



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
CENTRO TECNOLÓGICO  
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**DISSERTAÇÃO DE  
MESTRADO**

**Análise de desgaste por *Fretting* em varetas combustíveis de Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe via o método dos elementos finitos**



**ALUNO: Rafael Rodrigues de Oliveira  
ORIENTADOR: Prof. Dr. Neil de Medeiros**

**Volta Redonda  
2025**

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**Rafael Rodrigues de Oliveira**

**Análise de desgaste por *Fretting* em varetas combustíveis de  
Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe via o método dos elementos finitos**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense. Área de Concentração: Modelamento e Simulação de Processos e Fenômenos.

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Neil de Medeiros

**Volta Redonda**

**2025**

Ficha catalográfica automática - SDC/BEM  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

D278a De Oliveira, Rafael Rodrigues  
Análise de desgaste por fretting em varetas combustíveis  
de Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe via o método dos elementos finitos /  
Rafael Rodrigues De Oliveira. - 2025.  
53 f.: il.

Orientador: Neil De Medeiros.  
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta  
Redonda, Volta Redonda, 2025.

1. Desgaste por Fretting varetas combustíveis. 2. Grades  
espaçadoras. 3. Métodos dos elementos finitos. 4. Liga Zr-  
1Nb-1Sn-0,1Fe. 5. Produção intelectual. I. De Medeiros,  
Neil, orientador. II. Universidade Federal Fluminense. Escola  
de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta Redonda. III.  
Título.

CDD - XXX

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**Rafael Rodrigues de Oliveira**

**Análise de desgaste por fretting em varetas combustíveis de  
Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe via o método dos elementos finitos**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense. Área de Concentração: Modelamento e Simulação de Processos e Fenômenos.

Aprovada em 31 de março de 2025



Documento assinado digitalmente  
**NEIL DE MEDEIROS**  
Data: 31/03/2025 14:28:29-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Neil de Medeiros (Orientador)**  
Universidade Federal Fluminense (EEIMVR/UFF)



Documento assinado digitalmente  
**GLAUCIO SOARES DA FONSECA**  
Data: 01/04/2025 12:46:21-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Gláucio Soares da Fonseca**  
Universidade Federal Fluminense (EEIMVR/UFF)



Documento assinado digitalmente  
**SAULO BRINCO DINIZ**  
Data: 01/04/2025 08:56:49-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Saulo Brinco Diniz**  
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ)

Volta Redonda  
2025

## **DEDICATÓRIA**

**À minha esposa Anna Carolina e filhos, Pedro e Maria**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à Deus pela oportunidade que me foi dada e saúde para chegar a esse tão sonhado momento para mim e minha família.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu orientador Prof. Dr. Neil de Medeiros pela valiosa orientação, paciência e dedicação ao longo desta jornada. Seu conhecimento, incentivo e ensinamentos foram fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação e para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Ao amigo e professor Marcelo Costa Martins pela grande ajuda e sugestões importantíssimas na conclusão do trabalho.

A amiga da INB Dra. Daniele Azevedo Baeta pelas ajudas e pronto auxílio sempre que necessário.

À Proper Marine pelo entendimento de me liberar das minhas atividades quando necessário e incentivo no crescimento da minha carreira.

Às Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) pelo apoio principalmente na utilização do Centro de Pesquisas para obtenção de alguns resultados.

À minha esposa Anna Carolina, pelo amor, pelo cuidado, pelas orações, pela compreensão das minhas ausências, apoio e companheirismo.

Aos meus filhos Pedro e Maria pelo entendimento das minhas ausências e sempre com doces palavras de apoio e carinho. Consigo ver em seus olhos o quanto estão orgulhosos de mim.

Aos meus pais, Edna e Tadeu, que me ensinaram a não desistir dos meus sonhos e contribuírem pela minha educação.

## SUMÁRIO

|          |  |                                      |
|----------|--|--------------------------------------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>13</b>                            |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVOS .....</b>   | <b>15</b>                            |
| 2.1      | OBJETIVO GERAL.....  | 15                                   |
| 2.2      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....  | 15                                   |
| <b>3</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>  | <b>16</b>                            |
| 3.1      | CICLO DE ENERGIA NUCLEAR.....  | 16                                   |
| 3.2      | ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS E COMPONENTES .....   | 17                                   |
| 3.2.1    | – Grade espaçadora .....   | 20                                   |
| 3.2.2    | – Vareta Combustível .....   | 21                                   |
| 3.3      | <i>FRETTING</i> .....  | <b>Erro! Indicador não definido.</b> |
| 3.4      | Zr-1Nb e Zr-Nb-1Sn-0,1Fe E SUAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS ..... | 28                                   |
| <b>4</b> | <b>METODOLOGIA.....</b>  | <b>30</b>                            |
| 4.1      | MATERIAL .....   | 30                                   |
| 4.2      | DESENHO VIA CAD .....  | 32                                   |
| 4.2      | MODELAMENTO VIA ELEMENTOS FINITOS .....  | 33                                   |
| 4.3      | MODELO 3D .....  | 35                                   |
| 4.3.1    | – Material (vareta e grade): Liga Zirlo .....                                      | 35                                   |
| 4.3.2    | – Modelamento por elementos finitos: .....   | 36                                   |
| 4.3.3    | – Condições de contorno: .....   | 36                                   |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>  | <b>37</b>                            |
| 5.1      | Validação dos testes experimentais através da simulação .....                      | 37                                   |
| 5.2      | Cargas atuantes sobre molas e batentes da grade espaçadora .....                   | 39                                   |
| 5.3      | Interpretação dos resultados .....   | 45                                   |
| 5.4      | Aplicação Prática.....   | 46                                   |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÕES.....</b>   | <b>48</b>                            |
| <b>7</b> | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>                                      | <b>50</b>                            |
| <b>8</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>  | <b>51</b>                            |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Elemento combustível Angra I. Adaptado de [10].   | 18 |
| Figura 2 – Grade espaçadora de elemento combustível tipo 16x16 Adaptado de Palheiros (2005).   | 20 |
| Figura 3 – Interno da grade espaçadora   | 21 |
| Figura 4 – Vareta Combustível. [29]  | 22 |
| Figura 5 – Adaptado de Cacuci (2010).  | 22 |
| Figura 6 – Desgaste por atrito entre as grades espaçadoras e as varetas em um elemento combustível. Adaptado de [14].  | 23 |
| Figura 7 – Desgaste devido ao atrito entre as grades espaçadoras e as varetas.   | 24 |
| Figura 8 – Marcas de <i>Fretting</i> entre mola e vareta combustível após a realização do ensaio experimental.   | 25 |
| Figura 9 – Dispositivo para realização de testes de fadiga superficial do tipo <i>Fretting</i> (Vásquez, 2012).  | 27 |
| Figura 10 – Dispositivo de testes de fadiga superficial <i>Fretting</i> (Attia, 2006).   | 28 |
| Figura 11 – Escaneamento por varredura da Grade espaçadora.  | 32 |
| Figura 12 – Modelo de uma célula da grade espaçadora e da vareta de combustível feita em <i>CAD</i> .  | 33 |
| Figura 13 – Modelo 3D de uma única célula com detalhes de molas e batentes.  | 34 |
| Figura 14 – Grade espaçadora, em destaque a célula simulada.   | 34 |
| Figura 15 – Célula simulada com engaste com deslocamentos e rotações para X e Y = 0.   | 36 |
| Figura 16 – (a) Marcas de <i>Fretting</i> entre a mola e a vareta combustível após a realização do ensaio experimental e (b) Marcas de <i>Fretting</i> entre a mola e a vareta combustível após a realização da simulação computacional.                             | 38 |
| Figura 17 – Gráfico com a relação entre os testes experimentais com a simulação.   | 38 |
| Figura 18 – Gráfico com a relação entre os testes experimentais com a simulação.   | 39 |
| Figura 19 – Gráfico de pressão ao longo do comprimento da mola.  | 41 |
| Figura 20 – Distribuição de pressão do tamanho do contato ao longo da mola: (a) $\mu = 0,05$ / (b) $\mu = 0,1$ / (c) $\mu = 0,15$ / (d) $\mu = 0,2$ / (e) $\mu = 0,25$ / (f) $\mu = 0,3$ / (g) $\mu = 0,35$ / (h) $\mu = 0,4$ / (i) $\mu = 0,45$ / (j) $\mu = 0,5$ . | 45 |

**LISTA DE TABELAS**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1. Histórico de Falhas Adaptado de [3].....   | 14 |
| Tabela 2. Comparação entre os elementos 16 STD e 16 NGF [14].....                                      | 19 |
| Tabela 3. Composição química da liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe. (Baêta, 2020).....                              | 30 |
| Tabela 4. Composição química da liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe (Baêta, 2020) .....                              | 31 |
| Tabela 5. Resultados do teste de convergência para o modelo de contato entre<br>vareta e as molas..... | 40 |

**LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS**

ASTM – American Society For Testing And Materials  
CAD – Computer Aided Design  
CAE – Computer Aided Engineering  
EEIMVR – Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda  
FCN – Fábrica de Combustível Nuclear  
IAEA – International Atomic Energy Agency  
INB – Industrias Nucleares do Brasil  
kWh – kilowatt-hora  
LOCA – Loss of coolant accident  
MEF – Método dos Elementos Finitos  
MPa – Mega Pascal  
NGF – Next Generation Fuel  
PWR - Pressured Water Reactor  
UFF – Universidade Federal Fluminense  
Si – Taxa de nucleação  
STD – Standard  
VL – Volume perdido (volume loss) [mm<sup>3</sup>]  
VIPER - Vibration Investigation and Pressure-drop Experimental Research  
3D – Tridimensional

## RESUMO

Neste trabalho, foram propostos modelos numéricos tridimensionais baseados no método dos elementos finitos, capazes de reproduzir de forma consistente o comportamento termomecânico da liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe, com enfoque na resistência ao desgaste por *Fretting*, durante o processo de geração de energia nuclear em reatores do tipo PWR. Para a avaliação dos modelos numéricos propostos, a modelagem tridimensional foi realizada, bem como a análise por meio do método dos elementos finitos, permitindo, por meio de simulações computacionais, a reprodução da ocorrência de *Fretting* superficial no material em estudo. Além disso, foram estudadas as condições de tratamento térmico que possibilitaram o aumento da resistência ao desgaste por *Fretting* em varetas de elementos combustíveis e grades espaçadoras. Para o desenvolvimento e a validação dos modelos numéricos propostos, foram utilizados os resultados de caracterização mecânica e microestrutural obtidos por Baêta (2020), referentes a varetas combustíveis fabricadas a partir da liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe, submetidas a ensaios de desgaste por *Fretting*.

**Palavras-chave:** Desgaste por *Fretting*, varetas combustíveis, grades espaçadoras, métodos dos elementos finitos, liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe.

## ABSTRACT

In this work, three-dimensional numerical models based on the finite element method were proposed, capable of consistently reproducing the thermomechanical behavior of the Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe alloy, with a focus on *Fretting* wear resistance during the nuclear power generation process in PWR-type reactors. To evaluate the proposed numerical models, three-dimensional modeling was carried out, as well as analysis using the finite element method, allowing the simulation of surface *Fretting* occurrence in the material under study. In addition, heat treatment conditions that enabled an improvement in *Fretting* wear resistance in fuel rods and spacer grids were studied. For the development and validation of the proposed numerical models, mechanical and microstructural characterization results obtained by Baêta (2020) were used, referring to fuel rods manufactured from the Zr-1Nb-1Sn-0.1Fe alloy and subjected to *Fretting* wear tests.

**Keywords:** *Fretting* wear, fuel rods, spacer grids, element finite method, Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe alloy.

## 1 INTRODUÇÃO

É percebido nos dias de hoje que um renascimento nuclear está em curso devido, principalmente, a problemas climáticos mundiais e limitações energéticas das fontes de combustíveis fósseis. A geração nucleoe elétrica é uma das alternativas menos poluentes, permite a obtenção de muita energia em um espaço físico relativamente pequeno e a instalação de usinas perto dos centros consumidores, reduzindo o custo de distribuição de energia [1].

Considerando que a percepção pública da energia nuclear como segura, eficiente e confiável é mais importante do que nunca, a confiabilidade de combustível nuclear é essencial para sustentar o renascimento nuclear [1].

A indústria nuclear está presente em 31 países, e possui grande importância na matriz energética de países como a França, sendo o país com a maior dependência desse tipo de fonte de energia elétrica, com 77,7% de contribuição e geração de 423 bilhões de kWh, perdendo em valores absolutos apenas para os Estados Unidos, que gerou 790 bilhões de kWh [1].

Historicamente, em reatores comerciais, utilizavam-se as ligas à base de zircônio denominadas Zircaloy-2, Zircaloy-4 e Zr-1Nb em componentes para montagem de combustíveis, enquanto os materiais Zr-2,5Nb eram utilizados em tubos pressurizados. Durante as décadas de 1980 e 1990, o aumento da corrosão observada nas usinas alemãs e suíças que utilizavam reatores nucleares do tipo PWR (*Pressured Water Reactor*) levou à busca por materiais mais resistentes a este tipo de fenômeno químico. Este cenário desencadeou um amplo esforço científico voltado ao desenvolvimento de novas ligas à base de zircônio, tais como Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe e

M5, utilizadas como materiais constituintes dos elementos combustíveis dos reatores nucleares, devido às suas excelentes propriedades mecânicas em altas temperaturas e alta resistência à corrosão e à radiação de nêutrons, uma vez que as condições de trabalho são bastante severas [2].

