AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto

MARCELO MORAES DOS SANTOS

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

**Orientador:
Prof. Dr. Miguel Mattar Neto**

**São Paulo
2019**

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

**Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator
nuclear compacto**

MARCELO MORAES DOS SANTOS

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

Orientador:
Prof. Dr. Miguel Mattar Neto

Versão corrigida

São Paulo
2019

Fonte de Financiamento: Fundação para o Desenvolvimento e Tecnologia da Engenharia - FDTE

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

Como citar:

SANTOS, M. M. d. ***Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto***. 2019. 126 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

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

Santos, Marcelo Moraes dos
Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo
placa para um reator nuclear compacto / Marcelo Moraes dos
Santos; orientador Miguel Mattar Neto. -- São Paulo, 2019.
126 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia Nuclear (Reatores) -- Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019.

1. Reator PWR Compacto. 2. Elemento Combustível do tipo
placa. 3. Avaliação Estrutural . I. Neto, Miguel Mattar ,
orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Marcelo Moraes dos Santos

Título: Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em ciências.

Data: 02/07/2019

Banca Examinadora

Prof. Dr.: Miguel Mattar Neto

Instituição: Instituto de pesquisas energéticas e nucleares Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: João Manuel Losada Moreira

Instituição: Universidade Federal do ABC Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: José Roberto Berretta

Instituição: Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo Julgamento: Aprovado

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui a minha gratidão às instituições e pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, e em particular:

- Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, pelo fornecimento da infraestrutura necessária para a presente pesquisa, em especial na aplicação das disciplinas e na disponibilização da biblioteca e do laboratório de mecânica computacional, localizado no *CEN*.
- Ao Laboratório de Desenvolvimento e Instrumentação de Combustíveis Nucleares, LADICON, da Marinha do Brasil, sob a gerência do Comandante André Ricardo Mendonça Pinheiro, pelo suporte na forma de incentivo, encaminhamento e administração, que possibilitou o andamento da presente pesquisa.
- Ao Prof. Dr. Miguel Mattar Neto pelo importante apoio, paciência, orientação e, principalmente, pelos importantes ensinamentos sobre planejamento e ética profissional no decorrer deste trabalho.
- Ao Prof. Dr. Carlos Alexandre de Jesus Miranda pelas inestimáveis revisões realizadas no texto da presente dissertação.
- À Dr. Cláudia Giovedi Motta pela coordenação, incentivo, apoio e dedicada assistência ao longo de todo o trabalho.
- Ao colega do LADICON *Carlos Granado Puccinelli* pelo rico aprendizado obtido no desenvolvimento do projeto do E.C. placa, em especial na concepção dos desenhos técnicos.
- Aos colegas do *Centro de Engenharia Nuclear* Javier González Mantecón e Nikolas Lymberis Scuro pela valiosa contribuição na forma de comentários sobre as configurações do software *Ansys CFX®*.
- Ao colega do *Centro de Engenharia Nuclear* Gerson Fainer pela importante contribuição com os comentários sobre a utilização da norma *ASME®*.
- Ao colega do *Centro de Engenharia Nuclear* Altair Antônio Faloppa pelo apoio com a infraestrutura dos computadores e softwares utilizados.
- Aos colegas do *CTMSP* Amanda Abati Aguiar, Alfredo Abe, Danilo Pinheiro Faria, Leonardo de Souza Lima, José Roberto Berretta e Tiago Tucarelli pelo apoio técnico nos estágios iniciais do presente projeto de pesquisa.

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charlie Chaplin

RESUMO

Santos, Marcelo. M. Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto (Mestrado em tecnologia nuclear), São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, 2019.

A melhoria nos aspectos de eficiência e de segurança dos reatores nucleares compactos está diretamente ligada às inovações nos combustíveis e na geometria dos Elementos Combustíveis - *ou E.C.* - como é o caso do tipo Placa, em comparação com o do tipo Vareta. Do ponto de vista mecânico, garantir que a estrutura de um E.C. está segura para funcionar em um reator PWR compacto é afirmar que esta cumpre os requisitos funcionais de projeto para estruturas deste tipo e aplicação, presentes na norma *ANSI/ANS-57.5-1996*; e também que as tensões resultantes dos carregamentos impostos sobre si são menores do que os limites mecânicos admissíveis para os seus materiais estruturais, de acordo com a norma *ASME III, divisão 1, subseção NB*. Para desenvolver uma metodologia de análise mecânica buscando verificar o atendimento aos critérios das normas citadas, foi proposto um modelo conceitual computacional de E.C. placa e, posteriormente, este modelo foi submetido a uma série de análises computacionais que simularam a aplicação das combinações dos principais carregamentos atuantes. Os resultados extraídos das análises revelaram que os valores das tensões resultantes da aplicação dos carregamentos foram inferiores aos valores dos limites admissíveis dos materiais que compõem os seus componentes. Foi observado, também, que os deslocamentos resultantes não ultrapassaram os limites funcionais, que são o contato entre estruturas semelhantes vizinhas e/ou o contato da região superior desta estrutura com as estruturas de suporte do vaso de pressão que o contém.

Palavras-Chave: Elemento Combustível; Análise Mecânica; Reatores PWR compactos.

ABSTRACT

Santos, Marcelo. M. *Structural evaluation of a plate-type fuel element for a compact nuclear reactor* (Dissertation in nuclear technology), São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, 2019.

The improvement in the efficiency and safety aspects of compact nuclear reactors is directly linked to innovations in fuels and the geometry of Fuel Elements – *F.E.* - as is the case of the Plate type, as compared to the Rod type. From a mechanical point of view, to ensure that the structure of an *F.E.* is safe to operate in a compact PWR reactor is necessary to state that it meets the functional design requirements for structures of this type and application, present in *ANSI / ANS-57.5-1996*; and also that the stresses resulting from the loads imposed on them are less than the permissible mechanical limits for their structural materials in accordance with *ASME III, division 1, subsection NB*. In order to develop a methodology of mechanical analysis to verify compliance with the criteria of the cited standards, a computational conceptual model of *F.E. Plate* structure was proposed and later this model was submitted to a series of computational analyzes that simulated the application of the combinations of the main active loads. The results obtained from the analyzes revealed that the values of the stresses resulting from the application of the loads were lower than the values of the allowable limits of the materials that make up their components. It was also observed that the resulting displacements did not exceed the functional limits, which are the contact between neighboring similar structures i.e. the contact of the upper region of this structure with the supporting structures of the pressure vessel containing it.

Keywords: Fuel Element; Mechanical Analysis; PWR compact reactors.

SUMÁRIO

1. Introdução	13
1.1. Definição de um Elemento Combustível (E.C.)	16
1.2. Comparação entre um E.C. do tipo placa e um do tipo vareta	17
1.3. Objetivos da dissertação	24
2. Revisão da literatura	25
2.1. Projeto conceitual	27
2.1.1. Bocal Superior	28
2.1.2. Conjuntos de placas combustíveis	28
2.1.3. Bocal inferior	29
2.1.4. E.C. Conceitual nº1	29
2.1.5. E.C. conceitual nº2	30
2.2. Materiais	31
2.2.1. Zircaloy	31
2.2.2. Urânio Molibdênio – U-10Mo	32
2.2.3. Inconel 718	33
2.2.4. Propriedades dos Materiais	33
2.3. Carregamentos atuantes	35
2.3.1. Peso próprio	35
2.3.2. Empuxo Hidrostático	36
2.3.3. Arrasto hidráulico	36
2.3.4. Campo de temperaturas	36
2.3.5. Molas de fixação	37
2.4. Sistemas de análise do software Ansys®	37
2.4.1. CFX®	39
2.4.2. Steady-State Thermal®	40

2.4.3. Static-Structural®	41
3. Metodologia proposta.....	42
3.1. Estudos de referência	44
3.1.1. Estudo Termo-hidráulico.....	44
3.1.2. Estudo termomecânico	49
3.2. Análise do E.C. Placa.....	54
3.2.1. Análise termo-hidráulica	54
3.2.2. Análise termomecânica	64
3.3. Verificação da malha de Elementos Finitos	76
3.3.1. Número médio da assimetria dos elementos na malha	76
3.3.2. Estudo de convergência da malha de elementos finitos.....	77
4. Resultados das análises do E.C. Placa.....	80
4.1. Intensidade de tensão (<i>Stress Intensity</i>)	80
4.2. Deslocamentos resultantes	90
5. Análise e discussão dos resultados	94
5.1. Limites admissíveis	94
5.2. Avaliação estrutural do E.C. Placa.....	95
6. Conclusões	99
6.1. Comentários.....	99
6.2. Conclusões	100
6.3. Trabalhos futuros	101
7. Referências	102
Apêndice A.....	108

Lista de tabelas

	Página
Tabela 1 – E.C. Placa X E.C. vareta.	18
Tabela 2 - Densidade de urânio.	23
Tabela 3 – Símbolos e definições.	34
Tabela 4 - Propriedades do Zircaloy-4 (ASTM B351/352).....	34
Tabela 5 - Propriedades térmicas e mecânicas do U-10Mo.....	34
Tabela 6 - Propriedades térmicas e mecânicas do INCONEL 718.....	35
Tabela 7 - Propriedades físicas da água leve (H ₂ O).....	35
Tabela 8 - Análises realizadas.	44
Tabela 9 - Propriedades do revestimento (cladding) e do combustível (fuel)...	52
Tabela 10 - Dados termo-hidráulicos.	61
Tabela 11 - Combinações dos carregamentos.....	66
Tabela 12 - Carregamentos atuantes.....	70
Tabela 13 - Valor médio da assimetria dos elementos da malha.	77
Tabela 14 - Estudo de malha – Estudo termo-hidráulico.....	77
Tabela 15 - Estudo de malha – Estudo termomecânico.....	78
Tabela 16 - Estudo de malha – Análise termo-hidráulica.	78
Tabela 17 - Estudo de malha – Análise termomecânica.	79
Tabela 18 - Símbolos e definições.	80
Tabela 19 – Stress Intensity (MPa).	81
Tabela 20 - Deslocamentos no eixo X (m).	90
Tabela 21 - Deslocamentos no eixo Y (m).	91
Tabela 22 - Deslocamentos no eixo Z (m).....	91
Tabela 23 – Limites admissíveis.	95

Lista de figuras

	Página
Figura 1 - Planta nuclear PWR Westinghouse.	14
Figura 2 - Reator PWR embarcado.	14
Figura 3 - A geração PRO-SUB.	15
Figura 4 – “Cutaway of a typical reactor (Four Loop Plant)”.....	16
Figura 5 - E.C. Esquemático Mitsubishi.	19
Figura 6 - Detalhe de um E.C. do tipo vareta.	20
Figura 7 - E.C. do tipo placa do reator Shippingport.	21
Figura 8 - E.C. do tipo placa do reator OSIRIS.	22
Figura 9 – Conceito inicial do E.C. Placa.	31
Figura 10 - Geometria real.	45
Figura 11 - Geometria modelada.....	46
Figura 12 - Comparação dos modelos de turbulência.....	48
Figura 13 - Geometria real	50
Figura 14 - Geometria modelada - SolidWorks®.....	50
Figura 15 - Malha de elementos finitos.	51
Figura 16 - Restrições no modelo de análise.	52
Figura 17 - Método analítico (à esquerda); e numérico (à direita).....	53
Figura 18 - Cálculo do diâmetro hidráulico do canal de refrigeração.	55
Figura 19 – Volumes de interesse para a análise termo-hidráulica.....	56
Figura 20 - Região de análise do CFX®.	57
Figura 21 - Modelo de análise termo-hidráulica.	58
Figura 22 - Malha de elementos finitos.	59
Figura 23 – Linhas de análise na espessura da placa combustível.	62
Figura 24 - Distribuições de temperatura em uma placa combustível.....	63
Figura 25 - Arrasto Hidráulico na placa combustível.	63
Figura 26 - Modelo Original e modelo de análise da estrutura do E.C.	67
Figura 27 - Molas virtuais.	68
Figura 28 - Modelagem das placas combustíveis.	69
Figura 29 - Distribuição de temperaturas.	71
Figura 30 – Interno superior do VPR.....	73
Figura 31 – Interno Inferior do VPR.....	73

Figura 32 - Condições de restrição (U).	75
Figura 33 - Carregamentos impostos na estrutura do E.C.	76
Figura 34 - Círculo de Mohr.....	80
Figura 35 – Stress Intensity (MPa).	81
Figura 36– Bocal Superior.....	83
Figura 37 –Placa A.....	84
Figura 38 – Placa B.....	85
Figura 39 – Placa C.....	86
Figura 40 – Placa D.....	87
Figura 41 – Revestimento da Placa Combustível nº 18.	88
Figura 42 – Bocal Inferior.	89
Figura 43 - Deslocamentos no eixo X (m).	92
Figura 44 - Deslocamentos no eixo Y (m).	92
Figura 45 – Deslocamentos no eixo Z (m).....	93

Lista de Símbolos

g	Aceleração da gravidade
A_f	Área da superfície de arrasto
ANS	<i>American National Standards</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
c	Calor específico
$Q_{condução}$	Calor transferido por meio da condução
$Q_{convecção}$	Calor transferido por meio da convecção
$Q_{radiação}$	Calor transferido por meio da radiação
CTMSP	Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
α	Coef. de expansão térmica
LM.A.	Comprimento do modelo de análise
k	Condutividade térmica
ρ	Densidade
y	Deslocamento de uma mola
UO_2	Dióxido de Urânio
E.C.	Elemento Combustível
k_t	Energia cinética de turbulência
L	Espessura do objeto
E.Ct.	Elemento de Controle
E	Empuxo Hidrostático
ESS	<i>Engineering Equation Solver</i>
$D\Delta t$	Expansão térmica
F_{el}	Força Elástica
F_f	Força de arrasto
FDTE	Fundação de Desenvolvimento e Tecnologia da Engenharia
$U_{10}Mo$	Liga de Urânio-Molibdênio (10%)
Sm	Limite admissível
σ_e	Limite de escoamento
M.A.	Massa atômica
E	Módulo de elasticidade
ν	Módulo de Poisson
Re	Número de Reynolds
P	Pressão
P_r	Pressão do fluido refrigerante
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>
RRR	<i>Replacement Research Reactor</i>
k	Rigidez de uma mola
U_3Si	Siliceto de Urânio
S.I.	<i>Stress Intensity</i>
T	Temperatura
T_a	Temperatura ambiente
T_{mec}	Temperatura média no E.C.
τ	Tensão de cisalhamento

τ_{Max}	Tensão de cisalhamento máxima
σ_2	Tensão principal intermediária
σ_1	Tensão principal máxima
σ_3	Tensão principal mínima
U	Vetor velocidade
μ	Viscosidade do fluido
μ_t	Viscosidade turbulenta do fluido
P_k :	Taxa de produção de turbulência
USS	<i>United States Ship</i>
ΔT	Variação da temperatura no objeto
VPR	Vaso de Pressão do Reator
ν	Viscosidade Cinemática
V	Volume
V_f	Velocidade do fluxo de fluido
VPN	Vaso de Pressão Nuclear

1. Introdução

A energia nuclear trouxe como principal vantagem em relação aos combustíveis fósseis a possibilidade de se produzir maior quantidade de energia com menor quantidade de material combustível, podendo apenas um grama de urânio gerar uma quantidade energética equivalente a 13 barris de óleo diesel [1]. A energia nuclear é obtida, geralmente, por meio do processo de fissão do urânio 235, no qual o núcleo alvo é atingido por um nêutron. Este núcleo fica instável quanto à interação nuclear forte e se fissiona em duas partes, liberando energia nuclear na forma de calor, e de 3 a 4 nêutrons, dando sequência à reação de fissão em cadeia.

Os reatores nucleares são sistemas utilizados para iniciar, manter e controlar estes processos de fissão, podendo ser classificados como de pesquisa ou de potência. Os reatores de pesquisa são utilizados tanto para estudos neutrônicos e de física nuclear quanto para o desenvolvimento de materiais para a indústria médica ou militar; os reatores de potência são utilizados com propósito de direcionar a energia térmica gerada para serem fontes de calor de circuitos hidráulicos para diversas aplicações, sendo a principal a geração de energia elétrica comercial e até a propulsão de embarcações como submarinos, já que o processo de fissão não é dependente da presença de oxigênio.

O desenvolvimento desta tecnologia foi iniciado nas décadas de 1940 e 1950, quando se observou que a energia gerada pelos combustíveis nucleares poderia ser controlada e direcionada para atender, inicialmente, a demanda de energia majoritariamente mecânica para a propulsão de submarinos, como aconteceu com o USS Nautilus, a primeira embarcação equipada com um reator nuclear de potência, do tipo PWR, ou *Pressurized Water Reactor*. Este tipo de reator utiliza água leve, H_2O , para *moderar* os nêutrons, ou diminuir a energia destes para que o processo de fissão se torne possível, e é utilizada como fluido de refrigeração do núcleo. Este tipo de reator conta com três circuitos hidráulicos, sendo o primeiro responsável pelo aquecimento do fluido refrigerante, o segundo pela geração de energia através de um gerador de vapor que aciona um turbo-

gerador elétrico e o terceiro pela condensação do vapor com baixa entalpia. A Figura 1 ilustra um reator do tipo PWR estacionário e a Figura 2, um reator PWR embarcado.

Figura 1 - Planta nuclear PWR Westinghouse.

Fonte - Westinghouse [2].

Figura 2 - Reator PWR embarcado.

Fonte - Site Poder Naval.

