



INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Avaliação de Componente Estrutural de Elemento Combustível: Comparação
entre Dados Experimentais e Simulação Numérica**

RAFAEL SILVA BRANDÃO DOS SANTOS

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores**

**Orientadora:
Profa. Dra. Claudia Giovedi Motta**

**São Paulo
2024**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Avaliação de Componente Estrutural de Elemento Combustível:
Comparação entre Dados Experimentais e Simulação Numérica**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

RAFAEL SILVA BRANDÃO DOS SANTOS

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores**

**Orientadora:
Profa. Dra. Claudia Giovedi Motta**

**São Paulo
2024**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Como citar:

SANTOS, R. S. B. d. **Avaliação de Componente Estrutural de Elemento Combustível: Comparação entre Dados Experimentais e Simulação Numérica**. 2024. 79 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Santos, Rafael Silva Brandão dos

Avaliação de Componente Estrutural de Elemento Combustível:
Comparação entre Dados Experimentais e Simulação Numérica /
Rafael Silva Brandão dos Santos; orientadora Claudia Giovedi
Motta. -- São Paulo, 2024.
79 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia Nuclear (Reatores) -- Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2024.

1. Elemento Combustível. 2. Grade Espaçadora. 3. Compressão
Estática. 4. Simulação Numérica. I. Motta, Claudia Giovedi,
orient. II. Título.

Dedico este trabalho de mestrado
à minha esposa Julia e minha filha Catarina

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer inicialmente à Profa. Dra. Claudia Giovedi Motta por toda a sua orientação técnica e por nunca deixar de acreditar no sucesso do trabalho desenvolvido.

Agradeço à toda a equipe do LADICON pelo apoio na fabricação e preparação de amostras e na realização de ensaios.

Agradeço a Marinha do Brasil por ter me proporcionado a oportunidade de desenvolver este trabalho.

RESUMO

Em um reator nuclear, o elemento combustível (EC) é um componente essencial para a geração de energia. Assim para a sua qualificação, é necessário apresentar evidências de que o conjunto, bem como cada um de seus componentes estruturais atendam aos requisitos normativos de desempenho e segurança. Um dos componentes estruturais do EC é a grade espaçadora (GE), que garante o espaçamento adequado entre as varetas de combustível, permitindo a circulação do refrigerante em um reator refrigerado a água. O processo de qualificação de um EC requer atividades de verificação e validação utilizando ferramentas computacionais e bancadas experimentais. No presente estudo, buscou-se validar um modelo computacional utilizando um experimento para prever o comportamento mecânico de uma GE típica de EC de reator refrigerado a água pressurizada. O experimento escolhido foi o teste de compressão estática utilizando segmentos da GE. Em paralelo, foi desenvolvido um modelo computacional 3D do segmento da GE utilizando o código ANSYS 2023 R2 para reproduzir as condições do experimento, permitindo a comparação dos resultados obtidos por simulação com os dados obtidos no teste. Os resultados da simulação computacional indicaram que o modelo é capaz de prever com boa precisão a força máxima suportada pela GE, bem como a geometria final da amostra. Porém, verificou-se que diferenças decorrentes de imperfeições presentes na GE real afetam os resultados obtidos na simulação para a rigidez do componente, imperfeições estas difíceis de serem reproduzidas no modelo computacional. No entanto, o modelo computacional desenvolvido no presente estudo se mostrou uma boa ferramenta para ser aplicada no processo de verificação e validação buscando a qualificação de novos projetos de GE ou de modificações de projeto de GE, de modo a otimizar recursos e tempo na análise de desempenho do componente.

Palavras chave: Elemento Combustível; Grade Espaçadora; Compressão Estática; Simulação Numérica.

ABSTRACT

In a nuclear reactor, the fuel assembly (FA) is an essential component for power generation, and therefore, for its qualification, it is necessary to demonstrate that the FA, as well as each one of its structural components, comply with the regulatory requirements for performance and safety. One of the structural components of the FA is the spacer grid (SG), which enables to keep the designed spacing between the fuel rods, allowing coolant circulation in a water-cooled reactor. The qualification process of an FA requires verification and validation activities using computational tools and experimental benches. In this study, the objective was to validate a computational model using an experiment to predict the mechanical behavior of a typical SG applied for FA of pressurized water-cooled reactors. The chosen experiment was the static compression test using SG segments. In parallel, a 3D computational model of the SG segment was developed using the ANSYS 2023 R2 code to reproduce the experimental conditions, allowing the comparison of the results obtained by simulation with those obtained in the tests. The results of the computational simulation indicated that the developed model is able to predict with good accuracy the maximum force supported by the SG, as well as the final geometry of the sample. However, it was found that differences arising from imperfections present in the real SG affect the simulation results obtained for the stiffness of the component, and these imperfections are difficult to be reproduced in the computational model. Nevertheless, the computational model developed in this study has shown to be a good tool to be applied in verification and validation processes aiming the qualification of new SG designs or SG design modifications, in order to optimize resources and time in the analysis to evaluate the performance of the component.

Keywords: Fuel Assembly; Spacer Grid; Static Compression; Numerical Simulation.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados do modelo 3D sólido e uso de recursos computacionais. .	33
Tabela 2 - Resultados do modelo 3D tipo casca e uso de recursos computacionais.	34
Tabela 3 – Qualidade da malha em função do valor de Skewness.....	55
Tabela 4 - Dados do material ASTM B637 UNS N07718 tratado termicamente. ...	55
Tabela 5 - Rigidez elástica, força máxima de reação e seu respectivo deslocamento obtidos nos experimentos.	58
Tabela 6 – Resultados obtidos utilizando-se diferentes malhas.	60
Tabela 7 – Resultados obtidos utilizando-se modelos com imperfeições.	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de funcionamento de um reator PWR.....	14
Figura 2 - Representações de um EC do tipo vareta.	15
Figura 3 - (a) Representação esquemática de uma grade espaçadora. (b)Tira metálica de uma grade espaçadora.	17
Figura 4 - Dispositivo para inserção das varetas de combustível no EC.	22
Figura 5 - Gráfico força-deslocamento comparando o resultado do ensaio de compressão.....	23
Figura 6 – Forma deformada de segmentos e de GE completa nos testes.	24
Figura 7 – Geometria deformada dos modelos de GE.....	25
Figura 8 – Superfície representada por nós e elementos triangulares.....	27
Figura 9 – Aumento da precisão com o número de pontos de cálculo.....	28
Figura 10 – Resposta do material e exemplos de eventos em função da taxa de deformação.	29
Figura 11 – Modelo 3D desenvolvido por Schettino et al. [25].	30
Figura 12 – Modelos 3D desenvolvidos por Song [33].....	31
Figura 13 – Resultados das simulações de Song [33].	31
Figura 14 – Malha dos modelos 3D da GE do EC PLUS7.	32
Figura 15 – Localização da solda na intersecção das tiras de GE.....	33
Figura 16 – Convergência da solução do modelo 3D para um deslocamento de 5 mm.	35
Figura 17 – Visão lateral das malhas e uma visão em perspectiva.....	36
Figura 18 – Deslocamento e força de reação das três malhas.	37
Figura 19 – Configuração do dispositivo de teste.	39
Figura 20 – Configuração do dispositivo de teste dentro da célula quente.	40
Figura 21 – Atividades e resultados do processo de Verificação e Validação (V&V).	42
Figura 22 – Metodologia aplicada nas atividades de V&V.	46
Figura 23 – Corpo de prova fabricado e identificado com o número 5.....	47
Figura 24 – Representação do corpo de prova com as dimensões finais.....	48
Figura 25 – (a) Posição de corte das amostras e (b) Indicação de medição das áreas.	48

Figura 26 – Exemplo de inserção da propriedade mecânicas do material no ANSYS.....	52
Figura 27 – Representação do segmento de GE no software ANSYS. (b) Detalhe da representação da brasagem no modelo.....	52
Figura 28 – (a) Condições de contorno do modelo 3D. (b) Modelo 3D com os blocos A e B.....	53
Figura 29 – Exemplo de malhas testadas no modelo 3D.....	54
Figura 30 (a) - Máquina de teste. (b) Corpo de prova na posição de ensaio (c) Croqui esquemático do ensaio de compressão estática da GE.....	50
Figura 31 – Gráfico da Força de reação da grade em função do deslocamento para cada corpo de prova.	56
Figura 32 – Gráfico da força de reação da grade em função do deslocamento para os corpos de prova 1 e 2.....	57
Figura 33 – Gráfico da força de reação da grade em função do deslocamento para os corpos de prova 3 e 4.....	57
Figura 34 – Gráfico da força de reação da grade em função do deslocamento para os corpos de prova 5 e 6.....	58
Figura 35 – Gráfico da força de reação da grade em função do deslocamento para o corpo de prova 7.	58
Figura 36 – Aspecto dos corpos de prova de segmentos da GE de 3x3 na força máxima de reação.....	59
Figura 37 – Força máxima de reação em função do tamanho do elemento de malha.	60
Figura 38 – Comportamento das curvas força de reação em função do deslocamento com a variação do módulo de elasticidade.	61
Figura 39 – Variação dos resultados numéricos com o módulo de elasticidade...62	62
Figura 40 – Gráfico da força de reação em função do deslocamento para a malha adotada.	63
Figura 41 – Aspecto do segmento de GE na força máxima de reação.....	64
Figura 42 – Curvas de força em função do deslocamento do modelo 3D e dos corpos de prova.	65
Figura 43 – Deformação da GE na força máxima de reação.....	66
Figura 44 – Representação esquemática dos modelos da GE com imperfeições.	67

Figura 45 – Modelos da GE com imperfeições.	67
Figura 46 – Gráfico da força de reação x deslocamento - modelo 1.....	68
Figura 47 – Gráfico da força de reação x deslocamento - modelo 2.....	69
Figura 48 – Gráfico da força de reação x deslocamento - modelo 3.....	70
Figura 49 – Geometria deformada da GE na força máxima de reação para os modelos com imperfeições.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ANS: *American Nuclear Society*;
- ANSI: *American National Standards Institute*;
- ASME: *American Society of Mechanical Engineers*;
- ASTM: *American Society for Testing and Materials*;
- AWS: *American Welding Society*;
- CAD: *Computer Aided Design*;
- CAE: *Computer Aided Design*;
- CAM: *Computer-Aided Manufacturing*;
- CNEN: Comissão Nacional de Energia Nuclear;
- DCD: *Design Control Document*;
- DOF: *Degree of freedom*;
- EC: Elemento Combustível
- EPR: *Extended Producer Responsibility*;
- FEA: *Finite element analysis*;
- GE: Grade espaçadora;
- IAEA: *International Atomic Energy Agency*;
- LOCA: *Loss of Coolant Accident*;
- MEF: Método dos Elementos Finitos;
- NUREG: *Nuclear Regulatory Guide*;
- PTC: *Performance Test Codes*;
- PWR: *Pressurized Water Reactor*;
- QI: Quantificação da incerteza;
- RAS: Relatório de Análise de Segurança;
- UNS: *Unified Numbering System*; e
- V&V: Verificação e Validação.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	Trabalhos relevantes	21
3.2	Simulações numéricas	26
3.3	Teste de compressão estática	38
3.4	Verificação e validação computacional	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1	Preparação dos corpos de prova	46
4.2	Ensaio mecânico	49
4.2.1	Descrição do dispositivo de teste	49
4.2.2	Tratamento dos dados	50
4.3	Modelagem computacional	51
4.3.1	Caracterização	51
4.3.2	Condições de contorno adotadas	53
4.3.3	Convergência de malha	53
4.3.4	Análise de sensibilidade	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1	Teste de compressão estática	56
5.2	Modelagem computacional	59
5.3	Comparação dos resultados	64
5.4	Estudo exploratório de modelagem computacional com inclusão de imperfeições	66
6	CONCLUSÕES	72
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

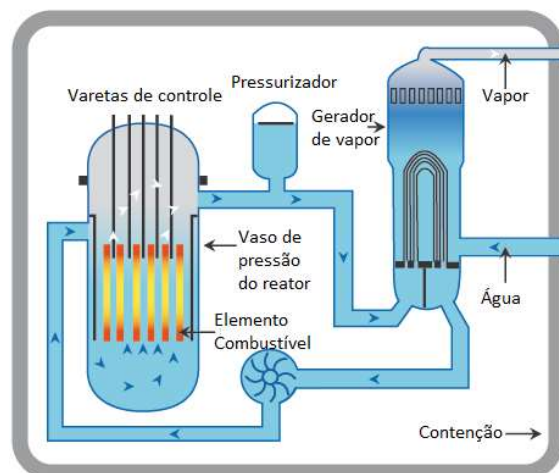
1 INTRODUÇÃO

A energia nuclear é a quarta maior fonte geradora de eletricidade do mundo, atrás do carvão, do gás natural e da hidroeletricidade [1]. Tem-se hoje 437 reatores nucleares gerando energia em 30 países e 56 novos reatores em construção, em países como China, Estados Unidos da América, Rússia e membros da União Europeia [2].

O funcionamento de uma usina nuclear pode ser comparado ao de uma usina térmica convencional, onde uma fonte de calor transforma a água em vapor que, em alta pressão, faz girar uma turbina acoplada a um gerador elétrico. A principal diferença entre as usinas térmicas e as nucleares é a fonte de calor. Nas térmicas, o calor é oriundo da queima de carvão, gás natural, óleo diesel, biomassa e outros, ao passo que em uma usina nuclear o calor é liberado por meio de uma reação de fissão utilizando como matéria-prima minério de urânio, cuja exploração no Brasil é monopólio federal [3].

Em plantas nucleares projetadas para a produção de energia elétrica, como reatores de potência refrigerados a água pressurizada (PWR, da sigla em inglês para *Pressurized Water Reactor*), o vapor pressurizado é utilizado para movimentar uma turbina conectada a um gerador elétrico que abastece a rede elétrica de transmissão. A Figura 1 apresenta uma representação esquemática de uma planta nuclear com reator do tipo PWR. O vaso de pressão de um PWR contém um conjunto de Elementos Combustível (EC), os quais são os componentes do reator que contêm o combustível nuclear.

Figura 1 - Esquema de funcionamento de um reator PWR.

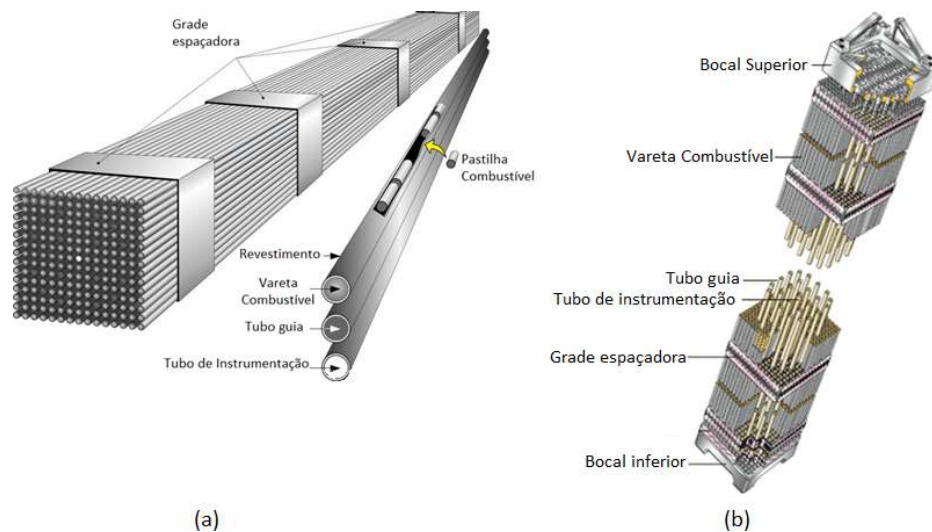


Fonte: [4].

Ciclo do combustível nuclear é o nome que se dá ao conjunto de etapas que vão desde as atividades de mineração do urânio até a disposição final do combustível irradiado [5]. O ciclo do combustível compreende as etapas de mineração e beneficiamento do minério, conversão, enriquecimento, reconversão, fabricação do EC, utilização do combustível no núcleo do reator e armazenamento e disposição do combustível após a utilização.

O EC é composto por pastilhas de dióxido de urânio encapsuladas em tubos de uma liga metálica especial, formando um conjunto de varetas, cuja estrutura é mantida rígida por meio de componentes estruturais (bocais, tubos guia e grades espaçadoras (GE)) que têm a função de manter a integridade e a geometria do EC em condições normais e transientes operacionais ao longo de sua permanência no interior do reator (Figura 2). O conjunto estrutural do EC contendo os bocais (superior e inferior), os tubos guia e as GE é chamado de esqueleto.

Figura 2 - Representações de um EC do tipo vareta.



Fonte: a - [6], b - [7].

Conforme ilustrado na Figura 2, as varetas de combustível, contendo o material físsil na forma de pastilhas cilíndricas, ficam posicionadas nas células das GE da estrutura do EC, garantindo-se assim o espaçamento geométrico adequado e a formação dos canais de refrigeração.

No projeto de um EC para um PWR devem ser consideradas as condições de operação do EC tais como pressão, temperatura, radiação e carregamentos hidráulicos [8].

Para assegurar o seu correto desempenho, o projeto de um EC deve atender aos seguintes requisitos, segundo a *American Nuclear Society* [8]:

- Acomodar efeitos químicos, térmicos, mecânicos e de irradiação dos materiais;
- Manter a barreira de separação do combustível e produtos de fissão com o refrigerante;
- Manter geometria aceitável;
- Permitir a inserção de barras de controle;
- Permitir expansões diferenciais;
- Permitir fluxo de refrigerante e transferência de calor aceitáveis;
- Permitir manuseio, transporte, carregamento etc;
- Permitir o posicionamento da instrumentação;
- Resistir a forças de escoamento do fluido; e
- Ter suportação própria.

As normas e guias aplicáveis ao projeto e licenciamento de um EC são:

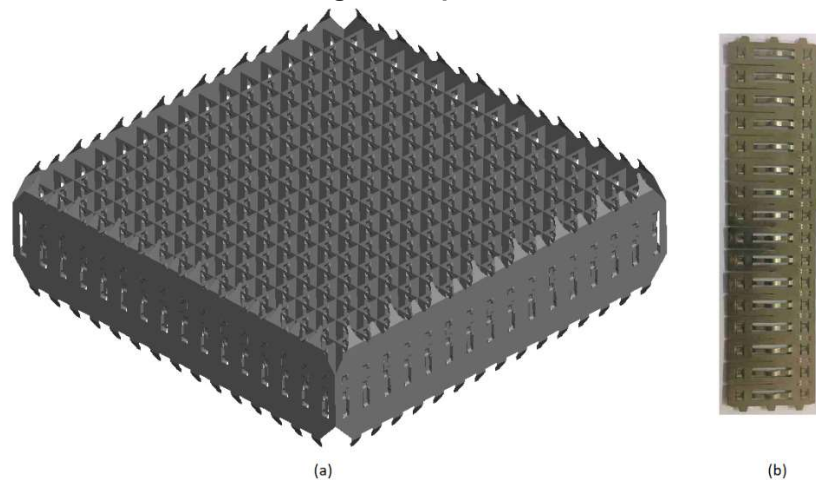
- ANS/ANSI [8];
- CNEN [9][10];
- IAEA [11];
- NUREG-0800, capítulo 4 [12]; e
- ASME [14].

De modo a atender à base normativa aplicável, os componentes do sistema combustível de reatores nucleares devem ter suas propriedades mecânico-estruturais projetadas de forma a prever e suportar as condições normais de operação, transientes e acidentes postulados. Além disso, é imprescindível que testes, quando viáveis, e/ou simulações computacionais sejam realizadas de modo a apresentar evidências de que o projeto atende aos requisitos normativos. Tais atividades compõem o conjunto de informações necessárias para a realização da análise de segurança do reator a ser apresentada ao órgão regulador por meio do Relatório de Análise de Segurança (RAS) como parte do processo de Licenciamento da instalação.

Como a GE é um importante componente estrutural do EC, de modo a atender aos requisitos de Licenciamento do sistema combustível, devem ser apresentadas as informações de suas propriedades mecânico-estruturais em diferentes condições. Assim, o presente trabalho objetiva a obtenção de dados que

possam subsidiar o processo de qualificação de uma GE típica de PWR, formada por tiras niqueladas da liga ASTM B637 UNS N07718, que são montadas em um arranjo quadrangular e fixadas por meio de brasagem. Na parte final de seu processo de fabricação, a GE é submetida a um processo de envelhecimento para adquirir maior resistência mecânica, formando um conjunto de células de $N \times N$, de acordo com o projeto do EC (Figura 3).

Figura 3 - (a) Representação esquemática de uma grade espaçadora. (b) Tira metálica de uma grade espaçadora.



Fonte: [15].

O documento NUREG 0800 [12] em seu capítulo 4, no item de base de projeto, estabelece que devem ser fornecidos os limites de tensão, deformação ou de carga para o componente GE. O documento define também que os limites de tensão obtidos por métodos semelhantes aos fornecidos na Seção III do código ASME [13] para vasos de pressão e caldeiras são aceitáveis e que outros limites propostos devem ser justificados. Na seção intitulada “Avaliação do Projeto – Testes em Protótipos”, o documento cita que quando não há experiência operacional conclusiva, como na proposição de mudança no projeto de algum componente, devem ser realizados testes em um protótipo. Esses testes devem ser realizados fora do reator, quando possível, para determinar as propriedades do componente antes da irradiação. A GE é um dos componentes citados que requerem a realização de testes estruturais para a sua qualificação.

O documento *Regulatory Guide* 1.70 [16], capítulo 4, no item de avaliação do projeto, cita que uma avaliação do projeto do sistema combustível

deve ser apresentada para combinações fisicamente viáveis de processos químicos, térmicos, de irradiação, bem como interação mecânica e hidráulica. A avaliação dessas interações deve ser feita considerando-se as condições normais de operação do reator, os transientes sem desligamento e os acidentes postulados. Nesse contexto, é citado que a GE deve ser verificada quanto à sua estabilidade geométrica considerando os efeitos térmicos, químicos e de irradiação.

