

Planejamento de experimentos e simulação de processos aplicados à indústria nuclear

Design of experiments and process simulation applied nuclear industry

¹ Igor Borjaille Eller

¹ Mayara Nascimento Arbach

¹ Matheus Carrara Pereira

¹ Patrícia Senatore Ribeiro

² Byanca Porto de Lima

² Flávia de Paula Vitoretti

² Sérgio Ricardo Bastos de Mello sergio.mello@foa.org.br

¹ Graduado em Engenharia de Produção pelo Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA.

² Docentes do Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA.

Resumo

De uma forma geral, um produto com qualidade é aquele que está dentro das especificações de projeto e das especificações requeridas pelo cliente. Essa qualidade deve ser obtida durante o processo de produção do produto. O controle estatístico do processo é uma das ferramentas que permite avaliar a estabilidade do processo por meio das cartas de controle. Depois de feitas essas análises, um bom caminho a ser seguido é o planejamento de experimentos com a finalidade de identificar os parâmetros com maior influência no processo. Neste trabalho, os testes de hipóteses foram realizados com utilização do software Minitab, aplicados ao processo de produção de pastilhas de urânio, nas Indústrias Nucleares do Brasil (INB), onde o principal parâmetro analisado foi a densidade das pastilhas. Ficou constatada a instabilidade estatística do processo de prensagem das pastilhas e o seu erro sistemático com tendência da média para o limite superior da especificação do produto. A simulação de processos foi uma decisão, neste trabalho, ao se verificar a impossibilidade de aplicação de um planejamento de experimentos com dois tratamentos e dois níveis. Foi feita a simulação da prensagem do pó para a produção de pastilhas para identificar como os parâmetros de compressão atuam no resultado do produto final, bem como, com a simulação, foi possível definir os melhores parâmetros para esse processo.

Palavras-chave

Planejamento de experimentos; cartas de controle; teste de hipótese; intervalo de confiança; simulação.

ABSTRACT

In general, a product with quality is the one inside of the specifications of the project and required by the customer. This quality must be obtained during the product production process and the statistical process control is one of the tools for evaluate the stability of the process by the control charts. After making some analyzes a good step to take is to plan the experiments with the purpose to identify the parameters with the greatest influence to the process. In this work hypothesis tests were performed using Minitab software, applied to the production process of uranium pellets in the Nuclear Industries of Brazil (INB), and the main parameter analyzed was the density of the pellets. It was observed instability of the statistical process of pressing pellets and their systematic error with average trend towards of the product specification limits. The simulation of process was a decision in this work after verify impossibility of application a plan of experiments with two treatments and two levels. Pressing simulation with powder of pellets production was made to identify how the compression parameters act in the final product result. With the simulation was possible to define the best parameters for the process.

Keywords

Design of experiments; control charts; hypothesis test; confidence interval; simulation.

Como você deve citar?

MELLO, S.R.B.. Planejamento de experimentos e simulação de processos aplicados à indústria nuclear. **Cadernos UniFOA Especial Eng. Produção**, Volta Redonda, n. 2, p. 77-87, ago. 2015.

1 INTRODUÇÃO

A qualidade é um fator fundamental para o sucesso das indústrias e tem impacto direto nos custos e produtividade dos processos. Para assegurar a qualidade é necessário saber quais variáveis do processo interferem direta ou indiretamente na qualidade do produto final. Identificadas essas variáveis, técnicas estatísticas são aplicadas para determinar a dependência entre elas e, também, com o produto final.

Neste trabalho foi proposta a realização de um estudo baseado na técnica de planejamento de experimentos e simulação, na indústria nuclear INB (Indústrias Nucleares do Brasil).

A empresa em estudo fabrica elementos combustíveis que são os responsáveis pela geração de energia elétrica nas usinas nucleares. Esses elementos são compostos por pastilhas de dióxido de urânio montadas em varetas de uma liga metálica.

