



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

**Avaliação da influência da subcamada viscosa na estabilidade mecânica de
placas de elementos combustíveis em condições de escoamento axial por
meio de simulações numéricas FSI**

ALCEU JOSÉ DOS SANTOS MOURA

**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
2023**

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

**Avaliação da influência da subcamada viscosa na estabilidade mecânica de
placas de elementos combustíveis em condições de escoamento axial por
meio de simulações numéricas FSI**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

ALCEU JOSÉ DOS SANTOS MOURA

**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
2023**

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

Como citar:

MOURA, A. J. d. S. ***Avaliação da influência da subcamada viscosa na estabilidade mecânica de placas de elementos combustíveis em condições de escoamento axial por meio de simulações numéricas FSI***. 2023. 62 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

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

Moura, Alceu José dos Santos

Avaliação da influência da subcamada viscosa na estabilidade mecânica de placas de elementos combustíveis em condições de escoamento axial por meio de simulações numéricas FSI / Alceu José dos Santos Moura; orientador Miguel Mattar Neto. -- São Paulo, 2023.

62 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Reatores) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2023.

1. Elemento combustível do tipo placa. 2. velocidade crítica. 3. FSI. 4. CFD. 5. FEA. I. Mattar Neto, Miguel, orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Alceu José dos Santos Moura

Título: Avaliação da influência da subcamada viscosa na estabilidade mecânica de placas de elementos combustíveis em condições de escoamento axial por meio de simulações numéricas FSI

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

São Paulo, 16 de agosto de 2023:

Banca Examinadora

Prof. Dr. Miguel Mattar Neto : _____

Instituição: IPEN/USP

Julgamento: _____

Prof. Dr. Ricardo Sbragio : _____

Instituição: PosDoc-EP/USP

Julgamento: _____

Prof. Dr. Gustavo Roque da Silva Assi : _____

Instituição: EP/USP

Julgamento: _____

*Este trabalho é dedicado a minha família, cujo amor
e apoio foram essenciais em minha jornada.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Miguel Mattar Neto, por sua orientação dedicada e conhecimentos indispensáveis. Suas contribuições foram essenciais para a definição dos objetivos, metodologia e análise dos resultados, bem como para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Agradeço imensamente ao Dr. Ricardo Sbragio, que durante vários anos dedicou parte de seu precioso tempo para me orientar e ensinar, e muito incentivou meu aprimoramento profissional.

Também expresso minha gratidão ao Prof. Dr. Yukio Shigaki/CEFET-MG, que generosamente contribuiu para a minha formação acadêmica e pessoal.

Agradeço aos demais membros da banca examinadora, Dr. Gustavo Assi/EPUSP, Dr. Delvonei Alves de Andrade e Dr. Eduardo Malta, pela disposição em avaliar este trabalho e contribuir, com suas respectivas áreas de conhecimento, para aprimorar a qualidade desta pesquisa.

Aos meus irmãos, agradeço pela camaradagem.

Aos meus pais, agradeço pela formação básica, orientação, exemplos e sacrifícios realizados ao longo da vida.

À minha esposa Cristiane e meus filhos, Lucas e Eduardo, agradeço pelo estímulo e amor incondicional.

Por fim, expresso minha gratidão à Marinha do Brasil, que me concedeu esta oportunidade e me forneceu apoio financeiro para a realização desta pesquisa, e ao IPEN, por disponibilizar recursos computacionais (Software e Hardware) do laboratório CEENG para o desenvolvimento do trabalho.

*“Há uma força motriz mais poderosa
que o vapor, a eletricidade e a energia
atômica: a vontade”.
(Albert Einstein)*

RESUMO

MOURA, Alceu J. S. *Avaliação da influência da subcamada viscosa na estabilidade mecânica de placas de elementos combustíveis em condições de escoamento axial por meio de simulações numéricas FSI*. 2023. 62 p. Dissertação em Tecnologia Nuclear - Reatores - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares- IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

Este trabalho visa a investigação da influência da subcamada viscosa na estabilidade mecânica de placas de elementos combustíveis em condições de escoamento axial por meio de simulações numéricas de Interação Fluido Estrutura (Fluid Structure Interaction -FSI) de duas vias. A metodologia adotada é a proposta por Mantecón (MANTECÓN, 2019), que observou uma transição de comportamento linear para não linear entre a máxima deflexão das placas em seu bordo de ataque com o quadrado da velocidade do fluido refrigerante no canal. A velocidade em que se identifica a transição é a velocidade crítica (V_c). A fim de verificar a influência da subcamada viscosa, o domínio CFD foi discretizado desde o início de sua camada limite. Como essa abordagem encarece sobremaneira o custo computacional, foram utilizadas condições de contorno de simetria, onde as características geométricas e de carregamento permitiram. Além desta abordagem, optou-se por investigar a capacidade de se resolver o problema FSI em regime permanente. Os resultados obtidos confirmaram que a modelagem da camada limite é suficiente para se determinar a velocidade crítica. Além disso, sugere-se também que a abordagem em regime permanente, com a aplicação de condições de contorno de simetria sempre que possível, pode ser utilizada para prevenir a ocorrência de falhas devido à deflexão estática no projeto de novos elementos combustíveis. Isso forneceria suporte aos métodos tradicionais.

Palavras-chaves: Elemento combustível do tipo placa, velocidade crítica, FSI, CFD, FEA.

ABSTRACT

MOURA, Alceu J. S. *Evaluation of the influence of the viscous sublayer on the mechanical stability of fuel plates under axial flow conditions through numerical FSI simulations*. 2023. 62 p. Dissertação em Tecnologia Nuclear - Reatores - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares- IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

This work aims at investigating the influence of the viscous sublayer on the mechanical stability of fuel element plates under conditions of axial flow through two-way Fluid-Structure Interaction (FSI) numerical simulations. The adopted methodology follows the approach proposed by Mantecón (MANTECÓN, 2019), who observed a transition from linear to nonlinear behavior in the maximum deflection of plates at their leading edge with the square of the velocity of the coolant fluid in the channel. The velocity at which this transition is identified is the critical velocity (V_c). In order to assess the influence of the viscous sublayer, the CFD domain was discretized from the beginning of its boundary layer. Given that this approach significantly increases computational costs, symmetry boundary conditions were applied wherever geometric and loading characteristics allowed for it. In addition to this approach, the feasibility of solving the FSI problem under steady-state conditions was also investigated. The obtained results confirmed that modeling the boundary layer is sufficient to determine the critical velocity. Furthermore, it is also suggested that the steady-state approach, along with the application of symmetry boundary conditions whenever possible, can be employed to prevent failures due to static deflection in the design of new fuel elements. This would provide support for traditional methods.

Key words: flat-plate-type fuel element, critical velocity, FSI, CFD, FEA.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação geométrica do domínio computacional	39
Tabela 2 – Propriedade da água a 24 °C	41
Tabela 3 – Características das malhas utilizadas no estudo de verificação e valores dos parâmetros chave para o Caso 1	43
Tabela 4 – Características das malhas utilizadas no estudo de verificação e valores dos parâmetros chave para o Caso 2	43
Tabela 5 – Incertezas numéricas do domínio CFD - Caso 1	43
Tabela 6 – Incertezas numéricas do domínio CFD - Caso 2	44
Tabela 7 – Propriedade da liga de alumínio 6061-T6 a temperatura de 24 °C .	44
Tabela 8 – Características das malhas utilizadas no estudo de verificação do domínio sólido e valores do parâmetro chave	45
Tabela 9 – Incertezas numéricas do domínio sólido	45
Tabela 10 – Velocidades simuladas nesta dissertação	46
Tabela 11 – Numero de iterações necessárias até a convergência	47

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de um E.C. do tipo placa.	15
Figura 2 – Perfil médio de velocidade adimensional na camada limite sobre uma parede.	32
Figura 3 – (a) Vista isométrica e (b) domínio multifísico.	37
Figura 4 – Diagrama genérico do domínio computacional.	38
Figura 5 – Exemplo de uma malha (F4) utilizada no modelo CFD.	42
Figura 6 – Exemplos de malhas utilizadas na verificação do domínio fluido: (a) Malha F3 e (b) malha F1.	42
Figura 7 – Exemplos de malhas utilizadas na verificação do domínio sólido: (a) Malha E3 e (b) malha E1. As superfícies cinzas visíveis no detalhe ampliado são as regiões usadas para fixar as placas. . . .	44
Figura 8 – Contornos de velocidade ao longo do plano médio dos canais e próximos ao bordo de ataque das placas para várias velocidades.	47
Figura 9 – Contornos de pressão ao longo do plano médio dos canais e próximos ao bordo de ataque das placas para várias velocidades.	48
Figura 10 – Linha central usada para extrair o perfil de deflexão axial das placas (neste caso, $v_0 = 17.68$ m / s).	48
Figura 11 – Perfil de deflexão da placa para diferentes velocidades de escoamento - malha E1.	49
Figura 12 – Contornos de deflexão da placa para diferentes velocidades de escoamento. Fluxo na direção -y. Fator de escala de deflexão de 43x.	50
Figura 13 – Máxima deflexão da placa como função do quadrado da velocidade no canal - Caso 1.	51
Figura 14 – Máxima deflexão da placa como função do quadrado da velocidade no canal - Caso 2.	52
Figura 15 – Comparação da máxima deflexão da placa como função do quadrado da velocidade no canal.	53
Figura 16 – Velocidade crítica obtida por Mantecón.	54

LISTA DE ABREVIATURAS

- ASME Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (acrônimo de sua designação em inglês: "*American Society of Mechanical Engineers*")
- CFD Dinâmica dos Fluidos Computacional (acrônimo de sua designação em inglês: "*Computational Fluid Dynamics*")
- E.C Elementos de combustível
- ESSS Empresa fornecedora exclusiva dos Softwares Ansys na América Latina (acrônimo de sua designação em inglês: "*Engineering Simulation and Scientific Software*")
- FEA Método dos Elementos Finitos (acrônimo de sua designação em inglês: "*Finite Element Analysis*")
- FSI interação fluido-estrutura (acrônimo de sua designação em inglês: "*Fluid-Structure Interaction*")
- GTRI Iniciativa Global de Redução de Ameaças (acrônimo de sua designação em inglês: "*Global Threat Reduction Initiative*")
- IPEN Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
- LEU Urânio de Baixo Enriquecimento (acrônimo de sua designação em inglês: "*Low Enriched Uranium*")
- MITR Reator do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (acrônimo de sua designação em inglês: "*Massachusetts Institute of Technology Reactor*")
- MTR Reatores de Teste de Material (acrônimo de sua designação em inglês: "*Material Testing Reactor*")
- N-S Equações de Navier-Stokes
- PWR Reatores de Água Pressurizada (acrônimo de sua designação em inglês: "*Pressurized Water Reactor*")
- RMB Reator Multipropósito Brasileiro
- USP Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Descrição do Problema	16
1.3	Objetivos	18
1.4	Abordagem Proposta	19
1.5	Organização da Dissertação	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3	FUNDAMENTOS	30
3.1	Domínio Fluido	30
3.1.1	Modelo de Turbulência	31
3.1.2	Condições de Contorno	34
3.2	Domínio Sólido	34
3.2.1	Condições de Contorno	35
3.3	Acoplamento Fluido-estrutura	35
4	METODOLOGIA NUMÉRICA	36
4.1	Simulação Fluido-estrutura	38
4.2	Verificação	39
4.2.1	Grid Convergence Index (GCI)	40
4.2.2	Verificação do Modelo Fluido	41
4.2.3	Verificação do Modelo Sólido	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1	Resultados do Caso 1	46
5.2	Resultados do Caso 2	52
5.3	Comparação com a Velocidade de Miller	52
5.4	Comparação com estudos anteriores relacionados ao RMB	54
6	CONCLUSÕES	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Elementos de combustível (E.C) do tipo placa são amplamente utilizados em reatores de pesquisas, que têm como principais objetivos fornecer serviços e desenvolver tecnologia, como: produção de radioisótopos médicos e industriais, teste de materiais e combustíveis nucleares para reatores de potência, utilização de feixe de nêutrons para pesquisa científica e tecnológica em diferentes campos da ciência, análise por ativação neutrônica, produção de traçadores para aplicação em pesquisas na agricultura e meio ambiente, formação de mão de obra para atuar na área nuclear, dentre outras. Ademais, é possível encontrar este tipo de E.C. também em reatores navais de potência do tipo PWR (“Pressurized Water Reactor”), possuindo diversas vantagens do ponto de vista funcional quando embarcado e utilizado em plantas de propulsão naval (KAUFMANN, 1962), (ANDRZEJEWSKI, 2005). De acordo com Mantecón (2019) e Santos (2019), dentre as vantagens apresentadas pelos E.C do tipo placa em relação aos E.C do tipo vareta, pode-se destacar:

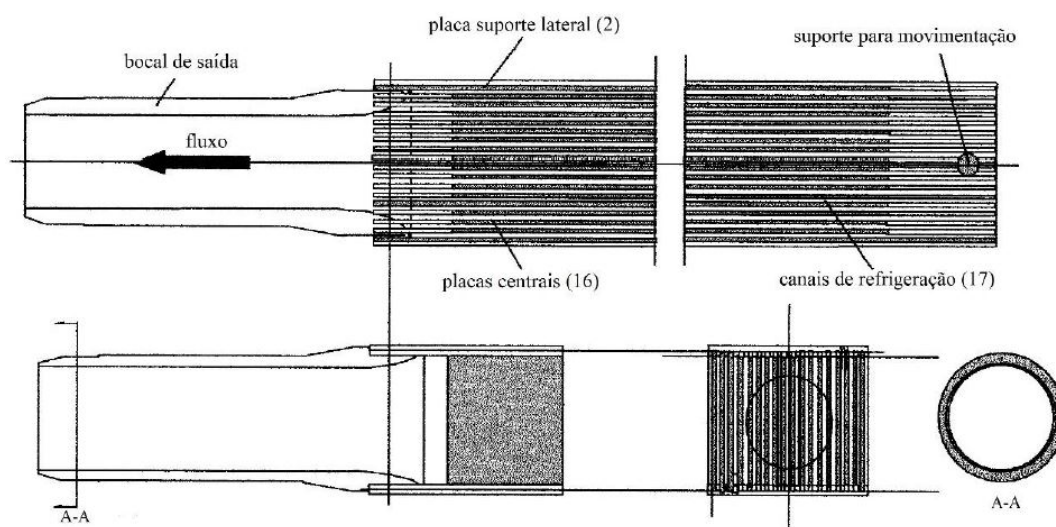
- Aumento no fluxo de nêutrons térmicos;
- Aumento da área de transferência de calor, melhorando a transferência de calor do E.C com o fluido refrigerante; e
- Aumento na densidade de potência, resultando em uma maior geração de energia térmica no mesmo volume.

Entretanto, existem também algumas desvantagens, como por exemplo:

- Aumento na precisão e custo de fabricação; e
- Aumento da taxa de queima do combustível, resultando em uma vida útil menor do núcleo.

Os E.C. do tipo placa constituem-se de um arranjo de placas paralelas contendo o combustível nuclear e separadas por estreitos canais por onde incide o escoamento que remove o calor gerado pela fissão nuclear. Estas placas possuem espessura da ordem de milímetros e comprimentos muito maiores em relação à sua

Figura 1 – Exemplo de um E.C. do tipo placa.



Fonte: Torres *et al.* (2003)

espessura. Um elemento combustível tipo placa típico de um reator de pesquisa é mostrado na Figura 1.

O projeto destes elementos combustíveis envolve diversas soluções de compromisso na busca de seu objetivo de satisfazer um conjunto particular de requisitos e restrições de projeto, como ter a espessura suficientemente fina para evitar a geração excessiva de temperatura interna e ser, ao mesmo tempo, suficientemente resistente para manter sua configuração estável, mesmo ante as altas vazões de refrigerante necessárias para seu arrefecimento.

Dada as características geométricas e condições de operação anteriormente mencionadas, pode-se dizer que um dos principais desafios no projeto de E.C do tipo placa para reatores nucleares de pesquisa e potência é a probabilidade de ocorrerem instabilidades estruturais quando carregadas pelas forças hidrodinâmicas do fluxo do refrigerante durante sua operação (DOAN, 1958), (EL-WAKIL, 1962), (GLASSTONE; SESONSKE, 2012).