A base normativa [12] e [16] estabelece que os componentes do sistema do EC devem ser testados antes da irradiação, assim, no caso da GE, é necessário avaliar o seu comportamento mecânico-estrutural antes desse componente ser inserido no reator como parte do EC. Assim, para a GE, dentre outras análises, é imprescindível a realização de estudos para a obtenção das propriedades mecânicas de rigidez elástica e da força de deflexão da GE sob carregamento estático de compressão, de modo a avaliar a integridade estrutural das GE antes da irradiação. Tais propriedades foram escolhidas no presente trabalho por apresentarem correlação direta com os carregamentos estáticos aplicados na GE durante as etapas de montagem, manuseio, fixação de componentes e transporte do EC, antes de sua inserção no reator.

As atividades necessárias para avaliar a integridade de uma GE por meio de experimentos requerem custo e tempo consideráveis, pois vários parâmetros que afetam as propriedades da GE, como por exemplo as propriedades do material utilizado, devem ser considerados. Assim, o desenvolvimento de um modelo de elementos finitos que possa avaliar o comportamento mecânico de uma GE sob condições experimentais definidas é de grande valia para complementar, ou até substituir, tais métodos experimentais [17]. A análise de elementos finitos torna possível avaliar o comportamento mecânico considerando diferentes condições de contorno, possibilitando a redução significativa do custo e do tempo dispendidos em processos de qualificação desse componente. Além disso, a análise de elementos finitos representa uma importante ferramenta quando o experimento é de difícil realização.

O uso de um modelo computacional para representar um experimento requer que esse modelo seja validado. Conforme a *American Society of Mechanical Engineers* [18], essa validação é feita comparando os resultados preditivos do modelo com os dos experimentos realizados. Se essas comparações forem satisfatórias, o modelo é considerado validado para o uso pretendido. Afirmar que

um modelo está validado para o uso, significa que os modelos Matemáticos e Conceituais sobre os quais o modelo Computacional foi construído também foram validados.

Nesse contexto, sendo a GE um componente estrutural do EC, é necessário conhecer e avaliar o seu comportamento mecânico-estrutural a fim de qualificá-la para esta aplicação como parte do processo de licenciamento do EC, o que requer a realização de experimentos e de simulação numérica, a fim de obter um conjunto de informações que permitam a avaliação do desempenho do componente em diferentes condições.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o processo de validação de modelo computacional para representar experimentos necessários para a análise mecânico-estrutural de GE típica de EC de PWR como parte das atividades de licenciamento. O objetivo específico é comparar resultados experimentais obtidos em teste de compressão estática utilizando segmentos de GE típica de EC de PWR com dados obtidos por meio de simulação numérica utilizando modelo computacional desenvolvido para reproduzir o experimento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Trabalhos relevantes

A literatura aberta mostra que fabricantes de reatores analisam os esforços aos quais a GE está submetida e realizam testes mecânicos para avaliar a sua integridade estrutural. Nos DCD (*Design Control Document*) das fabricantes de reatores KEPCO [19], WESTINGHOUSE [20] e MITSUBISHI [21] há dados que demonstram que a carga lateral imposta durante o transporte e o manuseio do EC é inferior à resistência à flambagem da GE.

No DCD da AREVA [22] é afirmado que a GE é capaz de resistir às cargas de impacto de sismos e acidente com perda de refrigerante (LOCA, da sigla em inglês para *Loss of Coolant Accident*) sem sofrer danos que afetem a refrigeração do núcleo ou a inserção das varetas de controle.

O DCD da AREVA [22] cita que os critérios de resistência dos componentes do seu EC são baseados em teste de resistência mecânica em protótipos, incluindo testes de compressão estática e dinâmica da GE. Como resultado, é citado que os limites de projeto são aceitáveis e suficientes para demonstrar que, no pior caso, ou seja, considerando eventos de sismo e de LOCA combinados, o núcleo, de uma perspectiva da GE, permanecerá com uma geometria refrigerável. De modo a determinar as cargas de fixação da GE permitidas durante o transporte de combustível, é realizado o teste de compressão estática para a obtenção das propriedades de rigidez estática e limites de carga elástica das GE.

O relatório do projeto do combustível EPR da AREVA [23] indica que o teste de compressão estática da GE é necessário para se obter as características mecânicas estáticas (rigidez estática e força de deflexão) do componente e foi usado para definir as cargas de fixação da GE permitidas durante o transporte.

Durante a fabricação do EC, é usada uma bancada para fixação do conjunto que segura as GE para a inserção da vareta de combustível no esqueleto do EC. Cada GE é assentada no respectivo dispositivo de fixação com os tubos guia já inseridos em suas posições (Figura 4).

Figura 4 - Dispositivo para inserção das varetas de combustível no EC.

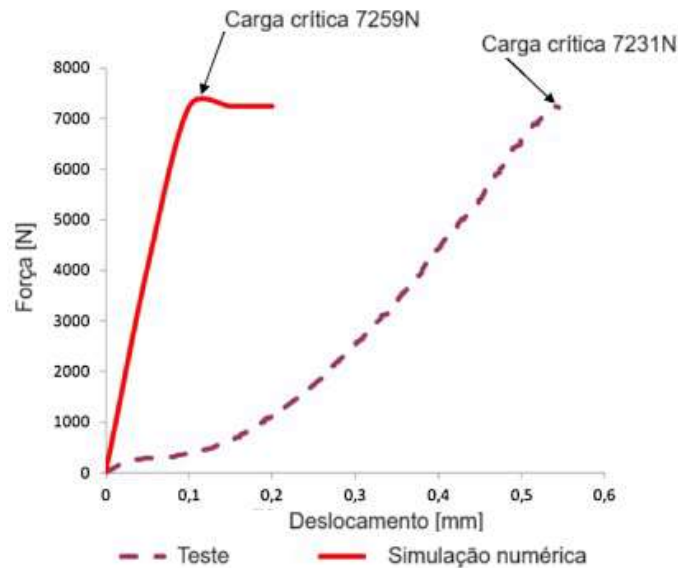


Fonte:[24].

O dispositivo de montagem aplica uma carga compressiva na GE para que o esqueleto do EC seja fixado na bancada de montagem, e então as varetas de combustível possam ser inseridas. Essa carga de compressão deve ter um limite máximo, de modo a assegurar que a GE não apresentará nenhum tipo de deformação devido ao processo de montagem.

Schettino et al. [25] realizaram testes de compressão estática em uma GE composta por tiras de ASTM B637 UNS N07718 intertravadas e brasadas em um arranjo de 16x16 células para avaliar a capacidade do dispositivo de fixação de bancada em suportar as cargas durante a inserção das varetas de combustível no esqueleto do EC. Os testes e simulações numéricas indicaram que a carga crítica para a GE sob compressão estática é de 7231 N e de 7259 N, respectivamente (Figura 5), demonstrando uma diferença mínima entre os resultados [24]. Os autores concluíram que o modelo analítico é eficaz em prever o comportamento da GE sob compressão estática, fornecendo informações confiáveis para o dimensionamento e o projeto do conjunto de dispositivos de fixação da bancada de montagem do EC.

Figura 5 - Gráfico força-deslocamento comparando o resultado do ensaio de compressão estática da GE por simulação com o resultado empírico.



Fonte: [25].

Yong Hwi Kim et al [26] discutiram a importância da GE para manter as varetas de combustível espaçadas permitindo o fluxo do fluido refrigerante e propuseram o uso de manufatura aditiva metálica para a fabricação da GE. Um modelo 3D parcial de uma GE de 17x17, usada em um reator coreano padrão, foi desenvolvida pelos autores, considerando que a rigidez da grade original pode ser prevista por meio de um modelo 3x3. No artigo, foram elaborados três novos modelos 3D de uma GE de 3x3 e foi simulada numericamente a compressão estática de cada um desses modelos. Após a comparação do comportamento dos novos modelos com o padrão, os autores concluíram que a tecnologia de manufatura aditiva metálica proposta é capaz de produzir uma GE de excelente qualidade.

As informações obtidas indicam que quando o ensaio de compressão estática é realizado, ele está diretamente relacionado aos carregamentos envolvidos nas etapas de manuseio, fabricação e transporte da GE. Além disso, é importante frisar que não foram encontradas referências que indicassem a realização deste teste em temperaturas superiores à ambiente, isto pode ser justificado por se tratar de uma avaliação do componente antes do mesmo ser introduzido no reator.

A análise dos dados da literatura indica que analisar o comportamento de cargas críticas em GE por meio de testes mecânicos é um processo demorado

e dispendioso. Assim, a análise por elementos finitos [17] (FEA, da sigla em inglês para *Finite Element Analysis*), um método numérico amplamente utilizado para simular o comportamento mecânico de estruturas complexas, apresenta-se como uma importante ferramenta para subsidiar processos de qualificação de GE. A FEA divide a estrutura em elementos finitos discretos e resolve as equações de equilíbrio para cada elemento. A solução das equações de equilíbrio fornece a distribuição de tensões, deformações e deslocamentos na estrutura.

Segundo Youngik Yoo et al [17], a FEA foi aplicada para simular o comportamento de GE sob diversas cargas e condições de contorno. Alguns autores previram a velocidade e a carga de impacto na qual a flambagem ocorre, realizando análises de impacto de segmentos de GE de 3x3 e de 5x5 sem vareta de combustível.

Guo et al. [27] realizaram análises de impacto de segmento de GE de 5x5 e previram a carga de impacto na qual a flambagem ocorre. Jeon [28] fez teste de compressão estática e análise por FEA em segmentos de vários tamanhos de uma GE original de 17x17 (Figura 6). Os resultados permitiram ao autor chegar em relações matemáticas para a carga máxima suportada em função do número de colunas e linhas.

Figura 6 – Forma deformada de segmentos e de GE completa nos testes.

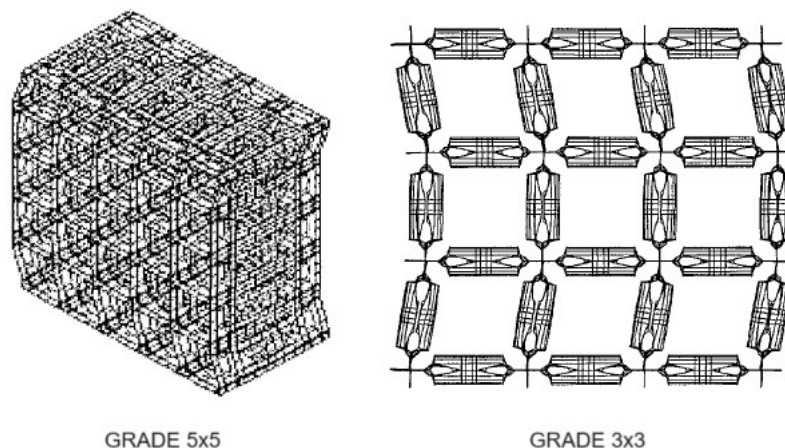
SEGMENTOS DE GRADE					
1 LINHA DE GRADE					
	(1x1)	(1x2)	(1x3)	(1x4)	(1x5)
2 LINHAS DE GRADE					
	(2x1)	(2x2)	(2x3)	(2x9)	
17 COLUNAS DE GRADE					
	(1x17)		(2x17)		(3x17)
GRADE COMPLETA					
GRADE 17x17 COMPLETA					
	FORMATO 1		FORMATO 2		FORMATO 3
	(17x17)				

Fonte: [28].

Jeon [28] analisou a geometria deformada e concluiu que, em geral, a flambagem da GE ocorre nas tiras paralelas à direção da carga e não nas tiras perpendiculares.

Yoon [29] simulou o teste de compressão estática de um segmento de GE de 3x3 e os resultados foram comparados com dados experimentais. Além disso, construiu modelos de GE de 5x5 e de 7x7 para investigar a tendência de mudança na carga máxima de flambagem à medida que o número de células aumentava, fornecendo a previsão da carga máxima da GE de tamanho real com arranjo de 17x17. O autor também estudou a geometria deformada dos modelos e observou que a deformação das GE ocorre principalmente nas camadas superior e inferior, como mostrado na Figura 7. As camadas intermediárias mantêm sua forma original. Esse resultado é independentemente de quantas células a GE possua. Esse padrão de deformação também é confirmado pelos experimentos com GE de 3x3.

Figura 7 – Geometria deformada dos modelos de GE.



Fonte: [29].

Em outro artigo [30], são apresentados dados de simulações realizadas utilizando o código ANSYS para segmentos de GE com o objetivo de estimar a carga de flambagem de uma GE originalmente maior. Assim, por meio de modelos 3D de GE quadradas (2x2, 3x3, 4x4 e 5x5), usou os resultados das simulações em suas equações e obteve a carga crítica para a GE em tamanho real. Os resultados foram comparados com o teste realizado na GE real e, segundo o autor, o modelo com 4 tiras (uma GE de 3x3) é o modelo mais apropriado para a estimativa da carga de flambagem estática da GE de tamanho real. Em seus cálculos o erro entre as

cargas estimada e obtida no teste foi inferior a 2%. Como conclusão do trabalho, o autor apresenta a equação Equação 1:

$$(P_{cr})_{fp} = (P_{cr})_i \times N_i + (P_{cr})_o \times N_o \quad (1)$$

Onde:

- $(P_{cr})_{fp}$: Carga de flambagem da GE real ou segmento dela;
- $(P_{cr})_i$: Carga de flambagem da tira interna no modelo da GE;
- $(P_{cr})_o$: Carga de flambagem da tira externa no modelo da GE;
- N_i : Número de tiras internas da GE; e
- N_o : Número de tiras externas da GE. ($N_o=0$ para GE parciais).

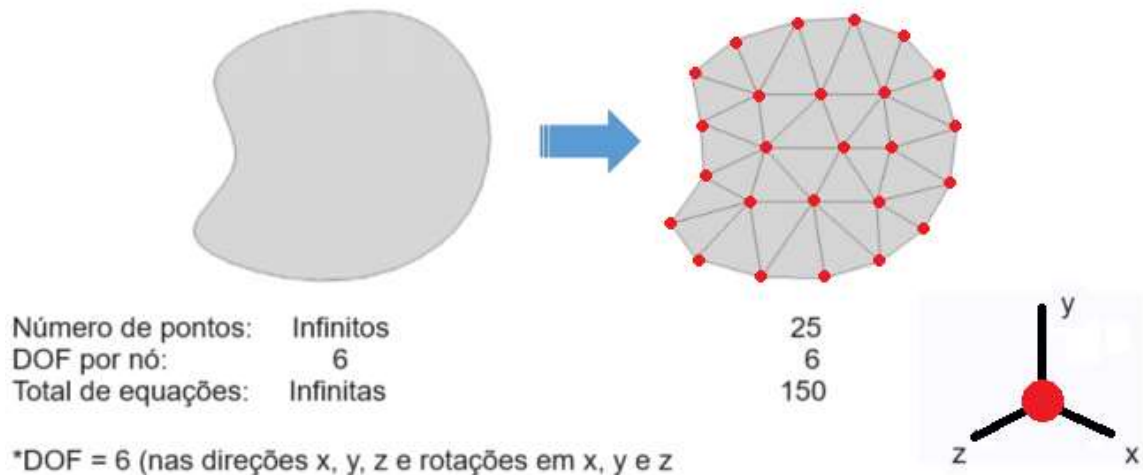
Com a finalidade de otimizar custos e prazo para alteração de projetos de GE ou para novos projetos de GE, vários autores procuraram usar métodos de FEA em detrimento dos ensaios mecânicos para estimar as cargas críticas. Indo além, a presente revisão bibliográfica mostra que alguns autores buscaram simplificar os modelos das GE utilizando segmentos menores tanto para os desenhos 3D quanto para os ensaios mecânicos para fins de comparação. Conforme Yoon [29], o padrão de deformação das GE em tamanho real é bem representado por um modelo de GE de 3x3. Da mesma maneira, Jeon [30] conclui que a GE de 3x3 é o modelo mais apropriado para estimar as cargas da GE de tamanho real. E, finalmente, Yong Hwi Kim et al [26] afirmam que a rigidez de uma GE de tamanho real pode ser estimada a partir de um modelo de uma GE de 3x3.

3.2 Simulações numéricas

Conforme Srirekha [31], a FEA é a simulação de qualquer fenômeno físico utilizando a técnica numérica chamada Método dos Elementos Finitos (MEF). Engenheiros utilizam softwares de FEA para reduzir a necessidade de protótipos físicos e experimentos, possibilitando a otimização de componentes na fase de projeto. MEF é um procedimento numérico usado para analisar estruturas e consiste em um modelo computacional de uma estrutura que é tensionada e analisada para resultados específicos. O MEF usa um sistema complexo de pontos (nós) e elementos, que formam uma grade chamada malha. Esta malha é

programada para conter o material e as propriedades estruturais (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e limite de escoamento), que definem como a estrutura irá reagir a certas condições de carga. A malha age como uma teia, pois de cada nó se estende um elemento de malha para cada um dos nós adjacentes. O objetivo é fazer cálculos em apenas um número limitado (finito) de pontos e então interpolar os resultados para todo o domínio (superfície ou volume). Qualquer objeto contínuo possui infinitos graus de liberdade (DOF) e simplesmente não é possível resolver o problema nesse formato. O MEF reduz os DOF de infinito para finito com o auxílio do malhamento (nós e elementos) e todos os cálculos são feitos em um número limitado de nós.

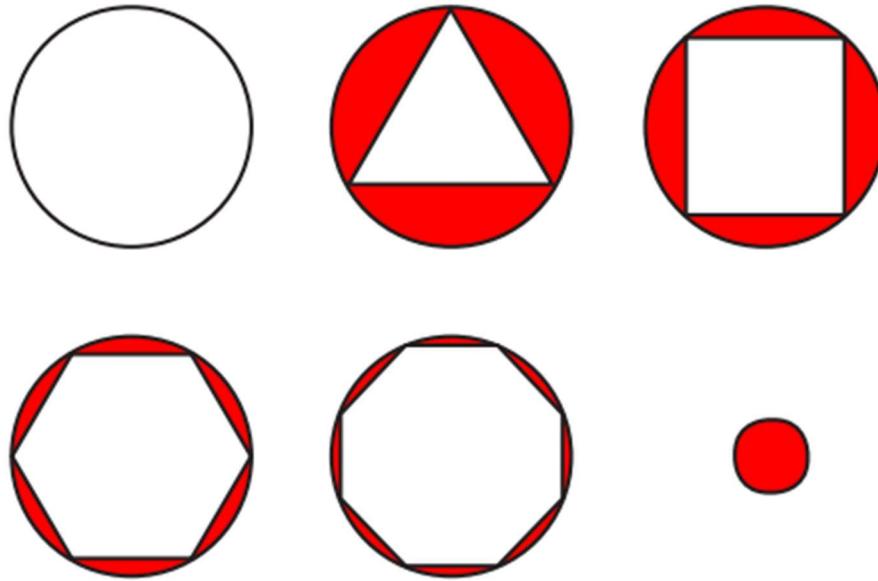
Figura 8 – Superfície representada por nós e elementos triangulares.



Fonte: Autor.

Usando essas funções e a geometria real do elemento, as equações de equilíbrio entre as forças externas atuando nos elementos e os deslocamentos ocorrendo em seus nós podem ser determinadas. Os elementos finitos começaram com elementos triangulares resultando em menos tensão e deslocamento. Posteriormente, elementos quadriláteros foram usados para maior precisão dos resultados. Aumentar o número de pontos de cálculo (nós e elementos) melhora a precisão, ao aumentar o número de linhas se reduz a margem de erro ao cobrir a área (Figura 9).

Figura 9 – Aumento da precisão com o número de pontos de cálculo.



Fonte: [31].

Essa divisão que transforma o problema original em um conjunto de elementos finitos é chamada de discretização, e permite que computadores analisem e resolvam o problema de forma eficiente.

No MEF as variáveis podem ser facilmente alteradas e a simulação pode ser realizada sem a necessidade de materiais físicos, o que auxilia na visualização do ponto de tensão e deslocamento máximos, porém não é simples prever a falha em materiais com formas geométricas complexas e produzidos em diferentes materiais, com carregamentos que variam em relação ao tempo e à presença de tensões residuais.

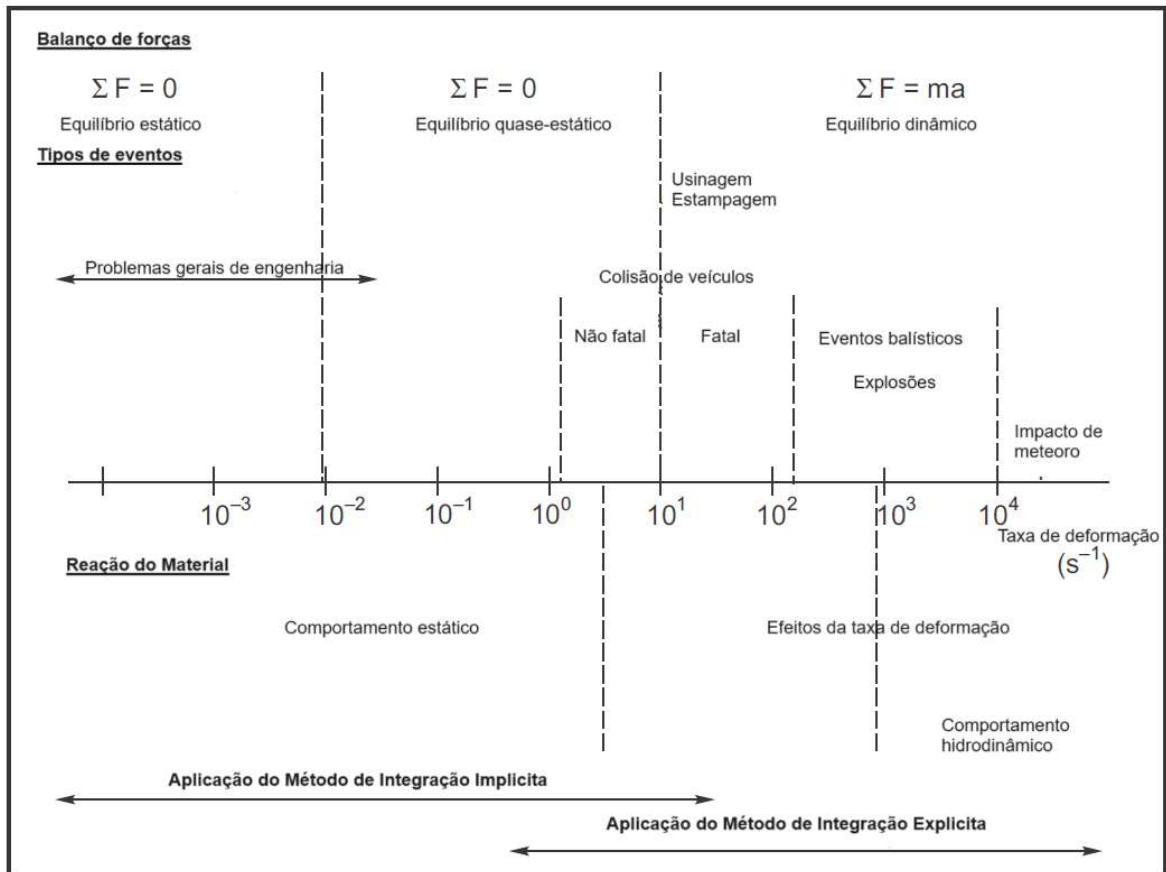
Se ferramentas como CAD e CAE (engenharia auxiliada por computador) forem modeladas de maneira apropriada, é possível obter as cargas da estrutura, indicando as localizações dos pontos de tensão e deslocamento elevados. O projeto com CAD/CAM (fabricação auxiliada por computador) ajuda no design e nas etapas de fabricação, e o engenheiro de CAE executa a análise após confeccionar a malha. Diversos software de MEF facilitam a aplicação da técnica, como ANSYS, Abaqus, *SolidWorks Simulation* e *Autodesk Inventor Nastran*.