O ciclo do combustível nuclear é o conjunto de etapas do processo industrial que transforma o mineral urânio até sua utilização como combustível dentro de uma usina nuclear. O que diferencia o urânio de outros minerais é a sua propriedade física de emitir partículas radioativas, a radioatividade, que é aproveitada para produzir calor e gerar energia (INB, 2014).

O ciclo pode ser representado pelo fluxograma da figura 1.

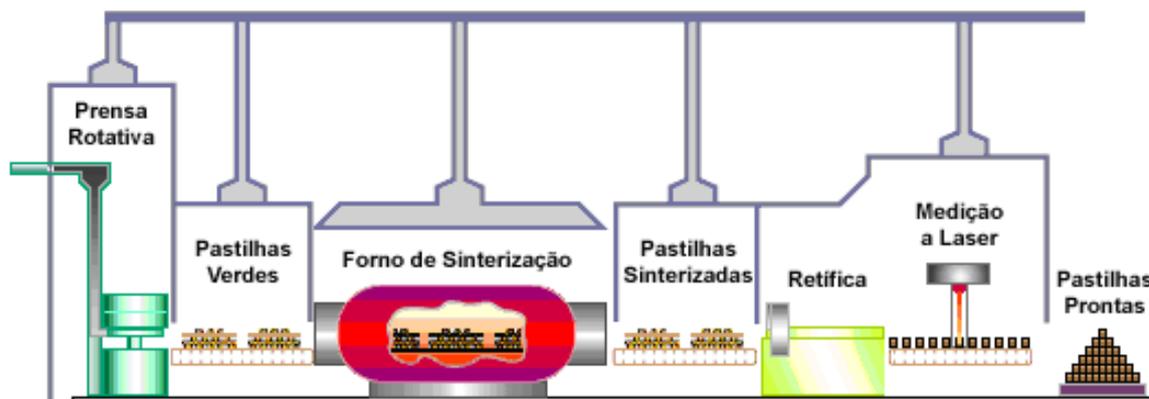
Figura 1 - Ciclo de combustível nuclear.



Fonte: INB (2014)

O processo de produção de pastilhas UO_2 está descrito na figura 2.

Figura 2 - Ciclo da produção de pastilhas



Fonte: INB (2014)

Após o processo de mistura (homogeneização) com U_3O_8 , o pó de UO_2 é transportado para uma prensa rotativa automática, onde são produzidas pastilhas. Essa fase do processo é chamada de "pastilhas verdes", objeto deste trabalho.

O principal problema abordado por este trabalho é o elevado número de pastilhas de UO_2 que são rejeitadas devido a não conformidade com as especificações da densidade da pastilha verde. Essa densidade verde deve ser ajustada de acordo com os padrões, para garantir que as pastilhas, depois de sinterizadas, também estejam dentro do especificado, evitando defeitos e a rejeição das mesmas. Essa densidade verde é ajustada durante a prensagem do pó, transformando-o em pastilha. Por esse motivo, os parâmetros da prensa rotativa foram analisados, a fim de se descobrir quais deles provocam alterações na densidade.

A meta da produção é fabricar elementos combustíveis com máxima eficiência e durabilidade no reator. Portanto, o principal objetivo é analisar os parâmetros de ajuste da prensa rotativa, a fim de atuar nas faixas de variação dos parâmetros que forem definidos como causadores da não conformidade da densidade das pastilhas verdes, o que implica na rejeição da pastilha final. Dessa forma, a meta é controlar essa variação da densidade, mantendo-a dentro da especificação de $5,70 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$.

2 DESENVOLVIMENTO

A definição do método de pesquisa utilizado neste trabalho foi baseada na conceituação de Andrade (2010). O autor registra que pesquisa é um conjunto de procedimentos sistemáticos baseados no raciocínio lógico, que, por meio de métodos científicos, tem o objetivo de encontrar soluções para problemas propostos.

O autor relata, ainda, que, além de registrar, analisar e interpretar os fenômenos estudados, a pesquisa explicativa procura identificar seus fatores determinantes. A maior parte das pesquisas explicativas faz uso do método experimental, sendo caracterizada pela manipulação e controle das variáveis.