Após o lançamento do Nautilus, no dia 13 de janeiro de 1955, os recordes de velocidade, autonomia de combustível e de submersibilidade para este tipo de embarcação foram superados, além de ser a primeira embarcação a chegar ao Polo Norte do planeta [3]. A adoção desta tecnologia trouxe consigo a vantagem de permitir a estas embarcações se manterem submersas por maior

tempo em plena operação durante as suas missões, sem a necessidade de serem reabastecidas com combustível frequentemente. Além do aspecto da eficiência energética, o aspecto da segurança destas embarcações também foi beneficiado. Enquanto os submarinos a diesel têm a necessidade de subir à superfície para recarregar as suas baterias, os submarinos nucleares podem fazê-lo quando submersos.

Do ponto de vista da segurança de uma operação de guerra, um submarino exposto traz riscos significativos para a sua tripulação, sendo alvos potenciais de ataques aéreos ou de outras embarcações, como navios de ataque ou até mesmo outros submarinos.

Por outro lado, um submarino nuclear pode custar cerca de 70% a mais do que um submarino convencional e, pela sua complexa operação, exige mais tripulantes a bordo, cerca de 100, em comparação com os cerca de 31 necessários em um submarino convencional, como ilustra a Figura 3.

Figura 3 - A geração PRO-SUB.

Fonte - Jornal "O Estado de São Paulo".

1.1. Definição de um Elemento Combustível (E.C.)

O combustível nuclear que torna o processo de fissão possível em um reator é confinado em uma estrutura denominada como *Elemento Combustível* (E.C.). Por definição, esta é uma estrutura que tem a função de prover meios para manter o combustível nuclear em posição e em segurança durante o funcionamento de um reator. A Figura 4 ilustra um vaso de pressão completo, sendo possível observar a localização do componente Elemento Combustível, ou “*Fuel Assembly*” em inglês.

Figura 4 – “Cutaway of a typical reactor (Four Loop Plant)”.

Fonte – Westinghouse®.

Além do aspecto de segurança do combustível nuclear, as outras razões de se utilizar Elementos Combustíveis são [4]:

1. No caso de falha de um E.C., apenas o próprio precisa ser removido, de maneira simples, e não o núcleo inteiro de um reator.
2. Essas estruturas facilitam o gerenciamento do combustível: os E.C. que contém material combustível parcialmente gasto podem ser realocados no núcleo de maneira a manter o equilíbrio da reatividade em todo o núcleo do reator.
3. Estas estruturas incluem uma fabricação relativamente simplificada.
4. Essas estruturas evitam a criticalidade neutrônica durante a sua fabricação.
5. O manuseio e o armazenamento dos E.C. são relativamente simples.

Um reator de potência deve produzir calor da maneira mais econômica possível, já que tanto a planta nuclear quanto o combustível nuclear são muito caros, tornando-se evidente a necessidade de se alcançar um alto valor de densidade de potência, isto é, maior energia gerada em um menor volume de material combustível. Para aumentar a segurança e a eficiência da operação de um reator de potência, é necessário que um E.C. tenha uma área de transferência de calor que contribua satisfatoriamente na redução da temperatura do combustível.

1.2. Comparação entre um E.C. do tipo placa e um do tipo vareta

Os combustíveis e revestimentos possuem diversos tipos de geometria. Nos reatores de potência do tipo PWR normalmente tanto o revestimento quanto o combustível são encontrados na forma cilíndrica ou retangular, sendo chamados, respectivamente, de E.C. do tipo vareta e do tipo placa. Nas figuras 5 e 6 são exibidos exemplos de estruturas de E.C. do tipo vareta, e nas figuras 7 e 8 são exibidos exemplos de estruturas de E.C. do tipo placa.

De acordo com as referências [4], [5] e [6], para os combustíveis formados por ligas, dispersões ou placas cerâmicas baseadas em Urânio, os revestimentos mais comuns são as ligas de alumínio, zircônio ou aço inoxidável. Quando o combustível é formado por ligas de urânio com alumínio, ou

dispersões em matriz de alumínio, as ligas de alumínio geralmente são usadas como revestimento. As ligas de zircônio são utilizadas como revestimento quando o combustível é constituído por um cerne de urânio com zircônio ou com molibdênio, ou dispersões com matriz de alumínio.

Do ponto de vista funcional, em um reator PWR compacto embarcado o E.C. do tipo placa mostra-se mais vantajoso, de acordo com as referências [4], [5] e [6]. A primeira vantagem é que a área de transferência de calor de uma placa combustível é geralmente maior do que de uma vareta combustível, o que melhora a transferência de calor do E.C. com o fluido refrigerante.

Tomando-se por base as informações geométricas de uma vareta com 9,1 mm de diâmetro externo de um reator de potência PWR da Westinghouse® [2], e as de uma placa combustível, retirada da referência [6], admitindo que ambas possuem a altura de 1150 mm para fins de comparação, foi possível constatar que o E.C. Placa é mais vantajoso, por ter uma área total de transferência de calor 79,3% maior do que a do E.C. do tipo vareta, como mostrado na tabela 1. O primeiro possui 72 placas com duas faces de contato com o fluido refrigerante, e o segundo possui 264 varetas combustíveis em contato com o fluido refrigerante, com uma face de contato cada uma.

Tabela 1 – E.C. Placa X E.C. vareta.

E.C. Placa		E.C. Vareta	
Número de placas	72	Número de varetas	264
Total de faces em contato com o fluido refrigerante	2	Total de faces em contato com o fluido refrigerante	1
Área de contato com o fluido refrigerante (m ²)	0,109	Área de contato com o fluido refrigerante (m ²)	0,0329
Área total de contato do E.C. com o fluido refrigerante (m ²)	15,6	Área total de contato do E.C. com o fluido refrigerante (m ²)	8,7
Diferença: $15,6/8,7 = 1,793$ (179,3%)			

Fonte - Autor próprio.

Figura 5 - E.C. Esquemático Mitsubishi.

Fonte – Referência [7].

Figura 6 - Detalhe de um E.C. do tipo vareta.

Fonte - Referência [5].

Fonte – Referência [4].

Figura 8 - E.C. do tipo placa do reator OSIRIS.

Fonte - Referência [5].

A segunda vantagem observada no E.C. placa diz respeito a maior densidade de urânio que o *U-10Mo* possui. Maior densidade de urânio significa maior quantidade de material físsil que, por sua vez, significa maior geração de energia térmica no mesmo volume. Tal característica contribuiu para o projeto de estruturas mais compactas de E.C., o que é desejável em reatores nucleares de potência compactos. Dessa maneira, pela comparação feita com os valores mostrados na tabela 2, foi possível observar que o *U-10Mo* é ideal nesse quesito, por possuir valores de densidade de potência 3% e 37% maiores, respectivamente, do que o *U₃Si* e com o *UO₂* [6].

Tabela 2 - Densidade de urânio.

Combustível	Densidade de urânio [Kg/m ³]
U-10Mo	15400
U ₃ Si	15000
UO ₂	9700

Fonte – Referência [6].

A terceira vantagem de um E.C. placa diz respeito novamente à adoção do *U-10Mo*, que possui maior valor de condutividade térmica. Pelo fato de ser um combustível nuclear de natureza metálica, a temperatura alcançada em seu centro durante a operação do reator, até 400°C, é consideravelmente menor do que a temperatura alcançada por uma pastilha combustível cerâmica de *UO₂*, até 2500°C. Isso se explica pela maior condutividade térmica do *U-10Mo*, $28 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$, em comparação com o *UO₂*, com $3,5 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$, e o *U₃Si*, com $20 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$ [6].

A quarta vantagem do E.C. tipo placa foi encontrada na referência [8], e diz respeito a maior rigidez e resistência à deformação permanente da sua estrutura, em comparação com um E.C. vareta. Trata-se de características desejáveis especialmente para a aplicação naval, considerando-se que um E.C. com tal aplicação está sujeito a movimentações bruscas devido às manobras de uma embarcação, como um submarino. Para esta afirmação, contudo, seriam necessários estudos experimentais para a sua validação, pois até o momento não foram encontrados dados disponíveis na literatura “aberta”.

1.3. Objetivos da dissertação

O objetivo principal geral desta dissertação é apresentar o desenvolvimento de uma metodologia de dimensionamento mecânico e de avaliação estrutural voltada a um elemento combustível do tipo placa para o evento de operação à plena potência, pertencente à operação normal de um reator compacto do tipo PWR.

Para atender ao objetivo geral mencionado anteriormente, os seguintes objetivos específicos serão desenvolvidos:

1. Será desenvolvido um projeto mecânico de um E.C. do tipo placa, que será utilizado como geometria modelada para as análises no software Ansys®.
2. Será desenvolvida uma metodologia de análise que envolve as áreas hidráulica, térmica e estrutural. Para tanto, serão realizados estudos de caso para verificar a utilização dos sistemas de análise *Steady-State Thermal*®, *Static Structural*® e *CFX*®, todos pertencentes ao software Ansys®.
3. Será feita a aplicação da metodologia proposta no projeto do E.C. placa desenvolvido.

2. Revisão da literatura

Não foram encontrados trabalhos que avaliam mecanicamente as estruturas dos E.C. por completo, provavelmente por conterem segredos industriais civis e militares, fato que caracteriza ineditismo para o presente trabalho. A avaliação de um E.C. é importante, sobretudo, quando as suas funções de projeto e segurança são levadas em consideração na atividade de um reator. As funções de projeto descritas na seção 5.1 da norma *ANSI/ANS 57.5-1996* [9] foram elaboradas para um E.C. do tipo vareta e, neste trabalho, estas foram adaptadas para um E.C. do tipo placa, como mostrado abaixo:

1. O E.C. deve prover e manter uma geometria, posicionamentos axiais e radiais adequados e estabilidade dimensional.
2. Deve-se permitir um fluxo de refrigerante e de transferência de calor adequados.
3. Deve-se prover uma barreira para separar o combustível e os produtos de fissão do refrigerante.
4. Deve-se permitir expansões axiais e transversais das placas combustíveis e do Elemento Combustível como um todo com relação aos internos do reator.
5. Deve-se permitir suporte próprio. Em outras palavras, ter sustentação própria quando necessário e ter resistência bem definida às distorções ocasionadas por cargas laterais e axiais.
6. O E.C. deve resistir às ações exercidas pelo escoamento do fluido refrigerante, efeitos de vibração, atrito, levantamento e instabilidade de escoamento.
7. O E.C. deve permitir o controle do processo de fissão, isto é, dar guia para os elementos de controle, acomodar efeitos de temperatura, gradientes e transientes de pressão, atrito, amortecimento e impactos associados com a movimentação de elementos de controle.
8. Deve ser permitido o posicionamento da instrumentação interna do núcleo e outros componentes quando associados ao Elemento Combustível. Isto inclui fontes de nêutrons e instrumentação de monitoração.

9. Devem ser acomodados os efeitos químicos, térmicos, mecânicos e de irradiação sobre os materiais. Exemplos são: corrosão sob tensão, hidretação, densificação etc.
10. Deve-se permitir o manuseio, o transporte e o carregamento no núcleo, isto é, ter detalhes construtivos para içamento, pontos de contato, molas de fixação ou outros detalhes necessários, incluindo previsão de carregamento e compatibilidade com equipamentos de interface.
11. Todos os E.C. dentro do núcleo devem ser compatíveis entre si.

Caso um dado E.C. seja projetado para um reator naval compacto voltado à aplicação militar, como para um submarino por exemplo, a recomendação, de acordo com a referência [10], é de que este E.C. seja projetado para resistir a um choque de cinquenta vezes a aceleração da gravidade nas três direções cartesianas: X, Y e Z. Essa estimativa de choque diz respeito à simulação de uma possível explosão de bomba próxima a esta embarcação, o que poderia afetar todos os seus componentes internos, inclusive o E.C.

Deve-se destacar que, dentre todos os requisitos funcionais mostrados anteriormente, o requisito *“Prover uma barreira para separar o combustível e os produtos de fissão do refrigerante”* é tido como a principal função de segurança de um E.C. No caso do não atendimento a esta função de segurança o fluido refrigerante pode entrar em contato com o combustível nuclear e causar a sua oxidação e inchamento. Por consequência destes efeitos, pode haver a redução ou restrição da passagem de fluido refrigerante nos canais de refrigeração e, com isso, os E.C. podem superaquecer. Este superaquecimento, por sua vez, pode resultar na reação química entre o Zircaloy e a água superaquecida no núcleo, que tem como principal produto a formação de hidrogênio em quantidade suficiente para que uma explosão seja causada no núcleo de um reator, como o ocorrido no acidente nuclear de Fukushima, em 2011.

A análise mecânica realizada neste trabalho leva em consideração a condição de operação normal de um reator compacto, que é a condição de dimensionamento de um E.C. De acordo com a *ANSI/ANS 57.5-1996* [9], nesta condição ocorrem eventos frequentes ou regulares durante a operação,

reabastecimento, manutenção ou manobras realizadas em um reator PWR. Os possíveis eventos dentro desta condição foram extraídos do paper da referência [11], referentes ao reator australiano de pesquisa RRR, e são mostrados abaixo:

- A. Operação em estado estacionário à plena potência.
- B. Operação em estado estacionário à potência parcial.
- C. Início da operação do reator (partida).
- D. Finalização da operação do reator (parada).

Dentre estes eventos, o que foi analisado neste trabalho é o primeiro, que trata da “*Operação do reator em estado estacionário à plena potência*”, e pode induzir aos maiores valores de temperatura gerada pelo combustível e, conseqüentemente, aos maiores valores de tensão e deformação no E.C. A justificativa para esta afirmação está no fato de o reator estar produzindo 100% da potência para a qual foi projetado nesta condição, o que significa que os valores de tensão e deformação resultante são maiores por conta da influência do carregamento térmico, que afeta toda a estrutura, como será mostrado no capítulo 5 deste trabalho.

Do ponto de vista estrutural, pela falta de estudos experimentais sobre o comportamento do E.C. quando submetido aos carregamentos da condição normal de operação do reator, mais especificamente no evento de operação a plena potência, a avaliação mecânica desta estrutura foi executada com a metodologia de projeto por análise presente no código *ASME III, divisão 1, subseção NB* [12]. O uso desta norma consiste, basicamente, no estabelecimento de um procedimento para a obtenção de limites admissíveis para os materiais dos componentes de uma determinada estrutura. Esta norma também define um procedimento de comparação dos limites admissíveis citados anteriormente com os valores de tensão resultantes de uma análise computacional.

2.1. Projeto conceitual

De acordo com Kaufmann [4], um E.C. deve conter, basicamente: canais de refrigeração, alças para o seu manuseio, molas de fixação, pinos para o contato com a estrutura interna de suporte dos E.C. no núcleo vaso de pressão, conexões para a instrumentação e um canal para o Elemento de Controle (E.Ct.).

Além disso, um E.C. deve ser uma estrutura pequena o suficiente para ser facilmente transportada.

O arranjo básico para a construção de um E.C. consiste, basicamente, na união dos denominados *componentes principais*, que são um *Bocal Superior*, quatro *Conjuntos de Placas Combustíveis* e um *Bocal Inferior*. Estes componentes principais, por sua vez, são formados por outros componentes, como será comentado nos tópicos 2.1.1, 2.1.2 e 2.1.3.

Os desenhos de cada um dos componentes do E.C. são mostrados no Apêndice A.

2.1.1. Bocal Superior

O *Bocal Superior* (Desenho 9) é o componente que abriga as molas de fixação do E.C. A sua estrutura é composta pelos componentes “*Base A*” (Desenho 3), “*Cantoneiras*” (Desenho 7) e a “*Base B*” (Desenho 4). Essa estrutura abriga os “*Pinos de suporte da mola*” (Desenho 8), as “*Presilhas*” (Desenho 6) e as “*Molas de fixação*” (Desenho 5). Os pinos têm a função de tornar possível o contato do E.C. com a estrutura interna de suporte dos E.C. no núcleo vaso de pressão. As presilhas têm a função de permitir a transferência de movimento dos pinos para as molas. Essas molas, por sua vez, são projetadas para permitir que o E.C. se expanda até certo ponto, limitando a distância do seu contato com estrutura interna de suporte dos E.C. no núcleo vaso de pressão. Com exceção das molas de fixação, constituídas por INCONEL 718, todos os componentes do *Bocal Superior* são constituídos por Zircaloy-4.

2.1.2. Conjuntos de placas combustíveis

O conjunto de placas combustíveis é constituído por quatro Placas de Suporte: as *placas “A”* (Desenho 13), “*B*” (Desenho 14), “*C*” (Desenho 15) e “*D*” (Desenho 16); e dezoito “*Placas Combustíveis*” (Desenho 11), constituídas por um “*Cerne*” (Desenho 10) de Urânio metálico com 10% de adição de Molibdênio e duas “*Molduras Laterais*” (Desenho 12), de Zircaloy-4.

As placas de suporte foram projetadas para serem soldadas entre si nas faces das suas extremidades. As placas “A” e “C” possuem ranhuras ao longo de sua altura projetadas para que as Placas Combustíveis sejam fixadas nestas

localizações. Desta maneira, um conjunto de placas combustíveis é formado, como mostrado no Desenho 18, sendo um E.C. completo constituído, como já mencionado, por quatro destes conjuntos, que são lateralmente soldados entre si. Em seguida, são soldados os bocais superior e inferior respectivamente nas faces das extremidades superior e inferior destes quatro conjuntos de placas combustíveis, completando a estrutura do E.C. em seu formato final, como é possível observar no desenho Desenho 2.

A maneira mais usual de se fabricar uma placa combustível é utilizar os processos de conformação e laminação. As duas molduras laterais e o cerne são conformados mecanicamente e submetidos, posteriormente, a diversos passes de laminação à quente. Com a laminação, ocorre o caldeamento, que é a ligação metalúrgica entre estas molduras e o cerne, de maneira a dar origem ao combustível monolítico. Para o ajuste fino das dimensões e das propriedades mecânicas desejáveis para a placa, executa-se o processo de laminação à frio [8]. Com exceção do cerne combustível, de U-10Mo, todos os outros componentes do conjunto de placas combustíveis foram projetados para serem compostos por Zircaloy-4.