Vários combustíveis nucleares vêm sendo projetados e desenvolvidos para serem mais competitivo, entretanto, alguns combustíveis tiveram vidas comerciais breves devido à ocorrência de falhas sistemáticas relacionadas ao seu projeto [1]. Neste contexto, (Wolter, 2006) analisou um histórico das falhas nos reatores de Angra I e II entre os anos de 2000 e 2006, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Histórico de Falhas Adaptado de [3]

| <b>% Falha</b> | <b>Defeito</b>  |
|----------------|-----------------|
| 70,22          | <i>Fretting</i> |
| 3,78           | Debris          |
| 1,65           | Corrosão        |
| 24,35          | Outros Defeitos |

A análise da Tabela 1 demonstra que a principal falha em elementos combustíveis é a ocorrência de desgaste por *Fretting*, objeto deste estudo, objetivando um maior entendimento do fenômeno, de forma a garantir a segurança da planta nuclear.

Com base no estado da arte exposto acima, o presente trabalho visa propor um modelo tridimensional que será submetido a análise através de elementos finitos capazes de reproduzir de forma consistente o comportamento termomecânico da liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe, com enfoque na resistência ao *Fretting* em varetas combustíveis.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

- Proposição de modelos numéricos tridimensionais de elementos finitos capazes de reproduzir superfícies de desgaste por *Fretting*, em varetas combustíveis de elemento tipo Angra I, fabricados a partir de uma liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinação dos níveis e perfis de tensão e deformação ao longo da superfície da vareta combustível sujeito a desgaste por *Fretting*;
- Obtenção de superfície com desgaste ao longo da vareta combustível;
- Validação dos modelos por comparação com superfícies de desgaste obtidos experimentalmente por Baêta, 2020.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 CICLO DE ENERGIA NUCLEAR

Este ciclo compõe em um conjunto de processos industriais em que o minério de urânio seja transformado no combustível utilizado na geração de energia em reatores nucleares. Por meio das reações nucleares, a energia, a radiação e os radioisótopos são liberados, proporcionando uma ampla gama de aplicações e benefícios para a humanidade, embora também estejam associadas a uma das formas mais conhecidas de destruição em larga escala [4]. Com isso, uma nova área industrial foi consolidada, caracterizada por seu elevado potencial de desenvolvimento e reconhecida como uma alternativa viável para a geração de energia

O Brasil possui a tecnologia de enriquecimento de urânio e, além disso, tem uma das maiores reservas de urânio do mundo, onde as usinas nucleares utilizam essa abundante fonte de energia. Entretanto para que se obtenha a permissão de uma operação segura, com viabilidade econômica e de rendimento satisfatório faz necessário um investimento no desenvolvimento de técnicas e pessoas. De fato, ainda é necessário trabalhar a aceitação pública e a minimização de impactos ambientais.

No Brasil, existem duas usinas nucleares em operação: Angra I, primeira usina nuclear brasileira e em operação desde 1985, possui capacidade instalada de 657 MW. Angra II entrou em operação em 2001 e possui capacidade de 1350 MW. Atualmente, as usinas nucleares de Angra I e Angra II, respondem ao equivalente de 50% do abastecimento do estado do Rio de Janeiro (ou 3% do abastecimento do Brasil).

## 3.2 ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS E COMPONENTES

As pastilhas de urânio são empilhadas em varetas de uma liga super resistente, o zircaloy. Um conjunto destas varetas, mantidas rigidamente por grades espaçadoras, forma o elemento combustível. As usinas Angra 1 e Angra 2 são abastecidas por dois combustíveis diferentes, ambos fabricados pela INB.

Um elemento combustível permanece no reator durante três ciclos, ou seja, aproximadamente três anos. Após este período eles são armazenados dentro das usinas, nas piscinas de combustíveis.

A usina Angra 1, utiliza 121 elementos combustíveis com 4 metros de comprimento, cada um contendo 235 varetas de zircônio rigidamente posicionadas em uma estrutura metálica, formada por 10 grades espaçadoras, 1 grade protetiva, 20 tubos guias e mais 1 tubo de instrumentação dispostos na forma de uma matriz quadrada 16x16 e dois bocais (inferior e superior), conforme apresentado em detalhes na Figura 1.

Na usina Angra 2 são utilizados 193 elementos combustíveis com 5 metros de comprimento, cada um com 236 varetas rigidamente posicionadas em uma estrutura metálica, formada por 9 grades espaçadoras, 1 grade protetiva, 20 tubos guias e dois bocais (inferior e superior).

A estrutura do Elemento Combustível trabalha como um “esqueleto” que, além de manter as varetas de combustível em suas respectivas posições, garante o correto alinhamento das Barras de Controle, possibilitando um manusear seguro do Elemento Combustível dentro e fora da usina.

A fábrica de Combustível Nuclear (FCN) e INB (Resende) são responsáveis pela montagem do elemento combustível aqui no Brasil. Um controle criterioso e de total confiabilidade é realizado na montagem destes elementos.

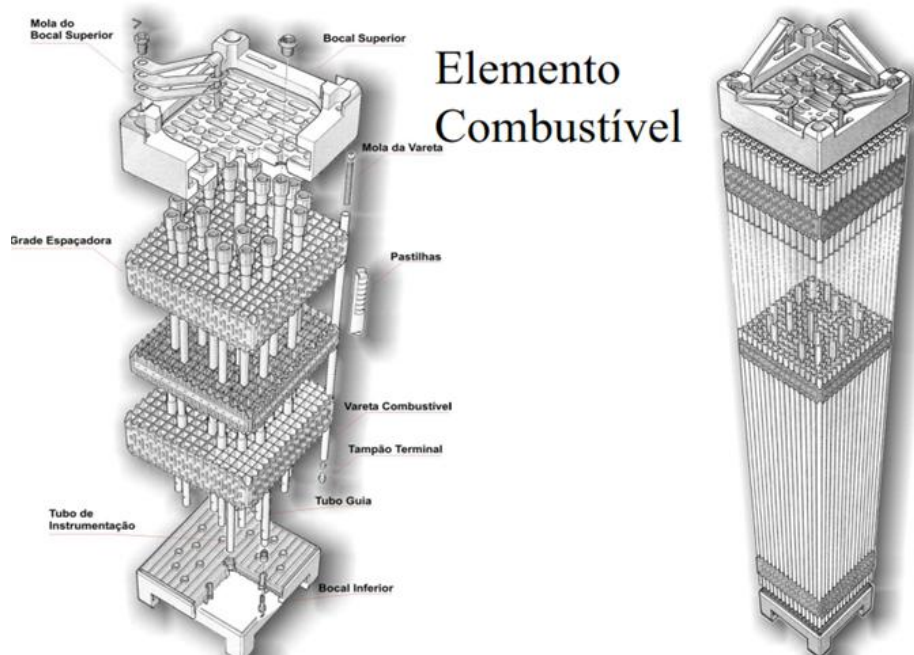


Figura 1 – Elemento combustível Angra I. Adaptado de [10].

No VIII Congresso Geral de Energia Nuclear realizado em 1998, foi apresentado pela INB um estudo de viabilidade de aumento de capacidade da reação nuclear (reatividade) do elemento combustível de Angra I, onde é proposto que se reduzisse o diâmetro da vareta combustível deste elemento. O elemento utilizado em Angra I é o 16 NGF que é equivalente aos mais modernos utilizados nas usinas do tipo PWR.

Foi desenvolvido um projeto do combustível chamado 16NGF (Next Generation Fuel) onde obteve compatibilidade entre o elemento combustível de Angra I e os das centrais nucleares de Kori-2 na Coreia do Sul e de Krsko na Eslovênia. Isso ocasionou grande interesse de um trabalho em conjunto com a INB (Brasil), a Westinghouse (USA) e a KNFC (Coreia) para desenvolvimento deste projeto.

Algumas vantagens são obtidas no Projeto 16NGF como: favorecimento no escoamento do fluxo no dimple e na mola, um aumento na área de contato com a vareta, aumento na resistência ao cisalhamento, aumento da margem de *Fretting* entre outros. A liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe foi utilizada no Projeto New Generation Fuel (16NGF) onde, pela redução do diâmetro das varetas acarreta um aumento da eficiência energética possibilitando ciclos de períodos maiores. Esse elemento combustível nuclear possibilita o aumento da quantidade de energia gerada com menor quantidade de combustível. Com a melhora na utilização do urânio, possibilitou a redução e a

quantidade de elementos combustíveis na piscina obtendo uma queima de descarga mais elevada durante sua vida útil da central.

Os resultados dos testes iniciais do Elemento Combustível Avançado Tipo PWR 16x16 para Angra I denominado 16NGF foram: aumento de 30% de energia por quilo de urânio no elemento combustível; redução de cerca de 9% na massa de urânio por elemento combustível; a diminuição do rejeito por Kwh gerado; acréscimo na potência de Angra I em 10%; acréscimo na resistência dinâmica a flambagem e da rigidez das grades o bastante para atender aos critérios de projeto sísmicos durante um LOCA (*Loss of coolant accident*); compatibilidade entre o 16NGF e o 16STD [10].

A Tabela 2 apresenta as principais diferenças entre o elemento combustível de nova geração e o elemento combustível padrão.

Tabela 2. Comparação entre os elementos 16 STD e 16 NGF [14].

| <b>Característica</b>                      | <b>16 NGF</b>         | <b>16 STD</b>     | <b>Observação</b>   |
|--|-----------------------|-------------------|---|
| <b>Queima máxima na VC ((MWd/MtU))</b>     | 75.000                | 50.000            | Maior energia gerada por massa de UO <sub>2</sub>           |
| <b>Diâmetro da vareta (mm)</b>             | 9,144                 | 9,500             | Maior moderação de nêutrons (economia de 5,0 % por recarga) |
| <b>Massa de UO<sub>2</sub> por EC (kg)</b> | 378                   | 413               | Economia no custo da recarga e redução do rejeito/GWh       |
| <b>Enriquecimento máximo</b>               | 5,00                  | 3,80              | Permite maior queima média                                  |
| <b>Veneno queimável</b>                    | Gd                    | Pyrex             | Permite maior queima média                                  |
| <b>Material das varetas e tubos</b>        | liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe | <i>Zircaloy-4</i> | Maior resistência à corrosão                                |
| <b>Material das grades Intermediárias</b>  | liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe | Inconel           | Menor absorção de nêutrons (economia de 1,6% por recarga)   |
| <b>Grade misturadora</b>                   | Sim                   | Não               | Maior margem térmica  |
| <b>Grade de proteção</b>                   | Sim                   | Não               | Maior proteção contra debris                                |

Os resultados dos testes iniciais do Elemento Combustível Avançado Tipo PWR 16x16 para Angra I denominado 16NGF foram: aumento de 30% de energia por quilo de urânio no elemento combustível; redução de cerca de 9% na massa de urânio por elemento combustível; a diminuição do rejeito por kWh gerado;

### 3.2.1 – Grade espaçadora

A grade espaçadora é responsável por separar e manter a estabilidade as varetas combustíveis no interior do núcleo do reator. Seu arranjo físico é estreito tipo engradado formando uma espécie de “favo” compostas por tiras metálicas soldadas entre si. A grade utilizada neste projeto (16 NGF) será de mesmo material que as varetas, onde as grades inferiores e superiores são de Inconel 718 e as grades intermediárias e as grades de fluxo são de mesmo material da vareta (liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe).

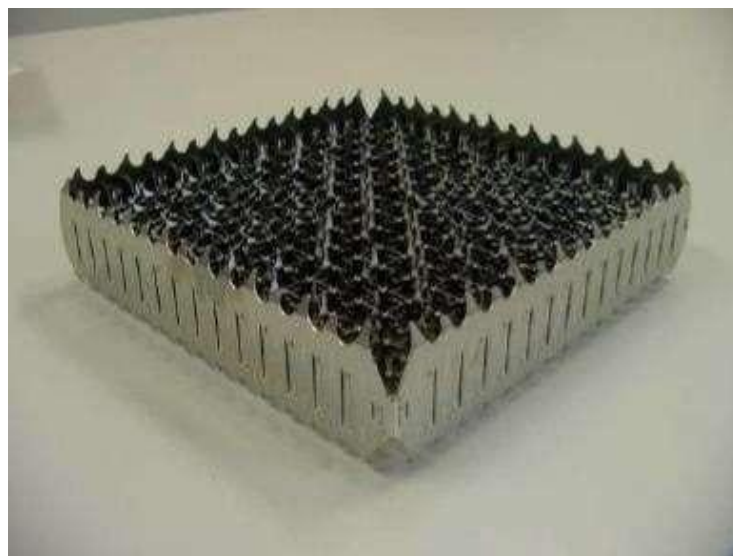


Figura 2 – Grade espaçadora de elemento combustível tipo 16x16  
Adaptado de Palheiros (2005).

As células de depósito das varetas ficam no interior da grade espaçadora. Essas células possuem uma geometria quadrada em sua seção transversal. Duas faces desse quadrado são apresentadas os batentes e nas outras duas faces uma mola em formato “I”. Com isso a vareta ficará submetida a uma força elástica da mola em duas faces e uma outra força de reação oposta àquela da mola nos batentes.