Portanto, com o objetivo de verificar os parâmetros que podem estar influenciando na grande quantidade de pastilhas de dióxido de urânio (UO_2) rejeitadas, devido a não conformidade com as especificações de densidades requeridas, foram realizadas as atividades descritas nas subseções a seguir.

2.1 Características Analisadas

Ficou constatado que o fator que tem maior influência no problema abordado é a densidade da pastilha verde. De acordo com a empresa, a densidade alvo é de $5,70 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$. Se a pastilha estiver fora dessa faixa de especificação, é rejeitada, a partir de um dispositivo que a separa através de um jato de ar.

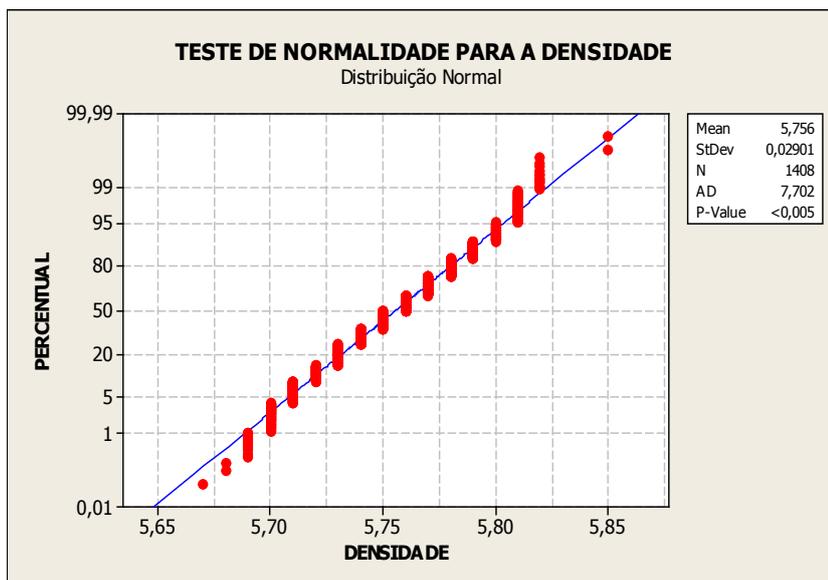
2.2 Coleta de dados

Foram coletadas 88 amostras de pastilhas de UO_2 com tamanho 16, no período de 13 de fevereiro a 12 de maio de 2014, na prensa rotativa.

2.3 Análise de Normalidade

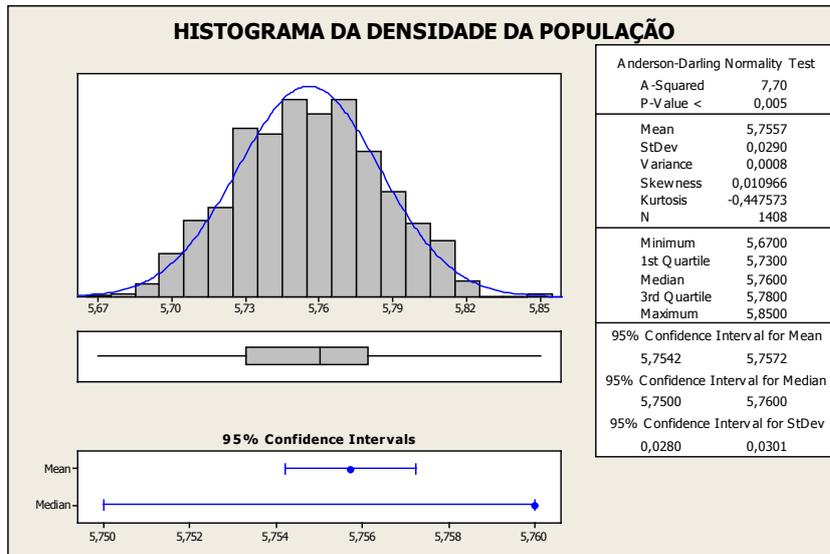
Inicialmente, foi realizado um estudo para verificar se a população das densidades é normalmente distribuída a partir do teste de normalidade Anderson-Darling, elaborado no Minitab. Segundo Walpole *et. al.* (2009), esse teste gera um gráfico de quantil-quantil, que plota os dados da amostra sobre uma reta que indica a normalidade, representado no gráfico 1. Em seguida foi elaborado um histograma para dados individuais representado no gráfico 2. Segundo Montgomery (2012), o histograma permite identificar tendências na distribuição dos dados.