Em experimentos e análises numéricas realizados com montagens de placas paralelas, foi observado que as instabilidades induzidas pelo escoamento em placas de combustível podem ser estáticas (que estão associadas ao equilíbrio da força elástica restauradora da placa com o desbalanço de pressão causado pelo escoamento) ou dinâmicas (que estão associadas à coincidência da frequência de excitação e da frequência natural da placa de combustível no meio fluido, ou do tipo *fluttering* que está associada a vibração induzida pela emissão de vórtices) (SMISSAERT, 1968), (SMISSAERT, 1969), (WEAVER; UNNY, 1970), (DAVIS; KIM, 1991), (KIM; DAVIS, 1995), (CURTIS *et al.*, 2013), (KENNEDY, 2015), (MANTECÓN,

2019). Nesta dissertação, o objetivo é estudar a instabilidade estática, que é também frequentemente identificada na literatura como instabilidade hidroelástica das placas, ou ainda divergência estática. Sua natureza fundamental é que as forças fluidodinâmicas que atuam na estrutura são alteradas pelo movimento das placas. Como resultado, é possível que a estrutura extraia energia do fluxo de tal forma que possam ocorrer deflexões excessivas, eventualmente deformações permanentes ou colapso das placas de combustível. A velocidade na qual esse fenômeno ocorre é chamada de velocidade crítica do fluido.

1.2 Descrição do Problema

O fenômeno de instabilidade hidroelástica pode levar a falhas catastróficas, resultando em obstrução de canais de refrigeração com conseqüente superaquecimento, o que pode culminar na necessidade de desligamento da planta. Dito isso, percebe-se que este problema não pode ser ignorado e nota-se que a velocidade crítica deve ser sempre estimada de modo a estabelecer as condições de operação segura dos reatores.

Miller (1958) foi um dos pioneiros nas pesquisas sobre estabilidade de placas de combustível, e foi o primeiro a propor uma expressão analítica para calcular a velocidade crítica do escoamento. Seu trabalho foi extremamente relevante, pois resultou na mais utilizada expressão para cálculo de velocidade crítica. Por este motivo, muitos autores denotam a velocidade crítica do escoamento como “Velocidade de Miller”. Ressalta-se que a teoria de Miller é aplicada até os dias atuais durante o projeto de muitos novos elementos combustíveis. Entretanto, as referências McLain e Martens (1964) e IAEA (1980) recomendam que a velocidade do fluido seja limitada a dois terços da velocidade crítica calculada pela expressão de Miller.

Na sequência, muitos autores propuseram modificações no trabalho de Miller (JOHANSSON, 1959), (WAMBSGANSS, 1967), (SMITH, 1968). Todavia, apesar das melhorias adicionais propostas por esses autores permitirem a captura de mais físicas - como por exemplo o efeito da queda de pressão por atrito através do canal, a redistribuição do fluxo entre canais contraídos e expandidos etc -, elas não foram extensamente empregadas na prática, dado que muitas produziam um valor semelhante à velocidade prevista por Miller, que já estava em uso na indústria por mais tempo. Possivelmente, uma exceção que mereça relevância seja os trabalhos de Jensen (2013) e Jensen e Marcum (2014), que desenvolveram um modelo analítico para estimar a velocidade crítica do fluxo de uma placa laminada, que parece prever de forma confiável o início do colapso da placa. Contudo, é importante

ressaltar que a formulação proposta por estes autores é aplicável apenas a uma estrutura do tipo sanduíche.

No campo dos experimentos, os resultados obtidos por Smissaert (SMISSAERT, 1968), (SMISSAERT, 1969) indicaram que os elementos combustíveis do tipo MTR ("*Material Testing Reactor*") estão sujeitos a diversas instabilidades mecânicas. Em sua pesquisa, ele observou experimentalmente duas velocidades críticas de escoamento: a primeira, a velocidade crítica predita por Miller, onde as placas começam a sofrer deflexão estática, como resultado de diferenças de pressão estática nos canais de refrigeração; a segunda, que foi observada no valor de aproximadamente o dobro da velocidade crítica de Miller, foi denominada de velocidade de vibração ("*flutter velocity*") e significou o início das vibrações das placas.

A estabilidade mecânica de uma placa foi estudada também por Weaver e Unny (1970). Neste trabalho, os autores utilizaram a teoria potencial linearizada clássica para descrever as forças fluidodinâmicas na placa; ao mesmo tempo, o comportamento da placa foi caracterizado utilizando uma abordagem modal combinada com a teoria das pequenas deflexões. A principal descoberta neste trabalho foi que a placa se torna instável estaticamente no início, mas a vibração é prevista para velocidades mais altas.

Davis e Kim, em suas pesquisas iniciadas em 1991 (DAVIS; KIM, 1991) e expandidas em 1995 (KIM; DAVIS, 1995), desenvolveram um modelo analítico de interação fluido-estrutural, para investigar as instabilidades estáticas e dinâmicas observadas em conjuntos de elementos combustíveis do tipo placa. Suas análises mostraram que as instabilidades estáticas devem ocorrer em média a velocidades superiores a 1,1 vezes a velocidade de Miller; ao passo que, instabilidades dinâmicas não devem ser esperadas até que o fluxo do canal seja de aproximadamente duas vezes a velocidade de Miller.

Até recentemente, a utilização de técnicas analíticas e experimentais foram os únicos métodos para quantificar e abordar o impacto de como os escoamentos em reatores afetam estruturalmente os elementos combustíveis. Entretanto, com os avanços em poder computacional, os métodos numéricos têm sido cada vez mais utilizados e constituem o estado da arte no estudo de estabilidade hidromecânica de elementos de combustível das mais diversas geometrias. Deste modo, em virtude dos avanços em poder computacional, diversos pesquisadores realizaram estudos de interação fluido-estrutura ("*Fluid-Structure Interaction*" - FSI¹) acoplando

¹ As simulações FSI podem ser classificadas como acopladas em uma via (unidirecional), ou em duas vias (bidirecional). Na abordagem unidirecional, apenas as pressões obtidas da análise CFD são transferidas para o modelo estrutural. Na abordagem de duas vias, não apenas as pressões

códigos comerciais de Dinâmica de Fluidos Computacional ("*Computational Fluid Dynamics*" - CFD) e Método dos Elementos Finitos ("*Finite Element Analysis*- FEA) para estudar as deflexões induzidas pelo escoamento em elementos de combustível (KENNEDY, 2012) (CURTIS *et al.*, 2013) (JESSE, 2015) (KENNEDY, 2015) (CURTIS *et al.*, 2018) (CURTIS *et al.*, 2019) (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2018) (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2019)(MANTECÓN, 2019) (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2020) (WANG *et al.*, 2023b) (WANG *et al.*, 2023a).

Evidencia-se ainda nos resultados das análises transientes de Kennedy (2015) e Mantecón (2019) que, após o “efeito transiente de partida” das simulações, a resposta constatada como instabilidade próximo a velocidade crítica de Miller se caracteriza como sendo uma instabilidade estática. Vale evidenciar ainda que a principal contribuição deste último autor foi fornecer uma metodologia para prever a velocidade crítica de escoamento de conjuntos de combustível do tipo placa usando simulações numéricas de interação fluido-estrutura.

Entretanto, após uma profunda pesquisa, este autor constatou que em todas as análises reportadas na literatura, os pesquisadores utilizaram modelos de turbulência e discretização de malha que modelam a camada limite a partir da camada logarítmica, utilizando a lei de parede. Deste modo, objetiva-se neste trabalho investigar se há algum prejuízo nesta simplificação na determinação da velocidade crítica em placas combustíveis.

1.3 Objetivos

O presente projeto de pesquisa tem como principal objetivo verificar qual é a contribuição da subcamada viscosa nos resultados de início da instabilidade mecânica das placas combustíveis em condições de escoamento axial por meio de simulações numéricas FSI.

Assim, partindo-se da metodologia numérica apresentada por Mantecón (2019) para prever o início da instabilidade das placas combustíveis com base na geometria do elemento combustível do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), objetiva-se explorar as características do modelo $\kappa - \omega$ SST ("*Shear-Stress-Transport*"), executando uma modelagem mais elaborada para escoamentos de camada limite podendo capturar característica como gradientes adversos de pressão, e consequentemente avaliar a influência de se resolver a camada limite desde a subcamada viscosa, ao invés de utilizar funções de parede, e verificar qual é a sua contribuição

do fluido são transferidas para a estrutura, mas também o domínio do fluido é atualizado como resultado das deformações estruturais, em um processo iterativo, até que ambas as soluções alcancem algum critério de convergência pré-definido.

nos resultados de início da instabilidade mecânica das placas combustíveis nas simulações de interação fluido-estrutura.

É necessário ressaltar que não faz parte do escopo desta pesquisa realizar qualquer trabalho de otimização ou de busca paramétrica com o propósito de se quantificar a relação dos efeitos da subcamada viscosa com a variação de qualquer propriedade. Nesta dissertação, faz-se um teste de hipótese única, utilizando um único modelo que resolve completamente a subcamada viscosa, para testar se os resultados se alteram quando comparados aos modelos que utilizam lei de parede.

Adicionalmente, os estudos aqui apresentados têm também como objetivo avaliar a viabilidade da simplificação da abordagem de interação-fluido estrutura do regime transitório para uma avaliação estacionária.

1.4 Abordagem Proposta

Como exposto anteriormente, aplicou-se neste estudo a metodologia numérica apresentada por González Mantecón (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2018), (MANTECÓN, 2019), (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2020) para prever o início da instabilidade das placas combustíveis, alterando o modelo de turbulência e discretização na região de camada limite. Para tanto, o pacote ANSYS, com os módulos CFD Premium e Mechanical Enterprise, foi utilizado para realizar simulações FSI modelando-se uma geometria baseada nas características geométricas e hidráulicas do elemento combustível do tipo placa do RMB.

A estratégia de simulação empregou o método particionado, onde os subproblemas de fluido e estrutura são resolvidos iterativamente. Essa estratégia requer a utilização de dois códigos: um para resolver as equações da dinâmica dos fluidos, que no presente caso foi o ANSYS – CFX Premium; e outro para a parte estrutural, onde utilizamos o ANSYS Mechanical Enterprise. Para o acoplamento dos modelos, utilizou-se o módulo ANSYS System Coupling com uma abordagem implícita de interação fluido-estrutura bidirecional onde, devido ao carregamento exercido pelo escoamento, o corpo deforma-se mudando os limites do domínio do fluido e, como resultado, o escoamento tem que se adaptar ao limite modificado.

Por se tratar do emprego de um método numérico, trabalhos de verificação são necessários a fim de garantir que os resultados obtidos das simulações são suficientemente precisos para a aplicação pretendida. Na presente dissertação, os domínios fluido e estrutural foram verificados individualmente.

O objetivo da verificação é estimar os erros numéricos que ocorrem

quando um modelo matemático é discretizado e resolvido em um computador. Geralmente, a maior fonte deste erro é devida a discretização, que estão associados à densidade e qualidade da malha. Isto posto, foi executado um estudo de convergência de malha seguido as boas práticas recomendadas pela ASME (2009) para se estimar as incertezas devido à discretização, tanto no domínio fluido, como no domínio estrutural.

Posto que há um aumento significativo no tamanho das malhas a fim de discretizar a camada limite para o propósito deste estudo e, com o intuito de tentar limitar o aumento no custo computacional, o domínio computacional considerado no presente trabalho foi composto por um quarto da geometria considerada por Mantecón (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2018) (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2019) (MANTECÓN, 2019); porém, utilizando regiões de simetria de modo a capturar os mesmos efeitos. Com esta abordagem simplificada, faz-se possível analisar a influência de placas combustíveis vizinhas e é possível tirar conclusões extrapoláveis para conjuntos de elementos combustíveis compostos de múltiplas placas, além de viabilizar uma comparação direta com os resultados obtidos anteriormente pelo mencionado autor.

Por fim, outra abordagem que permite uma significativa economia computacional que é adotada nesta pesquisa é a de realizar as análises fluido-estrutura em estado estacionário, uma vez que, como ressaltado diversas vezes nesta introdução, o efeito da instabilidade que se tem interesse não se caracteriza como sendo transitório. Acoplamento FSI de duas vias em estado estacionário já foi empregado em diversas áreas, como em Bang *et al.* (2022).

1.5 Organização da Dissertação

A dissertação será organizada da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução – Introdução ao tema, motivação e os objetivos desta pesquisa.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica – Levantamento da literatura disponível sobre deflexão induzida por escoamento.

Capítulo 3: Fundamentos – Este capítulo apresenta o modelo de turbulência que será utilizado, os fundamentos do CFD, FEA e da análise de interação fluido-estrutura.

Capítulo 4: Metodologia Numérica - Descrição das principais características dos modelos fluido e estrutural, bem como do FSI.

Capítulo 5: Resultados e Discussão - Apresentação dos resultados obtidos, comparação com os resultados publicados anteriormente relacionados ao RMB e discussão dos fenômenos que são captados no âmbito deste estudo.

Capítulo 6: Conclusões - Considerações finais sobre o tema desta dissertação.

Este manuscrito termina com a lista de publicações referenciadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma das primeiras publicações de estudos de deflexões induzidas por escoamento em placas de combustível foi escrita em 1948 (STROMQUIST; SISMAN, 1948). Os autores criaram uma das primeiras bancadas experimentais dedicadas aos estudos de instabilidades induzidas por escoamento para placas de combustível de reatores nucleares e observaram o surgimento de deformação plástica das placas de combustível com a elevação da velocidade do fluido refrigerante.

Doan (1958) observou o mesmo fenômeno de colapso em placas combustíveis de reatores nucleares no desenvolvimento de elementos combustíveis para um reator de pesquisa, onde discutiu qualitativamente a relação entre um fluxo crítico relacionado ao início da deflexão plástica da placa.

Partindo das hipóteses levantadas por Doan, Miller (1958) analisou este fenômeno e previu que há uma velocidade na qual as placas inicialmente paralelas se tornam instáveis e colapsam. Ele então apresentou uma expressão para o cálculo de velocidades críticas que causam colapso em placas (Equação 2.1). Seu modelo indica que, para velocidades de escoamento menores que a velocidade crítica, a mudança na pressão estática causada pela deflexão da placa será menor que a sua força de recuperação elástica. Entretanto, para vazões acima dessa velocidade, uma deflexão inicial aumentará até que a placa colapse por deformação excessiva ou toque uma placa adjacente. Miller modelou a placa utilizando a teoria de vigas largas e a diferença de pressão do refrigerante na placa usando a equação de Bernoulli.

Para montagens de placas planas, Miller assumiu as seguintes hipóteses:

- As placas são homogêneas, isotrópicas, elásticas, inicialmente planas, uniformes em espaçamento e dimensões;
- O fluido é incompressível, o escoamento está em regime permanente e todos os canais de refrigeração têm o mesmo fluxo de massa;
- As placas são largas o suficiente para que a deformação por cisalhamento seja desprezível e longas o suficiente para que possam defletir localmente sem redistribuição significativa do fluxo entre os canais de refrigeração; e
- Os suportes na borda das placas são perfeitamente rígidos.

$$V_M = \sqrt{\frac{15Ea^3h}{\rho b^4(1-\nu^2)}} \quad (2.1)$$

Onde: V_M = Velocidade Crítica de Miller; E = Módulo de Elasticidade da placa; a = Espessura da placa; h = Espessura do canal; ρ = Massa específica do refrigerante; b = Largura do canal; ν = Coeficiente de Poisson da placa.

Vale ressaltar que Miller estudou cascas planas e curvas, e a equação anteriormente apresentada refere-se a uma montagem de elementos do tipo placa, onde cada placa possui duas arestas engastadas, e as outras duas livres. Nota-se também que a principal limitação do modelo de Miller é que os efeitos tridimensionais do sistema são negligenciados.