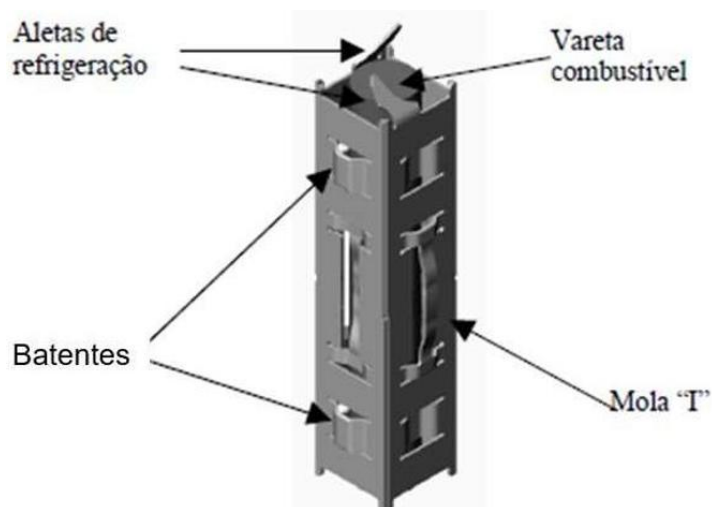


Figura 3 – Interno da grade espaçadora  
Adaptado de Carrilho (2005).

Desta forma, as molas e os batentes prendem as varetas a essa estrutura por meio da força de atrito entre elas, favorecendo assim, seu deslocamento em relação à estrutura pelas forças existentes no processo, como o movimento do fluido refrigerante, dilatação e vibrações, como mostra a Figura 2.

### 3.2.2 – Vareta Combustível

As varetas combustíveis (figura 4 e 5) são, na verdade, tubos sem costura que são confeccionados por um processo chamado *pilgering* que tem por finalidade evitar tensões residuais indesejadas. Essas varetas são os principais componentes feitos de liga de zircônio em um elemento combustível.

Nas varetas são confinadas as pastilhas de  $UO_2$  no núcleo do reator. Basicamente, é uma vareta metálica com formato cilíndrico no qual seu tamanho depende do tamanho do reator e do elemento combustível.

Eles podem chegar até 5 metros de comprimento com aproximadamente 10 milímetros de diâmetro para reatores do tipo PWR. Seu material é de liga especial de zircônio devido a sua transparência aos feixes de nêutrons responsáveis pela fissão do núcleo do urânio, e tem a resistência a corrosão e a abrasão como principais características mecânicas, comuns nesse tipo de material.

Internamente nessas varetas vão as pastilhas de urânio, porém elas não ocupam todo seu volume interno, permitindo assim um vão livre denominado região plenum, lugar este onde os gases são armazenados pela fissão nuclear. Para que as pastilhas

permaneçam em suas posições, existem nessa região uma pastilha extra e uma mola de alumina ( $Al_2O_3$ ), que separa a última pastilha de urânio da mola. Além disso ela é pressurizada com gás hélio, de forma a garantir uma boa condução térmica entre o tudo e as as bordas das pastilhas (CACUCI, 2010).

As varetas combustíveis se fixadas às grades espaçadoras por contato com molas que as prendem contra os batentes, permitindo seu deslocamento axial relativo à estrutura. A Figura 9 mostra um esquema de uma Vareta Combustível.

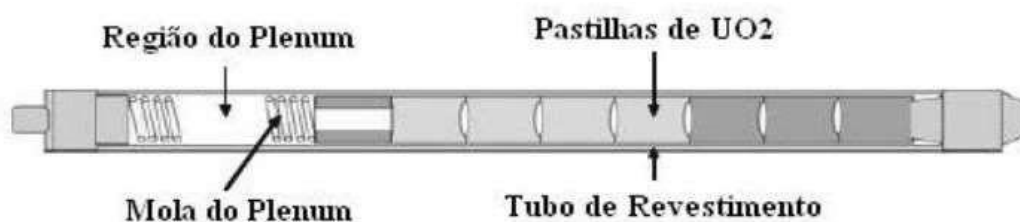


Figura 4 – Vareta Combustível. [29]



Figura 5 – Adaptado de Cacuci (2010).

### 3.3 FRETTING

Um dos principais motivos de falha de varetas combustíveis em reatores PWR (Figura 6) são os atritos entre a grade espaçadora e a vareta combustível. Esses motivos têm sido identificados como força de suporte da vareta insuficiente a projeto impróprio ou problema na fabricação e excessiva vibração da vareta por conta da instabilidade elástica por cross flow no elemento combustível e pelo escoamento do fluido refrigerante.

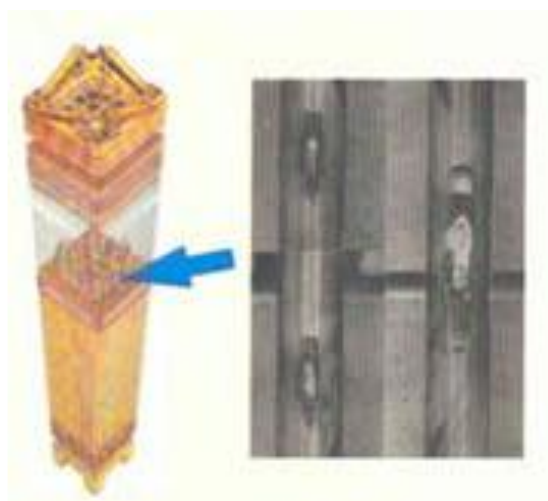


Figura 6 – Desgaste por atrito entre as grades espaçadoras e as varetas em um elemento combustível. Adaptado de [14].

Após testes experimentais (Baêta, 2020) observou-se que foram obtidas marcas nas amostras após ensaio de *Fretting* e que, em todas elas houve a formação das marcas de *Fretting* na forma elíptica semelhante às reportadas (Kim e Lee 2003).

Verifica-se que a perda de massa, assim como a área de desgaste, diminui com o aumento da temperatura de tratamento térmico, demonstrando que as amostras tratadas em maiores temperaturas apresentaram maiores resistências ao desgaste, corroborando os resultados de aumento de propriedades mecânicas de tração e microdureza Vickers.

O atrito por Debris é um tipo de atrito que tem sido a causa das falhas de varetas combustíveis para todos os tipos reatores de potência. Existem vários tipos de Atrito por Debris (fragmento metálico de qualquer espécie perdido na corrente de água do sistema primário do reator) onde circulam o refrigerante do primário, principalmente lascas ou pedaços ou fixações (porca, parafuso, etc.) de componentes estruturais do reator, e que penetram através do bocal inferior e ficam retidos em alguma grade do Elemento Combustível (principalmente as inferiores), atritando na vareta combustível e levando ao seu rompimento. Bocais com filtro anti-debris tem sido utilizado atualmente, o que reduziu bastante a ocorrência de falhas em Elemento Combustível.

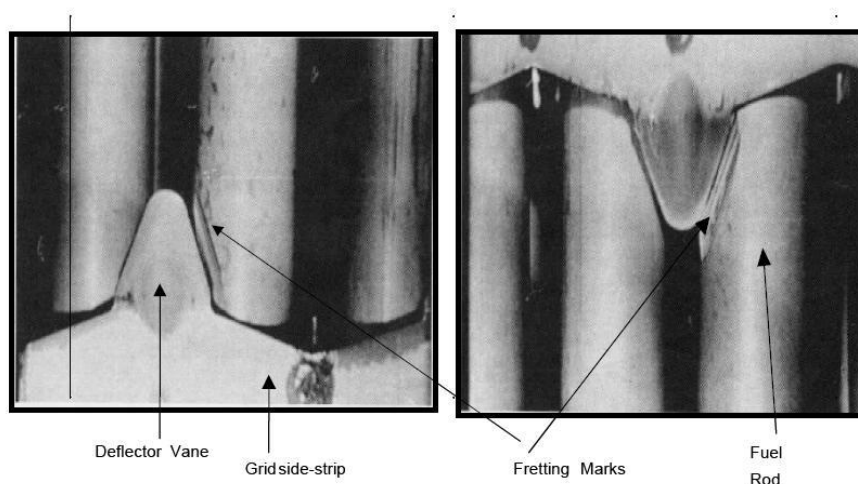


Figura 7 – Desgaste devido ao atrito entre as grades espaçadoras e as varetas.  
Adaptado de [19].

Dos mecanismos de degradação dos mecanismos de varetas combustíveis falhadas em reatores PWR, verificou que a ocorrência de *Fretting* devido ao atrito entre a grade espaçadora e a mola ou varetas ocorre em diferentes localizações do núcleo de Angra I (Castanheira, 2004).

Um estudo realizado pela Westinghouse verificou que 2/3 das falhas encontradas nos combustíveis fabricados entre os anos 1990 e 1997 foram ocasionadas por vários mecanismos de *Fretting* com grade espaçadora (Wilson, 1997). Em 1998, foram identificadas 19 varetas falhadas em 10 elementos combustíveis do PWR North Anna-1 (EUA, 2003) também por *Fretting* com grade. Entre os anos de 1994 e 1997, a Siemens divulgou que os combustíveis PWR de sua fabricação sofreram um acúmulo incidental de falhas por *Fretting* com grade espaçadora: e que apenas na Alemanha, foram 35 elementos combustíveis falhados em 1994 e 44 em 1995, e que a variação nos anos anteriores foi de 4 a 10 elementos combustíveis por ano, o que corresponde a uma taxa de falha a 20 ppm (Zircônio, 2015). Foi estimado que no período 1995-1998, a taxa anual média mundial de falha de varetas combustíveis PWR fora estimada pela IAEA (Monzani, 1989) de 20 ppm devido a *Fretting* grade-vareta.

Os problemas por *Fretting* em elementos combustíveis são representados por um modelo de vibração não linear da vareta de elemento combustível exposta a turbulência do fluido de processo (Rubiolo, 2009).

Os fatores-chaves que ocasionam a ocorrência de *Fretting* entre a vareta e a grade espaçadora de elementos combustíveis durante a operação de PWR é fundamental para o entendimento do referido fenômeno.

Com base nas condições operacionais de elementos combustíveis (Rubiolo e Yong, 2009) analisaram os principais fatores que afetam o risco da ocorrência de desgaste por *Fretting* entre a vareta e a grade espaçadora em elementos combustíveis operados em PWR. A análise faz parte da abordagem global para prever o risco de desgaste por *Fretting*, com base nas condições operacionais de elementos combustíveis. Os resultados das simulações numéricas mostraram que os fatores-chave para a avaliação do risco da ocorrência de *Fretting* em conjuntos de combustível PWR são a folga da grade espaçadora e as forças de turbulência.

Foi investigado (Lee e Kim, 2007) o efeito de diferentes formas de mola sobre a variação das condições de carga e o comportamento ao desgaste de varetas de combustível nuclear durante os testes de desgaste por *Fretting*. Com o aumento dos ciclos, os autores observaram que o comportamento de debris e o mecanismo de desgaste por *Fretting* podem ser alterados por uma variação da condição de contato determinada pela forma da mola. O contato entre a mola e a vareta influencia na evolução do desgaste.



Figura 8 – Marcas de *Fretting* entre mola e vareta combustível após a realização do ensaio experimental.

No caso da mola côncava, as arestas de contato que ocorre devido ao chanfro são consideradas como o local de iniciação e concentração preferível do desgaste. Enquanto que a mola convexa gera uma região de contato mais suave e plana (Lee e Kim, 2007).

Segundo Carrilho, (Carrilho, 2005) o circuito VIPER (Vibration Investigation and Pressure-drop Experimental Research) consiste em um teste de desempenho do elemento combustível, em termos de desgaste por *Fretting*, sob condições severas de escoamento. Os critérios de projetos avaliados incluem profundidade de desgaste para varetas oxidadas e volume de desgaste para varetas não oxidadas. A comparação das formas de contato vareta/grade ora por modelos numéricos baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF) ora por testes experimentais mostram que a metodologia desenvolvida permite uma avaliação satisfatória do contato entre vareta e grade espaçadora com base nos resultados de pressões de contato obtidos a partir de modelos.

A literatura fornece uma descrição das principais características do método de análise de desgaste por *Fretting*, assim como comparações dos resultados de métodos de elementos finitos (MEF) e dados de teste experimentais [23]. Visando otimizar as características do projeto do conjunto do elemento combustível, foram realizados testes hidráulicos na Westinghouse Columbia (EUA) compostos de vários ciclos e observado fenômenos associados às falhas de varetas combustível devido ao desgaste por *Fretting* e debris.

Os ciclos de teste primários são o VISTA para vibração de alta frequência, FACTS para estudos hidráulicos de elementos simples, VIPER para testes de desgaste a longo prazo (Rabenstein, 2004).

Inúmeros estudos experimentais e numéricos relacionados ao estudo da ocorrência de desgaste por *Fretting* em elementos combustíveis utilizados em reatores do tipo PWR (Rubiolo, 2009 / Lee, 2007 / Carrilho, 2005 / Rubiolo, 2004 / Vásquez, 2012) inclusive sobre a geometria da grade espaçadora e da mola, das forças atuantes durante a operação do reator e do grau de liberdade das varetas de combustível nuclear, bem como a realização de tratamentos térmicos e mecânicos nos materiais que compunham o elemento combustível, demonstrando que o efeito de tensões residuais de compressão e de melhoramento das condições superfícies resultam num

aumento da vida em fadiga. A Figura 3.6 mostra um exemplo de dispositivo para realização de testes de fadiga superficial do tipo *Fretting*.