2.1.3. Bocal inferior

O “Bocal Inferior” (Desenho 17) é o componente que, por meio do qual, é possível se apoiar o E.C. na estrutura interna inferior de suporte dos E.C. no núcleo vaso de pressão. Na estrutura citada existem pinos, que são passados pelos furos do bocal inferior e servem como guias para impedir que o E.C. se movimente lateralmente.

2.1.4. E.C. Conceitual nº1

Andrzejewski [6] apresenta o esboço de uma estrutura conceitual de um E.C. para um reator PWR compacto, exibido na figura 9. O design dessa estrutura foi baseado no E.C. do reator Shippingport, também voltado para aplicação em embarcações, mostrado anteriormente na figura 7. No presente trabalho foram desenvolvidos dois projetos de E.C. do tipo placa baseado nestas duas referências, denominados como conceitos 1 e 2. O conceito 1 (Desenho 2) tem, como principal característica estrutural, o método de fixação da soldagem entre os seus componentes principais, mais simples em sua fabricação e

montagem com relação ao conceito aparafusado, que será mostrado mais à frente. Na presente concepção, os quatro conjuntos de placas combustíveis são soldados entre si, formando uma única estrutura.

2.1.5. E.C. conceitual nº2

Além do modelo apresentado anteriormente, baseado no método da fixação da soldagem, foi elaborado um conceito baseado no método de fixação do aparafusamento, que permite haver modularidade entre os componentes principais, cuja característica mais notável está no fato desta montagem não ser permanente. Em outras palavras, por meio deste método seria possível substituir um componente defeituoso pelo simples desaperto de alguns parafusos. A praticidade que este conceito apresenta, contudo, não se aplica na prática sobretudo pelo fato de não ser recomendável a substituição de um componente já usado por um novo, por conta da modificação das propriedades mecânicas dos materiais quando submetidos aos efeitos dos carregamentos em um reator. O maior valor de massa e número de peças necessárias devido a necessidade de se inserir parafusos e fixadores de transição entre os componentes principais aumentaria a complexidade da posterior montagem desta estrutura, exigindo não apenas o aparafusamento, mas também a soldagem entre os seus componentes principais. Não é um método que consta em literatura para as estruturas dos E.C. placa, sendo necessário um estudo prévio aprofundado sobre a sua viabilidade de fabricação. A imagem ilustrativa deste E.C. encontra-se no Desenho 1.

Figura 9 – Conceito inicial do E.C. Placa.

Fonte – C. S. Andrzejewski [6].

2.2. Materiais

Tratando-se, a partir deste momento, apenas do E.C. Conceitual nº1, é possível dizer que, com exceção das suas molas de fixação e dos seus cernes combustíveis, constituídos por INCONEL-718 e U-10Mo respectivamente, todos os seus demais componentes estruturais são constituídos por Zircaloy-4. Nos itens que seguem são destacadas as principais características desses materiais.

2.2.1. Zircaloy

O Zircaloy é um material de revestimento que possui como principal atrativo, em comparação com o aço inoxidável, a baixa absorção de nêutrons. Trata-se de um material que possui boa resistência à corrosão em ambientes

úmidos e sujeitos a alta temperatura, sendo ideal para o emprego em reatores nucleares. Além disso, possui compatibilidade metalúrgica para ser fabricado juntamente com o urânio metálico.

Em contrapartida, trata-se de um material que possui complicações elevadas nos seus processos de usinagem, além de ser um material de revestimento mais caro do que o aço inoxidável para a mesma aplicação. O Zircaloy é suscetível à corrosão em processos de fabricação que ocorrem em temperaturas de trabalho no regime plástico do material, entre 600°C e 700°C, em ambientes com ar. Os efeitos da contaminação do ar nestes trabalhos à quente reduzem a capacidade de resistência à corrosão deste material, sendo necessária a remoção do metal de superfície à cada operação de fabricação à quente. Trata-se de um material que possui uma característica de “memória” quanto aos processos de fabricação anteriores, à quente ou frio, devido ao seu comportamento anisotrópico, o que pode resultar na ocorrência de dimensões não uniformes em posteriores operações de acabamento. Este comportamento pode ser eliminado por meio de tratamentos térmicos. Em processos de fabricação com atrito, ele tem a característica de ser “pegajoso”, sendo necessária a utilização de lubrificantes especiais para estas operações [4].

Neste trabalho foi considerado o Zircaloy-4, nas especificações ASTM B351 [13] e B352 [14], respectivamente para o Zircaloy-4 em barra e em placa, conforme será mostrado na tabela 4 do tópico 2.2.4.

2.2.2. Urânio Molibdênio – U-10Mo

O material combustível metálico que é contido dentro do E.C. placa, citado na referência [6], é uma liga de urânio com adição de 10% de molibdênio. Essa liga metálica tem sido estudada sobretudo pelas seguintes características [4]:

- A resistência à corrosão em alta temperatura do urânio molibdênio é maior em comparação com o urânio metálico. Sendo assim, na ocasião de falha no revestimento e consequente contato com o fluido refrigerante, a corrosão no urânio-molibdênio não é tão rápida a ponto de ser desastrosa.

- Com a adição de molibdênio, os valores de tensão limite elástica e tenacidade aumentam, contribuindo para o aumento da resistência mecânica destes combustíveis.
- As ligas de urânio molibdênio geralmente possuem menor valor de expansão térmica em comparação com o urânio metálico puro. Sendo assim, no aquecimento deste combustível, são encontrados menores valores de tensão térmica.

As propriedades desse material são mostradas na tabela 5 do tópico 2.2.4.

2.2.3. Inconel 718

O INCONEL 718 (ASTM B637) foi o material escolhido para as molas de fixação localizadas no *Bocal Superior* do conceito selecionado do E.C. por ser resistente à corrosão em ambientes sujeitos a alta temperatura e umidade. Os componentes criados a partir deste material podem trabalhar sujeitos a uma temperatura que varia entre -200°C até 500°C.

As propriedades consideradas para o INCONEL 718 para as molas de fixação, mostradas na tabela 6 do tópico 2.2.4, consideraram o processo de fabricação admitido para a configuração da mola de fixação, que é a conformação à frio. Além disso, foram considerados nestas propriedades os tratamentos térmicos de têmpera, revenimento e envelhecimento, que melhoram a resistência mecânica das molas para o emprego em um E.C.

2.2.4. Propriedades dos Materiais

Nas tabelas 4, 5 e 6 são mostradas as principais propriedades mecânicas e térmicas dos materiais que compõem a estrutura do E.C., respectivamente o Zircaloy-4, U-10Mo e INCONEL 718. Na tabela 7 são mostradas as propriedades físicas da água leve utilizada como fluido refrigerante. Os dados contidos nestas tabelas foram inseridos nos sistemas de análise do software Ansys® para caracterizar os volumes correspondentes aos materiais estruturais e fluido refrigerante. Abaixo segue a definição dos termos e símbolos observados nestas tabelas. Na tabela 3 são mostrados os principais símbolos e definições para estas propriedades.

Tabela 3 – Símbolos e definições.

Símbolo ¹	Definição	Unidade (S.I.)
T	Temperatura	°C
ρ	Densidade	Kg/m ³
k	Condutividade térmica	W/m.k
α	Coef. de expansão térmica	°C ⁻¹
E	Módulo de elasticidade	Pa
σ_e	Limite de escoamento	Pa
ν	Módulo de Poisson	-
P _r	Pressão do refrigerante	Pa
c	Calor específico	J/Kg°C

Fonte - Autor próprio.

Tabela 4 - Propriedades do Zircaloy-4 (ASTM B351/352).

T (°C)	ρ (Kg/m ³)	k (W/m.k)	α (°C ⁻¹)	E (GPa)	σ_e (MPa)	ν
25	6551	13,78	0	92,4	941	0,36
100		15,30	1,26E-05	88,4	877	0,37
200		17,39	1,26E-05	82,9	788	0,38
300		19,48	1,26E-05	77,4	700	0,38
400		21,57	1,26E-05	71,9	612	0,39

Fonte – Referências [15], [13], [14] e [16].

Tabela 5 - Propriedades térmicas e mecânicas do U-10Mo.

T (°C)	ρ (Kg/m ³)	k (W/m.k)	α (°C ⁻¹)	E (GPa)	σ_e (MPa)	ν
25	17130	12,11	1,19E-05	125	165	0,326
100	17060	14,35	1,31E-05	119		
200	16970	17,12	1,45E-05	105		
300	16880	20,06	1,60E-05	92,4		
400	16800	23,18	1,75E-05	79,3		

Fonte – Referências [4] e [17].

¹ Apesar de as unidades das variáveis σ_e e P_r no sistema internacional serem em Pa, nas tabelas elas foram colocadas como MPa para melhorar a visualização dos seus valores.

Tabela 6 - Propriedades térmicas e mecânicas do INCONEL 718.

T (°C)	ρ (Kg/m ³)	k (W/m.k)	α (°C ⁻¹)	E (GPa)	σ_e (MPa)	ν
20	17130	11,4	1,30E-05	200	1450	0,327
100	17060		1,31E-05	196		
200	16970		1,40E-05	190		
300	16880		1,44E-05	185		
400	16800		1,45E-05	179		

Fonte – Referência [18].

Tabela 7 - Propriedades físicas da água leve (H₂O).

Material	T (°C)	Pr (MPa)	ρ (Kg/m ³)	α (°C ⁻¹)	k (W/m.k)	c (J/kg.°C)
Água	275	13	763,6	2,57E-04	0,5832	4181

Fonte - Base de dados do software E.E.S. [19].

2.3. Carregamentos atuantes

Foi considerado, no presente trabalho, que durante o evento de operação à plena potência de um reator PWR compacto o E.C. se encontra sujeito a cinco carregamentos, sendo estes o peso próprio, a força de atuação das molas de fixação, o empuxo hidrostático, o arrasto hidráulico e o campo de temperaturas. Neste tópico da revisão bibliográfica serão expostos os conceitos destes carregamentos. A maneira como estes foram calculados e incorporados às análises do E.C. serão mostrados no decorrer do capítulo 3.

2.3.1. Peso próprio

O peso próprio (P_p), ou força-peso, é um carregamento intrínseco à concepção física de uma estrutura, e ocorre pela influência da ação da gravidade. Em outras palavras, é uma força que atua em todos os corpos sob influência do campo gravitacional da terra [20]. A equação (1) descreve a maneira como é calculada essa força, que é o produto da massa de um objeto (m) pela aceleração da gravidade (g).

$$P_p = m \cdot g \quad (1)$$

2.3.2. Empuxo Hidrostático

O empuxo hidrostático, de acordo com o princípio de Arquimedes, “é uma força vertical que age de baixo para cima, cuja intensidade é igual ao peso do volume de fluido deslocado” [21], e pode ser calculado através da equação (2), através do produto da densidade do fluido (ρ_F) pelo volume do objeto (V) pela aceleração da gravidade (g).

$$E = \rho_F \cdot V \cdot g \quad (2)$$

2.3.3. Arrasto hidráulico

O arrasto hidráulico, ou força de atrito hidrodinâmica, é a resistência física que um corpo encontra quando um fluido é forçado a se mover através dele, e vice-versa. De acordo com a referência [22], esta força é calculada através da equação (3), para a qual são definidos os seguintes termos:

- F_f : Força de arrasto
- C_f : Coeficiente de arrasto
- A_f : Área da superfície de arrasto
- ρ : Densidade do fluido
- V_f : Velocidade do fluxo de fluido

$$F_f = C_f \frac{\rho V^2}{2} A_f \quad (3)$$

2.3.4. Campo de temperaturas

A fonte de calor que é originada no E.C., especificamente nos cernes das placas combustíveis, que são aquecidos por conta das reações de fissão, gera os processos de transferência de calor por condução, convecção e radiação (que, no caso em estudo, não foi considerada). De acordo com a referência [22], por meio das equações (4), (5) e (6) os respectivos modos de transferência de calor citados são calculados e, para estes, são definidos os seguintes termos:

- $Q_{condução}$: calor transferido por meio da condução
- $Q_{convecção}$: calor transferido por meio da convecção
- $Q_{radiação}$: calor transferido por meio da radiação
- A_s : área de transferência de calor
- ΔT : variação da temperatura no objeto
- L : espessura do objeto
- k : condutividade térmica do material

- h_c : coeficiente de convecção
- ε : potência emissiva do corpo (emissividade)
- σ_r : constante de *Stefan-Boltzmann*

$$Q_{condução} = k \cdot A_s \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (4)$$

$$Q_{convecção} = h_c \cdot A_s \cdot \Delta T \quad (5)$$

$$Q_{radiação} = \varepsilon \cdot \sigma_r \cdot A_s \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (6)$$

2.3.5. Molas de fixação

As molas de fixação são componentes projetados para evitar a colisão do Bocal Superior do E.C. com a estrutura interna superior de suporte dos E.C. no vaso de pressão [7], ao mesmo tempo que permitem que o E.C. se expanda verticalmente por conta da temperatura de trabalho do reator. A atuação das molas de fixação no E.C. obedece a teoria da força elástica, representada pela lei de Hooke [23] mostrada na equação (7), onde a força elástica atuante na mola (F_{el}) é calculada pelo produto da rigidez do material da mola (k) pelo deslocamento imposto nesta (y).

$$F_{el} = k \cdot y \quad (7)$$

2.4. Sistemas de análise do software Ansys®

Por meio das equações apresentadas no tópico 2.3 foi possível calcular os carregamentos do peso próprio (via software SolidWorks®), do empuxo hidrostático e das molas de fixação. Embora também tenham sido apresentadas as equações por meio das quais os carregamentos do arrasto hidráulico e do campo de temperaturas (transferência de calor) são geralmente calculados, neste trabalho será utilizado o método de cálculo numérico via software Ansys® nestas duas situações. Esta opção foi definida, sobretudo, pela dificuldade observada no cálculo destes carregamentos, levando-se em consideração as diferentes propriedades dos materiais em função da temperatura. Não foram encontrados modelos analíticos que contemplem a complexidade de cálculo desta situação. Além desta complexidade no cálculo dos carregamentos citados, será analisada a combinação de todos os carregamentos mostrados no tópico 2.3.

A metodologia proposta neste trabalho consiste na utilização de dois métodos numéricos computacionais: o método dos elementos finitos, utilizado nos sistemas de análise *Steady-State Thermal*® e *Static Structural*®, e o método dos volumes finitos, utilizado no sistema de análise *CFX*®. Todos os sistemas de análise citados anteriormente pertencem ao software *Ansys*®.

No método dos elementos finitos uma geometria modelada é subdividida em pequenas partes, denominadas de elementos, que passam a representar a região de análise do problema. A divisão da geometria modelada em pequenos elementos permite solucionar um problema complexo subdividindo-o em problemas mais simples. Tais divisões – ou elementos – podem apresentar diferentes formas como a triangular, quadrilateral, entre outras, em função do tipo (linear e não linear – dinâmica e estática) e da dimensão do modelo (unidimensional, bidimensional ou tridimensional). Os elementos finitos são conectados entre si por pontos, que são denominados de nós ou pontos nodais, e ao conjunto de todos estes elementos e nós dá-se o nome de malha. Este método sugere que um número restrito de elementos de comportamento bem especificado sejam empregados no lugar de um número ilimitado de variáveis desconhecidas. As equações matemáticas que regem os comportamentos físicos em função dessas subdivisões geométricas não são resolvidas de maneira exata, mas de forma aproximada por este método numérico, sendo a precisão deste método dependente da quantidade de nós e elementos, do tamanho, dos tipos e da qualidade dos elementos presentes [24] [25].

O método dos volumes finitos se difere do método dos elementos finitos, simplificada, em duas características: a primeira é pelo fato deste método possuir, como base para a sua modelagem matemática, os princípios da conservação de massa, momentum e energia; a segunda é que a geometria modelada diz respeito a um domínio de interesse para a análise, que é dividido (discretizado) em pequenas partes, ou volumes de controle. A formulação de equações integrais de conservação de massa, momentum e energia é aplicada nestes volumes de controle [26].

2.4.1. CFX®

De acordo com o manual do usuário do Ansys® [27], por meio do CFX® é possível se discretizar e resolver numericamente as equações parciais diferenciais de Navier-Stokes, que descrevem os processos de transferência de calor, de massa e de quantidade de movimento, e que não possuem solução analítica geral. Modelos matemáticos aproximados que descrevem outros processos, como a turbulência, também podem ser resolvidos em conjunto com as equações de Navier-Stokes neste software. Sendo assim, a técnica utilizada no CFX® consiste em dividir a região de interesse da análise em pequenas sub-regiões, determinadas como volumes de controle, discretizar e resolver iterativamente as equações citadas anteriormente para cada volume de controle. Como resultado, é obtida a caracterização do comportamento do fluido por meio da aproximação do valor de cada variável em pontos específicos ao longo dos domínios analisados.

2.4.1.2. Modelo de turbulência K-Ômega

O fluxo turbulento é um tipo de escoamento que tem como principal característica a mistura das partículas de um fluido de forma caótica, o que aumenta a taxa de transferência de calor deste fluido. Apesar da existência de teorias e modelos matemáticos por meio dos quais a turbulência é explicada, ainda não existe uma maneira teórica capaz de prever uma série de casos que envolvem o escoamento turbulento [28].