A partir da publicação dos resultados de Miller, muitos pesquisadores começaram a conduzir trabalhos na tentativa de descrever as deflexões induzidas pelo escoamento e prever o colapso da placa de combustível. Zabriskie (ZABRISKIE, 1958), (ZABRISKIE, 1959) conduziu experimentos intensivos a fim de validar a equação da velocidade crítica de Miller, além de avaliar o escoamento sobre montagens de placas paralelas simples e múltiplas, investigando como a variação do comprimento e largura das placas afetam a velocidade crítica. Ele relatou, com base nos resultados de seus experimentos, que os resultados concordavam dentro de $\pm 20\%$ da teoria de Miller. Observou também que a borda de ataque da placa é mais vulnerável a grandes deflexões, e que poderiam ser facilmente corrigidos por meio de um pente de suporte na entrada para melhorar a estabilidade dos canais de escoamento. O resultado mais notável de seus estudos foi que a velocidade crítica de escoamento predita pelo modelo de Miller não gerava o colapso do canal de escoamento, mas sim a condição de grande deflexão das placas. Zabriskie também foi quem iniciou a tendência de se comparar a velocidade crítica medida como uma razão daquela prevista pelo método de Miller.

Johansson (1959) foi o primeiro a modificar as equações de Miller. Em seu trabalho, ele modificou as derivações de Miller para incluir a redistribuição do escoamento à medida que os canais se expandem e se contraem como resultado da deformação da placa, além de adicionar os efeitos das quedas de pressão por atrito. O resultado mais importante de seu trabalho foi ter demonstrado que o colapso da placa tem a tendência de ocorrer perto da entrada dos canais. Johansson também assumiu que mudanças de área superiores a 30% seriam excessivas.

Rosenberg e Youngdahl (1962) replicaram a análise de Miller, incluindo os termos dependentes do tempo que Miller negligenciou. Eles concluíram que, para placas uniformemente suportadas, sua análise dinâmica concordava com a análise

de “equilíbrio neutro” de Miller. Esta análise inicial não incluiu efeitos de inércia de fluido. Na segunda análise, ao considerarem placas com suportes periódicos, eles incluíram esses efeitos inerciais e concluíram que adicionar os efeitos inerciais leva a uma solução onde existem múltiplas velocidades críticas.

Em 1963, Kane fabricou desvios ou imperfeições na entrada dos canais entre as placas de combustível para explorar como o espaçamento na entrada do canal de resfriamento afetava a deflexão das placas (KANE, 1963). Foi observado que na velocidade calculada através da equação de Miller, deflexões significativas eram inicialmente percebidas. Os resultados mostraram também que pequenas diferenças nas condições de espaçamento na entrada geravam grandes efeitos nas deflexões observadas, especialmente para velocidades maiores que as calculadas pela fórmula de Miller.

No mesmo ano, Groninger e Kane realizaram investigações experimentais em 3 diferentes montagens de placas paralelas (GRONINGER; KANE, 1963). A configuração experimental mostrou que em altas vazões as placas adjacentes sempre deformam em direções opostas, com magnitudes semelhantes, abrindo e fechando alternadamente os canais de refrigeração. A velocidade do escoamento também foi variada desde valores abaixo da velocidade crítica de Miller até valores superiores a esta. Observaram que o início de vibrações das placas ocorreu em aproximadamente 1,9 vezes a velocidade crítica de Miller, e que a maior deflexão ocorreu na borda de ataque das placas. Também observaram que a presença de um pente de suporte reduziu a deflexão do bordo de ataque, como Zabriskie havia observado, ao mesmo tempo que eliminou a vibração.

Scavuzzo (1965) foi o primeiro a tentar incluir efeitos não lineares de segunda ordem em seus estudos. Ele acoplou as equações hidráulicas às equações da placa, gerando uma equação integral não linear que requer solução numérica. Scavuzzo concluiu em seu trabalho que as deflexões ocorrem ao longo de todo o comprimento das placas. Em 1967, também Wambsganss procurou capturar parte da informação perdida no processo de linearização, considerando efeitos não lineares causados por grandes deflexões (WAMBSGANSS, 1967).

No final da década de sessenta, Smissaert desenvolveu pesquisas experimentais e analíticas em elementos de combustível do tipo placa (SMISSAERT, 1968), (SMISSAERT, 1969). Em seus estudos, foram realizados experimentos até vazões equivalentes a 3,5 vezes a velocidade crítica de Miller. Ele observou experimentalmente duas velocidades críticas de escoamento: a primeira a velocidade crítica predita por Miller que significa o início das grandes deformações de flexão; e a segunda, que foi denominada velocidade de instabilidade tipo flutter (*flutter*

velocity"), que é aproximadamente igual a duas vezes a velocidade crítica de Miller. Smits também sugeriu que a presença de placas vizinhas afeta a força de sustentação que atua na borda de entrada de uma placa.

Weaver e Unny (1970) examinaram a estabilidade hidroelástica de uma placa plana, exposta a um escoamento de alta velocidade de um fluido de alta densidade, como a água. Em suas conclusões, os autores também verificaram que a placa se tornou estaticamente instável no início, mas a vibração foi prevista para velocidades mais altas.

Em 1977, Kim e Scarton apresentaram uma análise de deflexões induzidas pelo escoamento em elementos combustíveis do tipo placa utilizando ferramentas computacionais (KIM; SCARTON, 1977). A principal descoberta deste trabalho foi que o cisalhamento viscoso tem uma importância muito grande nas deflexões causadas na borda de entrada das placas, e concluíram também que o uso de placas com pequenas razões de aspecto minimizava as deflexões das mesmas.

Cekirge e Ural (1978) e Pavone e Scarton (1983) focaram em melhorar a teoria das placas para aprimorar o modelo de Miller. Cekirge e Ural utilizaram a teoria de placas com pequenas deflexões para atualizar a velocidade crítica do escoamento, obtendo como resultado uma margem de apenas 4% sobre a velocidade crítica de Miller. Já Pavone e Scarton, para capturar melhor as deflexões das placas, utilizaram um modelo estrutural de quarta ordem com escoamento laminar.

Kim e Davis (1995) conduziram investigações analíticas e, ao combinar efeitos turbulentos com uma análise de frequência de placas retangulares finas, conseguiram obter frequências naturais de uma série de placas. Eles descobriram que a frequência natural das placas em um fluido era menor do que a das placas no vácuo; eles também descobriram que, ao diminuir a altura do canal entre as placas, a frequência natural da placa também diminuía. Verificaram que placas de combustível com bordas engastadas na direção do escoamento são mais estáveis do que placas simplesmente apoiadas. Suas análises mostraram também que uma velocidade crítica divergente ocorrerá antes de uma velocidade crítica ressonante. Os critérios de velocidade crítica divergente, V_d , preveem instabilidade a aproximadamente 1,1 vezes a velocidade crítica de Miller, enquanto os critérios de velocidade crítica ressonante, V_r , preveem instabilidade em aproximadamente duas vezes a aproximação de Miller. Por fim, confirmaram também que as placas experimentariam deflexões menores e não um colapso repentino como Miller esperava.

Experimentos conduzidos por Ho *et al.* (2004) forneceram evidências de que a velocidade crítica de Miller pode não ser tão conservadora como sugerido por

Smitsaert. Um modelo físico de um conjunto de combustível de placas paralelas composto por duas placas foi construído e testado em um túnel de água em circuito fechado a 25 °C. A velocidade para o colapso das placas calculada com a equação de Miller foi de 15,4 m/s. Os resultados experimentais indicaram o colapso da placa ocorrendo em uma velocidade média de escoamento entre 11,1 m/s a 12 m/s, o que representa 78% da velocidade crítica de Miller. Um método implementado nesse estudo para determinar o colapso da placa foi a medição da queda de pressão através dos canais, valendo-se da variação que esta experimenta como resultado de diferentes áreas transversais do canal.

Em 2014, Jensen e Marcum (2014) desenvolveram um modelo analítico para estimar a velocidade crítica de escoamento de uma placa laminada, melhorando a suposição, que não é totalmente precisa, assumida por Miller ao considerar a placa de combustível como homogênea e feita de um único material. A placa em questão era do tipo sanduiche, composta em seu núcleo por uma liga de Urânio-Molibidênio (U-Mo) dispersas em uma matriz de alumínio revestidas com alumínio laminado. Eles incorporaram um termo de rigidez flexural na formulação da velocidade crítica de Miller e empregaram a teoria da estrutura em sanduíche para determinar o termo de rigidez. O resultado final deste estudo é o desenvolvimento de uma única equação para cada uma das três diferentes condições de fixação das borda que aparentemente prevê de forma confiável e abrangente o início do colapso da placa.

Devido ao desenvolvimento do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), realizado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Oliveira e Mattar apresentaram os primeiros cálculos da velocidade crítica nos elementos de combustível do RMB (OLIVEIRA; MATTAR NETO, 2011). Utilizando a expressão de Miller, os autores chegaram ao valor de 16,8 m/s. Neste mesmo trabalho, os autores também utilizaram uma expressão modificada para a velocidade de Miller que ignora qualquer resistência do material combustível, e considera apenas o revestimento como a seção transversal resistente. Com a expressão modificada, o valor calculado de velocidade crítica foi de 16,0 m/s.

Compreender a estabilidade das placas de elementos de combustível sob escoamentos de alta velocidade não é uma tarefa fácil, uma vez que requer a resolução de um problema de mecânica dos fluidos e dos sólidos simultaneamente. Até recentemente, a utilização de técnicas analíticas e experimentais foram os únicos métodos para quantificar e abordar o impacto de como os escoamentos em reatores afetam estruturalmente os elementos combustíveis. Entretanto, com os avanços em poder computacional, os métodos numéricos têm sido cada vez mais utilizados e constituem, como já mencionado anteriormente, o estado da arte

no estudo de estabilidade hidromecânica de elementos de combustível das mais diversas geometrias.

Neste sentido, alguns autores publicaram estudos de deflexões induzidas por escoamento em elementos combustíveis por meio de acoplamentos de códigos comerciais de CFD e FEA. Como parte do programa Iniciativa Global de Redução de Ameaças ("*Global Threat Reduction Initiative- GTRI*"), na esteira do desenvolvimento de um novo conjunto de combustível de Urânio de baixo enriquecimento ("*Low Enriched Uranium- LEU*") para o Reator de Pesquisa da Universidade de Missouri ("*University of Missouri Research Reactor- MURR*"), Kennedy realizou simulações FSI explicitamente acoplada em um elemento do tipo placa usando dois códigos diferentes, o Star-CCM + para resolver o domínio fluido e Abaqus para resolver a parte estrutural (KENNEDY, 2012).

Em 2013, também motivados pela necessidade de conversão de urânio altamente enriquecido para urânio levemente enriquecido, Curtis *et al.* (2013) simularam dois canais de refrigeração e uma placa de elemento combustível utilizando o software COMSOL. Segundo os próprios autores, o COMSOL foi escolhido por sua capacidade de resolver problemas de múltiplas físicas usando um algoritmo de solução totalmente acoplado e implícito. Os dados por eles obtidos apresentaram boa aderência com dados experimentais disponíveis.

Novamente Kennedy, durante seu doutorado, realizou experimentos e simulações numéricas com um modelo FSI acoplando os mesmos códigos mencionados anteriormente para estudar a deflexão da placa e a queda da pressão do canal para diferentes condições de escoamento (KENNEDY, 2015). Os resultados mostraram que uma placa plana é altamente sensível a pequenas perturbações na geometria do canal de refrigeração e que a deflexão máxima ocorreu na borda de ataque da placa.

Curtis *et al.* (2018) utilizaram novamente o COMSOL e constataram que a deflexão máxima na borda de ataque concordava bem com os dados experimentais de Smissaert (1969), bem como apresentaram os primeiros resultados de simulações com múltiplas placas, fornecendo informações importantes sobre a interação entre placas adjacentes que as simulações de uma única placa não forneceriam. Posteriormente, os mesmos autores utilizaram o *Know-how* desenvolvido anteriormente e realizaram simulações FSI em placas de combustível curvas em forma de involuta (CURTIS *et al.*, 2019), e confirmaram mais uma vez boa concordância com os dados de ensaios disponíveis.

Mantecón e Mattar Neto (2018) apresentaram o desenvolvimento de uma

metodologia de interação fluido-estrutura para investigar numericamente o início da instabilidade hidroelástica de elementos combustíveis tipo placa, sob condições de fluxo axial. O modelo adotado é representativo das placas de combustível e canais de refrigeração projetados para o RMB, sendo composto por duas placas de combustível delimitadas por três canais de fluido. Eles utilizaram os códigos comerciais ANSYS CFX para modelar o fluxo de fluido, e ANSYS Mechanical para modelar as placas. Os resultados obtidos mostraram-se bastante consistentes com outros trabalhos teóricos e experimentais. Pode-se concluir que a principal contribuição deste trabalho foi fornecer uma metodologia para prever a velocidade crítica de escoamento de conjuntos de combustível do tipo placa plana usando simulações numéricas de interação fluido-estrutura.

Em 2019 Mantecón, em seu trabalho de doutorado (MANTECÓN, 2019), expandiu seus estudos analisando cinco diferentes casos. Aplicando a metodologia desenvolvida por ele para prever o início da instabilidade de placas de combustível, ele investigou a influência de desvios de fabricação e da mudança das propriedades dos materiais devido ao aumento da temperatura na velocidade crítica e na deflexão das placas; além de avaliar a eficácia do uso de um pente de suporte de entrada na estabilidade mecânica das placas de combustível. Novamente, foram utilizados o ANSYS CFX e o ANSYS Mechanical, para resolver os domínios fluido e estrutural respectivamente. Os modelos foram acoplados usando a abordagem de interação fluido-estrutura bidirecional. Por fim, em suas conclusões, Mantecón constatou que: 1) se existirem tolerâncias iniciais nas dimensões dos canais de escoamento, as deflexões das placas de combustível serão amplificadas devido à diferença de pressão imposta, e a velocidade crítica pode ser esperada em taxas de fluxo mais baixas; 2) foi verificada a diminuição da magnitude da velocidade crítica com o aumento da temperatura do sistema; e 3) ele também confirmou a eficácia do uso do pente de suporte na borda de entrada das placas.

Em 2023, Wang *et al.* (2023b), aplicando a metodologia proposta por Mantecón e Mattar Neto em elementos combustíveis do tipo placa curvas, conseguiram capturar numericamente a velocidade crítica. O domínio computacional estudado por eles corresponde a dois elementos combustíveis do tipo placa em forma de arco circular paralelos, delimitadas por três canais. Os autores utilizaram o ANSYS Fluent e o ANSYS Mechanical para realizar simulações FSI de duas vias. Os resultados obtidos mostram que os dois elementos combustíveis se deformam assimetricamente em direções opostas. A maior deformação ocorreu no bordo de ataque, e a velocidade crítica reportada encontrada é da ordem de 80% da estimativa analiticamente pela fórmula de Miller.

Por fim, também em 2023 Wang *et al.* (2023a) realizaram simulações FSI utilizando o software STAR-CCM+ para prever as deflexões das placas de combustível propostas para a conversão do Reator do Instituto de Tecnologia de Massachusetts ("*Massachusetts Institute of Technology Reactor*- MITR).

3 FUNDAMENTOS

Este capítulo revisa brevemente os fundamentos dos métodos numéricos empregados, dando ênfase ao presente trabalho.

3.1 Domínio Fluido

Para a modelagem do domínio fluido, foi utilizado a Dinâmica de Fluidos Computacional. De um modo geral, pode-se definir CFD como sendo a união da Mecânica dos Fluidos com o Cálculo Numérico. Toda a técnica de CFD é baseada nas equações fundamentais que regem a mecânica dos fluidos; quais sejam: conservação de massa, segunda lei de Newton e primeira lei da termodinâmica.