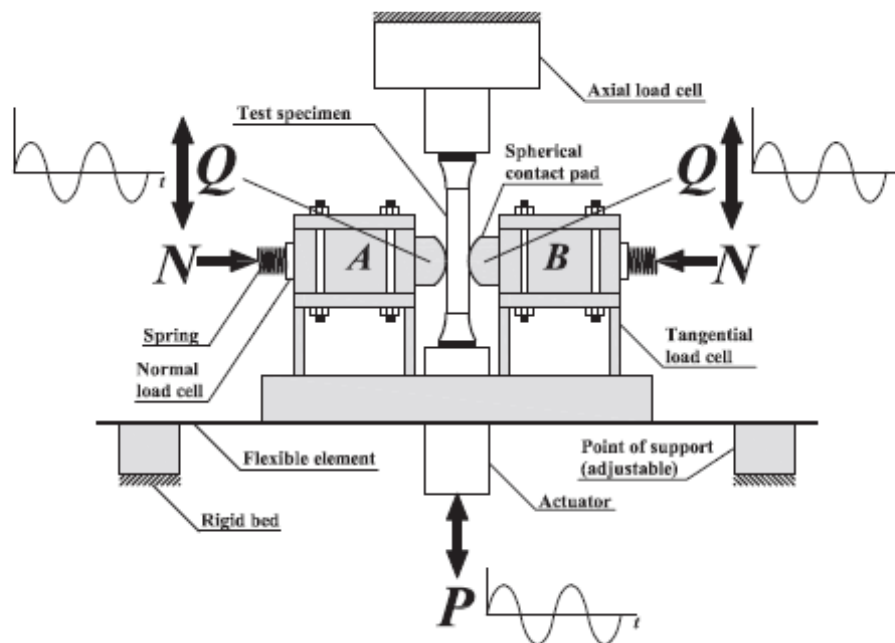


Figura 9 – Dispositivo para realização de testes de fadiga superficial do tipo *Fretting* (Vásquez, 2012).

Attia (Attia, 2006) apresentou que a resistência ao desgaste por *Fretting* da liga Zr-2,5%Nb pode ser melhorada por tratamento de superfície a laser e, em menor extensão, através de trabalho a frio.

Monitoramento em tempo real da resposta ao *Fretting* para as alterações induzidas pelo processo de deformação/desgaste apresentam valiosas informações quanto ao mecanismo de *Fretting* e características do processo. O dispositivo utilizado por Attia (Attia, 2006) (figura 3.7) para realização desses testes de desgaste superficial por *Fretting* garantia que a frequência e a amplitude do movimento oscilatório, a carga normal aplicada, bem como as condições ambientais de temperatura permaneceram constantes durante a realização do teste. Attia (Attia, 2006) concluiu que o mecanismo de desgaste por *Fretting* da liga Zr-2,5% Nb é fortemente dependente da amplitude de deslizamento, conclui seus resultados. Em pequenas amplitudes, as perdas de desgastes volumétricas são de natureza cíclica devido à concorrência e interação entre os mecanismos de desgastes abrasivo e adesivo, e a contribuição do desgaste adesivo torna-se insignificante em grandes amplitudes.

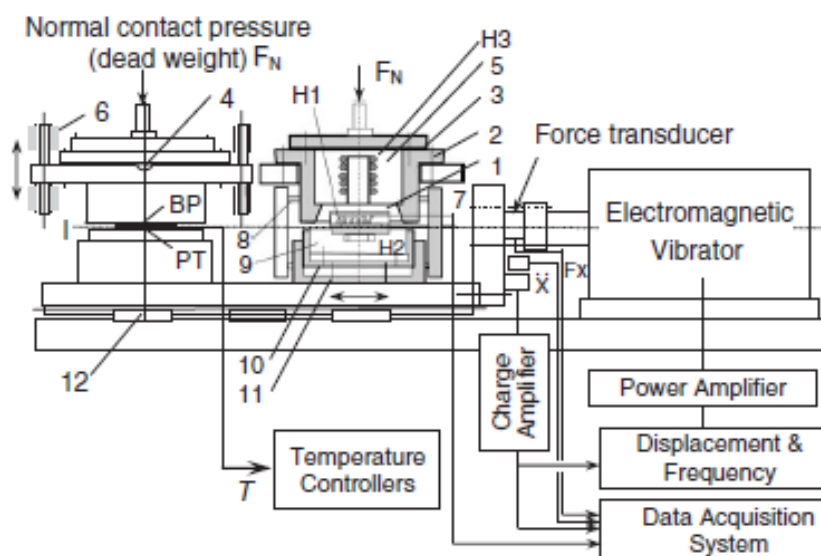


Figura 10 – Dispositivo de testes de fadiga superficial *Fretting* (Attia, 2006).

### 3.4 Zr-1Nb e Zr-Nb-1Sn-0,1Fe E SUAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS

Afim de elevar a resistência da liga são utilizados alguns elementos intersticiais com alta solubilidade na fase alfa como o nitrogênio e o oxigênio. Entretanto outros elementos também conferem uma boa resistência mecânica como o alumínio e o estanho, os quais mostram apreciável solubilidade da fase alfa.

Os elementos de liga podem ser classificados quanto ao efeito na resistência sob elevada temperatura em: elementos que tendem a aumentar a temperatura de transformação  $\alpha - \beta$  do zircônio; aqueles que tendem a diminuir essa temperatura e elementos não metálicos considerados impurezas no zircônio.

Entre as ligas de zircônio, as que contém alumínio estão entre as de maior resistência, entretanto o alumínio é dos que mais prejudicam a resistência à oxidação do zircônio, além do que o háfnio é um absorvedor de nêutrons nesse primeiro grupo onde estão o Al, Hf e Sn. Uma liga cuja a resistência é alta e considerada umas das ligas mais promissoras é a de Zr-Sn, exatamente pela boa resistência ao impacto e de excelente ductibilidade.

Entre os elementos que tendem a reduzir a temperatura de transformação estão o Cr, Cu, Nb, Ni, Ti e Fe. Com a têmpera a partir da fase beta, as ligas com estes elementos podem ser endurecidas, quando o teor do elemento é elevado, da ordem de 9% e retendo-a na temperatura ambiente.

Em relação aos elementos ligantes não metálicos, estão o O, H, N, Si e C. Os estudos apontam que os efeitos no zircônio são danosos e que o oxigênio e o nitrogênio favorecem a resistência mecânica em temperatura ambiente, porém são bem satisfatórios quando acima de 300 °C.

Para uma avaliação mais efetiva das ligas de zircônio são utilizados os parâmetros quanto a resistência mecânica e a dureza.

Através de testes de envelhecimento termo-mecânico realizados em temperaturas diversas em amostras de Zr-1,5Nb-0,4Sn-0,2Fe apontam que as tratadas termicamente apresentaram valores de tração/deformação maiores que as amostras não tratadas (Lee, 2007). Ainda neste mesmo estudo revelou que as amostras que passaram por tratamento térmico apresentaram um retardo em seu envelhecimento quando comparadas com as amostras que não foram tratadas.

Os reatores do tipo PWR operam a temperaturas entre 290-360°C e uma pressão de cerca de 15 MPa. Entretanto, os elementos combustíveis estão preparados para suportar de 30 a 40°C de temperatura mais elevada do que a do líquido de arrefecimento e uma tensão tão elevada tal como 120MPa. Pressões maiores que a pressão de trabalho podem ser observadas durante a operação de um PWR por influência da pressão do líquido refrigerante externo, vibração, pressão interna da interação dos gases liberados pela fissão e o elemento combustível, LOCA, entre outras. Sendo assim, é de extrema importância para a confiabilidade e segurança do reator que uma minuciosa avaliação das propriedades das ligas de zircônio em diversas temperaturas seja realizada.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 MATERIAL

A Tabela 3 mostra a composição química (% em peso) da liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe (Baêta, 2020). Estes resultados foram determinados por meio da técnica de fluorescência de raios X no Laboratório de Caracterização Química da EEL/USP.

Tabela 3. Composição química da liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe. (Baêta, 2020).

| Elemento | Nb   | Sn  | Fe   | Zr      |
|----------|------|-----|------|---------|
| (% peso) | 1,03 | 1,0 | 0,11 | Balanço |

Com a finalidade de aprimorar a resistência ao desgaste por *Fretting* da liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe, foram preparadas amostras de varetas combustíveis que passaram por encapsulamento a vácuo (pressão de  $10^{-2}$  bar) em tubos de quartzo com 10 mm de diâmetro, utilizando fluxo de argônio, no Laboratório de Fornos da EEL/USP. Os tratamentos térmicos foram conduzidos em um forno Brasimet K 250 NZ, com potência de 8 kW, às temperaturas de 580 °C, 630 °C, 830 °C e 960 °C, durante um período total de 4 horas, seguidos por resfriamento em água para preservar as características microestruturais típicas das elevadas temperaturas. A seleção dessas faixas térmicas teve como base os diagramas de fases teóricos dos sistemas Zr-Nb e Zr-Sn, permitindo

a investigação das fases e dos precipitados formados, os quais são diretamente responsáveis pelas propriedades finais observadas nesses materiais.

No caso da liga em análise, a avaliação dos diagramas teóricos com base nas proporções mássicas de estanho (Sn) e nióbio (Nb) permite a identificação das fases que se formam nas temperaturas de tratamento térmico aplicadas. Com base nessa análise, é possível prever com confiabilidade as fases presentes nas respectivas condições térmicas utilizadas, são elas:

- 580 °C:  $\alpha$ Zr,  $\beta$ Nb e ZrFeNb
- 630 °C:  $\alpha$ Zr,  $\beta$ Zr e ZrFeNb
- 830 °C:  $\alpha$ Zr e  $\beta$ Zr
- 960 °C:  $\beta$ Zr

Em termos de propriedades mecânicas, os modelos de elementos finitos a serem desenvolvidos utilizarão também os resultados obtidos (Baêta, 2020) por meio de ensaios de tração uniaxial conduzidos a frio, mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Composição química da liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe (Baêta, 2020) .

| Temperatura (°C) | $\sigma_y^{0,2\%}$ (MPa) | $\sigma_t$ (MPa) | L (%) |
|------------------|--------------------------|------------------|-------|
| Como recebida    | 603                      | 754              | 21,00 |
| 580 °C/4h        | 619                      | 829              | 20,83 |
| 630 °C/4h        | 624                      | 831              | 15,93 |
| 830 °C/4h        | 633                      | 836              | 14,17 |
| 960 °C/4h        | 637                      | 882              | 9,46  |

Onde  $\sigma_y^{0,2\%}$ ,  $\sigma_t$  e L denotam limite de escoamento, limite de ruptura e alongamento total, respectivamente.

## 4.2 DESENHO VIA CAD

A metodologia a ser utilizada para obtenção dos resultados serão apresentados a seguir. Todos os experimentos foram realizados na Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, da Universidade Federal Fluminense – EEIMVR/ UFF.

Inicialmente foi utilizado o escaneamento 3D por varredura com o braço de medição da Hexagon na grade espaçadora, e para a compilação dos resultados obtidos pelo braço de medição foi utilizado o software Polyworks.

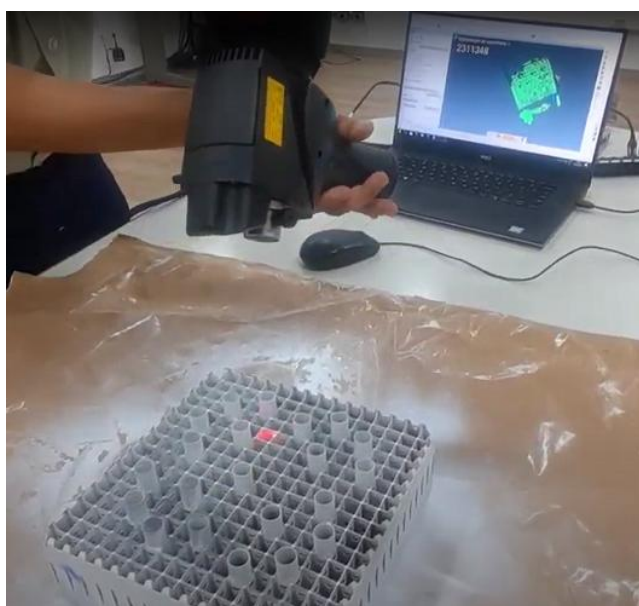


Figura 11 – Escaneamento por varredura da Grade espaçadora.

Após o escaneamento, foi necessário realizar o tratamento do modelo, realizando a correção dos erros carregados pelo escâner. O recurso utilizado para essa correção foi o software CATIA e o AutoCad, onde o arquivo gerado foi extraído em um formato que permita os testes de simulação computacional do modelo 3D a serem realizados no software Ansys para que a análise via Método dos Elementos Finitos fosse feita. Esta análise seria dividida em três momentos, a saber: a inserção da vareta de combustível em uma das células da grade espaçadora, a aplicação da pressão de trabalho e, por fim, aplicação do *Fretting*.

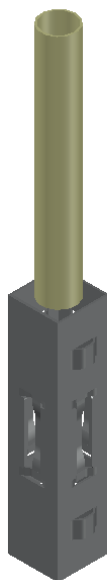


Figura 12 – Modelo de uma célula da grade espaçadora e da vareta de combustível feita em CAD.

## 4.2 MODELAMENTO VIA ELEMENTOS FINITOS

O modelamento foi desenvolvido via elementos finitos com a utilização do software Ansys onde será submetido a simulação de uma célula da grade do modelo 3D visando diminuir o custo computacional.

Nesta célula será aplicado o deslocamento da vareta em contato com as paredes à 0,07 mm para ida e para volta, visando a obtenção dos resultados de desgaste ao longo desta vareta. Este deslocamento realizou um atrito que gerou uma marca ao longo da vareta, onde foi realizado nosso objeto de estudo.