Para Lakshmana [32], a análise por FEA tem etapas de pré-processamento que são os alicerces da simulação:

- Geometria: representação da geometria da estrutura ou componente com precisão, utilizando ferramentas CAD ou softwares de modelagem 3D;

- Material: inserção e atribuição das propriedades dos materiais nos softwares utilizados, como densidade, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e limites de resistência, para cada parte da estrutura;
- Cinemática: definição do comportamento do modelo (estático, quasi-estático ou dinâmico), conforme Figura 10.

Figura 10 – Resposta do material e exemplos de eventos em função da taxa de deformação.

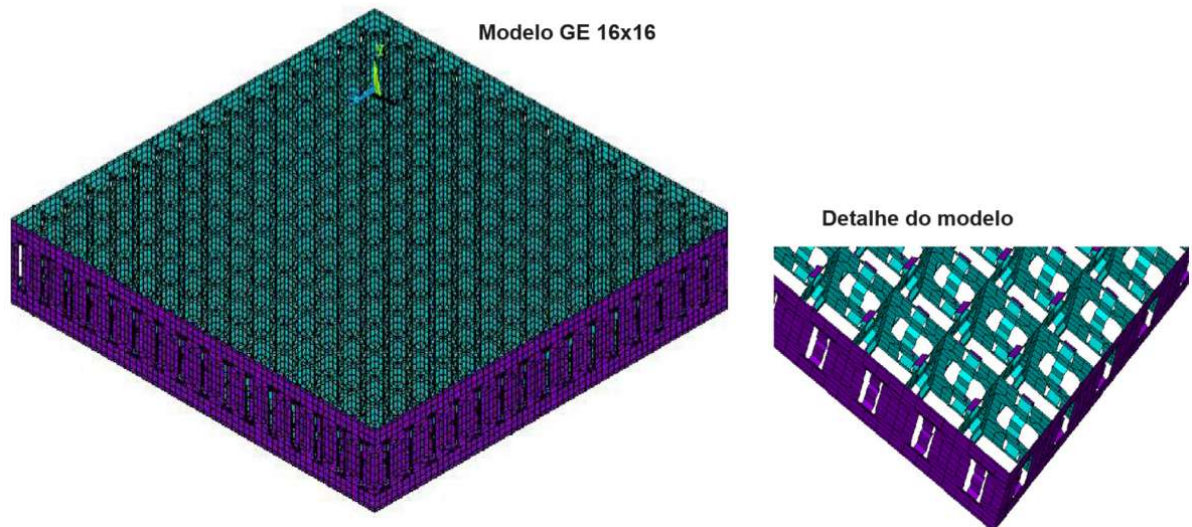


Fonte: Lakshmana [32], modificado.

- Condições de contorno: definição de como a estrutura interage com o ambiente, como apoios, tipos de contato e restrições de movimento;
- Tipo de análise: linear ou não linear. A análise linear aplica-se a problemas com comportamento linear, onde a relação entre carga e deformação é proporcional. Na análise não linear se considera o comportamento não linear, tais como deformações plásticas e grandes deslocamentos;
- Malhagem: divisão da a estrutura em elementos (discretização); e
- Carregamento: aplicação das cargas que a estrutura irá suportar, como forças, momentos e pressões.

A literatura mostra que alguns autores utilizaram MEF para estudar a GE, como por exemplo Schettino et al. [25], que realizaram testes de compressão estática em uma GE composta por tiras brasadas. O modelo 3D de uma GE de 16x16 foi desenvolvido com elementos tipo casca (*shell*) e malha quadrática feita no software ANSYS, conforme Figura 11.

Figura 11 – Modelo 3D desenvolvido por Schettino et al. [25].

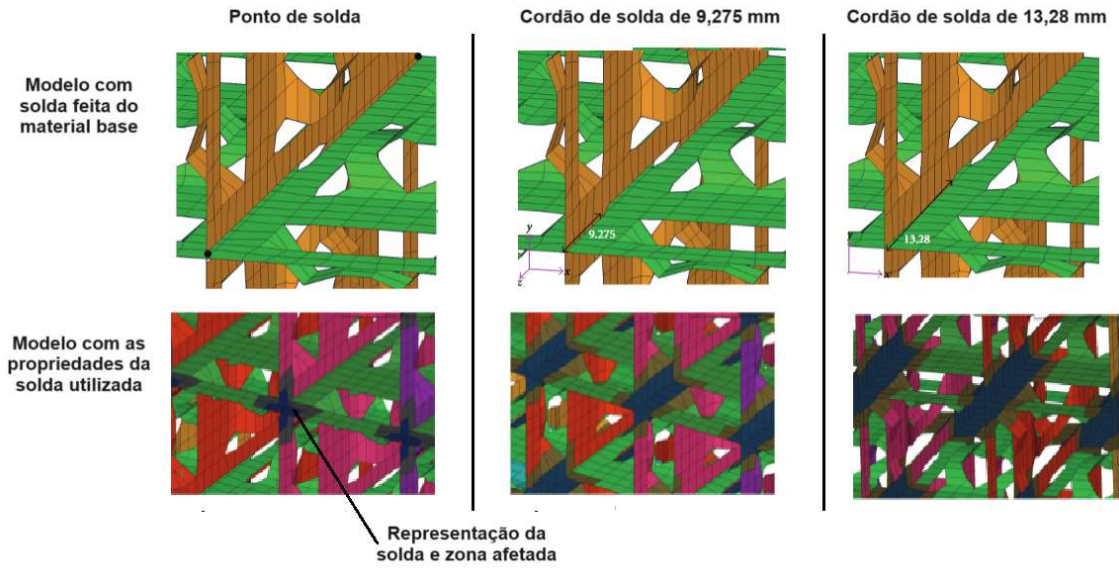


Fonte: [25], modificado.

Os autores concluíram que o modelo é eficaz em prever o comportamento da GE sob compressão estática, fornecendo informações confiáveis.

Song [33] investigou o efeito das propriedades mecânicas da solda no comportamento mecânico da GE considerando estudos por meio de uma técnica de indentação instrumentada. O autor simulou um teste de impacto em uma GE de 7x7, e os resultados da análise foram comparados aos resultados de pesquisas anteriores que utilizaram as propriedades do material base. Os modelos criados no artigo são apresentados na Figura 12.

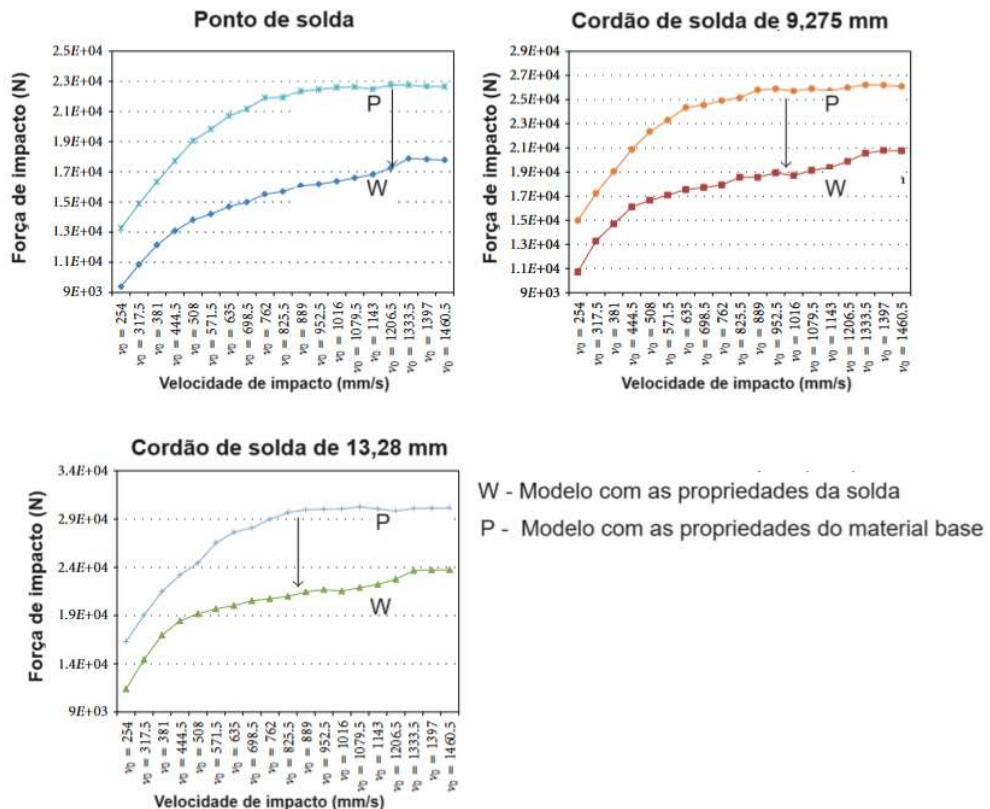
Figura 12 – Modelos 3D desenvolvidos por Song [33].



Fonte: [33], modificado.

Song [33] usou um modelo do tipo casca com uma malha composta por elementos quadráticos. Os gráficos apresentando os resultados da carga de impacto em função da velocidade de impacto são apresentados na Figura 13.

Figura 13 – Resultados das simulações de Song [33].

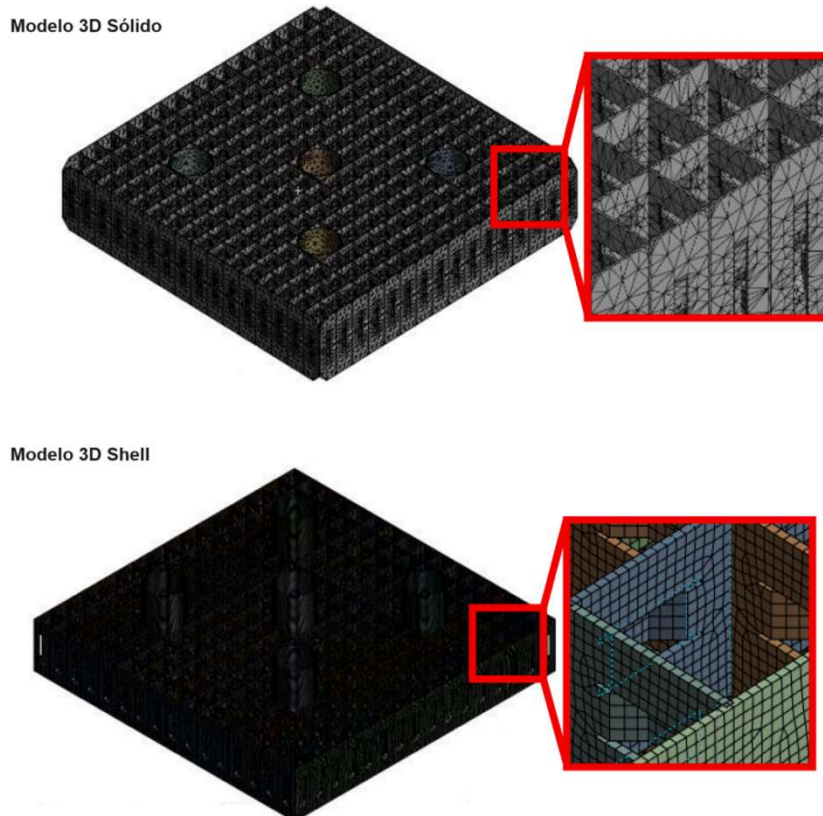


Fonte: [33], modificado.

Analisando os resultados, o autor concluiu que a carga de impacto obtida utilizando as propriedades do material de solda é cerca de 30% menor do que aquela obtida utilizando as propriedades do material base da GE. Portanto, para uma análise de resistência mais confiável, é necessário considerar as propriedades do material de solda.

Naqeeb [34] avaliou a integridade estrutural da GE do EC PLUS7 (projeto conjunto da KEPCO e da Westinghouse) por MEF usando softwares de CAD 3D, CATIA e SpaceClaim. Dois modelos foram desenvolvidos, sendo um baseado em elementos sólidos 3D e outro baseado em elementos tipo casca 3D. Posteriormente, os modelos foram transferidos para o software ANSYS para o processo de criação da malha (representados na Figura 14) e usados para realizar a análise estrutural estática de cargas normais, por teste de compressão estática, e de cisalhamento.

Figura 14 – Malha dos modelos 3D da GE do EC PLUS7.

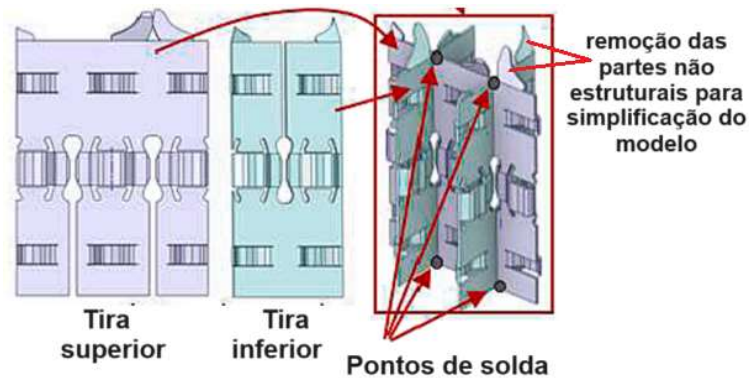


Fonte: [34], modificado.

A interseção das tiras da GE é soldada por pontos na parte superior e inferior. Segundo o autor, modelar a solda por pontos gerava malhas muito

complexas e pouco confiáveis. A localização da solda por pontos pode ser vista na Figura 15. Por isso, na simulação, ela foi substituída por uma conexão sólida entre as placas superior e inferior.

Figura 15 – Localização da solda na intersecção das tiras de GE.



Fonte: [34], modificado.

Conforme indicado na Figura 14, o autor optou por usar uma malha quadrática no modelo tipo casca e uma malha tetraédrica no modelo sólido. Para avaliar a validade da solução por MEF, foi realizado o refinamento da malha do modelo sólido 3D e do modelo tipo casca. Em seguida, a convergência das malhas foi testada. Uma simulação simples com deslocamento de 5 mm com os dois modelos para vários tamanhos de malha foi feita e os resultados obtidos, bem como o tempo de simulação, estão apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 1 - Resultados do modelo 3D sólido e uso de recursos computacionais.

Modelo 3D Sólido				
Tamanho da malha (mm)	Número de nós	Número de elementos	Uso de memória (MB)	Tempo demandado (s)
0,46	5537702	2665419	51774	203,2
0,70	3100865	1446189	54065	114,2
1,00	1976573	902389	37202	83,6
2,00	1640749	750635	31418	74,9
3,00	1095563	484507	18883	50,0

Modelo 3D Sólido				
Tamanho da malha (mm)	Número de nós	Número de elementos	Uso de memória (MB)	Tempo demandado (s)
4,50	934622	405744	16459	44,6
5,00	927816	402981	16232	38,1

Fonte: [34].

Tabela 2 - Resultados do modelo 3D tipo casca e uso de recursos computacionais.

Modelo 3D Tipo Casca				
Tamanho da malha (mm)	Número de nós	Número de elementos	Uso de memória (MB)	Tempo demandado (s)
0,35	1061634	998407	34149	113,6
0,70	291732	260622	10175	33,9
1,00	158793	137699	6764	17,4
2,00	59994	4758	4646	8,0
3,00	35007	27227	3792	5,5
4,00	27281	21057	3792	4,2

Fonte: [34].

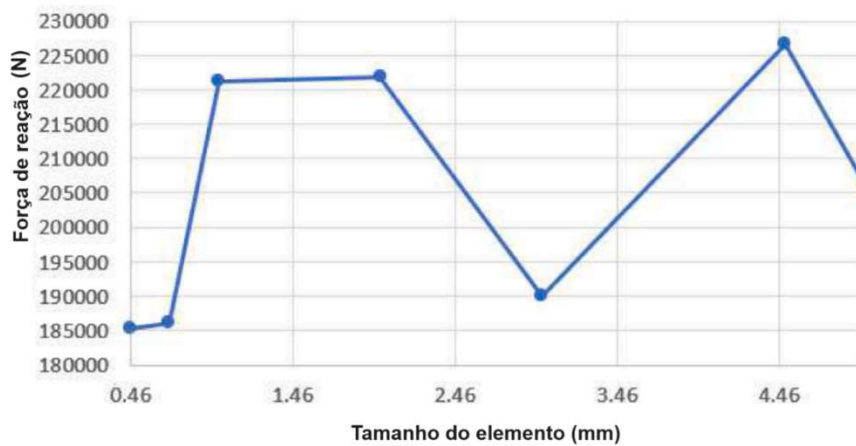
Os valores apresentados nas Tabelas 1 e 2 mostram que para malhas de mesmos tamanho, o modelo 3D tipo casca utilizou menos recursos computacionais. No caso da malha do modelo 3D tipo casca de tamanho 0,35 mm, o uso de recursos computacionais foi significativamente menor que a malha mais refinada do modelo 3D sólido.

O teste de convergência das malhas dos modelos 3D de Naqeeb [34], mostrado na Figura 16, revelou que à medida que o tamanho do elemento diminui de 5 mm para 0,46 mm, a solução flutua e converge no tamanho de elemento de 0,46 mm, com uma razão final de diferença na solução de 0,46% em relação ao tamanho anterior do elemento de 0,7 mm. Para o modelo 3D casca, a solução

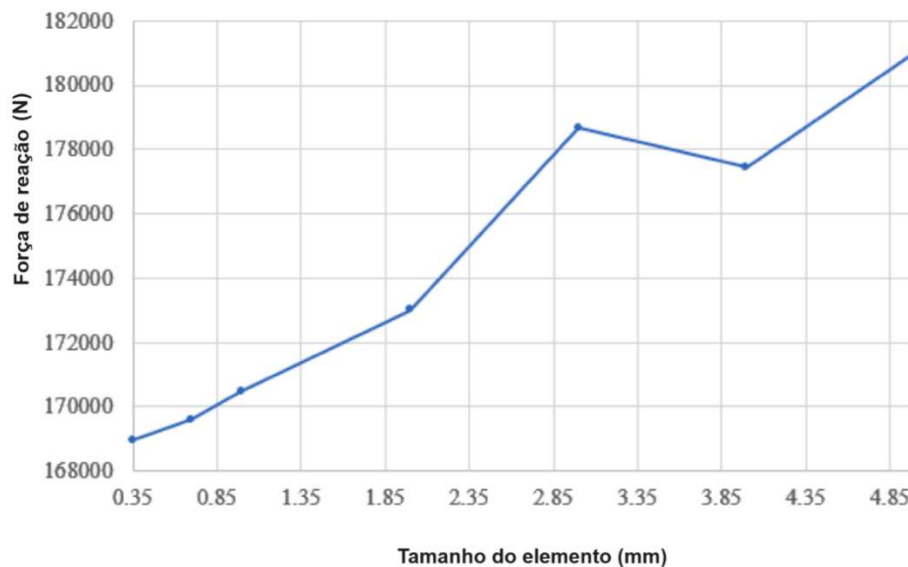
converge na malha de 0,35 mm e a razão final de diferença em relação ao tamanho anterior do elemento de 0,7 mm é de 0,38%. Comparando os resultados da análise de convergência, o modelo tipo casca converge de maneira mais suave do que o modelo sólido. Isso se deve à qualidade inferior dos elementos da malha 3D sólida em comparação com a malha 3D tipo casca.

Figura 16 – Convergência da solução do modelo 3D para um deslocamento de 5 mm.