Na presente dissertação, admite-se que fluido é Newtoniano e monofásico. Considera-se o escoamento tridimensional, incompressível, turbulento (alto número de Reynolds - $Re = \frac{UL}{\nu}$, onde U e L são as escalas características de velocidade e comprimento, e ν é a viscosidade cinemática, respectivamente) e permanente; e despreza-se a parte da energia. Para a modelagem do domínio fluido, utilizou-se o método RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), que baseia-se em uma proposta de Osbourne Reynolds que sugeriu tratar os escoamentos turbulentos analisando cada uma de suas grandezas decompostas em uma componente média no tempo e outra flutuante no tempo.

$$f(x, t) = \bar{f}(x) + f'(x, t) \quad (3.1)$$

Onde o operador de média utilizado na definição de f é dado por:

$$\bar{f}(x) = \frac{1}{t_1} \int_{t_0}^{t_0+t_1} f(x, t) dt \quad (3.2)$$

Aplicando a decomposição de Reynolds e a média de tempo nas equações de conservação de massa e quantidade de movimento linear, obtém-se as equações resolvidas pelo método RANS:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.3)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] + \bar{f}_i \quad (3.4)$$

onde $i, j = 1, 2, 3$; u é o vetor velocidade, ρ é a densidade do fluido, μ é a viscosidade dinâmica, p é a pressão.

Verifica-se na Equação (3.4) o surgimento de um termo adicional que não permite o "desacoplamento" das partes média e flutuante. Este termo $\overline{\rho u'_i u'_j}$ é conhecido como tensor de Reynolds e representa a média das tensões causadas pelas flutuações turbulentas no escoamento. Como se trata de um tensor simétrico, este traz para o problema da solução dos campos médios seis incógnitas adicionais envolvendo produtos de flutuações. Com isso, tem-se mais incógnitas do que equações, o que leva ao "problema de fechamento". Assim, de modo a obter um número de equações igual ao de incógnitas, se faz necessário o uso de alguma hipótese simplificativa ou algum nível de modelagem; e é neste ponto que entram os modelos de turbulência.

Após o fechamento dos modelos matemáticos, para se obter uma solução aproximada numericamente, os métodos de CFD utilizam algum método de discretização que aproxima as equações diferenciais por um sistema de equações algébricas, que pode então ser resolvido em um computador. Existem muitas abordagens, mas a mais utilizada atualmente é o método dos volumes finitos. Após a conversão das equações em um sistema de equações algébricas, é utilizado um método iterativo para a solução.

3.1.1 Modelo de Turbulência

Para a definição do modelo de turbulência mais adequado, bem como da definição do nível de discretização da malha necessários para capturar corretamente os gradientes de velocidades na camada limite, é necessário levar em consideração o y^+ (Equação 3.5), que é um adimensional que relaciona o produto da velocidade de atrito (u_τ) pela distância (y) até a parede mais próxima dividida pela viscosidade cinemática (ν).

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \quad (3.5)$$

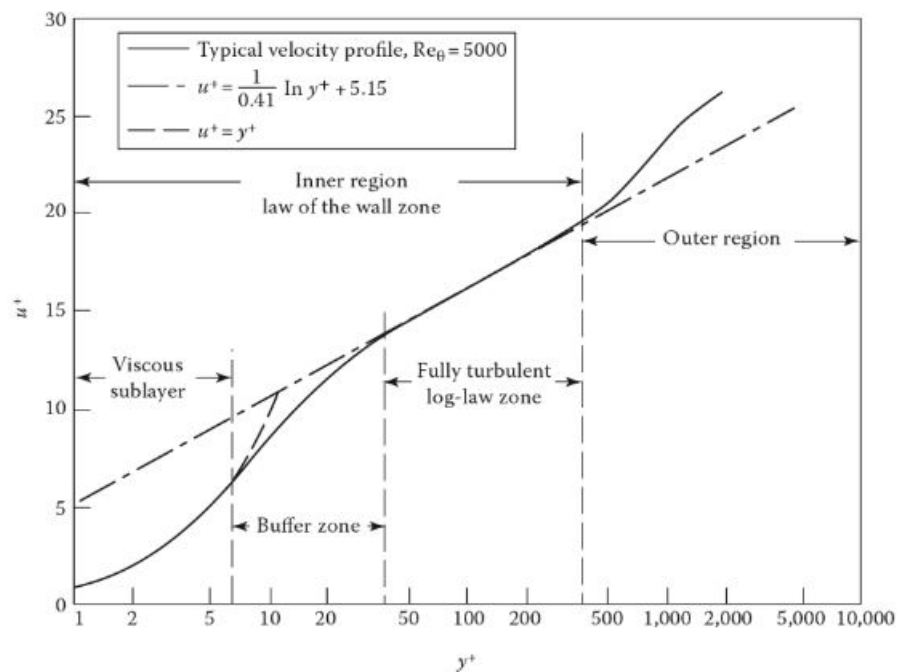
u_τ pode ser definida em função da tensão de cisalhamento τ_w e da densidade ρ , ou seja:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.6)$$

A Figura 2 apresenta o perfil médio de velocidade adimensional na camada limite sobre uma parede. As diferentes camadas indicadas nesta figura apre-

sentam características bastante distintas. A região mais próxima da parede, onde os efeitos viscosos são dominantes, é chamada de subcamada viscosa e se estende até $y^+ \approx 5$. A camada logarítmica (também conhecida como subcamada inercial) é a região que se inicia a partir de $y^+ \approx 30$ e pode atingir y^+ da ordem de 10^3 a 10^4 . O nome de camada logarítmica foi dado porque o perfil de velocidade adimensional nessa região apresenta uma forma logarítmica. Nessa camada, os efeitos inerciais são significativos e os efeitos viscosos são menos importantes do que na subcamada viscosa, mas não são desprezíveis. Por fim, na região mais externa está a camada de esteira (ou camada de déficit de velocidade). Nesta camada, efeitos viscosos são muito inferiores aos efeitos inerciais; e é onde estão os maiores vórtices da camada limite e onde a influência da turbulência do escoamento externo (se presente) é mais significativa.

Figura 2 – Perfil médio de velocidade adimensional na camada limite sobre uma parede.



Fonte: Anderson *et al.* (2016)

Isto posto, como o interesse da presente dissertação é avaliar a influência da subcamada viscosa na estabilidade mecânica das placas de elementos combustíveis, o modelo de turbulência $\kappa - \omega$ SST ("*Shear-Stress-Transport*") foi selecionado, uma vez que se faz necessário resolver a subcamada viscosa. O SST é um modelo baseado na hipótese de Boussinesq, que foi proposto combinando as melhores propriedades dos modelos $\kappa - \epsilon$ e $\kappa - \omega$ (MENTER, 1994). Este modelo utiliza duas equações de transporte extras para representar as propriedades turbulentas do escoamento. Estas equações são a da energia cinética da turbulência (κ) e a da

frequência característica da turbulência (ω):

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} = \frac{\tau'_{ij}}{\rho} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* \omega \kappa + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\alpha}{\nu_t} \frac{\tau'_{ij}}{\rho} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3.8)$$

O termo F_1 é a função de mistura responsável por utilizar a formulação do modelo $\kappa - \omega$ em escoamentos parentais, ou a formulação $\kappa - \epsilon$ na corrente livre. Para tanto, essa função de mistura é função da distância à parede, e assume o valor igual a um (conduzindo ao modelo $\kappa - \omega$ padrão) na extremidade interna da camada limite turbulenta, e fora desta assume o valor igual a zero (correspondendo ao modelo $\kappa - \epsilon$ padrão). Seja ϕ uma constante qualquer do modelo SST, e sejam ϕ_1 e ϕ_2 constantes dos modelos $\kappa - \omega$ e $\kappa - \epsilon$ respectivamente, as constantes empíricas do modelo SST são obtidas da seguinte forma:

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad (3.9)$$

A função de mistura é definida da seguinte forma:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (3.10)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\kappa^{\frac{1}{2}}}{0,09\omega y}; \frac{500\nu}{y^2\omega} \right); \frac{4\rho\kappa}{\sigma_{\omega 2} D_{\kappa\omega} y^2} \right] \quad (3.11)$$

onde y é a distância à parede, $\sigma_{\omega 2}$ é uma constante empírica e $D_{\kappa\omega}$ é a parte positiva do termo de difusão cruzada, dada por:

$$D_{\kappa\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-20} \right) \quad (3.12)$$

O modelo de turbulência $\kappa - \omega$ SST apresenta também uma segunda função de mistura (F_2) para alterar a forma como é calculada a viscosidade turbulenta dentro da camada limite, melhorando principalmente os resultados na presença de gradiente adverso de pressão.

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (3.13)$$

$$arg_2 = max \left(2 \frac{\kappa^{\frac{1}{2}}}{0,09\omega y}; \frac{500\nu}{y^2\omega} \right) \quad (3.14)$$

$$\mu_t = \frac{a_1\kappa}{max(a_1\omega; \Omega F_2)} \quad (3.15)$$

onde a_1 é uma constante empírica igual a 0,3 e Ω é o módulo do tensor deformação do escoamento médio.

3.1.2 Condições de Contorno

Além das equações governantes do domínio fluido que foram apresentadas, se faz necessário especificar também as condições de contorno em todas as regiões delimitadoras do domínio.

Na entrada do domínio (*inlet*), foram especificadas uma velocidade uniforme (V_{in}) e um nível de turbulência médio (5%); na saída (*outlet*), é especificada uma pressão estática relativa igual a zero; para todas as superfícies sólidas, foi aplicada a condição de não escorregamento (no-slip), e, adicionalmente nas paredes da placa de elemento combustível, foi habilitado o recurso de malha móvel coordenado pelo módulo ANSYS System Coupling. Com o intuito de tirar proveito de características geométricas especiais da região de interesse, uma vez que há de fato simetria geométrica, de carregamento e de condições de contorno, aplicou-se duas condições de contorno de simetria, localizadas no meio do canal central de resfriamento (plano YZ) e ao longo do eixo de simetria da placa em seu sentido longitudinal (plano XY). Com a utilização deste recurso de simetria, é possível economizar poder computacional e capturar os efeitos de placas contíguas. A Figura 4 apresentada mais adiante mostra graficamente a posição dos planos de simetria aplicados.

3.2 Domínio Sólido

Os cálculos do domínio sólido são realizados na presente dissertação através do Método dos Elementos Finitos (FEA). A abordagem aqui utilizada é a de análise estrutural estática; e, assim a equação básica a ser resolvida é mostrada a seguir:

$$F = [K]x \quad (3.16)$$

onde $[K]$ é a matriz de rigidez, x é o vetor de deslocamento nodal, e F é o vetor de força.

3.2.1 Condições de Contorno

Para o domínio sólido, foi necessário modelar apenas metade de uma placa. Ao longo de todo o comprimento da placa, uma pequena região de 2,25 mm de largura foi utilizada para fixá-la. Para tal fim, aplicou-se restrição nos deslocamentos em $x = y = z = 0$. Na posição correspondente à metade da largura da placa, foi aplicada a condição de contorno de simetria ao longo de seu sentido longitudinal (plano XY). Nas demais superfícies da placa que correspondem a superfície molhada, foi aplicada a condição de "*Fluid Solid Interface*", de modo a permitir a transferência do carregamento do CFD.

3.3 Acoplamento Fluido-estrutura

Na análise de interação fluido-estrutura, os dados são trocados na interface entre os modelos sólido e fluido, que corresponde à superfície molhada da placa de elemento combustível. Nesta fronteira, o fluido transfere forças de carregamento para o domínio estrutural, que por sua vez deforma-se e envia deslocamentos de volta para o CFD.

Para a análise FSI, utiliza-se malha móvel e múltiplas iterações de acoplamento são usadas para convergir transferências de dados e produzir uma solução implícita.

4 METODOLOGIA NUMÉRICA

Esta pesquisa foi iniciada com os esforços concentrados na geração de malhas com maior discretização, de modo a atender o primeiro objetivo desta dissertação. Entretanto, logo no início constatou-se a inviabilidade de se utilizar o malhador básico do pacote ANSYS, o "*Meshing*", na geração de malhas hexaédricas, uma vez que, dado o nível de refino necessário das malhas nas regiões próximas às paredes, esse malhador estendia este refino para regiões além das necessárias, gerando malhas com tamanhos proibitivos. Assim, optou-se pelo malhador ICEM, e utilizamos uma metodologia de geração de malhas hexaédricas estruturadas, com o emprego do recurso de topologia "*o-grid*". Em virtude deste recurso, conseguiu-se criar ao redor das placas combustíveis uma série de blocos que organiza as linhas de grade em uma forma de "O", de natureza envolvente, melhorando a eficiência do agrupamento de nós próximos às paredes que de fato necessitavam de maior refino.

No entanto, verificou-se posteriormente que, mesmo com o uso do ICEM, o nível de refino que necessitaríamos no domínio CFD para a pesquisa, inviabilizaria a modelagem de duas placas completas, como Mantecón havia realizado em sua tese de doutorado (MANTECÓN, 2019). Por conseguinte, iniciou-se o estudo de simplificações que eram possíveis de serem realizadas de modo a reduzir o custo computacional e condições de contorno de simetria fora utilizadas tirando proveito das simetrias geométrica e de carregamento no domínio.

Em seguida, com a discretização das malhas obtidas, tentou-se aplicá-las à metodologia apresentada por Mantecón em regime transiente. No entanto, deparamo-nos com dificuldades de estabilidade numérica e não obtivemos convergência. Nessa fase, após muita consideração, tentativas e análise de trabalhos anteriores, identificou-se a possibilidade de conduzir os estudos em regime permanente e estacionário, conforme abordagem já utilizada em outras áreas (EZKURRA *et al.*, 2018) (BANG *et al.*, 2022). Após a realização de testes nos modelos, verificaram-se resultados adequados.

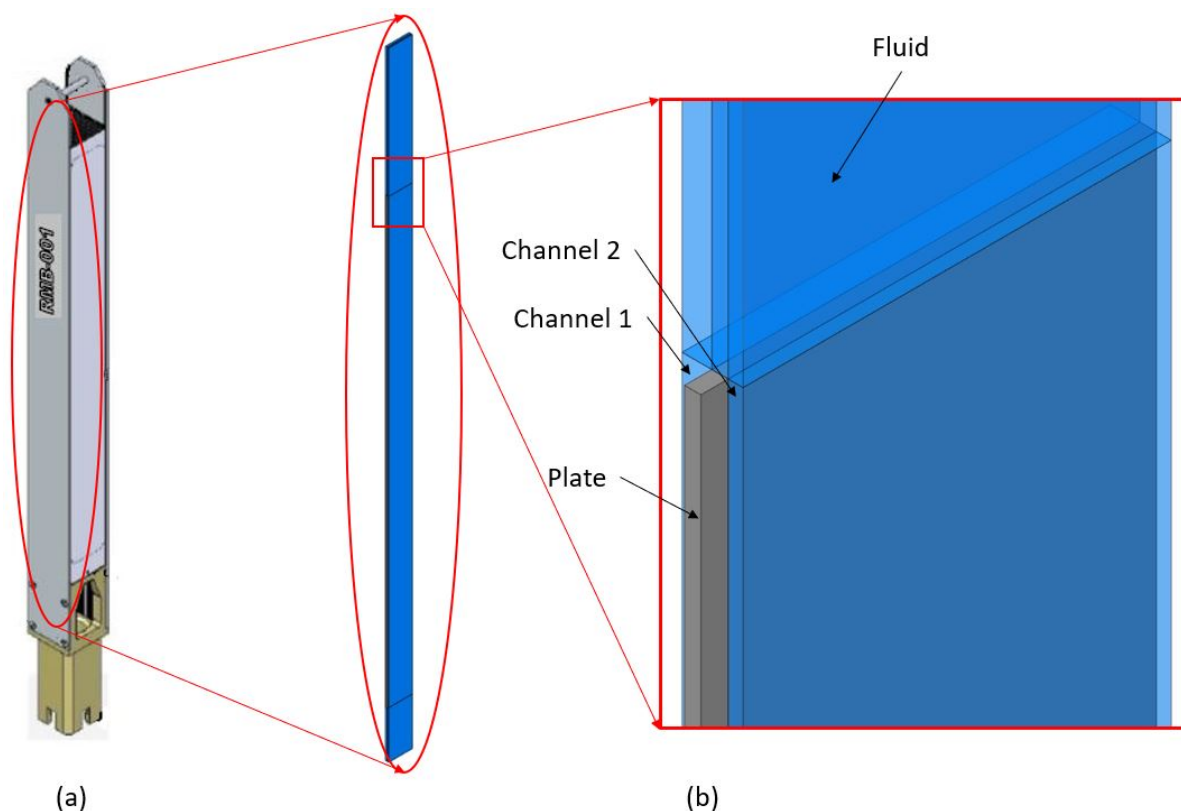
Assim, a metodologia empregada nesta dissertação é uma simplificação da apresentada por Javier Mantecón (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2018), (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2019), (MANTECÓN, 2019), (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2020) para prever o início da instabilidade das placas combustível. Aqui, foram realizadas análises de interação fluido-estrutura de duas vias, contudo utilizando a abordagem estática. De modo também a economizar poder computacional, valeu-se

de aplicações de simetria nas condições de contorno, de modo a modelar uma geometria que corresponde a 1/4 do domínio analisado por Mantecón.

