



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

**Autarquia associada à Universidade de São Paulo**

**Modelagem numérica de um elemento combustível para estudos hidrodinâmicos**

**PEDRO HENRIQUE DI GIOVANNI SANTOS**

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

**Orientador:**

**Prof. Dr. Delvonei Alves de Andrade**

**São Paulo**

**2018**

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

**Modelagem numérica de um elemento combustível para estudos hidrodinâmicos**

**PEDRO HENRIQUE DI GIOVANNI SANTOS**

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

**Orientador:**

**Prof. Dr. Delvonei Alves de Andrade**

**Versão Corrigida**

**Versão original disponível no IPEN**

**São Paulo**

**2018**

Fonte de Financiamento: IPEN - CNEN

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

Como citar:

SANTOS, P. H. D. G. **Modelagem numérica de um elemento combustível para estudos hidrodinâmicos**. 2018. 108 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

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

Santos, Pedro Henrique Di Giovanni  
Modelagem numérica de um elemento combustível para estudos hidrodinâmicos / Pedro Henrique Di Giovanni Santos; orientadora Delvonei Alves de Andrade. -- São Paulo, 2018. 108 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Reatores) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2018.

1. Modelagem numérica. 2. Combustível nuclear MTR. 3. Reator Nuclear de Pesquisas IEA-R1. 4. Distribuição de vazão. 5. ANSYS CFX. I. Andrade, Delvonei Alves de , orient. II. Título.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico primeiramente a Deus que nos deu seu Filho amado Jesus para pregar a todos a verdade da Boa-Nova do Reino de Deus. Verdade está que consolidou os pilares que me suportaram em afago, atenção, incentivo e apoio incondicional – Família.

## **AGRADECIMENTOS ESPECIAIS**

Agradeço novamente a Deus, ao Brasil, minha família e aos demais cidadãos brasileiros. Atores diretos ou indiretos que contribuíram para a oportunidade ímpar de obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear de Reatores pelo ilustríssimo, fraterno e saudoso Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, autarquia associada à Universidade de São Paulo.

## AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado não poderia chegar a um bom resultado sem o precioso e inestimável apoio de várias pessoas.

Gostaria de agradecer inicialmente ao meu orientador Prof. Dr. Delvonei Alves de Andrade, por todo empenho, paciência e atenção que guiaram os rumos deste trabalho em todas suas etapas. Não obstante, fica o agradecimento especial ao Prof. Dr. Edvaldo Angelo pessoas que confiou, acreditou e depositou créditos sobre a minha capacidade em ingressa o desafio do Mestrado.

Sou igualmente grato a todos os colegas que fiz nessa jornada, especialmente Pedro Ernesto Umbehaun, Walmir Maximo Torres, Nikolas Scuro, Alfredo Alvim e Gabriel Angelo pelo suporte técnicos nas incansáveis dúvidas, preocupação cotidiana e amizade estabelecida durante os anos de IPEN. Agradeço também de maneira geral a todos os colegas que fiz no Centro de Engenharia Nuclear os quais ajudaram a suavizar o cotidiano dessa trajetória e estiveram presentes nos momentos importante.

Não posso deixar de agradecer minha amada mãe Maria Elisa Di Giovanni, meu pai Antônio Luiz Matarazzo Lisboa Santos, minha Irmã Marianna Di Giovanni e minha doce Edna Rocha da Silva, pelo suporte, apoio, orientação quanto aos meus objetivos pessoais e profissionais e sugestões no desenvolvimento do trabalho.

A comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) pela concessão da bolsa de estudo.

## RESUMO

**SANTOS, P.H.G.** Modelagem numérica de um elemento combustível para estudos hidrodinâmicos. 2018. 108p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN. São Paulo.

É visível, no mundo atual, a elevada dependência da utilização de energia elétrica. Na tentativa de suprir as necessidades de consumo e impedir o déficit energético, a sociedade faz uso dos mais diversos artifícios para a obtenção desta. Nesta perspectiva, a utilização da energia nuclear vem sempre sendo recolocada nos fóruns mundiais de geração elétrica revelando-se uma alternativa eficiente, limpa e de baixo custo. Devido à complexidade enfrentada durante a instalação de empreendimentos nucleares diversos protocolos, equipamentos e ações de segurança são empregados para garantir a operação segura da planta nuclear ao longo de sua vida útil. Reatores de pesquisas prestam suporte no desenvolvimento de novas tecnologias e práticas de segurança, desde que estes tenham seus fenômenos e comportamentos bem compreendidos como base de partida. O presente trabalho destina-se a criar suporte para a atualização da análise de segurança do reator de pesquisa IEA-R1. Testes numéricos foram conduzidos para validar a viabilidade de construção de um modelo computacional capaz de apresentar resultados similares aos dados experimentais já existentes. O trabalho mostra que a distribuição de vazão no elemento combustível ocorre de forma não uniforme com os canais laterais recebendo vazões menores do que os centrais. Os canais periféricos recebem uma vazão média de 95% da vazão principal enquanto os canais centrais recebem até 105% da vazão principal. Os resultados são ligeiramente diferentes dos resultados experimentais apresentados anteriormente, entretanto apresentam uma boa correlação com outros estudos numéricos em elementos combustíveis similares.

**Palavras-chave:** Modelagem numérica; CFD; Combustível nuclear; hidrodinâmica; Reator Nuclear de Pesquisas IEA-R1; Distribuição de vazão; ANSYS CFX.

## ABSTRACT

**SANTOS, P.H.G.** Numerical modeling of a fuel element for hydrodynamic studies. 2018. 108p. Dissertation (Masters in Nuclear Technology) – Institute of Energy and Nuclear Research – IPEN. São Paulo.

The world today is highly dependent on the use of electric energy. To meet the needs of consumption and to prevent deficit, society uses the most various devices to obtain energy. In this perspective, the use of nuclear energy is always being replaced in the world's electric generation forums, proving to be an efficient, clean and low-cost alternative. Due to the complexity faced during the installation of nuclear undertakings several protocols, equipment and safety actions are employed to ensure the safe operation of the nuclear plant throughout its useful life. Researchers support the development of new security technologies and practices, as long as they have their phenomena and behaviors well understood as the starting point. The present work aims to create support for updating the safety analysis of the IEA-R1 research reactor. Numerical tests were conducted to validate the feasibility of constructing a computational model capable of simulating the existing experimental data. It shows that the flow distribution in the fuel element occurs non-uniformly with the lateral channels receiving smaller flows than the central ones. The peripheral channels receive a mean flow rate of 95% of the main flow while the central channels receive up to 105% of the main flow. The results are slightly different from the previous experimental results, however they have a good correlation with other numerical studies on similar fuel elements.

**Keywords:** Numerical modeling; CFD; Nuclear fuel; Hydrodynamic.



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados computacionais para vazão principal de 6,08 kg/s, elemento com pino de sustentação.....	81
Tabela 2 – Dados computacionais para vazão principal de 5,17 kg/s, elemento com pino de sustentação.....	82
Tabela 3 – Dados computacionais para vazão principal de 4,05 kg/s, elemento com pino de sustentação.....	83
Tabela 4 – Dados computacionais para vazão principal de 6,08 kg/s, elemento sem pino de sustentação.....	93
Tabela 5 – Dados computacionais para vazão principal de 5,17 kg/s, elemento sem pino de sustentação.....	94
Tabela 6 – Dados computacionais para vazão principal de 4,05 kg/s, elemento sem pino de sustentação.....	95
Tabela 7 – Resultados computacionais para vazão principal de 6,08 kg/s com o modelo de malha estruturada nos canais .....	99
Tabela 8 – Comparação da malha não estruturada e estruturada nos canais .....	100

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração de um circuito termodinâmico básico .....	18
Figura 2 – Ilustração do Espaçamento de topo entre elementos combustíveis .....	22
Figura 3 – Espaçamento lateral entre elementos do núcleo.....	22
Figura 4 – Instrumentação para medida de perda de carga no DMPV-01 .....	27
Figura 5 – Levantamento experimental da perda de carga total do elemento DMPV-01 ....	28
Figura 6 – Distribuição da velocidade e vazão para diferentes vazões .....	30
Figura 7 – Elemento de ensaio do MNR e pontos de medição da velocidade .....	32
Figura 8 – Resultados computacional e experimental do MNR.....	33
Figura 9 – Resultados experimentais e computacionais do reator IEA-R1 .....	34
Figura 10 – Distribuição da vazão nos canais periféricos de Park .....	35
Figura 11 – Ilustração simplificada do sistema de resfriamento do reator IEA-R1 .....	37
Figura 12 – O esquema do núcleo do IEA-R1.....	38
Figura 13 – Espaçamento real entre cada elemento combustível .....	39
Figura 14 – Vista em seção do elemento combustível padrão .....	40
Figura 15 – Esquema da placa combustível no conjunto .....	41
Figura 16 – Processo de fabricação das placas combustíveis.....	42
Figura 17 – Ilustração da regiões de entrada, placas e saída .....	43
Figura 18 – Esquema de entrada do fluido refrigerante no núcleo.....	45
Figura 19 – Ilustração do comportamento do escoamento de fluido refrigerante .....	46
Figura 20 – Ilustração esquemática da divisão do escoamento na região de entrada.....	48
Figura 21 – Ilustração do estreitamento do escoamento no bocal de saída.....	49
Figura 22 – Detalhamento da superfície de estagnação de fluido e aberturas de escoamento .....	50
Figura 23 – Regiões de tomada de pressão no experimento.....	52
Figura 24 – Exemplo de transformação do domínio contínuo em domínio discretizado .....	57
Figura 25 – Exemplos de tipos de malhas .....	57
Figura 26 – Diagrama de blocos: hierarquia de processos para análises CFD.....	60
Figura 27 – Ilustração detalhada da placa de suporte lateral .....	61

Figura 28 – Detalhamento da região de entrada e detalhamento da simplificação de geometria .....	62
Figura 29 – Detalhamento da região dos canais .....	62
Figura 30 – Detalhamento da região de saída.....	64
Figura 31 – Modelagem do domínio tridimensional .....	65
Figura 32 – Planos de Simetria.....	67
Figura 33 – Diagrama de blocos para refinamento da malha .....	68
Figura 34 – Ilustração indicando número de elementos em função de uma propriedade ou grandeza.....	69
Figura 35 – Indicação das interfaces de simetria e regiões de paredes .....	71
Figura 36 – Captura de tela do ANSYS: Parâmetros globais para criação da malha.....	72
Figura 37 – Propriedade da ferramenta <i>On: Proximity and Curvature</i> .....	72
Figura 38 – Malha tridimensional na região de entrada, plano de simetria.....	73
Figura 39 – Malha tridimensional na região de saída, plano de simetria .....	74
Figura 40 – Planos para tomada de dados nos canais de escoamento .....	80
Figura 41 – Detalhamento do Efeito da parede lateral e pino de sustentação na distribuição de vazão, para vazão de entrada de 6,08 kg/s .....	86
Figura 42 –Efeito da parede lateral e pino de sustentação na distribuição de vazão, para vazão de entrada de 5,17 kg/s .....	87
Figura 43 –Efeito da parede lateral e pino de sustentação na distribuição de vazão, para vazão de entrada de 4,05 kg/s .....	88
Figura 44 – Detalhamento da zonas de recirculação e contração do fluido na região do bocal com paredes laterais, vazão de entrada de 6,08 kg/s .....	89
Figura 45 – Zonas de recirculação e contração do fluido na região do bocal com paredes laterais, vazão de entrada de 5,17 kg/s .....	90
Figura 46 – Zonas de recirculação e contração do fluido na região do bocal com paredes laterais, vazão de entrada de 5,17 kg/s .....	91
Figura 47 – Criação de malha com controle estruturado.....	97
Figura 48 – Diferença entre malha estruturada e não estruturada nos canais.....	98

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultado da distribuição de vazão experimental IEA-R1 .....	54
Gráfico 2 – Resultado normalizado .....	55
Gráfico 3 – Aproximação de Stern e Wilson para determinação do número de elementos .	78
Gráfico 4 – Resultado computacional da distribuição de vazão para as três faixas de vazões estudadas.....	84
Gráfico 5 – Respostas computacionais normalizadas em relação a vazão média .....	85
Gráfico 6 – Resultado computacional da distribuição de vazão sem pino de sustentação ...	96
Gráfico 7 – Comparação dos resultados computacionais com e sem pino de sustentação ..	96

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	Um panorama da energia nuclear no mundo .....	13
1.2	Um panorama da indústria nuclear no Brasil .....	15
1.3	Problemática Histórica .....	17
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>24</b>
2.1	Objetivos específicos .....	24
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>REATOR IEA-R1</b> .....	<b>36</b>
4.1	Introdução.....	36
4.2	Elemento combustível IEA-R1.....	39
4.3	Elemento combustível padrão do IEA-R1 .....	40
<b>5</b>	<b>HIDRODINÂMICA DO REATOR IEA-R1</b> .....	<b>44</b>
5.1	Introdução.....	44
5.2	Hidrodinâmica no elemento combustível padrão do IEA-R1 .....	45
5.3	Distribuição de vazão.....	47
5.4	Dados experimentais .....	51
<b>6</b>	<b>METODOLOGIA CIENTÍFICA</b> .....	<b>56</b>
6.1	Equações de governo.....	58
6.2	Programa CFD .....	59
6.3	Geometria (modelo tridimensional região fluido) .....	60
6.3.1	Criação do modelo fluido.....	60
6.3.2	Simetria do modelo fluido.....	66
6.4	Malha volumétrica .....	68
6.4.1	Criação da malha volumétrica.....	69
6.5	Pré-processamento .....	74
6.5.1	Regime de escoamento.....	74
6.5.2	Modelo de turbulência.....	75
6.5.3	Condições de contorno gerais .....	75
<b>7</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>77</b>
7.1	Definição do número de elementos na malha .....	77

7.1.1	Influência do pino de sustentação e faces de simetria no número de elementos	78
<b>7.2</b>	<b>Análise dos resultados.....</b>	<b>79</b>
7.2.1	Efeito do pino de sustentação.....	91
<b>7.3</b>	<b>Comparação da malha estruturada com malha não estruturada .....</b>	<b>97</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>101</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>103</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Um panorama da energia nuclear no mundo

A prosperidade econômica e tecnológica das nações, bem como o aumento populacional, geram um crescimento inevitável da demanda de energia elétrica no mundo.

Marcado por pautas envolvendo temas como sustentabilidade ambiental e questões de saúde pública, o Século XXI traz à humanidade o dilema de fornecer uma quantidade de energia nunca antes imaginada, buscando matrizes energéticas menos nocivas e prejudiciais à natureza e às futuras gerações. Atualmente grande parte da energia consumida no mundo é proveniente de fontes que utilizam combustíveis emissores de poluentes (derivados de petróleo, gás natural, biomassa, lixo e outros), responsáveis pela liberação de toneladas de rejeitos e gases nocivos na atmosfera anualmente. Tendo em vista este cenário, a geração elétrica nuclear é sempre recolocada na agenda dos fóruns mundiais de energia.

A utilização da energia nuclear com finalidade civil e comercial, teve início no ano de 1957 na cidade de *Shippingport, Pennsylvania*. Desde então, os setores público e privado perceberam o alto potencial pacífico da energia atômica no desenvolvimento sócio-econômico das nações, ocasionando na criação de diversos reatores ao redor do mundo [1].

Segundo a *International Energy Agency* (IEA) em seu relatório anual, *International Energy Outlook 2016 (IEO2016)* [2], as projeções para 2040 apontam que as fontes de energia renováveis terão o maior crescimento no período, prevendo um aumento médio do consumo de energia renovável de 2,6% ao ano entre 2012 e 2040. Dentre as fontes renováveis, a energia nuclear terá o segundo maior crescimento, com um aumento do consumo projetado em 2,3% ao ano.

No atual panorama, a energia nuclear que já vem sendo utilizada há mais de 60 anos aparece no cenário global como uma grande aliada às pautas deste Século. Apresentando uma grande capacidade energética, e oferecendo preço altamente competitivo frente as demais fontes de energia limpa e sustentáveis. A energia nuclear ainda tem um grande potencial a ser explorado, agregando aos empreendimentos nucleares mais segurança e eficiência na produção elétrica.

De um lado, a experiência acumulada com a geração elétrica nuclear pelo mundo propiciou avanços tecnológicos e forneceu em 2015 cerca de 12% da energia consumida na Terra. De outro lado, porém, junto a expansão da indústria nuclear, surgiu também a insegurança da opinião pública. Após superar os acidentes de Three Mile Island e Chernobyl, o acidente de Fukushima em 2011 fez o mundo reaver o debate ligado à segurança dos reatores e à destinação dos rejeitos radioativos. Em alguns países, o crescimento da indústria nuclear chegou a ser suspenso parcial ou totalmente. Entretanto outras grandes potências mundiais como Estados Unidos, China, Rússia, Índia e Coreia do Sul prometeram altos investimentos na construção de novas plantas nucleares, o que mantém as projeções do IEO2016 [2] de crescimento desde 2012.

Segundo a instituição Eletrobrás Eletronuclear e dados da IEA, até fevereiro de 2016 haviam 442 reatores nucleares em operação destinados à geração de energia elétrica, fornecendo um total de 384.057 GW elétricos. Outros 66 novos reatores encontram-se em fase de construção e adicionando uma capacidade instalada de 65.088 GW elétricos. Entre janeiro de 2014 e dezembro de 2015, 15 novos reatores entraram em operação e outros 10 tiveram sua construção iniciada [3] e [4].

No final de 2015 a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) apontou que, dentre os reatores destinados à geração de energia, 140 tinham entre 20 e 30 anos de atividade, e 250 tinham mais de 30 anos aproximando-se de sua vida útil que em média é de 50 anos de operação. Este grupo de reatores a caminho da inatividade operacional terá um dentre os seguintes destinos: ou terá de ser substituído por novos reatores; ou terá sua vida útil estendida mediante investimentos e aplicações de novas tecnologias; ou será substituído por outras matrizes energéticas. [3]

Destinada a crescer e se fortalecer, a energia nuclear tem investimentos estimados em 4,5 trilhões de dólares entre 2012 e 2050, onde cerca de 40% deste investimento deverá ser destinado à extensão da vida útil dos empreendimentos nucleares já existentes. O restante deste total deverá ser aplicado na construção de novas plantas e centros de pesquisas, os quais deverão fomentar a demanda tecnológica da indústria nuclear em busca de mais segurança e eficiência. [5]



## 1.2 Um panorama da indústria nuclear no Brasil

O Brasil tem uma longa relação com as atividades relacionadas ao setor nuclear. Signatário do programa Átomos para a Paz, de 1953 (que tinha por objetivo difundir o uso pacífico da energia nuclear pelo mundo), foi o primeiro país do Hemisfério Sul a possuir um reator nuclear e um dos poucos países no mundo a conseguir dominar o ciclo completo de enriquecimento de urânio. [6]

Buscando atender às necessidades técnico-científicas e auxiliar o desenvolvimento do setor nuclear brasileiro, nos últimos anos foram construídos no total, 4 reatores de pesquisas relacionados a diversas áreas de interesse.

O primeiro reator nuclear de pesquisa construído no país foi o IEA-R1, em 1957, instalado no campus da Universidade de São Paulo dentro Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), o IEA-R1 encontra-se em operação produzindo conhecimento científico e atendendo parte da demanda nacional de radiofármacos. Os outros reatores de pesquisas em operação são: IPR-R1 de 1960; ARGONAUTA de 1965; e IPEN/MB-01 de 1988. [7]

Está prevista, para os próximos anos, a construção do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB). Fruto de parceria com outros países, o RMB deve integrar o grupo de reatores de pesquisa brasileiro, suprimindo a demanda nacional de produção de radiofármacos e suplementando a capacidade dos demais reatores de pesquisas, impulsionando a tecnologia nuclear nas próximas décadas.

Apesar disso, a matriz energética brasileira ainda explora muito pouco a geração nuclear. Segundo dados da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) em 2016 a capacidade total instalada no Brasil era de 156.039 GW, dos quais eminentemente 61,37% correspondem as usinas hidroelétricas e apenas 1,27% as usinas termonucleares. [8]

Embora a fonte hidráulica forneça energia de forma limpa e barata, esta é altamente vulnerável as condições climáticas. Períodos prolongados de escassez hídrica podem resultar em crise energética, como visto entre os anos de 2013 a 2015, onde a seca stressou o setor elétrico brasileiro causando prejuízos sócio-econômicos. Nesse contexto, além de incrementar a indústria hidroelétrica, a geração nuclear pode desempenhar importante papel, tratando-se de uma fonte térmica eficaz e com valores competitivos, permitindo que os

reservatórios das hidrelétricas exerçam como principal função a regulação das fontes renováveis intermitentes de energia.

O parque gerador nuclear brasileiro é composto por duas usinas nucleares situadas no Estado do Rio de Janeiro. Angra I em operação comercial desde 1985 e Angra II em operação comercial desde 2001, segundo a ANEEL ambas têm capacidade de fornecer 1.990 GW. A usina Angra III ainda em fase de construção, tem indicativo de operação para 2019 e adicionará 1.350 GW a matriz brasileira. [8] e [9]

Compete esclarecer que no Brasil, a Constituição Federal de 1988 coloca a União como total responsável pelas atividades nucleares. Fica a cargo da União a responsabilidade sob à geração de energia elétrica, a regulamentação, licenciamento, controle da segurança nuclear e outras atividades relativas ao setor nuclear. [10]

Nas últimas décadas os altos e baixos do Programa Nuclear Brasileiro (PNB), ocasionaram em ociosidade do setor nuclear nacional durante longos períodos. A estatal EPE (Empresa de Pesquisas Energéticas) destaca em seu relatório de 2016 a importância de uma aplicação contínua do PNB:

“Não menos importante para a viabilização de novos projetos nas diversas atividades relativas ao setor nuclear, a retomada da construção de Angra III e a expansão de novas unidades de geração nuclear visa permitir uma contínua formação e recomposição técnico-profissional, de maneira a reter o conhecimento já adquirido pelo setor no país”. [11]

Cabe destacar que em 2008 duas ações importante foram adotadas para apoiar o crescimento do setor nuclear. A primeira, foi a criação do Comitê de Desenvolvimento do Programa Nuclear Brasileiro (CDPNB) com o objetivo de estabelecer novas diretrizes ao PNB e garantir continuidade das ora existentes. A segunda ação de importância, foi a determinação de estudos preliminares para a seleção de novas localidades para futuras instalações nucleares de potência. [11]

Ainda em 2016 as ações adotadas pela CDPNB caminham sem grandes incentivos fiscais e amparo legislativo. A finalização de Angra II e a retomada das obras de Angra III denotam um avanço, entretanto uma efetiva retomada do PNB resultara em discussões iminentes como:

- Estabelecer a política brasileira de gerenciamento de rejeitos radioativos, que reza sobre a segurança e armazenamento final dos rejeitos nucleares;
- Extensão de novas piscinas nas usinas nucleares, destinadas a alocar os combustíveis irradiados enquanto não se concluem o depósito final;
- Construção de um repositório intermediário de longa duração para combustíveis irradiados;
- Construção de um repositório nacional de rejeitos de baixa e média atividade;
- Revisão do marco constitucional para o setor nuclear;
- Avanços no processo de licenciamento nuclear.

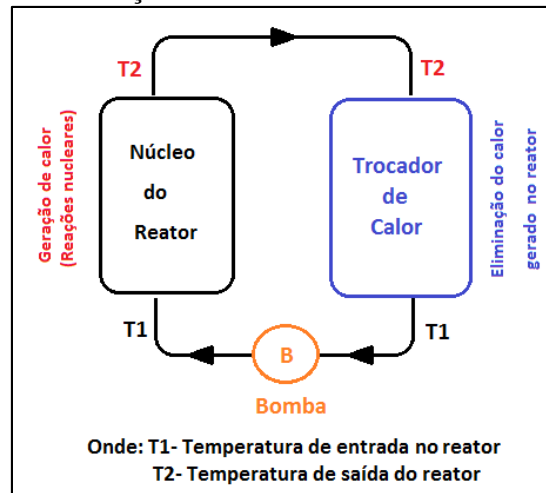
O investimento no setor nuclear é um ponto economicamente estratégico, tendo em vista que o Brasil possui uma das maiores reservas de Urânio do mundo e é um dos poucos países a dominar o ciclo completo do enriquecimento do urânio. Ademais o setor nuclear atua como um forte indutor de indústria de alta tecnologia que acabam gerando soluções em diversas áreas não diretamente relacionada com o setor nuclear.

### **1.3 Problemática Histórica**

Embora existam diferentes aplicações para os reatores nucleares de fissão, pode-se afirmar que o princípio de funcionamento e operação ocorre de maneira similar em qualquer modelo. Todo reator possui, a princípio, fluido refrigerante, elementos moderadores, refletores, absorvedores, emissores, barreira de contenção e elementos combustíveis; e de um modo geral, a instalação nuclear pode ser entendida como um circuito termodinâmico básico [2].

Na literatura [12], entende-se por circuito termodinâmico qualquer série de processos que envolvem energia térmica, onde ao final de um ciclo, ou volta completa, o sistema regressa ao seu estado inicial. A Figura 1 exemplifica o circuito descrito de maneira simplificada.

Figura 1 – Ilustração de um circuito termodinâmico básico



Fonte: Autor.

Devido à grande variedade e complexidade dos equipamentos que compõem um reator nuclear, o projeto e desenvolvimento de empreendimentos nucleares demanda altos investimentos financeiros. Para a efetiva construção de uma planta nuclear, diversos estudos, simulações e testes devem ser realizados para garantir a operação segura da instalação durante sua vida útil.

Desde o início de sua operação em 1957 até 1997, o reator IEA-R1 operou com potência térmica de 2 MW. A partir de 1995 foram feitas modificações para que o reator operasse em sua potência térmica máxima de projeto, 5 MW.