Modelo sólido



Modelo casca

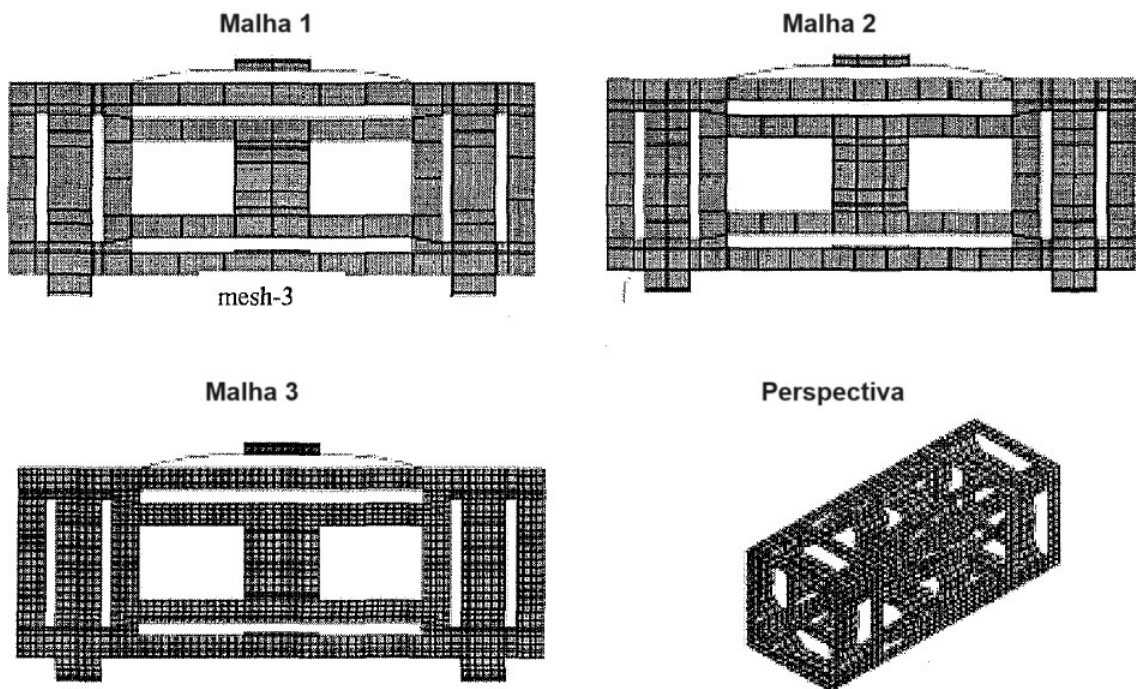


Fonte: [34], modificado.

Yoon [29] simulou o teste de compressão estática de um segmento de GE de 3x3, porém antes de prosseguir com seu objetivo, realizou um teste de convergência de malha em um modelo de GE de 1x1. Segundo o autor, os

resultados de simulações de um mesmo modelo podem divergir de acordo com o tamanho dos elementos da malha utilizada. Portanto, três malhas diferentes foram consideradas, conforme mostrado na Figura 17. Todas as malhas são quadráticas e do tipo casca. O número de elementos é de 392, 556 e 5872, e o número de nós é de 1568, 2156 e 19440, respectivamente.

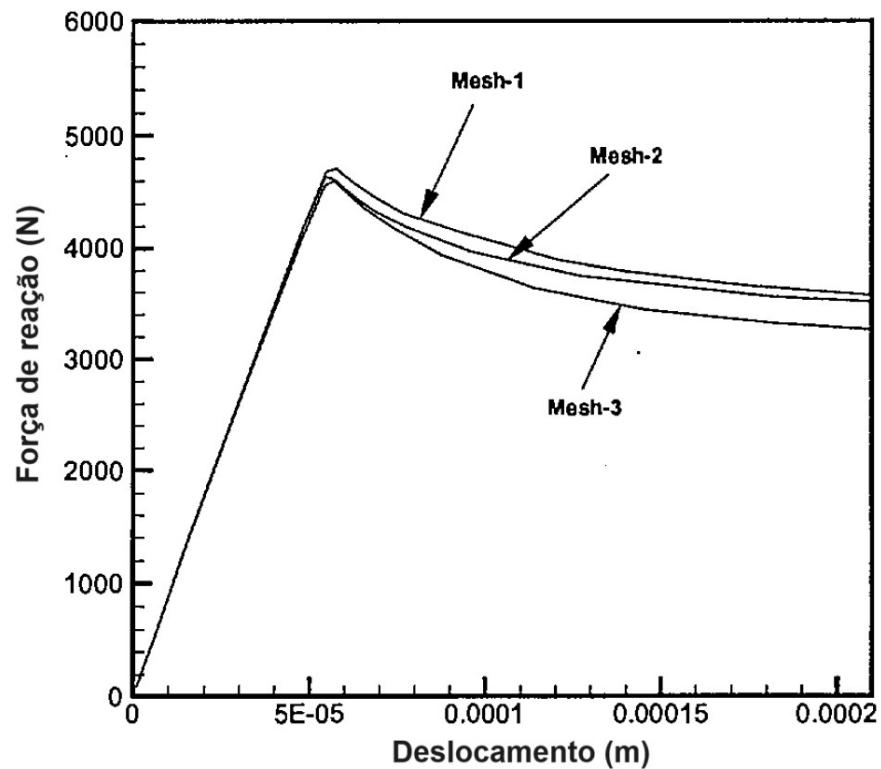
Figura 17 – Visão lateral das malhas e uma visão em perspectiva.



Fonte: [29], modificado.

As curvas de força de reação em função de deslocamento total são plotadas na Figura 18 para comparar as respostas das diferentes malhas aplicadas. Um ponto importante no método Yoon [29] é que conforme a malha é refinada (diminuição do tamanho dos elementos) ocorre uma convergência dos resultados da força de reação para o mesmo deslocamento imposto. Desta forma, o resultado da simulação mitiga sua dependência com o tamanho do elemento, ou seja, com a malha aplicada.

Figura 18 – Deslocamento e força de reação das três malhas.



Fonte: [29], modificado.

Com base nessa comparação, o autor concluiu que a malha mais grossa (malha-1) pode ser utilizada para a simulação da GE de 3x3, a fim de economizar tempo de computação e manter a precisão da força de reação máxima.

Schettino et al. [25], Song [33], Naqeeb [34], e Yoon [29] optaram por usar malhas com elementos quadráticos e do tipo casca para representar GE. Song [33] e Naqeeb [34] tomaram cuidados na representação da região de solda do intertravamento das tiras da GE, sendo que o primeiro autor apresentou as diferenças nos resultados quando não se usa as propriedades mecânica do material da solda em simulações. Naqeeb [34], mostrou a vantagem do modelo 3D tipo casca no consumo de recursos computacionais. Naqeeb [34] e Yoon [29] avaliaram as malhas usadas para seus modelos por meio testes de convergência que permitiram verificar se a malha empregada no modelo está adequada ou se precisa ser refinada.

3.3 Teste de compressão estática

A norma ASTM E9 [35], intitulada "*Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*", define os métodos padronizados para realizar ensaios de compressão em materiais metálicos à temperatura ambiente. O objetivo principal desses ensaios é determinar as propriedades mecânicas do material, como:

- Módulo de elasticidade: a rigidez do material em compressão, ou seja, a capacidade do material de resistir à deformação quando submetido a uma carga compressiva;
- Limite de proporcionalidade: o ponto até o qual a relação entre a tensão e a deformação é linear;
- Limite de escoamento: a tensão máxima que o material pode suportar antes de sofrer deformação plástica irreversível; e
- Resistência à compressão: a tensão máxima que o material pode suportar antes de sofrer ruptura.

A norma ASTM E9 [35] descreve em detalhes os procedimentos para preparar as amostras de teste, realizar o ensaio e analisar os resultados. As amostras de teste geralmente são corpos de prova cilíndricos ou prismáticos usinados a partir do material a ser testado. A carga de compressão é aplicada à amostra de teste de maneira uniforme e controlada até que a falha ocorra. A deformação da amostra é medida durante o ensaio, e os dados de força-deformação são usados para calcular as propriedades mecânicas do material.

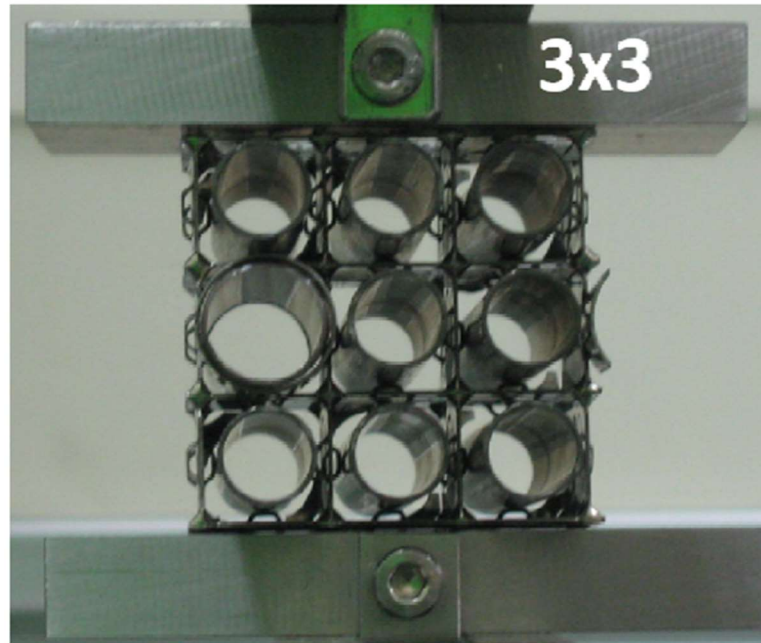
A norma é utilizada em diversos setores da indústria, como aeroespacial, automotiva, construção civil e manufatura, para garantir a qualidade e a segurança dos materiais metálicos, possibilitando a padronização dos procedimentos de ensaio, de modo a ser possível a comparação de resultados obtidos por diferentes laboratórios.

Segundo a norma, máquinas de ensaio equipadas com controle de taxa de deformação, devem ser configuradas para deformar o corpo de prova a uma taxa nominal de 0,005 mm/mm/min. A temperatura ambiente de referência para os ensaios é de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

Young Ik [36] realizou o ensaio de compressão estática em GE de 1x1 e GE de 3x3. A configuração do dispositivo de ensaio e o corpo de prova está

ilustrado na Figura 19. A velocidade de compressão foi controlada pelo deslocamento de 0,05 pol/min. O ensaio mecânico foi realizado em uma máquina de ensaio INSTRON™ com uma força máxima de 50 kN. As cargas de compressão atuantes nas GE foram medidas em função da deflexão durante o ensaio.

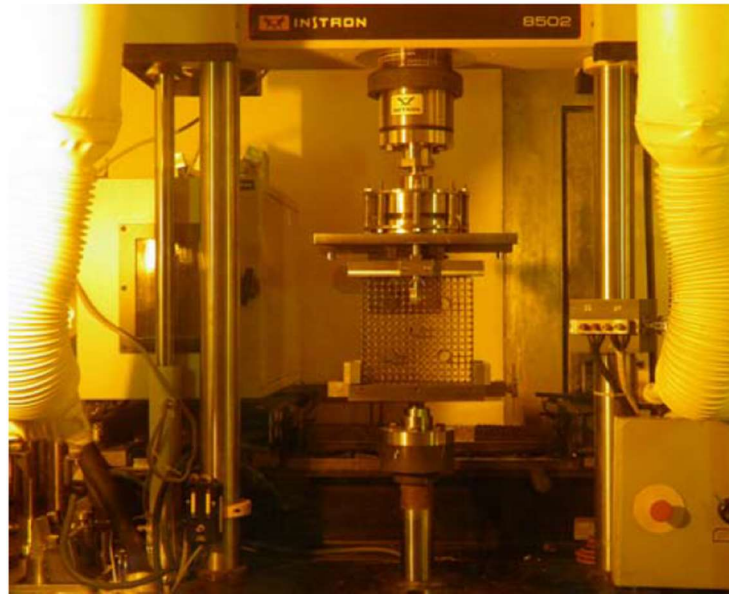
Figura 19 – Configuração do dispositivo de teste.



Fonte:[36].

Jin, Y. G. et al [37] fez o ensaio de compressão com uma GE irradiada em uma célula quente M5b, Figura 20. O experimento foi realizado utilizando uma máquina de ensaio universal (Instron 8502) com célula de carga de 50 kN em temperatura ambiente. A carga inicial foi de -0,5 kN e a velocidade de compressão foi de 0,5 mm/min. O sistema de aquisição de dados, associado ao sistema de controle da máquina de ensaio universal, registrou a carga e o deslocamento durante a compressão da GE.

Figura 20 – Configuração do dispositivo de teste dentro da célula quente.



Fonte: [37].

Assim, apesar da GE não ser um corpo de prova padrão para a norma ASTM E9, os testes de compressão estática realizadas em máquina de teste universal seguem esta norma.

3.4 Verificação e validação computacional

Em 2006, a Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME) formou o comitê PTC 60 com o objetivo de desenvolver um guia abrangente para Verificação e Validação (V&V) em simulação computacional de mecânica dos sólidos. O guia [38], intitulado "*Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics*", foi publicado no mesmo ano e apresenta um conjunto de práticas e etapas essenciais para garantir a confiabilidade dos modelos computacionais utilizados na área. Em 2019, o guia foi elevado à categoria de norma [18], consolidando sua importância como referência fundamental para profissionais que atuam com simulação computacional em mecânica dos sólidos.

Os processos de V&V começam e terminam com modelagem e modelos. Isso porque é um modelo computacional que se busca verificar e validar para fazer previsões dentro do domínio de uso pretendido do modelo.

No contexto da modelagem científica e da engenharia, os modelos conceituais, matemáticos e computacionais são três etapas interligadas que

representam diferentes níveis de abstração e formalização de um sistema ou fenômeno real.

O modelo conceitual é a representação abstrata e qualitativa do sistema ou fenômeno que se deseja estudar. Ele descreve os principais elementos, suas interações e os processos envolvidos de forma simplificada e intuitiva.

O modelo matemático traduz o modelo conceitual em uma linguagem matemática, utilizando equações, desigualdades, funções e outros conceitos matemáticos para descrever as relações entre as variáveis do sistema. Ele permite quantificar as características do sistema e prever seu comportamento sob diferentes condições.

O modelo computacional implementa o modelo matemático em um programa de computador, permitindo realizar simulações e análises numéricas do sistema. Ele traduz as equações e relações matemáticas em um algoritmo que pode ser executado por um computador, gerando resultados numéricos e visualizações.

Os três modelos estão interligados e se complementam. O modelo conceitual fornece a base para o desenvolvimento dos modelos matemático e computacional, enquanto os modelos matemático e computacional permitem a análise quantitativa e a simulação do sistema, validando e refinando o modelo conceitual.

Com base nos três tipos de modelos descritos acima, ou seja, conceitual, matemático e computacional, foram descritos os conceitos de V&V:

- Verificação: o processo de determinar se um modelo computacional representa com precisão o modelo matemático e sua solução; e

- Validação: o processo de determinar o grau em que um modelo é uma representação precisa do mundo real, a partir da perspectiva dos usos do modelo.

Existem duas partes fundamentais da verificação:

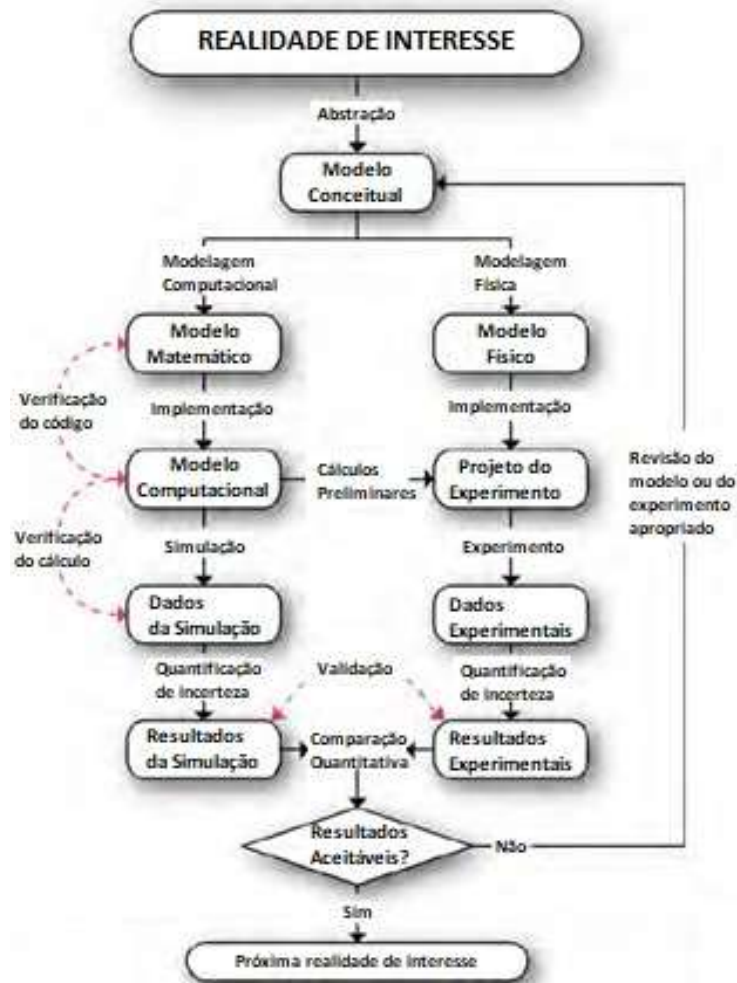
- Verificação de Código: estabelecer confiança, por meio evidências, de que o modelo matemático e os algoritmos de solução estão funcionando corretamente; e

- Verificação de Cálculo: estabelecer confiança, por meio de evidências, de que a solução discreta do modelo matemático é precisa.

Simplificando, a verificação é o domínio da matemática e a validação é o domínio da física. A maneira como a matemática e a física interagem no processo

de Verificação e Validação (V&V) é ilustrada no fluxograma da Figura 21. Após modelo conceitual, o processo de V&V possui dois ramos, um que contém os elementos de modelagem (simulação) e o outro o teste físico (experimento).

Figura 21 – Atividades e resultados do processo de Verificação e Validação (V&V).



Fonte: [38], modificado.

A Figura 21 ilustra a importância do teste físico no processo de V&V. Afinal, somente por meio de observações físicas (experimentação) é possível avaliar a adequação dos modelos conceitual e matemático selecionados para representar a realidade de interesse.

Por último, é enfatizado o papel da quantificação da incerteza (QI). As técnicas de QI tentam quantificar o efeito dessas variações de parâmetros nos resultados da simulação.

Os três elementos-chave do plano de V&V que auxiliam a estimar a alocação de recursos são:

- Características de Resposta do Sistema: definem-se as características do sistema que serão comparadas e como essa comparação será realizada (por meio de métricas);

- Teste de Validação: refere-se ao experimento utilizado para demonstrar a capacidade preditiva do modelo. É por meio desse teste que se determina se o modelo pode ser aceito para o uso pretendido; e

- Requisitos de Precisão: a especificação dos requisitos de precisão permite responder à pergunta "aceitação adequada" de maneira quantitativa. O plano de V&V é a base para o desenvolvimento dos modelos e avaliação, além disso estabelece os critérios para aceitá-los como adequados para fazer previsões.

O Guia [38] enfatiza que a Verificação deve preceder a Validação. A lógica por trás disso é que tentar validar um modelo usando um código que ainda possa conter erros pode levar a uma conclusão falsa sobre a validade do modelo, portanto se deve iniciar o processo com a verificação do código e do cálculo.

A Verificação de Código é, em geral, domínio dos desenvolvedores de software. Dentre as técnicas de Verificação de Código, o método mais popular é comparar as saídas do código com soluções analíticas; esse tipo de comparação é o pilar do teste de regressão.

A verificação de cálculo é uma estimativa dos erros na solução numérica devido à discretização. O erro de discretização é geralmente estimado comparando soluções numéricas obtidas com duas ou mais malhas de resolução crescente, ou seja, com elementos cada vez menores. O objetivo dessa comparação é determinar a taxa de convergência da solução.

O processo de validação tem como objetivo avaliar a capacidade preditiva do modelo. Essa avaliação é feita comparando os resultados preditivos do modelo com os experimentos de validação. Se essas comparações forem satisfatórias, o modelo é considerado validado para o uso pretendido.

Ainda, segundo o Guia, a razão original para desenvolver um modelo era fazer previsões para aplicações em que dados experimentais não pudessem ser obtidos. Portanto, no plano de V&V, estabelece-se que, se o modelo for capaz de prever adequadamente alguns casos relacionados e geralmente mais simples do uso pretendido, onde dados experimentais possam ser obtidos, então o modelo é

validado para fazer previsões além dos dados experimentais para o uso pretendido. Simplificando, se o modelo passar nos testes do plano de V&V, ele poderá ser usado para fazer as previsões desejadas com confiança.

Os componentes chave do processo de validação são:

- Experimentos de Validação: Experimentos realizados expressamente para fins de validação do modelo; e
- Avaliação de Precisão: Quantificação do quão bem os resultados experimentais e de simulação se comparam.

As qualidades importantes de um experimento de validação incluem:

- Redundância de Dados: Repetição de experimentos para estabelecer a variação experimental;
- Medições de Suporte: Não apenas as medições das grandezas importantes da resposta do sistema são registradas, mas também outras medições de suporte. Um exemplo seria registrar a curvatura de uma viga.
- Quantificação da Incerteza: Os erros são geralmente classificados como aleatórios (precisão) ou sistemáticos (viés).