Com o objetivo de se avaliar a influência da subcamada viscosa, alterou-se também o modelo de turbulência e aumentou-se a discretização na região de camada limite a fim de resolver a subcamada viscosa.

O domínio computacional estudado foi baseado nas características geométricas e hidráulicas do elemento de combustível do RMB (Figura 3). O elemento combustível do RMB possui seção transversal quadrada e é formado pela montagem de 21 placas de combustível planas contendo no cerne uma dispersão de siliceto de urânio-alumínio de baixo enriquecimento ($U_3Si_2 - Al$) revestida com alumínio (PERROTTA; SOARES, 2015). Para o elemento combustível do RMB são previstos dois tipos de placas de combustível, as internas e as externas. As duas placas de combustível externas (1a e a 21a) possuem revestimento com maior espessura, de modo a conferir maior rigidez estrutural ao conjunto. Neste estudo, o modelo é representativo da porção interna do elemento de combustível. Assim, suas dimensões correspondem às das placas internas.

Figura 3 – (a) Vista isométrica e (b) domínio multifísico.

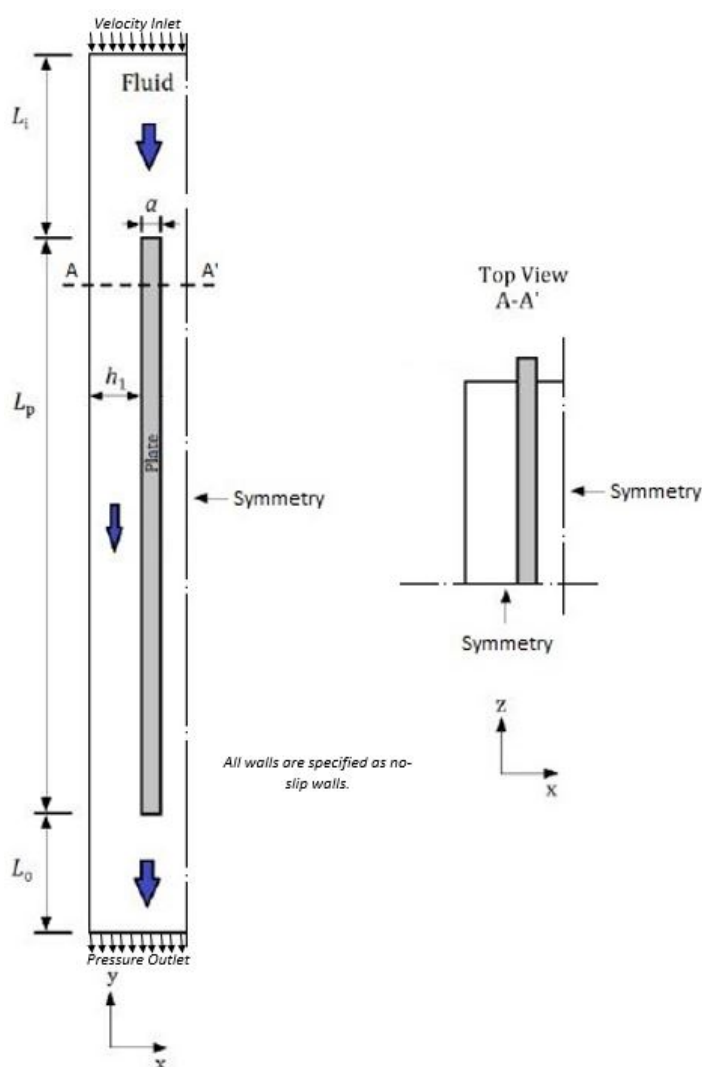


Fonte: Autor

No presente estudo, analisa-se o escoamento em um domínio composto por um arranjo de duas placas e três canais de escoamento iguais. Entretanto,

apenas metade de uma placa foi efetivamente modelada, uma vez que, valendo-se da simetria geométrica e de carregamento, condições de contorno de simetria foram aplicadas e o domínio computacional utilizado corresponde a 1/4 do analisado por Mantecón (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2018), (MANTECÓN, 2019). Com esta abordagem simplificada, é possível analisar a influência de placas combustíveis vizinhas, bem como tirar conclusões extrapoláveis para conjuntos de elementos combustíveis compostos de múltiplas placas. O diagrama genérico do domínio é apresentado na Figura 4. Nesta, as setas azuis indicam a direção do escoamento. As especificações geométricas do domínio estão resumidas na Tabela 1.

Figura 4 – Diagrama genérico do domínio computacional.



Fonte: Mantecón (2019) (Adaptado)

4.1 Simulação Fluido-estrutura

A estratégia de simulação empregada foi a do método particionado, onde os subproblemas de fluido e estrutura são resolvidos iterativamente. Todos os softwa-

Tabela 1 – Especificação geométrica do domínio computacional

Parâmetro	Dimensão [mm]
Espessura dos Canais, h	2.45
Largura dos Canais, b	70.5
Comprimentos das placas, L_p	655
Espessura das placas, a	1.35
Largura das placas, d	75
Plenum de entrada, L_i	190
Plenum de saída, L_o	70

Fonte: Autor

res utilizados são da família ANSYS, onde para se resolver as equações da dinâmica dos fluidos, foi utilizado o CFX Premium; e para resolver a parte estrutural, utilizou-se o Mechanical Enterprise. Para o acoplamento dos modelos, foi utilizado o System Coupling.

Os domínios fluido e sólido foram criados utilizando os recursos do ANSYS CFX-Pre e ANSYS Mechanical, respectivamente. Para a geração das malhas, foi utilizado o ANSYS Meshing para discretizar o domínio estrutural, e o ANSYS ICEM para discretizar o domínio fluído. Durante os cálculos, o acoplamento bidirecional é realizado através do ANSYS System Coupling, que é a ferramenta ANSYS capaz de integrar várias análises em uma única simulação multifísica. São utilizadas múltiplas interações de acoplamento para convergir transferência de dados e produzir uma solução implícita.

4.2 Verificação

Por se tratar do emprego de um método numérico, trabalhos de verificação são necessários a fim de garantir que os resultados obtidos das simulações são suficientemente precisos para a aplicação pretendida.

O objetivo da verificação é estimar os erros numéricos que ocorrem quando um modelo matemático é discretizado e resolvido em um computador. Geralmente, a maior fonte deste erro é devida a discretização, que estão associados à densidade e qualidade da malha. Isto posto, foi executado um estudo de convergência de malha, tanto do modelo fluido como também do modelo estrutural, seguido as boas práticas recomendadas pela ASME (2009) para se estimar as incertezas numéricas.

4.2.1 Grid Convergence Index (GCI)

De acordo com a mencionada referência da ASME, o Grid Convergence Index (GCI) é recomendado para estimativa de incerteza devido à discretização. O método foi desenvolvido por Roache (1998) e fornece uma estimativa de erro de discretização comparando-se resultados obtidos por sucessivos refinamentos de malha. A base teórica do método é assumir que as soluções convergem assintoticamente para a solução exata à medida que o número de elementos é incrementado com uma ordem aparente de convergência teoricamente proporcional à ordem do esquema de discretização.

Para obter bons resultados usando o GCI, a experiência prática (ROACHE, 1998) mostrou que as taxas de refinamento da malha precisam ser apenas maiores que 1,3. Assim, para malhas tridimensionais, pode-se calcular o tamanho representativo de malha (h) da seguinte forma:

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta V_i \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.1)$$

onde ΔV_i é o volume do i -ésimo elemento, e N é o número total de elementos da malha. O fator de refino de malha é $r = h_{coarse}/h_{medium}$ ou $r = h_{medium}/h_{fine}$.

Sendo p (Equação 4.2) a ordem aparente de convergência (calculada através de um procedimento iterativo), ϕ é a variável de interesse calculada através do refino gradual de malha, ϕ_{ext}^{21} (Equação 4.5) é o valor extrapolado da variável de interesse e e_a^{21} (Equação 4.6) é o erro relativo aproximado; e, considerando três malhas distintas (grossa - 3, média - 2, fina - 1), o GCI para a malha mais fina é calculado através da Equação 4.7.

$$p = \left[\frac{1}{\ln(r_{21})} \right] \left[\ln \left| \frac{\phi_3 - \phi_2}{\phi_2 - \phi_1} \right| + q(p) \right] \quad (4.2)$$

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \quad (4.3)$$

$$s = 1 \cdot \text{sign} \left(\frac{\phi_3 - \phi_2}{\phi_2 - \phi_1} \right) \quad (4.4)$$

$$\phi_{ext}^{21} = \frac{r_{21}^p \phi_1 - \phi_2}{r_{21}^p - 1} \quad (4.5)$$

$$e_a^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (4.6)$$

Tabela 2 – Propriedade da água a 24 °C

Propriedade	Valor
Viscosidade Dinâmica, $\mu [Pa \cdot s]$	8.87×10^{-4}
Densidade, $\rho [kg/m^3]$	997.56

Fonte: Autor

$$GCI_{21} = \frac{F_s \cdot e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (4.7)$$

Na Equação 4.7, o termo F_s é o fator de segurança; e, no presente estudo, foi atribuído o valor de 1,25, o que resulta em um GCI com um intervalo de confiança de 95%.

É necessário enfatizar que não houve caso de convergência oscilatória na presente dissertação. Todos os resultados apresentaram convergência monotônica, e por isso foram utilizadas as equações anteriormente apresentadas. Para os casos onde se observa convergência não monotônica, a ASME recomenda uma abordagem de mínimos quadrados desenvolvida nas referências (EçA; HOEKSTRA, 2002), (PELLETIER; ROACHE, 2000), (EçA *et al.*, 2005).

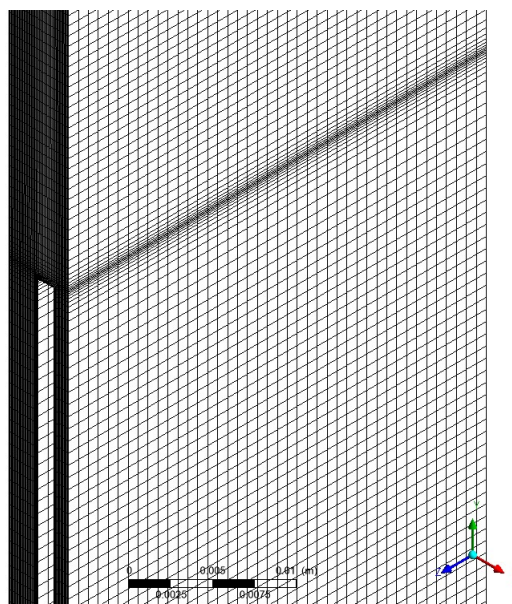
4.2.2 Verificação do Modelo Fluido

De modo a verificar o efeito de se resolver completamente a camada limite e seu resultado na determinação da velocidade crítica do escoamento, foram estudadas malhas com discretização suficiente para resolver toda a camada limite (aqui nomeado como Caso 1), bem como para malhas que modelam a camada limite (ou seja, ter malha a partir da camada logarítmica - aqui nomeado como Caso 2). Em todos os casos, camadas de prisma foram usadas para capturar adequadamente a camada limite da placa de combustível, e a altura da primeira célula foi calculada de forma a ter o y^+ adequado. A Figura 5 mostra a vista de uma das malhas utilizadas na região próxima ao bordo de ataque. Para cada caso, foram rodadas três malhas hexaédricas progressivamente refinadas.

Em todos os casos, o fluido refrigerante considerado foi água com propriedades físicas constantes (ver tabela 2), e as simulações conduzidas em estado estacionário. Na entrada do domínio fluido, uma velocidade de fluido uniforme foi assumida e foi calculada de modo a se obter uma velocidade de fluido de $8,2 \text{ m/s}$ nos canais, que é a velocidade mínima do refrigerante necessária em um conjunto de combustível do RMB.

Na aplicação do GCI, foram selecionadas a máxima pressão (P_{max}) e a tensão de cisalhamento na superfície das placas (τ_w) como parâmetros chave para

Figura 5 – Exemplo de uma malha (F4) utilizada no modelo CFD.

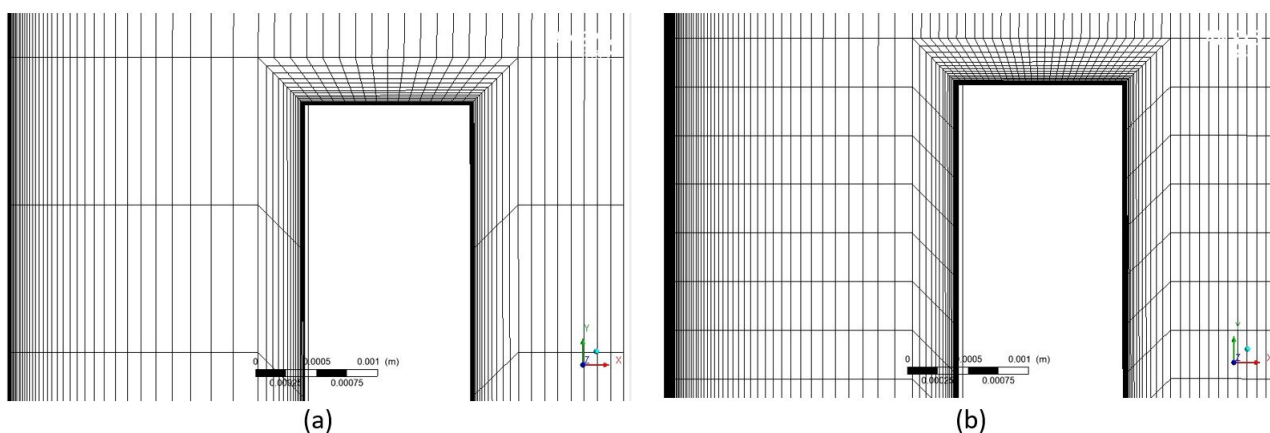


Fonte: Autor

avaliar as incertezas.

A Figura 6 mostra exemplos das malhas utilizadas na verificação do modelo fluido, com discretização suficiente para resolver a camada limite (Caso 1). Na referida figura, a malha (a) é a malha aqui referenciada como F3; e a malha (b), é a malha F1. A Tabela 3, apresenta os detalhes das três malhas utilizadas no estudo de convergência para o Caso 1, onde a malha mais fina é identificada como malha 1. Já a tabela 4 mostra os mesmos dados, porém para as malhas do Caso 2.

Figura 6 – Exemplos de malhas utilizadas na verificação do domínio fluido: (a) Malha F3 e (b) malha F1.



Fonte: Autor

Enfim, as tabelas 5 e 6 mostram os resultados de incertezas numéricas reportados para as malhas F1 e F4 respectivamente.

