

## **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS MODOS DE VIBRAÇÃO DE GRADES ESPAÇADORAS CONFORME PROJETADA VERSUS FABRICADA, UTILIZANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

**Carlos Frederico Mattos Schettino, [carlosschettino@inb.gov.br](mailto:carlosschettino@inb.gov.br)<sup>1</sup>**  
**João Carlos Aguiar Gaspar Júnior, [joaojunior@inb.gov.br](mailto:joaojunior@inb.gov.br)<sup>1</sup>**  
**Victor Hugo Leal de Araújo, [victorhugo@inb.gov.br](mailto:victorhugo@inb.gov.br)<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Indústrias Nucleares do Brasil S.A. – INB, Rod. Presidente Dutra km 330 – Eng. Passos, Resende-RJ, CEP: 27555-000

**Resumo:** *O presente trabalho pretende avaliar o comportamento dos modos de vibração de tiras internas de grade espaçadora de elemento combustível utilizadas na usina nuclear de Angra 2. As distorções entre os modos de vibração são causadas devido à diferença entre o que foi projetado e a condição pós-fabricação. Os desvios da fabricação podem ocorrer devido à estampagem da tira, a montagem das tiras para formar a grade, a soldagem, ao tratamento térmico, entre outros. Neste artigo são demonstradas apenas as características do modo de vibração do componente devido ao processo de estampagem e comparados aos modos de vibração do projeto conceitual. Para modelar a geometria do componente foi utilizado o programa Solidworks, e para a modelagem por elementos finitos, foi utilizado o programa Ansys, a fim de obter os resultados desta análise. As propriedades da tira da grade espaçadora analisada são as da superliga Inconel 718. Foi realizada uma análise modal entre os dois modelos propostos. Os resultados desta análise foram usados para avaliar o impacto que um processo de conformação acarretará no projeto original de um componente, que neste caso é parte integrante da estrutura de um elemento combustível. A obtenção destes dados poderá ser empregada pelas Indústrias Nucleares do Brasil – INB durante o processo de nacionalização da fabricação de tiras de grades para combustível nuclear.*

**Palavras-chave:** *elemento combustível, grade espaçadora, método de elementos finitos, análise modal, Inconel 718*

### **1. INTRODUÇÃO**

A melhoria da qualidade de vida de nossa sociedade através, da inclusão de pessoas que não tinham acesso a energia, do aumento do consumo per capita e do aumento da competitividade da economia brasileira associada com a limitação de utilização de alguns recursos naturais devido a sua escassez e os seus efeitos na alteração do clima, traz a necessidade de expansão do sistema de geração de eletricidade de forma segura, confiável, competitiva e sem danos ao meio ambiente. A energia nuclear se apresenta como uma fonte que atende a estes pré-requisitos.

Com as perspectivas do novo programa nuclear brasileiro surge a necessidade de se dominar a capacidade de projeto de Elemento Combustível (EC), com maior nível de eficiência, segurança e confiabilidade.

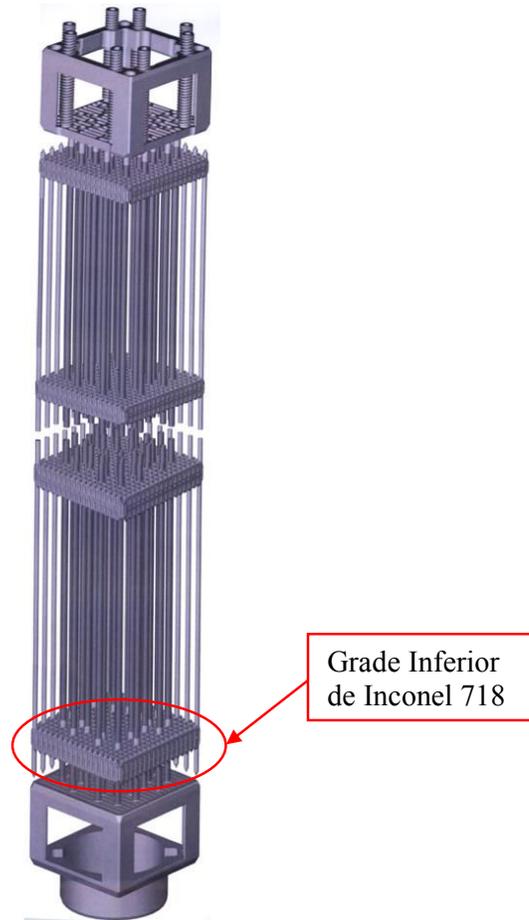
O presente trabalho tem por objetivo avaliar o componente estrutural presente no combustível nuclear de projeto típico de Angra 2 - grade espaçadora inferior de Inconel 718 - quanto ao comportamento vibracional, comparando os modos de vibração e as frequências naturais do componente nas condições de projeto e de pós-fabricação, ou seja, com a ação das ferramentas de conformação.