Como pontos focais de estudo deste modelo podemos ressaltar na parte interna da célula as molas e batentes, não só a geometria internamente, como a disposição delas ao longo da grade. Isso é importante porque os batentes e as molas têm a geometria perpendiculares entre si.



Figura 13 – Modelo 3D de uma única célula com detalhes de molas e batentes.

Para efeito de estudo do modelo, foi estabelecido que não haverá necessidade de simular toda a grade, onde a célula terá seu movimento restringido nas paredes externas e em condição de simetria com as paredes internas.

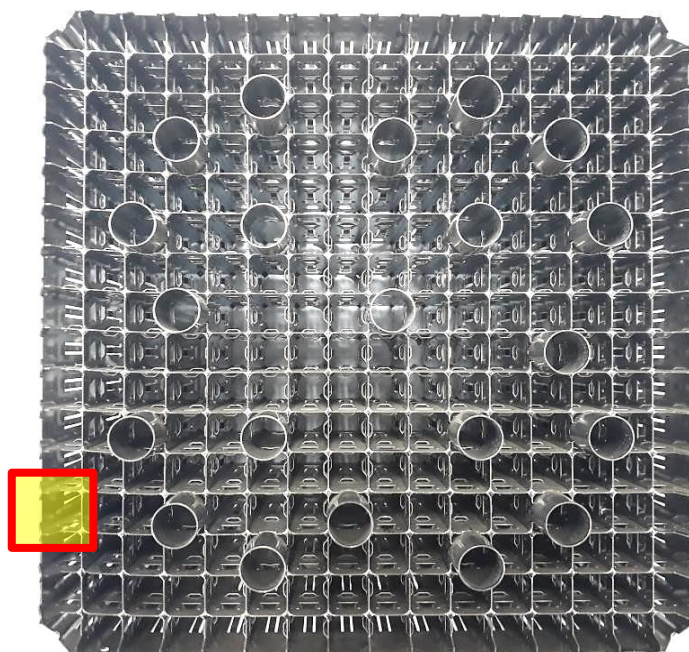


Figura 14 – Grade espaçadora, em destaque a célula simulada.

## 4.3 MODELO 3D

### 4.3.1 – Material (vareta e grade): Liga Zirlo

A compreensão das propriedades da liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe é essencial para a avaliação do seu desempenho sob condições operacionais simuladas de reatores nucleares do tipo PWR. Os parâmetros apresentados a seguir foram adotados com base em resultados experimentais.

A densidade da liga foi determinada como 6.560 kg/m<sup>3</sup>. Essa propriedade física é fundamental para análises de transferência de calor, cálculos de massa dos elementos combustíveis e modelagem estrutural dos componentes envolvidos no processo de geração de energia nuclear.

Quanto ao módulo de elasticidade (E) da liga, adotamos como 100.000 MPa, indicando a rigidez do material e sua capacidade de resistir a deformações elásticas quando submetido a tensões. Esse valor é compatível com ligas à base de zircônio utilizadas em aplicações nucleares, onde estabilidade dimensional é um fator crítico.

O coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), adotado como 0,30, expressa a relação entre a deformação lateral e longitudinal quando o material é tracionado. Essa constante é relevante para a modelagem numérica em elementos finitos, especialmente nas análises tridimensionais de comportamento termomecânico.

E por fim, quanto à resistência mecânica onde o limite de escoamento convencional, definido para uma deformação plástica de 0,2%, foi de 573,4 MPa. Esse valor  $\sigma_y^{0,2\%}$ , representa a tensão mínima necessária para provocar escoamento permanente sob carregamento uniaxial, sendo um parâmetro fundamental para avaliar a integridade da liga em função das solicitações mecânicas típicas de operação em ambiente nuclear.

A combinação dessas propriedades fornece a base para o desenvolvimento de modelos numéricos que representem adequadamente o comportamento da liga sob condições reais, incluindo o desgaste por *Fretting*, fenômeno crítico para a durabilidade de varetas combustíveis e grades espaçadoras.

$$\rho = 6560 \frac{kg^3}{m} = 6,56 \times 10^{-3} \frac{g}{mm^3}$$

$$E = 100000 MPa$$

$$\nu = coef. Poisson = 0,3$$

$$\sigma_y^{0,2\%} = 573,4 MPa$$

#### 4.3.2 – Modelamento por elementos finitos:

Grade: Elemento shell 281 com 2mm de aresta

Vareta: Elemento solid 186

#### 4.3.3 – Condições de contorno:

A célula representada utilizada na simulação foi submetida a condições de contorno do tipo engaste, por meio das quais seus graus de liberdade foram completamente restringidos nas direções X e Y. Isso significa que os deslocamentos translacionais ( $U_x$  e  $U_y$ ), bem como as rotações associadas aos eixos X e Y ( $Rot_x$  e  $Rot_y$ ), foram anulados. Tal abordagem visa reproduzir, de forma simplificada (figura 15), uma condição de fixação rígida, garantindo estabilidade ao modelo e representando um cenário em que a geometria foi impedida de se movimentar ou girar nesses dois eixos coordenados.

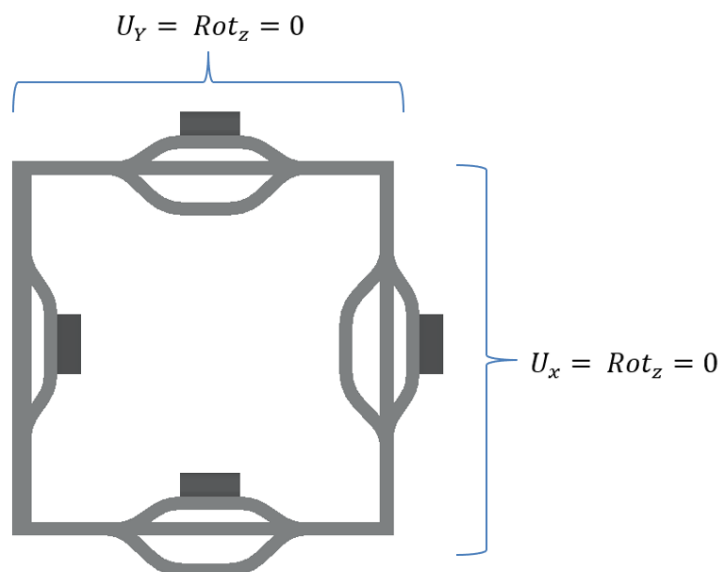


Figura 15 – Célula simulada com engaste com deslocamentos e rotações para X e Y = 0.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos em cada uma das simulações descritas anteriormente.

Os resultados esperados desta simulação visam validar o modelo que fora realizado anteriormente através de ensaios experimentais (Baêta, 2020), sendo assim reproduzir através dos recursos CAD e CAE de forma obter a validação desses modelos numéricos que representem o seu comportamento estrutural quando em operação em uma usina nuclear.

### 5.1 Validação dos testes experimentais através da simulação

O objetivo principal de se realizar uma simulação numérica é que os resultados computacionais se aproximem o máximo possível de resultados experimentais ou teóricos. No presente trabalho, os resultados computacionais foram comparados com os resultados teóricos correspondentes.

A Figura 16 mostra as marcas obtidas nas amostras após ensaio de *Fretting*, e a figura ao lado apresenta os testes computacionais que validados pelos testes experimentais.

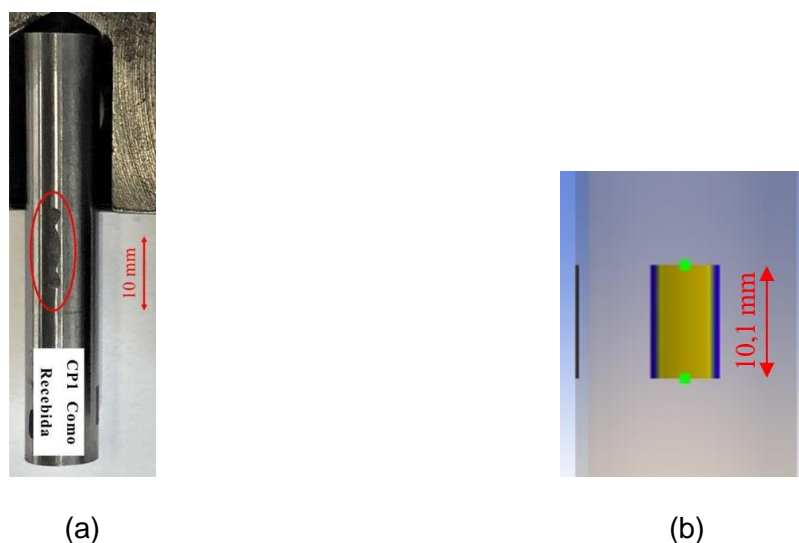


Figura 16 – (a) Marcas de *Fretting* entre a mola e a vareta combustível após a realização do ensaio experimental e (b) Marcas de *Fretting* entre a mola e a vareta combustível após a realização da simulação computacional.

Conforme pode ser observado no gráfico apresentado na Figura 17, foi identificado que, para uma superfície de desgaste com comprimento de 10 mm, foi encontrado um coeficiente de atrito de aproximadamente 0,24, valor compatível com os resultados previamente obtidos nos testes experimentais de aproximadamente 0,20.

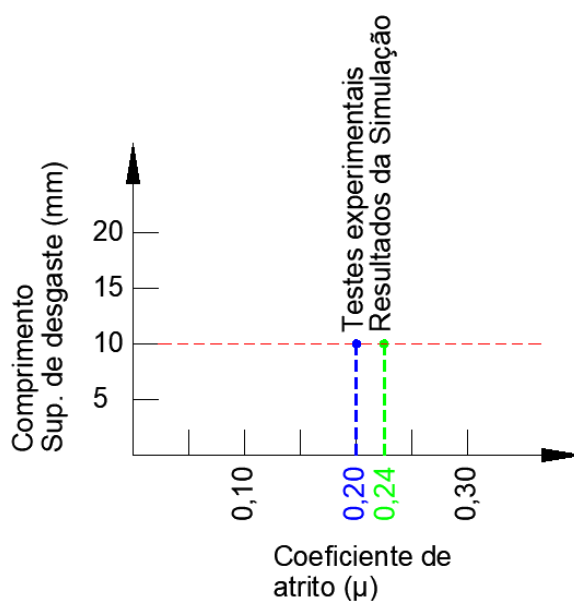


Figura 17 – Gráfico com a relação entre os testes experimentais com a simulação.

## 5.2 Cargas atuantes sobre molas e batentes da grade espaçadora

Como pontos focais de estudo deste modelo foi utilizado a parte interna da célula as molas e batentes, não apenas a geometria interna, como a disposição delas ao longo da grade. Sua importância é pelo fato que os batentes e as molas tem a geometria perpendiculares entre si. Proporcionando realizar uma análise sobre a razão pela qual a variável de pressão de contato entre o tubo e a mola são dependentes, ou seja, elas dependem do atrito conforme mostrado na figura 18.

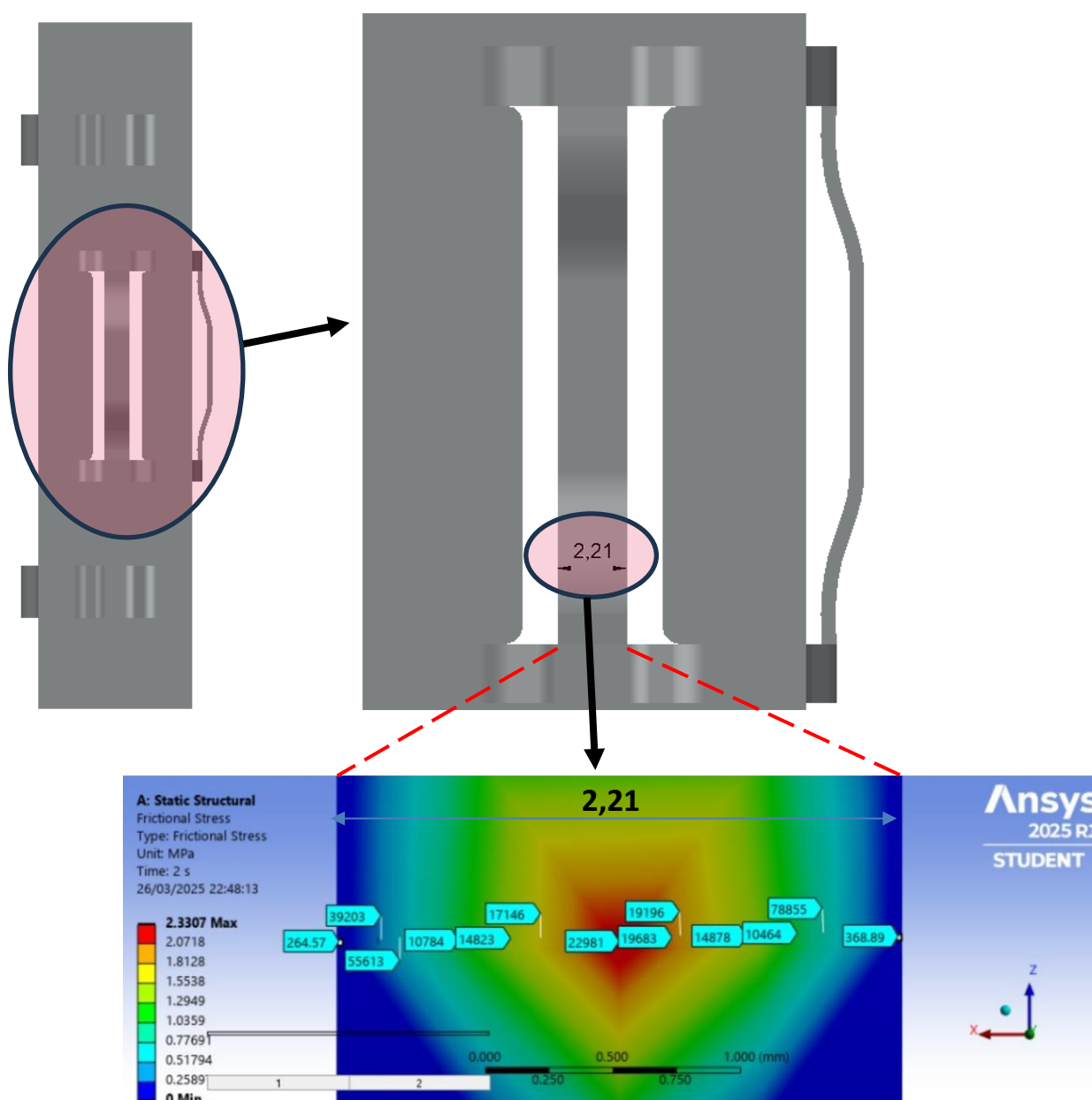


Figura 18 – Gráfico com a relação entre os testes experimentais com a simulação.