Dentro da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) existem modelos matemáticos que têm por objetivo representar a presença do fenômeno da turbulência em certos casos de escoamento. Desta maneira, para garantir a correta representação deste fenômeno em casos de escoamento, é necessário que seja feita a escolha adequada do modelo de turbulência, que leva em consideração o conhecimento sobre as características do escoamento e do software utilizado (ver mais detalhes na Seção 3.1.1). Basicamente, no Ansys CFX, foi definida a estratégia numérica RANS (do inglês, *Reynolds Averaged Navier-Stokes*), dentro da qual se encontra o modelo de turbulência K-Ômega [28]. Por meio desta estratégia é resolvida a média das variáveis da equação de Navier-Stokes em função do tempo.

De acordo com a referência [29], por meio do modelo matemático K-Ômega são resolvidas duas equações diferenciais de transporte, correspondentes à energia cinética de turbulência (k_t) e à frequência de turbulência (ω), respectivamente mostradas nas equações (9) e (10). Estas duas equações são correlacionadas como mostrado na equação (8).

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla * (\rho U k) = \nabla * \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla * (\rho U \omega) = \nabla * \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 \quad (10)$$

Para estas equações, são definidos os seguintes termos:

- U : vetor velocidade
- μ : viscosidade do fluido
- μ_t : viscosidade turbulenta do fluido
- P_k : taxa de produção de turbulência

Constantes de fechamento do modelo:

- β : 0,075
- β' : 0,09
- σ_k : 2
- σ_ω : 2

2.4.2. Steady-State Thermal®

No sistema de análise *Steady-State Thermal*® é feita uma análise em estado estacionário, por meio da qual são calculados os efeitos das cargas térmicas, como por exemplo distribuições de temperatura, acúmulo de calor perdido ou ganhado, gradientes térmicos e fluxos térmicos em estruturas. Outra função comum deste sistema é a possibilidade do seu acoplamento com o módulo *Static Structural*® para o estabelecimento de condições térmicas iniciais para uma análise mecânica, função utilizada no presente trabalho. De acordo

com o manual do *Ansys*® [30], a base do funcionamento deste sistema de análise é a equação de balanço de calor, obtida do princípio da conservação da energia. Por meio do método dos elementos finitos é possível calcular as temperaturas nos nós da malha e usá-las para obter outras grandezas térmicas. Por meio deste sistema de análise é possível resolver problemas de condução, convecção e radiação, que são os três modos primários de transferência de calor.

2.4.3. Static-Structural®

O sistema de análise *Static Structural*® é utilizado para executar, em particular, análises estáticas onde se obtém os efeitos estruturais dos carregamentos atuantes em estruturas. Estas são análises que podem incluir cargas inerciais constantes, como a aceleração da gravidade e a velocidade rotacional. As cargas que variam com o tempo podem ser aproximadas como cargas estáticas equivalentes, como o vento e o sismo por exemplo. Por meio destas análises é possível se determinar deslocamentos, tensões, deformações e forças causadas por carregamentos que não induzem efeitos de inércia e amortecimento significantes, já que as respostas das estruturas a estes carregamentos são assumidas como sendo lentamente variantes com o tempo, bem como os próprios carregamentos. Os tipos de carregamento que podem ser aplicados em uma análise estática incluem forças e pressões aplicadas, forças iniciais constantes, deslocamentos impostos, temperaturas etc. [30].

3. Metodologia proposta

A utilização dos dois métodos numéricos mencionados no tópico 2.4 requer que sejam definidos os seguintes parâmetros para que as análises das situações de carregamento em um componente representem com maior fidelidade as condições reais de um modelo existente [24] [26] [27] [30] [31]:

- Geometria real:
 - Trata-se da geometria real de estudo, que servirá de base para a definição da geometria modelada.
- Geometria modelada:
 - O passo inicial no uso dos métodos numéricos consiste na elaboração de um “esquema de cálculo” ou, em outras palavras, um “modelo de cálculo” ou uma “geometria modelada”. Trata-se de uma modelagem computacional geométrica por meio da qual são identificadas as regiões relevantes do problema em estudo, e permitem que sejam definidas hipóteses para a análise. No presente trabalho, as geometrias modeladas foram elaboradas no software SolidWorks® e foram, posteriormente, exportadas para os sistemas de análise pertinentes a cada análise realizada.
- Malha de elementos finitos:
 - Nesta etapa o modelo de análise é configurado com o método dos elementos finitos, o que significa dizer que este modelo é subdividido em vários elementos menores que formam uma malha de elementos, para que a solução matemática do problema analisado seja obtida. Os tipos dos elementos desta malha, as suas características como número de nós e graus de liberdade por nó são configurados nesta etapa.

- Carregamentos:
 - Nesta etapa os carregamentos definidos (ou pré-estabelecidos) são inseridos nos seus respectivos locais de influência (ou aplicação) na geometria do modelo de análise, podendo estar na forma de forças, pressões, temperaturas etc.

- Restrições:
 - Nesta etapa as condições de contorno ou de restrição ao movimento do modelo nas três direções cartesianas são configuradas, podendo estar na forma de suportes fixos, deslocamentos impostos etc.

- Contatos:
 - Completando as condições de contorno, é importante definir as condições de contato porventura existentes entre os componentes presentes na geometria modelada, o que equivale a dar ao software a informação de como esta geometria se comporta quando existe o contato entre os seus componentes. Nas análises computacionais realizadas neste trabalho foram configurados, basicamente, dois tipos de contato lineares com relação à geometria modelada: *Bonded* e *No Separation*.
 - *Bonded*: trata-se de um tipo de contato que não permite a separação entre dois componentes porventura encostados entre si.
 - *No Separation*: trata-se de um tipo de contato que permite o deslizamento entre componentes sem que haja a separação destes.

- Propriedades dos materiais:
 - Nesta etapa, as principais propriedades dos materiais são inseridas e atribuídas aos componentes do modelo de análise.

No decorrer do presente trabalho foram feitas quatro análises, sendo duas para o aprendizado da metodologia dos sistemas de análise do software *Ansys*® utilizados, e duas para a avaliação mecânica da estrutura. A relação do número de análises realizadas é mostrada na tabela 8. Todas as análises foram definidas como estáticas e lineares. Essa linearidade se deve pela seleção de contatos nos modelos de análise que não permitem a mudança na rigidez estrutural do modelo de análise.

Tabela 8 - Análises realizadas.

Função	Número	Análise	Tópico
Testes (estudos)	1	Estudo termo-hidráulico	3.1.1
	2	Estudo termomecânico	3.1.2
Análise Estrutural	3	Análise termo-hidráulica	3.2.1
	4	Análise termomecânica	3.2.2

Fonte - Autor próprio.

3.1. Estudos de referência

Parte da metodologia de uma análise mecânica consiste na comparação dos resultados das análises computacionais com os valores extraídos de estudos experimentais para uma determinada estrutura. Até o momento da preparação desta dissertação, não existem estudos experimentais do comportamento mecânico da estrutura do E.C. analisado. Dessa maneira, foi necessário partir para a reprodução de estudos experimentais para verificar a utilização dos sistemas de análise de interesse do software *Ansys*®.

3.1.1. Estudo Termo-hidráulico

No primeiro estudo mencionado na tabela 8 foi feita a reprodução de uma análise de transferência de calor de dois aquecedores de INCONEL 625 para um fluxo ascendente de água em um canal retangular, presente nas referências [32] e [33], com a utilização do sistema de análise *CFX*®, do software *Ansys*®. O fluxo de água tem o sentido ascendente, à velocidade de 0,225 m/s.

Para este estudo, as configurações definidas são mostradas nos tópicos a seguir.

3.1.1.1. Geometria real

A geometria real de análise foi extraída do artigo de referência [32], e é exibida na figura 10. Do lado esquerdo (a) é mostrada a seção transversal da geometria. Do lado direito (b) é mostrada a geometria dos aquecedores, com os respectivos locais de coleta dos dados de temperatura, com o uso de termopares.

Figura 10 - Geometria real.

Fonte – Referência [32].

3.1.1.2. Geometria modelada (fluido e aquecedores)

Foram modelados cinco corpos, sendo três referentes ao fluido refrigerante e dois referentes aos aquecedores esquerdo e direito, como exibido na figura 11.

Figura 11 - Geometria modelada.

Fonte - Autor próprio.

3.1.1.3. Malha de elementos finitos

- Número de elementos: 1.400.000
- Número de elementos na espessura:
 - Aquecedores: 6
 - Fluido refrigerante: 30

3.1.1.4. Carregamento

Nos corpos (volumes) representativos dos aquecedores foram definidas fontes de energia com no valor de 1156 W, ou $3,61 \cdot 10^7 \left[\frac{W}{m^3} \right]$.

3.1.1.5. Contatos (interfaces)

As faces dos aquecedores que estão em contato com o fluido refrigerante (uma face para cada aquecedor) foram definidas como interfaces sólido-fluido, para que o calor gerado nos aquecedores pudesse passar para o fluido refrigerante.

As faces de contato entre os corpos que formam o fluido refrigerante foram definidas como interfaces fluido-fluido, para que o comportamento do refrigerante como um todo seja compartilhado por esses três corpos.

3.1.1.6. Condições de restrição

As faces de todos os corpos para as quais não foram atribuídos carregamentos ou interfaces foram definidas como “*adiabatic walls*” (paredes adiabáticas).

3.1.1.7. Propriedades dos materiais

Para o aquecedor de INCONEL 625:

- Propriedade de interesse para a análise, dada na referência [32]: condutividade térmica: $10,1 \left[\frac{W}{m.^{\circ}C} \right]$ a $38^{\circ}C$.

Para o fluxo de água:

- As propriedades de interesse da água são as mesmas que constam na tabela 7.

3.1.1.8. Modelo de turbulência adotado

Para a determinação do modelo de turbulência, o estudo termo-hidráulico foi reproduzido com três modelos de turbulência, sendo estes o K-Ômega, o K-Épsilon e o SST.

De acordo com a figura 12, a reprodução do estudo com o modelo de turbulência K-Ômega apresentou os valores de temperatura mais próximos aos valores obtidos do experimento citado nas referências [32] e [33], com uma diferença menor do que 10%. Como adendo, cita-se que mesmas referências apresentam uma margem de erro experimental de $\pm 19,5\%$.

Figura 12 - Comparação dos modelos de turbulência.

Fonte - Autor próprio.

3.1.1.9. Comentários sobre o estudo termo-hidráulico

Embora as temperaturas de entrada do fluido refrigerante não estejam exatamente próximas às obtidas no experimento, o efeito da transferência de calor foi capturado da maneira correta, como apresentado na figura 12. O fator que pode ter proporcionado estas diferenças são as considerações sobre as propriedades térmicas dos termopares existentes no experimento, que não foram contempladas na análise realizada por falta de informações. Por conta disto, o modelo elaborado foi simplificado, considerando os aquecedores sem os termopares.

Por meio estudo é possível concluir que a análise numérica utilizando o método dos elementos finitos foi configurada adequadamente. As mesmas configurações e hipóteses básicas de análise foram, então, empregadas nas análises do E.C. tipo placa, que é o objeto do presente trabalho.

3.1.2. Estudo termomecânico

No segundo estudo mencionado na tabela 8 [34] foram analisados os valores das tensões térmicas em uma placa combustível genérica. O autor deste trabalho de referência desenvolveu equações por meio das quais é possível calcular a temperatura e os valores de tensão quando a placa combustível está sujeita a uma fonte interna de energia e, também, a um valor de temperatura nas faces externas do seu revestimento. Essa condição térmica de contorno dá origem a um gradiente de temperaturas, sendo a maior localizada ao centro - *cerne combustível* - desta placa.

Para a obtenção dos valores de expansão térmica foram analisadas duas situações: a primeira considerando uma geração de energia na placa combustível genérica e; a segunda não considerando a geração de energia na placa combustível. Os valores de tensão obtidos no primeiro caso foram subtraídos dos valores obtidos no segundo caso. Os valores resultantes foram referentes apenas à influência da geração de energia térmica desta placa.

Para a reprodução deste estudo, a geometria, as condições de contorno mecânicas e térmicas, os carregamentos e as propriedades dos materiais adotados no artigo original foram configuradas da seguinte maneira:

- Sistemas de análise do Ansys utilizados:
 - *Steady-State Thermal*® e *Static Structural*® integrados.
- Simulações realizadas:
 - 1ª: placa combustível genérica sujeita a uma geração volumétrica de energia no valor de $0,517 \text{ W/mm}^3$ e a uma temperatura importa de $71,1^\circ\text{C}$ localizada nas faces externas laterais dos seus revestimentos.
 - 2ª: a mesma que no caso 1, porém sem a geração volumétrica de energia.

3.1.2.1. Geometria real (figura 13)

Figura 13 - Geometria real

Fonte - Referência [34].

3.1.2.2. Geometria modelada (figura 14)

- Número de corpos relativos ao revestimento: 8 (sendo 4 do lado direito e 4 do lado esquerdo).
- Número de corpos relativos ao cerne combustível: 4.

Figura 14 - Geometria modelada - SolidWorks®

Fonte - Autor próprio.

3.1.2.3. Malha de elementos finitos:

A malha de elementos finitos é configurada da seguinte maneira:

- Número de elementos: 150.000.
- Número de elementos na espessura da placa: 6.

Figura 15 - Malha de elementos finitos.

Fonte - Autor próprio.

3.1.2.4. Carregamento

É atribuído ao cerne da placa um valor de potência térmica igual a 0,517 W/mm³.

3.1.2.5. Restrições

São definidos quatro pontos de suporte fixo nos locais indicados na figura 16.

Figura 16 - Restrições no modelo de análise.

Fonte - Autor próprio.

3.1.2.6. Contatos

Todos os corpos foram considerados unidos, não existindo a configuração de contatos.

3.1.2.7. Propriedades dos materiais:

A referência [34] não identifica os materiais utilizados, mas fornece as propriedades destacadas na tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades do revestimento (cladding) e do combustível (fuel).

Propriedades	Cladding	Fuel
Condutividade térmica (k: W/m.°C)	10,4	29,4
Módulo de elasticidade (E: Pa)	1,20E+07	1,72E+11
Poisson	0,35	0,2
Coefficiente de expansão térmica	6,30E-06	2,70E-05

Fonte - Referência [34]

3.1.2.8. Comentários sobre o estudo termomecânico

Por conta da diferença das principais propriedades mecânicas dos materiais genéricos adotados – não identificados –, sobretudo referente ao maior coeficiente de expansão térmica do cerne, foi observado um aumento das tensões de compressão no cerne e um aumento das tensões de tração no revestimento, sendo este o comportamento esperado para as placas combustíveis do E.C.

Os resultados numéricos que serão mostrados na figura 17 ficaram próximos aos resultados analíticos exibidos no artigo de referência [34], como é possível observar na comparação entre o método analítico (à esquerda) e o numérico (à direita). Por meio desta comparação é possível concluir que a análise numérica utilizando o método dos elementos finitos foi configurada adequadamente. As mesmas configurações e hipóteses básicas de análise foram, então, empregadas nas análises da estrutura do E.C. tipo placa, que é o objeto do presente trabalho.

Figura 17 - Método analítico (à esquerda); e numérico (à direita).

Fonte - Referência [34] à esquerda e autor próprio à direita.

3.2. Análise do E.C. Placa

Neste tópico será abordada a análise do E.C., que será dividida em duas partes. A primeira diz respeito a uma análise termo-hidráulica em uma placa combustível, por meio da qual serão obtidos os valores dos carregamentos do arrasto hidráulico e do campo de temperaturas. Estes valores obtidos serão admitidos, conservadoramente, iguais para todas as placas combustíveis. Na sequência será apresentada uma análise termomecânica na qual será abordada a análise das combinações de todos os carregamentos citados no item 2.3, e a maneira como todos estes carregamentos foram definidos na geometria modelada do E.C.

3.2.1. Análise termo-hidráulica

O arrasto hidráulico e o campo de temperaturas são dois carregamentos que devem ser calculados através de uma análise termo-hidráulica. Durante a atividade do reator o cerne combustível é aquecido e o calor gerado é passado para o fluido refrigerante, que está em circulação nos canais de refrigeração do E.C. O calor gerado nesse processo afeta todos os componentes do E.C., sendo este o carregamento responsável pelos maiores valores de tensão e deslocamentos, como será visto no capítulo 4.

A primeira etapa desta análise consiste na caracterização do tipo de escoamento nos canais de refrigeração, através do cálculo do número de Reynolds. Para tanto, é necessário destacar que:

- O fluido refrigerante escoa a um valor médio estimado de 275°C no circuito primário do reator, resultando em um valor de viscosidade cinemática da água igual a $1,26 \cdot 10^{-7} \left[\frac{m^2}{s} \right]$. Este valor foi obtido através da biblioteca das propriedades da água presente no software EES [19].
- A velocidade de escoamento do fluido refrigerante é de $1,469 \frac{m}{s}$ [6].
- O diâmetro hidráulico foi calculado de acordo com a equação (11), encontrada na referência [35], levando-se em consideração o canal retangular mostrado na figura 18, do qual a base A compreende a largura do canal de refrigeração, 94,35 mm, e a altura B compreende a distância de 5,43 mm, equivalente à somatória da espessura de uma placa combustível com a metade de dois canais de refrigeração.

$$D_h = \frac{4AB}{A + B} = 0,02054 \text{ m} \quad (11)$$

Figura 18 - Cálculo do diâmetro hidráulico do canal de refrigeração.

Fonte - Autor próprio.

O número de Reynolds foi calculado de acordo com a equação (12), retirada da referência [22].

$$Re = \frac{V_m D_h}{\nu} = 2,39.10^5 \quad (12)$$

O valor do número de Reynolds obtido, $2,39.10^5$, caracteriza um regime turbulento de escoamento nos canais de refrigeração, já que trata-se de um valor maior do que o limite $Re = 1.10^4$, adotado para se caracterizar o regime de escoamento turbulento em um duto retangular, que é aproximadamente a geometria equivalente de um canal de refrigeração, de acordo com as referências [22] e [35].