### **2. GRADE ESPAÇADORA**

A grade espaçadora (Perrota, 1999 e Silva et al, 2009) é um dos componentes dos Elementos Combustíveis, ela faz parte do conjunto estrutural do combustível nuclear, chamado de “esqueleto”, como mostra a Fig. (1). O esqueleto é constituído dos seguintes componentes: Bocais (inferior e superior), Tubos-guias e as Grades Espaçadoras. As Varetas Combustíveis (tubos onde são inseridas as pastilhas de urânio) são inseridas após esse conjunto estiver montado.

As grades espaçadoras (Perrota, 1999 e Silva et al, 2009) têm a função de manter a posição das varetas combustíveis dentro do arranjo do Elemento Combustível. Elas são elementos estruturais bem rígidos, montadas numa forma reticular por tiras metálicas entrelaçadas. Nas posições de fixação das varetas combustíveis existe um sistema mola-batente

estampado nas tiras. Este sistema permite a fixação da vareta no plano da grade e possibilita o deslizamento da vareta no sentido perpendicular à grade, admitindo expansões axiais diferenciais entre varetas combustíveis sem causar tensões excessivas. As grades possuem também geometria característica para prover agitação na água de refrigeração que passa ao longo do EC visando melhoria na transferência de calor das varetas combustíveis para o refrigerante.



**Figura 1. “Esqueleto” do Elemento Combustível (EC) e a grade espaçadora analisada em destaque**

Devido ao fluxo de refrigerante dentro do reator nuclear, o Elemento Combustível, mais especificamente a grade espaçadora, sofre uma vibração induzida por este fluxo.

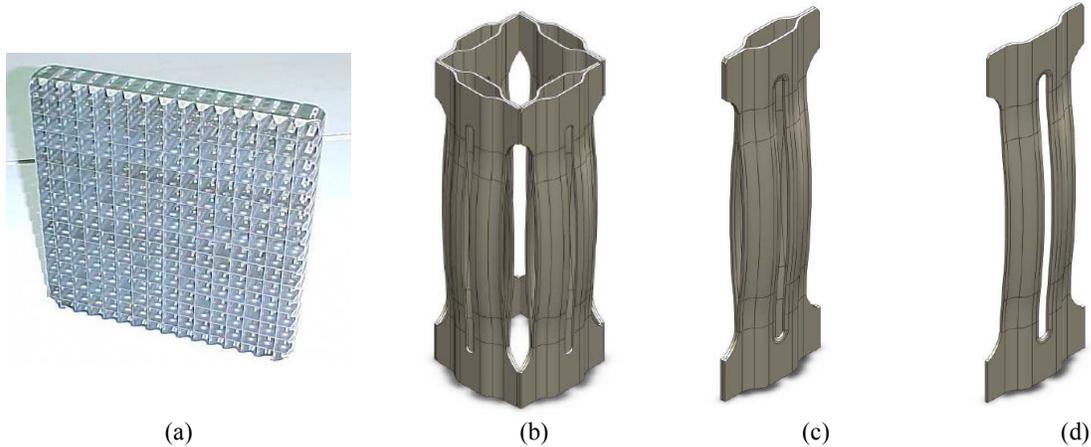
Cada EC do tipo utilizado em Angra 2, possui 9 grades espaçadora ao longo de seu comprimento, como mostrado na Fig. (2). No presente trabalho, será analisado a grade espaçadora mais inferior do EC, chamada de Grade Inferior. Na fabricação das tiras das grades são utilizados um dos dois tipos de material: liga de zircônio ou superliga de Inconel 718. Na região onde há maior necessidade de resistência mecânica as grades são fabricadas com a liga de Inconel 718, como é o caso da Grade Inferior, aqui analisada.

O Inconel 718 (Araújo, 2009) possui propriedades essenciais para operação em ambientes hostis, como o núcleo de um reator nuclear. As superligas de níquel constituem uma família de ligas destinadas a aplicações em temperaturas elevadas, já que mantêm boas propriedades mecânicas e resistência à corrosão até temperaturas próximas do ponto de fusão. Isto é conseguido graças à combinação de uma matriz austenítica endurecida por solução sólida - fase  $\gamma$  - com elevadas frações volumétricas de precipitados - fases  $\gamma''$  e  $\gamma'$ . As aplicações incluem turbinas a gás, motores de foguete, artefatos aeroespaciais, reatores nucleares e componentes do seu núcleo.