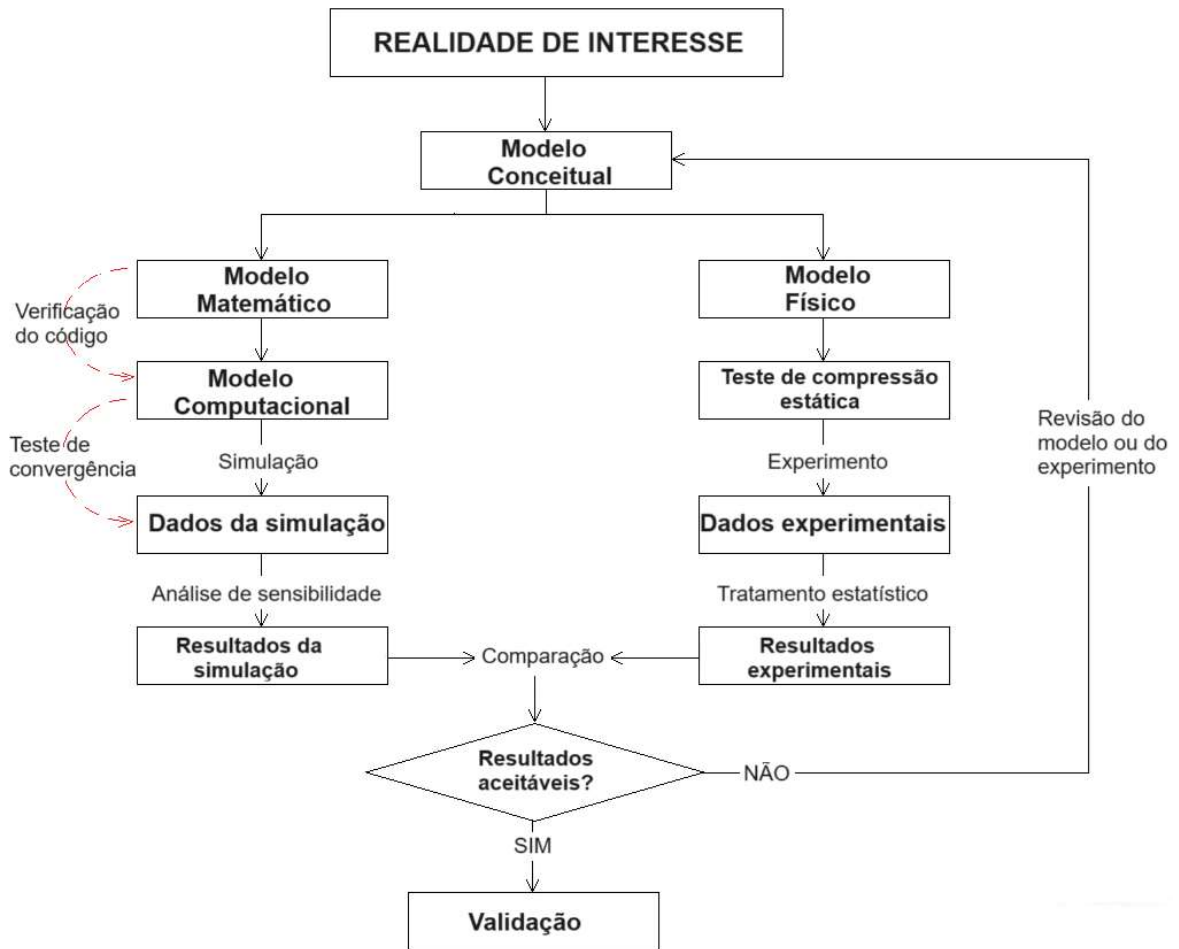
O Guia [38] conclui que, uma vez obtidos os resultados experimentais e de simulação, a fase de avaliação de precisão do processo de validação pode começar. Se possível, a comparação dos resultados experimentais e de simulação deve ser feita por um terceiro interessado, pois isso ajuda a remover um viés que possa favorecer os resultados experimentais ou de simulação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

No desenvolvimento deste trabalho, foi obedecida a sequência da Figura 21, considerando que a realidade de interesse é conhecer o comportamento e o limite de carga de uma GE antes da inserção do EC no reator devido aos carregamentos estáticos durante as etapas de montagem, manuseio, fixação de componentes e transporte do EC. O modelo conceitual abstraído da realidade de interesse constitui-se na implementação de uma carga compressiva na GE, tendo como resposta as propriedades mecânicas de rigidez elástica e a força de deflexão da GE sob carregamento estático de compressão.

O modelo físico utilizado é o da GE produzida conforme as características de projeto, considerando um segmento de GE de 3x3, sem varetas de combustível inseridas sob carregamento compressivo contra uma superfície rígida. O experimento que reproduz o modelo físico é o teste de compressão estática. O modelo matemático se baseia no MEF aplicado à análise estrutural estática comum a maioria dos problemas de engenharia (Figura 10). A modelagem computacional foi realizada com o software *Ansys Mechanical* com boa reputação no mercado e amplamente aplicado em estudos na literatura, garantindo a veracidade da verificação do código. As condições de contorno, análogas ao experimento, foram definidas e usadas na modelagem computacional e o teste de convergência de malha foi empregado nos dados das simulações para verificação do cálculo, conforme citado no Guia [38]. A quantificação da incerteza dos dados experimentais foi realizada por meio de tratamento dos dados. O laboratório, onde foi realizado o experimento, já possuía os limites de escoamento, limite de resistência à tração e módulo de elasticidade do material da tira da GE, portanto para a quantificação da incerteza da simulação numérica foi feita uma análise de sensibilidade, usando como referência os materiais com maiores e menores resistências e verificando as diferenças. Em seguida os resultados experimentais e numéricos foram comparados para fins de validação. O fluxograma de V&V é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Metodologia aplicada nas atividades de V&V.



Fonte: Autor.

4.1 Preparação dos corpos de prova

A GE é uma estrutura complexa, responsável por manter as varetas de combustível em sua posição ideal e garantir o fluxo uniforme do refrigerante. A base da GE são suas tiras, resistentes à corrosão e às altas temperaturas do reator, cada tira apresenta molas e batentes que foram produzidos por um processo de estampagem.

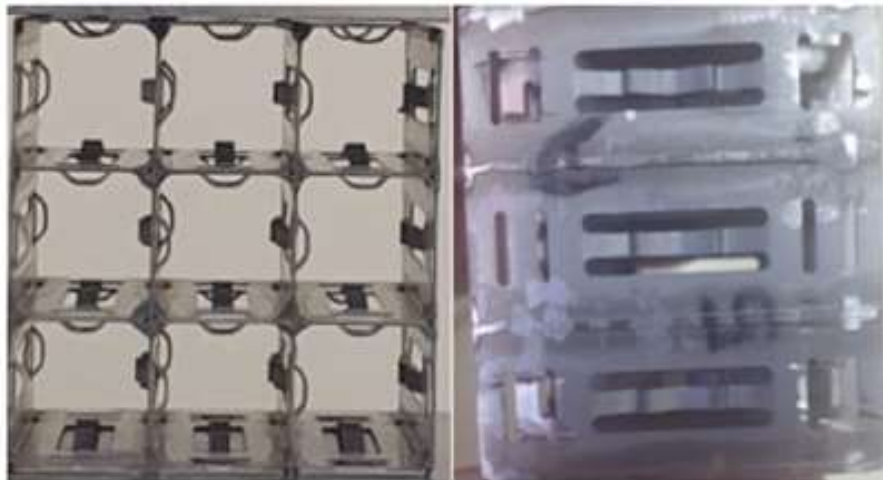
As tiras se entrelaçam e se interconectam em pontos nas ranhuras, formando uma estrutura tridimensional robusta. As tiras das GE são cuidadosamente encaixadas à mão sobre uma superfície rígida, garantindo que cada componente esteja na posição correta. A pasta de brasagem é manualmente depositada com cuidado nas intersecções das tiras pelo operador.

A brasagem cria uma união permanente e extremamente resistente, garantindo a integridade da GE em condições extremas.

A fabricação da grade espaçadora é um processo feito à mão, exigindo habilidade e precisão dos profissionais envolvidos.

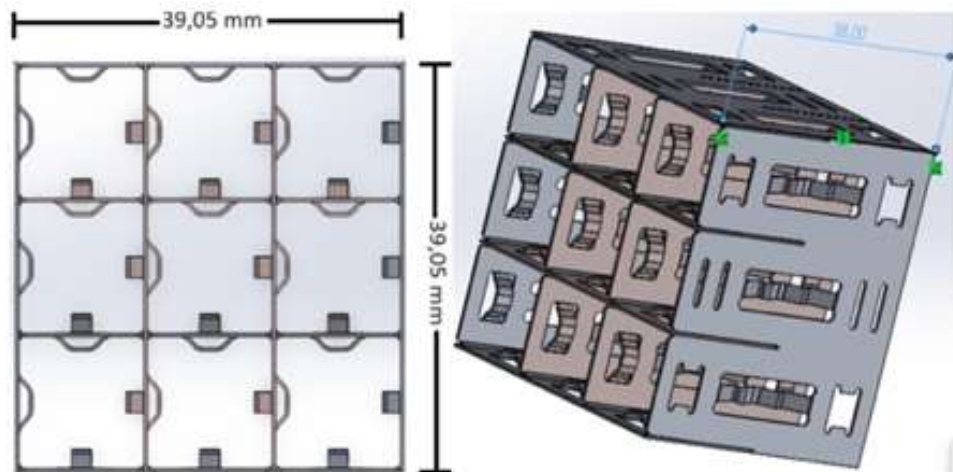
Uma GE de 17x17, fabricada artesanalmente, formada por tiras de ASTM B637 UNS N07718 com 38 mm de altura e 0,35 mm de espessura foi cortada para confecção dos corpos de prova. A GE foi cortada com esmeril e lixada para remover imperfeições e irregularidades da superfície dos segmentos, proporcionando um acabamento uniforme. Foram produzidos sete segmentos de GE de 3x3 com dimensões de 39,05 mm x 39,05 mm, 38 mm de altura e 0,35 mm de espessura e, em seguida, os segmentos de GE foram numerados de 01 até 07 e suas faces externas identificadas com as letras “A”, “B”, “C” e “D” conforme apresentado na Figura 23. As dimensões finais estão representadas na Figura 24.

Figura 23 – Corpo de prova fabricado e identificado com o número 5.



Fonte: Autor.

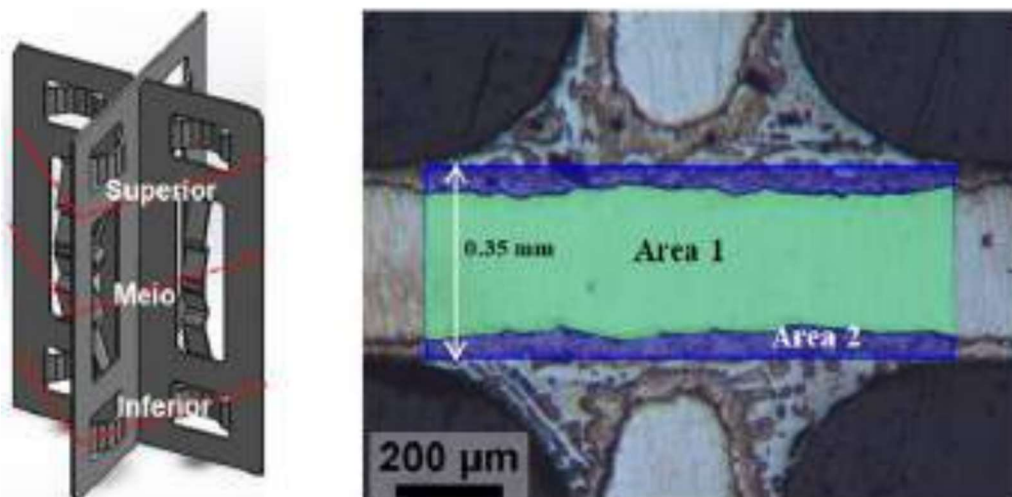
Figura 24 – Representação do corpo de prova com as dimensões finais.



Fonte: Autor.

Os segmentos de GE resultantes do corte mantiveram as características da GE original, com as tiras unidas por processo de brasagem. A especificação da pasta de brasagem AWS 5.8 é BNi-7, cujo metal de brasagem é utilizado para a brasagem de estruturas alveolares, conjuntos de tubos de paredes finas e outras estruturas utilizadas em altas temperaturas. Rezende [39], estudou o cisalhamento das juntas brasadas da GE original, e observou que o material de brasagem preenche toda a folga da intersecção das tiras (Figura 25).

Figura 25 – (a) Posição de corte das amostras e (b) Indicação de medição das áreas.



Fonte: [39].

Os segmentos de GE foram submetidos ao tratamento térmico de envelhecimento em um forno a vácuo, da seguinte forma:

- aquecimento do forno até 750°C;
- patamar de 8,5 h a 750°C;
- rampa de transição de 1,5 h da temperatura de 750°C para 650°C;
- patamar de 8 h a 650°C; e
- resfriamento dentro do forno até a temperatura ambiente.

Segundo Rezende [39], o tratamento térmico de envelhecimento não altera significativamente as propriedades mecânicas da junta brasada.

Dessa forma, os materiais que compõem os segmentos de GE de 3x3 possuem as mesmas propriedades mecânicas da GE original tratada termicamente.

4.2 Ensaio mecânico

Esta seção descreve em detalhes os métodos e procedimentos utilizados no teste de compressão estática, incluindo o preparo dos corpos de prova, a instrumentação utilizada e tratamento dos dados.

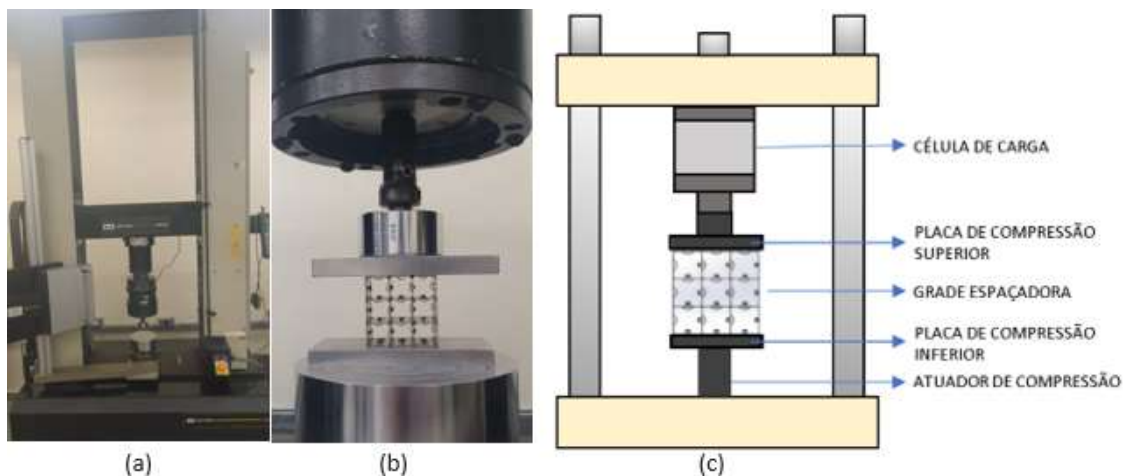
4.2.1 Descrição do dispositivo de teste

Sete segmentos de GE de 3x3 foram submetidos ao teste de compressão estática na máquina de teste universal (Instron 5500R) com célula de carga de 10 kN à temperatura ambiente. A Figura 26 apresenta a configuração do experimento. Conforme a norma [35], para máquinas de ensaio equipadas com controle de taxa de deformação, a máquina deve ser ajustada para deformar o corpo de prova a uma taxa nominal de 0,005 mm/mm/min, considerando que a altura da GE é de 39,05 mm, a velocidade de avanço da parte superior da máquina foi configurada para 0,2 mm/min ($0,005 \text{ mm/mm/min} \times 39,05 \text{ mm} \approx 0,2 \text{ mm/min}$).

À medida que o deslocamento era incrementado a máquina registrava os valores da força de reação do conjunto. Com os dados extraídos da máquina de

ensaios foram feitos os gráficos da força de reação em função do deslocamento para cada corpo de prova de segmento da GE ensaiado. Os dados abaixo de 100N (pré-carga imposta para o assentamento das GE) e os dados cujas tensões estão acima do limite de escoamento foram desprezados, assim foi obtida a inclinação da reta média para cada corpo de prova na região elástica, o que corresponde à rigidez elástica do segmento de GE de 3x3 ensaiado. O mesmo procedimento foi realizado para os demais corpos de prova ensaiados. O teste é encerrado com a falha do corpo de prova.

Figura 26 (a) - Máquina de teste. (b) Corpo de prova na posição de ensaio (c) Croqui esquemático do ensaio de compressão estática da GE.



Fonte: autor.

4.2.2 Tratamento dos dados

Após obter a rigidez elástica e força máxima de reação, de cada segmento de GE de 3x3, a média e o desvio padrão foram calculados para cada um desses resultados. Valores que se desviam da média, destoam do comportamento dos demais corpos de prova, podem indicar erros na coleta de dados ou comportamentos excepcionais que merecem investigação. Logo, o tratamento dos dados contribui para a melhora da confiabilidade permitindo comparações.

4.3 Modelagem computacional

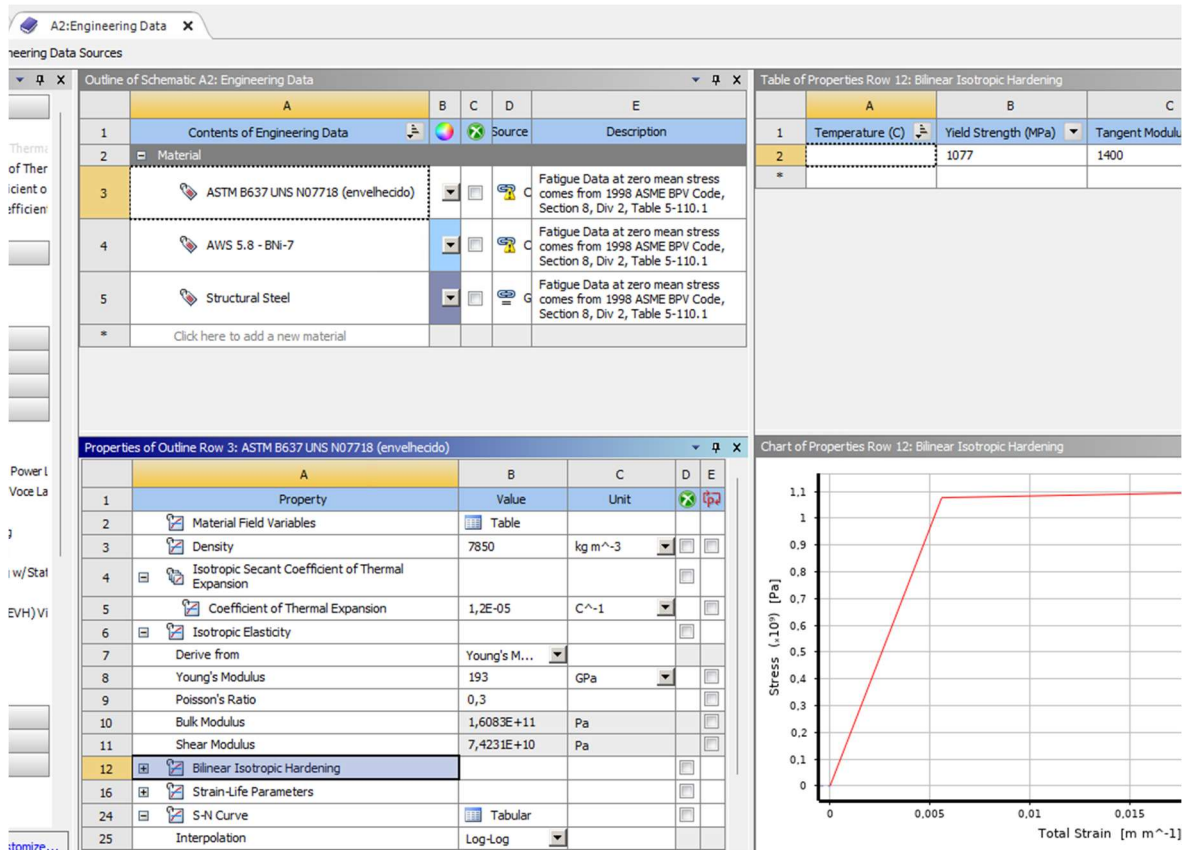
Com auxílio do software SolidWorks, o corpo de prova foi desenhado e sua geometria foi transferida para outro programa, o ANSYS.

O ANSYS, software de engenharia, se destaca por sua expertise no MEF, permitindo simulações numéricas precisas e confiáveis. Este software usa ferramentas matemáticas que garantem a aproximação gradual dos resultados à realidade, à medida que a quantidade de elementos na análise aumenta.

4.3.1 Caracterização

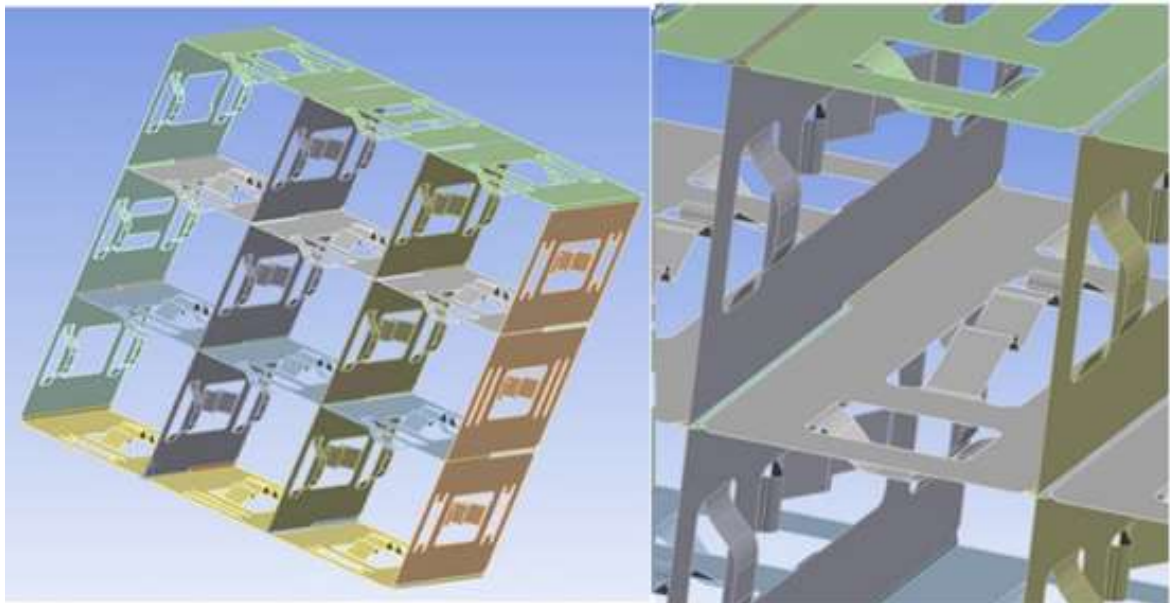
O segmento de GE de 3x3 foi modelado usando elementos finitos do tipo casca e malha quadrática para reproduzir seu comportamento mecânico real com a ajuda do programa ANSYS 2023 R2. As dimensões de projeto foram respeitadas, e nos vãos das intersecções entre as tiras foi adicionada uma extensão para representar o material da junta brasada que preenche os vãos entre as tiras e têm espessura de 0,35 mm, conforme observado na Figura 28. As propriedades do material da junta brasada foram obtidas da referência [40]. Por se tratar de uma simulação onde os materiais envolvidos atingem a região plástica, as propriedades dos materiais foram inseridas no software e a propriedade *Large deflection* foi acionada. Assim, a simulação numérica levará em consideração as deformações plásticas.

Figura 27 – Exemplo de inserção da propriedade mecânica do material no ANSYS.