A tabela 05 mostra os resultados do teste de convergência para o modelo de contato entre vareta e as molas. Onde é possível correlacionar a pressão de contato do tubo ao longo do comprimento da mola.

Tabela 5. Resultados do teste de convergência para o modelo de contato entre vareta e as molas

| Comprimento da mola (mm) | $\mu = 0,05$ | $\mu = 0,1$ | $\mu = 0,15$ | $\mu = 0,2$ | $\mu = 0,25$ | $\mu = 0,3$ | $\mu = 0,35$ | $\mu = 0,4$ | $\mu = 0,45$ | $\mu = 0,5$ |
|--------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| <b>0,17</b>              | 264,57       | 478,07      | 18783        | 12958       | 6626         | 1134        | 1334         | 1453        | 1657         | 1472        |
| <b>0,34</b>              | 10464        | 11704       | 19282        | 25534       | 10979        | 12987       | 5412         | 9405        | 10209        | 11788       |
| <b>0,51</b>              | 14823        | 18403       | 27804        | 43808       | 29739        | 37171       | 9359         | 11849       | 12532        | 16194       |
| <b>0,68</b>              | 17146        | 26133       | 37438        | 58013       | 31979        | 39453       | 11116        | 13078       | 14317        | 18327       |
| <b>0,85</b>              | 19683        | 31817       | 47006        | 64704       | 58042        | 66244       | 12815        | 43469       | 19311        | 21285       |
| <b>1,02</b>              | 39203        | 38295       | 58678        | 74825       | 79419        | 73453       | 44174        | 52334       | 54554        | 54262       |
| <b>1,19</b>              | 78855        | 63799       | 92875        | 89189       | 92233        | 95699       | 88105        | 91163       | 97887        | 61294       |
| <b>1,36</b>              | 55613        | 44935       | 67061        | 74847       | 80368        | 94567       | 46087        | 61377       | 85805        | 59967       |
| <b>1,53</b>              | 22981        | 34167       | 49886        | 68153       | 74433        | 69294       | 15138        | 47896       | 36016        | 51763       |
| <b>1,7</b>               | 19196        | 27121       | 41121        | 62983       | 57748        | 62908       | 11302        | 17262       | 15954        | 19056       |
| <b>1,87</b>              | 14878        | 22561       | 29217        | 47486       | 30592        | 37718       | 10077        | 12659       | 13752        | 16481       |
| <b>2,04</b>              | 10784        | 13643       | 20431        | 26129       | 23187        | 30196       | 8086         | 10843       | 10518        | 14361       |
| <b>2,21</b>              | 368,89       | 2015        | 18993        | 20595       | 9527         | 11085       | 4474         | 1591        | 5421         | 10747       |

A figura 19 mostra os resultados de pressão de contato, possibilitando listar os resultados e gerar o gráfico. Fazendo uma sobreposição da simulação no gráfico facilita o entendimento do trabalho realizado na mola ao longo do seu comprimento.

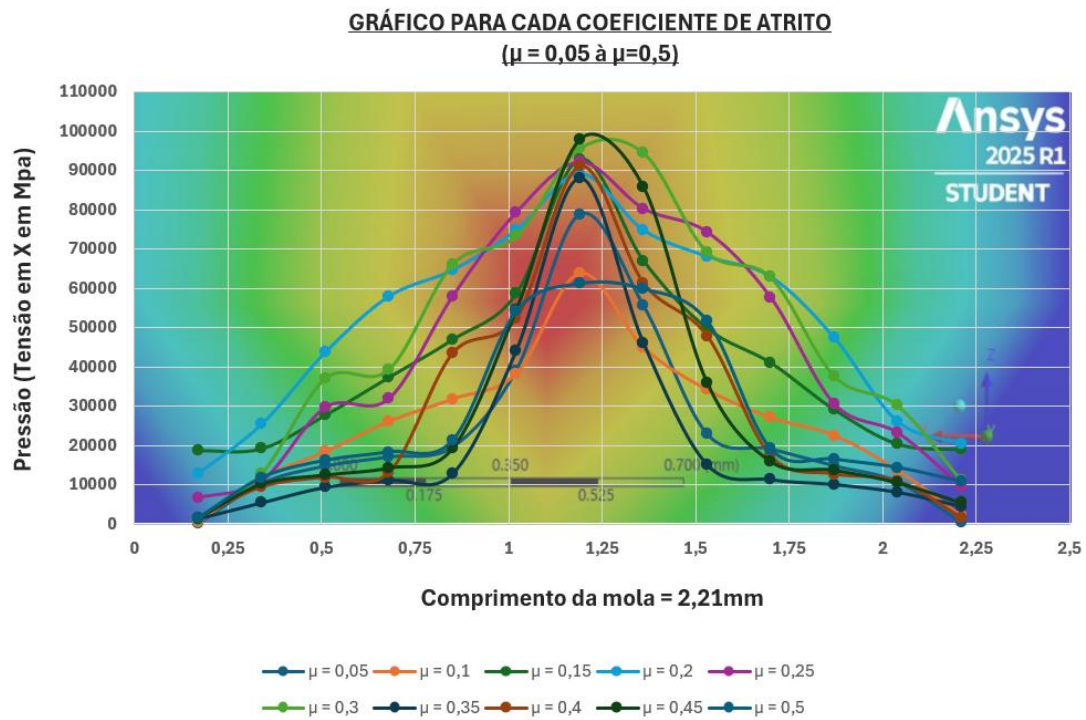
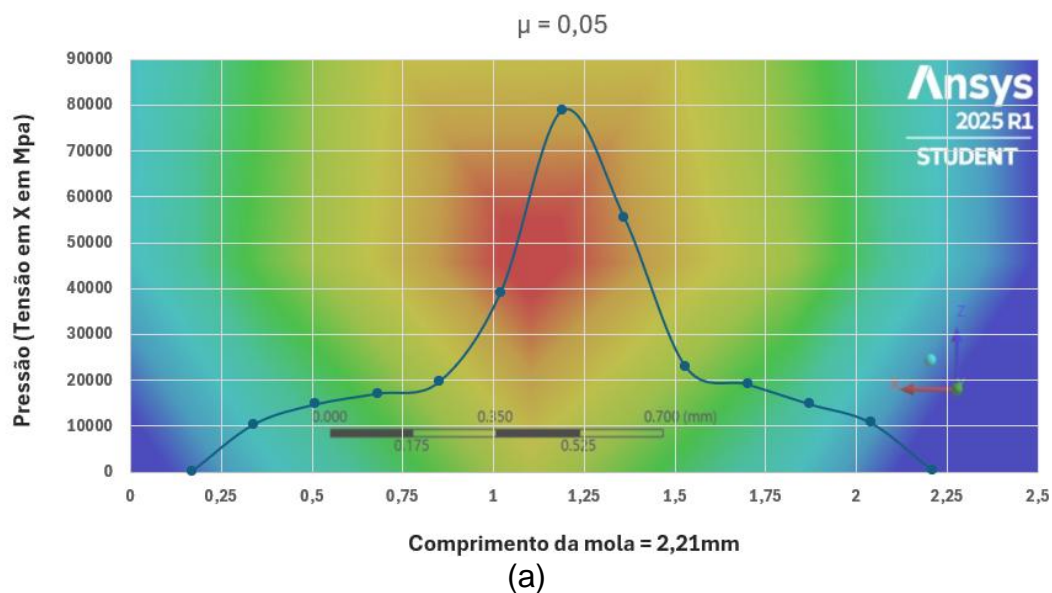
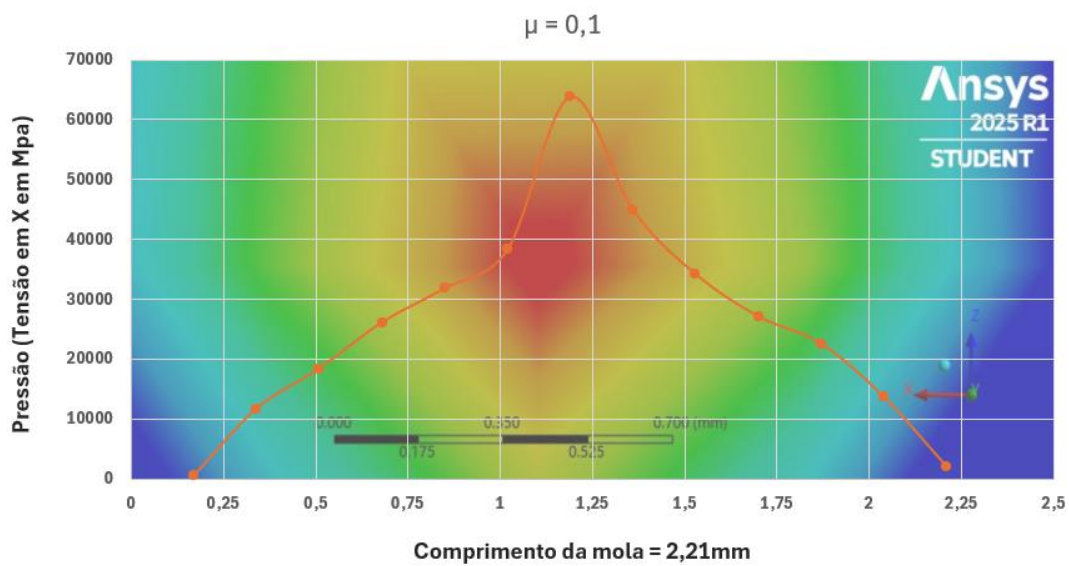


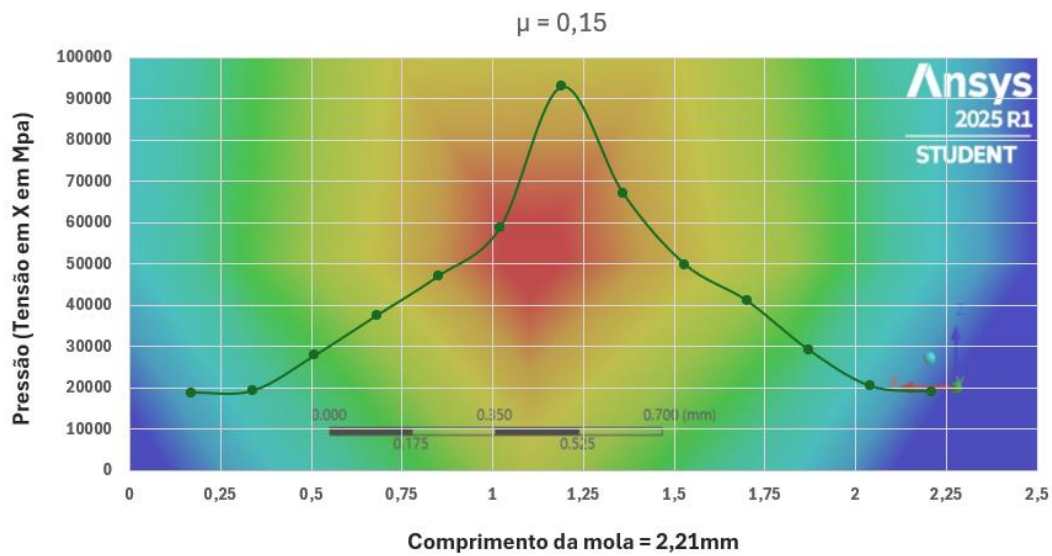
Figura 19 – Gráfico de pressão ao longo do comprimento da mola.

Também é possível observar que, mesmo com a variação do coeficiente de atrito não há mudanças significativas nas características do contato avaliadas nesta etapa do trabalho.