Uma grade montada (Araújo, 2009) consiste de várias tiras obtidas a partir de chapas laminadas (cerca de 0,32 mm de espessura) e estampadas de forma que possam ser encaixadas formando um arranjo quadrado de células com configuração específica. Para manter a união do conjunto as tiras são soldadas por feixe de elétrons (EBW - Electron Beam Welding) que pela alta densidade de energia do processo permite a diminuição do volume de metal de solda e, conseqüentemente, na extensão da zona afetada pelo calor e no nível de tensões residuais, resultando em juntas soldadas de excelente qualidade. Após a soldagem, as tiras são submetidas a um tratamento térmico de solubilização e precipitação visando atingir as propriedades finais desejadas.

### 3. METODOLOGIA

Para o objetivo proposto foi modelado uma parte unitária de uma célula da Grade Inferior, na qual são analisados os modos de vibração e retiradas as frequências naturais. Na Fig. (2) tem-se um exemplo de uma grade espaçadora e todos os cortes efetuados de modo a se chegar a uma parte unitária de uma tira da grade.



**Figura 2. (a) Grade Inferior de Inconel 718 completa; (b) Uma célula da Grade Inferior; (c) Uma tira da célula da grade; (d) Parte unitária da tira.**

#### 3.1. Modelamento Sólido

Uma parte unitária da tira interna da Grade Inferior do EC de Angra 2, Fig. (2-d), foi desenhada no programa Solidworks, obtendo um modelo sólido, em três cenários de interesse. No cenário I, Fig. (3-a), a tira foi desenhada sem considerar a parte de material que escoava durante o processo de estampagem, ou seja, a ação da ferramenta é desconsiderada, foi chamada de “como projetada”. No cenário II, Fig. (3-b), foi considerado o escoamento típico deste produto em decorrência da ação da ferramenta de estampagem, chamado de “como fabricado”. No cenário III, Fig. (3-c) foi avaliado um escoamento com o dobro de profundidade em relação ao cenário II.

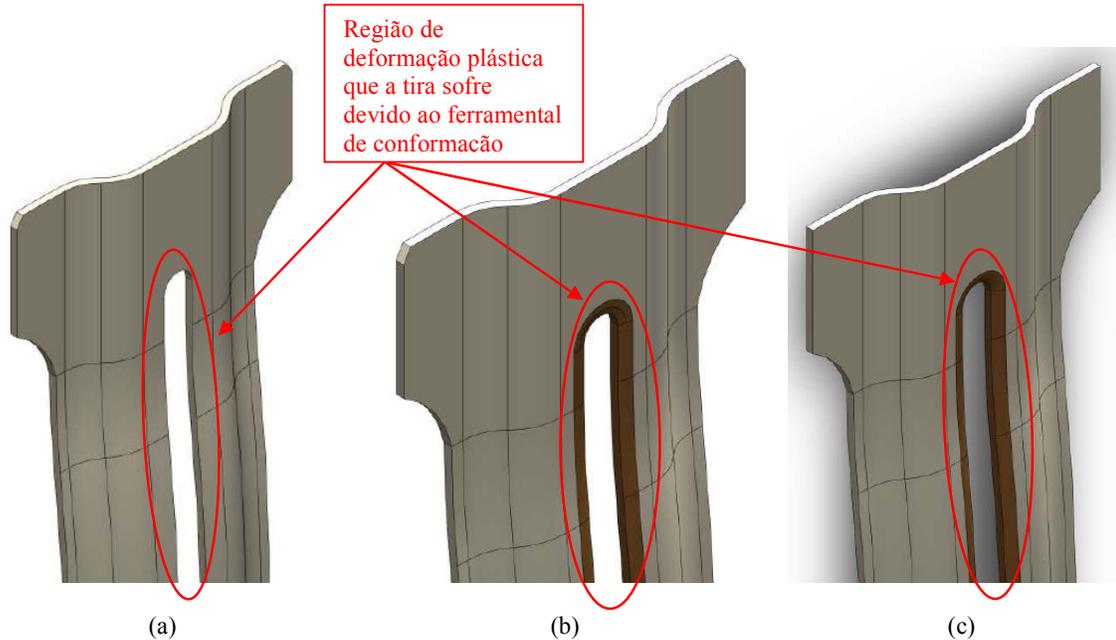


Figura 3. (a) Cenário I; (b) Cenário II; e (c) Cenário III

### 3.2. Modelamento Numérico

O programa de simulação que utiliza o Método dos Elementos Finitos, ANSYS (versão 12.0), foi utilizado nessa etapa. As características do modelamento são apresentadas a seguir.