Fonte: autor.

Figura 28 – Representação do segmento de GE no software ANSYS. (b) Detalhe da representação da brasagem no modelo.



(a)

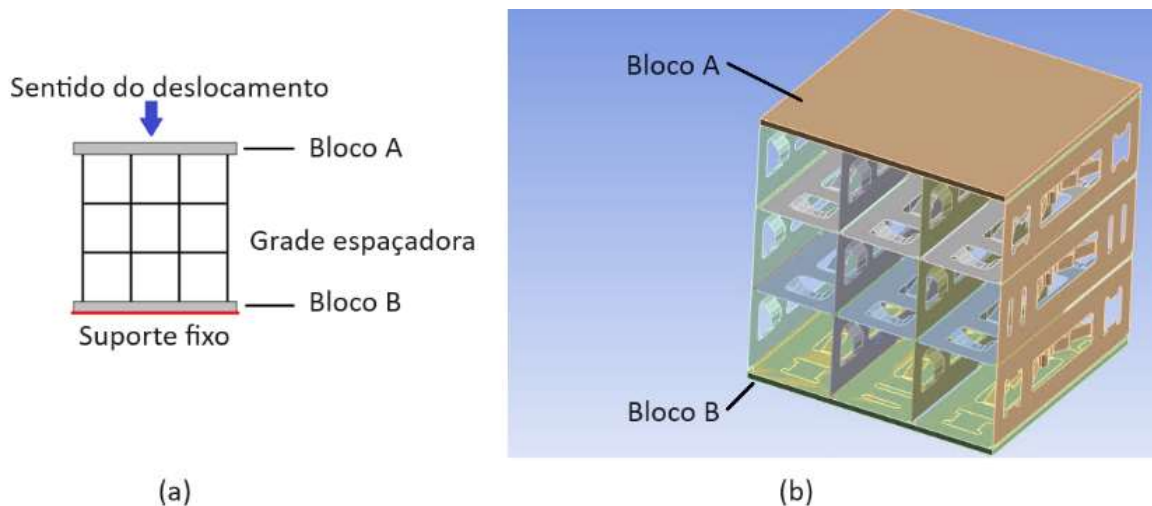
(b)

Fonte: autor.

4.3.2 Condições de contorno adotadas

Conforme ilustrado na Figura 29, dois blocos foram modelados para representar o teste de compressão estática. O bloco A representa a parte superior da máquina de teste que recebe a carga de deslocamento e pode se mover apenas verticalmente. O bloco B representa a parte inferior da máquina e não se movimenta. Todos os contatos entre a GE e os blocos possuem atrito, com coeficiente de atrito estático igual a 0,25 [15]. A simulação é realizada à temperatura ambiente e a força de reação no suporte fixo do conjunto é obtida. Os resultados são plotados em um gráfico da força de reação em função do deslocamento.

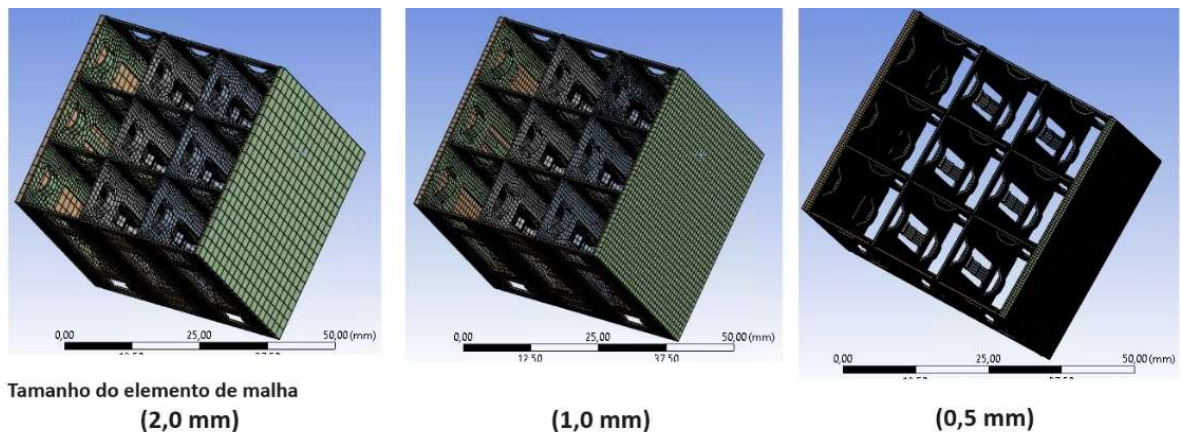
Figura 29 – (a) Condições de contorno do modelo 3D. (b) Modelo 3D com os blocos A e B.



Fonte: autor.

4.3.3 Convergência de malha

Os resultados de simulações de um mesmo modelo podem divergir de acordo com o tamanho dos elementos da malha utilizada. Para minimizar o efeito da malha utilizada, foi realizada uma investigação da dependência dos resultados com a malha adotada no modelo computacional. Seis malhas diferentes foram consideradas, conforme mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Exemplo de malhas testadas no modelo 3D.

Fonte: autor.

Foram testadas as malhas com o elemento do tamanho de 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,4 mm, 0,3 mm e 0,2 mm. As curvas de força de reação em função do deslocamento total foram plotadas para comparar as respostas das diferentes malhas aplicadas. Um ponto importante neste método é que conforme a malha é refinada (diminuição do tamanho dos elementos) ocorre uma convergência dos resultados da força de reação para o mesmo deslocamento imposto. Desta forma, o resultado da simulação mitiga sua dependência com o tamanho do elemento, ou seja, com a malha adotada.

A qualidade da malha no ANSYS é decisiva para a confiabilidade dos resultados das simulações computacionais. Uma malha bem estruturada garante precisão e convergência, enquanto uma malha mal definida pode levar a erros e resultados inconsistentes.

O ANSYS oferece diversas ferramentas para avaliar a qualidade da malha, incluindo a métrica *Skewness*, adotada no presente trabalho e que quantifica a distorção dos elementos da malha, fornecendo uma indicação da qualidade da discretização.

A Tabela 3, baseada no manual do ANSYS [41], mostra as faixas de distorção dos elementos para esse método.

Tabela 3 – Qualidade da malha em função do valor de Skewness.

Valor de Skewness	Qualidade da malha
1	distorcido
0,9 — < 1	ruim
0,75 — 0,9	pobre
0,5 — 0,75	razoável
0,25 — 0,5	bom
> 0 — 0,25	excelente
0	perfeito

Fonte: [41].

4.3.4 Análise de sensibilidade

A incerteza da solução numérica foi verificada, considerando que a origem dos dados de entrada do material da tira (ASTM B637 UNS N07718) são de origem experimental, assim os valores de entrada do programa: resistência à tração, limite de escoamento e módulo de elasticidade devem ser alterados conforme os limites dos dados experimentais para obter a variação dos resultados. Como a resistência à tração e o limite de escoamento possuem uma baixa variação (inferior a 1 % em relação à média), a análise de sensibilidade foi focada no módulo de elasticidade. Se os resultados divergirem de forma significativa os valores médios não podem ser usados na simulação.

Tabela 4 - Dados do material ASTM B637 UNS N07718 tratado termicamente.

Propriedade	Média	Desvio padrão	Extremo 1 (GPa)	Extremo 2 (GPa)
Módulo de Elasticidade (GPa)	193	7	186	200

Fonte: laboratório.

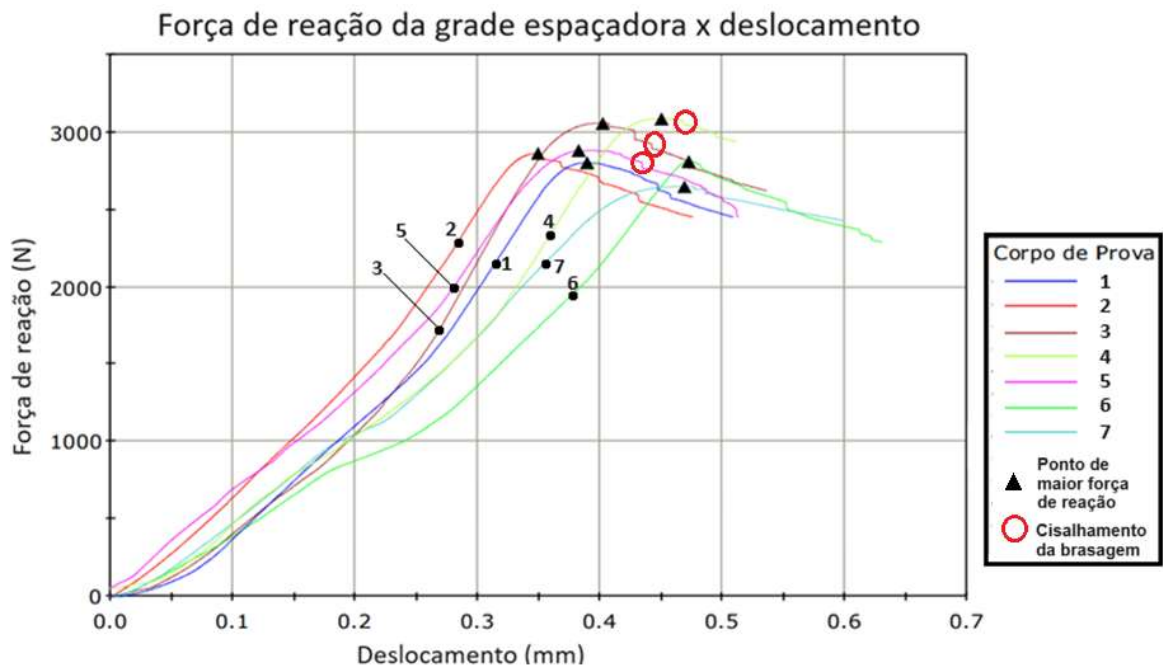
Uma simulação para cada extremo foi realizada para verificar as diferenças nos resultados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Teste de compressão estática

Os resultados dos experimentos realizados são apresentados na Figura 31. Em cada uma das curvas pode-se observar a presença de um “degrau”, circulado em vermelho, o que representa o cisalhamento de uma das brasagens que o corre após a GE ter atingido a carga máxima.

Figura 31 – Gráfico da Força de reação da grade em função do deslocamento para cada corpo de prova.



Fonte: autor.

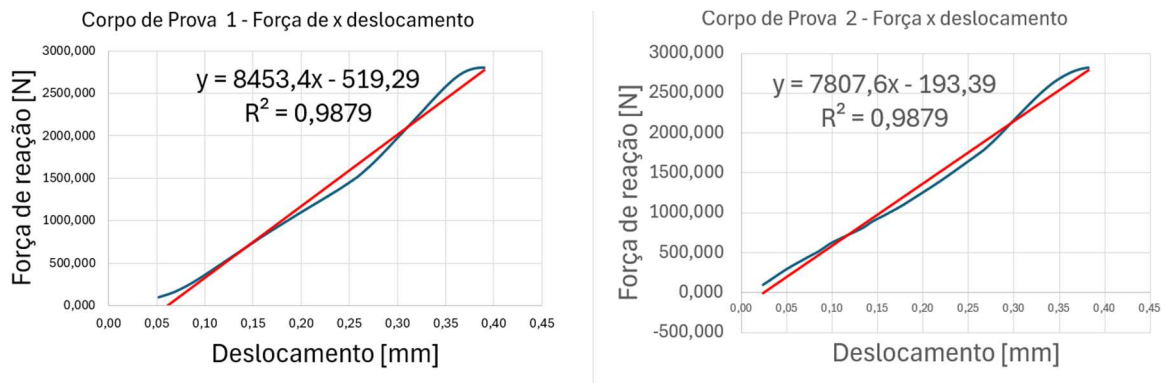
Com base nos dados extraídos da máquina de ensaios, a rigidez elástica de cada corpo de prova de segmento da GE de 3x3 foi calculada. Primeiramente, foi feita a remoção de dados ruidosos: dados abaixo de 100N (pré-carga para assentamento) e os dados após o ponto de carga máxima foram excluídos, assim a análise se concentrou na região elástica do comportamento do material, onde a relação entre tensão e deformação é linear.

O cálculo da inclinação da reta média foi feito, ajustado aos dados da região elástica, para cada corpo de prova. Essa inclinação representa a rigidez elástica do corpo de prova, quantificando sua resistência em relação à deformação

sob carga compressiva. Gráficos de força de reação em função da deformação foram gerados para cada corpo de prova (conforme Figura 32, Figura 33, Figura 34 e Figura 35) destacando a região elástica e a reta média ajustada.

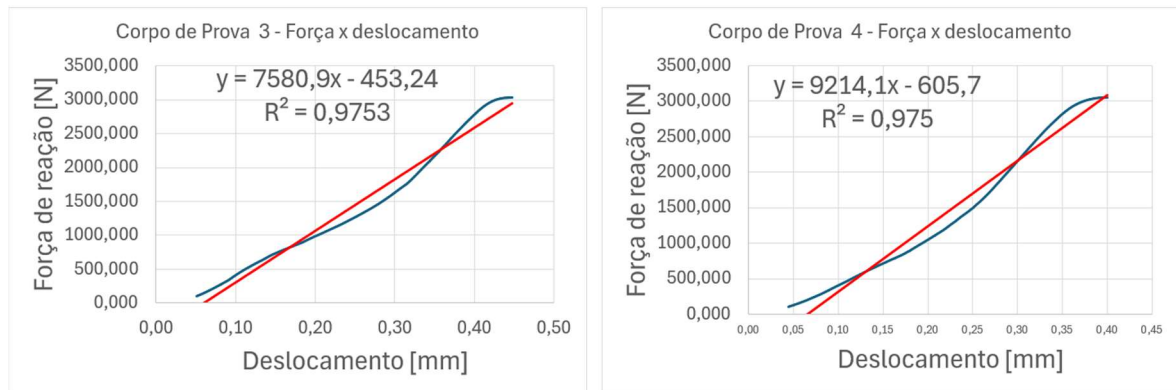
O valor da rigidez elástica (inclinação da reta média) para cada corpo de prova foi registrado e é apresentado na Tabela 5.

Figura 32 – Gráfico da força de reação da grade em função do deslocamento para os corpos de prova 1 e 2.



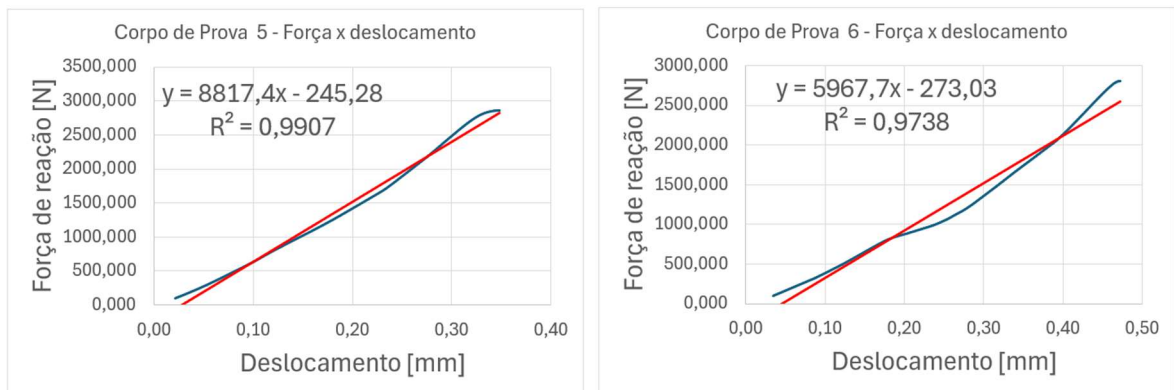
Fonte: autor.

Figura 33 – Gráfico da força de reação da grade em função do deslocamento para os corpos de prova 3 e 4.



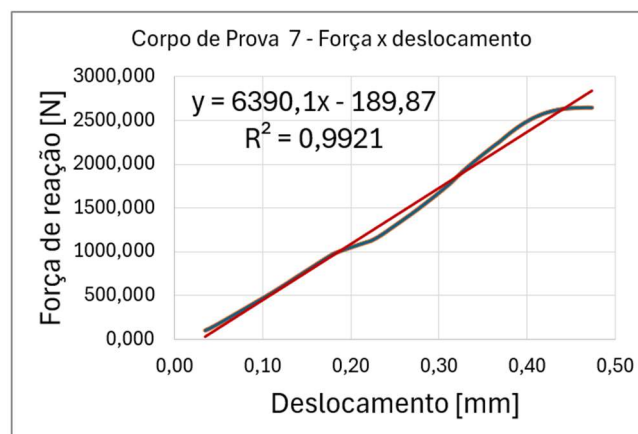
Fonte: autor.

Figura 34 – Gráfico da força de reação da grade em função do deslocamento para os corpos de prova 5 e 6.



Fonte: autor.

Figura 35 – Gráfico da força de reação da grade em função do deslocamento para o corpo de prova 7.



Fonte: autor.

A Tabela 5 apresenta a rigidez elástica calculada e os dados experimentais com média e desvio padrão para os corpos de prova ensaiados.

Tabela 5 - Rigidez elástica, força máxima de reação e seu respectivo deslocamento obtidos nos experimentos.

Segmento de GE de 3x3	Força máxima [kN]	Deslocamento [mm]	Rigidez [kN/mm]*
1	2,802	0,390	8,45
2	2,820	0,383	7,81
3	3,033	0,450	7,58
4	3,056	0,402	9,21
5	2,862	0,350	8,82
6	2,810	0,472	5,97

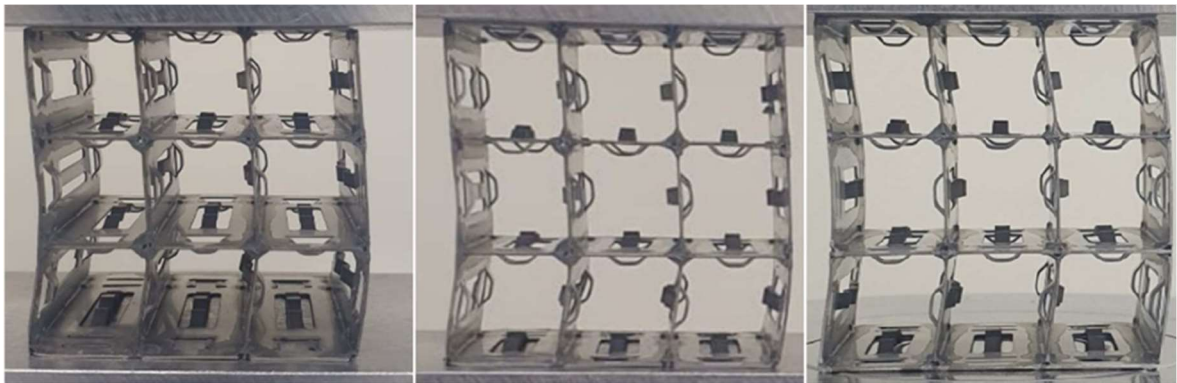
Segmento de GE de 3x3	Força máxima [kN]	Deslocamento [mm]	Rigidez [kN/mm]*
7	2,646	0,467	6,39
Média**	2,9 ± 0,1	0,42 ± 0,05	8 ± 1

*Rigidez elástica calculada para segmento de GE de 3x3.

Fonte: autor.

A Figura 36 ilustra o aspecto dos corpos de prova de segmentos das GE de 3x3 sob carga compressiva durante o experimento. Por meio da Figura 36 é possível constatar que a flambagem da GE ocorre nas tiras paralelas à direção da carga e não ocorre nas tiras perpendiculares como o observado nos experimentos de Jeon [28] (Figura 6).

Figura 36 – Aspecto dos corpos de prova de segmentos da GE de 3x3 na força máxima de reação.



Fonte: autor.

5.2 Modelagem computacional

O modelo 3D foi executado adotando-se diferentes malhas e observou-se que as malhas fornecem valores semelhantes de força de reação para um mesmo deslocamento, registrando-se forças máximas de reação entre 2955 N e 3065 N.

Tabela 6 – Resultados obtidos utilizando-se diferentes malhas.

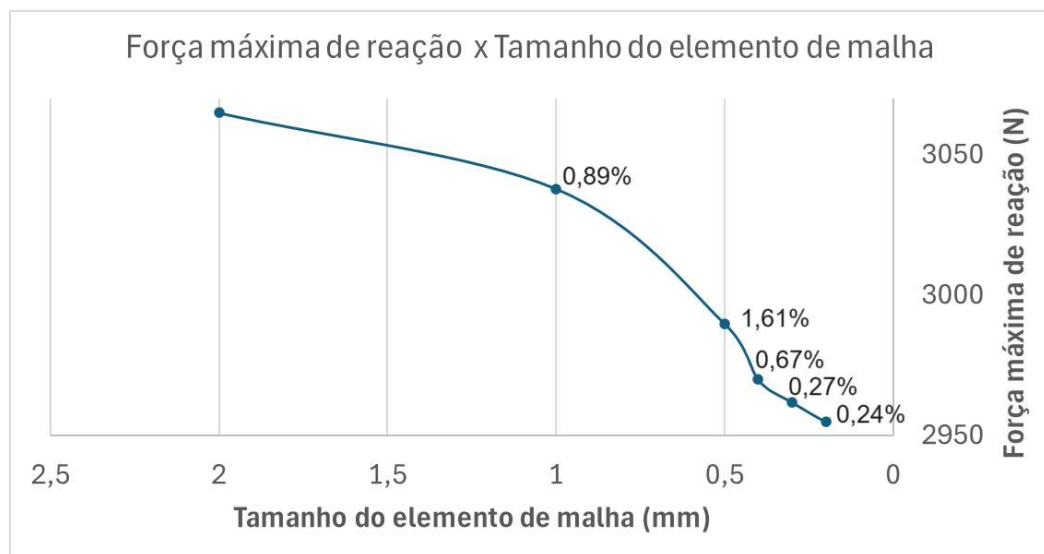
Tamanho do elemento de malha [mm]	Força máxima de reação [N]	Deslocamento [mm]	Número de elementos	Número de nós	Valor de Skewness
2,0	3065	0,036	23101	28028	0,16
1,0	3038	0,036	46895	46895	0,13
0,5	2990	0,036	69001	180616	$3,95 \times 10^{-2}$
0,4	2970	0,036	353979	353979	$2,32 \times 10^{-2}$
0,3	2962	0,036	216618	622616	$2,1 \times 10^{-2}$
0,2	2955	0,036	630387	1983552	$1,14 \times 10^{-2}$

Fonte: autor.