3.2.1.1. Geometria real

A geometria real definida foi baseada em uma placa combustível cercada por dois canais de refrigeração. Através desta análise será possível mapear as temperaturas da placa combustível e do canal de refrigeração, sendo possível

admitir, conservadoramente, que estas são válidas para todas as outras placas presentes em um E.C.

3.2.1.2. Geometria modelada

Para atender ao proposto como geometria real, como comentado no tópico 3.2.1.1, foi necessário elaborar um modelo que representasse os volumes correspondentes ao cerne combustível, ao revestimento e ao volume de fluido refrigerante que cerca uma placa combustível do começo ao final de um canal de refrigeração do E.C.

Este modelo, exibido na figura 19, conta com os três volumes de controle, comentados no parágrafo anterior, que foram elaborados através da junção de outros corpos menores. O volume do fluido refrigerante, por exemplo, foi elaborado através da junção de oito corpos e o revestimento através da junção de quatro. Essa divisão na modelagem foi adotada para melhorar a definição da malha de elementos finitos gerada a partir desta geometria. O desenho mais detalhado sobre este modelo pode ser visto na figura 21.

Figura 19 – Volumes de interesse para a análise termo-hidráulica.

Fonte - Autor próprio.

Por meio do CFX® foi possível, ainda, definir uma condição de simetria no modelo, como mostrado na figura 20, sendo possível estender a região de análise para três placas combustíveis e três canais de refrigeração. A vantagem dessa simetria está no fato de ser possível analisar uma placa combustível mais

ao centro do E.C., por meio da qual são extraídos maiores valores de temperatura.

Figura 20 - Região de análise do CFX®.

Fonte - Autor próprio.

Figura 21 - Modelo de análise termo-hidráulica.

Fonte - Autor próprio.

3.2.1.3. Malha de elementos finitos

A malha de elementos finitos baseada na geometria modelada foi definida com quarenta elementos na espessura de cada um dos corpos que constituem os volumes de interesse, e com elementos de 5 mm de altura por 5 mm de largura, como exibido na figura 22, somando 900.000 elementos.

Figura 22 - Malha de elementos finitos.

Fonte - Autor próprio.

3.2.1.4. Carregamento

Foi adicionado ao volume de controle “Combustível” uma fonte de calor – ou *densidade de potência* - no valor de $0,181 \text{ W/mm}^3$, referente à potência nominal do reator, 58 MW [6], dividida pelo volume de um cerne combustível ($2,1\text{e-}5 \text{ mm}^3$) multiplicado pelo número de cernes combustíveis (72) e, ainda, multiplicado pelo número de E.C.s em um reator (21), de acordo com o procedimento mostrado abaixo:

- Volume de um cerne:
 - $2,1164 \cdot 10^5 \text{ [mm}^3\text{]}$
- Número de placas combustíveis em um Elemento Combustível:
 - 72

- Número de Elementos Combustíveis no núcleo do reator:
 - 21
- Volume total de material combustível no núcleo:
 - $2,1164 \cdot 10^5 * 72 * 21 = 3,2 \cdot 10^8 [mm^3]$ (13)
- Densidade média de potência:
 - $\frac{58 \cdot 10^6}{3,2 \cdot 10^8} = 0,181 = 181 \cdot 10^6 \left[\frac{W}{m^3} \right]$ (14)

3.2.1.5. Contatos (interfaces)

As faces dos volumes referentes ao cerne combustível e ao revestimento que estão em contato entre si foram definidas como *interfaces sólido-sólido*, que é a condição real de contorno entre estes dois corpos. Sendo assim, o calor definido no combustível foi transferido ao revestimento por condução, que é a condição de contorno real da geometria analisada.

As faces dos volumes referentes ao revestimento e ao fluido refrigerante que estão em contato entre si foram definidas como *interfaces fluido-sólido*, para que o calor gerado no combustível e conduzido ao revestimento seja transferido para o fluido refrigerante por meio da convecção, que é a condição de contorno real da geometria analisada.

3.2.1.6. Restrições

As faces de todos os corpos para as quais não foram atribuídos carregamentos ou interfaces foram definidas como “*adiabatic walls*” (paredes adiabáticas). Todas as paredes externas do modelo, com exceção das faces de entrada e saída do fluido refrigerante, foram definidas como paredes adiabáticas e representam os limites geométricos da análise realizada.

3.2.1.7. Materiais

O corpo do volume *Combustível* foi definido como sendo composto por U-10Mo. Os corpos presentes no volume *Revestimento* foram definidos como sendo compostos por Zircaloy-4. Os corpos presentes no volume *Fluido Refrigerante* foram definidos como sendo compostos por água a 275°C e pressurizada em 13 MPa, de acordo com a referência [6]. As propriedades destes materiais foram apresentadas no tópico 2.2.

3.2.1.8. Condições termo-hidráulicas consideradas

Todos os dados termo-hidráulicos utilizados para a definição das condições dos carregamentos, contatos, restrições e materiais foram extraídos da referência [6]. De maneira resumida, os dados termo-hidráulicos são mostrados abaixo, na tabela 10.

Tabela 10 - Dados termo-hidráulicos.

Descrição	Valor
Potência nominal total do reator (MW)	58
Potência gerada nas placas de combustível (MW)	56,6
Número de placas no núcleo	1512
Potência total gerada em uma placa combustível (KW)	38,36
Fluxo médio de calor (W/cm ²)	18,4
Pressão nominal no sistema primário (bar)	130
Vazão no canal (m ³ /h)	1,26
Vazão mássica de projeto do reator (kg/s)	427,6
Espessura do canal de refrigeração (mm)	3
Velocidade do refrigerante no canal de refrigeração (cm/s)	146,9

Fonte – Adaptada de C.S. Andrzejewski [6].

3.2.1.9. Resultados do estudo termo-hidráulico

Através da análise termo-hidráulica realizada foram obtidos os valores do campo de temperaturas (item 3.2.1.9.1) e do carregamento de arrasto hidráulico (item 3.2.1.9.2), definidos como atuantes em todas as placas combustíveis da geometria modelada do E.C.

3.2.1.9.1. Campo de temperaturas

O aquecimento dos cerne combustíveis atinge todos os componentes do E.C., causando a sua expansão térmica, que não é livre, visto que existem restrições verticais e laterais no E.C. (observar a figura 32) quanto à sua movimentação no núcleo do reator. Com isso, há o surgimento de tensões mecânicas, mais intensas sobretudo nos revestimentos das placas combustíveis, que estão em contato com o cerne.

Considerar os efeitos mecânicos da expansão térmica do E.C. é importante visto que:

- A expansão axial – ou vertical - da estrutura não pode ser maior do que o vão de 15 mm existente entre o bocal superior e a estrutura de suporte superior do núcleo do vaso de pressão do reator analisado, sob risco de o contato entre estas estruturas causar danos mecânicos em ambas.
- A expansão transversal da estrutura não pode ser tal que possibilite o contato entre os Elementos Combustíveis. É considerado um vão de 1 mm de espaço entre os E.C.
- O deslocamento das placas combustíveis não pode restringir o canal de refrigeração em mais de 30% - ou 0,9 mm - da sua espessura original, sob risco de serem causados problemas de superaquecimento no núcleo do reator, por demasiada restrição ao fluxo do refrigerante, de acordo com a referência [36].

As distribuições de temperatura atuantes em uma placa combustível foram extraídas da seção de resultados do *CFX*[®], onde foram criadas quatro linhas de análise, A, B, C e D, exibidas na figura 23, por meio das quais foram extraídos os valores de temperatura presentes na figura 24 em função da altura desta placa. Esses valores de temperatura serão usados, mais à frente, como dados de entrada para a análise termomecânica.

Figura 23 – Linhas de análise na espessura da placa combustível.

Fonte - Autor próprio.

Figura 24 - Distribuições de temperatura em uma placa combustível.

Fonte - Autor próprio.

3.2.1.9.2. Arrasto Hidráulico

Após feita a análise termo-hidráulica, foi possível verificar que o arrasto hidráulico possui o valor de 0,74 N nas faces laterais e de 3,43 N na face inferior da placa combustível analisada, resultando em 4,91 N de força de arrasto para uma placa combustível, como mostrado na figura 25. Ao considerar as 72 placas combustíveis presentes em um E.C., o valor alcança os 353,5 N.

Para esta resposta foram definidas as seguintes expressões no CFX®, respectivamente para o arrasto lateral (2 expressões) e o arrasto transversal (1 expressão):

- $force_y()@Face\ Externa\ Direita.$
- $force_y()@Face\ Externa\ Esquerda.$
- $force_y()@Face\ Inferior.$

Figura 25 - Arrasto Hidráulico na placa combustível.

Fonte - Autor próprio.

3.2.2. Análise termomecânica

No estudo termomecânico serão associadas à geometria modelada todos os carregamentos mencionados no tópico 2.3 de maneira gradual, para ser possível avaliar os seus efeitos na estrutura do E.C. A este procedimento foi dado o nome de “combinações dos carregamentos”.

Neste capítulo serão calculados os valores dos carregamentos do peso próprio, empuxo hidrostático e das molas de fixação, para que estes sejam os valores dos carregamentos que atuam na estrutura do E.C., e foi dada ênfase na metodologia específica de cálculo para cada um destes. Esses carregamentos atuam de maneira gradual e os seus efeitos se somam à medida que as situações a seguir se sucedem.

1. Colocação do E.C. no vaso de pressão (Ponto de partida):

- A colocação de um E.C. no núcleo de um vaso de pressão confere a ele a restrição lateral em seu bocal inferior. Isso se deve ao fato de existirem pinos na estrutura de suporte interna inferior de suporte dos E.C., nos quais os furos presentes no bocal inferior são encaixados.
- Nesta condição, definida como “Ponto de partida”, o carregamento analisado foi o peso próprio do E.C.

2. Inserção do interno superior do VPR (Combinação 1):

- A inserção do interno superior do VPR confere à estrutura do E.C. a condição de restrição superior, pelo contato entre os pinos de suporte das molas de fixação e a estrutura interna superior de suporte dos E.C. no interior do VPR.
- Nesta condição é originado o carregamento exercido pelas molas de fixação, por conta da sua compressão em 5 mm.
- Nesta condição, definida como “Combinação 1”, foram analisados os efeitos dos carregamentos do peso próprio e da atuação das molas de fixação no E.C.

3. Inserção do fluido refrigerante no núcleo do reator (Combinação 2):
 - Na terceira situação considerada o fluido refrigerante é inserido no circuito hidráulico primário do reator, preenchendo o vaso de pressão. Essa situação dá origem ao efeito do empuxo hidrostático atuante em um E.C.
 - Nesta condição, definida como “Combinação 2”, foram analisados os efeitos dos carregamentos do peso próprio, da atuação das molas de fixação e o empuxo hidrostático no E.C.
4. Início da atuação das bombas hidráulicas (Combinação 3):
 - Nesta situação o fluido refrigerante entra em circulação por meio da atuação de bombas hidráulicas, evento que dá origem ao carregamento de arrasto hidráulico em um E.C.
 - Nesta condição, definida como “Combinação 3”, foram analisados os efeitos dos carregamentos do peso próprio, da atuação das molas de fixação, empuxo hidrostático e arrasto hidráulico no E.C.
5. Aquecimento dos E.C. (Combinação 4):
 - A última situação considerada como fonte de carregamento oriundo da operação à plena potência de um reator PWR compacto diz respeito ao aquecimento do núcleo do reator até a sua temperatura de trabalho, através do aquecimento do material combustível presente dentro das placas combustíveis. Este carregamento térmico dá origem à expansão mecânica do E.C.
 - Nesta condição, definida como “Combinação 4”, foram analisados os efeitos dos carregamentos do peso próprio, da atuação das molas de fixação, empuxo hidrostático, arrasto hidráulico e campo de temperaturas no E.C.

Vale ressaltar, novamente, que foi considerada a condição de operação normal de um reator compacto PWR, especificamente durante o evento de operação à plena potência, para o cálculo dos carregamentos.

Para tanto, são utilizados os sistemas de análise *Static Structural*® e *Steady-State Thermal*® integrados. No primeiro sistema citado são definidas as

cargas mecânicas e mecânica-equivalentes (empuxo e arrasto), enquanto no segundo sistema é definida a carga térmica (campo de temperaturas) para, posteriormente, ser incorporada como carregamento no *Static-Structural*[®]. A ordem da análise das combinações dos carregamentos no Ansys[®] é mostrada na tabela 11.

Tabela 11 - Combinações dos carregamentos.

Etapas	Carregamentos Considerados	Sistema de análise utilizado
Combinação 1	Peso próprio + Molas de fixação	<i>Static Structural</i> [®]
Combinação 2	Peso próprio + Molas de fixação + Empuxo Hidrostático	<i>Static Structural</i> [®]
Combinação 3	Peso próprio + Molas de fixação + Empuxo Hidrostático + Arrasto Hidráulico ⁽²⁾	<i>Static Structural</i> [®]
Combinação 4	Peso próprio + Molas de fixação + Empuxo Hidrostático + Arrasto Hidráulico + Campo de temperaturas ⁽³⁾	<i>Static Structural</i> [®] + <i>Steady-State Thermal</i> [®]

Fonte - Autor próprio.

3.2.2.1. Geometria real

A geometria real deste estudo foi definida como sendo a própria geometria do conceito nº1 do E.C., apresentado no Desenho 2.

3.2.2.2. Geometria do modelada

O modelo de análise foi baseado na geometria real mencionada no tópico 3.2.2.1. Neste modelo foram feitas simplificações, objetivando otimizar o número de elementos da malha. As simplificações serão mostradas nos tópicos 3.2.2.2.1, 3.2.2.2.2 e 3.2.2.2.3.

⁽²⁾Carregamento calculado no *CFX*[®] e passado para o *Static Structural*[®] como carga mecânica equivalente.

⁽³⁾Campo de temperaturas calculado no *CFX*[®], compilado para todo o E.C. no *Steady-State Thermal*[®] e definido como carregamento térmico no *Static Structural*[®].

3.2.2.2.1. Modelagem com simetria

O modelo de análise é formado por um quarto da estrutura da geometria real mencionada no tópico 3.2.2.1. Em outras palavras, foi definida uma condição de dupla simetria neste modelo, conforme ilustrado ao lado direito da figura 26. Foram configuradas molas virtuais, suprimindo a necessidade de se modelar uma mola em elementos finitos. Com isso, a Base A, a Cantoneira e as Presilhas foram suprimidas na geometria modelada, como maneira de simplificar o modelo e focar as análises principalmente nos conjuntos de placas combustíveis.

Figura 26 - Modelo Original e modelo de análise da estrutura do E.C.

Fonte - Autor próprio.

3.2.2.2.2. Molas virtuais

As duas molas virtuais definidas no modelo de análise estão localizadas nos pontos A e B exibidos na figura 27. As áreas de contato com as molas e o bocal superior são equivalentes à área formada entre o diâmetro externo e o interno das espiras da mola (209,5 mm²).

Figura 27 - Molas virtuais.

Fonte - Autor próprio.

3.2.2.2.3. Modelagem adaptada

Para facilitar a definição da malha de elementos finitos do modelo, a geometria de todas as placas combustíveis foi seccionada de maneira a serem constituídos corpos bem definidos, com geometria simples e sem descontinuidades, como mostrado na figura 28. Esta simplificação contribuiu para a melhor qualidade da malha de elementos finitos, como será visto no tópico 3.2.2.3.

Figura 28 - Modelagem das placas combustíveis.

Fonte - Autor próprio.

3.2.2.3. Malha de elementos finitos

A malha de elementos finitos baseada na geometria modelada contém 100.000 elementos ao total. Como mencionado no tópico 3.2.2.2.3, a correta modelagem da geometria de análise foi fundamental para a formação de uma malha de elementos finitos bem definida.

3.2.2.4. Inserção dos carregamentos nos sistemas de análise

Como mencionado no tópico 2.3, foram consideradas a presença de cinco carregamentos atuantes na estrutura do E.C. Placa. Analisar a sua influência no E.C. é fundamental para avaliar a integridade dos seus componentes e, conseqüentemente, comprovar que os critérios de projeto funcionais para os quais ele foi projetado são atendidos. Os métodos pelos quais estes carregamentos foram calculados são resumidos na tabela 12.

Tabela 12 - Carregamentos atuantes.

Carregamento	Valor (N)	Método de cálculo	Localização
Peso próprio	3412	<i>SolidWorks</i> ®	Tópicos 2.3.1 e 3.2.2.4.1
Molas de fixação	1012	Analítico	Tópicos 2.3.5 e 3.2.2.4.5
Empuxo Hidrostático	281	Analítico	Tópicos 2.3.2 e 3.2.2.4.2
Arrasto Hidráulico	353,5	<i>Ansys CFX</i> ®	Tópicos 2.3.3 e 3.2.2.4.3
Campo de temperaturas	-	<i>Ansys CFX</i> ®	Tópicos 2.3.4 e 3.2.2.4.4

Fonte - Autor próprio.

3.2.2.4.1. Peso próprio

O cálculo do peso próprio foi feito no software *SolidWorks*®, baseado na equação (1) descrita no tópico 2.3.1, logo após o término da fase de concepção tridimensional computacional e da seleção dos materiais da estrutura do E.C. Para tanto, esse software multiplicou o volume de todos os componentes pela respectiva densidade dos seus materiais constituintes, dando o valor de massa encontrado no Desenho 2. O peso total dessa estrutura tem o valor de 3412 N. O peso próprio foi configurado como atuante em toda geometria modelada, sendo inserido através do comando “*Standard Earth Gravity*” (aceleração da gravidade padrão da terra) no *Static Structural*®.