Tabela 3 – Características das malhas utilizadas no estudo de verificação e valores dos parâmetros chave para o Caso 1

Malha	N° Elementos	$h[mm]$	r	$P_{max}[Pa]$	$\tau_w[Pa]$	y^+
F1	12385850	0.3484	1.423	138886.00	195.44	0.51
F2	4295040	0.4958	1.428	137350.00	192.07	1.01
F3	1474950	0.7081	-	135264.00	189.91	1.50

Fonte: Autor

Tabela 4 – Características das malhas utilizadas no estudo de verificação e valores dos parâmetros chave para o Caso 2

Malha	N° Elementos	$h[mm]$	r	$P_{max}[Pa]$	$\tau_w[Pa]$	y^+
F4	1941240	0.6461	1.307	135564.00	189.27	34.71
F5	869430	0.8445	1.314	134172.00	187.04	39.87
F6	383000	1.1099	-	133358.00	184.34	41.11

Fonte: Autor

Tabela 5 – Incertezas numéricas do domínio CFD - Caso 1

Parâmetro	$\phi_{ext}^{21}[Pa]$	$e_a^{21}[\%]$	$GCI_{21}[\%]$
P_{max}	143373.5948	1.1059	4.0389
τ_w	186.1857	1.7243	5.9189

Fonte: Autor

Os resultados dos estudos de incerteza apresentados para o domínio fluido mostram que: 1) para o Caso 1, verificou-se uma incerteza máxima da ordem de 5,9%, já trabalhando com a máxima capacidade computacional disponível, o que impede maiores refinamentos para tentar reduzir esta incerteza; para o Caso 2, a maior incerteza reportada foi da ordem de 7,9%. Contudo, ao analisar os valores obtidos, percebe-se que, em valores absolutos, todos os parâmetros estão variando muito pouco (com uma variação da ordem de 1%). Isto leva a crer que a física está sendo bem capturada, e então foi decidido prosseguir o estudo com as malhas F1 e F4.

4.2.3 Verificação do Modelo Sólido

Para o domínio sólido, foi considerado a liga de alumínio 6061-T6 como material das placas. A plasticidade foi considerada no modelo de material, através do modelo de endurecimento isotrópico bilinear (*Bilinear Isotropic Hardening*) com módulo tangente zero. As propriedades deste material estão apresentadas na tabela 7.

Para a verificação do modelo sólido, também foram geradas três diferentes malhas, e realizadas análises utilizando o módulo Static Structural do ANSYS Mechanical. A placa de combustível foi discretizada usando uma malha estruturada com elementos hexaédricos SOLID186, produzida usando o ANSYS Meshing. Ao longo de um dos lados paralelos ao escoamento, uma região de 2,25 mm da largura

Tabela 6 – Incertezas numéricas do domínio CFD - Caso 2

Parâmetro	$\phi_{ext}^{21} [Pa]$	$e_a^{21} [%]$	$GCI_{21} [%]$
P_{max}	132281.2046	1.0268	3.0270
τ_w	201.3682	1.1782	7.9900

Fonte: Autor

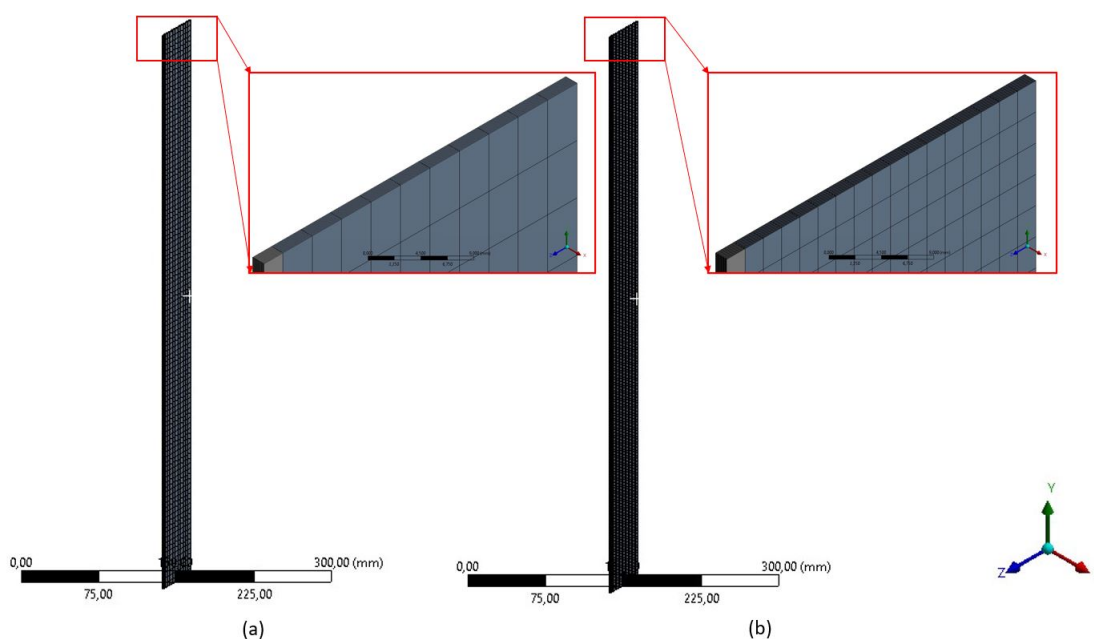
Tabela 7 – Propriedade da liga de alumínio 6061-T6 a temperatura de 24 °C

Propriedade	Valor
Densidade, $\rho_m [kg/m^3]$	2700
Poisson, ν	0.33
Módulo de Elasticidade, $E [GPa]$	68.9
Tensão de Escoamento, $\sigma_y [MPa]$	276

Fonte: Autor

da placa foi utilizada para fixá-la, e a condição de contorno imposta foi restrição nos deslocamentos em $x = y = z = 0$. Em uma das faces da placa, uma carga de pressão uniforme (P) foi aplicada. Esta carga de pressão é igual à pressão máxima encontrada com a malha F1 na subseção de verificação do modelo fluido, de modo a simular a carga de pressão hidráulica a que as placas são expostas quando acopladas ao domínio do fluido. Na posição correspondente à metade da largura da placa, foi aplicada a condição de simetria ao longo de seu sentido longitudinal (plano XY).

Figura 7 – Exemplos de malhas utilizadas na verificação do domínio sólido: (a) Malha E3 e (b) malha E1. As superfícies cinzas visíveis no detalhe ampliado são as regiões usadas para fixar as placas.



Fonte: Autor

Novamente, aplicamos o método GCI para estimar as incertezas. Como parâmetro chave, escolheu-se a deflexão no ponto médio (δ_m). A Tabela 8 apresenta

as características das malhas e os valores obtidos para o parâmetro selecionado. Finalmente, a tabela 9 apresenta a quantificação da incerteza do modelo estrutural e, como pode ser observado, a incerteza obtida para a malha E1 está muito baixa, confirmando que esta malha está adequada para o estudo.

Tabela 8 – Características das malhas utilizadas no estudo de verificação do domínio sólido e valores do parâmetro chave

Malha	N° Elementos	$h[mm]$	r	$\delta_m[mm]$
E1	74800	0.9607	1.3116	0.5783
E2	33150	1.2600	1.3168	0.5777
E3	14520	1.6592	-	0.5767

Fonte: Autor

Tabela 9 – Incertezas numéricas do domínio sólido

Parâmetro	$\phi_{ext}^{21}[mm]$	$e_a^{21}[\%]$	$GCI_{21}[\%]$
δ_m	0.5792	0.1038	0.2040

Fonte: Autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta dissertação, as simulações FSI foram realizadas para um conjunto de vazões que estão apresentadas na Tabela 10. Estas velocidades de entrada foram selecionadas de modo a se obter uma velocidade no canal de refrigeração variando de 8,2 m/s à 17,68 m/s. Todas as simulações foram realizadas em regime permanente e estático; e foram rodadas até que os critérios de convergência fossem alcançados, quais sejam: resíduos de todas as equações de conservação iguais ou menores do que 10^{-6} , variáveis globais estáveis ao longo das iterações e alvo residual de deslocamento de malha inferior a 0,5%.

Tabela 10 – Velocidades simuladas nesta dissertação

Simulação	$v_o[m/s]$	$v_{in}[m/s]$
1	8,20	6,00
2	9,26	6,77
3	10,10	7,39
4	10,95	8,01
5	11,79	8,62
6	12,63	9,24
7	13,47	9,85
8	14,31	10,47
9	15,16	11,08
10	16,00	11,70
11	16,84	12,32
12	17,68	12,93

Fonte: Autor

Utilizando a Equação 2.1, determina-se a velocidade de Miller da montagem de combustíveis aqui analisada, que no caso foi de 16,84 m/s, que está coerente com o reportado por Oliveira e Mattar Neto (2011) (16,86 m/s).

Todas as simulações foram realizadas em um PC AMD Ryzen 9 5950X 16-Core Processor, 3,40 GHz, com 64 GB de RAM. A tabela 11 apresenta o número de iterações necessárias para convergência dos casos 1 e 2, para cada uma das velocidades simuladas:

5.1 Resultados do Caso 1

As Figuras 8 e 9 apresentam, respectivamente, os contornos de magnitude da velocidade e pressão próximos ao bordo de ataque das placas de elemento combustível, no plano médio dos canais de refrigeração. Verifica-se nestas imagens que, a medida em que a velocidade do escoamento aumenta, e por conseguinte

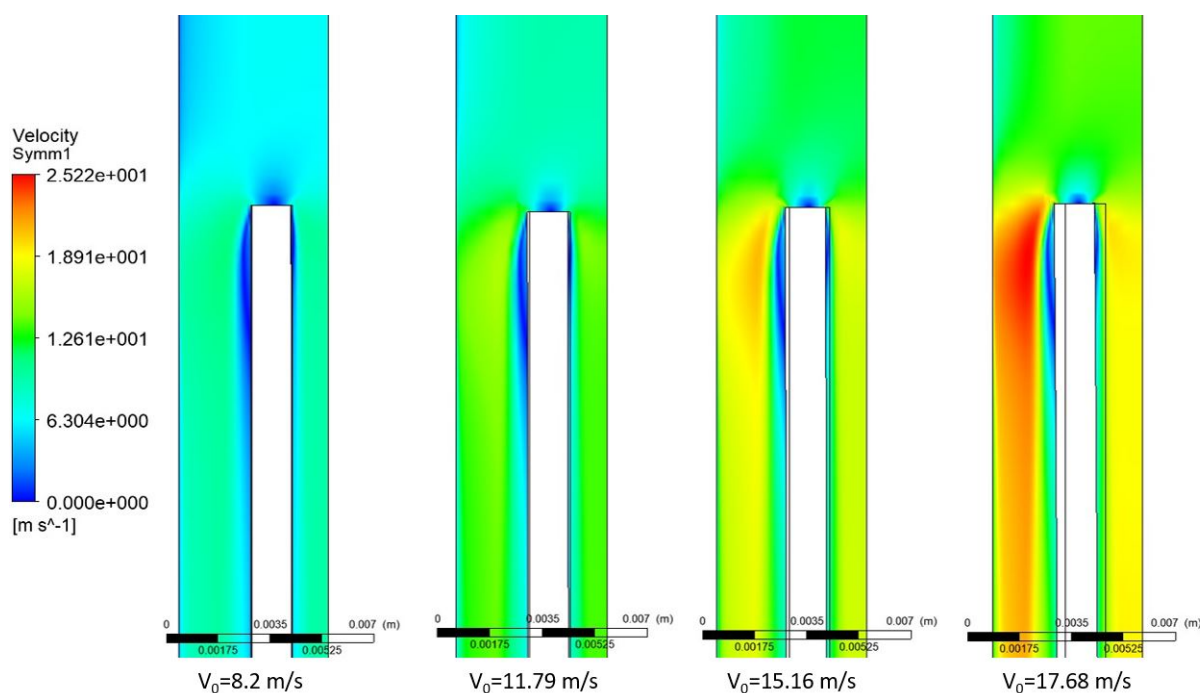
Tabela 11 – Numero de iterações necessárias até a convergência

v_o [m/s]	N° Iterações	
	Caso 1	Caso 2
8,20	10	11
9,26	12	11
10,10	13	12
10,95	13	12
11,79	17	13
12,63	14	14
13,47	15	16
14,31	18	19
15,16	22	25
16,00	29	27
16,84	39	36
17,68	64	63

Fonte: Autor

as deformações das placas, aumentam também as diferenças nos contornos de pressão e velocidade entre os canais de refrigeração.

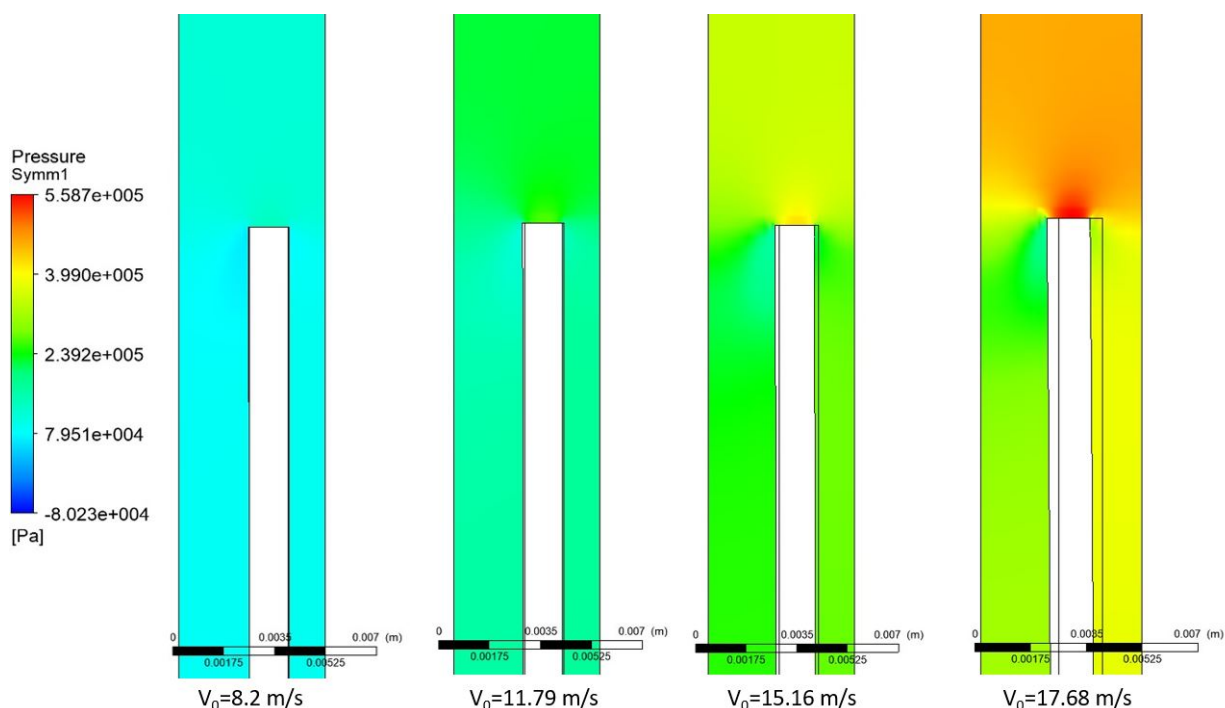
Figura 8 – Contornos de velocidade ao longo do plano médio dos canais e próximos ao bordo de ataque das placas para várias velocidades.



Fonte: Autor

Para o pós-processamento, foram criadas linhas teste ao longo da linha central axial da placa de elemento combustível, e os deslocamentos totais da malha foram obtidos. A Figura 10 mostra um exemplo desta linha central axial, que se estende do bordo de ataque ao bordo de fuga, utilizada no Caso 1. É necessário mencionar que esta imagem foi gerada utilizando o recurso de expansão de simetria

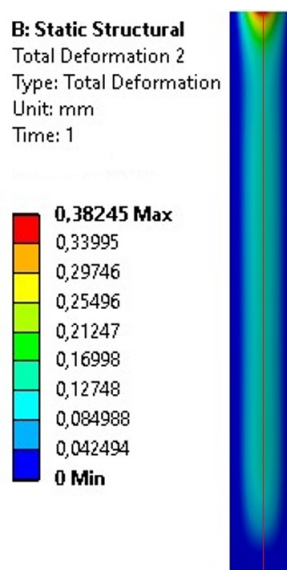
Figura 9 – Contornos de pressão ao longo do plano médio dos canais e próximos ao bordo de ataque das placas para várias velocidades.



Fonte: Autor

disponível no ANSYS. A partir destes deslocamentos, foi possível gerar o perfil de deflexão estático da placa combustível, conforme apresenta a Figura 11.