Segundo o no manual do ANSYS [41], pelo valor de *Skewness*, as malhas testadas são consideradas excelentes.

A Figura 37 mostra o gráfico das forças máximas de reação em função do tamanho do elemento de malha. Os percentuais acima de cada ponto representam a diferença do resultado do valor da força em relação à malha anterior. A convergência de malha ocorre nas malhas com elementos de tamanho 0,3 mm e 0,2 mm, onde o refinamento da malha e o aumento do número de elementos pouco influenciam os resultados. A força máxima de reação ocorreu para um deslocamento de 0,036 mm em todas as malhas.

Figura 37 – Força máxima de reação em função do tamanho do elemento de malha.

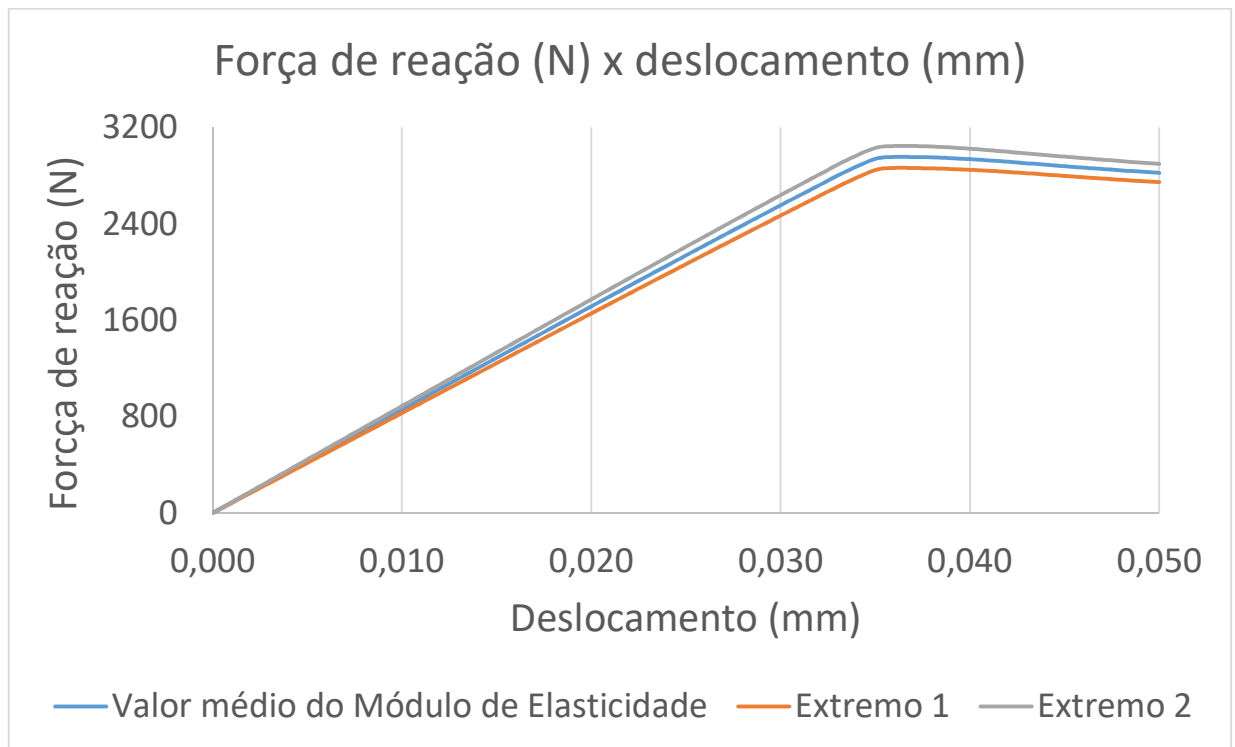


Fonte: autor.

Assim, adotou-se a malha de 0,2 mm para o modelo de simulação computacional da GE.

Após a escolha da malha, a análise de sensibilidade dos resultados numéricos foi feita. Três simulações foram realizadas: uma com o valor médio do módulo de elasticidade e as outras duas com os valores somados (extremo 2) e subtraídos (extremo 1) do desvio padrão da Tabela 4. A Figura 38 apresenta o gráfico das três simulações.

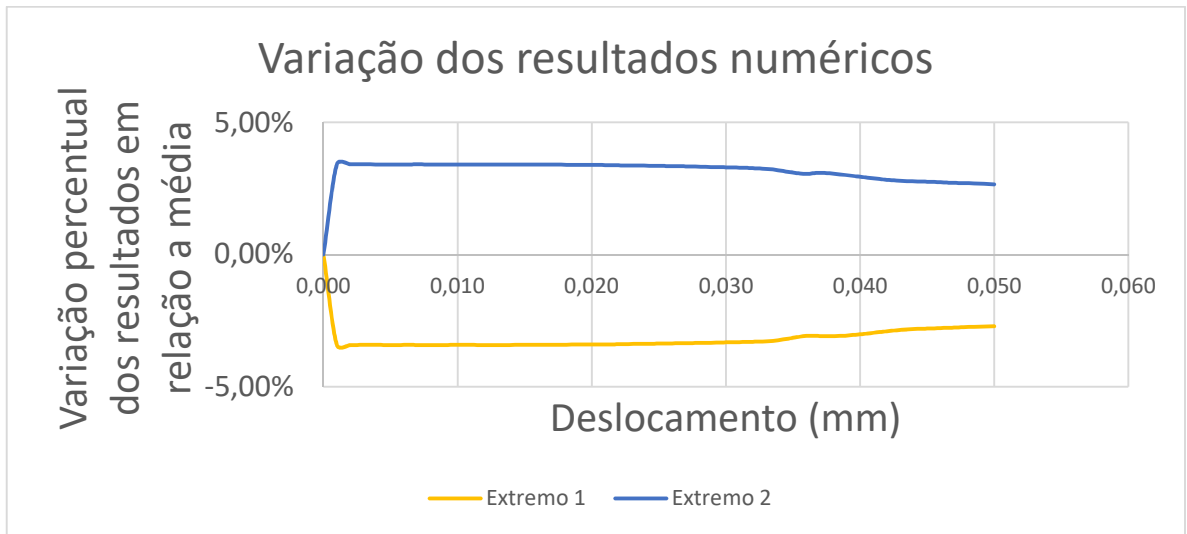
Figura 38 – Comportamento das curvas força de reação em função do deslocamento com a variação do módulo de elasticidade.



Fonte: autor.

As curvas de força de reação em função do deslocamento apresentadas na Figura 38 apresentam o mesmo comportamento e atingem a força máxima no mesmo deslocamento. Para finalizar a análise de sensibilidade é necessário verificar a variação dos resultados em relação à média.

Figura 39 – Variação dos resultados numéricos com o módulo de elasticidade.

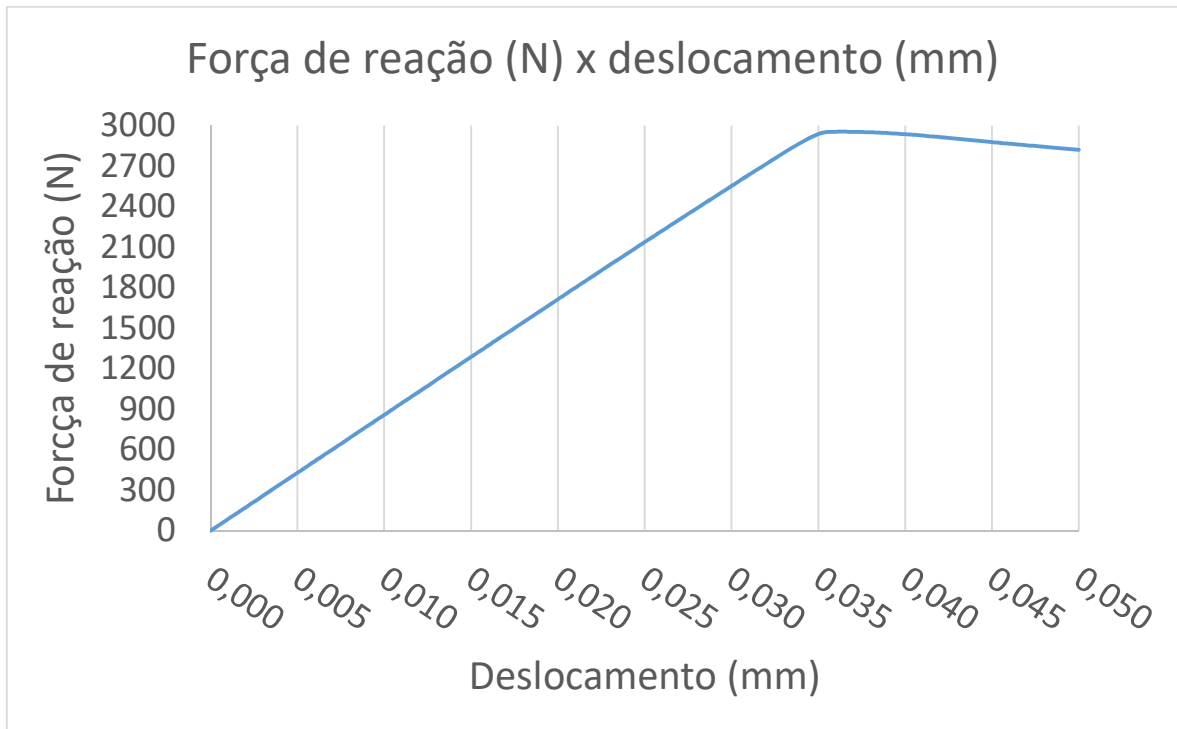


Fonte: autor.

Para cada deslocamento foi calculada a variação da força de reação em relação à média para os módulos de elasticidade com os valores dos extremos 1 e 2. A Figura 39 mostra que a variação é maior no início do deslocamento e vai diminuindo conforme aumenta a carga compressiva. Quando o segmento de GE atinge a força máxima de reação, a variação diminui mais rapidamente. Da Figura 39 se observa que a variação máxima dos resultados é de aproximadamente 3,4% e depois diminui. E conforme a Figura 38, as curvas apresentam o mesmo comportamento. Assim, a variação do módulo de elasticidade afeta os resultados em até 3,4% o que permite usar os resultados, uma vez que, a sensibilidade é baixa e não tende a aumentar.

A curva da força de reação em função do deslocamento para a malha adotada é apresentada na Figura 40.

Figura 40 – Gráfico da força de reação em função do deslocamento para a malha adotada.



Fonte: autor.

Pelo modelo, a força aumenta linearmente com o incremento do deslocamento e seu valor máximo coincide com o final da região elástica, com um deslocamento de 0,036 mm. A rigidez elástica foi calculada com base na lei de Hooke, onde a rigidez elástica é a média do módulo da força pelo deslocamento, na porção linear da curva força em função do deslocamento, cuja fórmula é apresentada a seguir:

$$|K| = F / x \quad (2)$$

Onde:

|K| é o módulo da rigidez elástica em kN/mm;

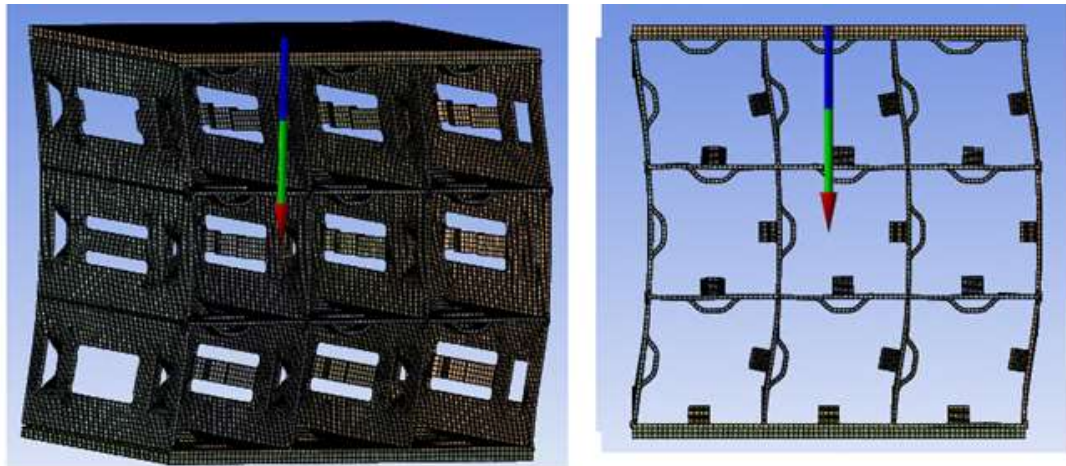
F é a força em kN; e

x é o deslocamento em mm.

Para $F = 2955 \text{ N}$ (2,955 kN) e $x = 0,036 \text{ mm}$, o valor da rigidez elástica é de 82,1 kN/mm.

O aspecto do segmento de GE sob carga compressiva foi obtido na simulação computacional e é apresentado na Figura 41. O aspecto da geometria deformada é similar aos obtidos nas simulações de Yoon [29] (Figura 7).

Figura 41 – Aspecto do segmento de GE na força máxima de reação.



Fonte: autor.

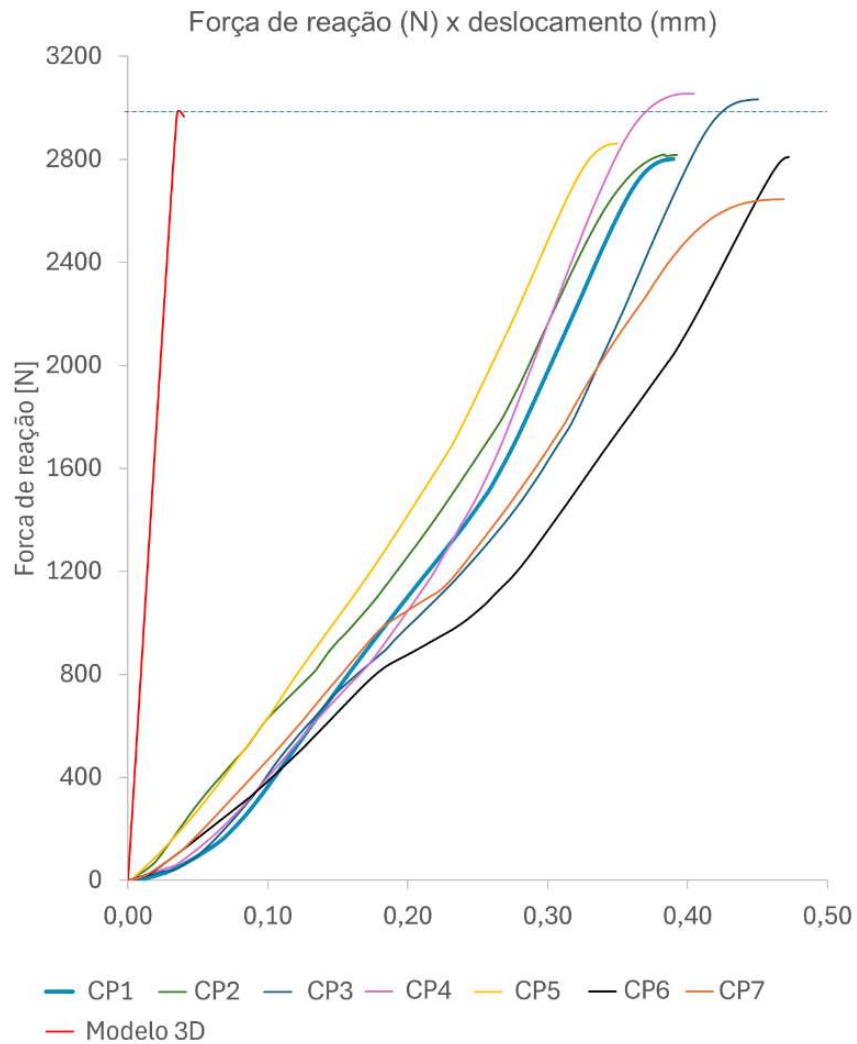
5.3 Comparação dos resultados

Os resultados obtidos nos testes de compressão estática e na simulação computacional foram comparados e analisados criticamente. A concordância entre os resultados dos dois métodos foi avaliada, buscando identificar possíveis discrepâncias e suas origens. As diferenças observadas podem estar relacionadas à natureza experimental do teste de compressão, sujeita a erros de medição e incertezas, ou à idealização do modelo computacional, que pode não capturar todas as nuances do comportamento real da GE, fabricada artesanalmente.

A força máxima suportada pelo modelo numérico da GE foi determinada pela força de reação presente no bloco inferior que está sujeito à imposição de deslocamento no conjunto. Essa força máxima calculada foi de 2955 N. Para comparação, o valor médio obtido no experimento foi de 2900 N (Tabela 5). Portanto, o resultado obtido por simulação computacional foi 1,9% superior à média experimental, o que indica que o modelo numérico é capaz de reproduzir o comportamento do segmento de GE no teste de compressão estática.

A Figura 42 compara as curvas de força em função do deslocamento obtidas experimentalmente e por simulação computacional. Ambas as curvas são ascendentes até o ponto onde há uma instabilidade geométrica que ocorre devido à estrutura perder sua capacidade de suportar a carga. Nessa região, o perfil da curva obtida pela simulação computacional apresenta diferença em relação à sua inclinação (rigidez elástica) quando comparada à curva experimental.

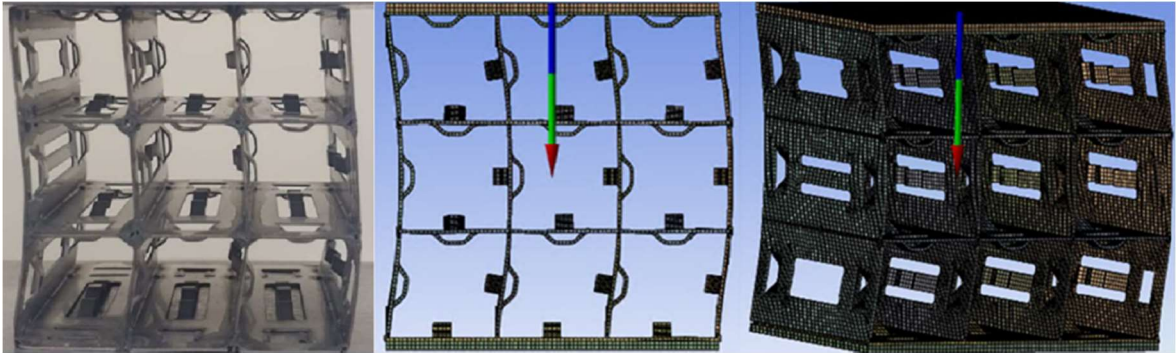
Figura 42 – Curvas de força em função do deslocamento do modelo 3D e dos corpos de prova.



Fonte: autor.

A Figura 43 compara a geometria deformada do segmento de GE após o ensaio de compressão estática e a geometria obtida pelo modelo 3D após a simulação do experimento. Pode-se notar que ambas apresentam o mesmo aspecto de deformação em formato de “C”.

Figura 43 – Deformação da GE na força máxima de reação.



Fonte: autor.

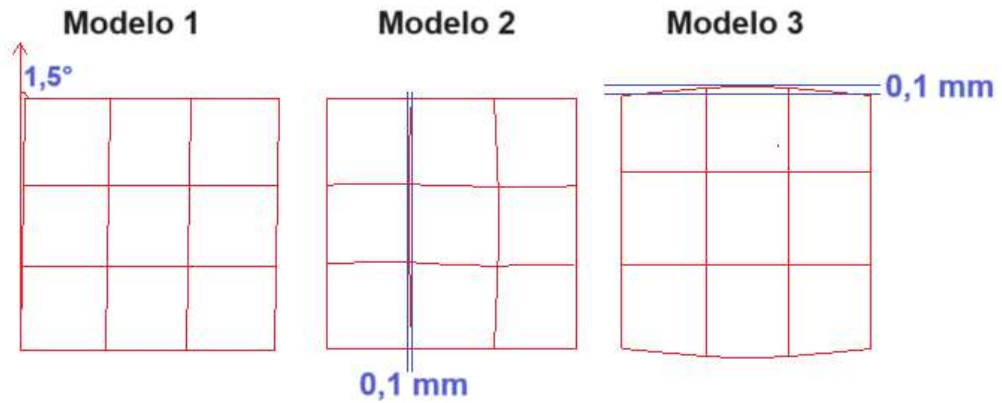
A Figura 43 corresponde ao instante em que a GE está sob a força máxima compressiva.

5.4 Estudo exploratório de modelagem computacional com inclusão de imperfeições

Aplicando a metodologia apresentada na Figura 22, os resultados da geometria deformada de GE e da força máxima de reação obtidos são aceitáveis. Os dois resultados preveem corretamente o que ocorre no ensaio. Porém, os resultados da simulação para os parâmetros deslocamento e rigidez da GE não representam o experimento. A justificativa para isso é que o modelo apresentado é idealizado e livre de imperfeições, porém a GE é uma estrutura feita com tiras finas e encaixadas em um processo de fabricação manual que depende da habilidade do montador e, portanto, pode apresentar algumas imperfeições dentro do limite de projeto. A fim de investigar esses fatores, três modelos usando elementos finitos do tipo casca, malha quadrática e elemento de malha utilizado foi de 1 mm foram criados. Cada um dos modelos apresenta alguma imperfeição. As condições de contorno são as mesmas descritas na metodologia (Figura 29-a).