Com o início da operação a 5 MW, inspeções visuais nos elementos combustíveis constataram níveis de corrosão mais acentuados nas placas combustíveis laterais (periféricas) dos elementos quando comparadas às placas centrais [7] e [13]. Três possíveis hipóteses foram levantadas para o problema: (I) qualidade da água; (II) composição do material de revestimento; e (III) resfriamento inadequado. Dentre as três hipóteses, ficou constatado que o resfriamento inadequado nas placas laterais era o responsável pela corrosão.

Diante o novo problema, averiguou-se a necessidade da aplicação de estudos termo-hidráulicos mais criteriosos a fim de garantir a operação segura do reator e minimizar a taxa de corrosão nas placas periféricas.

Análises termo-hidráulicas aplicadas ao núcleo do reator são de extrema importância para garantir a operação segura e correta do mesmo. Estas têm por finalidade estudar valores de temperatura, vazão e fluxo de calor nos diferentes elementos que compõem o núcleo, e,

assim, verificar se estes valores estão dentro dos critérios de limites operacionais pré-estabelecidos em projeto.

Crítérios e limites de projeto são pré-definidos, estabelecendo margens de segurança operacionais para combustível de forma a evitar que os mesmos não sofram mudanças geométricas significativas, permitindo assim o correto funcionamento e máximo desempenho do elemento combustível ao longo de sua vida útil no reator.

As margens de segurança operacionais para reatores de pesquisa tipo piscina aberta em estado estacionário (operação normal) são baseadas em critérios estabelecidos no TECDOC-233 [14] da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, em inglês). Estes são:

- **Temperatura de mistura do refrigerante inferior a 100°C**: Estando o reator de pesquisa sujeito a pressão atmosférica, é importante que a água não atinja temperaturas superiores a 100°C a fim de evitar a transformação da água líquida em vapor [12];
- **Temperatura média na superfície do revestimento inferior a 95°C**: Altas temperaturas favorecem a oxidação acelerada do revestimento (alumínio) do combustível, reduzindo sua vida útil, e podendo levar a vazamento do composto combustível e seus rejeitos radioativos [15];
- **Temperatura máxima na superfície do revestimento inferior à temperatura de ebulição nucleada ou ONB (*Onset of Nucleate Boiling*)**: Quando a temperatura superficial do revestimento é ligeiramente maior que a temperatura de saturação do refrigerante (100°C para água sob pressão atmosférica), dá-se início ao processo de ebulição nucleada onde há a geração de pequenas bolhas de vapor em alguns pontos da superfície; bolhas de vapor prejudicam a transferência de calor entre revestimento e refrigerante[13]. Este processo não ocorre no reator IEA-R1, pois a temperatura de superfície deve ser mantida inferior a 95 °C. [16];
- **Velocidade de escoamento no canal de refrigeração inferior à velocidade crítica de instabilidade mecânica da placa combustível**: Devido às pequenas dimensões do canal de escoamento, o fluido refrigerante, quando em altas velocidades, gera deformações nas placas combustíveis podendo causar o fechamento parcial ou total do canal de escoamento, o que poderia causar risco de vazamento e mesmo de

superaquecimento no local. Um critério de segurança, estabelecido para a operação correta, é manter a velocidade do fluido refrigerante até o equivalente a  $2/3$  da velocidade crítica; [17] e [18];

- **Fluxo de calor máximo inferior ao fluxo de calor para instabilidade de fluxo:** O surgimento de vapor no canal, mesmo que localmente, altera a densidade e viscosidade do fluido em escoamento. A alteração da densidade mesmo que momentaneamente, causa a diminuição da perda de carga no canal ocasionando no aumento da velocidade de escoamento. Fluxo de calor elevados podem ocasionar em geração demasiada de vapor [19];
- **Fluxo de calor máximo inferior ao fluxo de calor crítico (*Burnout*):** Quando a temperatura de ebulição nucleada aumenta, mais vapor é criado, provocando um isolamento térmico em alguns pontos do revestimento. Este isolamento de vapor faz com que o calor gerado no revestimento não se dissipe, conseqüentemente o fluxo de calor da placa combustível chega ao seu valor máximo, denominado fluxo de calor crítico. Após o ponto crítico, a temperatura do revestimento sobe rapidamente [20];
- **DNB (*Departure from Nucleate Boiling – Partida de Ebulição Nucleada*):** Corresponde a condição física na qual o fluxo de calor crítico (*Burnout*) se torna iminente, ocasionando em uma acelerada taxa de formação de bolhas de vapor gerando não só condição de ONB como posteriormente ebulição pelicular. Este fenômeno é local e faz com que a temperatura na superfície do revestimento se eleve, podendo ocasionar em fusão do mesmo. [21] e [22].

Tendo em vista a variedade de critérios estabelecidos, a análise termo-hidráulica é distinta para cada reator; fatores como: distribuição do fluxo de calor, características geométricas, propriedades dos materiais utilizados, e taxa de vazão de refrigerante através do elemento combustível, afetam cada parâmetro de segurança citado anteriormente.

A descrição mais detalhada do núcleo do reator IEA-R1, assim como do elemento combustível está presente no capítulo 4 desta dissertação. Neste capítulo está presente a descrição da geometria dos canais retangulares de resfriamento, espessura das placas combustíveis, demais medidas e cotas de interesse além da descrição da placa matriz e da montagem do núcleo.

Atualmente o reator IEA-R1 opera com uma configuração onde o núcleo do reator conta com 20 elementos combustíveis, 4 elementos de controle, 1 irradiador de berílio central e alguns outros componentes periféricos que contém material a ser irradiado para estudos diversos e fabricação de radiofármacos.

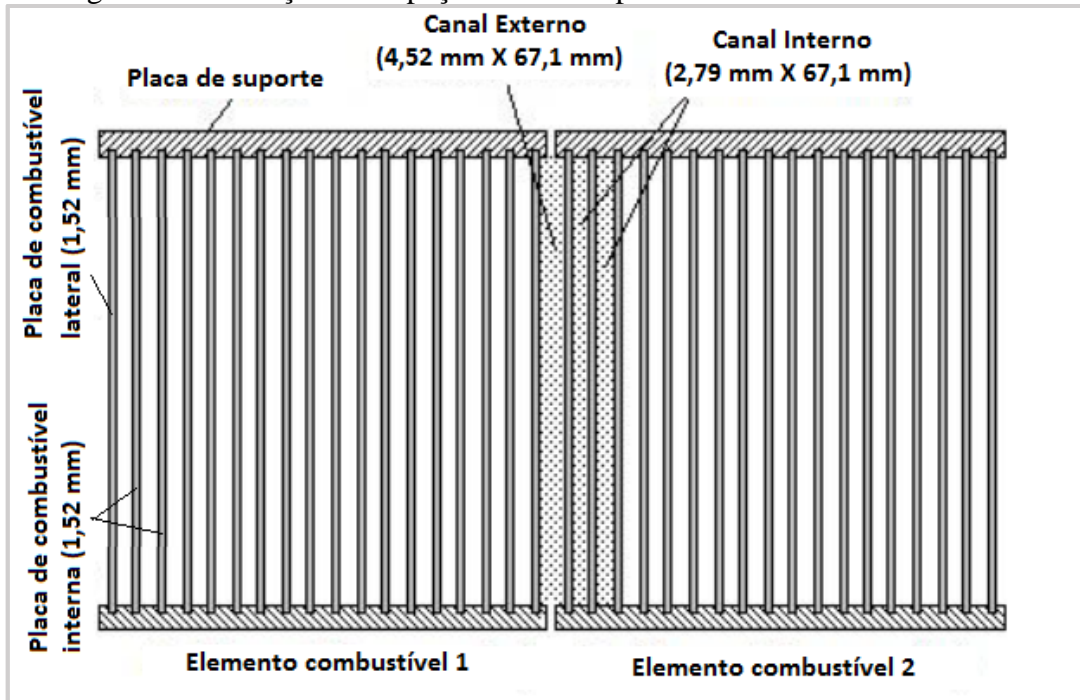
A Agência Internacional de Energia Atômica, no TECDOC 233 [14] sugere que a vazão de refrigerante através dos elementos combustíveis pode ser determinada dividindo-se a vazão total da bomba do circuito primário pelo número de elementos combustíveis presentes no núcleo do reator. Este valor não é totalmente verdadeiro, devido ao núcleo do reator conter diversos outros componentes que recebem fluxo de refrigerante.

Conforme discutido por Umbehaun [23], a vazão fornecida pela bomba do primário do reator IEA-R1 é dividida por entre diversos elementos combustíveis e de controle, pelos irradiadores que permitem a passagem de água, por eventuais orifícios não tamponados da placa matriz (placa que suporta e fixa os elementos do núcleo), pelos canais entre elementos combustíveis, e pelos canais entre refletores e irradiadores, ramificando-se na região do coletor.

O escoamento pelos canais internos dos elementos combustíveis e de controle é necessário para promover o resfriamento das placas combustíveis internas. O escoamento pelos canais entre estes elementos tem por finalidade o resfriamento das faces externas das placas combustíveis laterais Figura 2 e Figura 3, já o escoamento pelos canais entre refletores e irradiadores justifica-se e se faz necessário a fim de evitar que ocorra estagnação do refrigerante em qualquer local do núcleo. Com o intuito de evitar que parte da vazão da bomba venha a ser desviada e desperdiçada, passando por orifícios não utilizados da placa matriz, é importante tamponar os mesmos [23].

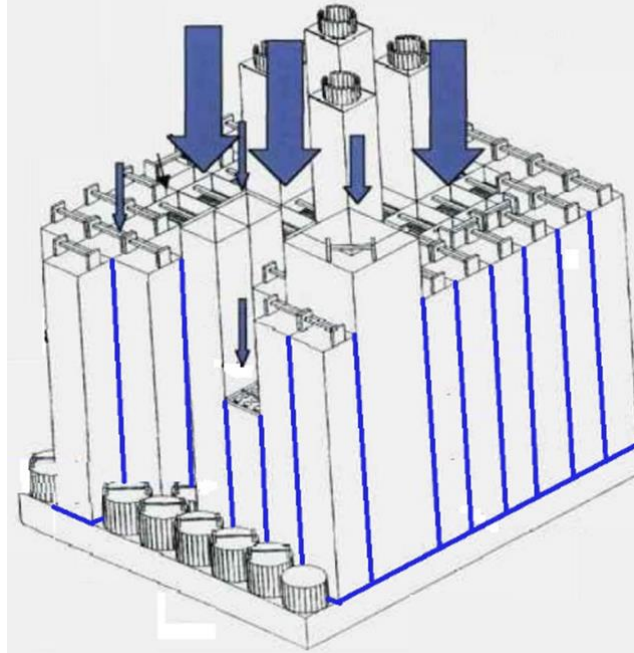
Dados os parâmetros de segurança baseados em critérios estabelecidos no TECDOC-233 [14] da IAEA, e os demais detalhamentos específicos ao núcleo do reator IEA-R1, fica evidente a importância de uma determinação precisa da vazão que passa por cada elemento que compõe o núcleo do IEA-R1, em especial nos elementos combustíveis. Variações sutis no valor da vazão afetam os parâmetros termo-hidráulicos podendo afetar significativamente os parâmetros de controle.

Figura 2 – Ilustração do Espaçamento de topo entre elementos combustíveis



Fonte: Adaptado de [24].

Figura 3 – Espaçamento lateral entre elementos do núcleo



Fonte: Adaptado de [23]

Buscar uma análise mais aprimorada da vazão de refrigerante nestes componentes não implica afirmar que as outras realizadas até então no reator IEA-R1 estejam erradas, e



muito menos que a sugestão do TECDOC-233 [14], onde a vazão de refrigerante através dos elementos combustíveis pode ser determinada dividindo-se a vazão total da bomba do circuito pelo número de elementos combustíveis presentes, seja inadequada. Segundo Umbehaun [23] esta hipótese do TECDOC-233 [14] é razoável para núcleos que operem a baixas potências e não possuam irradiadores ou, então, que possuam irradiadores que permitam a passagem de uma quantidade muito pequena de refrigerante.

No caso específico do reator IEA-R1, há um número expressivo de irradiadores acoplados à placa matriz, causando uma demanda significativa da vazão fornecida pela bomba principal. Portanto, estudos computacionais podem ser aplicados para realizar uma estimativa mais realista da distribuição de vazão no núcleo.

## **2 OBJETIVO**

O objetivo dessa dissertação é a criação de uma modelagem numérica para um elemento combustível do reator de pesquisa IEA-R1 para estudos da dinâmica do escoamento. Para se atingir essa proposta, o desenvolvimento da hidrodinâmica entre os canais do elemento combustível foi analisado por meio de ferramentas computacionais, especificamente, a técnica de dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*) CFD.

Com o intuito de validar o método numérico computacional a fim de assegurar uma metodologia confiável e compatível com a realidade, os resultados computacionais obtidos são validados através da comparação entre os diversos estudos experimentais já realizados ao longo da existência do IEA-R1, bem como de outros estudos numéricos para domínios semelhantes.

### **2.1 Objetivos específicos**

Fornecer, por meio do conhecimento da dinâmica do fluido nos canais do elemento do reator IEA-R1, subsídios para projetos de novos elementos combustíveis;

Prover dados para outros estudos em outros componentes do reator que necessitem de análise hidrodinâmica;

Estabelecer uma metodologia confiável para aplicação no desenvolvimento de futuros reatores como o RMB;

Auxiliar e complementar pesquisas com testes experimentais na área de hidrodinâmica de reatores.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos estudos sobre desenvolvimento hidrodinâmico monofásico entre os canais de um elemento combustível do tipo placa já foram realizados. Análises experimentais e numéricas constituem a vasta bibliografia presente no meio acadêmico e científico. Esse estudo apresenta alguns desses estudos de maneira resumida, buscando enaltecer a relevância do tema.

Ahmed Khedr [25], estudou como pequenas variações dimensionais no processo de fabricação das placas combustíveis e do elemento combustível podem afetar o desenvolvimento termo-hidráulico em cada canal de escoamento de um elemento tipo MTR com placas planas.

Khedr [25] afirma que em casos onde os canais de escoamento a direita e a esquerda da placa combustível são similares em dimensões, é aceitável assumir que cada canal receberá exatamente a metade da energia liberada pela placa combustível e, portanto, é possível resolver analiticamente as equações de massa, energia e momento. Entretanto em casos em que os canais não forem similares em relação as dimensões a presunção anterior não é válida e se deve aplicar análise numérica para o estudo termo-hidráulico. A publicação demonstra que o decréscimo da espessura do canal de refrigeração em combustíveis tipo MTR afeta negativamente a vazão em massa do canal, gerando impactos diretos na temperatura média do fluido refrigerante e na superfície de revestimento.

O excesso de velocidade no fluido refrigerante também pode ocasionar em corrosão acelerada (FAC do inglês *Flow Accelerated Corrosion*) e vibração induzida nos componentes que compõem a instalação nuclear. Estes fenômenos já foram responsáveis por diversos acidentes em componentes e equipamentos de plantas nucleares. Pietralik [26] e Ahmed [27] enumeram diversos fatores que levam a ocorrência de FAC em escoamento monofásico. Naitoh et al [28] aborda a ocorrência de FAC conjunto ao estresse gerado por vibração induzida.

A corrosão por FAC ocorre por meio de um efeito denominado escama de peixe, onde pequenas camadas de material oxidado são retiradas lentamente pela vazão de fluido ao longo do tempo de operação da peça em um processo de erosão. Os defeitos e deformações formados no processo de erosão da superfície podem favorecer condição de ONB, pois criam micro bolsões onde o refrigerante se estagna.

A vibração induzida é um fenômeno observado principalmente nas regiões onde a seção transversal de escoamento é pequena, como ocorre nos canais de escoamento de elementos combustíveis do tipo placa. A vibração induzida é um indicativo de que a velocidade de escoamento pode estar se aproximando da velocidade crítica.

Por definição, velocidade crítica é a velocidade na qual a diferença de pressão formada no duto de escoamento cria esforços suficientes para causar deformação e colapso das placas combustíveis.

O fenômeno de colapso de placas combustíveis foi inicialmente observado no *Oak Ridge High Flux Reactor* [17], na década de 40 e posteriormente no *Engineering Test Reactor at the Idaho National Laboratory* [29] na década de 50. Mais tarde Miller [17] publicou o estudo precursor que continha a primeira formulação teórica para estipular a velocidade crítica.

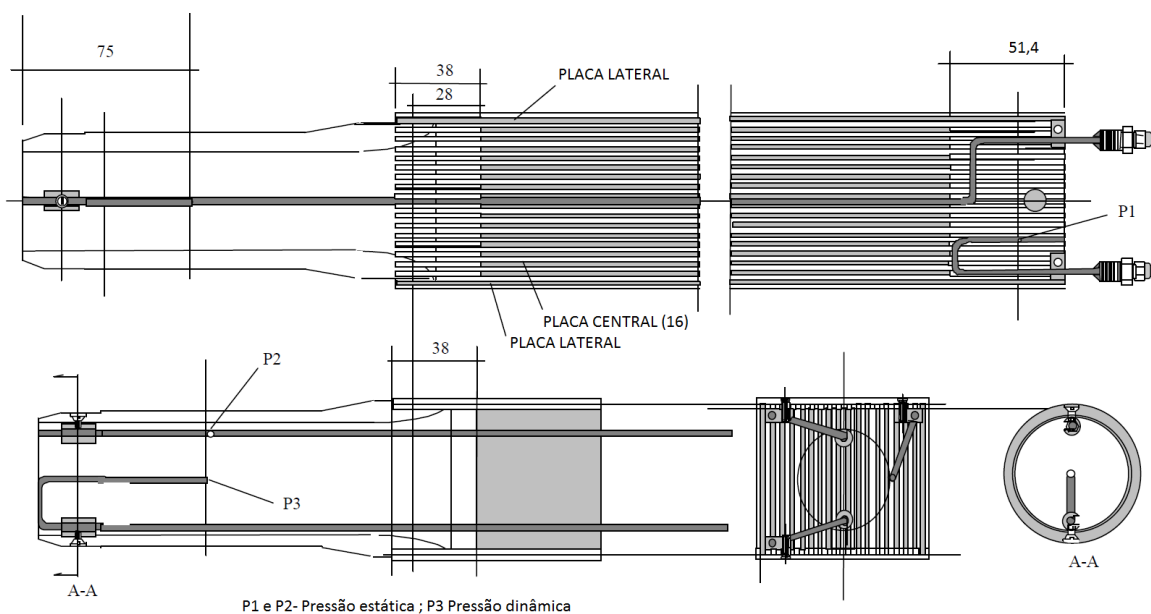
Guillen e Russell em [30] apresentam a estimativa da velocidade crítica de escoamento para um combustível de placa plana curvas, com montagem em forma cilíndrica. Para o estudo, as seguintes prerrogativas foram adotadas: (I) As placas combustíveis são uniformemente curvadas; (II) fluido incompressível, (III) vazão em massa de todos os canais idênticas; (IV) escoamento unidimensional; (V) Revestimento de alumínio; e (VI) geração de calor desprezada. A velocidade crítica de escoamento foi definida analiticamente por meio da equação de Miller [17], posteriormente foi feita uma análise com código computacional para prever a velocidade média do escoamento em cada canal considerando superfície com e sem rugosidade. As análises demonstram que a velocidade de escoamento em condição estacionária é equivalente a 6% da velocidade crítica prevista com a fórmula de Miller [17]. Segundo o estudo a montagem curva das placas proporciona uma rigidez 15 vezes superior à montagem em placa planas.

Em meados de 1990 o Centro de Engenharia Nuclear (CEN) pertencente ao IPEN/SP deu início a construção de uma Bancada de Aferição de Vazão (BAV) no laboratório de termo-hidráulica. A BAV tinha como função principal analisar e estudar a perda de carga em diversos componentes e dispositivo do reator IEA-R1. A utilização da BAV foi fundamental para a criação dos principais experimentos e análises que fundamentam o presente estudo proposto nesta dissertação.

Em 2001 Torres et al [31] estudaram a distribuição de vazão no núcleo do reator IEA-R1 por meio da utilização de um elemento combustível instrumentado, denominado DMPV-01.

O DMPV-01 é um elemento combustível construído por Lima et al [32], desenvolvido apenas para estudos hidrodinâmicos, sua fabricação é feita inteiramente em alumínio, sendo assim, não contém combustível nuclear nas placas. Sua geometria é idêntica aos demais elementos combustíveis utilizados no núcleo do IEA-R1, contendo apenas pequenas modificações para possibilitar a introdução de peças adicionais para realizar a tomada de pressão estática e dinâmica em alguns pontos de interesse conforme pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Instrumentação para medida de perda de carga no DMPV-01

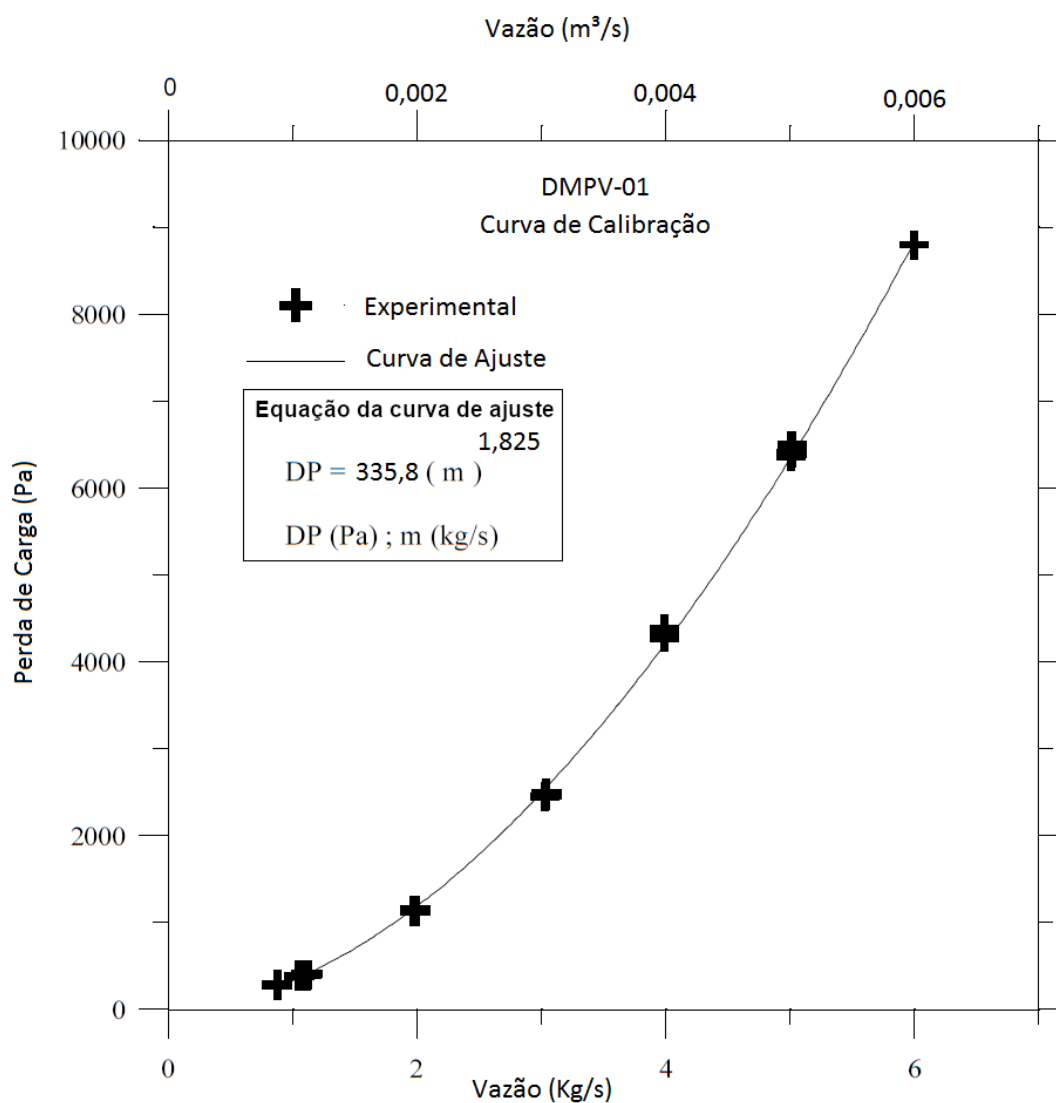


Fonte: Adaptado de [31]

Na publicação de 2001, Torre et al [31] utilizaram a BAV, inicialmente, para realizar o levantamento experimental da perda de carga total do elemento DMPV-01, com base na pressão estática e dinâmica na região de entrada e saída do refrigerante, resultados na Figura 5. Em seguida o DMPV-01 foi introduzido no núcleo do reator IEA-R1 substituindo um elemento combustível temporariamente na placa matriz em diversas posições, com intenção de verificar se havia uma diferença significativa da vazão de refrigerante em regiões distintas do núcleo.

Após um total de 9 testes realizados com diversas modificações, Torre et al [31] concluíram que a vazão em massa distribuída entre os elementos combustíveis do núcleo é homogênea em qualquer região do núcleo, cerca de 4,25kg/s por elemento combustível. Toda via a vazão observada nos elementos era 28% menor do que a vazão estimada anteriormente por método analítico. Segundo o estudo, a diferença entre o valor calculado e medido indicam a possibilidade de ocorrência de desvio de vazão não calculados no núcleo anteriormente.