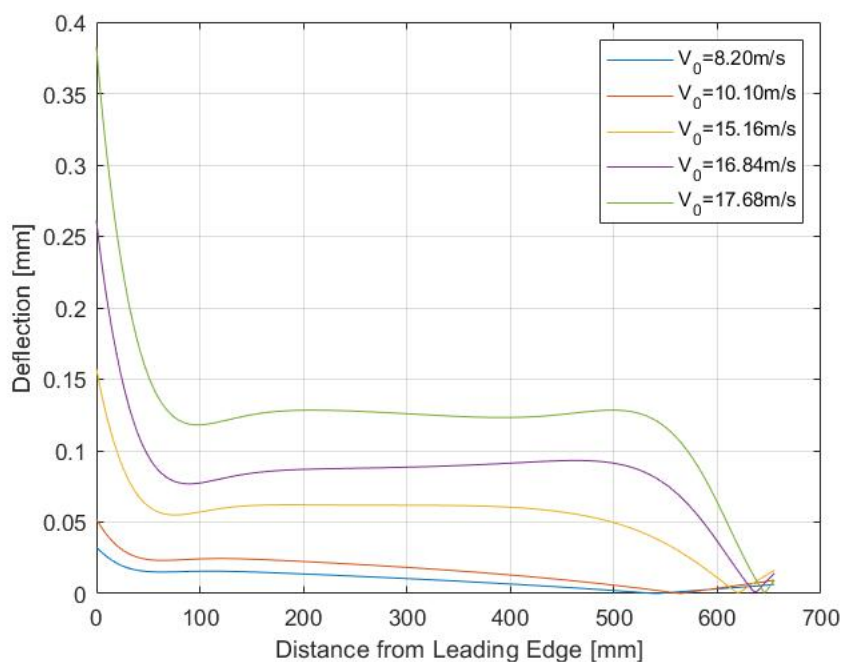
Figura 10 – Linha central usada para extrair o perfil de deflexão axial das placas (neste caso, $v_0 = 17.68$ m / s).



Fonte: Autor

O perfil obtido se mostra coerente com o esperado, apresentando aumento da deflexão em razão do aumento da vazão. Nota-se também que, para todas

Figura 11 – Perfil de deflexão da placa para diferentes velocidades de escoamento - malha E1.



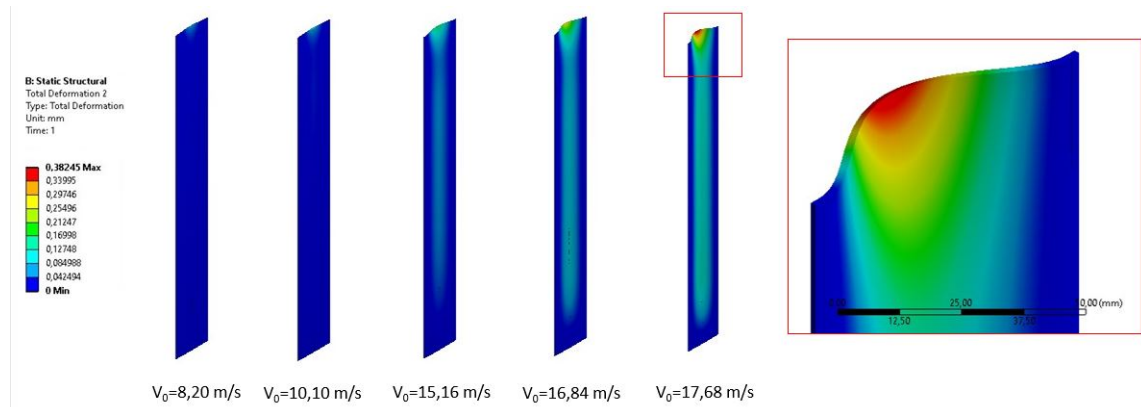
Fonte: Autor

as velocidades, a maior deflexão ocorreu no bordo de ataque da placa. Outrossim, é possível notar um aumento de deflexão próximo ao bordo de fuga da placa para a velocidade mais alta, fenômeno que já havia sido observado por outros autores (KENNEDY, 2015), (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2018), (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2019), (MANTECÓN, 2019).

A Figura 12 mostra os gráficos de contorno de deflexão das placas para diferentes velocidades de escoamento. Nestas imagens, novamente foi utilizado o recurso de expansão de simetria do ANSYS, de modo a apresentar uma placa completa. Lembrando que modelamos a placa de elemento combustível da esquerda, e utilizamos a condição de simetria, verificamos que a condição de contorno está bem posta, uma vez que o fenômeno de deslocamentos das placas contíguas em direções opostas foi corretamente capturado. Verifica-se também que, além da divergência estática no bordo de ataque, a placa pode sofrer também deflexões ao longo do comprimento.

Mantecón observou que a pressão dinâmica do fluido sobre a placa é proporcional ao quadrado da velocidade do fluido e, a partir dessa observação, propôs uma metodologia para prever a velocidade crítica de escoamento de forma numérica (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2018), (MANTECÓN, 2019), (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2019). Plotando-se a deflexão máxima da placa e o quadrado

Figura 12 – Contornos de deflexão da placa para diferentes velocidades de escoamento. Fluxo na direção -y. Fator de escala de deflexão de 43x.

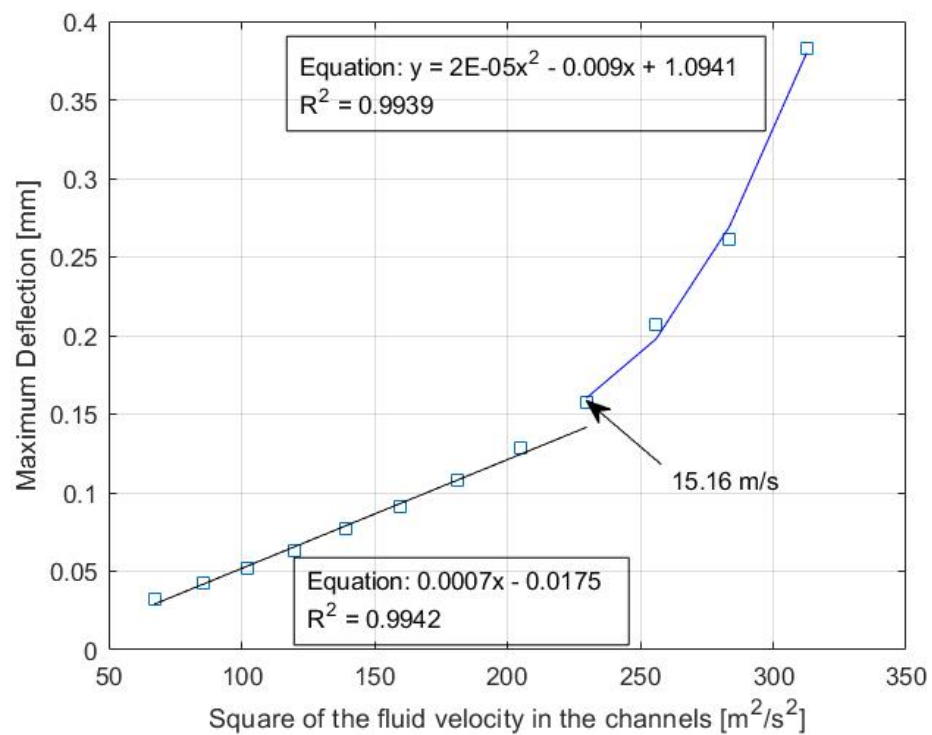


Fonte: Autor

da velocidade média do refrigerante nos canais, o referido autor notou que era possível perceber duas tendências nos dados apresentados: para velocidades mais baixas, notou-se que deflexão máxima das placas é uma função linear do quadrado da velocidade do fluido nos canais; porém, após um certo valor, notou-se que a deflexão aumenta mais rapidamente e que o comportamento não mantinha mais uma tendência linear. Neste ponto então, é onde se identifica a velocidade crítica.

Portanto, ao realizar análises de regressão estatística e avaliar o coeficiente de determinação (R-quadrado) com o objetivo de obter o valor mais alto possível, chegamos à Figura 13. Nessa figura, podemos identificar que a velocidade crítica obtida para o Caso 1 é de 15,16 m/s, e a máxima deflexão da placa nessa velocidade é de $\delta_{Caso1} = 0,1572$ mm.

Figura 13 – Máxima deflexão da placa como função do quadrado da velocidade no canal - Caso 1.

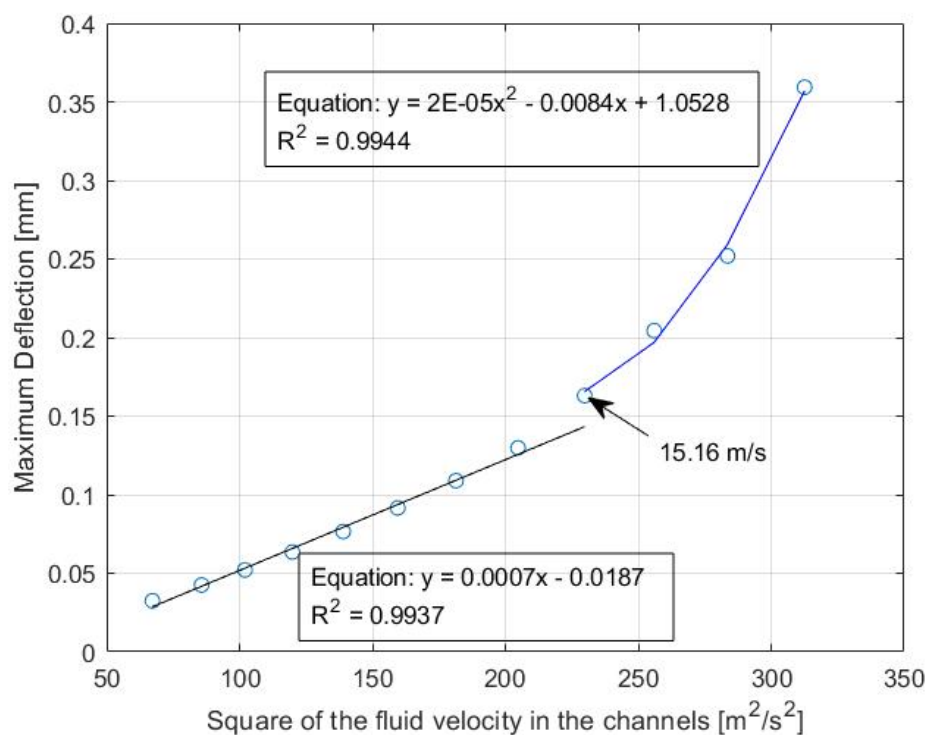


Fonte: Autor

5.2 Resultados do Caso 2

No Caso 2, onde utilizou-se lei de parede para modelar a camada limite, foi aplicado o mesmo critério da subseção anterior para identificar a velocidade crítica; qual seja, a velocidade em que a deflexão máxima da placa varia de um comportamento linear para não linear. Desta maneira, analisando-se a Figura 14, que apresenta a deflexão máxima da placa versus a velocidade ao quadrado é possível identificar que a velocidade do fluido onde a forma da curva foi alterada é igual a 15,16 m/s; isto é, a mesma identificada para o Caso 1. Já a máxima deflexão encontrada para o Caso 2 foi de $\delta_{Caso2} = 0,1630$ mm.

Figura 14 – Máxima deflexão da placa como função do quadrado da velocidade no canal - Caso 2.



Fonte: Autor

5.3 Comparação com a Velocidade de Miller

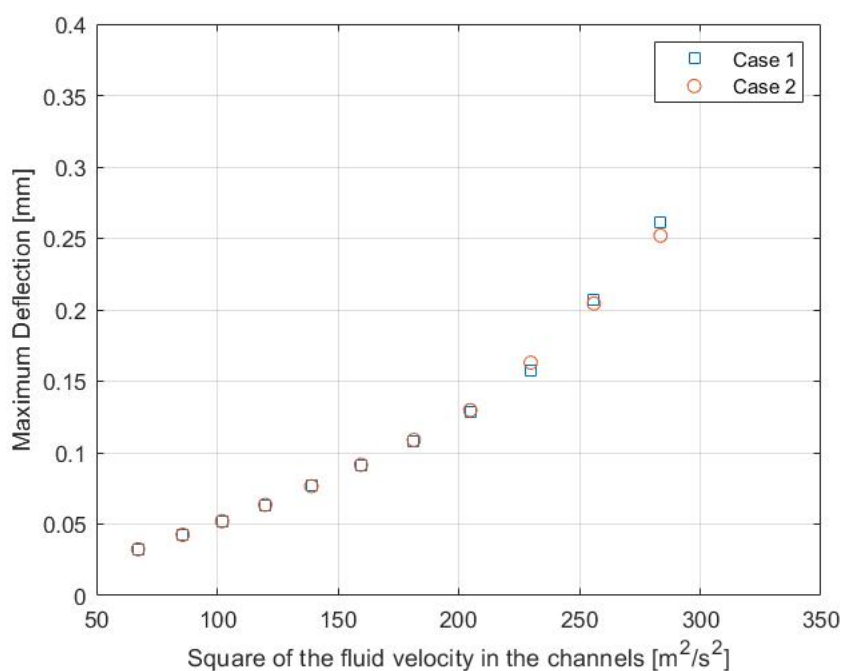
Seguindo a tendência iniciada por Zabriskie (ZABRISKIE, 1958) (ZABRISKIE, 1959), uma comparação possível de ser feita é relacionar a velocidade crítica obtida nesta pesquisa com a velocidade crítica calculada analiticamente através da fórmula de Miller (Equação 2.1). Logo, fazendo-se a razão do valor obtido nos Casos 1 e 2 ($V_c = 15,16 \text{ m/s}$) pelo valor calculado analiticamente ($V_M = 16,84 \text{ m/s}$), nota-se que o valor obtido numericamente está abaixo da velocidade de Miller em

10%. Assim, constata-se que o valor obtido numericamente é mais conservador que o calculado pela fórmula de Miller.

Kim e Davis (1995), em suas investigações analíticas, também chegaram em uma velocidade crítica 10% abaixo do valor predito pela fórmula de Miller. Como abordado anteriormente nesta dissertação, encontra-se na literatura também resultados experimentais e numéricos, onde foram reportados valores de velocidade crítica menores que os calculados pela formulação de Miller. Nos resultados experimentais de Ho *et al.* (2004), os autores observaram o colapso das placas ocorrendo em uma velocidade média de 78% da velocidade crítica de Miller; e nos estudos numéricos de (WANG *et al.*, 2023b), onde os autores também aplicaram a metodologia prevista por Mantecón, porém, para elementos curvos, obtiveram como resultado a ocorrência da velocidade crítica a cerca de 80% da estimativa teórica de Miller. Estes resultados ratificam que a formulação de Miller é uma hipótese simplificada, e mostraram a necessidade de se impor uma margem de segurança, como já mencionado em algumas referências (MCLAIN; MARTENS, 1964) (IAEA, 1980).

Superpondo os resultados de máxima deflexão da placa em função do quadrado da velocidade dos Casos 1 e 2 (Figura 15), constata-se a sobreposição de resultados até a velocidade de 14,31 m/s. A partir da velocidade crítica obtida (V_c), começam a surgir diferenças nas deflexões obtidas, chegando a uma diferença máxima da ordem de 6% para a maior velocidade.

Figura 15 – Comparação da máxima deflexão da placa como função do quadrado da velocidade no canal.