3.2.2.4.2. Empuxo Hidrostático

O cálculo do empuxo hidrostático foi feito com base na equação (2), descrita no tópico 2.3.2. Foi admitido que o fluido refrigerante tem um valor de densidade igual a $1000 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$, o volume total da estrutura do E.C. tem o valor de $0,028644 [m^3]$, e a aceleração da gravidade considerada tem o valor de $9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$. Sendo assim, o valor do carregamento do empuxo atuante na estrutura do E.C. é igual a 281 N.

O empuxo foi definido na geometria modelada, de maneira conservadora, como atuante em todas as faces internas do E.C., na forma de uma força de 70,25 N (correspondente a $\frac{1}{4}$ do modelo) atuante no sentido vertical ascendente. A configuração deste carregamento foi feita no *Static Structural*®.

3.2.2.4.3. Arrasto Hidráulico

Assim como no empuxo hidrostático, o arrasto hidráulico foi definido, de maneira conservadora, como sendo uma força atuante nas faces internas do E.C, no valor de 88,4 N (correspondente a $\frac{1}{4}$ do modelo) atuante também no sentido vertical ascendente. A configuração deste carregamento foi feita no *Static Structural*®. O valor deste carregamento foi apresentado no tópico 3.2.1.9.2.

3.2.2.4.4. Campo de temperaturas

As distribuições de temperatura em função da altura e da espessura de uma placa combustível, mostradas no tópico 3.2.1.9.1, foram inseridas em todas as placas combustíveis presentes na geometria modelada da análise termomecânica., no sistema de análise *Steady-State Thermal*®. Após isso, foi obtido um campo de temperaturas neste modelo de análise, como mostrado na figura 29. Posteriormente, este campo de temperaturas foi passado para o *Static Structural*®, para ser considerado na análise mecânica.

Figura 29 - Distribuição de temperaturas.

Fonte - Autor próprio.

3.2.2.4.5. Molas de fixação

As molas de fixação de um E.C. de um reator PWR são projetadas para suportar o peso próprio do E.C. somado aos carregamentos que atuam no sentido favorável ao choque entre o bocal superior e a estrutura interna superior de suporte dos E.C. no núcleo vaso de pressão, de acordo com as referências [7]. Estas molas também estão sujeitas a deslocamentos impostos, que são a compressão de montagem dos internos do vaso de pressão do reator e a expansão – ou dilatação - térmica vertical do E.C.

O primeiro deslocamento citado ocorre por conta da compressão que o interno superior do vaso de pressão (figura 30) exerce no núcleo, formado por todos os E.C. Tanto o núcleo quanto o interno superior estão montados em cima do interno inferior do vaso de pressão (figura 31). O segundo deslocamento ocorre no sentido ascendente, quando existe a expansão térmica máxima vertical da estrutura, no valor de 4,64 mm, como será visto no tópico 3.2.1.9.1.

Desta maneira, sendo o primeiro deslocamento para baixo e o segundo para cima, tem-se um total de 9,64 mm de compressão vertical atuante em uma mola de fixação. Este valor de deslocamento - ou compressão - será utilizado posteriormente para o cálculo da força atuante em cada mola de fixação.

Como visto no tópico 3.2.2.2.1, o software Ansys® permite que seja inserida uma condição de contato caracterizada como “*Spring*” (mola), por meio da qual é possível simular a ação de molas sem que seja necessária a modelagem destas no modelo de elementos finitos, o que contribui para a diminuição do esforço computacional. Para tanto, o dado de entrada requisitado pelo software é a rigidez da mola, que é calculada pela divisão entre os carregamentos aplicados e os deslocamentos impostos na mola, de acordo com a lei de Hooke, como descrita no tópico 2.3.5.

Figura 30 – Interno superior do VPR.

Fonte - Westinghouse™ [2].

Figura 31 – Interno Inferior do VPR.

Fonte - Westinghouse™ [2].

Foi considerado, na referência [7], que os carregamentos a serem considerados para o cálculo da rigidez de uma mola de um E.C. são o peso próprio, empuxo e arrasto hidráulico. Desta maneira, a somatória dos valores destes carregamentos, considerando-se um coeficiente de segurança igual a 2, é igual a 8095 N, sendo 1012 N para cada mola. A somatória dos deslocamentos provenientes do encaixe do interno superior e da expansão térmica é igual a 9,64 mm. Aplicando-se a equação (7), o valor calculado da rigidez para uma mola de fixação é igual a $105 \left[\frac{N}{mm} \right]$.

Como mostrado na figura 27, o carregamento proveniente das molas de fixação foi definido por meio de duas molas virtuais, que exercem o carregamento mencionado no tópico 2.3.5. Esta mola foi inserida através do comando de contato do tipo “*Spring*” (mola) no *Static Structural*®.

3.2.2.5. Contatos

Os contatos existentes entre as faces dos corpos da geometria modelada foram definidos como “*Bonded*”, com exceção do contato entre os cernes combustíveis e os seus revestimentos. Nestes, o contato foi definido como “*No Separation*”.

3.2.2.6. Restrições

A geometria modelada foi restrita de maneira a representar a condição real de restrição de um E.C. Como mostrado na figura 32, as seguintes condições foram impostas a essa geometria:

- Foi definida uma condição de restrição à movimentação vertical do E.C. em todos os nós dos elementos finitos presentes na face inferior do seu bocal inferior ($U(y)=0$).
- Nas faces de simetria da geometria modelada localizadas à esquerda da figura 32, foi definida uma condição de restrição com relação ao eixo horizontal Z ($U(z)=0$).
- Nas faces de simetria da geometria modelada localizadas à direita da figura 32, foi definida uma condição de restrição com relação ao eixo horizontal X ($U(x)=0$).

Figura 32 - Condições de restrição (U).

Fonte - Autor próprio.

3.2.2.7. Materiais

As propriedades dos materiais que constituem a geometria modelada do E.C. foram apresentadas no tópico 2.2. Os materiais que constituem os componentes do E.C. estão descritos no Desenho 2.

3.2.2.8. Ilustração dos carregamentos e seu sentido de atuação

De maneira resumida, na figura 33 são mostrados os valores dos carregamentos atuantes e o seu sentido com relação à estrutura do E.C., informações que foram configuradas nos sistemas de análise do Ansys®.

Figura 33 - Carregamentos impostos na estrutura do E.C.

Fonte - Autor próprio.

3.3. Verificação da malha de Elementos Finitos

Para a averiguação da qualidade das malhas de elementos finitos das geometrias modeladas nas análises mencionadas na tabela 8, foram feitas verificações por meio de dois parâmetros: número médio da assimetria dos elementos na malha (tópico 3.3.1) e convergência da malha de elementos finitos (tópico 3.3.2).

3.3.1. Número médio da assimetria dos elementos na malha

A primeira verificação tratou da análise da qualidade dos elementos presentes nas malhas de acordo com o critério de assimetria do *Ansys*® [30]. Esse critério consiste na avaliação da distorção dos elementos na malha em valores que variam de 0, para os elementos mais simétricos, até 1, para os

elementos mais distorcidos. Em uma malha composta por elementos com melhor qualidade são evitadas possíveis distorções nos resultados calculados.

Na tabela 13 são mostrados os valores médios de assimetria para as malhas selecionadas das análises realizadas ao longo deste trabalho. Em suma, os valores apresentados indicam a boa qualidade média dos elementos, o que leva ao entendimento de que os resultados obtidos foram pouco influenciados por possíveis distorções na malha de elementos finitos.

Tabela 13 - Valor médio da assimetria dos elementos da malha.

Geometria modelada	Tópico	Valor médio de assimetria dos elementos
Estudo termo-hidráulico	3.1.1	1,47E-04
Estudo termomecânico	3.1.2	1,31E-10
Análise termo-hidráulica	3.2.1	1,31E-10
Análise termomecânica	3.2.2	3,60E-02

Fonte - Autor próprio.

3.3.2. Estudo de convergência da malha de elementos finitos

A segunda verificação foi baseada na análise de refinamento da malha de elementos finitos, conforme comentado na referência [37]. Esta verificação consiste na observação dos valores de uma variável em, no mínimo, três diferentes configurações de refinamento de malha para o mesmo modelo de análise. O objetivo desta verificação foi saber se o refinamento das malhas utilizadas interferia nos resultados obtidos.

3.3.2.1. Estudo termo-hidráulico

Para o estudo de referência termo-hidráulico, que foi comentado no tópico 3.1.1, foi analisada a variável “Temperatura máxima de saída do fluido refrigerante” em cinco diferentes tipos de malha, conforme mostrado na tabela 14. A malha escolhida para a análise foi a que contém 1.400.000 elementos.

Tabela 14 - Estudo de malha – Estudo termo-hidráulico.

Número de elementos	Temperatura de saída do fluido refrigerante [°C]	Temperatura máxima entre todos os volumes [°C]	Tempo de processamento
1.200.000	55,6	57,8	51m 18s
1.400.000	55,6	57,8	50m 11s
1.600.000	55,6	57,8	51m 45s
1.800.000	55,6	57,8	50m 47s
2.200.000	55,6	57,8	50m 55s

Fonte - Autor próprio.

3.3.2.2. Estudo termomecânico

Para o estudo de referência termomecânico, que foi comentado no tópico 3.1.2, foi analisada a variável “*Stress Intensity (Intensidade de Tensão)*” em cinco diferentes tipos de malha, conforme mostrado na tabela 15. A malha selecionada para esta análise foi a que contém 150.000 elementos.

Tabela 15 - Estudo de malha – Estudo termomecânico

Número de elementos	Temperatura máxima na geometria modelada [°C]	Stress Intensity Máximo no centro da geometria modelada [MPa]
50.000	79,85	107,0
100.000	79,84	107,3
150.000	79,85	107,1
200.000	79,85	107,0
250.000	79,85	106,9

Fonte - Autor próprio.

3.3.2.3. Análise termo-hidráulica

Para a análise termo-hidráulica, que foi comentada no tópico 3.2.1, foi analisada a variável “Temperatura máxima de saída do fluido refrigerante” em cinco diferentes tipos de malha, conforme mostrado na tabela 16. Para esta análise, a malha selecionada foi a que contém 900.000 elementos.

Tabela 16 - Estudo de malha – Análise termo-hidráulica.

Número de elementos	Temperatura máxima de saída do fluido refrigerante (°C)	Tempo de processamento
500.000	288,2	7 min 49 s
700.000	287,4	10 min 19 s
900.000	287,3	12 min 14 s
1.200.000	287,1	15 min 53 s
1.400.000	287,0	18 min 31 s

Fonte - Autor próprio.

3.3.2.4. Análise termomecânica

Para a análise termomecânica, que foi comentada no tópico 3.2.2, foi analisada a variável “*Intensidade de Tensão (Stress Intensity)* máxima na linha central da placa n°1” em cinco diferentes tipos de malha, conforme mostrado na tabela 17. A malha selecionada para esta análise é a que contém 100.000 elementos.

Tabela 17 - Estudo de malha – Análise termomecânica.

Número de elementos	Placa 1 – Stress Intensity máximo (MPa)	Tempo de processamento
215.000	20,79	67 min
130.000	20,75	40 min
100.000	20,80	28 min
85.000	20,79	3 min
70.000	20,79	2 min 20 s

Fonte - Autor próprio.

3.3.2.5. Comentários sobre o estudo de convergência

As diferenças nos valores das variáveis observadas não se mostraram significativas, sendo possível afirmar que todas as configurações de malha destacadas poderiam ser utilizadas para o prosseguimento dos cálculos sem distorções significativas nos resultados nesta localização. Porém, distorções poderiam ser observadas em locais próximos às descontinuidades geométricas e, para que os resultados colhidos não ficassem distorcidos, malhas intermediárias foram tomadas, balanceando-se a relação entre a distribuição dos elementos finitos nestas e o tempo de processamento.

4. Resultados das análises do E.C. Placa

Serão mostrados neste capítulo os resultados das análises em função da intensidade de tensão - *Stress Intensity (S.I.)* -, como pressupõe a norma *ASME® III, divisão 1, subseção NB* [12] e, também, os deslocamentos resultantes nos componentes analisados da estrutura do E.C. Placa.

4.1. Intensidade de tensão (*Stress Intensity*)

O *Stress Intensity* é calculado como sendo o dobro da tensão cisalhante calculada pelo critério de Tresca, como mostrado na equação (15), estando os símbolos e definições associados a esta equação mostrados na tabela 18. Este critério define que o escoamento ocorre quando a máxima tensão de cisalhamento atinge o escoamento, tanto para casos uniaxiais quanto para casos multiaxiais, como mostrado no ciclo de Mohr da figura 34 [23] [30].

$$S.I. = 2 \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \quad (15)$$

Figura 34 - Círculo de Mohr.

Fonte – Ansys Help Viewer [30].

Tabela 18 - Símbolos e definições.

Símbolo	Definição
σ_1	Tensão principal máxima
σ_2	Tensão principal intermediária
σ_3	Tensão principal mínima
τ	Tensão de cisalhamento
$\tau_{máx}$	Tensão de cisalhamento máxima

Fonte - Autor próprio.

Os valores mostrados na tabela 19 e na figura 35 referem-se ao S.I. máximo em todos os componentes considerados nas análises executadas. Estes componentes foram analisados nas quatro combinações de carregamento comentadas no decorrer do tópico 3.2.2.

Tabela 19 – Stress Intensity (MPa).

Combinações de carregamentos	Base B	Placa A	Placa B	Placa C	Placa D	Revestimento	Bocal Inferior
Ponto de partida	0,016	1,281	0,796	1,441	0,912	0,778	0,646
1	10,719	9,821	7,756	3,331	1,970	1,800	1,426
2	10,719	9,822	7,756	3,222	1,900	1,740	1,374
3	10,720	8,982	7,756	3,083	1,812	1,664	1,308
4	25,788	94,232	87,696	92,742	52,286	151,15	12,161

Fonte – Autor próprio.

Figura 35 – Stress Intensity (MPa).

Fonte – Autor próprio.

Nas figuras 36 a 42 serão apresentados os resultados gráficos de *Stress Intensity* e deslocamento obtidos no Ansys®, respectivamente para o *Bocal Superior*, *Placa A*, *Placa B*, *Placa C*, *Placa D*, *Revestimento da Placa Combustível n°18* (a mais solicitada) e *Bocal Inferior*. Ao lado esquerdo destas figuras é apresentada a localização do componente analisado; ao lado direito superior, é apresentada a distribuição da intensidade de tensão (S.I.) nos componentes; ao lado direito inferior, é apresentado o deslocamento dos componentes analisados.

Figura 36– Boca Superior.

Fonte – Autor Próprio.

Figura 37 –Placa A.

Fonte – Autor Próprio.

Figura 38 – Placa B.

Fonte – Autor Próprio.

Figura 39 – Placa C.

Fonte – Autor Próprio.

Figura 40 – Placa D.

Fonte – Autor Próprio.

Figura 41 – Revestimento da Placa Combustível n° 18.

Fonte – Autor Próprio.

Figura 42 – Bocal Inferior.

Fonte – Autor Próprio.

4.2. Deslocamentos resultantes

De maneira geral, os valores resultantes máximos de deslocamento para o E.C. completo, via método numérico, foram os seguintes ⁽⁴⁾:

- Direção do eixo X: 0,000367 m (0,367 mm)
- Direção do eixo Y: 0,00463 m (4,63 mm)
- Direção do eixo Z: 0,00048 m (0,48 mm)

Para o eixo X, os componentes com maior valor de deslocamento foram a *Base B* e a *Placa A*, com 0,000367m (0,367mm); para o eixo Y, foi a *Base B*, com 0,00463m (4,63mm) e; para o eixo Z, foi a *Placa A*, com 0,00048 m (0,48 mm).

Os valores dos deslocamentos dos componentes são mostrados nas tabelas 20, 21 e 22, respectivamente condizentes aos eixos cartesianos X, Y e Z ⁽⁵⁾. Para melhorar a visualização dos resultados mencionados, foram plotados gráficos nas figuras 43, 44 e 45, respectivamente correspondentes aos eixos X, Y e Z.

Tabela 20 - Deslocamentos no eixo X (m).

Combinações de carregamentos	Base B	Placa A	Placa B	Placa C	Placa D	Revestimento	Bocal Inferior
Ponto de partida	1,19E-08	2,34E-07	2,27E-07	2,10E-07	3,97E-08	2,20E-07	1,80E-07
1	2,81E-06	8,08E-07	4,15E-06	2,27E-06	2,11E-06	1,41E-06	3,96E-07
2	2,81E-06	8,08E-07	4,16E-06	2,27E-06	2,11E-06	1,42E-06	3,81E-07
3	2,82E-06	8,07E-07	4,16E-06	2,27E-06	2,11E-06	1,42E-06	3,63E-07
4	3,67E-04	3,67E-04	3,61E-04	3,37E-04	3,48E-05	1,15E-04	3,50E-04

Fonte – Autor próprio.

⁽⁴⁾ O eixo cartesiano de referência para os resultados de deslocamento obtidos é o mesmo que foi admitido para as figuras 36 a 42.

⁽⁵⁾ Ao invés de serem exibidos todos os valores de deslocamento dos revestimentos de todas as placas combustíveis, foi tomado apenas o do revestimento da placa combustível mais solicitada.

Tabela 21 - Deslocamentos no eixo Y (m).