Figura 5 – Levantamento experimental da perda de carga total do elemento DMPV-01

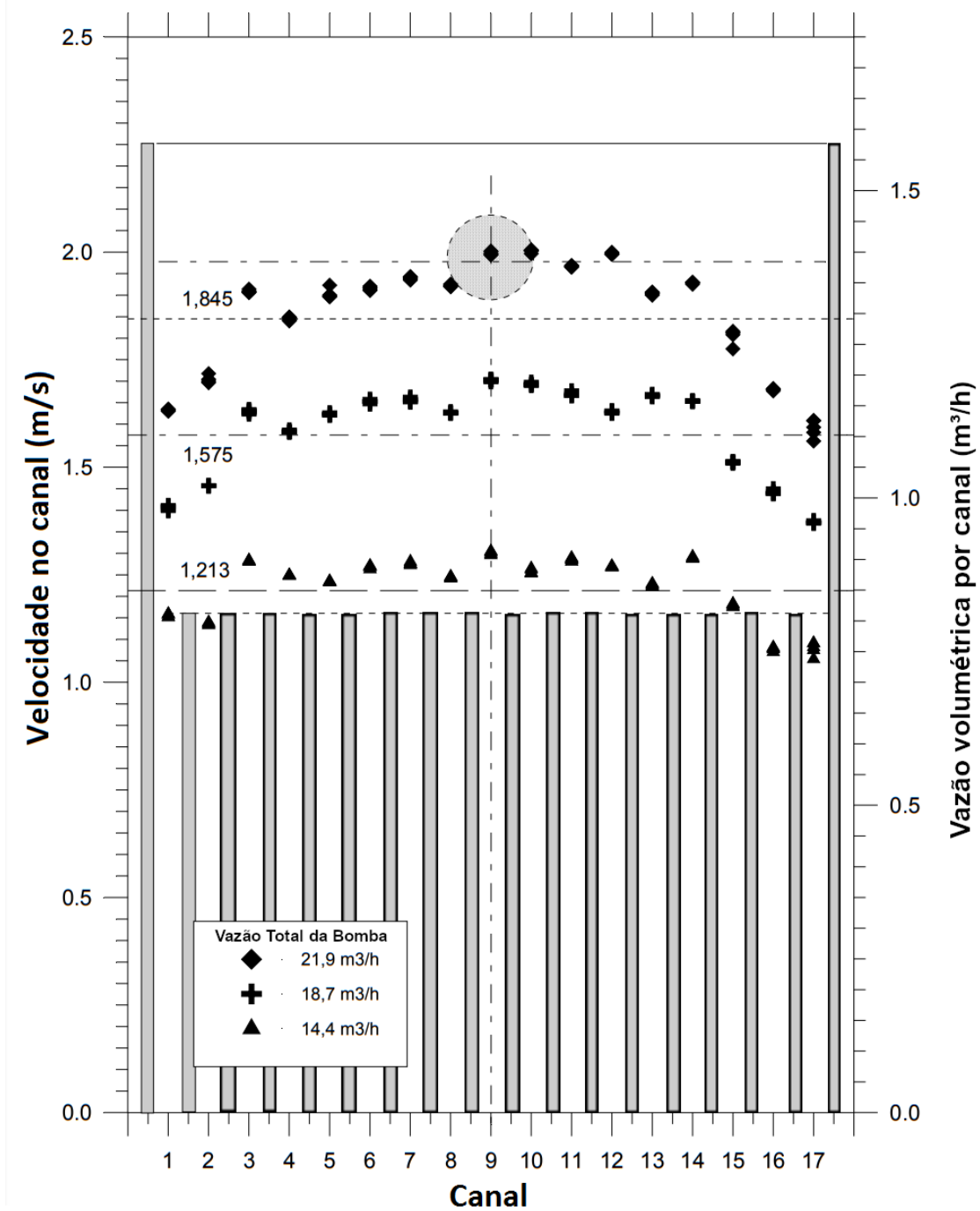


Fonte: Adaptado de [31]

Já em 2003 [33] o CEN publicou um novo estudo utilizando a BAV e o elemento DMPV-01, porém desta vez o objetivo era realizar o levantamento da vazão média em cada canal do elemento.

Para a realização do estudo foi utilizada uma instrumentação diferente do experimento citado anteriormente, um tubo de metal foi introduzido com dois pontos de tomada de pressão estática localizados na entrada e saída do canal retangular de escoamento. A diferença de pressão em cada canal foi obtida individualmente com base em três diferentes vazões da bomba primária da BAV. Em seguida a velocidade média em cada canal de escoamento foi estimada com base em equações de perda de carga para tubos de seção transversal retangular. A Figura 6 apresenta um gráfico ilustrando a variação da velocidade e vazão em cada canal. A análise dos resultados experimentais mostra que a distribuição de vazão entre os canais periféricos do elemento combustível do reator IEA-R1 de placa plana é menor nos canais periféricos, com variação de 10 a 15% quando comparado ao canal central.

Figura 6 – Distribuição da velocidade e vazão para diferentes vazões



Fonte: Adaptado de [33]

Ha e Garland em 2005 [34] estudaram o escoamento turbulento em um elemento combustível de placa com base na construção de um modelo em escala real do elemento combustível do reator nuclear da Universidade de McMaster (MNR). O elemento combustível do reator MNR tem características geométricas muito semelhantes ao elemento



combustível DPMV-01 estudado por Torres et al [33], com exceção de que as placas do MNR são curvas, entretanto Ha e Garland [34] desenvolveram o seu modelo experimental em uma geometria de placas planas para simplificar a fabricação do modelo de teste. A Figura 7 ilustra o elemento instrumentado utilizado na análise experimental.

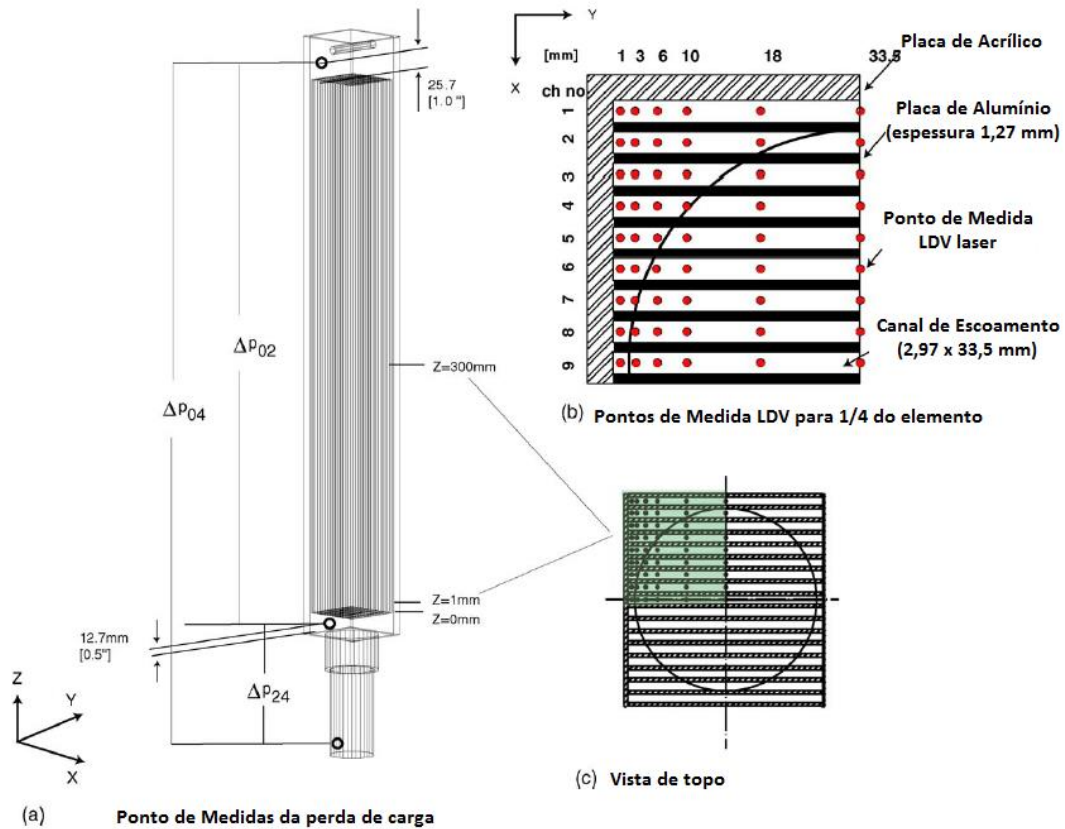
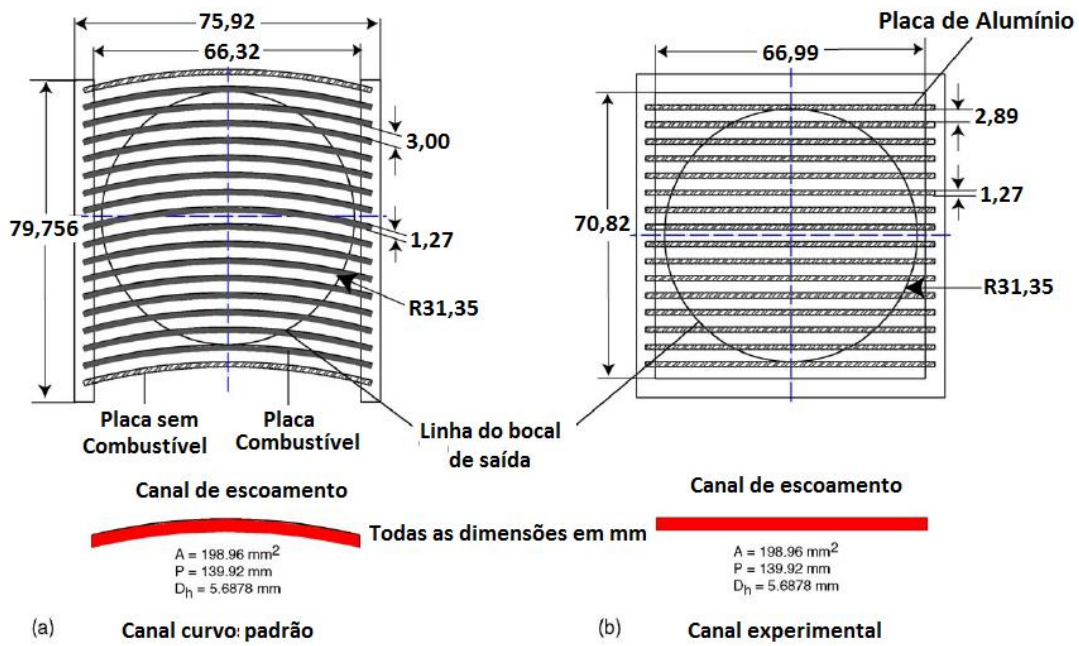
Diferente de Torres et al [33] que determinou a velocidade de escoamento nos canais por meio da diferença de pressão, Ha e Garland [34] utilizaram tecnologia de Laser Doppler para medir a velocidade em vários pontos do canal de escoamento e obter o perfil da velocidade de escoamento no canal e posteriormente calcular a perda de carga em cada canal.

Ha e Garland [34] esperavam observar uma diferença significativa da distribuição da vazão entre os canais periféricos em relação aos canais centrais, porém as análises apontaram uma diferença de apenas 5% da vazão média entre os canais periféricos e centrais, um resultado diferente do observado por Torres et al [33].

Ha e Garland [34] comparam os resultados experimentais com os resultados computacionais do estudo de Yu e Lightstone [35] publicado em 2005 para o elemento combustível do reator MNR. Os resultados computacional e experimental apresentaram valores próximos, como pode ser visto na Figura 8.

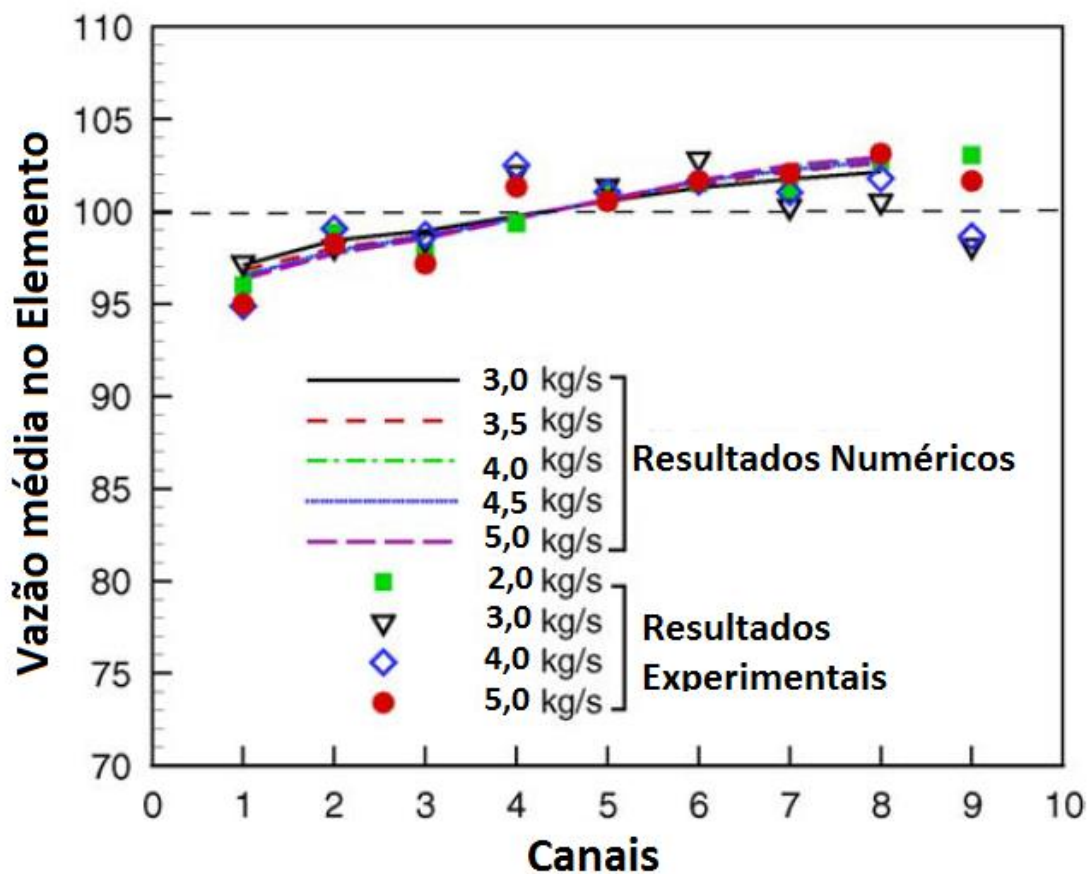
De fato, tanto Ha e Garland [34] como Torres et al [33], esperavam observar uma discrepância na distribuição de vazão dos canais periféricos frente aos canais centrais, entretanto apenas Torres et al [33] observaram esse fenômeno de forma mais significativa. Discussões à parte, se pode afirmar somente que ambos foram realizados com metodologias e abordagens diferentes. A análise de Ha e Garland [34] utilizou ferramenta laser para aferir o perfil de velocidade, esta é uma técnica mais precisa e complexa quando comparada a metodologia empregada por Torres et al [33], onde um tubo de metal mediu a pressão estática na entrada e saída do canal. Torres et al [33], valeram-se de equações muito mais simples para determinar a vazão em massa do canal de escoamento, por outro lado Ha e Garland [34] utilizaram equações mais complexas para a determinação da perda de carga e consequentemente da vazão. Entretanto, conforme apresentado no subcapítulo Histórico, Umbehaun [23] discute o problema da corrosão excessiva nas placas periféricas como consequência de uma baixa vazão de refrigerante nos canais, fato este que condiz com os resultados observados por Torres et al no que diz respeito ao elemento combustível do reator IEA-R1.

Figura 7 – Elemento de ensaio do MNR e pontos de medição da velocidade



Fonte: Adaptado de [34]

Figura 8 – Resultados computacional e experimental do MNR



Fonte: Adaptado de [34]

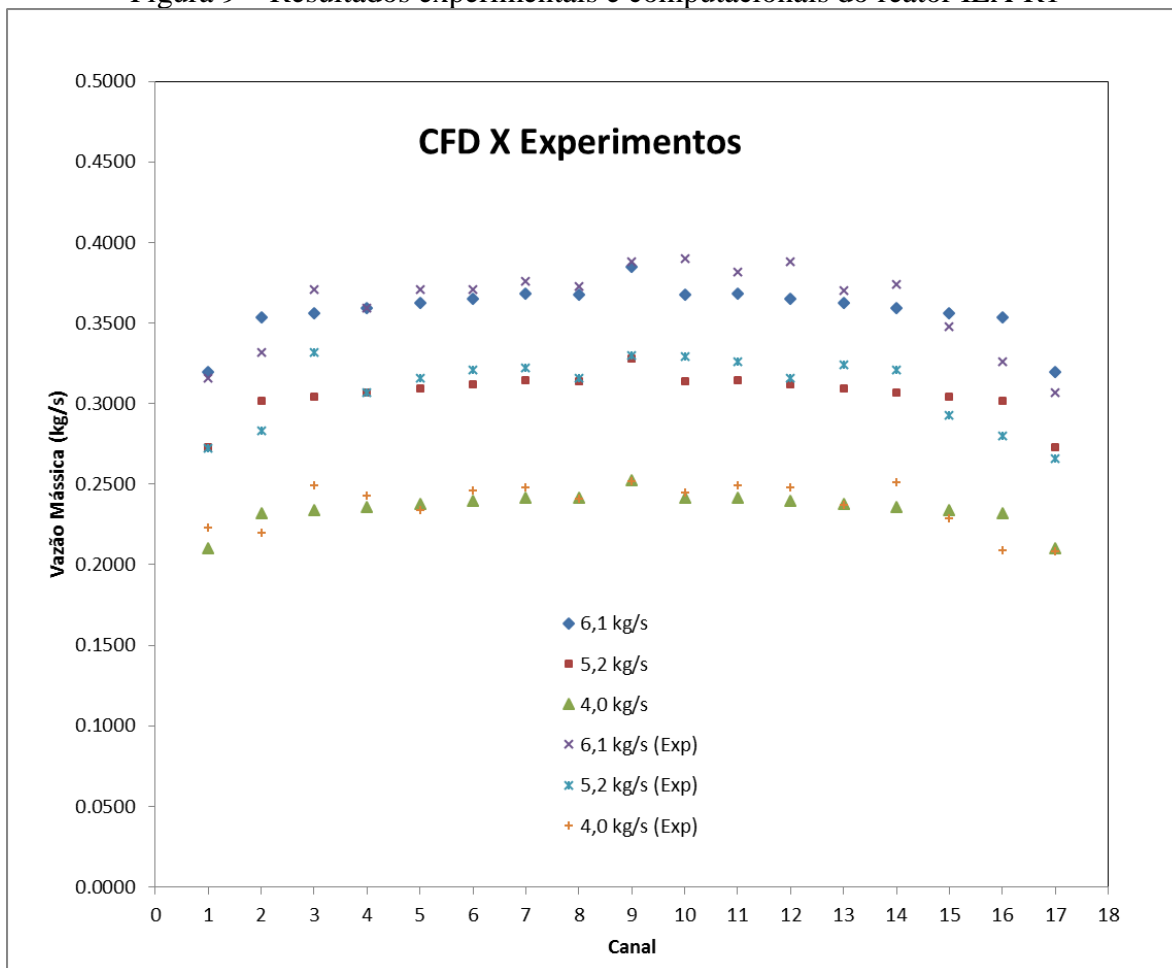
Posteriormente em 2015 Andrade et al [24], reproduziram computacionalmente a análise de Torres et al [33]. Com base em um domínio computacional tridimensional, utilizando uma abordagem de Dinâmica dos Fluidos Computacional ou CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamic*).

Andrade et al [24], desenvolveram o modelo tridimensional usando a metodologia dos volumes finitos aplicado a uma malha não estruturada. Para capturar o desenvolvimento do perfil de velocidade, camadas de elementos prismáticos perpendiculares ao escoamento (denominadas de “*Inflation layers*”, no software utilizado) foram introduzidas em todas as regiões próximas as paredes. O modelo de turbulência considerado foi o K- $\epsilon$ .

Os resultados finais da análise computacional apresentaram um comportamento semelhante ao observado por Torres et al [33] no teste experimental, o que mostrou que a abordagem numérica reproduz satisfatoriamente o experimento. A Figura 9 demonstra a

comparação dos resultados de Torres et al [33] e Andrade et al [24] para cada canal do elemento combustível do reator IEA-R1.

Figura 9 – Resultados experimentais e computacionais do reator IEA-R1



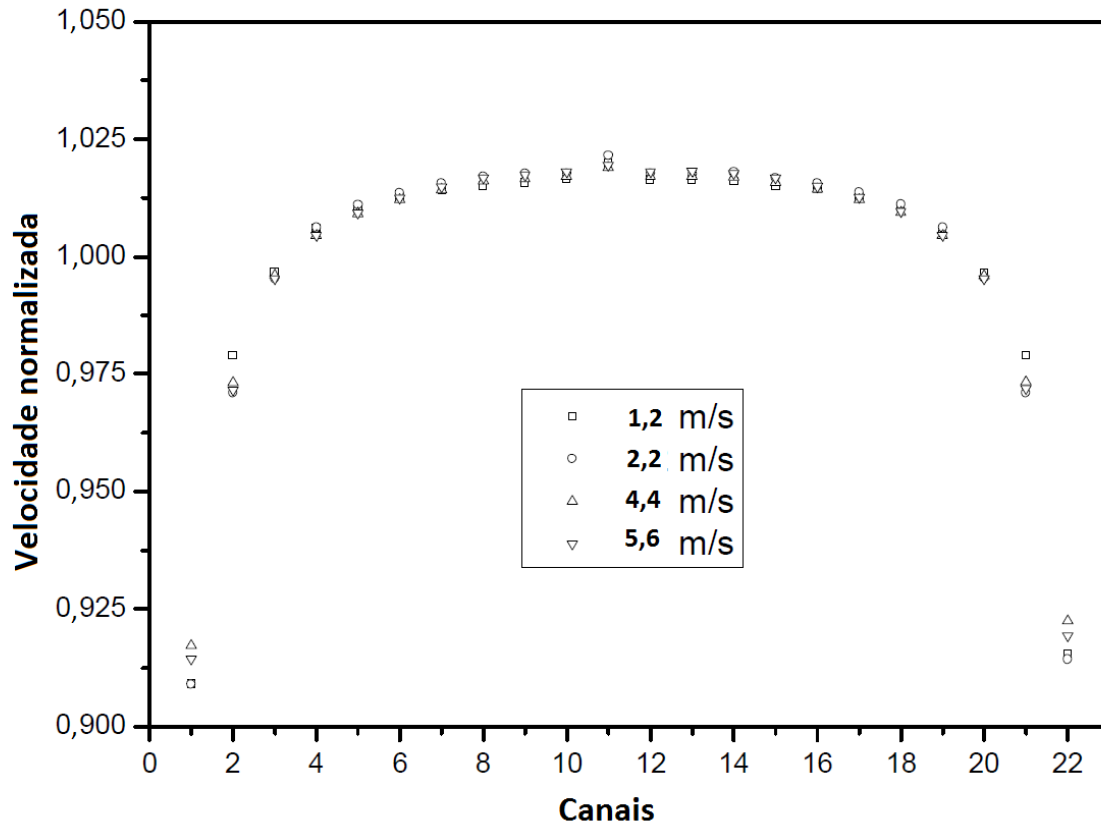
Fonte: Adaptado de [24]

Jonghark Park et al [36], publicaram em 2011 uma análise computacional sobre a distribuição de vazão em um elemento combustível do tipo placa plana para um reator de piscina fechada. Utilizando como base de comparação e referência os dados de Torres et al [33] e Ha e Garland [34]. Novamente foi observado uma distribuição menor da vazão nos canais periféricos (Figura 10), na ordem de 92% do valor de velocidade média de escoamento dos canais.

Park et al [36], associa essa baixa vazão de refrigerante nos canais periféricos a dois fatores: (I) influência das paredes vizinhas aos canais periféricos na região de entrada e saída dos canais e; (II) efeito do pente de reforço das placas combustíveis.

Park et al [36] apresenta os valores de seu trabalho com base na velocidade normalizada, ou seja, mostrando o percentual que a velocidade em cada canal é superior ou inferior a velocidade média. Velocidade média é calculada considerando a vazão total dividida pelo número de canais do elemento.

Figura 10 – Distribuição da vazão nos canais periféricos de Park



Fonte: Adaptado de [36]

## 4 REATOR IEA-R1

Instalado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) o reator IEA-R1 gerido pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) em São Paulo é um reator de pesquisa montado em piscina aberta, que utiliza berílio e grafite como refletores, e um meio moderador e refrigerante de água leve desmineralizada [8]. Seu elemento combustível é do tipo placa plana, comumente denominado combustível MTR (do inglês, *Materials Testing Reactor*) e sua potência térmica máxima de projeto é de 5 MW.

Por ser do tipo MTR, o IRA-R1 tem como função principal realizar estudos e análises dos efeitos da radiação em diversos materiais ao longo do tempo de exposição. Mas, também é amplamente empregado na fabricação de radioisótopos, análises termo-hidráulicas e diversos estudos de interesse.