Gráfico 1 - Gráfico para o Teste de Normalidade



Analisando o gráfico 1, é possível concluir que o processo não segue uma distribuição normal. Isso é evidenciado pelo valor P ou *P-value* que é menor que 0,005, valor bastante inferior ao nível de significância $\alpha = 0,05$ utilizado para o teste.

Gráfico 2 - Histograma para Valores Individuais excluídos os outliers



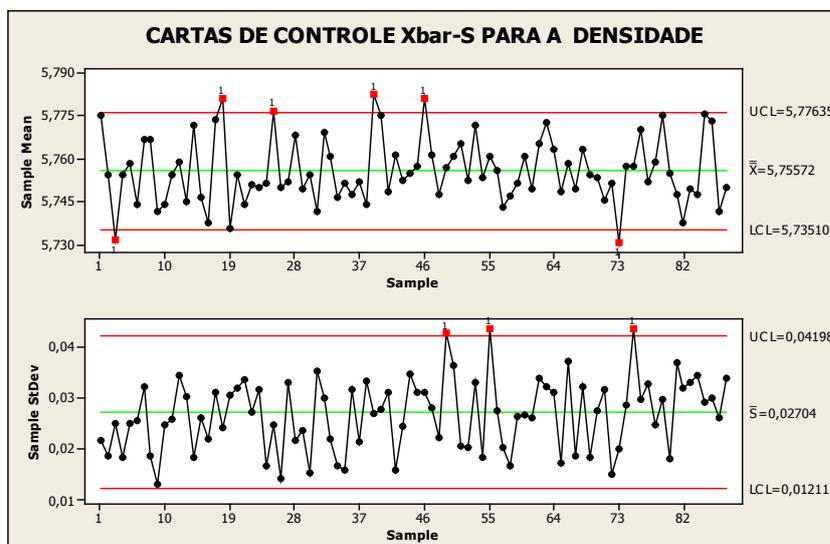
O histograma apresentado no gráfico 2 não evidencia tendências capazes de inviabilizar a hipótese de normalidade da população, como também indica que a média do processo está deslocada para o limite superior de engenharia.

2.4 Carta de Controle Xbar-S

Segundo Slack *et. al.* (2009), o controle estatístico permite verificar e monitorar a estabilidade dos processos por meio de cartas de controle. Foram elaboradas cartas de controle para média e desvio padrão da densidade das pastilhas verdes a partir das amostras coletadas, conforme representado no gráfico 3.

Observa-se, no gráfico 3, que há pontos fora dos limites de controle, indicando claramente que o processo não é estável.

Gráfico 3 - Cartas de Controle Xbar-S.



2.5 Intervalo de Confiança

Segundo Ryan *et al.* (2009), intervalo de confiança é um termo estatístico empregado para designar a representatividade da amostra. Quanto maior a amostra, menores e mais confiáveis serão os intervalos de confiança.

A partir dos dados da amostra obtida, realizou-se, primeiramente, o teste de intervalo de confiança para a média (μ) com a variância (σ^2) desconhecida, com a finalidade de verificar se a especificação da densidade do processo é confirmada pelos parâmetros amostrais. Esse cálculo foi realizado por meio do software Minitab. Com um nível de significância $\alpha = 0,05$, sabendo que a média amostral \bar{X} obtida com a amostra é igual a $5,7557 \text{ g/cm}^3$ e a variância amostral S é igual a $0,0115$, para uma amostra de tamanho n igual a 16 , foram obtidos os intervalos de confiança IC (média) = $[5,7531; 5,7580]$ e IC (variância) = $[0,0100; 0,0135]$.