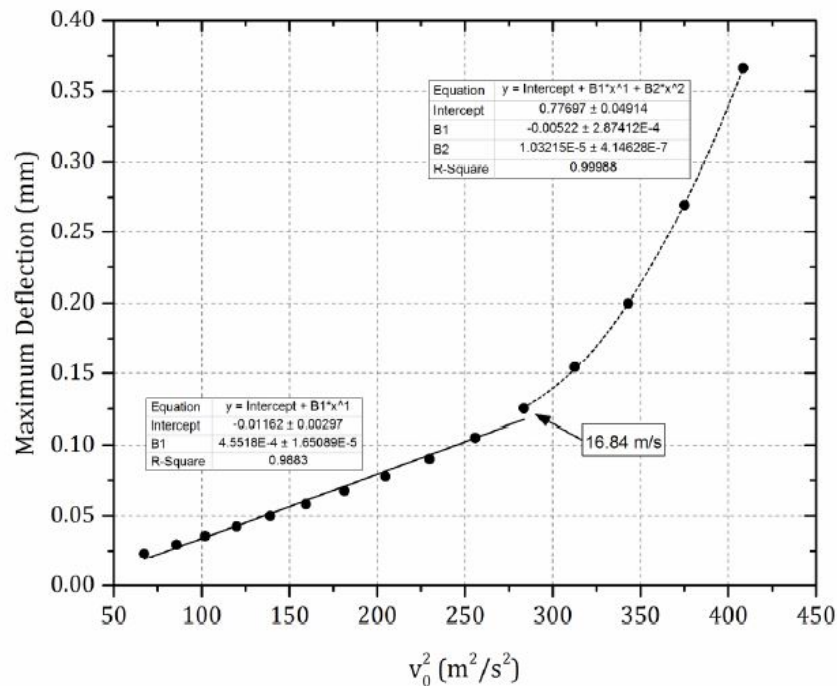


Fonte: Autor

5.4 Comparação com estudos anteriores relacionados ao RMB

No âmbito do desenvolvimento do RMB, já foram realizadas simulações numéricas com o intuito de identificar a velocidade crítica (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2018), (MANTECÓN, 2019). A Figura 16 foi publicada por Mantecón, e nela nota-se que o valor obtido em seu estudo foi de 16,84 m/s, coincidindo exatamente com a fórmula de Miller, e a máxima deflexão encontrada nesta velocidade foi de $\delta_{Mantecón} = 0,1252$ mm.

Figura 16 – Velocidade crítica obtida por Mantecón.



Fonte: Mantecón (2019)

Chama atenção o fato de que, apesar da velocidade crítica obtida numericamente por Mantecón ser maior do que a obtida na presente pesquisa, a máxima deformação encontrada por ele no bordo de ataque da placa está aproximadamente 20% menor do que a encontrada na velocidade crítica do Caso 1. Acredita-se que uma das razões seja devida ao maior rigor observado nesta dissertação na discretização da camada limite.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, investigou-se a contribuição da subcamada viscosa na estabilidade mecânica de placas de combustível nuclear sob condições de fluxo axial, aplicando a metodologia proposta por Javier Mantecón (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2018), (MANTECÓN, 2019); porém, em regime permanente. O modelo adotado é representativo das placas de combustível e canais de refrigeração projetados para o RMB. A estratégia numérica foi baseada no método de interação fluido-estrutura bidirecional. Os resultados importantes do estudo atual podem ser resumidos da seguinte forma:

- A metodologia conseguiu capturar bem o fenômeno para os Casos 1 e 2, sugerindo que a modelagem em regime permanente e estático é viável. Esta abordagem, bem como a aplicação das condições de contorno de simetria, permitem uma significativa economia de poder computacional;
- Os resultados obtidos neste trabalho para caracterizar a instabilidade nas placas estão 10% abaixo do reportado utilizando-se a modelagem em regime transiente e dinâmico realizada por Mantecón (MANTECÓN; MATTAR NETO, 2018), (MANTECÓN, 2019);
- O valor da velocidade crítica obtido numericamente nesta dissertação corresponde a 90% do calculado pela fórmula de Miller, sendo assim mais conservador que este;
- Os resultados dos casos 1 e 2 mostraram que a máxima deflexão foi detectada no bordo de ataque; e, a comparação de seus resultados revelou que os efeitos da subcamada viscosa não são relevantes para a determinação da velocidade crítica; e
- Durante todas as análises, as placas de combustível não sofreram um colapso abrupto ou catastrófico a qualquer velocidade, e nenhuma deformação plástica foi notada.

Pode-se concluir, portanto, que a principal contribuição da presente pesquisa é que ela comprovou que a modelagem da camada limite é suficiente para estudar a velocidade crítica de elementos combustível do tipo placa. Os resultados aqui obtidos também sugerem que as simulações numéricas de interação fluido-estrutura podem ser realizadas em regime permanente e com a aplicação

de condições de contorno do tipo simetria, onde possível. Esta abordagem resulta em uma significativa economia de tempo e recursos computacionais, podendo ser utilizada durante o projeto de novos conjuntos combustíveis, dando suporte aos métodos tradicionais.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, D.; TANNEHILL, J. C.; PLETCHER, R. H. **Computational fluid mechanics and heat transfer**. [S.l.]: Taylor & Francis, 2016.
- ANDRZEJEWSKI, C. de S. **Estudo da deposição termoforética de partículas na fabricação de fibras óticas**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2005.
- ASME. **Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer**. [S.l.]: American Society of Mechanical Engineers, 2009. (Normes ASME). ISBN 9780791832097.
- BANG, C. S.; RANA, Z. A.; KÖNÖZSY, L.; RODRIGUEZ, V. M.; TEMPLE, C. Numerical investigation and fluid-structure interaction (fsi) analysis on a double-element simplified formula one (f1) composite wing in the presence of ground effect. **Fluids**, MDPI, v. 7, n. 2, p. 85, 2022.
- CEKIRGE, H.; URAL, E. Critical coolant flow velocities in reactors having parallel fuel plates. **Computers Mathematics with Applications**, v. 4, n. 2, p. 153–156, 1978. ISSN 0898-1221. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0898122178900251>>.
- CURTIS, F. G.; EKICI, K.; FREELS, J. D. Fluid-structure interaction modeling of high-aspect ratio nuclear fuel plates using comsol. In: **COMSOL Multiphysics Conference**. [S.l.: s.n.], 2013.
- CURTIS, F. G.; FREELS, J. D.; EKICI, K. Predicting large deflections of multiplate fuel elements using a monolithic fsi approach. **Nuclear Science and Engineering**, Taylor Francis, v. 189, n. 1, p. 82–92, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00295639.2017.1379304>>.
- CURTIS, F. G.; FREELS, J. D.; EKICI, K. Deflection predictions of involute-shaped fuel plates using a fully-coupled numerical approach. **Annals of Nuclear Energy**, v. 130, p. 184–191, 2019. ISSN 0306-4549. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454919300702>>.
- DAVIS, D.; KIM, G. Design against hydrodynamic instabilities in flat-plate type fuel element assemblies. 1991. Disponível em: <https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:23059740>.
- DOAN, R. The engineering test reactor—a status report. **Nucleonics (US) Ceased publication**, Phillips Petroleum Co., Idaho Falls, Idaho, v. 16, 1958.
- EL-WAKIL, M. M. **Nuclear Power Engineering**. [S.l.]: McGraw-Hill Companies, 1962.
- EZKURRA, M.; ESNAOLA, J. A.; MARTINEZ-AGIRRE, M.; LERTXUNDI, U.; ETXEBERRIA, U. Analysis of one-way and two-way fsi approaches to characterise the flow regime and the mechanical behaviour during closing manoeuvring operation of a butterfly valve. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2018.

EÇA, L.; HOEKSTRA, M. **An Evaluation of Verification Procedures for CFD Applications**. 2002. 8-13 p.

EÇA, L.; HOEKSTRA, M.; ROACHE, P. Verification of calculations: An overview of the 2nd lisbon workshop. 06 2005.

GLASSTONE, S.; SESONSKE, A. **Nuclear reactor engineering: reactor systems engineering**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.

GRONINGER, R. D.; KANE, J. J. Flow induced deflections of parallel flat plates. **Nuclear Science and Engineering**, Taylor Francis, v. 16, n. 2, p. 218–226, 1963. Disponível em: <<https://doi.org/10.13182/NSE63-A26503>>.

HO, M. K.; HONG, G.; MACK, A. Experimental investigation of flow-induced vibration in a parallel plate reactor fuel-assembly. In: THE UNIVERSITY OF SYDNEY, SYDNEY, NSW 2006, AUSTRALIA. **Australasian Fluid Mechanics Conference**. [S.l.], 2004.

IAEA. **Research Reactor Core Conversion From the Use of Highly Enriched Uranium to the Use of Low Enriched Uranium Fuels: Guidebook**. International Atomic Energy Agency, 1980. (TECDOC Series, 233). Disponível em: <<https://www.iaea.org/publications/484/research-reactor-core-conversion-from-the-use-of-highly-enriched-uranium-fuels-guidebook>>.

JENSEN, P.; MARCUM, W. Predicting critical flow velocity leading to laminate plate collapse—flat plates. **Nuclear Engineering and Design**, v. 267, p. 71–87, 2014. ISSN 0029-5493. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549313006560>>.

JENSEN, P. J. Application of sandwich structure analysis in predicting critical flow velocity for a laminated flat plate. 2013.

JESSE, C. J. **Analysis of the potential for flow-induced deflection of nuclear reactor fuel plates under high velocity flows**. [S.l.]: University of Missouri-Columbia, 2015.

JOHANSSON, E. B. Hydraulic instability of reactor parallel-plate fuel assemblies. 7 1959. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/4221444>>.

KANE, J. J. The effect of inlet spacing deviations on the flow-induced deflections of flat plates. **Nuclear Science and Engineering**, Taylor Francis, v. 15, n. 3, p. 305–308, 1963. Disponível em: <<https://doi.org/10.13182/NSE63-A26441>>.

KAUFMANN, A. R. **Nuclear Reactor Fuel Elements: Metallurgy and Fabrication**. [S.l.]: Interscience Publishers, 1962.

KENNEDY, J. C. **Hydro-mechanical analysis of low enriched uranium fuel plates for University of Missouri Research Reactor**. Tese (Doutorado) — University of Missouri–Columbia, 2012.

KENNEDY, J. C. **Development and experimental benchmarking of numeric fluid structure interaction models for research reactor fuel analysis**. [S.l.]: University of Missouri-Columbia, 2015.

KIM, G.; DAVIS, D. Hydrodynamic instabilities in flat-plate-type fuel assemblies. **Nuclear Engineering and Design**, v. 158, n. 1, p. 1–17, 1995. ISSN 0029-5493. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002954939501023B>>.

KIM, Y. T.; SCARTON, H. A. Flow-Induced Bending of Rectangular Plates. **Journal of Applied Mechanics**, v. 44, n. 2, p. 207–212, 06 1977. ISSN 0021-8936. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.3424025>>.

MANTECÓN, J. G. **Evaluation of mechanical stability of nuclear fuel plates under axial flow conditions**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2019.

MANTECÓN, J. G.; MATTAR NETO, M. Numerical methodology for fluid-structure interaction analysis of nuclear fuel plates under axial flow conditions. **Nuclear Engineering and Design**, Elsevier, v. 333, p. 76–86, 2018.

MANTECÓN, J. G.; MATTAR NETO, M. Numerical analysis on stability of nuclear fuel plates with inlet support comb. **Nuclear engineering and Design**, Elsevier, v. 342, p. 240–248, 2019.

MANTECÓN, J. G.; MATTAR NETO, M. Numerical investigation on the effects of geometric deviations and materials properties on flow-induced deflections of fuel plates. **Annals of Nuclear Energy**, v. 140, p. 107118, 2020. ISSN 0306-4549. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454919306280>>.

MCLAIN, S.; MARTENS, J. H. **Reactor Handbook, Vol. IV**. [S.l.]: Interscience, 1964.

MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. **AIAA Journal**, v. 32, n. 8, p. 1598–1605, 1994. Disponível em: <<https://doi.org/10.2514/3.12149>>.

MILLER, D. R. Critical flow velocities for collapse of reactor parallel-plate fuel assemblies. 8 1958. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/4199355>>.

OLIVEIRA, C. A. de; MATTAR NETO, M. Flow velocity calculation to avoid instability in a typical research reactor core. 2011. Disponível em: <https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:43050775>.

PAVONE, S. J.; SCARTON, H. A. Laminar flow induced deflections of stacked plates. **Nuclear Engineering and Design**, v. 74, n. 1, p. 79–89, 1983. ISSN 0029-5493. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029549383901413>>.

PELLETIER, D.; ROACHE, P. J. Verification and validation of computational heat transfer. In: _____. **Handbook of Numerical Heat Transfer**. John Wiley Sons, Ltd, 2000. cap. 13, p. 417–442. ISBN 9780470172599. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470172599.ch13>>.

PERROTTA, J. A.; SOARES, A. J. Rmb: the new brazilian multipurpose research reactor. **ATW**, 2015.

ROACHE, P. **Verification and Validation in Computational Science and Engineering**. Hermosa Publishers, 1998. ISBN 9780913478080. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=ENRIQgAAGAAJ>>.

ROSENBERG, G. S.; YOUNGDAHL, C. K. A simplified dynamic model for the vibration frequencies and critical coolant flow velocities for reactor parallel plate fuel assemblies. **Nuclear Science and Engineering**, Taylor Francis, v. 13, n. 2, p. 91–102, 1962. Disponível em: <<https://doi.org/10.13182/NSE62-A26138>>.

SANTOS, M. M. dos. **Avaliação estrutural de um elemento combustível do tipo placa para um reator nuclear compacto**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/d.85.2019.tde-08082019-140803>>.

SCAVUZZO, R. J. Hydraulic instability of flat parallel-plate assemblies. **Nuclear Science and Engineering**, Taylor Francis, v. 21, n. 4, p. 463–472, 1965. Disponível em: <<https://doi.org/10.13182/NSE65-A18790>>.

SMISSAERT, G. E. Static and dynamic hydroelastic instabilities in mtr-type fuel elements part i. introduction and experimental investigation. **Nuclear Engineering and Design**, v. 7, n. 6, p. 535–546, 1968. ISSN 0029-5493. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029549368901039>>.

SMISSAERT, G. E. Static and dynamic hydroelastic instabilities in mtr-type fuel elements part ii. theoretical investigation and discussion. **Nuclear Engineering and Design**, v. 9, n. 1, p. 105–122, 1969. ISSN 0029-5493. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029549369900521>>.

SMITH, R. L. **Dynamic pressure limits for flat plates as related to nuclear fuel elements**. National Aeronautics and Space Administration, 1968. v. 4417. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=M5CGfvNiPnwC>>.

STROMQUIST, W.; SISMAN, O. **High Flux Reactor Fuel Assemblies Vibration and Water Flow. Problem Assignment No. TX5-12**. [S.l.], 1948.

TORRES, W. M.; UMBEHAUN, P. E.; ANDRADE, D. A.; SOUZA, J. A. B. **A MTR FUEL ELEMENT FLOW DISTRIBUTION MEASUREMENT PRELIMINARY RESULTS**. 2003.

WAMBSGANSS, M. Second-order effects as related to critical coolant flow velocities and reactor parallel plate fuel assemblies. **Nuclear Engineering and Design**, v. 5, n. 3, p. 268–276, 1967. ISSN 0029-5493. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029549367900647>>.

WANG, G.; BOJANOWSKI, C.; DAVE, A.; JALUVKA, D.; HU, L.-W.; WILSON, E. Numerical simulations of flow-induced deflections in mtr leu fuel plate due to channel size disparity. **Nuclear Technology**, Taylor Francis, v. 0, n. 0, p. 1–22, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00295450.2023.2205971>>.

WANG, Y.; BIAN, X.; WANG, T.; HUANG, G. Numerical investigation of hydraulic instability of circular arc shell-type fuel elements under axial flow conditions. **Nuclear Engineering and Design**, v. 405, p. 112185, 2023. ISSN 0029-5493. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549323000341>>.

WEAVER, D. S.; UNNY, T. E. The Hydroelastic Stability of a Flat Plate. **Journal of Applied Mechanics**, v. 37, n. 3, p. 823–827, 09 1970. ISSN 0021-8936. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.3408615>>.

ZABRISKIE, W. L. An experimental evaluation of the critical flow velocity formulas for parallel plate assemblies. 10 1958. Disponible em: <<https://www.osti.gov/biblio/4273529>>.

ZABRISKIE, W. L. An experimental evaluation of the effect of length-to-width ratio on the critical flow velocity of single plate assemblies. 9 1959. Disponible em: <<https://www.osti.gov/biblio/4228702>>.

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

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