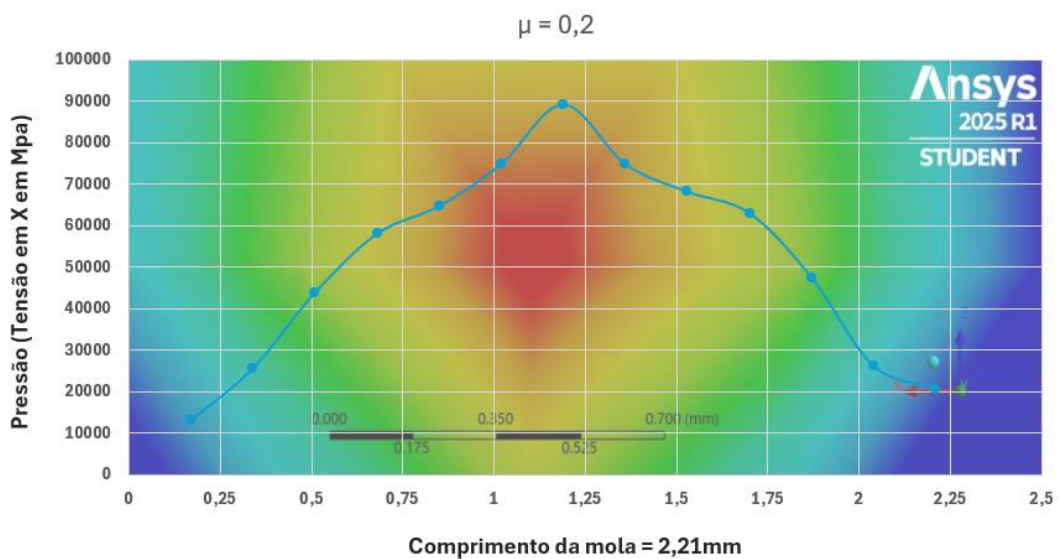




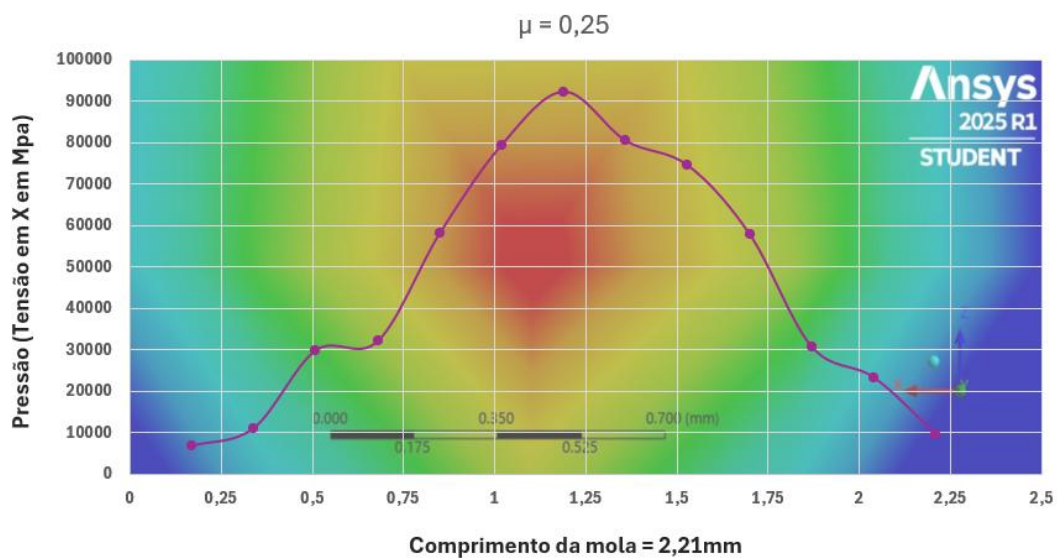
(b)



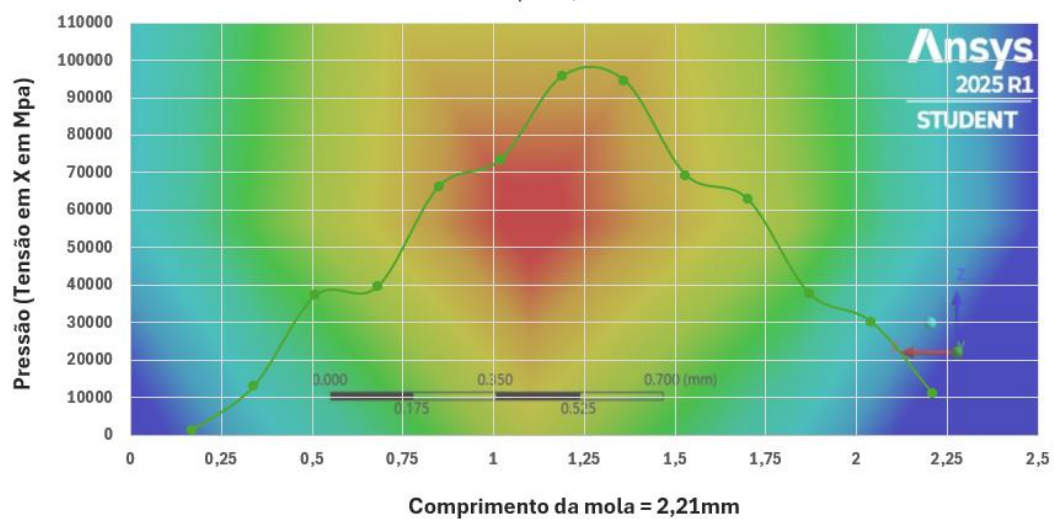
(c)



(d)

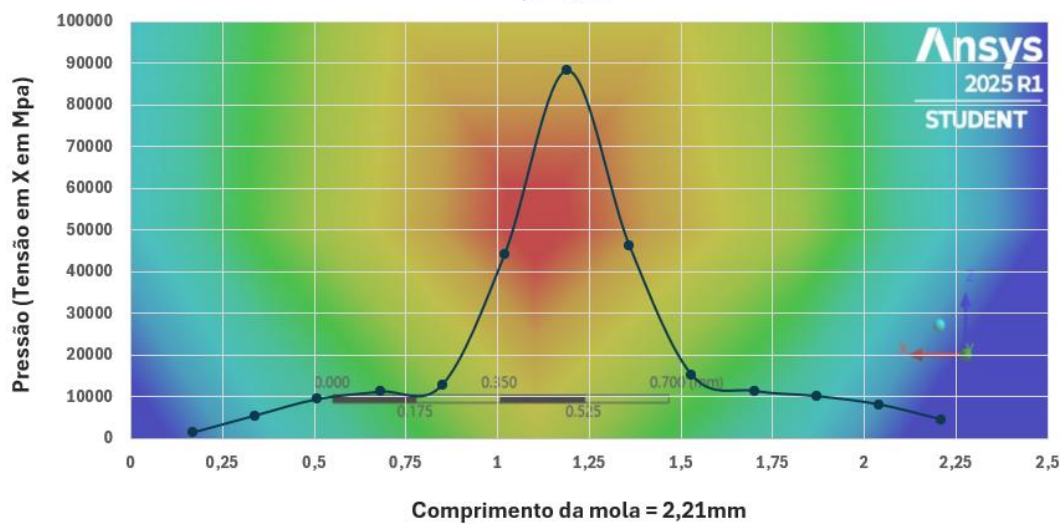


(e)  
 $\mu = 0,3$

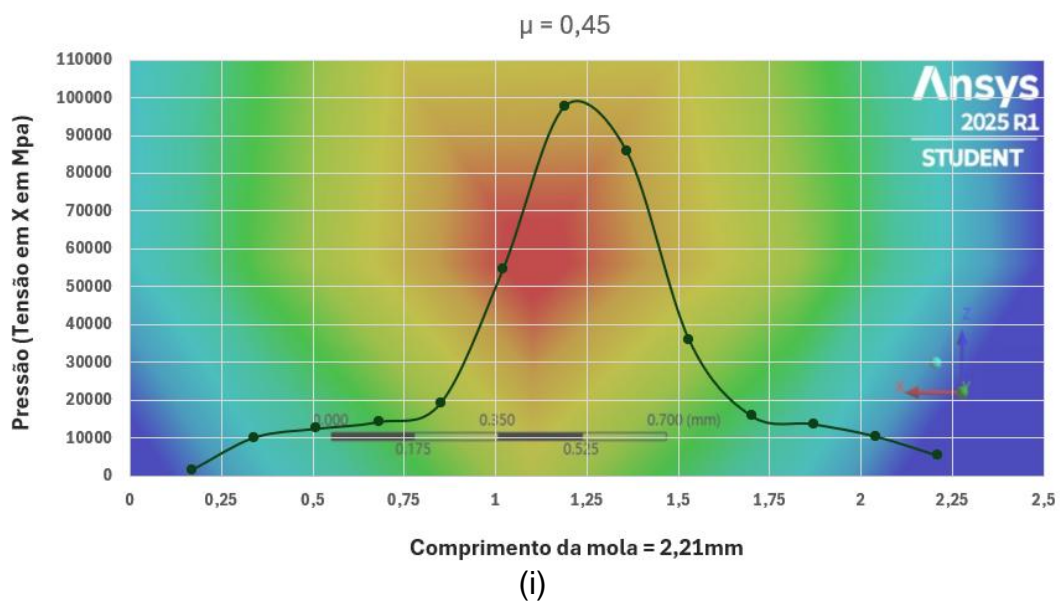
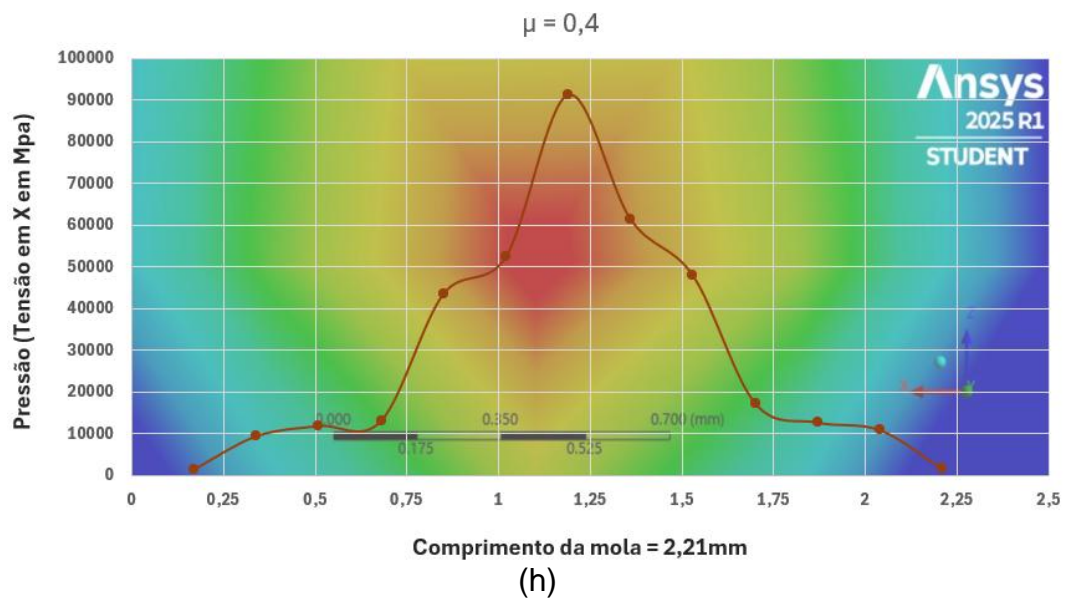


(f)

$\mu = 0,35$



(g)



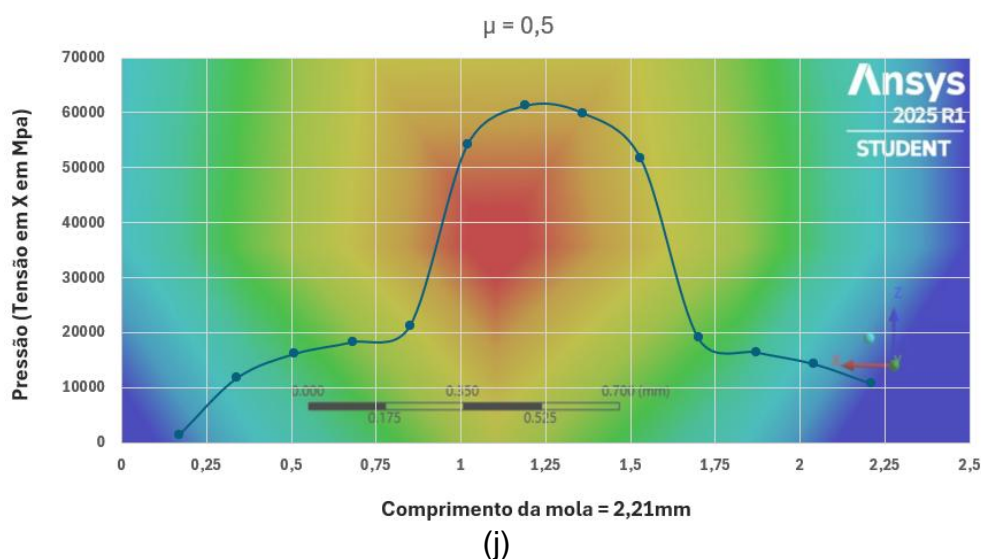


Figura 20 – Distribuição de pressão do tamanho do contato ao longo da mola: (a)  $\mu = 0,05$  / (b)  $\mu = 0,1$  / (c)  $\mu = 0,15$  / (d)  $\mu = 0,2$  / (e)  $\mu = 0,25$  / (f)  $\mu = 0,3$  / (g)  $\mu = 0,35$  / (h)  $\mu = 0,4$  / (i)  $\mu = 0,45$  / (j)  $\mu = 0,5$ .

### 5.3 Interpretação dos resultados

A partir dos resultados apresentados na tabela 05, é possível verificar que a variação de deslocamento não provoca uma variação significativa nas características analisadas para a pressão e ao longo do comprimento da mola, variando o atrito entre **0,05 à 0,5 ( $\mu$ )**, onde a maior variação só é observada nos valores do tamanho da zona de aderência.