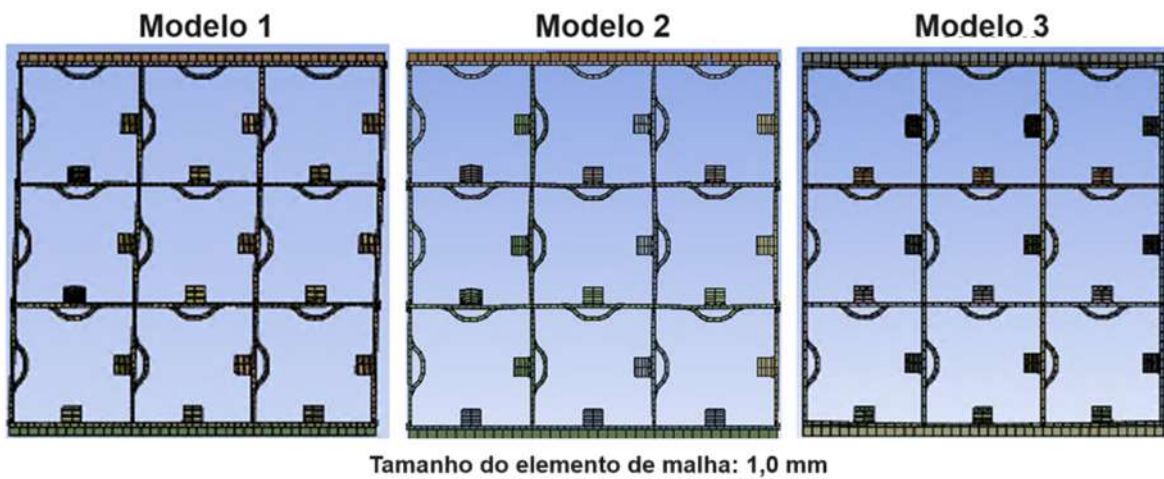
O modelo 1 é inclinado no sentido horário em $1,5^\circ$. As tiras verticais são inclinadas e as tiras horizontais não possuem imperfeições. O modelo 2 tem suas tiras distorcidas, com exceção das tiras que estão em contato com os blocos superior e inferior que não apresentam imperfeições. O modelo 3 tem apenas as tiras superior e inferior arqueadas. As distorções do modelo 2 e o arqueamento do modelo 3 têm sua dimensão alterada em no máximo 0,1 mm, conforme apresentado na Figura 44. Os modelos estão representados na Figura 45.

Figura 44 – Representação esquemática dos modelos da GE com imperfeições.



Fonte: autor.

Figura 45 – Modelos da GE com imperfeições.



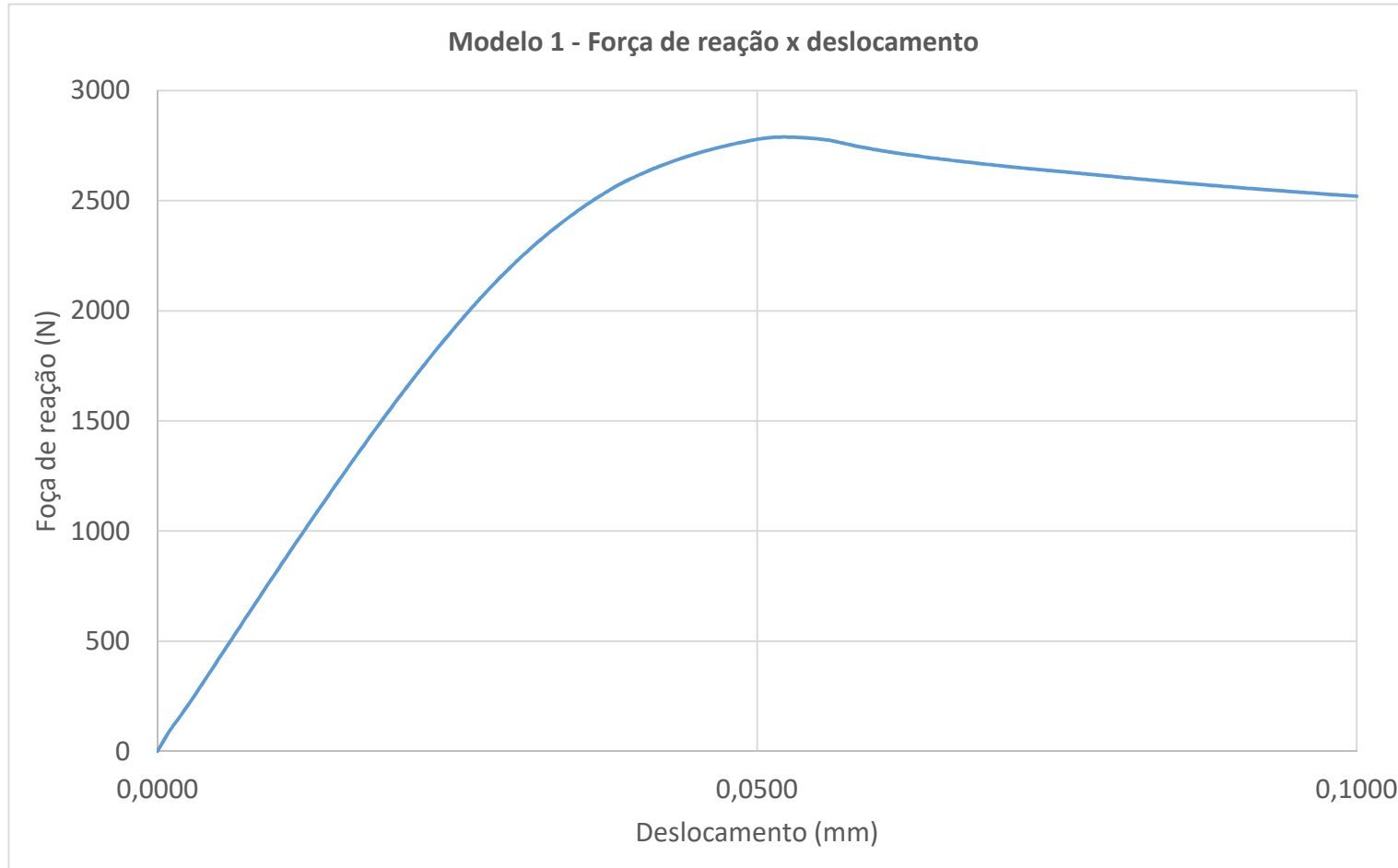
Fonte: autor.

A Tabela 7 apresenta os resultados das simulações utilizando os modelos com imperfeições. O cálculo da rigidez elástica foi feito sobre a região elástica do material da tira da GE.

Tabela 7 – Resultados obtidos utilizando-se modelos com imperfeições.

Gráfico da força de reação x deslocamento do modelo**Resultados**

Figura 46 – Gráfico da força de reação x deslocamento - modelo 1.



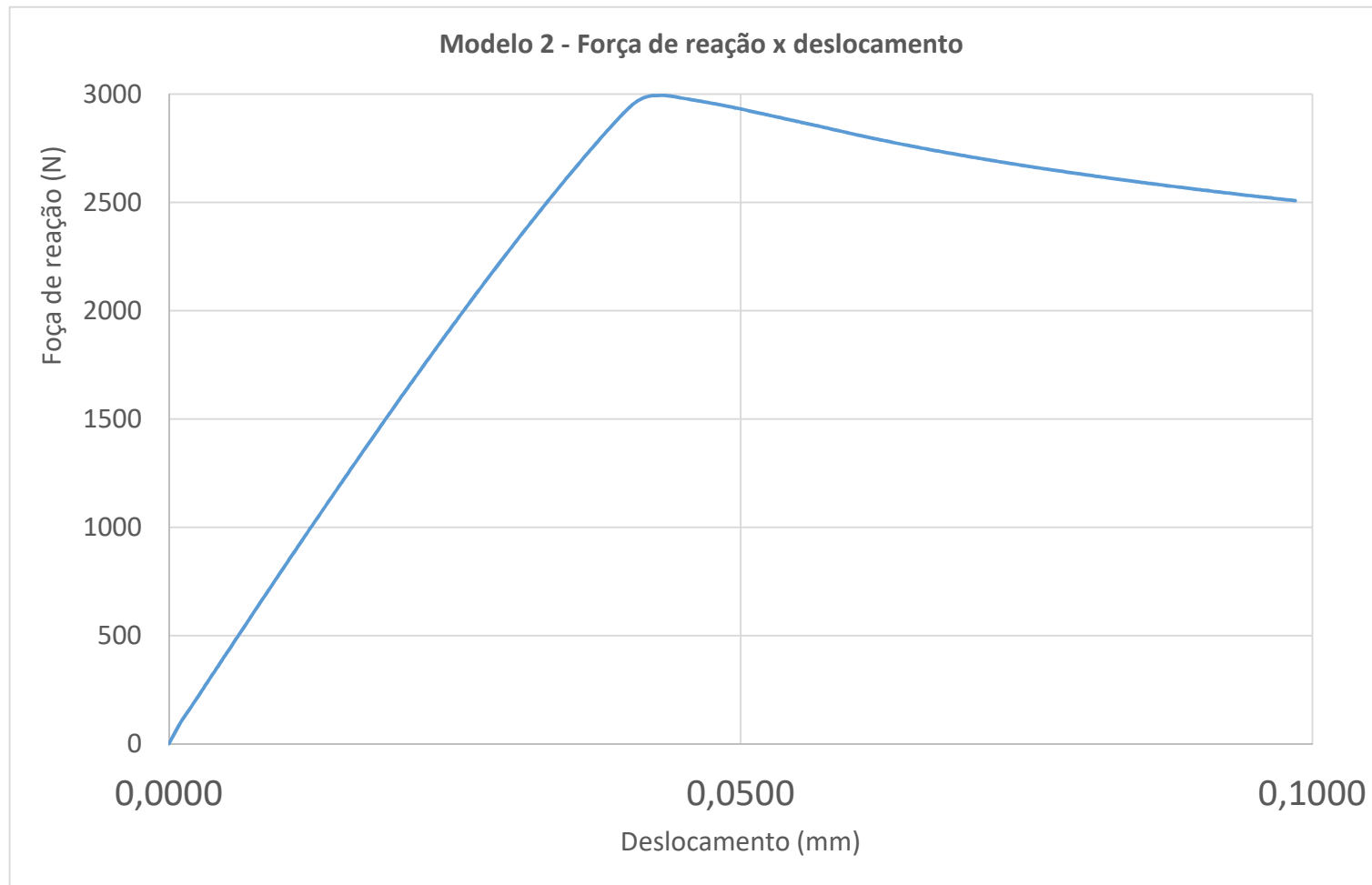
- Força máxima de reação: 2789 N.

- Deslocamento na força máxima: 0,052 mm.

- Rigidez elástica: 67 kN/mm.

Fonte: autor.

Gráfico da força de reação x deslocamento do modelo**Resultados**

Figura 47 – Gráfico da força de reação x deslocamento - modelo 2.

- Força máxima de reação: 2994 N.

- Deslocamento na força máxima: 0,044 mm.

- Rigidez elástica: 77 kN/mm.

Fonte: autor.

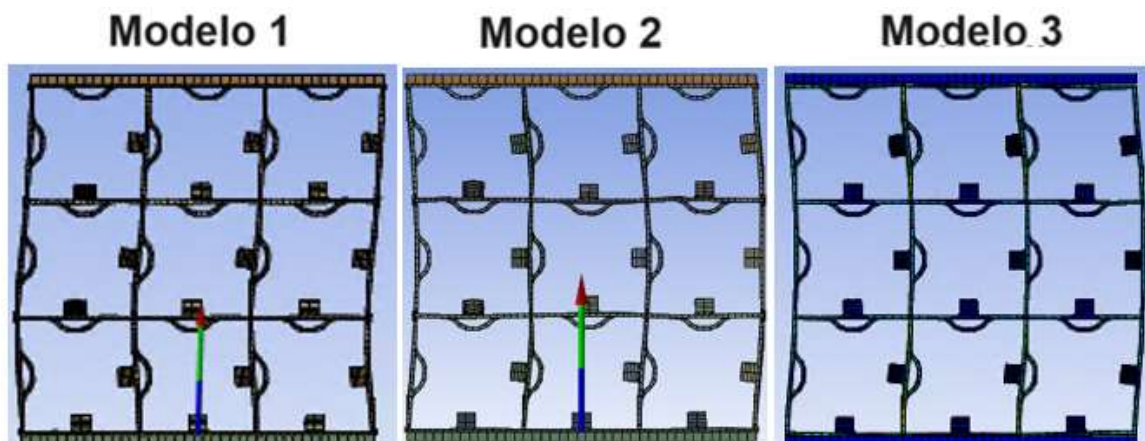
Gráfico da força de reação x deslocamento do modelo**Resultados****Figura 48 – Gráfico da força de reação x deslocamento - modelo 3.**

- Força máxima de reação: 2710 N.
- Deslocamento na força máxima: 0,15 mm.
- Rigidez elástica: 44 kN/mm.

Em relação ao modelo ideal:

- Nos modelos 1 e 3 a carga máxima suportada foi menor;
- No modelo 1, a rigidez elástica diminuiu em 18%. No gráfico da Figura 46, é possível identificar uma transição suave da porção linear até a força máxima de reação. Diferentemente do modelo ideal (Figura 40) onde essa transição é abrupta. O deslocamento na força máxima também é maior;
- No modelo 2, a carga máxima suportada foi próxima ao do modelo ideal com malha de 1,0 mm (3038 N, da Tabela 6). A diferença foi de -1,4%. O deslocamento na força máxima também é maior e a rigidez elástica diminuiu em 6%;
- No modelo 3, o deslocamento na força máxima é quatro vezes superior. A rigidez elástica diminuiu em 46%; e
- Todos os modelos apresentaram a mesma geometria deformada, presente na Figura 49.

Figura 49 – Geometria deformada da GE na força máxima de reação para os modelos com imperfeições.



Fonte: autor.

As imperfeições impostas às tiras internas do segmento de GE de 3x3, no modelo 2, tiveram pouca influência nos resultados. No entanto as imperfeições das tiras mais externas, em contato com os blocos superior e inferior, influenciaram mais os resultados obtidos. Assim, observa-se que imperfeições nos contatos afetam mais os resultados das simulações do que os defeitos internos.

6 CONCLUSÕES

A força máxima obtida na simulação computacional se aproximou da força máxima registrada no teste experimental, demonstrando a capacidade do modelo em prever a capacidade de carga do corpo de prova.

A geometria do segmento de GE de 3x3 deformado durante a compressão no modelo 3D apresentou similaridade com a deformação observada no experimento, indicando que o modelo captura os aspectos básicos do comportamento mecânico da estrutura.

O comportamento da curva força em função do deslocamento, em ambos os casos, evidenciou o aumento da força até a instabilidade sob carga, corroborando a coerência entre os resultados da simulação e do experimento.

A rigidez elástica obtida na simulação computacional foi significativamente superior à rigidez medida no teste experimental. Essa discrepância pode ser atribuída à idealização do modelo 3D, que não considera imperfeições do corpo de prova decorrentes do processo de fabricação e montagem.

A discrepância na rigidez elástica indica a necessidade de aprimorar o modelo numérico para considerar imperfeições, a fim de aumentar a precisão das previsões. A inserção de imperfeições geométricas no modelo 3D, como desvios dimensionais, pode capturar melhor o comportamento real do corpo de prova.

O modelo numérico foi eficaz em prever o limite de carga máxima sob compressão estática, atendendo o requisito do capítulo 4.2 da NUREG 0800 [12].

Os resultados demonstram o potencial da simulação numérica como ferramenta para aplicação em processos de licenciamento para novos projetos ou modificação de projeto de GE, possibilitando otimizações com redução de custos e tempo.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As simulações numéricas são uma ferramenta importante na análise do comportamento mecânico-estrutural de componentes de EC, tais como a GE. Assim, sugere-se para trabalhos futuros, a realização de estudos usando modelagem numérica e experimento para validação de modelos de outros componentes estruturais do EC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEA, "**Key electricity trends**," Paris, França, 2020.
- [2] IS/IAEA, "Power Reactor Information System," 2022. Disponível em <<https://www.iaea.org/PRIS/home.aspx> > acesso em 03 outubro 2022.
- [3] Jorge Costa de Moura, USU "**Conflito entre normas constitucionais: monopólio do minério nuclear e a função social da propriedade no Brasil**", 2013.
- [4] World Nuclear Association, disponível em <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx> acesso em 03 outubro 2022.
- [5] Cintia Monteiro de Lima, PUC-Rio "**Estudo da solubilidade de compostos de Urânio do ciclo do combustível em LPS**", 2008.
- [6] Deep Isolation, disponível em <<https://www.deepisolation.com/about-nuclear-waste/what-is-spent-nuclear-fuel/>>, acesso em 03 outubro 2022.
- [7] Nuclear Power, disponível em <<https://www.nuclear-power.com/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/>>, acesso em 14 outubro 2022.
- [8] ANS, American Nuclear Society - ANS. **Light Water Reactors Fuel Assembly Mechanical Design and Evaluation**. La grange Park, Illinois (USA): American Nuclear Society, 1996.
- [9] CNEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Garantia da qualidade na aquisição, projeto e fabricação de elementos combustíveis** (CNEN NE 1.27); Rio de Janeiro 1995.
- [10] CNEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Transporte, recebimento, armazenagem e manuseio de elementos combustíveis de usinas nucleoeletricas** (CNEN NE 5.02); Rio de Janeiro 2003.

- [11] IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; **Safety standards series. Design of the Reactor Core for Nuclear Power Plants** (IAEA NS-G-1.12); 2006.
- [12] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION OF UNITED STATES OF AMERICA; **Chapter 4.2: Fuel system design, rev 3**; (NUREG -0800); USA; 2007.
- [13] American Society of Mechanical Engineers (ASME). (2023). **ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC)**, Section III. New York, NY: ASME.
- [14] AMERICAN NUCLEAR SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS; disponível em <<https://www.asme.org/about-asme/standards>>, acesso em 20 de dezembro de 2023.
- [15] SCHETTINO, Carlos Frederico Mattos. **Evaluation of spacer grid spring characteristics by means of physical tests and numerical simulation**. 2017.
- [16] UNITED STATE REGULATORY COMMISSION, Regulatory Guide 1.70, **Section 4.2 Fuel System Design, rev 3**, 1978.
- [17] YOO, Youngik et al. Finite element analysis of the mechanical behavior of a nuclear fuel assembly spacer grid. **Nuclear Engineering and Design**, v. 352, p. 110179, 2019.
- [18] ASME, 2019, Standard for Verification & Validation in Computational Solid Mechanics, ASME V&V 10-2019, The American Society of Mechanical Engineers, New York, NY.
- [19] KOREA ELECTRIC POWER CORPORATION, **APR1400-K-X-FS-14002-NP – APR1400 Design Control Document Tier 2, rev 3**, 2018.

- [20] WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LLC. **ML11171A444 - Westinghouse AP1000 Design Control Document, Tier 2, Chapter 4 – Reactor – Section 4.2 Fuel System Design, rev. 19**, 2011.
- [21] MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD., **MUAP-DC004 – Design Control Document for the US_APWR, rev 3**, 2011.
- [22] AREVA. **ML13220A677 - Design Control Document - Tier 2 Chapter 04 - Reactor - Section 4.2 Fuel System Design, Rev. 5**, 2013.
- [23] AREVA. **Topical Report - U.S. EPR Fuel Assembly Mechanical Design ANP-10285NP, rev 1**, 2013.
- [24] Rodrigo Penna, Energia Nuclear, disponível em <<https://slideplayer.com.br/slide/1263031/>>, acesso em 03 outubro 2022.
- [25] Schettino,C.F.M., Gouvêa, J.P., Medeiros N. Analyses of Spacer Grids Compression Strength and Fuel Assemblies Structural Behavior. **ELSEVIER - Nuclear Engineering and Design**. Volume 260, Páginas 93-103, 2013
- [26] KIM, Yong Hwi et al. Stiffness analysis of new spacer grid model for metal 3D additive manufacturing. **Journal of Mechanical Science and Technology**, p. 1-7, 2022.
- [27] GUO, Yan et al. Analysis on the dynamic buckling behavior of the spacer grid structure. In: **International Conference on Nuclear Engineering**. American Society of Mechanical Engineers, 2018. p. V003T02A048.
- [28] JEON, S. Y. et al. A study on the buckling characteristics of spacer grid in PWR fuel assembly. 2001
- [29] YOON, Kyung Ho; SONG, Kee Nam; LEE, Young Shin. Nonlinear dynamic buckling analysis of a grid structure. **Key Engineering Materials**, v. 183, p. 451-456, 2000.
- [30] JEON, Sang Youn; KIM, Kyu Tae; LEE, Young Shin. A Study on the Static Buckling Load Estimation of the Spacer Grid in the Pressurized Water

- Reactor Fuel Assembly. **Key Engineering Materials**, v. 353, p. 2581-2584, 2007.
- [31] SRIREKHA, A.; BASHETTY, Kusum. Infinite to finite: an overview of finite element analysis. **Indian Journal of Dental Research**, v. 21, n. 3, p. 425-432, 2010.
- [32] RAO, C. Lakshmana; NARAYANAMURTHY, Vijayabaskar; SIMHA, K. R. Y. **Applied impact mechanics**. John Wiley & Sons, 2016.
- [33] SONG, Kee-nam; LEE, Sang-hoon. Effect of weld properties on the crush strength of the PWR spacer grid. **Science and Technology of Nuclear Installations**, v. 2012, n. 1, p. 540285, 2012.
- [34] ADLI, Naqeeb Hakam; KIM, Minhee; NAMGUNG, Ihn. An assessment of PWR fuel assembly spacer grid strength by FEM models. **Annals of Nuclear Energy**, v. 198, p. 110328, 2024.
- [35] American Society for Testing and Materials (ASTM). “**ASTM E9: Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature**”, 2019
- [36] YOO, Young Ik et al. Development of Finite Element Model for the Static Buckling Behavior of the Spacer Grid. 2013.
- [37] JIN, Y. G. et al. A Study on Structural Strength of Irradiated Spacer Grid for PWR Fuel. In: **Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Pyeongchang**, Korea. 2014.
- [38] SCHWER, Leonard E. Guide for verification and validation in computational solid mechanics. 2009.
- [39] REZENDE, Renato Paulo. **Avaliação de propriedades de juntas brasadas e de juntas envelhecidas de liga a base de Níquel utilizadas em grades espaçadoras de reatores nucleares do tipo PWR**. 2023. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

- [40] ROSS, Robert B. **Metallic materials specification handbook**. Springer Science & Business Media, 2013.
- [41] ANSYS Meshing User's Guide, ANSYS, Inc., 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, November 2013

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.