Primeiramente, o modelo sólido (descrito no item 3.1) foi importado pelo ANSYS, para depois serem aplicadas ao modelo as condições de contorno relativas ao comportamento físico do componente, como, por exemplo, as restrições. As restrições (região da solda) e a simetria (região de continuidade da tira) são apresentadas na Fig. (4). Nessa figura são apresentados os seguintes símbolos para a restrição de movimento: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY e ROTZ, que significam deslocamento na direção do eixo x, y, e z e rotação através do eixo x, y e z, respectivamente.

As propriedades do material utilizado no modelamento são apresentadas na Tab. (1).

O tipo de elemento utilizado foi um do tipo casca, chamado de SHELL21, ou atualmente conhecido como SHELL181. Esse elemento é preciso em analisar estruturas em forma de casca/placa finas ou moderadamente finas. Possui 4 nós, cada um deles tem 6 graus de liberdade: translação nos eixos x, y e z (UX, UY e UZ), e rotação nos eixos x, y e z (ROTX, ROTY e ROTZ). Ele é apropriado para análises lineares, grandes rotações, e/ou grandes deformações não-lineares.

O tipo de análise realizada foi uma Análise Modal (Ansys Training Manual, 2003), a fim de determinar as frequências naturais e os modos de vibração do componente analisado. Esse tipo de análise tem por benefícios:

- Permitir que o projeto não entre em vibrações de ressonância ou vibre até uma frequência natural específica;
- Estimar como a estrutura pode responder a um determinado tipo de carregamento dinâmico;
- Serve como uma solução prévia para outras análises dinâmicas, como por exemplo, para análise harmônica.

A equação básica (Ansys Release Documentation 12.0, 2009) a ser resolvida em uma análise modal não-amortecida típica inclui o clássico problema de autovalores, a Eq. (1) mostra isso a seguir.

$$[K].v = \lambda .[M].v \quad (1)$$

Sendo que,

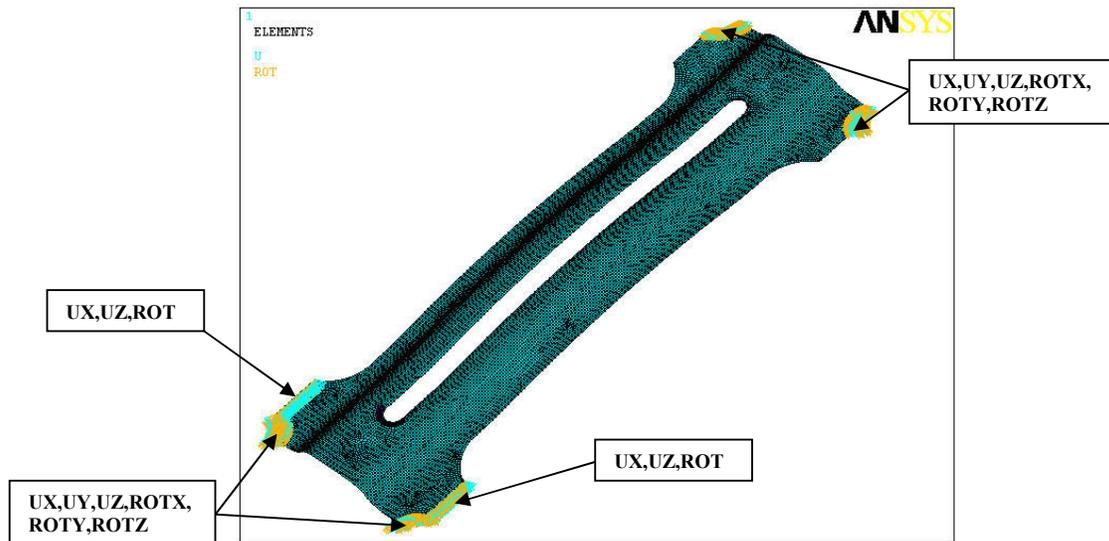
- $[K]$  = matriz de rigidez
- $v$  = auto-vetores
- $[M]$  = matriz mássica
- $\lambda$  = auto-valores

Muitos métodos numéricos estão disponíveis no ANSYS (Ansys Release Documentation 12.0, 2009) para a solução dessa equação acima. O método Block Lanczos de extração dos modos de vibração foi o utilizado para essa análise. Abaixo estão listadas algumas características desse método:

- Permite obter muitos modos de vibração (mais de 40 modos) de modelos grandes;
- Recomendado quando o modelo é feito por elementos de casca e sólidos com formato pobre;
- A solução desenvolve bem quando o modelo consiste de elementos de placa ou uma combinação de casca e sólido;
- Processamento rápido, mas necessita de um espaço moderado na memória.