Como a média e variância da especificação não se encontram nos intervalos de confiança, rejeitando-se a hipótese de que a média e a variância da população confirmam a especificação do processo.

2.6 Teste de Hipóteses

Segundo Walpole *et al.* (2009), o teste de hipóteses é um procedimento, com base em dados experimentais, para a tomada de decisão sobre algum sistema científico, ou seja, feita determinada afirmação sobre uma população, verificar se os resultados de uma amostra contrariam ou não tal afirmação.

Os testes de hipóteses utilizados para este estudo foram, também, realizados pelo software Minitab. Inicialmente foi calculado o teste de hipótese para médias com variância desconhecida, utilizando-se as hipóteses $H_0: \mu = 5,70$ e $H_1: \mu \neq 5,70$, com um nível de significância $\alpha = 0,05$. Com isso o programa gerou os seguintes resultados: o valor da estatística $t = 19,34$, valor $P = 0,00$. Analisando esses resultados, a decisão é rejeitar H_0 , ou seja, não há evidências estatísticas suficientes que comprovem que a média do processo é, aproximadamente, igual a $5,70$. Essa decisão foi tomada já que o valor P é menor que o nível de significância α ($0,00 < 0,05$).

Em seguida foi realizado o teste de hipótese para desvio padrão, utilizando-se as hipóteses $H_0: \sigma = 0,0167$ e $H_1: \sigma \neq 0,0167$, com nível de significância $\alpha = 0,05$. Com esses dados, o programa gerou os seguintes resultados: $t = 42,20$, valor $P = 0,00$. Com análise desses resultados, a decisão também é rejeitar H_0 , ou seja, não se pode provar estatisticamente que o desvio padrão é, aproximadamente, igual a $0,0167$, pois não há evidências suficientes. Essa decisão também foi tomada, visto que o valor P é menor que o nível de significância α ($0,00 < 0,05$).

2.7 Simulação

Em função das análises estatísticas realizadas nas seções anteriores, optou-se por realizar uma simulação da prensagem, a fim de se encontrar os parâmetros causadores da não conformidade com a especificação da densidade e possíveis melhorias no processo.

De acordo com Oliveira (2008), a simulação de processos contribui para a análise e compreensão de sistemas complexos. Pode ser utilizada como uma abordagem eficaz para testar novas opções e cenários de negócios sem incorrer os riscos sem que sejam experimentados na prática.

Essa simulação foi desenvolvida para avaliar a densificação do pó de urânio através da prensagem mecânica, no programa de simulação de processos Abaqus. Na empresa em estudo, a INB, o pó

prensado para a obtenção das pastilhas é uma mistura de $UO_2 + U_3O_8 + ADS$, no entanto os parâmetros utilizados nessa simulação não são controlados pela indústria e por se tratar de uma mistura singular, ainda não existem estudos que forneçam os dados necessários para sua realização. Dessa forma, foram usados os parâmetros de prensagem do pó de UO_2 puro, com a finalidade de definir quais os parâmetros afetam na obtenção da densidade requerida.

Para o modelamento, foram utilizados a fração de vazios e o campo de tensão do material completamente denso. As constantes do modelo original de Gurson q_1, q_2 e q_3 foram consideradas iguais a 1,0.

As propriedades elásticas do urânio usadas na simulação estão listadas abaixo:

- Módulo de Elasticidade, E : 200 GPa
- Coeficiente de Poisson, ν : 0,345

Os parâmetros de nucleação de vazios estão mostrados abaixo:

- Valor médio de distribuição normal da nucleação de compressão, ε_N : 0,3;
- O desvio padrão da distribuição normal nucleação deformação, s_N : 0,1;
- Fração de volume de vazios de nucleação, f_N : 0,04.

