0329
		1,50	1,50	1,50	1,48	1,50	1,50	1,50					
		1,50	1,51	1,51	1,51	1,50	1,48	1,47					
9	902	1,49	1,48	1,49	1,51	1,50	1,49	1,47	1,47	1,51	1,49	0,0112	0,0337
		1,48	1,50	1,50	1,51	1,50	1,49	1,48					
		1,48	1,49	1,49	1,50	1,48	1,49	1,47					
10	903	1,48	1,49	1,49	1,50	1,48	1,49	1,48	1,47	1,51	1,49	0,0097	0,0291
		1,49	1,49	1,48	1,50	1,51	1,49	1,51					
		1,48	1,49	1,49	1,49	1,48	1,49	1,47					

a. Identificação seqüencial da placa combustível.

b. Medidas da espessura das placas.

c. Valores retirados e valores calculados.

TABELA 2. Quadro de Análise Estatística da Análise Dimensional da Espessura das Placas Combustíveis tipo MTR

Tópicos ^d	Placas Combustíveis ^e			
	U ₃ Si ₂ -Al 1060 ^f	U ₃ Si ₂ -Al 6061 ^f	U ₃ O ₈ -Al 1060 ^f	U ₃ O ₈ -Al 6061 ^f
Espessura Mínima Encontrada (mm)	1,470	1,470	1,520	1,454
Espessura Máxima Encontrada (mm)	1,610	1,620	1,620	1,600
Amplitude da Amostragem (mm)	0,140	0,150	0,100	0,146
Espessura Média da Amplitude (mm)	1,540	1,545	1,570	1,527
Média da Amostragem (mm)	1,5645	1,5354	1,5916	1,5255
Desvio Padrão (Sigma T)	0,02780	0,02021	0,01776	0,02383
Grau de Confiabilidade (3 Sigma T)	0,0834	0,0606	0,0533	0,0715
Limite Inferior de Controle (LIC) (mm)	1,4811	1,4748	1,5383	1,4540
Limite Superior de Controle (LSC) (mm)	1,6479	1,5960	1,6449	1,5970
Desvio dos Desvios Padrões / Placas	0,00299	0,00389	0,00387	0,00291
Total de Amostragem (placas)	20	100	100	100

d. Parâmetros estatísticos analisados.

e. Tipos de Placas Combustíveis MTR.

f. Valores retirados / calculados conforme os tipos de placas combustíveis.

VI. RESULTADOS E COMENTÁRIOS

Através dos resultados obtidos pode-se concluir que a incidência de inspeções na análise dimensional da espessura das placas combustíveis de U₃O₈ fabricadas com Al ASTM 6061 pode ser reavaliada, em comparação com as fabricadas com Al ASTM 1060, pois os resultados obtidos fornecem indicadores de uma tendência de menor variabilidade (desvios) no processo - Al ASTM 6061 (0,00291) e Al ASTM 1060 (0,00387) - o que pode vir a viabilizar a implementação de uma melhoria no “plano de inspeção” da fabricação de placas combustíveis com Al ASTM 6061, através da redução de pontos e frequência de inspeção e conseqüentes reduções de tempo e custos.

Cabe ressaltar que os dados das amostragens referentes às análises dimensionais da espessura das placas de U₃Si₂-Al não apresentam resultados conclusivos - Al ASTM 6061 (0,00389) e Al ASTM 1060 (0,00299) - devido a fatores determinantes, com influência direta na análise efetuada, tais como: para o Al 1060 a amostragem não se caracteriza como representativa (20 placas) e para o Al 6061 os dados analisados apresentam interferências devido a diversos ajustes de processo, pois pertencem à fase inicial do processo produtivo.

Este estudo também sugere que o método (modelo) estatístico utilizado tem eficácia comprovada na verificação de variabilidade nos diferentes processos de fabricação de placas combustíveis em questão.

REFERÊNCIAS

[1] ASTM E 177 - 71, Standard Recommended Practice for “Use of the Precision and Accuracy as Applied to Measurement of a Property of a Material” - American Soc. Testing Mats, 1980.

[2] ASTM B 221M - 79, Standard Specification for “Aluminium-Aloy Extruded Bar, Rod, Wire, Shape, and Tube (metric)” - American Soc. Testing Mats, 1979.

[3] PSI.REN.IEAR1.002-ESPT.004.R01, **Especificação da Placa Combustível do E.C. e E.C.C. do Reator IEA-R1**, IPEN/CNEN-SP, 1998.

[4] PSI.REN.IEAR1.002-ESPT.004.R01, **Especificação da Placa Combustível Externa do E.C. Especial para o Reator IEA-R1, de U₃O₈-Al com 2,3 gU/cm³ e menor enriquecimento**, IPEN/CNEN-SP, 2001.

[5] L.A.A. Terremoto, C.A. Zeituni, J.A. Perrota, J.E.R. da Silva., **Gamma-ray Spectroscopy on Irradiated MTR Fuel Elements**, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Elsevier Science B.V., dezembro de 1999.

[6] Lourenço Filho, Ruy de C. B., **Controle Estatístico de Qualidade**, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., maio de 1970.

ABSTRACT

This work aims at introducing some improvements on the fabrication of MTR Type Fuel Plates, applying Statistic Techniques of Process Control.

The work was divided into four single steps and their data were analyzed for:

- Fabrication of U₃O₈ Fuel Plates;
- Fabrication of U₃Si₂ Fuel Plates;
- Rolling of small lots of Fuel Plates;
- Applying Statistic Tools and Standard Specifications to perform a comparative study of these processes.