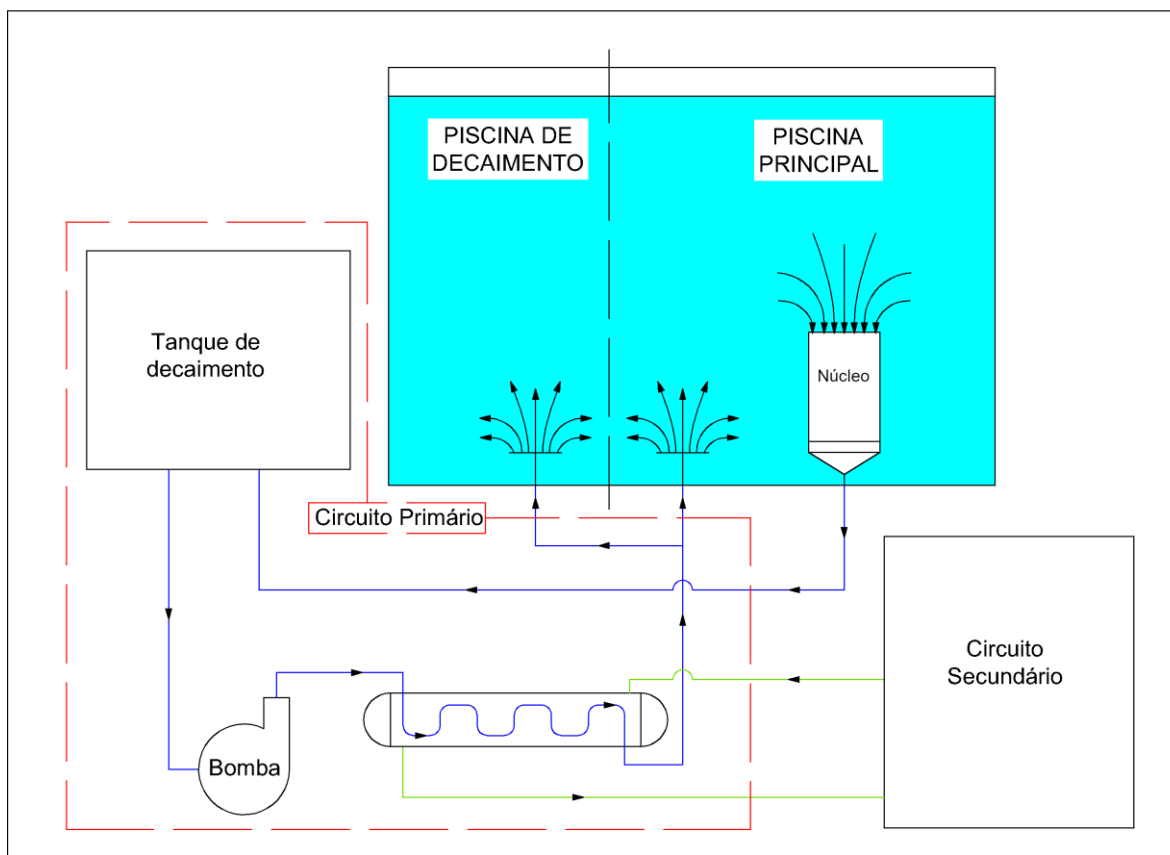
### 4.1 Introdução

O Reator IEA-R1 possui um sistema de resfriamento dividido em dois circuitos, o primário e o secundário que podem ser vistos na Figura 11 de maneira simplificada. O núcleo do reator fica localizado no fundo da piscina principal próximo as paredes de contenção.

Apresentando uma maior complexidade, o circuito primário tem função de resfriar a água em contato direto com o núcleo e seus componentes, a bomba principal força o escoamento de refrigerante no reator causando um escoamento descendente a favor da gravidade. O fluido é succionado por tubulações até o tanque de decaimento onde é retido tempo suficiente para eliminar a presença de  $N^{16}$ . Após o decaimento, a bomba principal força o fluido refrigerante pelo trocador de calor do circuito primário para resfriar a água que deve retornar à piscina do reator. Além destes componentes citados, o primário contém diversas válvulas para manobras hidráulicas, um tanque de água reserva para operação em possíveis acidentes, sistemas filtrantes, detectores de radiação e outros componentes.

Já o circuito secundário tem a função de resfriar o primário, como seu fluido refrigerante não entra em contato direto com o reator e quaisquer resíduos oriundos do processo de fissão, esse sistema é mais simples do que o anterior, podendo ser simplificado de maneira ilustrativa apenas como uma máquina termodinâmica.

Figura 11 – Ilustração simplificada do sistema de resfriamento do reator IEA-R1



Fonte: Autor

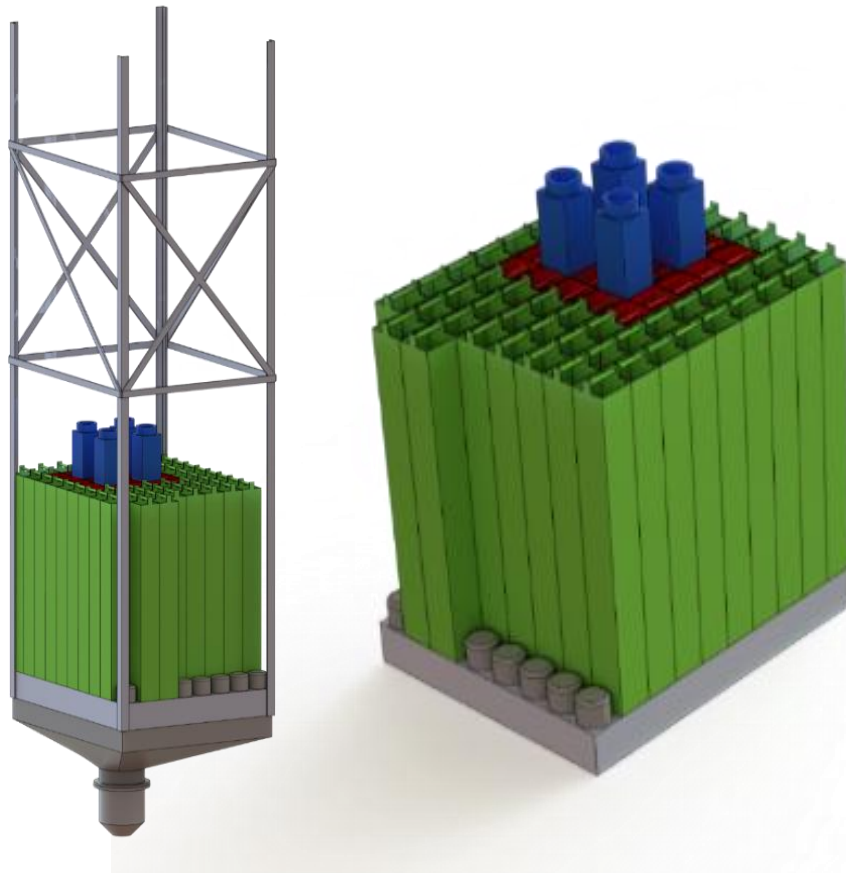
O esquema do núcleo do IEA-R1 está ilustrado na Figura 12, o núcleo tem aparência aproximada de um paralelepípedo e fica posicionada a 7 m da superfície da piscina sendo composto pela placa matriz, funil de sucção e válvula de convecção. Todo conjunto do núcleo é suspenso por uma ponte rolante e é ligado à placa matriz por meio de treliças. A placa matriz construída inteiramente em alumínio é composta por 72 orifícios principais que conectam os componentes do núcleo ao funil de sucção e alguns orifícios secundários os quais permitem a vazão do refrigerante pelo espaçamento entre os componentes.

No início da operação do circuito primário, antes do acionamento da bomba, a válvula de convecção natural é acoplada ao cone por meio de um sistema mecânico pneumático. Em seguida a bomba é acionada e sua vazão é ajustada usando o sistema de controle de vazão para um valor constante de 213,5 kg/s (772,1 m<sup>3</sup>/h; 3400 gpm). Neste ponto, o acionamento pneumático da válvula é suspenso, e a válvula se mantém acoplada ao cone por meio de efeito hidrodinâmico oriundo da perda de carga no núcleo do reator. Em caso de perda acentuada

da vazão a perda de carga no núcleo diminui e a válvula de convecção natural é desacoplada instantaneamente pela força gravitacional, permitindo que a água da piscina atinja o núcleo do reator dando início ao processo de convecção natural.

A placa matriz permite diversas configurações de operação do núcleo, atualmente o reator IEA-R1 opera com um esquema onde o núcleo é montado em uma disposição central de cinco por cinco (5 x 5) totalizando 20 elementos combustíveis, 4 elementos de controle e 1 irradiador de berílio central, ao redor dessa montagem são colocados outros componentes e elementos para estudos diversos, os furos não utilizados são fechados com tampões. A Figura 12 ilustra em vermelho os elementos combustíveis, em azul as barras de controle, em verde elementos diversos de estudo e em cinza os tampões dos orifícios não utilizados. A Figura 13 demonstra o espaçamento real entre cada elemento combustível na placa matriz, o resfriamento entre esses espaçamentos é realizado pelos furos secundários da placa.

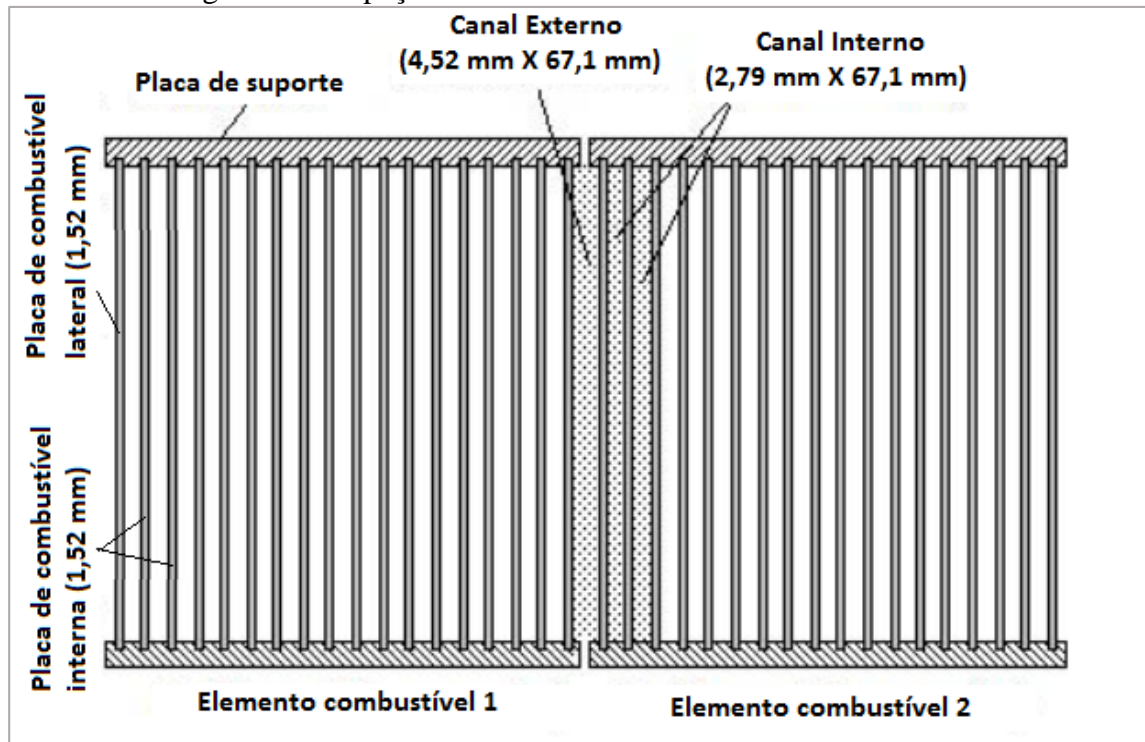
Figura 12 – O esquema do núcleo do IEA-R1



Fonte: Autor



Figura 13 – Espaçamento real entre cada elemento combustível



Fonte: [24]

#### 4.2 Elemento combustível IEA-R1

Elemento combustível, é a denominação comum que se dá ao componente alocado no núcleo do reator que tem função de abrigar as placas de combustível nuclear, ou material físsil e fértil. Além de abrigar o combustível do contato direto com o fluido refrigerante, o elemento combustível deve também ser projetado para reter os produtos de fissão ao longo da vida útil e garantir a transferência da energia térmica gerada no processo de fissão nuclear para o fluido refrigerante de forma eficaz.

Combustíveis nucleares são criados através de diversos compostos que devem possuir elementos físsis e férteis, como o Urânio (U), Tório (Th) e Plutônio (Pu). Os principais materiais combustíveis podem ser encontrados ou em forma de ligas metálicas, ou de materiais cerâmicos, ou de dispersões (compostos de cerâmica e metal, denominados *cermets*) [7]. No caso específico do reator IEA-R1, o combustível utilizado atualmente é uma dispersão ou de  $U_3O_8$ -Al, ou  $U_3Si_2$ -Al [37].

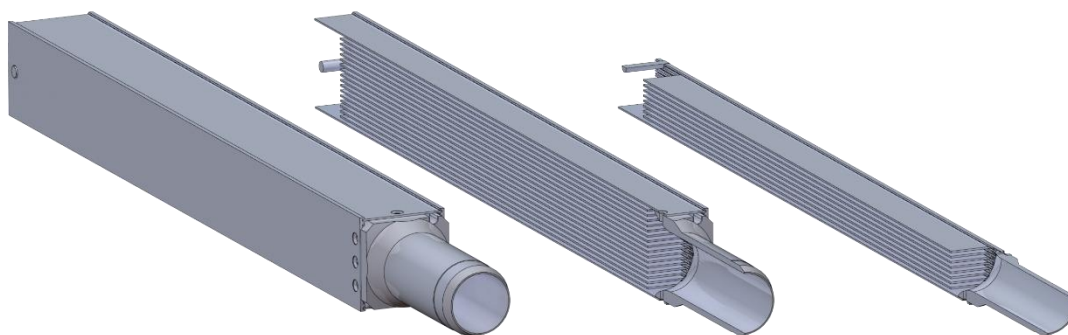
As dimensões do elemento combustível, a quantidade de elementos e o espaçamento entre eles no núcleo do reator são ditados principalmente pelos projetos neutrônicos e termo-hidráulicos.

Os revestimentos mais utilizados em reatores tipo MTR para a fabricação do elemento combustível são ligas de alumínio, ligas de Zircônio ou ligas de aço inox. O reator IEA-R1 emprega liga de alumínio ASTM 6061 T0 e T6 [32], a utilização do alumínio favorece o projeto neutrônico, mas também fornece vantagens para a troca de calor e fabricação do elemento combustível.

### 4.3 Elemento combustível padrão do IEA-R1

A montagem do elemento combustível padrão do IEA-R1 é do tipo placa plana, sendo composto por 1 bocal, 2 placas de suporte lateral (esquerda e direita), 1 pino de sustentação, 8 parafusos e 18 placas combustíveis, sendo que dessa 16 são internas e 2 externas e mais compridas. A montagem do elemento resulta em um total de 17 canais internos independentes por onde o fluido refrigerante é forçado a escoar resfriando o conjunto, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Vista em seção do elemento combustível padrão



Fonte: Autor

Construídas inteiramente de alumínio as duas placas laterais de suporte tem a função de manter as placas combustíveis presas ao elemento. As placas combustíveis são fixadas às placas laterais por um processo de travamento mecânico, onde um pequeno rolete cria uma

deformação plástica na placa de suporte lateral esquerda e direita garantindo a fixação permanente da placa combustível no conjunto, tal esquema pode ser visualizado na Figura 15.

Figura 15 – Esquema da placa combustível no conjunto



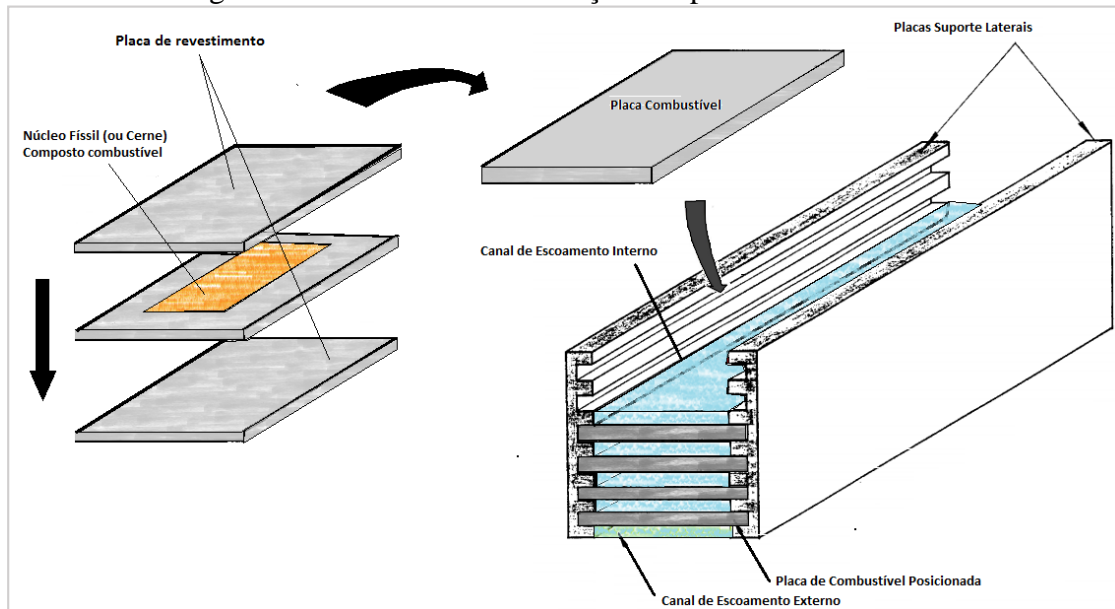
Fonte: Autor

Cada placa combustível é feita de alumínio ASTM 6061 T0 [32] com um cerne Urânio, a Figura 16 ilustra o processo de fabricação das placas combustíveis. Cada placa é fabricada com a técnica de montagem núcleo-moldura-revestimentos, do inglês *picture frame*. Duas placas externas sólidas de alumínio são laminadas junto a uma terceira placa central com formato de moldura onde no cerne da moldura é compactado o combustível nuclear de acordo com técnicas de metalurgia do pó. A montagem em moldura garante que o material físsil e fértil, e os rejeitos de fissão não tenham contato direto com o fluido refrigerante, pois ficam acondicionados entre uma moldura de alumínio e o revestimento.

A montagem final do elemento combustível pode ser dividida em três regiões principais, região de entrada, região das placas e região de saída. A Figura 17 ilustra de maneira simplificada vista axial em corte do elemento combustível. A região de entrada tem formato retangular com comprimento de 51,40 mm, o pino de sustentação com diâmetro de 9,50 mm fica locado 13,00 mm em relação a interface de entrada de fluido. A região das placas tem 625 mm de comprimento com a mesma seção retangular da entrada sendo dividida por 16 placas combustíveis internas que criam 17 canais para o escoamento de refrigerante.

Com 196,60 mm a região de saída transforma a área de escoamento retangular em circular com a contração do bocal onde o fluido passa de um diâmetro de 67,40 para 50,80 mm até o final do EC.

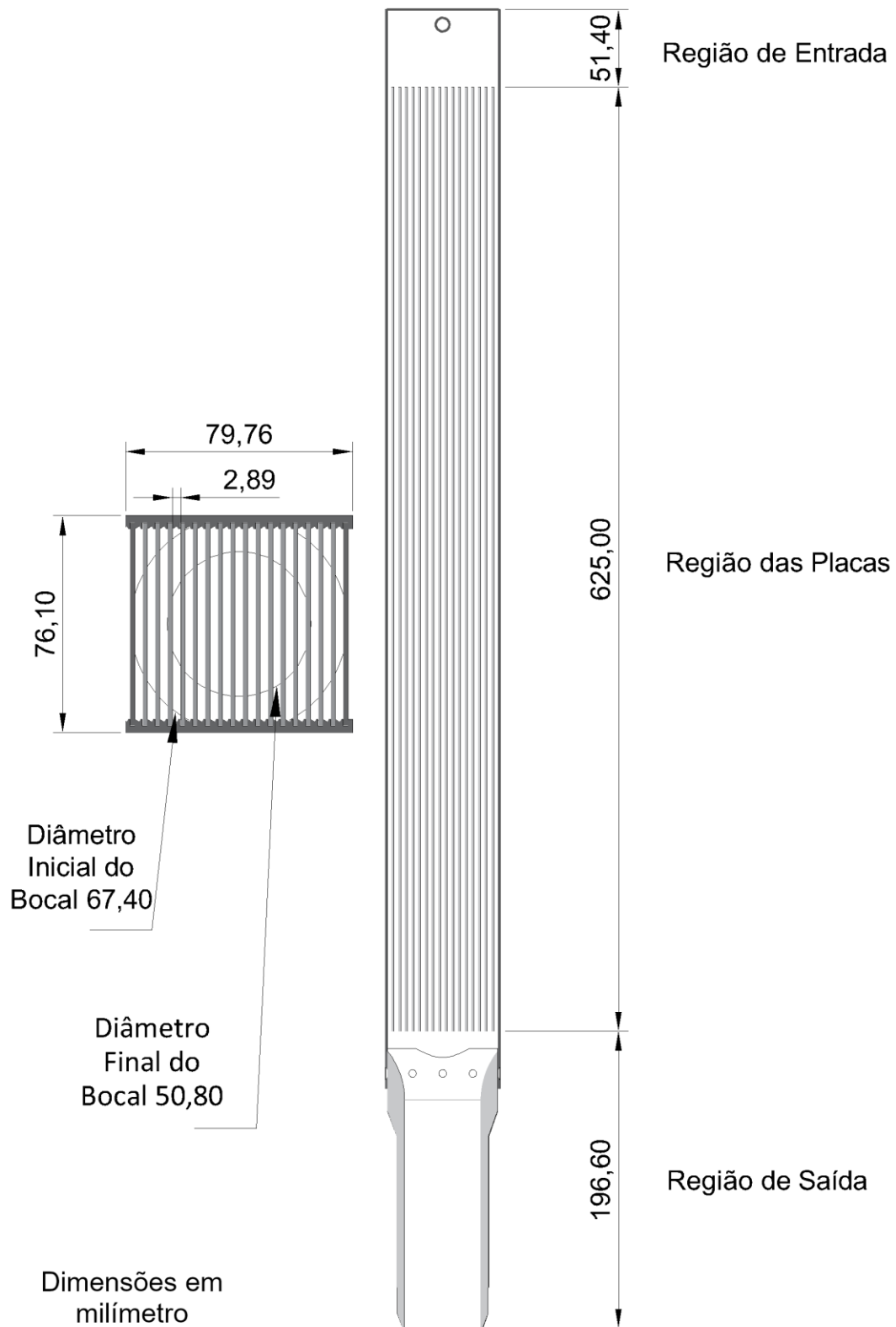
Figura 16 – Processo de fabricação das placas combustíveis



Fonte: Autor

Levando-se em conta as medidas nominais de projeto para a região das placas os canais de escoamento possuem uma largura útil de 66,90 mm e espessura de 2,89 mm, apresentando uma seção retangular onde o comprimento é 23,15 vezes a espessura com área útil total de 193,34 mm<sup>2</sup>, perímetro molhado de 139,58 mm e diâmetro hidráulico igual a 5,54 mm.

Figura 17 – Ilustração da regiões de entrada, placas e saída



Fonte: Autor

## 5 HIDRODINÂMICA DO REATOR IEA-R1

### 5.1 Introdução

Regida pela diferença de pressão criada no circuito primário, a vazão no núcleo do IEA-R1 é determinada pela potência da bomba principal em conjunto com a ação de manobra de válvulas.

Devido as diversas possibilidades de montagem do núcleo na placa matriz, o padrão de entrada do fluido refrigerante nos diversos componentes do núcleo, assim como a vazão exata de cada componente, apresenta diferenças em cada caso como esquematizado na Figura 18. O comportamento de entrada do fluido nos componentes é totalmente dependente do local onde o mesmo é alocado na placa matriz. As regiões mais extremas da placa matriz permitem que a vazão entre pelo topo e faces laterais, enquanto os elementos centrais recebem apenas vazão de topo. Alguns elementos próximos a mini placas (componentes com comprimentos menores) ou a furos tamponados podem criar até três faces laterais para entrada de escoamento.

Outro fator de influência na distribuição da vazão principal no núcleo é o comportamento do fluido na contração do cone de sucção da placa matriz, essa região apresenta um comportamento extremamente complexo com formação de vórtices que variam conforme a montagem da placa matriz. Além da vazão principal distribuída entre cada componente é preciso levar em consideração a vazão pelos furos secundários da placa matriz.

Adicionalmente aos fatores citados anteriormente, a distribuição da densidade de potência no núcleo baseado no fluxo de nêutrons cria regiões mais quentes próximas aos elementos combustíveis e componentes centrais quando comparados aos periféricos.

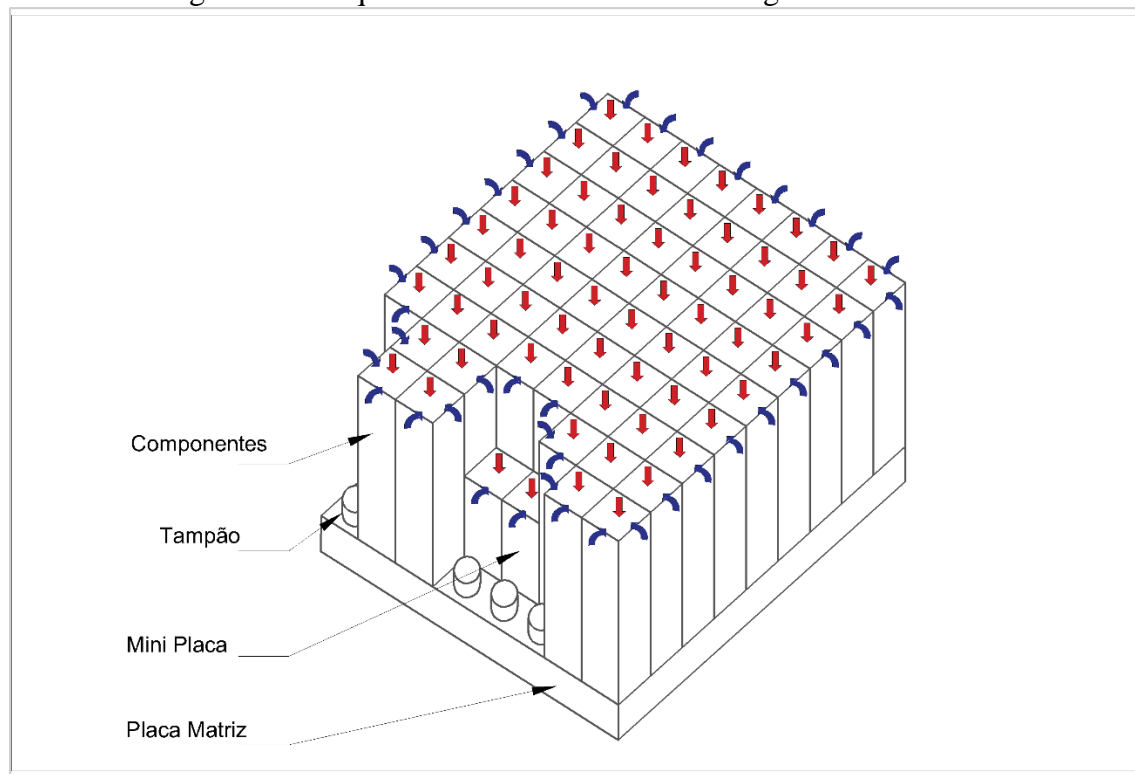
Considerando os diversos fatores hidráulicos na distribuição da vazão de refrigerante do núcleo do reator IEA-R1, a distribuição de vazão pelos componentes do reator e pelos furos secundário deve ser estudada individualmente, assim como o comportamento do fluido na contração do cone da placa matriz.