Na INB, indústria em estudo, a geometria da pastilha não é de um cilindro perfeito, possuindo, nas extremidades, uma curvatura côncava, como pode ser observado na figura 3. No entanto, a geometria e suas dimensões são sigilosas, não podendo ser utilizadas neste estudo, portanto, essa simulação foi realizada considerando-se um cilindro completamente preenchido com altura inicial (o pó antes de compactado) de 3.05 cm e diâmetro de 1.135 cm.

Figura 3 - Pastilhas de Urânio

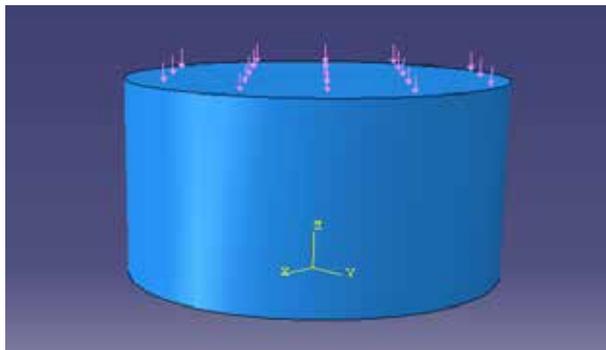


Fonte: REVISTA GALILEU (2014)

Foi analisada a compressão simétrica da pastilha, conforme figura 4.

Para a discretização, utilizam-se elementos finitos do tipo CAX6. Nas condições de contorno, a pastilha não se deforma na direção x e y . Para a compressão, é aplicada uma pressão constante na face superior da pastilha.

Figura 4 - Compressão da pastilha.



O teste de compressão é simulado para diferentes condições de contorno. As figuras a seguir mostram os resultados da compressão de todos os elementos, a partir da pastilha não deformada, figura 5, para a forma após a deformação, figura 6, com altura final de 1,22 cm.

A máxima deformação é 60%. Para essa simulação, foram considerados os parâmetros do modelo de Gurson, onde $q_1=q_2=q_3=1.0$ com densidade e a fração de vazios iniciais iguais a 2.27968 g/cm^3 e 0.792 , respectivamente.

Figura 5 - Pó antes da Compactação.

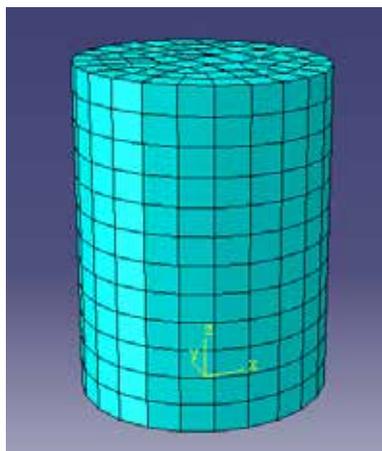
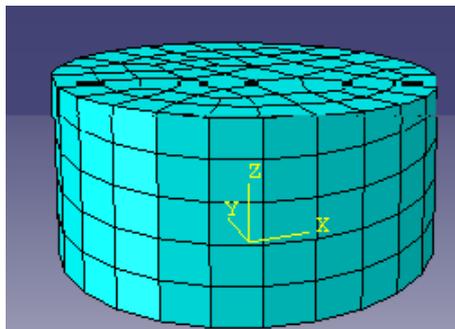


Figura 6 - Pastilha Compactada.



O desenvolvimento do modelo permitiu avaliar a fração de vazios e a densidade da pastilha, em relação à pressão de compressão. Observou-se que quanto maior a força menor a porosidade e maior a densidade da pastilha.