Combinações de carregamentos	Base B	Placa A	Placa B	Placa C	Placa D	Revestimento	Bocal Inferior
Ponto de partida	-1,43E-06	-5,28E-08	-4,59E-08	-3,85E-08	-2,36E-08	-4,85E-07	2,05E-08
1	-3,03E-06	-1,18E-07	-1,04E-07	-8,70E-08	-5,26E-08	-1,10E-06	4,63E-08
2	-2,91E-06	-1,13E-07	-1,00E-07	-8,38E-08	-5,06E-08	-1,06E-06	4,46E-08
3	-2,76E-06	-1,08E-07	-9,51E-08	-7,99E-08	-4,80E-08	-1,01E-06	4,24E-08
4	4,60E-03	4,54E-03	4,53E-03	4,54E-03	4,54E-03	4,34E-03	6,46E-05

Fonte – Autor próprio.

Tabela 22 - Deslocamentos no eixo Z (m).

Combinações de carregamentos	Base B	Placa A	Placa B	Placa C	Placa D	Revestimento	Bocal Inferior
Ponto de partida	2,90E-09	4,04E-07	1,54E-07	6,69E-08	1,41E-07	1,95E-07	1,86E-07
1	2,90E-06	4,41E-06	8,57E-07	2,33E-06	2,46E-06	6,90E-07	4,15E-07
2	2,90E-06	4,40E-06	8,57E-07	2,33E-06	2,46E-06	6,89E-07	4,00E-07
3	2,90E-06	4,40E-06	8,58E-07	2,33E-06	2,46E-06	6,88E-07	3,81E-07
4	4,54E-04	4,80E-04	3,64E-04	1,41E-04	4,58E-04	4,72E-04	3,51E-04

Fonte – Autor próprio.

Figura 43 - Deslocamentos no eixo X (m).

Fonte – Autor próprio.

Figura 44 - Deslocamentos no eixo Y (m).

Fonte – Autor próprio.

Figura 45 – Deslocamentos no eixo Z (m).

Fonte – Autor próprio.

5. Análise e discussão dos resultados

Neste capítulo os valores de intensidade de tensão (*S.I.*) mostrados no capítulo 4 serão comparados com os valores dos limites admissíveis, que serão mostrados na tabela 23.

5.1. Limites admissíveis

De acordo com o procedimento da seção de projeto por análise da norma *ASME® III, divisão 1, subseção NB* [12], os limites admissíveis dos materiais são comparados com os valores de *S.I.* resultantes das análises executadas, e são encontrados na norma *ASME II, Part. D* [38]. Os valores dos limites admissíveis para os materiais que formam os componentes do E.C. Placa desenvolvido neste trabalho, porém, não constam nesta norma. Desta maneira, os limites admissíveis encontrados na tabela 23 foram baseados nos limites de escoamento dos materiais comentados no tópico 2.2, obtidos por referências externas à *ASME®*, e foram correlacionados, de maneira conservadora, com os seus limites da seguinte maneira ⁽⁶⁾:

- Limite S_m : considerado como equivalente a $\frac{2}{3}$ da tensão de escoamento do material.
- Limite de $1,5 S_m$: considerado como equivalente à tensão de escoamento do material.
- Limite de $3 S_m$: considerado como equivalente a duas vezes a tensão de escoamento do material.

De acordo com a *ASME® III, divisão 1, subseção NB* [12], o atendimento aos limites S_m e $1,5 S_m$ garantem que um componente não sofrerá colapso plástico, e o atendimento ao limite de $3 S_m$ garante que um componente não sofrerá deformação excessiva. Em outras palavras, o não atendimento a estes limites indica que o projeto de um componente necessita de alteração. O *colapso plástico* é a falha de um componente quando as tensões resultantes neste

⁽⁶⁾ As propriedades dos materiais foram obtidas na faixa de temperaturas próxima à do reator em sua condição de operação normal (275°C).

superam o valor do seu limite de resistência. A deformação excessiva ocorre quando a ciclagem das tensões no regime plástico leva o material a acumular deformação plástica e, quando o limite de deformação deste material é ultrapassado, ocorre a falha.

Será assumido que as combinações de carregamento n°1, 2 e 3 estarão sujeitas aos limites de S_m até $1,5 S_m$, pois nessas condições é assumida a predominância dos carregamentos que resultam em colapso plástico; e será assumido que a combinação de carregamentos n°4 estará sujeita ao limite de até $3 S_m$, pois nesta condição é assumida a predominância dos carregamentos que resultam em deformação excessiva.

Tabela 23 – Limites admissíveis.

Componentes	Materiais	S_m (MPa)	$1,5 S_m$ (MPa)	$3S_m$ (MPa)
Base B	Zircaloy-4 (ASTM B351)	70	105	210
Placa A	Zircaloy-4 (ASTM B352)	66,7	100	200
Placa B	Zircaloy-4 (ASTM B352)	66,7	100	200
Placa C	Zircaloy-4 (ASTM B352)	66,7	100	200
Placa D	Zircaloy-4 (ASTM B352)	66,7	100	200
Revestimento	Zircaloy-4 (ASTM B352)	66,7	100	200
Bocal Inferior	Zircaloy-4 (ASTM B351)	70	105	210

Fonte - Autor próprio.

5.2. Avaliação estrutural do E.C. Placa

Na primeira combinação de carregamentos foi observado, com relação ao *Ponto de Partida*, um aumento nos valores do *S.I.* em todos os componentes analisados, devido a aplicação da força de 525 N por cada mola de fixação, que é somada à influência do peso próprio.

Na segunda combinação de carregamentos não foram observadas diferenças significativas nos valores do *S.I.* com relação à primeira combinação,

pelo fato de o carregamento do empuxo hidrostático impor ao E.C. um valor de carregamento muito menor do que o carregamento proveniente das molas de fixação.

Na terceira combinação de carregamentos, assim como na segunda, também não foram observadas alterações significativas nos valores do *S.I.* no E.C., já que o valor do arrasto hidráulico, do mesmo modo como ocorre com o empuxo hidrostático, não possui um valor significativo em comparação com o carregamento imposto pelas molas de fixação e pelo peso próprio do E.C., atuantes no sentido contrário.

Na quarta combinação de carregamentos foi observado um aumento significativo nos valores de tensão para todos os componentes, por conta da restrição à expansão térmica do E.C. na situação em que existe a influência do campo de temperaturas, que corresponde ao evento de operação à plena potência do reator. De maneira geral, o aumento significativo nos valores de *S.I.* exibidos nesta combinação deixou evidente a influência do campo de temperaturas em todos os componentes do E.C., sobretudo nos revestimentos das placas combustíveis.

Pela comparação entre os valores apresentados na tabela 19 e na tabela 23, respectivamente correspondentes aos valores máximos de *S.I.* e aos valores dos limites admissíveis, foi possível verificar que o E.C. não sofre falhas devido ao colapso plástico e à deformação excessiva. Os valores resultantes de *S.I.* provenientes das combinações de carregamentos nº1, 2 e 3 permaneceram longe até mesmo do limite S_m dos materiais, que é o limite mais conservador adotado para estas três combinações. Os valores resultantes de *S.I.* provenientes da combinação de carregamentos nº4 também se mostraram menores do que o limite admissível de $3 S_m$ dos materiais. Dentre todos os componentes, em todas as combinações de carregamento, o revestimento da placa combustível nº18 apresentou o maior valor de tensão resultante: 151,15 MPa. De maneira geral, não foram observados problemas estruturais no E.C. quando exposto ao evento de operação à plena potência, pertencente à condição normal de operação de um reator PWR compacto.

Apesar de os valores indicados na tabela 19 destacarem que os componentes analisados atendem aos limites admissíveis respectivos dos materiais, a hipótese de se utilizar estes valores como sendo representativos das tensões máximas em todas as regiões dos componentes é conservadora. A norma *ASME® III, divisão 1, subseção NB* [12] recomenda que deve ser feita uma análise de linearização nestes componentes. Neste trabalho, porém, não foi feita uma análise por linearização, por ser necessário um aprofundamento mais intenso na utilização da norma citada anteriormente, sendo essa uma sugestão de continuação deste trabalho.

De acordo com os resultados apresentados na tabela 20, não houve diferença significativa nos valores resultantes de deslocamento no eixo cartesiano X para as condições de carregamento nº1, 2 e 3. Na combinação de carregamentos nº4 houve um aumento em relação às combinações anteriores, mas ainda assim sem influência significativa.

Foram observados com relação ao eixo cartesiano Y (tabela 21), para as combinações de carregamento nº1, 2 e 3, valores negativos de deslocamento nos componentes, com exceção do bocal inferior. Estes valores indicam que houve compressão nos componentes por conta da influência do carregamento imposto pelas molas de fixação. Na combinação de carregamentos nº4 foram observados valores positivos de deslocamento, mais significativos, indicando o efeito da expansão vertical destes componentes.

Os resultados de deslocamento observados com relação ao eixo Z, exibidos na tabela 22, mostraram valores semelhantes nas combinações de carregamento nº1, 2 e 3. Para a combinação de carregamentos nº4, foi observado um aumento significativo nos valores de deslocamento para o eixo citado, seguindo a mesma tendência observada com relação aos outros eixos analisados.

Foi observado que o valor da expansão vertical do E.C. não é maior do que o espaço de 15 mm considerado entre o seu Bocal Superior e o interno superior do VPN. Da mesma maneira, foi observado que os valores dos

deslocamentos resultantes horizontais, correspondentes aos eixos X e Z, atenderam ao limite de 1 mm de distância considerado entre os E.C., o que equivale a dizer que um E.C. não entra em contato lateral com outro E.C. no núcleo do reator. Estes critérios foram apresentados no tópico 3.2.1.9.1.

Por último, foi observado que o limite de deslocamento horizontal das placas combustíveis também foi atendido, como comentado no tópico 3.2.1.9.1. Não foram observados valores de deslocamento que poderiam restringir a passagem do fluido refrigerante em 30% ou mais com relação à espessura original do canal de refrigeração.

6. Conclusões

6.1. Comentários

O desenvolvimento da metodologia proposta foi possível, sobretudo, pelo atendimento aos objetivos gerais e específicos determinados no início desta dissertação, especificamente no tópico 1.3. Em primeiro lugar, um projeto mecânico computacional de um E.C. Placa foi desenvolvido no software SolidWorks® e serviu, posteriormente, como base para o desenvolvimento da geometria modelada para a análise estrutural no software Ansys®. Este projeto mecânico computacional teve como base o conceito de E.C. do tipo placa apresentado por Andrzejewski [6], o E.C. do tipo placa do reator Shippingport descrito por Kaufmann [4] e os critérios de projeto funcionais que constam na norma ANSI/ANS-57.5-1996 [9], todos citados no capítulo 2 da presente dissertação.

Em seguida, foi necessária a realização de estudos de verificação dos sistemas de análise do software Ansys® que foram empregados na análise estrutural do E.C. Placa. Esta necessidade surgiu devido à falta de estudos com relação a estrutura desenvolvida, e devido à importância de se configurar adequadamente os sistemas de análise utilizados. Por meio dos dois estudos reproduzidos, sendo um termo-hidráulico e um termomecânico (apresentados nos tópicos 3.2.1 e 3.1.2), foi verificada a utilização dos sistemas de análise CFX®, *Steady-State Thermal*® e *Static Structural*®.

Posteriormente, foram calculados todos os carregamentos atuantes no E.C. separadamente, como mostrado no decorrer do capítulo 3. Em seguida, foram definidas as combinações destes carregamentos de acordo com a ordem considerada discutida no decorrer do tópico 3.1.2. Na sequência, essas combinações dos carregamentos foram definidas nos ambientes dos sistemas de análise conforme exibido na tabela 11, pertencente ao tópico citado. Nestes sistemas de análise também foram definidas as configurações da malha de elementos finitos, condições de contorno, contatos e restrições, e as

propriedades dos materiais. As análises foram posteriormente realizadas e foram obtidos resultados na forma de intensidade de tensão (*S.I.*) e deslocamentos, como apresentado no capítulo 4.

A avaliação da estrutura foi feita através da comparação entre os valores dos limites admissíveis definidos com base na norma *ASME® III, divisão 1, subseção NB*, apresentados na tabela 23, com os valores de intensidade de tensão (*S.I.*) apresentados na tabela 19, resultantes das análises computacionais. De maneira conservadora, como mencionado no capítulo 5, foi possível notar que os valores máximos de *S.I.* nos componentes são menores do que os seus respectivos limites admissíveis, o que permite dizer que, para os carregamentos analisados, os componentes do E.C. placa foram adequadamente dimensionados.

6.2. Conclusões

Considerando o exposto acima, conclui-se que:

1. A metodologia desenvolvida permite o dimensionamento mecânico e a avaliação estrutural do E.C. do tipo placa considerando os principais carregamentos provenientes do evento de operação à plena potência (da condição normal de operação) de um reator PWR compacto.
2. Do ponto de vista mecânico e estrutural, o E.C. do tipo placa desenvolvido neste trabalho pode ser uma alternativa interessante em reatores compactos do tipo PWR, considerando que ele está adequadamente verificado para a condição de operação à plena potência.
3. O presente trabalho possibilita que outras configurações de E.C. do tipo placa possam ser analisadas por meio dos princípios abordados na metodologia desenvolvida e documentada nesta dissertação, mesmo que disponham de outras dimensões e materiais.

6.3. Trabalhos futuros

O presente trabalho abordou uma situação específica de condição de operação à plena potência de um reator PWR compacto, sendo este o passo inicial em um possível leque de outros trabalhos que podem vir a ser desenvolvidos com o objetivo de enriquecer a temática abordada.

Como continuação direta do presente trabalho propõe-se uma avaliação estrutural do E.C. do tipo placa projetado para outras condições operacionais como a de carregamentos de frequência moderada (por exemplo, o terremoto básico de operação), e a de eventos com pouca frequência (por exemplo, o LOCA (*Loss of Coolant Accident*), como consta na referência [9], e o terremoto de desligamento seguro). Além destes eventos, podem ser exploradas a aceleração provocada pela movimentação de uma embarcação e a aceleração resultante da explosão submarina, comentadas no capítulo 2 do presente trabalho.

7. Referências

1. HUBBERT, M. K. **Nuclear energy and the fossil fuels**. Houston, Texas: American Petroleum Institute, 1956.
2. WESTINGHOUSE™. **The Westinghouse pressurized water reactor nuclear power plant**. Pittsburgh: Westinhouse Electric Corporation - Water Reactor Divisions, 1984.
3. MARINE Nuclear Propulsion. **Academia.Edu**. Disponível em: <https://www.academia.edu/6270766/Marine_Nuclear_Propulsion>. Acesso em: 24 Fevereiro 2018.
4. KAUFMANN, ALBERT R. **Nuclear Reactor Fuel Elements**. New York-London: John Wiley and Sons, Inc., 1962.
5. PERROTTA, J. A. **Curso de introdução à engenharia do núcleo de reatores**. [S.l.]: [s.n.], 1999.
6. ANDRZEJEWSKI, C. D. S. **Avaliação de alternativas de combustível tipo placa para reatores de pequeno porte**. São Paulo: IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2005.
7. MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, L. **Mitsubishi Fuel Design Criteria and Methodology**. [S.l.]: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 2009.
8. SILVA, J. E. R. D. **Comparação do desempenho do dióxido de urânio sinterizado sob forma plana e cilíndrica para reatores à água pressurizada**. São Paulo: Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, 1989.
9. ANSI/ANS-57.5-1996. **Light water reactors fuel assembly mechanical design and evaluation**. Illinois: American Nuclear Society, 1996.

10. S. B.; , G. M.; BOURDONNEC, L. L. **Validation of structural design of JHR fuel element**. France: [s.n.], 2009.
11. A., E. E.; E., M. M.; , G. R. **Diseño del elemento combustible para el reactor RRR (Australia)**. Bariloche - Argentina.
12. ASME. **Asme Boiler and Pressure Vessel Code - Section III**. Nova York: The American Society of Mechanical Engineers, 2015.
13. INTERNATIONAL, A. **ASTM B351/B351M - Standard Specification for Hot-Rolled and Cold-Finished Zirconium and Zirconium Alloy Bars, Rod and Wire for Nuclear Application**. West Conshohocken, PA. 2017.
14. INERNATIONAL, A. **ASTM B352/B352M - Standard Specification for Zirconium and Zirconium Alloy Sheet, Strip and Plate for Nuclear Application**. West Conshohocken, PA. 2017.
15. NORTHWEST, P. **PNNL Stress/Strain Correlation for Zircaloy**. Springfield: U.S. Departament of Energy, 2008.
16. LABORATORY, I. N. E. **SCDAP/RELAP5/MOD3.1 Code Manual Volume IV: MATPRO -- A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis**. Idaho: Idaho National Engineering Laboratory, 1993.
17. LABORATORY, I. N. **Thermophysical Properties of U-10Mo Alloy**. Idaho: Idaho National Laboratory, 2010.
18. INTERNATIONAL, A. **ASM Ready Reference: Thermal Properties of Metals**. Ohio: ASM International®, Cap. 2.
19. KLEIN, S. A. **Engineering Equation Solver**. Suwon Kyung-Do: F-Chart Software, 1992-2003.
20. GOUVEIA, R. **Força Peso. Toda Matéria**, 29 dez. 2018. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/forca-peso/>>.

21. BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos - 2ª edição**. São Paulo: Pearson Education Brasil, 2009.
22. ÇENGEL, A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa**. São Paulo: AMGH EDITORA LTDA/ McGRAW HILL, v. 4, 2012.
23. NORTON, R. L. **Projeto de máquinas - Uma abordagem integrada**. Porto Alegre: Bookman, 2013.
24. ENGINEERING SIMULATION AND SCIENTIFIC SOFTWARE. O método dos elementos finitos. **ESSS**, 22 Janeiro 2016. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em: 13 Maio 2019.
25. RAO, S. S. **The Finite Element Method in Engineering**. Chennai: Elsevier, 2011.
26. ENGINEERING SIMULATION AND SCIENTIFIC SOFTWARE. O método de volumes finitos. **ESSS**, 2 Janeiro 2017. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/o-metodo-de-volumes-finitos>>. Acesso em: 13 Maio 2019.
27. 18.2, A. H. V. **The k-epsilon Model in ANSYS CFX**. [S.l.]: SAS IP, Inc., 2017.
28. KESSLER, M. Escoamento Turbulento, 18 Outubro 2016. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/escoamento-turbulento/>>.
29. GABBI, R. **Modelagem Matemática do Escoamento Turbulento em Canal Axissimétrico com "Bluff-Body" (Dissertação de Mestrado)**. Ijuí: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2013.
30. SAP IP, I. **ANSYS® Help Viewer**. [S.l.]: SAP IP, Inc, 2017.
31. FILHO, A. A. **Elementos Finitos - A base da tecnologia CAE**. São Paulo: ÉRICA, 2002.

32. DAESEONG JO, O. S. A.-Y. R. M. A. J. P. A. H. C. Experimental Investigation of Convective Heat Transfer in a Narrow Rectangular Channel for Upward and Downward Flows. **Nuclear Engineering and Technology**, 46, Abril 2014.
33. DAXIN GONG, S. H. G. W. A. K. W. Heat Transfer Calculation on Plate-Type Fuel Assembly of High Flux Research Reactor. **Science and Technology of Nuclear Installations**, Abril 2015.
34. SMITH, C. O. Thermal Stresses in Clad Fuel Plates. **Nuclear Science and Engineering**, v. 2, p. 213-218, 1956.
35. WHITE, F. M. **Fluid Mechanics**. Nova York: McGraw-Hill, 2008.
36. JOHANSSON, E. B. **Hydraulic instability of reactorparallel-plate fuel assemblies**. [S.I.]. 1959.
37. KWASNIEWSKI, L. **Application of grid convergence index in FE computation**. Warszawa: Bulletin of the polish academy of sciences, v. 61, 2013. 123-128 p.
38. ASME. **Properties (Metric) - Materials**. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2007.
39. INTERNATIONAL, A. W. **Technical Datasheet AWS 013 Ver.1**. [S.I.]: [s.n.].
40. BSI. **Cylindrical helical springs made from round wire and bar - Calculation and design**. Brussels: Comité Européen de Normalisation - CEN, 2013.
41. BOCCHESI, C. **Solidworks - Projeto e Desenvolvimento**. [S.I.]: Érica, 2008.
42. SENAI, S. N. D. A. I.-. **Desenho técnico mecânico**. São Paulo: SENAI-SP, 2010.

43. DE OLIVEIRA, A.; NETO, M. M. **Flow velocity calculation to avoid instability in a typical research reactor core**. International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011. Belo Horizonte, MG, Brasil.: [s.n.]. 2011.
44. SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. Porto Alegre: Bookman, 2008.
45. CORPORATION, S. P.; COPELAND, R. A.; DESTEESE, R. J. **Generic Mechanical Design Criteria for PWR Fuel Designs [EMF-92-116(NP) (A) - Revision 0]**. [S.l.]. 1999.
46. ALBUQUERQUE, L. B. D. **Categorização de tensões em modelos de elementos finitos de conexões bocal-vaso de pressão**. São Paulo: Instituto de pesquisas energéticas e nucleares - IPEN/USP, 1999.
47. GOUVEIA, R. Dilatação Térmica, 04 jul. 2018. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/dilatacao-termica/>>. Acesso em: 2018.
48. FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRICHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Sexta edição. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
49. WHITMARSH, C. L. **Review of Zircaloy-2 and Zircaloy-4 properties relevant to N.S. Savannah reactor design**. Washington: Oak Ridge National Laboratory, 1962.
50. SCOTT, D. B. **Physical and mechanical properties of Zircaloy-2 and 4**. Pittsburgh: Westinghouse Electric Corporation - Atomic Power Division, 1965.
51. SYSTEMES, D. **Introdução ao SolidWorks**. Massachusetts: Dassault Systemes, 1995-2016.
52. DIVISIONS, W. E. C.-W. R. **The Westinghouse Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plant**. Pittsburgh: WestingHouse Nuclear Operations Division, 1984.

53. WESTINGHOUSE™. **The Westinghouse pressurized water reactor nuclear power plant.** Pittsburgh: Westinhouse Electric Corporation - Water Reactor Divisions, 1984.

Apêndice A

Desenhos técnicos de referência

Item	Página
Desenho 1	109
Desenho 2	110
Desenho 3	111
Desenho 4	112
Desenho 5	113
Desenho 6	114
Desenho 7	115
Desenho 8	116
Desenho 9	117
Desenho 10	118
Desenho 11	119
Desenho 12	120
Desenho 13	121
Desenho 14	122
Desenho 15	123
Desenho 16	124
Desenho 17	125
Desenho 18	126

Vista isométrica

Vista isométrica explodida

Projeto

Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto

Observações:

1 Por questão de sigilo de informação, as medidas apresentadas neste trabalho são limitadas e aproximadas.

2 Todas as medidas estão em milímetros.

Desenho 1

Vista Isométrica

Material Classificado	Quantidade Classificado	Folha 1 de 1	Tipo A4
Componente E.C. Placa (Conceito nº2)			
Massa 358 Kg (3512 N)	Escala 1:10	Data 15/04/2019	

Vista isométrica

Vista isométrica explodida

Proieto

Avaliação estrutural de um elemento combustivel do tipo placa para um reator nuclear compacto

Observações:

1 Por questão de *sigilo de informação*, as medidas apresentadas neste trabalho são limitadas e aproximadas.

2 Todas as medidas estão em milímetros.

Desenho 2

Vista Isométrica

Nº da peça	Nome da peça	Material	Quantidade
1	Bocal Inferior	ASTM B351 (Zircaloy-4)	1
2	Placa A	ASTM B352 (Zircaloy-4)	4
3	Placa B	ASTM B352 (Zircaloy-4)	4
4	Placa C	ASTM B352 (Zircaloy-4)	4
5	Placa D	ASTM B352 (Zircaloy-4)	4
6	Revestimento	ASTM B352 (Zircaloy-4)	72
7	Cerne	10U-Mo	72
8	Base B	ASTM B351 (Zircaloy-4)	1
9	Cantoneira	ASTM B351 (Zircaloy-4)	4
10	Base A	ASTM B351 (Zircaloy-4)	1
11	Pino de suporte	ASTM B351 (Zircaloy-4)	8
12	Mola de fixação	ASTM B637 (INCONEL 718)	8
13	Presilha	ASTM B351 (Zircaloy-4)	8

Material	Quantidade	Folha	Tipo
Vide tabela	Vide tabela	1 de 1	A4

Componente

E.C. Placa - Vista Explodida

Massa	Escala	Data
347,8 Kg (3412 N)	1:12	15/04/2019

110

Projeto
Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto

Observações:

- 1 Por questão de sigilo de informação, as medidas apresentadas neste trabalho são limitadas e aproximadas.
- 2 Todas as medidas estão em milímetros.

Desenho 3

Vista Isométrica

Material ZIRCALOY-4 (ASTM B351)	Quantidade 1	Folha 1 de 1	Tipo A4
Componente BASE A - BOCAL SUPERIOR			
Massa 1,32 Kg (12,95 N)	Escala 1:5	Data 15/04/2019

DETALHE A
ESCALA 1 : 1

DETALHE B
ESCALA 1 : 1

Projeto

Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto

Observações:

1 Por questão de sigilo de informação, as medidas apresentadas neste trabalho são limitadas e aproximadas.

2 Todas as medidas estão em milímetros.

Desenho 4

Vista Isométrica

Material ZIRCALOY-4 (ASTM B351)	Quantidade 1	Folha 1 de 1	Tipo A4
Componente BASE B - BOCAL SUPERIOR			
Massa 2,37 Kg (23,25 N)	Escala 1:4	Data 15/04/2019	

112

Diâmetro do fio (mm)	
(Df)	4,5
Diâmetro da espira (mm)	
Interno (Di)	15,75
Médio (Dm)	18
Externo (De)	20,25
Passo (mm)	
10	
Espiras Ativas	
8	

Projeto

Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto

Observações:

1 Por questão de sigilo de informação, as medidas apresentadas neste trabalho são limitadas e aproximadas.

2 Todas as medidas estão em milímetros.

Desenho 5

Vista Isométrica

Material INCONEL 718 (ASTM B637)	Quantidade 8	Folha 1 de 1	Tipo A4
Componente MOLA DE FIXAÇÃO			
Massa 0,08 Kg (0,78 N)	Escala 1:2	Data 15/04/2019

Projeto

Avaliação mecânica da estrutura de um elemento combustível
Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para
um reator nuclear compacto

Substituição

1 Por questão de sigilo de informação, as medidas
apresentadas neste trabalho são limitadas e aproximadas.

2 Todas as medidas estão em milímetros.

Desenho 6

Vista Isométrica

Material ZIRCALOY-4 (ASTM B351)	Quantidade 8	Folha 1 de 1	Tipo A4
---------------------------------------	-----------------	-----------------	------------

Componente **PINO DE SUPORTE**

Massa 0,0126 Kg (0,12 N)	Escala 3:1	Data 15/04/2019
-----------------------------	---------------	--------------------

114

Projeto

Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto

Observações:

1 Por questão de *sigilo de informação*, as medidas apresentadas neste trabalho são limitadas e aproximadas.

2 Todas as medidas estão em milímetros.

Desenho 7

Vista Isométrica

Material ZIRCALOY-4 (ASTM B351)	Quantidade 4	Folha 1 de 1	Tipo A4
Componente CANTONEIRA - BOCAL SUPERIOR			
Massa 0,22 Kg (2,16 N)	Escala 1:1	Data 15/04/2019	

115

Projeto

Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto

Observações:

1 Por questão de sigilo de informação, as medidas apresentadas neste trabalho são limitadas e aproximadas.

2 Todas as medidas estão em milímetros.

Desenho 8

Vista Isométrica

Material ZIRCALOY-4 (ASTM B351)	Quantidade 8	Folha 1 de 1	Tipo A4
Componente PINO DE SUPORTE			
Massa 0,0653 Kg (0,64 N)	Escala 1:1	Data 15/04/2019

Vista Explodida

Projeto

Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto

Observações:

1 Por questão de sigilo de informação, as medidas apresentadas neste trabalho são limitadas e aproximadas.

2 Todas as medidas estão em milímetros.

Desenho 9

Vista Isométrica

N° da peça	Nome da peça	Material	Quantidade
3	Base A	Zircaloy-4 (ASTM B351)	1
1	Base B	Zircaloy-4 (ASTM B351)	1
2	Cantoneira	Zircaloy-4 (ASTM B351)	4
4	Pino de Suporte	Zircaloy-4 (ASTM B351)	8
5	Mola	INCONEL 718 (ASTM B637)	8
6	Presilha	Zircaloy-4 (ASTM B351)	8

Material	Quantidade	Folha	Tipo
Vide lista	1	1 de 1	A4

Componente
BOCAL SUPERIOR

Massa	Escala	Data
5,9 Kg (58 N)	1:5	15/04/2019

Projeto
Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto

Observações:

- 1 Por questão de *sigilo de informação*, as medidas apresentadas neste trabalho são limitadas e aproximadas.
- 2 Todas as medidas estão em milímetros.

Desenho 11

Vista Isométrica

N° da peça	Nome da peça	Material	Quantidade
2	Cerne	U-10Mo	1
1	Moldura	Zircaloy-4 (ASTM B351)	2

Material	Quantidade	Folha	Tipo
Vide tabela	Vide tabela	1 de 1	A4

Componente			
PLACA COMBUSTÍVEL			
Massa	Escala	Data	
3,76 Kg (36,9 N)	1:10	15/04/2019

Projeto			
Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto			
<u>Observações:</u>			
1 Por questão de <u>sigilo de informação</u> , as medidas apresentadas neste trabalho são limitadas e aproximadas.			
2 Todas as medidas estão em milímetros.			
Desenho 12		Vista Isométrica

Material ZIRCALOY-4 (ASTM B352)	Quantidade 144	Folha 1 de 1	Tipo A4
Componente			
MOLDURA			
Massa 0,26 Kg (2,5 N)	Escala 1:8	Data 15/04/2019

Projeto
Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para
um reator nuclear compacto

- Observações:**
- 1 Por questão de sigilo de informação, as medidas apresentadas neste trabalho são limitadas e aproximadas.
 - 2 Todas as medidas estão em milímetros.

Desenho 13 Vista Isométrica

Material ZIRCALOY-4 (ASTM B352)	Quantidade 1	Folha 1 de 1	Tipo A4
Componente PLACA A			
Massa 3,94 Kg (38,7 N)	Escala 1:10	Data 15/04/2019

Projeto

Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto

Observações:

1 Por questão de sigilo de informação, as medidas apresentadas neste trabalho são limitadas e aproximadas.

2 Todas as medidas estão em milímetros.

Desenho 14

Vista Isométrica

Material ZIRCALOY-4 (ASTM B352)	Quantidade 1	Folha 1 de 1	Tipo A4
Componente			
PLACA B			
Massa 2,17 Kg (21,3N)	Escala 1:10	Data 15/04/2019

Projeto

Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto

Observações:

1 Por questão de sigilo de informação, as medidas apresentadas neste trabalho são limitadas e aproximadas.

2 Todas as medidas estão em milímetros.

Desenho 15 Vista Isométrica

Material ZIRCALOY-4 (ASTM B352)	Quantidade 1	Folha 1 de 1	Tipo A4
---------------------------------------	-----------------	-----------------	------------

Componente

PLACA C

Massa 3,62 Kg (35,5 N)	Escala 1:12	Data 15/04/2019
---------------------------	----------------	--------------------

123

Projeto

Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto

Observações:

1 Por questão de sigilo de informação, as medidas apresentadas neste trabalho são limitadas e aproximadas.

2 Todas as medidas estão em milímetros.

Desenho 16

Vista Isométrica

Material
ZIRCALOY-4
(ASTM B352)

Quantidade	1
------------	---

Folha
1 de 1

Tipo	A4
------	----

Componente	Definición	Medición	Indicadores
1. Estructura Organizativa	Organización de la empresa, departamentos, puestos de trabajo, etc.	Diagrama de flujo, organigrama, etc.	Organigrama, Diagrama de flujo, etc.
2. Cultura Organizativa	Valores, normas, comportamientos, etc. que definen la identidad de la empresa.	Encuestas, entrevistas, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.
3. Recursos Humanos	Personal que trabaja en la empresa, sus habilidades, conocimientos, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.
4. Recursos Materiales	Equipos, herramientas, tecnología, etc. necesarios para el funcionamiento de la empresa.	Encuestas, entrevistas, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.
5. Recursos Financieros	Dinero, créditos, etc. necesarios para el funcionamiento de la empresa.	Encuestas, entrevistas, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.
6. Recursos Tecnológicos	Tecnología utilizada en la empresa, software, hardware, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.
7. Recursos de Información	Información necesaria para el funcionamiento de la empresa.	Encuestas, entrevistas, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.
8. Recursos de Marketing	Estrategias de marketing, canales de distribución, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.
9. Recursos de Investigación y Desarrollo	Actividades de investigación y desarrollo de nuevos productos o servicios.	Encuestas, entrevistas, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.
10. Recursos de Logística	Gestión de la cadena de suministro, transporte, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.
11. Recursos de Atención al Cliente	Servicio al cliente, quejas, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.
12. Recursos de Mantenimiento	Mantenimiento de equipos, instalaciones, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.
13. Recursos de Seguridad	Seguridad física, seguridad informática, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.
14. Recursos de Compliance	Normas de conducta, políticas, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.
15. Recursos de Sostenibilidad	Impacto ambiental, social, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.	Encuestas, entrevistas, etc.

PLACA D

Massa	1,97 Kg (19,3 N)
-------	------------------

Escala	1:10
--------	------

Data
15/04/2019

124

2

1

1282,1

2

1

Projeto

Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto

Observações:

- 1 Por questão de sigilo de informação, as medidas apresentadas neste trabalho são limitadas e aproximadas.
- 2 Todas as medidas estão em milímetros.

Desenho 17 Vista Isométrica

Material ZIRCALOY-4 (ASTM B352)	Quantidade 1	Folha 1 de 1	Tipo A4
---------------------------------------	-----------------	-----------------	------------

Componente **BOCAL INFERIOR**

Massa 2,33 Kg (22,9 N)	Escala 1:5	Data 15/04/2019
---------------------------	---------------	--------------------

DETALHE A
ESCALA 1 : 2

Projeto

Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto

Observações:

1 Por questão de sigilo de informação, as medidas apresentadas neste trabalho são limitadas e aproximadas.

2 Todas as medidas estão em milímetros.

Desenho 18

Vista Isométrica

Vista Isométrica

Nº da peça	Nome da peça	Material	Quantidade
1	Placa A	ASTM B352 (Zircaloy-4)	1
2	Placa B	ASTM B352 (Zircaloy-4)	1
3	Placa C	ASTM B352 (Zircaloy-4)	1
4	Placa D	ASTM B352 (Zircaloy-4)	1
5	Placa Combustível	Revestimento: ASTM B352 (Zircaloy-4) Cerne: U-10Mo	18

Material	Quantidade	Folha	Tipo
Vide tabela	Vide tabela	1 de 1	A4

Componente

CONJUNTO DE PLACAS COMBUSTÍVEIS

Massa	Escala	Data
19,75 Kg (193,7 N)	1:8	15/04/2019

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 e Inovação.**