Buscando entender melhor a distribuição de vazão na região central (mais quente) do núcleo, Torres et al em 2001 [31] alocaram um elemento combustível instrumentado em

diversas posições da placa matriz. Ao final de 9 testes concluíram que a variação de vazão na região onde é alocada a montagem 5 x 5 com 20 elementos combustíveis apresenta uma variação máxima de 4,5%.

Os resultados observados por Torres et al 2001 [31] também indicaram que a vazão em cada elemento combustível é muito diferente da vazão estimada pelo TECDOC 22 [14], sendo que a mesma é estimada dividindo a vazão total do circuito primário pelo número de elementos combustíveis presente no núcleo. A metodologia do TECDOC 22 [14] deve ser aplicada apenas para núcleos pequenos e com poucos componentes periféricos aos elementos combustíveis.

Figura 18 – Esquema de entrada do fluido refrigerante no núcleo



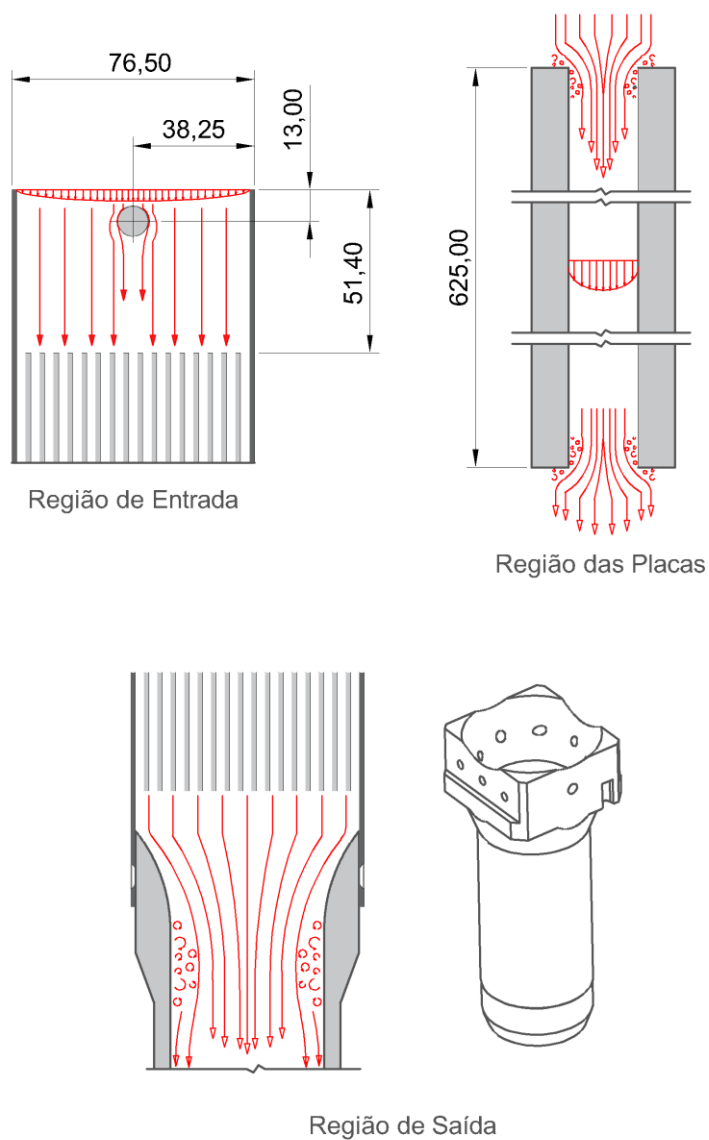
Fonte: Autor

## 5.2 Hidrodinâmica no elemento combustível padrão do IEA-R1

Após ser distribuída pelos diversos componentes pertencentes ao núcleo o fluido refrigerante ao entrar no elemento combustível padrão do IEA-R1 é submetido a mais uma condição hidráulica complexa. Inicialmente o escoamento de refrigerante é acelerado na região retangular de entrada do elemento, onde logo em seguida é forçado a dividir-se ao

passar pelo pino de sustentação, sendo em seguida submetido a contração e divisão entres os 17 canais de escoamento formados pelas placas combustíveis. Na região das placas o escoamento consegue se desenvolver totalmente ao longo dos 625 mm de comprimento de escoamento onde ao final ocorre a expansão e junção das correntes de fluxo em uma pequena região retangular que é rapidamente contraída pelo bocal de saída em formato cônico tubular até o diâmetro final de 50,80 mm, conforme pode ser visualizado na Figura 19.

Figura 19 – Ilustração do comportamento do escoamento de fluido refrigerante



Dimensões em milímetro

Fonte: Autor



### 5.3 Distribuição de vazão

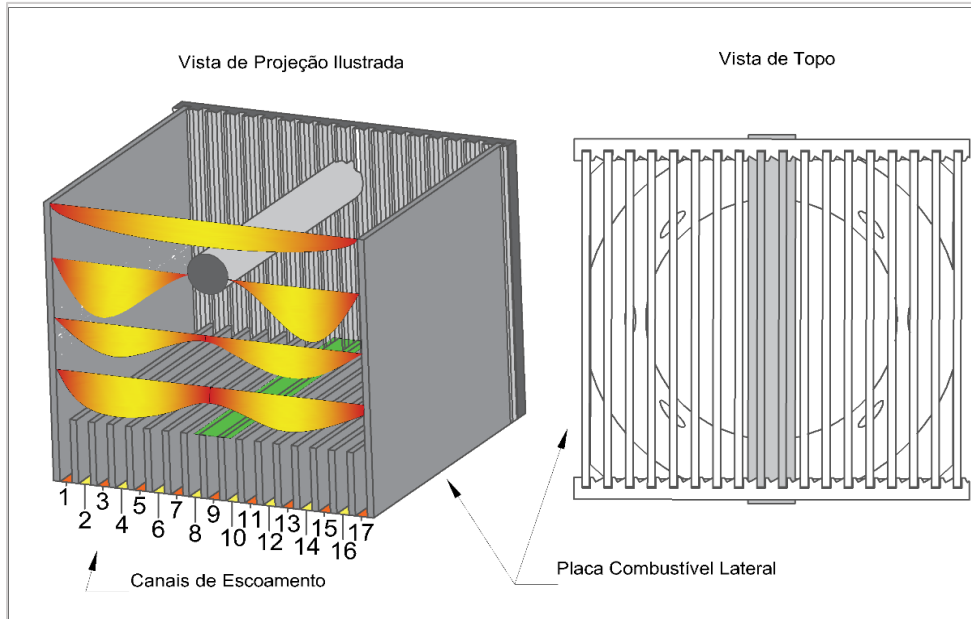
Assim como a vazão no núcleo do reator se dá pela diferença de pressão causada no circuito primário, a distribuição de vazão dentro do elemento combustível é regida pela diferença de pressão criada em cada região específica da montagem. Conforme visto na figura anterior cada uma das três regiões principais do EC apresenta características hidrodinâmica diferente.

O pino de sustentação posicionado na parte central da região de entrada causa uma obstrução da vazão de refrigerante a montante nos canais centrais. A obstrução de vazão criada pelo pino pode favorecer a criação de vórtices e redemoinhos que afetam o perfil de velocidade e distribuição de massa.

Levando em consideração apenas a região de entrada e o efeito hidráulico criado pelo pino de sustentação, é possível afirmar que o perfil de velocidades e distribuição de pressão criados nessa região afetam diretamente a vazão de refrigerante que cada placa recebe. Caso o escoamento após o pino consiga se desenvolver totalmente, é possível afirmar que os canais receberão uma vazão de entrada muito mais homogênea, com exceção talvez dos canais 1 e 17, uma vez que estes se localizam nas regiões periféricas próximas as paredes. Outra caso o escoamento após o pino não consiga se desenvolver totalmente até a região de entrada dos canais, é possível afirmar que os canais 8, 9 e 10 podem ser afetados em relação aos canais vizinhos, como ilustrado na Figura 20.

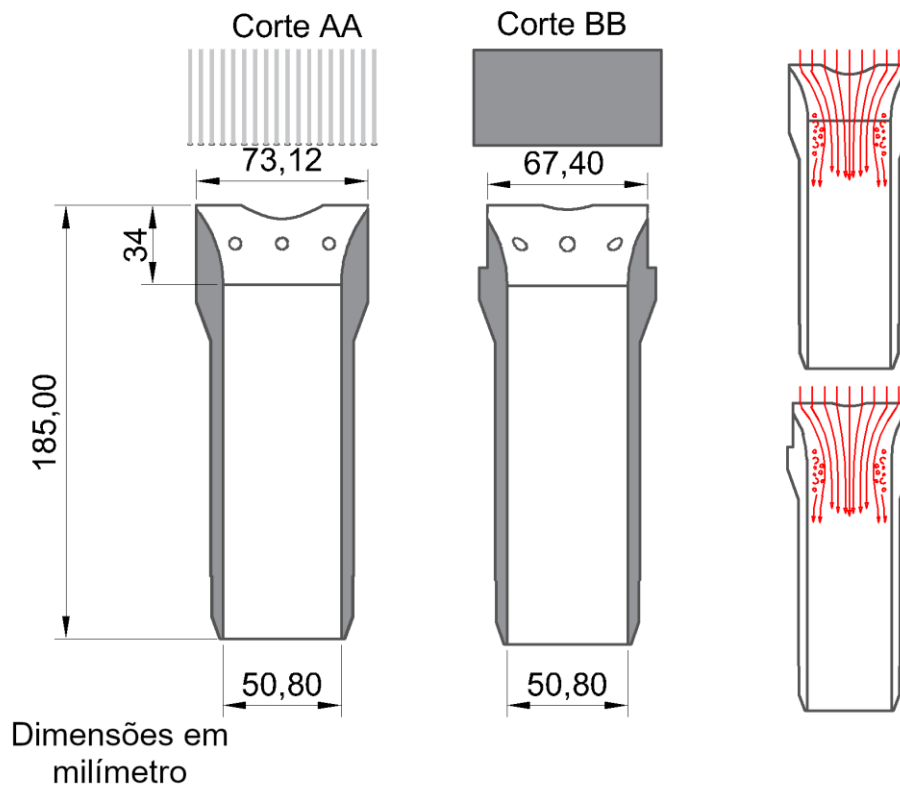
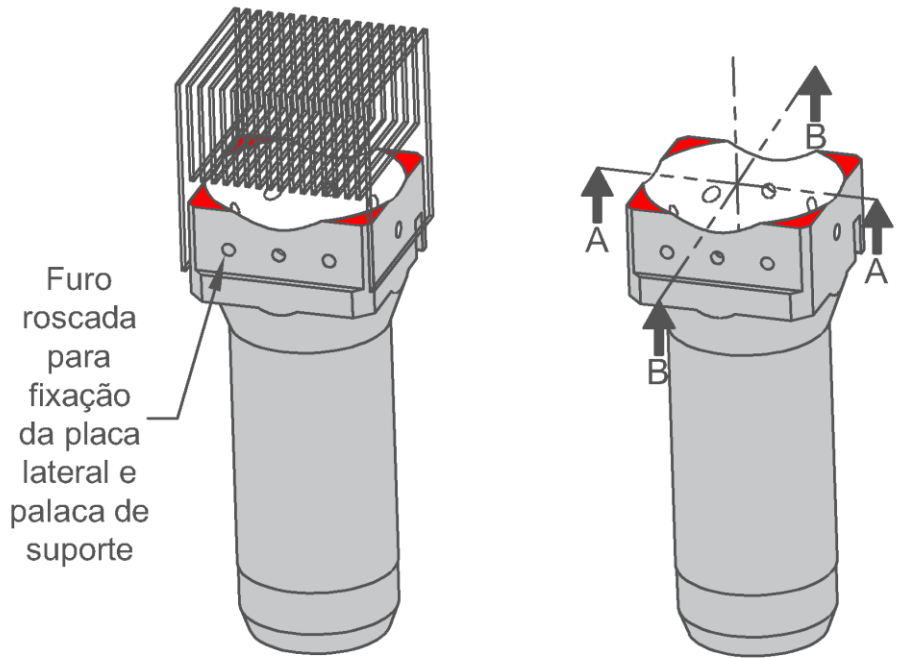
A região de saída também apresenta complexidade ao escoamento dos canais, embora alguns canais possam supostamente receber uma vazão maior do que outros na região de entrada, as características geométricas da saída proporcionam áreas de recirculação de fluido, formação de vórtices nas saídas das placas e outros fenômenos que dificultam o escoamento nas placas mais periféricas 1, 2, 3, 15, 16 e 17. A Figura 21 e a Figura 22 ilustram as regiões onde ocorre o estreitamento do escoamento e a regiões onde há possibilidade de escoamento estagnado e recirculação devido a superfícies transversais ao escoamento axial.

Figura 20 – Ilustração esquemática da divisão do escoamento na região de entrada



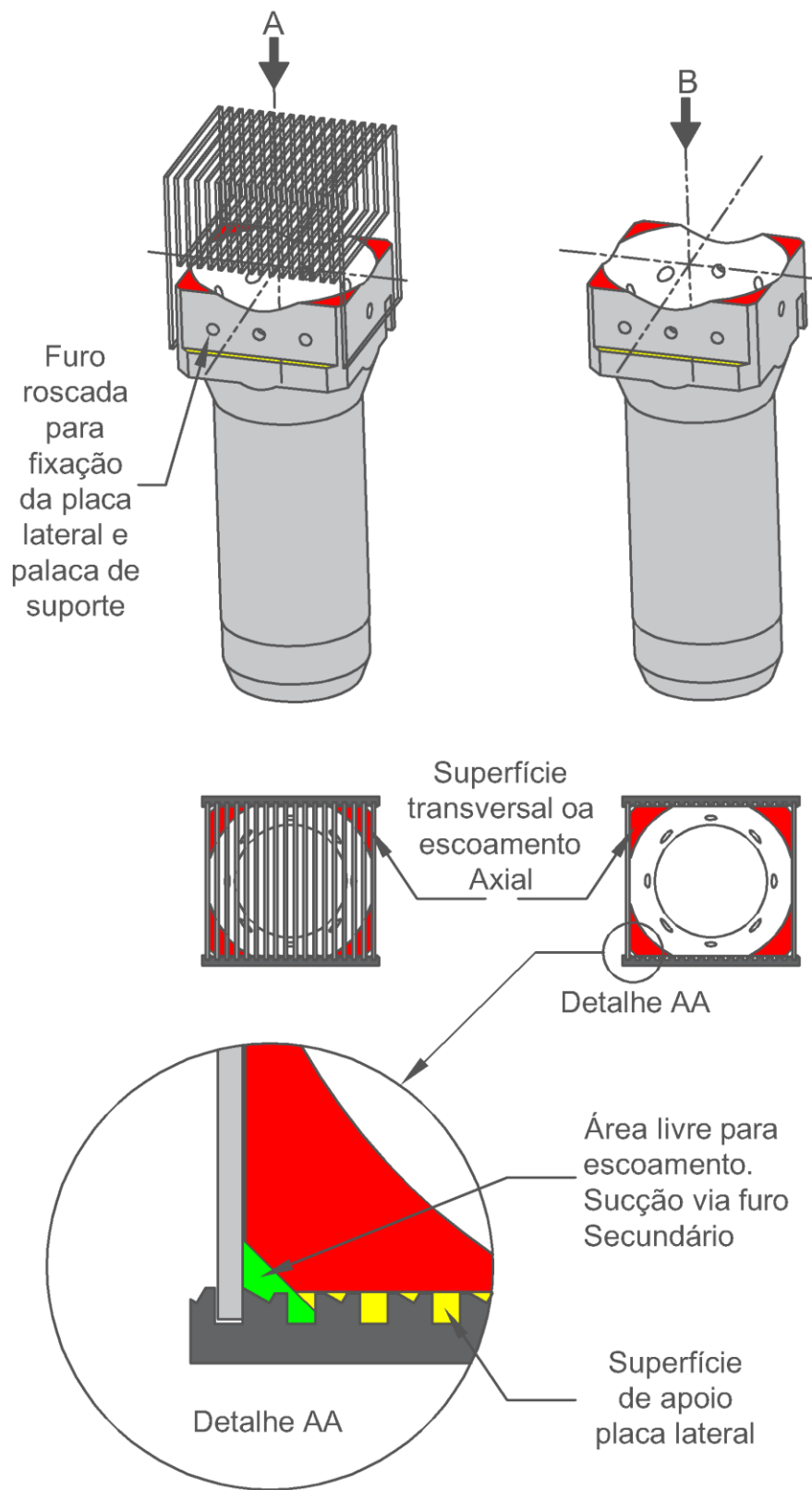
Fonte: Autor

Figura 21 – Ilustração do estreitamento do escoamento no bocal de saída



Fonte: Autor

Figura 22 – Detalhamento da superfície de estagnação de fluido e aberturas de escoamento



Fonte: Autor

## 5.4 Dados experimentais

Todas as condições apresentadas em cada região do elemento combustível criam características hidrodinâmicas únicas que afetam diretamente a vazão de refrigerante recebido em cada canal de escoamento. Determinados a entender melhor como ocorria essa distribuição de vazão, Torres et al em 2001 [31] utilizaram novamente o DMPV-01 com uma nova instrumentação para medir a perda de carga em cada canal por meio da diferença de pressão estática na parte de entrada e saída de cada canal.

Feita inteiramente de aço inox, duas pequenas sondas com 2,5 mm de diâmetro externo cada foram introduzidas a 100 mm da entrada e 50 mm da saída de cada canal consecutivamente até obter a perda de carga gerada em cada canal para 3 faixas de vazão no circuito de teste (14, 18 e 22 m<sup>3</sup>/h), conforme pode ser visualizada na Figura 23.

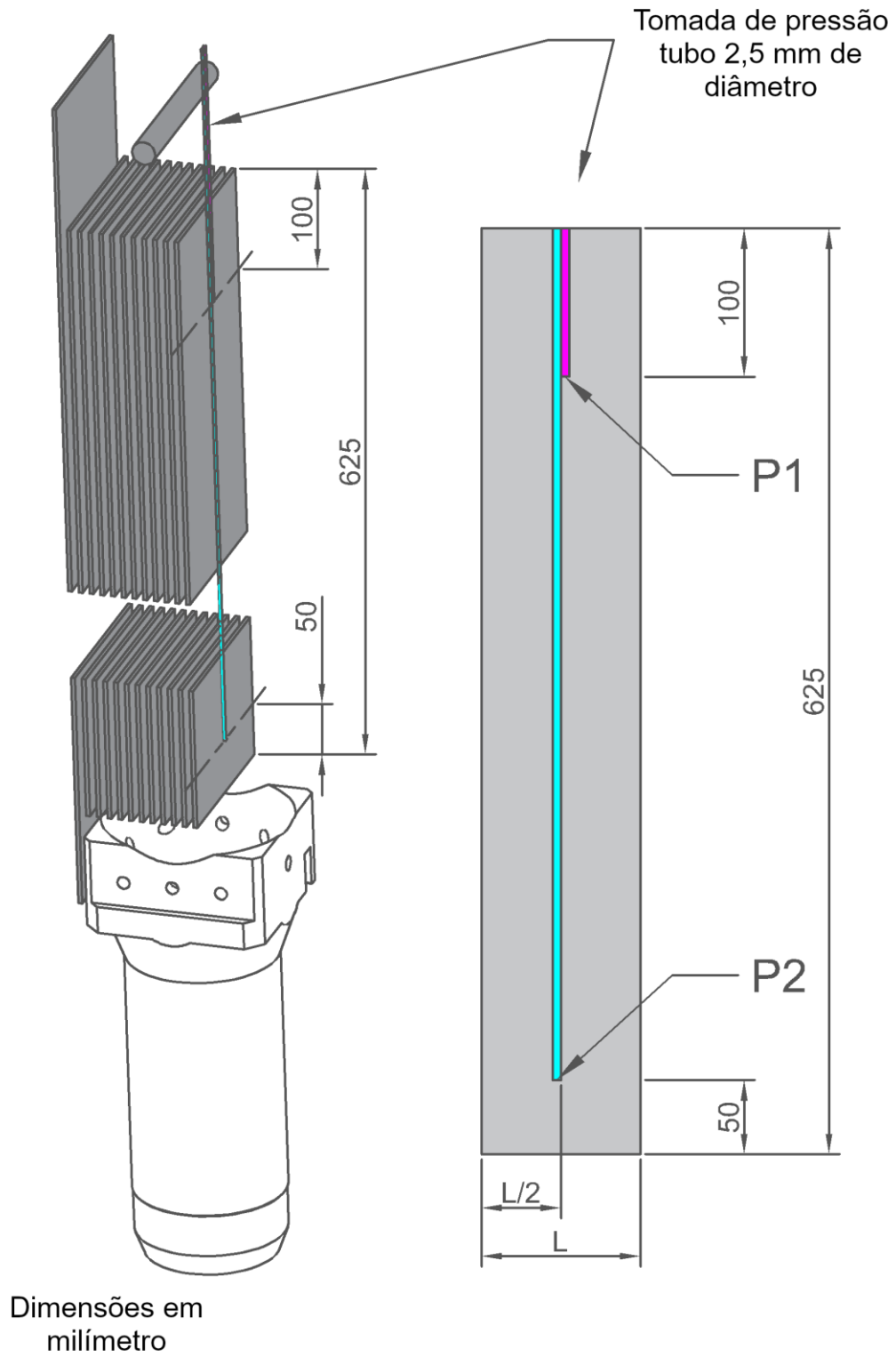
Para o estudo as seguintes hipóteses foram adotadas:

- Espessura dos canais uniforme e constante de 2,89 mm;
- Comprimento dos canais uniforme e constante de 67,10 mm;
- Comprimento total do canal de 625,00 mm, sendo a medida da queda de pressão feita com comprimento de 475,00 mm conforme Figura 23;
- Área de escoamento dos canais igual a 0,000133919 m<sup>2</sup>;
- Diâmetro hidráulico dos canais equivalente a 0,005541 m;
- Influência da sonda de medição considerada desprezível nos cálculos de área e diâmetro hidráulico dos canais;
- Rugosidade nas paredes equivalente a parede lisa;
- Pino de sustentação presente na montagem.

Realizada de forma indireta, a medição da vazão em cada canal utilizou a Equação 1, que relaciona a queda de pressão com a velocidade média no canal:

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \rho \frac{V^2}{2} \quad (1)$$

Figura 23 – Regiões de tomada de pressão no experimento



Fonte: Autor

A estimativa do coeficiente de atrito utilizou a Equação 2, que relaciona o número de Reynolds com a rugosidade relativa, onde  $a$  e  $b$  são coeficientes dependentes da rugosidade relativa sobre o número de Reynolds.

$$f = a \cdot \text{Re}^{-b} \quad a \text{ e } b \text{ são coeficientes que dependem de } \varepsilon/D_h \quad (2)$$

Para determinar o número de Reynolds, foi considerada a Equação 3.

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot D_h}{\mu} \quad (3)$$

Substituindo as Equações 2 e 3 na Equação 1 e rearranjando para a calcular a velocidade média ( $V$ ) de escoamento no canal, obtém-se a Equação 4, onde 9,796 é um fator de conversão para a queda de pressão  $\Delta P$  de [mmH<sub>2</sub>O] (obtido no experimento) para [N/m<sup>2</sup>]. A Equação 5 é usada para calcular o diâmetro hidráulico do canal, e as Equações 6 e 7 são usadas para cálculo das propriedades do fluido em função da temperatura enquanto que a Equação 8 é usada para calcular a vazão volumétrica no canal em [m<sup>3</sup>/h].

$$V = {}^{2-b}\sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P \cdot D_h^{1+b} \cdot 9,796}{a \cdot \rho^{1-b} \cdot \mu^b \cdot L}} \quad V \text{ [m/s]} \quad (4)$$

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{P_m} \quad A \text{ [m}^2\text{]} \text{ e } P_m \text{ [m]} \quad (5)$$

$$\rho = -0,00358397 \cdot T^2 - 0,0911028 \cdot T + 1001,61 \quad (6)$$

$$\mu = -4,35 \cdot 10^{-13} \cdot T^5 + 1,42 \cdot 10^{-10} \cdot T^4 - 1,88 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 1,34 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 5,99 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,001792$$

$$\mu \text{ [kg/m.s]} \quad \text{e} \quad T \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (7)$$

$$Q = V \cdot A \cdot 3600 \quad Q \text{ [m}^3\text{/h]} \quad (8)$$

Ao final da rodada ensaios na bancada experimental o resultado da distribuição de vazão está demonstrado no Gráfico 1. O Gráfico 2 apresenta o resultado de maneira linearizada, onde é possível comparar todas as faixas de vazões estudadas.