A escolha do intervalo de coeficiente de atrito entre  $\mu = 0,05$  e  $\mu = 0,5$  foi fundamentada tanto em dados experimentais da literatura quanto em observações práticas de testes de desgaste por *Fretting* realizados com ligas de zircônio em contato com elementos estruturais típicos de reatores PWR. Esse intervalo contempla uma ampla faixa de condições, abrangendo desde situações de atrito lubrificado ou inicial (valores próximos de 0,05), até cenários de contato mais severo, com desgaste acentuado e degradação superficial (valores próximos de 0,5) e também sob critério máximo permitido para o coeficiente de atrito por Von Mises = 0,577 (atrito de agarramento).

Além disso, a variação sistemática do coeficiente de atrito dentro desse intervalo permitiu avaliar, de forma parametrizada, a sensibilidade do modelo às condições de

contato. Isso contribuiu diretamente para a identificação de regimes críticos de transição entre deslizamento parcial e completo, aspectos fundamentais na análise do desgaste por *Fretting*.

A adoção desse range também está alinhada com estudos de referência, como os de Baêta (2020), os quais demonstram que, dependendo da rugosidade superficial, da presença de óxidos, da temperatura e do histórico de carga, o coeficiente de atrito em ligas de zircônio pode variar significativamente dentro dessa faixa.

Portanto, a aplicação desse intervalo no modelo numérico garantiu uma análise robusta e representativa, permitindo simulações mais aderentes à realidade operacional das varetas combustíveis, mesmo diante das limitações naturais de simplificação do modelo computacional.

Esta variação pode ser explicada porque, de acordo com Vingsbo and Söderberg (1988), as condições de *Fretting* mudam à medida que a amplitude do deslocamento aumenta.

Uma das principais dificuldades enfrentadas foi contornar a limitação comparativa, em que os resultados das simulações numéricas foram constantemente validados com dados experimentais previamente publicados (especialmente os obtidos por Baêta, 2020). Essa análise de dados permitiu identificar padrões consistentes, como a influência crescente do coeficiente de atrito na extensão da área de desgaste e na concentração de tensões. Além disso, a utilização de uma faixa ampla de coeficiente de atrito ( $\mu = 0,05$  a  $0,5$ ), aplicada de forma sistemática nas simulações, auxiliou na filtragem dos resultados e reforçou a robustez da análise.

Por fim, vale destacar que, a consistência entre as tendências identificadas nas simulações e os dados experimentais disponíveis reforçam a confiabilidade da interpretação dos resultados obtidos.

## 5.4 Aplicação Prática

Os resultados obtidos nesta pesquisa têm aplicação direta tanto no contexto industrial quanto acadêmico. Em ambiente industrial, especialmente no setor nuclear, os modelos numéricos desenvolvidos podem ser utilizados como ferramentas de apoio para o dimensionamento e otimização de componentes de elementos combustíveis, considerando os efeitos do desgaste por *Fretting*. Isso permite antecipar falhas

mecânicas, aprimorar o desempenho dos materiais e aumentar a segurança e a eficiência dos reatores do tipo PWR.

Além disso, os dados de simulação podem ser integrados a ciclos de projeto de novos combustíveis nucleares, oferecendo subsídios para, ao utilizar o modelo proposto, é possível avançar para estudos subsequentes por meio de alterações na geometria da mola ou no material utilizado.

Embora a célula tenha sido simulada, a grade também pode ser simulada, permitindo modificações, como a substituição de uma vareta na posição proposta ou a inclusão de mais varetas, o que resultaria em um aumento da massa do modelo e, conseqüentemente, em uma maior rigidez. Essa abordagem possibilita a análise da influência de um modelo mais rígido, configurando uma continuidade para o desenvolvimento do trabalho.

Ainda no campo acadêmico, o trabalho contribui para a validação de abordagens computacionais aplicadas a ligas metálicas utilizadas em ambientes extremos, promovendo o avanço no uso de métodos de elementos finitos para fenômenos complexos como o *Fretting*. A abordagem paramétrica empregada também pode servir como referência para estudos semelhantes em outras ligas ou componentes estruturais.

## 6 CONCLUSÕES

Com base nas simulações realizadas para a investigação do fenômeno de *Fretting* na interface entre a vareta de combustível e a grade espaçadora do elemento combustível, foram obtidas as seguintes conclusões:

- (1) Os resultados numéricos apresentados mostraram que é possível verificar que a variação de deslocamento não provoca uma variação significativa nas características analisadas para a pressão e, ao longo do comprimento da mola, variando o atrito entre 0,05 à 0,5 ( $\mu$ ), onde a maior variação só é observada nos valores do tamanho da zona de aderência.
- (2) Esta variação pode ser explicada porque, de acordo com Vingsbo and Söderberg (1988), as condições de *Fretting* mudam à medida que a amplitude do deslocamento aumenta.
- (3) Para efeitos de desenvolvimento e validação dos modelos numéricos propostos foram utilizados os resultados de caracterização mecânica e microestrutural obtidos por Baêta, 2020 para varetas combustíveis fabricadas a partir de uma liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe submetidas a ensaios de desgaste por *Fretting*.
- (4) Algumas alterações, ainda que pequenas, podem trazer resultados em largas proporções e, por isso, o modelamento tridimensional da grade espaçadora e das varetas de combustível podem e devem ser utilizado no aumento da assertividade e maior precisão do projeto do elemento combustível.
- (5) Os resultados obtidos demonstraram coerência com os valores esperados, considerando as dimensões da região de contato, ainda que pequenas discrepâncias tenham sido observadas.

- (6) A análise da variação do coeficiente de atrito, conduzida para dez diferentes valores, indicou que essa variável não exerceu influência significativa no comportamento global do sistema.
- (7) As simulações evidenciaram que os parâmetros de contato sofreram modificações, especialmente no que se refere à pressão máxima de contato, a qual apresentou uma redução substancial.
- (8) O aumento da amplitude do deslocamento cíclico resultou na variação da extensão da zona de aderência, conforme previsto.
- (9) A obtenção das curvas de distribuição da pressão ao longo da superfície de contato possibilitou a determinação precisa da dimensão da região de contato.
- (10) Verificou-se que a pressão interna da vareta de combustível influenciou diretamente o tamanho da área de contato. Adicionalmente, na interface com as molas, o aumento da pressão interna promoveu a expansão da zona de aderência.
- (11) A análise dos resultados indicou que variações elevadas de tensão são o principal fator associado à fadiga por *Fretting*, sendo essa a principal causa do seu desenvolvimento.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Diversas modificações podem ser realizadas no sistema, incluindo alterações na geometria da mola e na escolha do material empregado. Embora a presente simulação tenha sido conduzida considerando apenas a célula, é possível estender a análise para a grade espaçadora.

Além disso, pode-se investigar o impacto da inserção de diferentes configurações de varetas, seja por meio da inclusão de uma única vareta na posição analisada ou pelo acréscimo de múltiplas varetas ao modelo. Essa abordagem resultaria no aumento da massa total do sistema, conferindo-lhe maior rigidez.

Dessa forma, torna-se viável avaliar a influência desse acréscimo na resposta mecânica do modelo com maior rigidez. Assim, essas possibilidades representam perspectivas de continuidade para o desenvolvimento deste trabalho.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <https://world-nuclear.org/> [Online] Acesso em: Abril de 2025.
- [2] Moan, G.D e Rudling, P. Zirconium in the Nuclear Industry. Thirteenth International Symposium. 2002.
- [3] Wolter, R., Performance do combustível de Angra I e II e performance mundial. 10 SITEC, Angra dos Reis – RJ, 2006.
- [4] Murray, R. L. Nuclear Energy. Oxford : Elsevier, 2008.
- [5] Gabriel, C. W. Estudo da Precipitação de Hidretos em Ligas De Zircônio Para Aplicações Nucleares. Rio de Janeiro, RJ, Brasil : Tese de M.Sc. COPPE/UFRJ, 2011.
- [6] Azambuja, V. M., Efeitos do hidrogênio em ligas de zircônio utilizadas em reatores Nucleares, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [7] Perrota, J. A., Proposta de um núcleo de reator PWR avançado com características adequadas para o conceito de segurança passiva, IPEN, São Paulo, 1999.
- [8] Bohm, W.; Holzer, R., Reatores a Água Pressurizada para Centrais Nucleares, Tradução Informal do Original Alemão “Druckwasserreaktoren fur Kernkraftwerke” feita pela Nuclebras, KWU, Erlangen, Alemanha, 1974.
- [9] Cardoso, E.M.; Alves, I.P.; de Lima, J.M. et al. Energia Nuclear - Apostila Educativa, CNEN. Disponível em:  
<<http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/energia.pdf>>. [Online] Acesso em: Outubro de 2014.
- [10] Esteves, R. G., Planejamento Estratégico para o Ciclo do Combustível Nuclear, LAS, 2006.
- [11] VIII CEGEN, XII ENFIR, Congresso Geral de Energia Nuclear, Encontro de Física de Reatores, “Desenvolvimento de um elemento combustível avançado para Angra I do tipo 16 NGF”, Santos - SP, 1998.

- [12] Pereira, P. A. S., Estudo preliminar da aplicação da técnica de correntes parasitas visando a inspeção submersa de elementos combustíveis, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- [13] Perrota, J. A., Curso de Capacitação para Inspeção Visual de Combustíveis PWR Irrradiados, IPEN, São Paulo, 2002.
- [14] Song, K.N., Yoon, K-H., Kang, H-S., Lee, K-H, Mechanical/Strutural Perfomance Test on the KAERI Devised Spacer Grids for the PWR. In: Strutural behavior of fuel assemblies for water cooled reactors, 22-26 November 2004, Cadarache, France; IAEA-TECDOC-1454
- [15] Castanheira, M., Análise dos Mecanismos de Degradação de varetas Combustíveis Falhadas em Reatores PWR, Dissertação de Doutorado, IPEN, São Paulo, 2004.
- [16] Wilson, H.W., Menke, H.F., Kunishi, H., Miller, R.S., Scherperreel, L.R, Westinghouse fuel performance in today's aggressive plant operation environment In: International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, MARCH 2-6, 1997, PORTLAND. PROCEEDINGS... LA GRANGE PARK: ANS, 1997.
- [17] International Atomic Energy Agency. Fuel Failure In Water Reactors: Causes And Mitigation. Vienna: laea, 2003. (TECDOC-1345).
- [19] Monzani, D., Estudo experimental do processo de obtenção de zircônio metálico por magnesioterapia. Dissertação de M.Sc., Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, SP, Brasil, 1989.
- [20] Rubiolo, P.R., Michael, On the factors affecting the *Fretting*-wear risk of PWR fuel assemblies, Nuclear Engineering and Design, v.239, pp.68-79, 2009.
- [21] Lee, Y.H., kim, H.K., Effect of spring shapes on the variation of loading conditions and the wear behavior of the nuclear fuel rod during *Fretting* wear tests, Wear, v.263, pp.451-457, 2007.
- [22] Carrilho, L.A., Otimização do contato entre vareta combustível e suporte para o elemento combustível 16x16 avançado, International Nuclear Atlantic Conference – INAC, Santos, 2005.
- [23] Rubiolo, P.R., Paramonov, D.V., Young, M.Y., Development of a *Fretting*-Wear and Flow-Induced Vibration Model for the Fuel Rods. In: In: Strutural behavior of fuel assemblies for water cooled reactors, 22-26 November 2004, Cadarache, France; IAEA-TECDOC-1454.
- [24] Aullo, M., Rabenstein, W.D., European Fuel Group Experience on Control Rod Insertion and Grid to Rod *Fretting*. In: In: Strutural behavior of fuel assemblies for water cooled reactors, 22-26 November 2004, Cadarache, France; IAEA-TECDOC-1454.
- [25] Vásquez, J. Navarro, C. Domínguez, J., Experimental results in *Fretting* fadigue with shot and laser peened Al 7075-T651 specimens, International Journal of Fadigue 40 (2012) 143-153.

- [26] Carrilho, L. A., Modelamento do Elemento Combustível Nuclear em Operação Normal pelo Método de Elementos Finitos, M.Sc., UFF, Volta Redonda-RJ, 2000.
- [27] Swanson Analysis Systems Inc. – ANSYS. Ansys User's Manual for Revision 12.1, 2010.
- [28] BAÊTA, D.A. Avaliação da resistência ao desgaste por *Fretting* em varetas combustíveis de Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe. 2020. Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil, 2020.
- [29] CACUCI, D. G. Handbook of Nuclear Engineering. Springer, New York, 2010.
- [30] ATTIA, M. H. On the *Fretting* wear mechanism of Zr Alloys, Tribology International 39, p. 1320-1326, 2006.
- [31] SOARES, A. R., LAMAS, W. Q., CAMARGO, J. R. Ensaio e avaliação por líquidos penetrantes em placas de bocais de elementos combustíveis na área nuclear. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.7, n.1, p.3101-3112 jan. 2021.
- [32] BLAU P. J. A multi-stage wear model for grid-to-rod *Fretting* of nuclear fuel rods. A International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear 313, p. 89-96, 2014.
- [33] K. Mallikarjuna, K. S. Prasad, M. V. Subramanyam, "Image Compression and Reconstruction using Discrete Rajan Transform Based Spectral Sparsing", I.J. Image, Graphics and Signal Processing, 1, pp 59-67; 2016.