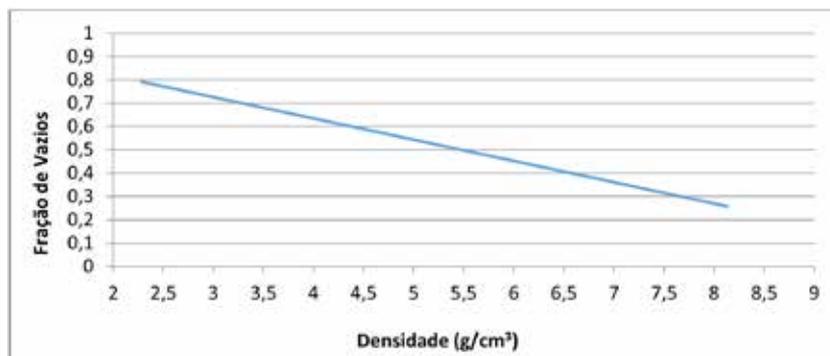
3 RESULTADOS

O teste de normalidade indicou que o processo de produção de pastilhas de UO_2 não segue uma distribuição normal. A análise da carta de controle constatou que o processo não é estável, e os intervalos de confiança e os testes de hipóteses indicaram que a especificação da média em 5,70 e do desvio padrão de 0,0167 não forneceu evidências estatísticas suficientes para sustentar que são os valores do processo atual.

Com isso, estatisticamente, não é possível indicar um planejamento de experimentos para buscar melhorias do processo antes de uma revisão do mesmo. Por isso, optou-se por realizar uma simulação da prensagem, a fim de se encontrar os parâmetros causadores da não conformidade com a especificação da densidade e possíveis melhorias no processo.

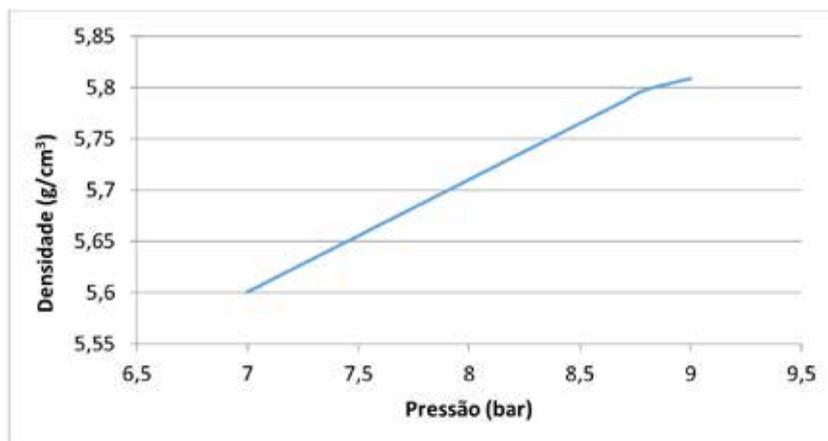
Com o processo de simulação, foram elaborados os gráficos abaixo que mostram uma relação linear entre as variáveis analisadas. Isso significa que há uma influência direta entre elas. Nesse caso, prévios estudos consideram pastilhas com densidade aproximada de 5.70 g/cm^3 , a densidade ideal para o subsequente processo de sinterização da pastilha. Portanto, com uma pressão muito alta, a porosidade diminui, ocorrendo uma elevação na densidade da pastilha, conforme o observado no gráfico 4, podendo levar essa densidade a aproximar-se da densidade teórica de $10,96 \text{ g/cm}^3$, o que, no caso, não é viável.

Gráfico 4 - Relação entre a Fração de Vazios e a Densidade



É observado no gráfico da densidade da pastilha em relação à pressão de compressão que, de acordo com a densidade desejada, a pressão de compressão deve estar entre 7 e 9 bar. Porém, a velocidade de compressão deve ser considerada, pois influenciará no coeficiente angular da reta. Quanto mais inclinada a reta abaixo, maior será a velocidade, ou seja, aumentando-se a velocidade de compressão, consequentemente, a pressão diminui, conforme mostrado no gráfico 5.

Gráfico 5 - Relação entre a densidade e a pressão de compactação



4 PROPOSTAS DE MELHORIAS

A prensa rotativa é o instrumento chave no processo de compactação do pó. É nessa etapa que se ajusta a densidade verde de tal maneira que seu produto, depois da sinterização (que é um processo de mais densificação), atinge o alvo da especificação. O equipamento usado hoje na produção é da marca GEA Courtoy (Belga), modelo R53 e número de série 96R5306.