Gráfico 1 – Resultado da distribuição de vazão experimental IEA-R1

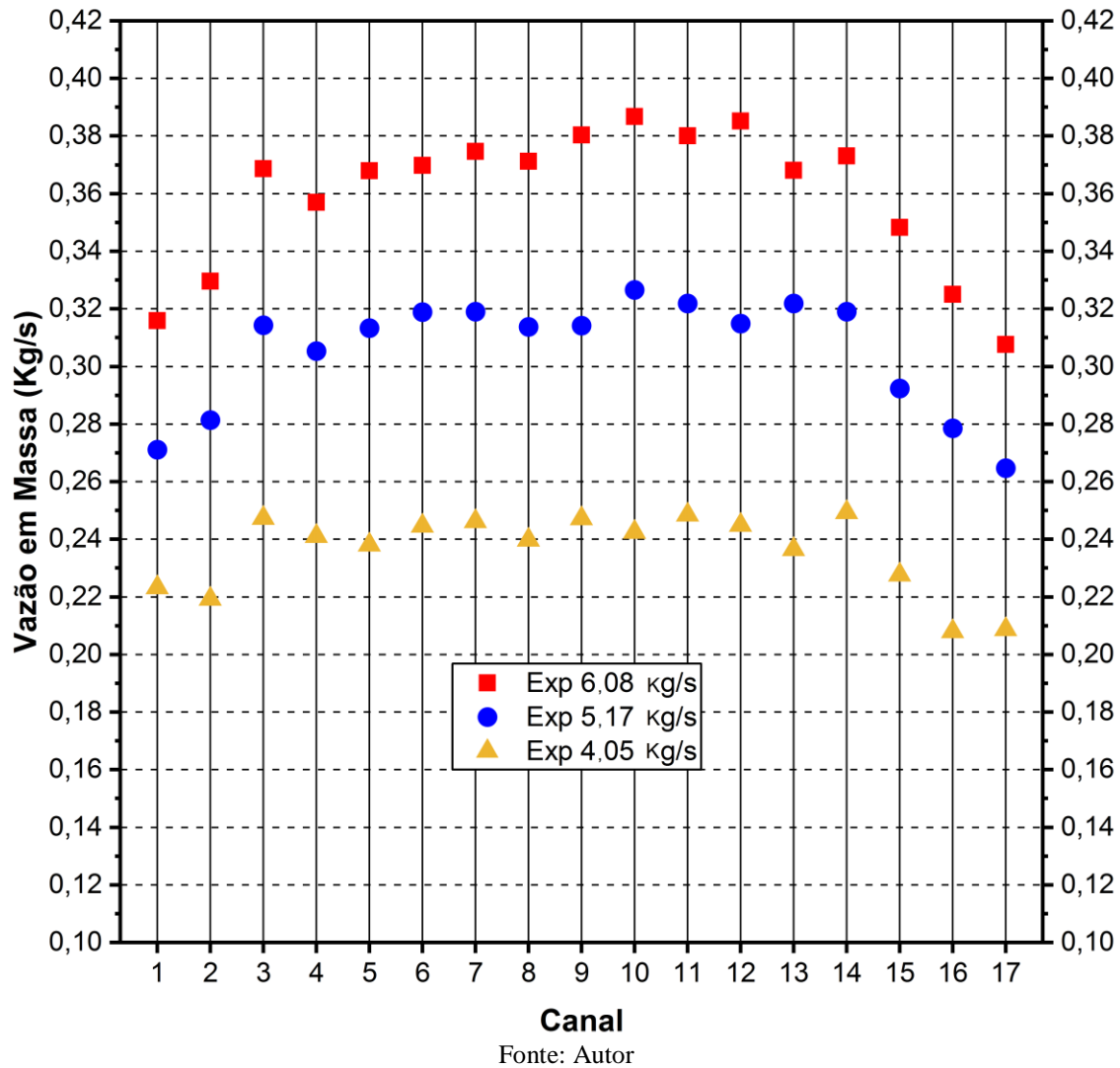
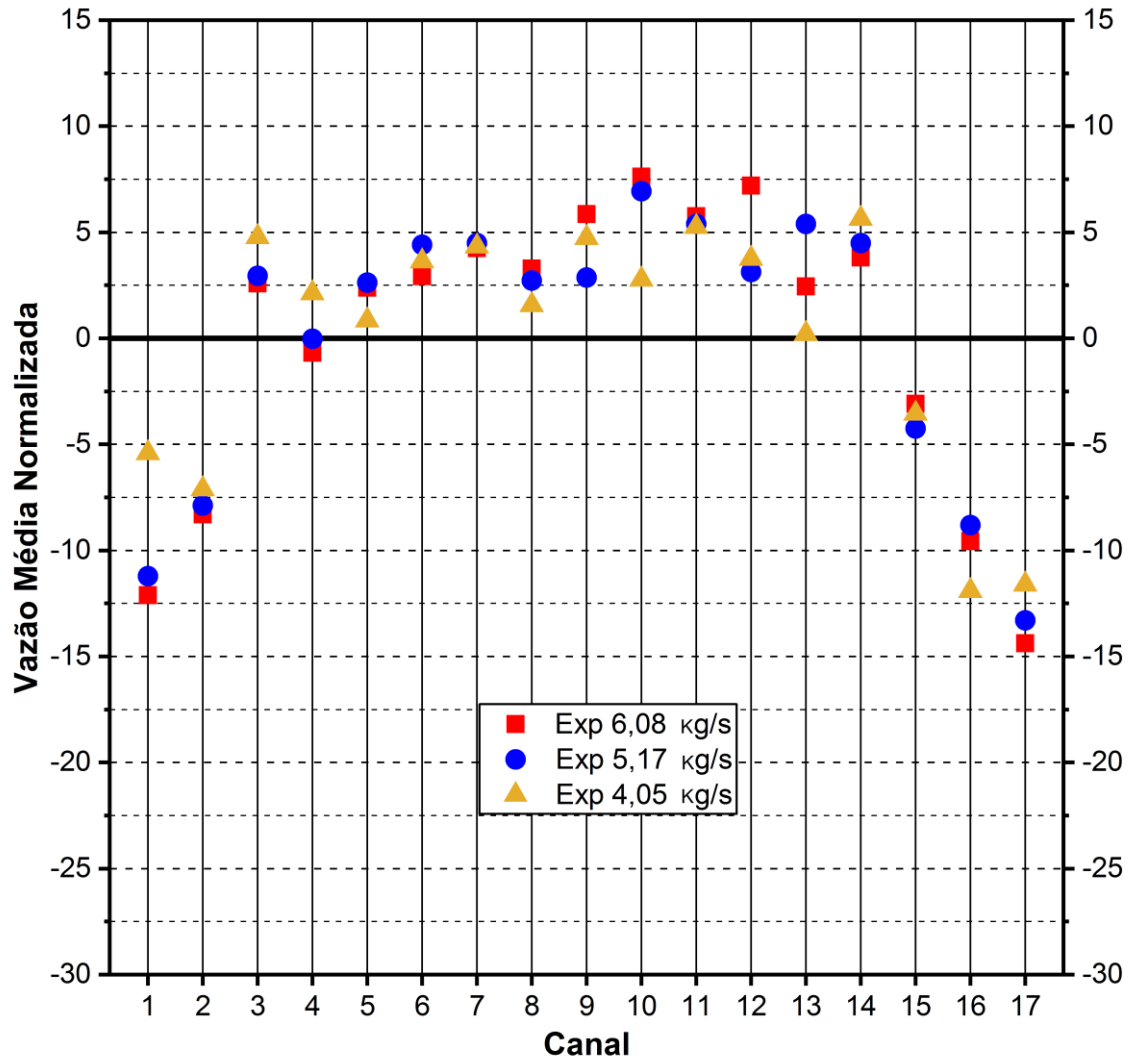




Gráfico 2 – Resultado normalizado



Fonte: Autor

## 6 METODOLOGIA CIENTÍFICA

O desenvolvimento de computadores digitais de alta velocidade e desempenho, a partir da metade do século XX ao início do século XXI, mudou totalmente a abordagem dos problemas relacionados à mecânica computacional (ciência que estuda fenômenos físicos utilizando técnicas que envolvem computação, matemática e engenharia). A Dinâmica dos Fluidos Computacional ou CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*) é a área da computação destinada aos estudos que envolvem os fenômenos de mecânica dos fluidos e transferência de calor com o intuito de obter grandezas físicas, tais como velocidade, temperatura e pressão, na região de escoamento estudada [38].

Problemas complexos com múltiplas variáveis, que poderiam levar anos para serem resolvidos (analítica ou experimentalmente), ou mesmo nem apresentar uma solução viável, passaram a ser resolvidos por análises computacionais com economia de custo e tempo [39].

Basicamente a CFD usa uma abordagem computacional para resolver numericamente as equações diferenciais parciais (ou PDE, do inglês *Partial Differential Equation*) que governam um processo físico de interesse.

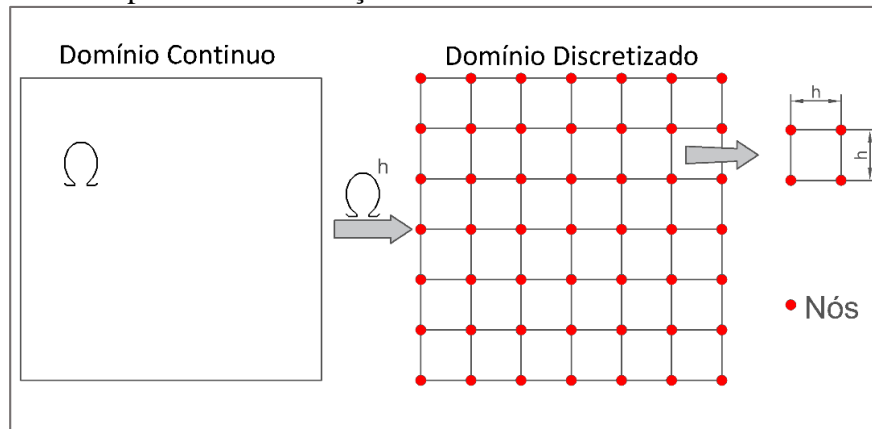
As PDE são equações obtidas através da modelagem matemática: técnica utilizada para descrever e representar processos, e problemas reais. Elas envolvem equações que descrevem fenômenos físicos de interesse para a termo-hidráulica tais como dinâmica dos fluidos, difusão do calor e outros.

Segundo Santiago [40]:

“Os métodos numéricos consistem em substituir os termos das derivadas parciais envolvidas na equação diferencial por aproximações numéricas. Com isso, o problema contínuo é transformado em um problema discreto, em que o domínio espacial é fracionado em um número finito de pontos ou nós. Essa transformação é conhecida como discretização do domínio e resulta em um conjunto de pontos discretos e seus elementos, que recebe o nome de malha computacional, ou simplesmente malha”.

A Figura 24 ilustra a ideia de transformação do domínio contínuo em uma malha (domínio discretizado).

Figura 24 – Exemplo de transformação do domínio contínuo em domínio discretizado

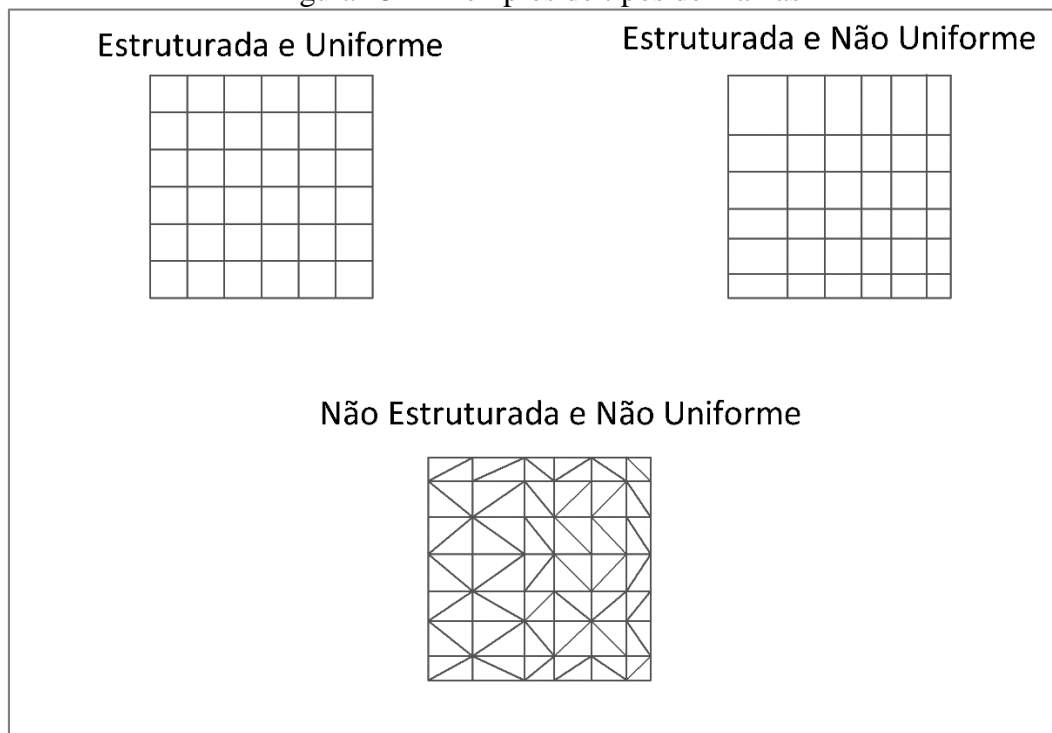


Fonte: Autor

O processo de discretização permite atribuir a cada nó do sistema (ou malha) uma equação algébrica ou uma coordenada, cuja característica depende do tipo de aproximação numérica que será utilizada.

A malha resultante, que representa o domínio discretizado, não necessariamente é homogênea e uniforme. A Figura 25 representa algumas estruturas diferenciadas que podem ser geradas no processo de discretização de um domínio.

Figura 25 – Exemplos de tipos de malhas



Fonte: Autor

Existem vários métodos para resolver um modelo discretizado. Para análises CFD os métodos mais comuns são: Método dos Elementos Finitos (MEF); Método dos Volumes Finitos (MVF); e, Método das Diferenças Finitas (MDF).

## 6.1 Equações de governo

Para obtenção do comportamento detalhado ponto a ponto das propriedades em um campo ou domínio de interesse as leis que governam a mecânica dos fluidos e a transferência de calor devem ser descritas na forma diferencial. Essas equações representam as leis de conservação de massa, energia e momento.

Em um estudo de dinâmica de fluidos sendo ele bidimensional ou tridimensional, não é possível seguir uma parcela de fluido ao longo do domínio. Sendo assim para a aplicação das equações diferenciais é mais conveniente trabalhar dentro de uma região infinitesimal do domínio, ou elemento da malha volumétrica. Assim é possível analisar uma parcela de matéria que passa pelo volume de controle ou região de interesse.

Garantindo o princípio de conservação de massa em termos de volumes de controles infinitesimal, o fluxo de massa saindo e entrando na superfície de controle deve ser sempre igual. Dessa forma a equação da Conservação de Massa ou Continuidade pode ser descrita por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho V) = 0 \quad (09)$$

A segunda lei de Newton estabelece que a somatória das forças externas para um sistema é igual a variação da quantidade de movimento linear atuando sobre o sistema. Para um volume de controle infinitesimal de massa a equação da quantidade de movimento será descrita por:

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + [\nabla \cdot (\rho V V)] = -\nabla p - [\nabla \cdot \tau] + S \quad (10)$$

Na Equação (10) os termos do lado esquerdo representam a aceleração total da partícula fluida. No lado direito os dois primeiros termos representam respectivamente as forças de pressão e forças viscosas, ou tensões normais e cisalhantes e o último termo representa um termo fonte.

Admitindo-se condição de fluido Newtoniano, a equação da quantidade de movimento passa a ser denominada equação de Navier-Stokes. Considerando também as hipóteses simplificadoras de densidade e viscosidade constante e escoamento incompressível, temos a Equação (10) reduzida para:

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho(V \cdot \nabla V) = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + S \quad (11)$$

## 6.2 Programa CFD

Atualmente existem diversos *softwares* comerciais disponíveis para realização de análises CFD, cada qual é estruturado por algoritmos numéricos diferentes e conseqüentemente possuem se comparado, vantagens e desvantagens. Para a solução de problemas complexos cada programa oferece interfaces distintas que possibilitam a aplicação de diversos parâmetros de projeto.

Entretanto, mesmo com as diferenças existentes entre os programas comerciais disponíveis, todos os códigos contêm três etapas básicas para a sua solução: Pré-Processamento (definição da geometria, condições de contorno, indicação do modelo matemático, tipo de fluido e propriedades do fluido); Resolução (processamento); e Pós-Processamento (análises dos resultados).

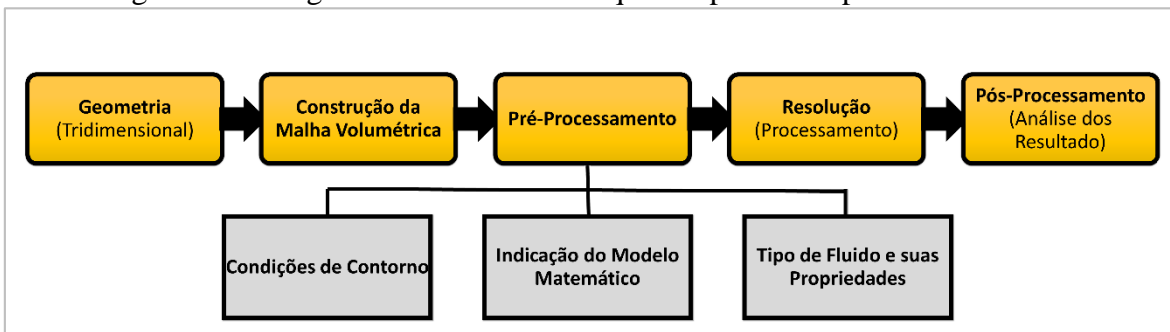
O presente trabalho utilizou, para realização das análises hidráulicas do elemento combustível, o software comercial ANSYS CFX® [41]. Este programa elimina a criação e desenvolvimento de ferramentas matemáticas, fato este que não extingue a necessidade da familiarização com as equações de dinâmica dos fluidos, de transferência de calor, e do método numérico utilizado na solução a ser empregada.

O ANSYS CFX® [41] é integrado a uma plataforma interativa denominada *WorkBench*, a qual permite ao usuário indicar os parâmetros necessários à realização do estudo a ser concretizado.

Ao inicializar um projeto CFD nesta plataforma, uma hierarquia de procedimentos é imposta ao usuário. A seqüência a ser seguida para as resoluções de problemas utilizando o ANSYS CFX®, está demonstrada no diagrama de blocos indicado na Figura 26. Todos os

passos demonstrados neste diagrama são essencialmente necessários à elaboração do modelo matemático.

Figura 26 – Diagrama de blocos: hierarquia de processos para análises CFD



Fonte: Adaptado de [42] pelo autor

### 6.3 Geometria (modelo tridimensional região fluido)

Para a realização da geometria (ou modelagem sólida) tridimensional, o pacote *WorkBench* possui um software próprio para este fim, denominado *Design Modeler*; este também aceita importação de geometrias realizadas em outros *softwares*. Sempre que possível é indicada a utilização do próprio modelador do ANSYS CFX<sup>®</sup> evitando assim problemas de compatibilidade. Entretanto, o *Design Modeler* quando comparado a outros *softwares* de modelagem 3D apresenta poucas ferramentas e estrutura; em casos de geometrias complexas faz-se aceitável a utilização de programas externos.

O presente trabalho utilizou para a criação da geometria o *software* SolidWorks<sup>®</sup> [43]. Atual concorrente direto dos maiores programas de modelagem tridimensional existentes no mercado, apresenta ferramentas suficientes e adequadas para a modelagem do elemento combustível do IEA-R1.

Destaca-se que nessa etapa foi realizada a modelação da região tridimensional do fluido, sendo assim não serão modeladas as superfícies e componentes sólidos como placa combustível, pino de sustentação e outros. Estruturas sólidas serão retratadas como não existentes e em seus lugares nenhuma geometria vai ser projetada.

#### 6.3.1 Criação do modelo fluido

Buscando garantir a máxima fidelidade possível com o modelo real do elemento combustível DMPV-01 utilizado nos experimentos de Torres et al [31] e [33], a modelagem do domínio tridimensional possui sempre que possível as medidas exatas do projeto de

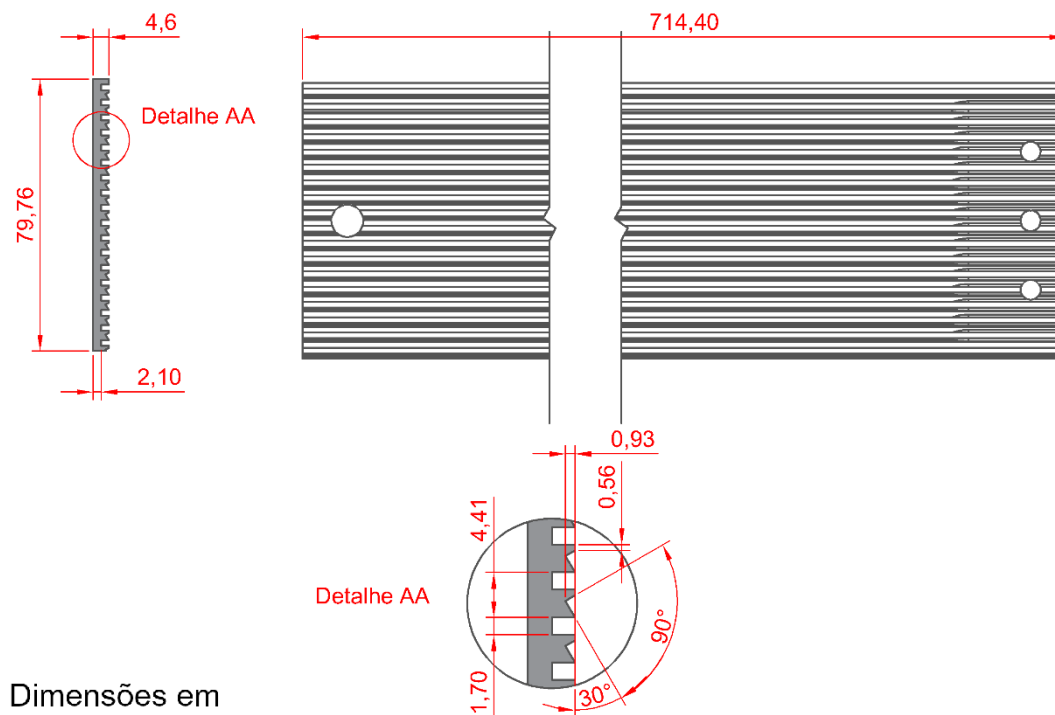
fabricação. Entretanto faz-se necessário simplificar geometricamente algumas regiões e detalhes da estrutura, que podem apresentar complicações numéricas sem agregar valor científico e analítico aos resultados observados.

Dada a complexidade geométrica da placa de suporte lateral esquerda e direita ilustrada em detalhes na Figura 27 essa região foi simplificada na fase de criação do modelo tridimensional do domínio fluido. O processo de simplificação está ilustrado na Figura 28, destaca-se também as principais medidas adotadas para a região de entrada do fluido.

A largura dos canais ficou definida em 67,40 mm valor muito próximo ao utilizado por Torres et al 2003 de 67,10 mm. A espessura dos canais foi mantida em 2,89 mm seguindo as medidas nominais de projetos existentes no plano de fabricação do DMPV-01 de LIMA et al [32].