**Tabela 1. Propriedades do Inconel 718**

Módulo de Elasticidade [MPa]	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Poisson
200658	6446,3	0,293



**Figura 4. Parte unitária da grade a ser analisada pelo ANSYS e as condições de contorno do modelo de Elementos Finitos**

#### 4. RESULTADOS

As simulações no ANSYS encontraram os resultados presentes na Tab. (2) das frequências naturais do componente analisado, para cada cenário descrito no item 3.1.

**Tabela 2. Resultado das Frequências Naturais**

Modo	Frequência Natural [Hertz]		
	Cenário I	Cenário II	Cenário III
1	112,52	112,99	112,84
2	116,17	116,05	115,54
3	189,55	190,45	190,76
4	194,39	195,19	195,40
5	206,89	208,26	209,06

A ação da ferramenta de conformação durante a estampagem provocou um aumento de área pequeno, que acarretou uma pequena modificação na rigidez da tira, isto pode ser comprovado pela pequena diferença nos resultados obtidos dos três cenários avaliados, que é menor do que 1 %.

Devido a maior facilidade de visualização do 1º e 3º modos de vibração que apresentam a forma de um “C” e de um “S”, respectivamente. A Fig. (5) a seguir mostra estes dois modos de vibração do componente para cada cenário.

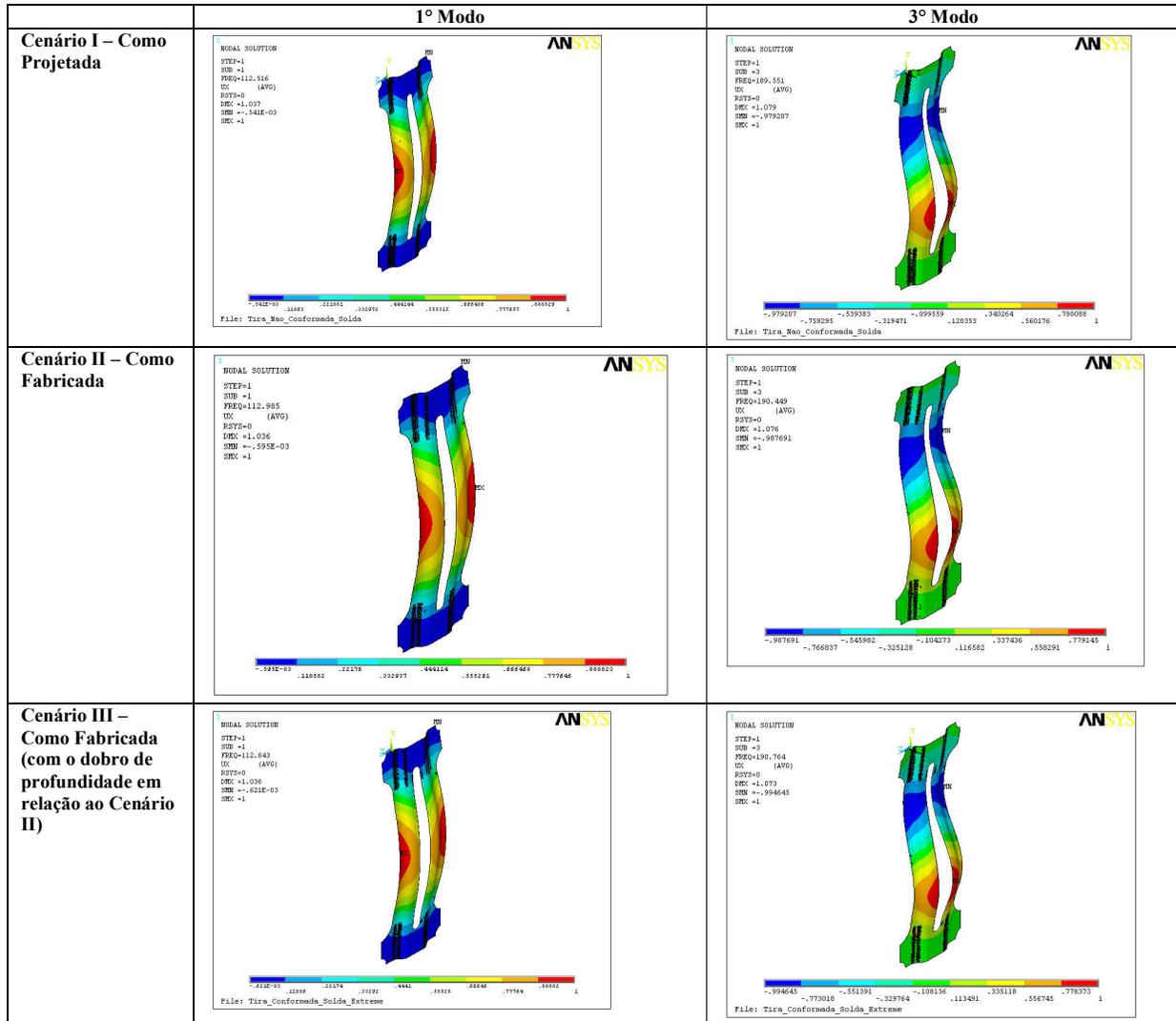


Figura 5. 1º e 3º Modo de Vibração da parte unitária da tira da Grade Inferior

## 5. CONCLUSÕES

A mínima discordância entre os resultados permite a realização de projetos de tiras sem considerar a parte do material que escoar durante o processo de estampagem. Este procedimento simplificado traz uma economia de tempo no processamento das análises necessárias à avaliação do projeto estrutural de elementos combustíveis.

A análise da variação entre os cenários I, II e III demonstra que é possível a utilização de conjuntos punções e matrizes que produzem maiores rebarbas sem causar dano significativo ao comportamento dos modos de vibração.

## 6. REFERÊNCIAS

- Ansyst Release Documentation 12.0, 2009;
- Ansyst Training Manual, Dynamics 7.0, Modal Analysis, 2003;
- Araújo, V. H. L., 2003, “Efeito da soldagem por feixe de elétrons e tratamento térmico pós-soldagem em características mecânicas e microestruturais de tiras de Inconel 718 aplicadas em componentes nucleares”, dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo EEL-USP, Lorena;