Um ponto importante nesse processo, para que se consiga chegar à densidade desejada, é o enchimento das matrizes, portanto é muito importante que a sapata (sistema de estocagem e distribuição de pó na mesa rotativa da torre) funcione adequadamente, especialmente a medição de enchimento, que é capacitivo no momento.

Uma possível melhoria é mudar o sistema capacitivo, que, muitas vezes, tem problemas técnicos, como defeitos no cabo de transmissão, por motivo de manuseio, limpeza da máquina etc., por um sistema de medição por ultrassom, que é menos sensível contra essas influências.

Outra forma de melhoria seria a instalação de um novo sistema de compensação (*Hold down / Hold up*). Atualmente a prensa da INB usa um *hold down piston* e molas de compensação dentro dos porta-punções. O ideal seria utilizar 6 *hold down pistons* sem molas nos porta-punções, pois as molas podem provocar a quebra das pastilhas, e, com isso, obter uma melhor regulagem da compensação durante a extração da pastilha da matriz.

O compensador de ar, Courtoy, tem como objetivo certificar-se de que a mesma força é aplicada a cada pastilha, de modo que a densidade da mesma seja constante. O movimento do compensador é utilizado como uma medida para o controle do peso, atuando em uma extensão de tempo para melhorar o pó da purga, reduzindo assim, os problemas de nivelamento em velocidades mais altas e melhorando a homogeneidade.

5 CONCLUSÃO

Com a finalidade de encontrar os parâmetros de maior influência no processo de produção de pastilhas de UO_2 e identificar as causas da não conformidade com a especificação das densidades

dessas pastilhas, foram realizados vários testes estatísticos. A partir da análise desses testes, constatou-se que o processo não segue uma distribuição normal, a carta de controle mostra que o processo não é estável. O teste de hipótese e o intervalo de confiança evidenciaram que a média e o desvio padrão não seguem o padrão de especificação, ou seja, não estão aproximados ao alvo requerido pelas especificações da empresa, apontando uma grande variabilidade no processo e deslocamento da média do processo e relação à especificação. Com isso, estatisticamente, não foi possível indicar um planejamento de experimentos, já que é indicado para processos estáveis para orientar projetos de melhoria.

A fim de identificar fatores que, se alterados, podem ajudar no alcance da densidade alvo das pastilhas, foi realizada a simulação do processo de prensagem do pó de UO_2 .

Neste estudo, foi analisada a densidade de deslocamento na compressão de pós de UO_2 , baseado em um modelamento constitutivo. É possível avaliar os efeitos da densidade, a partir da fração de vazios que demonstra um comportamento linear em relação à pressão de compressão. Foi possível avaliar, também, que, para atingir a densidade ideal, é necessário regular a pressão e a velocidade de compressão. A pressão de compressão deve estar entre 7 e 9 bar e também deve-se regular a velocidade de compressão, para que se possa chegar à densidade desejada.

Foi possível identificar, também, que os equipamentos utilizados no processo estão ultrapassados. Com isso, uma proposta de melhoria seria a substituição do sistema capacitivo da prensa rotativa por um sistema com medição por ultrassom, que é menos sensível às influências externas. Outra forma de evitar defeitos no produto final é a instalação de um novo sistema de compensação (*Hold down / Hold up*) com 6 *hold down pistons* e sem molas nos porta-punções.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, M. M. **Introdução à metodologia do trabalho científico**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

INB. Disponível em <http://www.inb.gov.br>. Acesso em: 30 jun. de 2014.

_____. CICLO DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR. Acesso em: 30 jun. de 2014.

_____. CICLO DE PRODUÇÃO DE PASTILHAS. Acesso em: 30 jun. de 2014.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

QUEIROZ, Luiz Claudio; RYAN, Thomas P. **Estatística moderna para engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

WALPOLE RE; MYERS RH; MYERS SL; YE K. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2009.