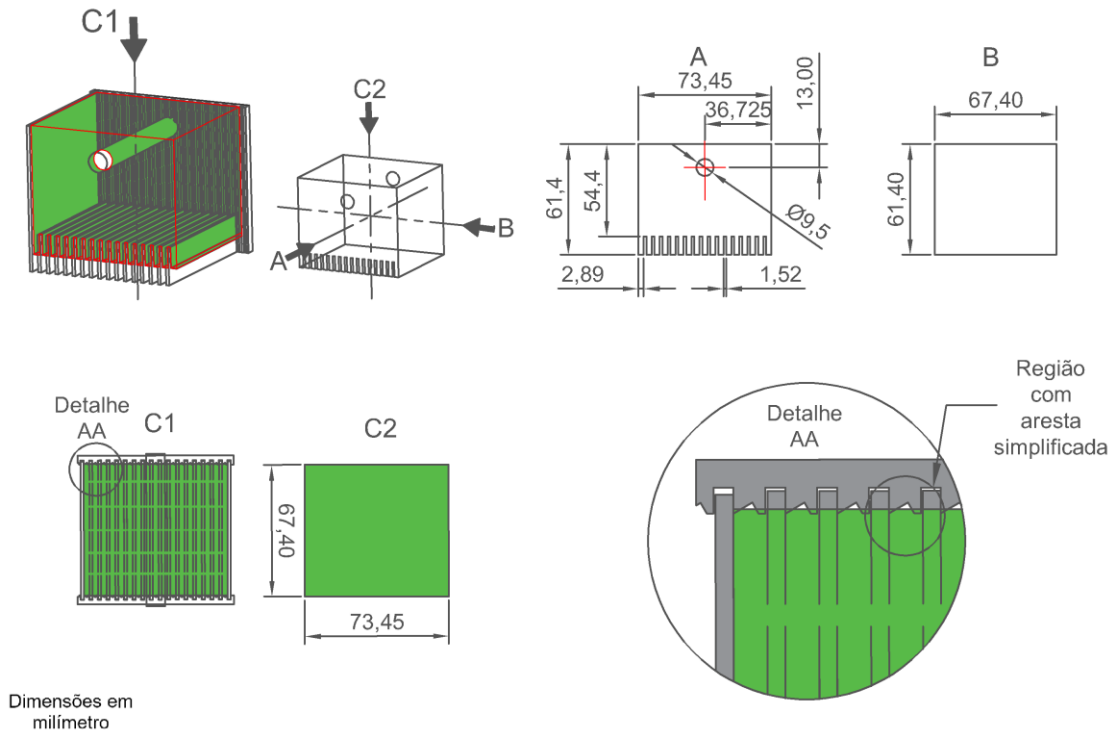
Com 17 canais homogêneos e independentes, a região das placas foi criada dando continuidade à região de entrada. Cada canal ficou com espessura de 2,89 mm, largura de 67,40 mm e comprimento total de 205,00 mm conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 27 – Ilustração detalhada da placa de suporte lateral



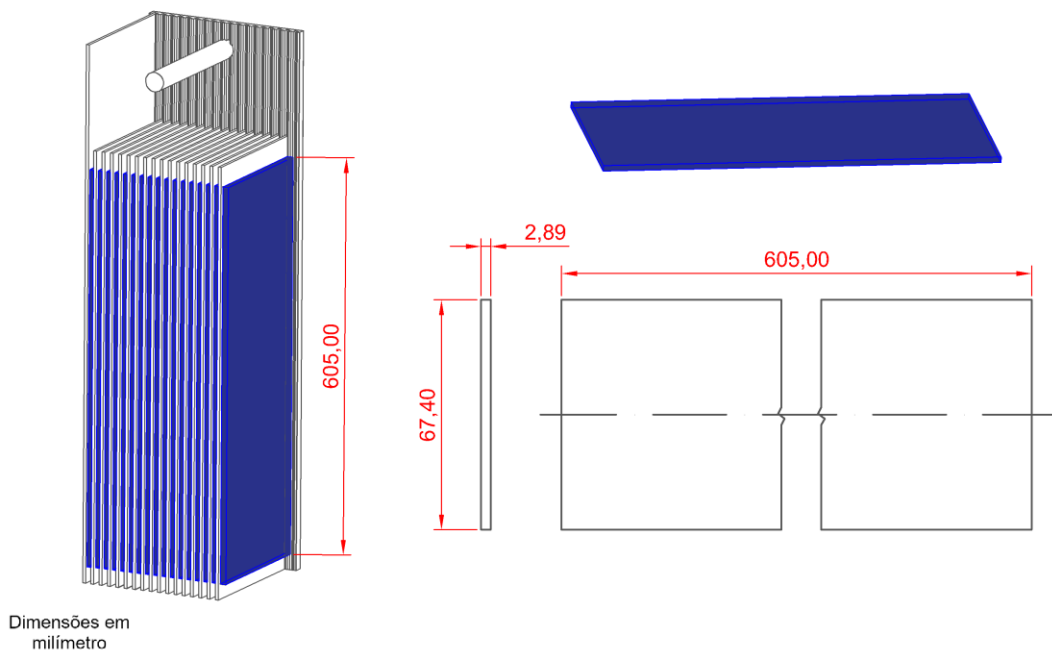
Fonte: Autor

Figura 28 – Detalhamento da região de entrada e detalhamento da simplificação de geometria



Fonte: Autor

Figura 29 – Detalhamento da região dos canais



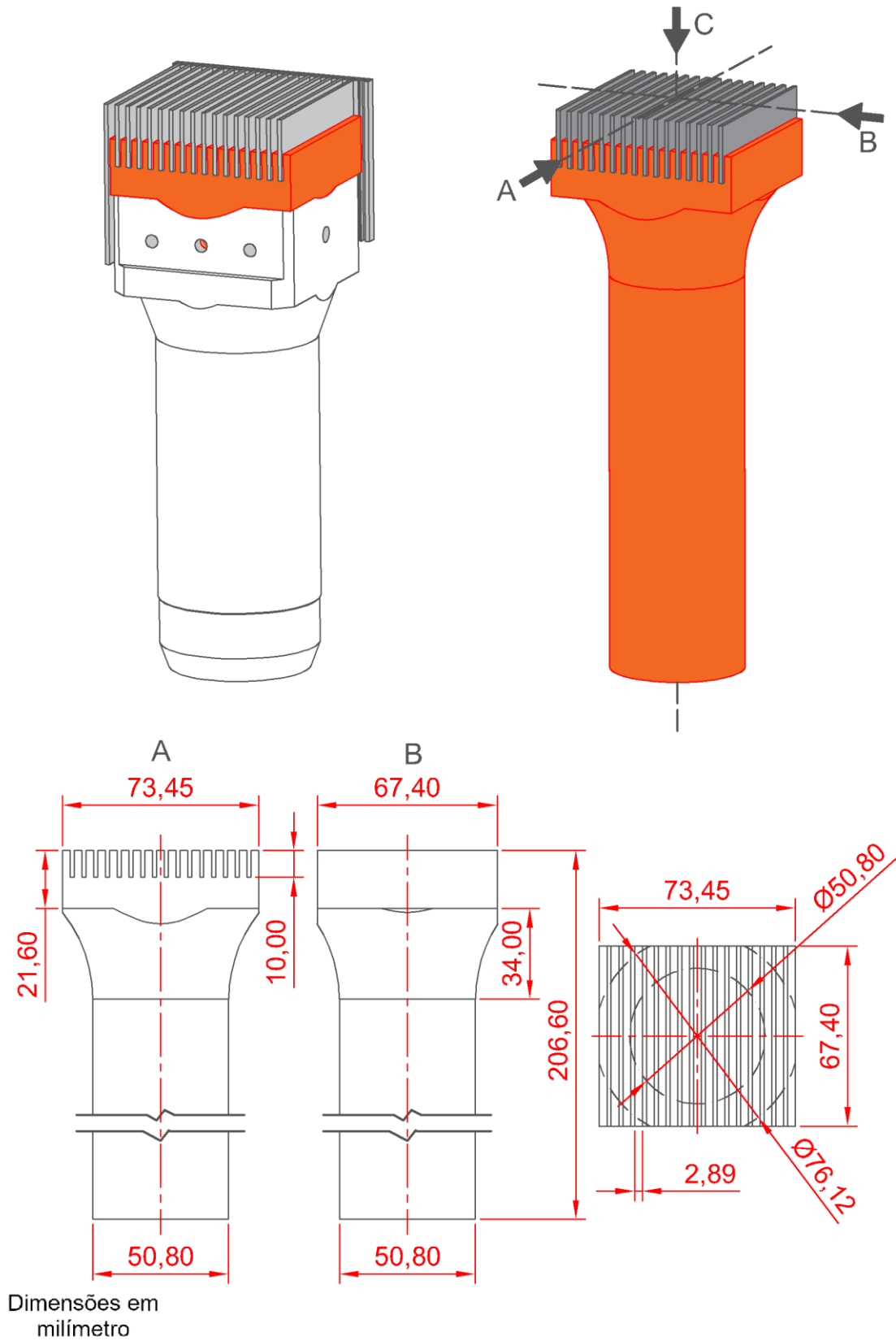
Fonte: Autor



Ilustrada na Figura 30, a região de saída de fluido inicialmente deu continuidade as dimensões dos 17 canais de escoamento. Entretanto as regiões de contato do bocal com as placas laterais e de suporte sofreram simplificações, pois como ilustrando anteriormente na Figura 22 (página 50) essas regiões contém algumas aberturas e mini canais, os quais foram eliminados na etapa da criação do modelo tridimensional. Essa simplificação garante que toda a vazão que é admitida na região de entrada é direcionada totalmente à contração do bocal e posteriormente a saída desprezando a hipótese de qualquer saídas alternativas para o fluido.

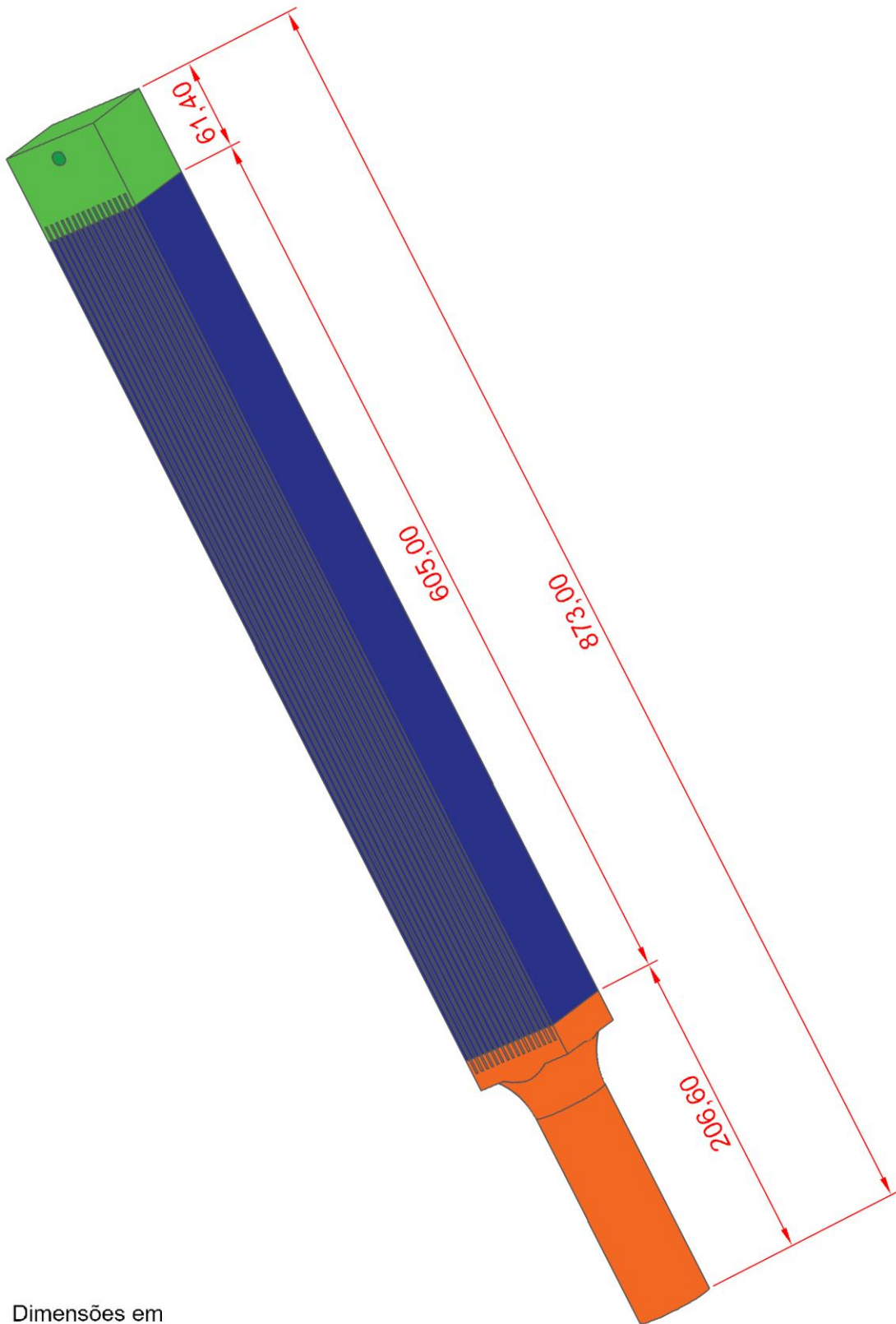
A Figura 31 ilustra a junção da modelagem do domínio tridimensional da região de entrada, região das placas e região de saída com as medidas principais em evidência.

Figura 30 – Detalhamento da região de saída



Fonte: Autor

Figura 31 – Modelagem do domínio tridimensional



Dimensões em milímetro

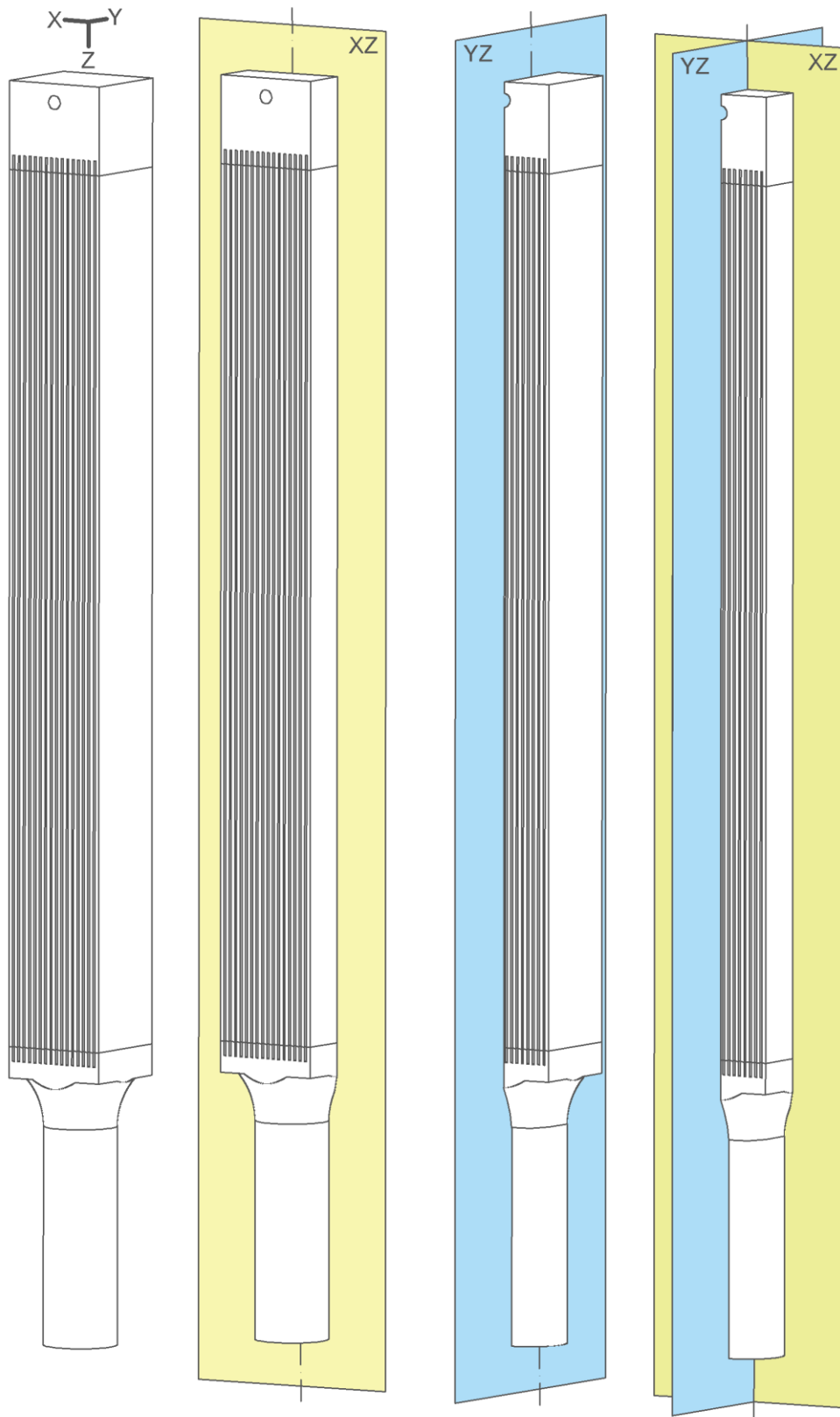
Fonte: Autor

### 6.3.2 Simetria do modelo fluido

Observando o modelo tridimensional de topo é possível notar que este se resume em um aspecto retangular na região de entrada que é subdividido em canais retangulares homogêneos na região dos canais de refrigeração sendo posteriormente submetido a uma região de secção retangular seguida de uma contração cone-tubular. A análise unificada das três regiões apresenta aspecto de simetria em torno de dois planos. A Figura 32 coloca o modelo Fluido em um plano cartesiano, onde as faces de simetria então representadas pelos planos XZ e YZ.

Abordando a condição de simetria, faz-se a utilização de apenas  $\frac{1}{4}$  do modelo fluido desenvolvido para elemento combustível padrão do reator IEA-R1. Essa simplificação será útil na parte subsequente de criação de malha volumétrica, pois economiza tempo computacional no processamento de dados além de diminuir o número de elementos que farão parte do volume finito. Muitos autores utilizam essa abordagem para modelos de estudos CFD, [24], [36] e [44].

Figura 32 – Planos de Simetria



Fonte: Autor

## 6.4 Malha volumétrica

Seguindo a hierarquia apresentada na Figura 26, a modelagem da malha computacional foi feita através do software *CFX<sup>®</sup> Mesher*, interno ao *Workbench*. O *CFX<sup>®</sup> Mesher* apresenta ferramentas que permitem ao usuário domínio sobre a malha criada no processo de discretização, como: forma dos elementos criados (tetraédrico, prismático, hexaédricos e outros); definição do tamanho máximo e mínimo das arestas; e diversos outros fatores. O a literatura [45] destaca detalhes sobre o processo de criação da malha volumétrica no ANSYS CFX<sup>®</sup> [41], assim como as equações de conservação e demais aspectos teóricos.

A criação da malha é um dos passos mais importantes do trabalho. A seleção e adição inapropriada de parâmetros podem levar a resultados equivocados que não correspondam ao comportamento hidráulico real do fluido no elemento combustível; ou mesmo apresentar um resultado real e plausível com a realidade, porém exigindo um grande tempo de simulação computacional.

Em suma, na maioria dos problemas de CFD, para determinar uma boa qualidade de malha, deve-se manter um compromisso entre o número de elementos e suas dimensões com a variação nas propriedades e grandezas envolvidas. Vale dizer, para certo resultado obtido após a convergência, por mais refinada (ou discretizada) que a malha seja, as respostas obtidas para uma mesma condição de contorno serão muito próximas.

Deste modo o diagrama de blocos indicado na Figura 33 foi construído para ilustrar o processo de verificação da qualidade da malha em relação a resposta final observada. A partir da resposta obtida para a primeira malha é necessário refiná-la para as mesmas condições de contorno, assim uma nova resposta será obtida e esta deve ser comparada à anterior; caso haja variação das propriedades ou grandezas um novo refinamento será necessário. [42]

Figura 33 – Diagrama de blocos para refinamento da malha

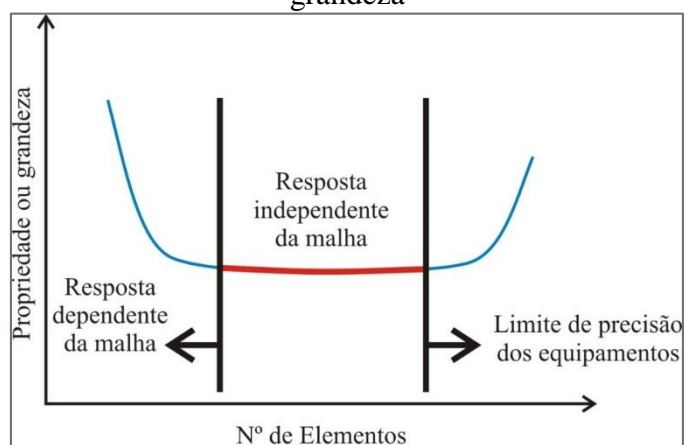


Fonte: [42]

Este processo mostrado no diagrama anterior deve ser realizado para qualquer estudo de CFD para garantir a independência da malha computacional. Na literatura técnica científica é possível encontrar alguns trabalhos que indicam métodos para refinamento da malha [46] e [47]. Ainda a título de curiosidade, a Figura 34 a seguir ilustra um gráfico indicando a quantidade de elementos de um domínio computacional em função de propriedade ou grandeza observada, como pode ser observado, quanto menor for o tamanho do elemento utilizado, maior será a probabilidade de que a resposta obtida não seja dependente da malha. Entretanto, segundo Angelo et al [42], há pelo menos dois problemas distintos que podem ocorrer:

- 1- Limite dos equipamentos, ou seja, a quantidade necessária de memória RAM para efetuar um determinado cálculo é proporcional à quantidade de elementos.
- 2- Limite de precisão dos equipamentos, ou seja, o tamanho do elemento é tão pequeno que está próximo da precisão dos computadores, mesmo utilizando-se do artifício de dupla precisão. (Ao ativar esta opção a quantidade necessária de memória RAM será duplicada).

Figura 34 – Ilustração indicando número de elementos em função de uma propriedade ou grandeza



Fonte: [42]

#### 6.4.1 Criação da malha volumétrica

A criação da malha volumétrica ou domínio tridimensional seguiu a metodologia apresentada anteriormente a fim de garantir que as respostas finais do modelo sejam independentes da qualidade da malha. Baseada na geometria de um quarto do modelo fluido, conforme Figura 32 (página 67) a malha foi desenvolvida para resolução do sistema de equação de conservação utilizando método dos volumes finitos, sendo compostas por

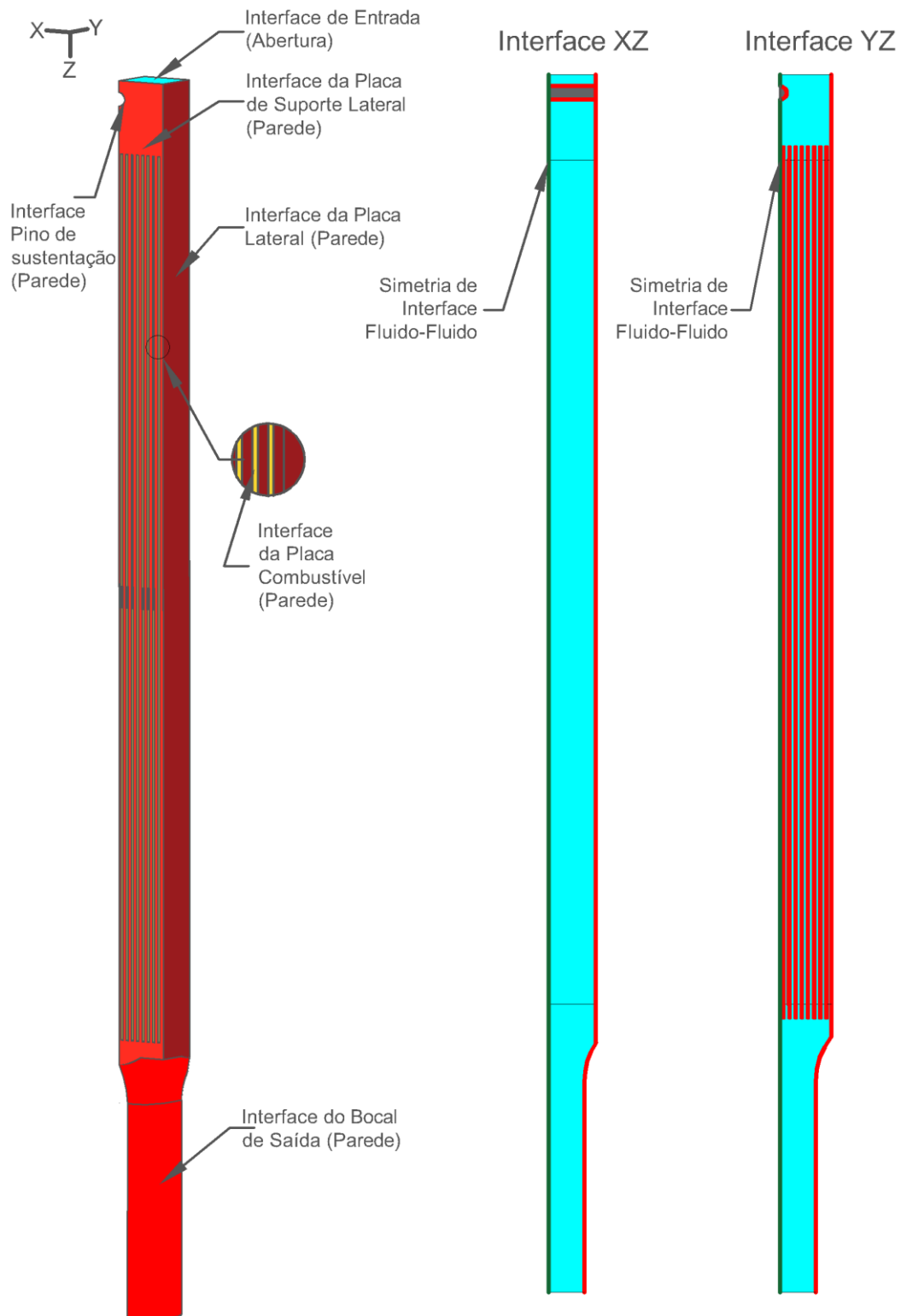
elementos mistos e dispersos de maneira não estruturada, variando em formas geométrica e tamanho.

Nas regiões próximas as paredes do elemento combustível, local onde existe o contato de fluido com parte sólida, existe a necessidade de capturar o desenvolvimento do perfil de velocidade, ou camada limite. Para capturar o fenômeno desejado uma camada de elementos prismáticos de elementos perpendiculares ao escoamento principal, descendente deve ser criada, essa camada é comumente denominada de *inflation layers*, ANSYS-CFX®. A Figura 35 ilustra as faces onde há a ocorrência do efeito camada limite devido a região de interface de fluido, repensado fisicamente no modelo e a região de interface sólido (não representado fisicamente).

Para a criação da malha no modelo tridimensional, utilizaram-se os seguintes parâmetros como base, Figura 36. A ferramenta *Use Advances Size Function* foi ativa com o parâmetro *On: Proximity and Curvature* que faz com que a malha criada receba refinamento nas regiões onde há curvaturas, faces curvas e estreitamentos de superfícies. A Figura 37 ilustra em uma geometria qualquer o efeito da ativação do parâmetro. Nas regiões de estreitamento (canais de refrigeração) foi implícito com a opção *Num Cells Across Gap* a criação de pelo menos 7 camadas de elementos. Outro parâmetro de importância foi a seleção do *max face size* em 2,00 mm fazendo com que a grande maioria dos elementos criados não tenham comprimento maior do que o estipulado.