- Perrotta, J. A., 1999, “Curso de Introdução à Engenharia do Núcleo de Reatores”;
- Silva, H. A, Dulce, A. G., et al, 2009, “Conhecendo o Elemento Combustível”, INB.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# EVALUATION OF THE BEHAVIOR OF SPACER GRIDS VIBRATION MODES AS DESIGNED VERSUS AS BUILT, USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Carlos Frederico Mattos Schettino, [carlosschettino@inb.gov.br](mailto:carlosschettino@inb.gov.br)<sup>1</sup>  
João Carlos Aguiar Gaspar Júnior, [joaojunior@inb.gov.br](mailto:joaojunior@inb.gov.br)<sup>1</sup>  
Victor Hugo Leal de Araújo, [victorhugo@inb.gov.br](mailto:victorhugo@inb.gov.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Indústrias Nucleares do Brasil S.A. – INB, Rod. Presidente Dutra km 330 – Eng. Passos, Resende-RJ, CEP: 27555-000

**Resumo:** *This study aims to evaluate the behavior of the vibration modes of an inner strip of a spacer grid used in Fuel Assemblies of the nuclear power plant Angra 2. The distortion between the vibrations modes are caused due to the difference between the as designed grid and the as built one. Deviations of the manufacturing can occur due to the forming, to the assembly and/or to the welding of the grid strips, among others. This article demonstrate the characteristics of the vibrations modes of the component due to the stamping process and compared to the vibrations modes of the conceptual design. To model the solid geometry of the component, the software Solidworks was used. For the finite element model, the software Ansys version 12.0 was used to run and to get the results of this analysis. The material properties of the spacer grid strip was baesd on the superalloy, Inconel 718. A modal analysis was performed between the two models proposed. The results of these analysis were used to assess the impact of a forming process in the original design of the component, which in this case is part of the structure of a Fuel Assembly. These data will be of great importance to the Indústrias Nucleares do Brasil S.A.- INB to begin the nationalization process of spacer grid manufacture for nuclear fuel.*

**Key-words:** *Fuel Assembly, Spacer Grid, Finite Element Method, Modal analysis, Inconel 718*

The authors are the only responsables for the contents of the press material inside their work.