Figura 35 – Indicação das interfaces de simetria e regiões de paredes



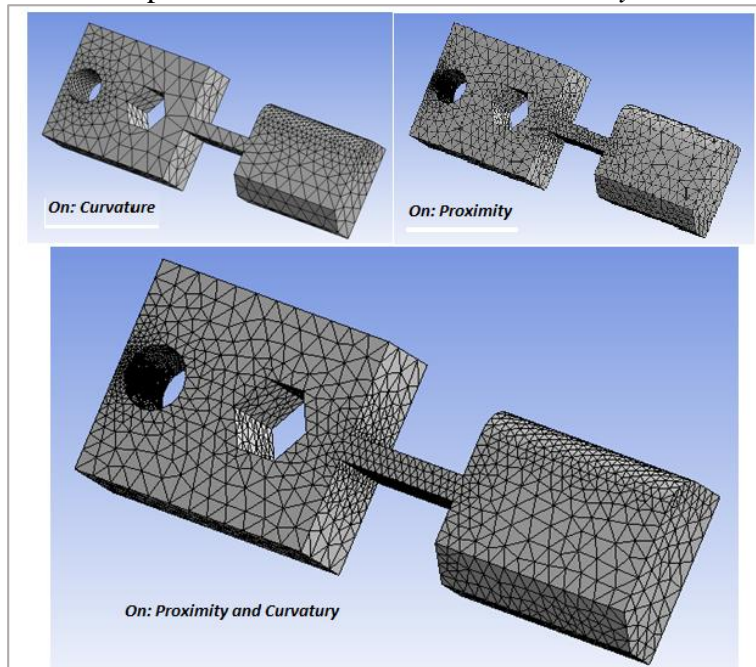
Fonte: Autor

Figura 36 – Captura de tela do ANSYS: Parâmetros globais para criação da malha

Details of "Mesh"	
+ Defaults	
- Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
Proximity Accuracy	0,5
Num Cells Across Gap	7
Min Size	Default (0,435840 mm)
Max Face Size	2,0 mm
Max Tet Size	Default (87,1690 mm)
Growth Rate	Default (1,20 )
Minimum Edge Length	1,41990 mm
+ Inflation	
+ Advanced	
+ Pinch	
+ Statistics	

Fonte: Autor

Figura 37 – Propriedade da ferramenta *On: Proximity and Curvature*



Fonte: Autor

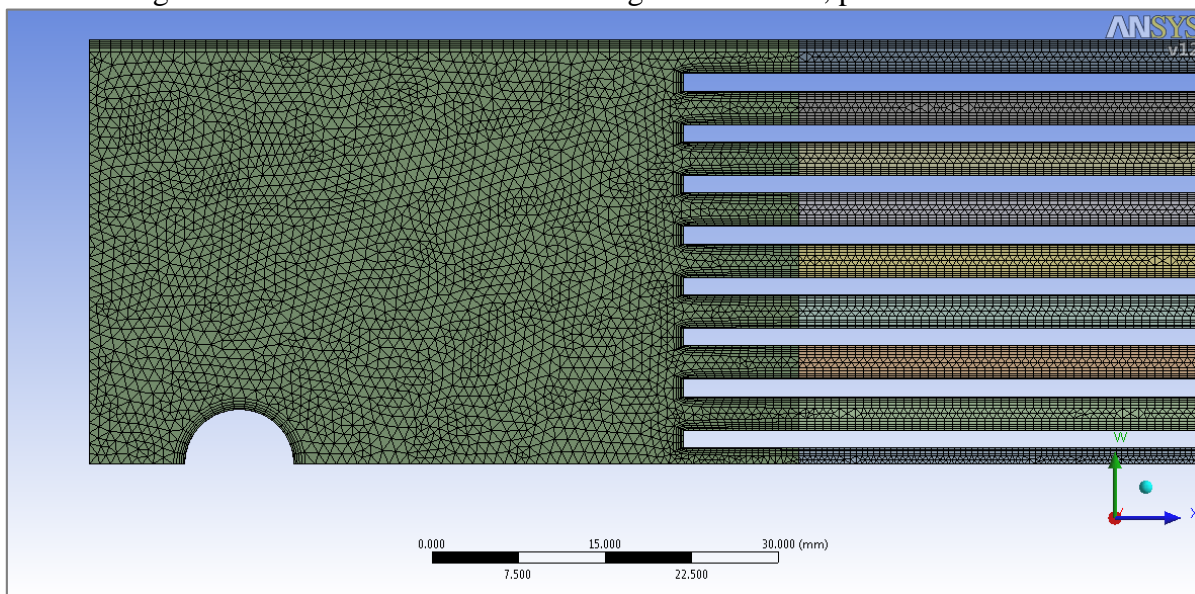
A imposição dos parâmetros principais ou globais na guia *sizing* atua como uma base inicial para a criação da malha geométrica, entretanto, para refinar alguns pontos específicos da geometria é necessário aplicar um controle local.

O controle de malha local foi aplicado nas regiões dos canais, pois estas possuem uma espessura nominal de apenas 2,89 mm, sendo assim o tamanho da aresta que representa a espessura do canal é muito pequeno em relação ao tamanho das demais arestas da geometria. Um caso ainda mais complexo acontece no canal central, o qual é localizado em uma região de simetria entre dois planos, fazendo com que sua espessura tenha uma aresta de apenas 1,445 mm. Para essa região foi aplicado um controle global individual.

Com essa disparidade entre a espessura dos canais e outras arestas da geometria, a região dos canais de escoamento foi discretizada com auxílio adicional de ferramentas de controle local denominadas de *Local Sizing control*, onde os elementos nos canais 1 ao 8 foram discretizado com *sizing control* de 0,70 mm e no canal central por ser menor foi imposto um controle local de 0,5 mm para os elementos.

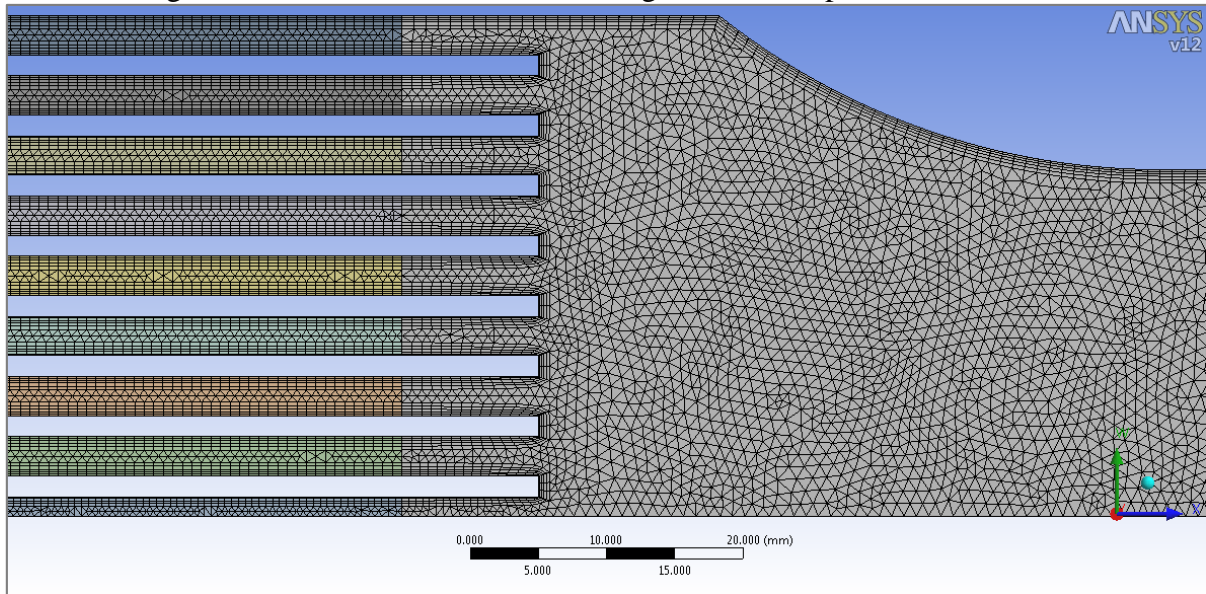
A Figura 38 e Figura 39 mostram a malha final gerada nas regiões de entrada e saída. É possível notar que nos canais de escoamento embora os elementos sejam menores não há uma discrepância de tamanho entre os demais elementos.

Figura 38 – Malha tridimensional na região de entrada, plano de simetria



Fonte: Autor

Figura 39 – Malha tridimensional na região de saída, plano de simetria



Fonte: Autor

## 6.5 Pré-processamento

Nessa etapa do processo, são implementadas as condições de contorno que governam as regiões criadas anteriormente na etapa de criação da malha volumétrica. A presente etapa é também denominada pré-processamento.

Como base principal para as condições de contorno que regem o escoamento no elemento combustível serão utilizados os estudos experimentais de Torres et al 2001 [31] e 2003 [33], assim como o estudo de Andrade et al 2015 [24].

### 6.5.1 Regime de escoamento

Tendo em vista que o modelo experimental construído por Lima et al [32] é um elemento sem presença de combustível nuclear (denominado *dummy*) e conseqüentemente sem geração de calor os estudos de Torres et al 2001 [31] e 2003 [33] apenas apontam dados hidrodinâmicos. O experimento de 2003 contou com um total de 295 coletas de pressão nos 17 canais onde mediu-se uma temperatura média na entrada da água elemento combustível 27,4°C com desvio padrão de 4,1. A variação da temperatura dentro do desvio padrão não altera significativamente os valores da viscosidade da água presente na Equação 7 e o valor da densidade na Equação 6.

Com vista nos dados experimentais de Torres et al 2003 [33] é seguro admitir, como hipótese simplificadora, regime permanente, com temperatura do fluido refrigerante constante de 27 °C. Como fluido refrigerante foi utilizado propriedades da água em estado líquido. Andrade et al [24] também utilizam a temperatura da água em 27°C e regime de escoamento permanente para a simulação do elemento combustível.

### 6.5.2 Modelo de turbulência

O modelo de turbulência contemplado para a análise CFD foi o K-ε [48]. O presente trabalho não visa estudar os diferentes comportamentos por modelo de turbulência, assim a escolha do K-ε é uma opção conservadora, pois este é um modelo muito utilizado e de fácil implementação quando comparado a outros modelos [49]. Ahsan [50] demonstra a efetividade do modelo em capturar perda de carga em escoamentos totalmente desenvolvidos.

### 6.5.3 Condições de contorno gerais

Buscando replicar o modelo experimental, [31] e [33], foram impostas três faixas de vazões diferente para análises, como o modelo computacional utiliza apenas um quarto da geometria física do elemento real conforme abordado no Subcapítulo 6.3.2 (página 66), a vazão considerada na fronteira de entrada é apenas um quarto do valor utilizado no experimento. Pois como foi abordado anteriormente a vazão na região central do núcleo do reator IEA-R1 pode ser admitida homogênea em qualquer região e é seguro admitir que os elementos combustíveis recebem apenas vazão de topo totalmente desenvolvida como ilustrado na Figura 18 (página 45).

Foram consideradas as três vazões, a seguir, para um quarto do elemento:

- 5,49 m<sup>3</sup>/h (1,52 k kg/s);
- 4,67 m<sup>3</sup>/h (1,29 kg/s);
- 3,66 m<sup>3</sup>/h (1,01 kg/s).

Como pressão de referência na entrada do elemento combustível foi considerado 1,5 bar e na região de saída uma pressão relativa de 0 bar.

As regiões de interface do fluido com parede, conforme imagens anteriores foram consideradas paredes fixas com rugosidade de  $22\ \mu\text{m}$ , segundo projeto de Lima et al [32]. Para a região das paredes foi considerado uma função logarítmica seguindo a formulação descrita em [48].

## 7 RESULTADOS

### 7.1 Definição do número de elementos na malha

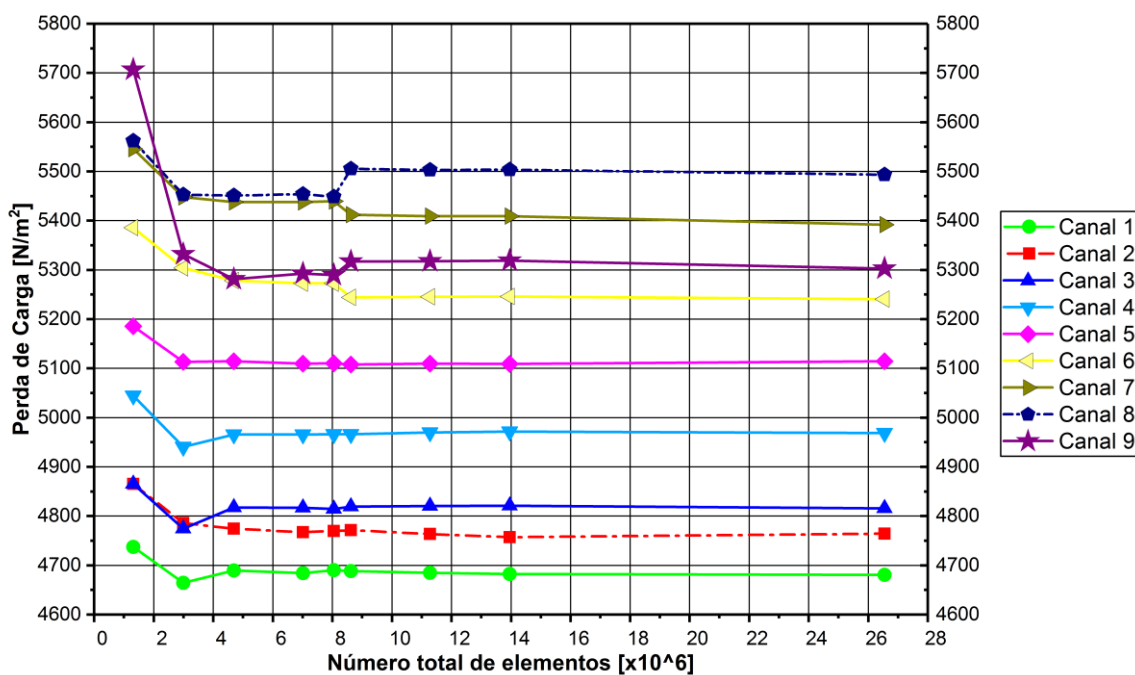
Conforme demonstrado anteriormente no capítulo de criação da malha tridimensional, a escolha da malha correta depende da sequência apresentada na Figura 36. A qualidade da malha numérica foi verificada e validada baseada no processo de aproximação proposto por Stern et al [46] e Wilson et al [47]. O resultado obtido no final da análise é independente da malha volumétrica devido a um processo sucessivo de soluções e refinamentos garantindo que para uma mesma condição de contorno a resposta tenha uma variação insignificante para qualquer grandeza física em uma variação grande no número de elementos

Exibindo a relação da perda de carga obtida analiticamente entre a entrada e saída de cada canal no eixo das ordenadas com o número total de elementos da malha no eixo das abscissas, o Gráfico 3 aponta que as respostas obtidas começam a apresentar uma variação muito pequena a partir da malha com 8.618.771 (aproximadamente 8,6 milhões) de elementos.

Subsequente a análise com 8,6 milhões de elementos o próximo refinamento utilizou 11.274.723 (aproximadamente 11,3 milhões) de elementos e posteriormente 13.957.103. Entre essas duas últimas análises os números de elementos criados na região dos canais mantiveram-se praticamente homogêneos, pois foram mantidos os controles de malha locais aplicados, no Capítulo 6, e apenas foram refinados o número de elementos nas regiões de entrada e saída por meio de controle global na guia *Sizing*.

A malha utilizada para continuação das demais análises foi o modelo com 13.957.103 elementos. Refinar a região de entrada e saída é importante pois garante que o tamanho dos elementos em todas as regiões da malha não apresente uma disparidade e mantenha um tamanho similar conforme foi demonstrado na Figura 38 e Figura 39.

Gráfico 3 – Aproximação de Stern e Wilson para determinação do número de elementos



Fonte: Autor

### 7.1.1 Influência do pino de sustentação e faces de simetria no número de elementos

Analisando-se apenas os canais 1 ao 5 no Gráfico 3 é possível notar que com a malha de 4.689.449 elementos os resultados apresentam valores muito próximos daqueles apresentados pelas malhas mais refinadas. Entretanto os demais canais 6 ao 9 sofrem variações significativas nos resultados até a malha com 8,6 milhões de elementos. Essa variação se deve basicamente a dois fatores:

- Influência da discretização em torno da região do pino de sustentação;
- Influência do número e tamanho dos elementos no canal 9.

O pino de sustentação causa um efeito de desordem no fluxo de entrada da vazão, tal efeito foi ilustrado de maneira empírica na Figura 20 (página 48) e pode ser visualizado matematicamente com a distorção dos valores entre os refinamentos iniciais da malha. A divisão do escoamento criada no pino causa um efeito de turbulência que afeta diretamente as vazões de refrigerante recebidas nos canais centrais 6 ao 9.

Contudo, discretizar o modelo ao ponto de apenas poder representar corretamente o fenômeno causado pelo pino de sustentação não garante que o mesmo representará fielmente



a distribuição de vazão nos canais centrais, pois o canal 9 está centralizado junto a face de simetria do elemento combustível, fato esse que implica em uma região geométrica com apenas 1,455 mm de espessura no canal, sendo esse valor muito pequena em relação as demais arestas geométricas do elemento.

Para a criação das *inflation layers*, camada de elementos rugulares, em número suficiente afim de capturar o efeito da camada limite no canal 9 é necessário aplicar um refinamento local mais rigoroso do que nos demais canais. A aplicação desse refinamento ocorreu entre a malha de 8,0 e 8,6 milhões de elementos.

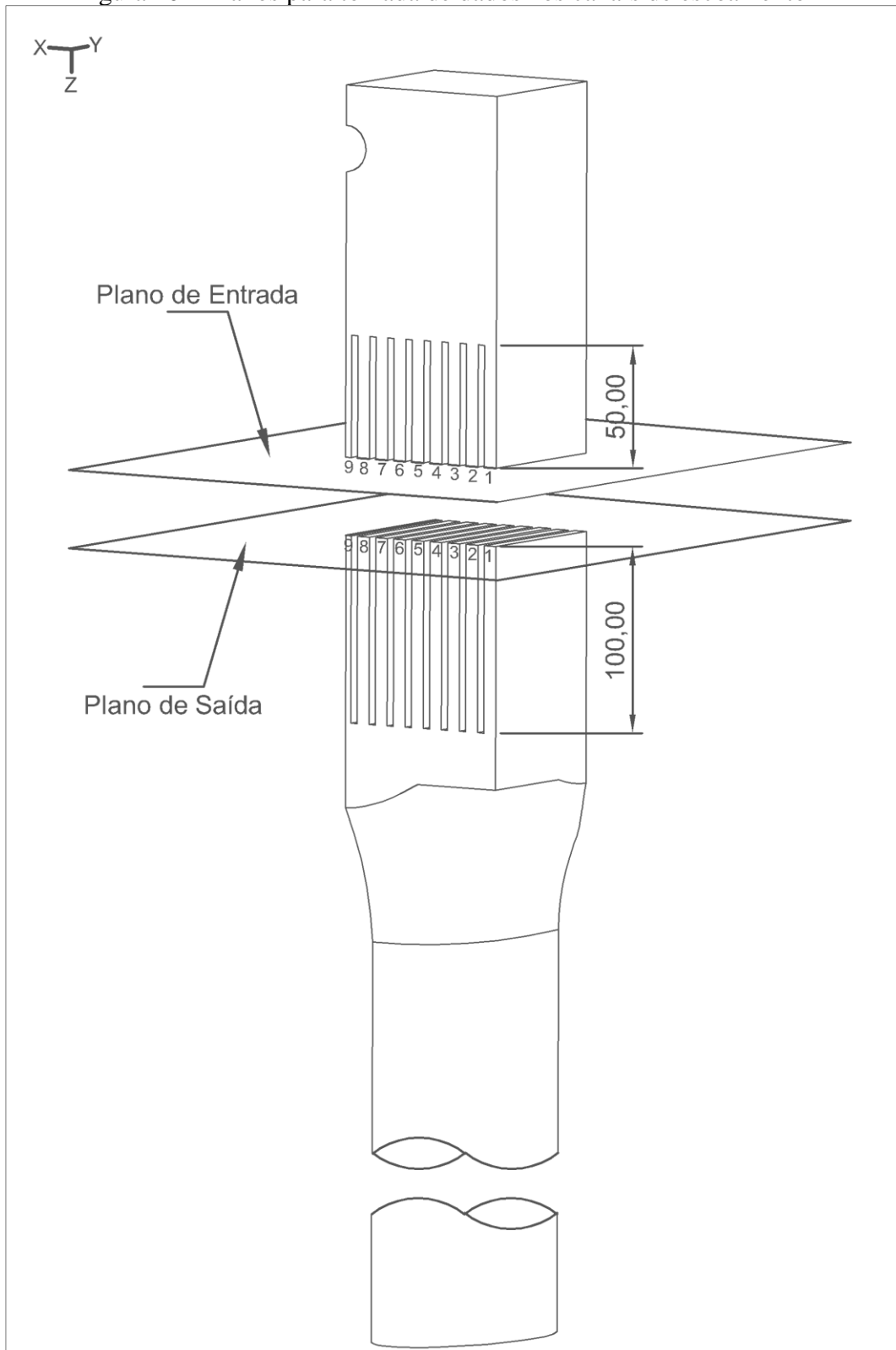
## 7.2 Análise dos resultados

Baseado no experimento de Torres et al 2003 [33] onde a sonda de pressão realizou medidas a 100 mm da região de entrada e a 50 mm da região de saída dos canais conforme Figura 23. O modelo CFD utilizou planos de coleta de dados nas mesmas regiões do experimento, a fim de garantir a análise dos resultados em um ponto onde o escoamento dos canais já é totalmente desenvolvido. A Figura 40 ilustra os planos considerados para coletar dados de interesse na região do canal.

As Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3 apresentam os resultados obtidos nas análises computacionais para as três faixas de vazão estudadas. A perda de carga foi estimada com base na pressão estática da região de entrada e saída, a vazão em massa é determinada pelas condições de contorno. Para comparar os resultados aos testes experimentais é necessário multiplicar o valor calculado das vazões por um fator 2,0 nos canais 1 a 8 e multiplicar por um fator 4,0 no canal central 9 devido a esse estar em uma região dividida por dois planos de simetria.

Compilando os resultados apresentados nas tabelas três tabelas anteriores, o Gráfico 4 ilustra os resultados das vazões em cada canal para as três faixas de vazão estudadas. Com o intuito de linearizar todas as respostas obtidas e comparar o comportamento da distribuição da vazão nas análises anteriores, o Gráfico 5 apresenta a distribuição de vazão nos canais com base na diferença percentual de vazão do canal em relação ao valor de vazão média que foi estimada dividindo o valor total da vazão pelo número de canais do elemento combustível.

Figura 40 – Planos para tomada de dados nos canais de escoamento



Fonte: Autor

Tabela 1 – Dados computacionais para vazão principal de 6,08 kg/s, elemento com pino de sustentação

Condições de contorno principais						
Vazão de Referência		Vazão considerada para 1/4 de EC		Rugosidade		Vazão Média
[kg/s]		[kg/s]		x[10 <sup>-6</sup> m]		[kg/s]
6.08		1.52		22		0.358
Análise de dados						
Canal	Região	Pressão Estática	Perda de Carga	Vazão CFD	Planos de Simetria	Vazão Real
		[Pa]	[Pa]	[kg/s]		[kg/s]
1	Entrada	9880.37	4772.03	0.170	2	0.339
	Saída	5108.34		0.170	2	0.339
2	Entrada	9811.39	4703.05	0.173	2	0.346
	Saída	5108.34		0.173	2	0.346
3	Entrada	9736.42	4827.13	0.176	2	0.351
	Saída	4909.29		0.176	2	0.351
4	Entrada	9667.18	4963.53	0.178	2	0.356
	Saída	4703.65		0.178	2	0.356
5	Entrada	9622.18	5089.81	0.181	2	0.360
	Saída	4532.37		0.181	2	0.360
6	Entrada	9622.28	5216.89	0.183	2	0.365
	Saída	4405.39		0.183	2	0.365
7	Entrada	9724.34	5376.98	0.186	2	0.371
	Saída	4347.36		0.186	2	0.371
8	Entrada	9724.56	5406.01	0.186	2	0.372
	Saída	4318.55		0.186	2	0.372
9	Entrada	9710.25	5166.06	0.089	4	0.358
	Saída	4544.19		0.089	4	0.358

Fonte: Autor

Tabela 2 – Dados computacionais para vazão principal de 5,17 kg/s, elemento com pino de sustentação

Condições de contorno principais						
Vazão de Referência		Vazão considerada para 1/4 de EC		Rugosidade	Vazão Média	
[kg/s]		[kg/s]		x[10 <sup>-6</sup> m]	[kg/s]	
5.17		1.52		22	0.304	
Análise de dados						
Canal	Região	Pressão Estática	Perda de Carga	Vazão CFD	Planos de Simetria	Vazão Real
		[Pa]	[Pa]	[kg/s]		[kg/s]
1	Entrada	9880.37	4772.03	0.170	2	0.339
	Saída	5108.34		0.170		0.339
2	Entrada	9811.39	4703.05	0.173	2	0.346
	Saída	5108.34		0.173		0.346
3	Entrada	9736.42	4827.13	0.176	2	0.351
	Saída	4909.29		0.176		0.351
4	Entrada	9667.18	4963.53	0.178	2	0.356
	Saída	4703.65		0.178		0.356
5	Entrada	9622.18	5089.81	0.181	2	0.360
	Saída	4532.37		0.181		0.360
6	Entrada	9622.28	5216.89	0.183	2	0.365
	Saída	4405.39		0.183		0.365
7	Entrada	9724.34	5376.98	0.186	2	0.371
	Saída	4347.36		0.186		0.371
8	Entrada	9724.56	5406.01	0.186	2	0.372
	Saída	4318.55		0.186		0.372
9	Entrada	9710.25	5166.06	0.089	4	0.358
	Saída	4544.19		0.089		0.358

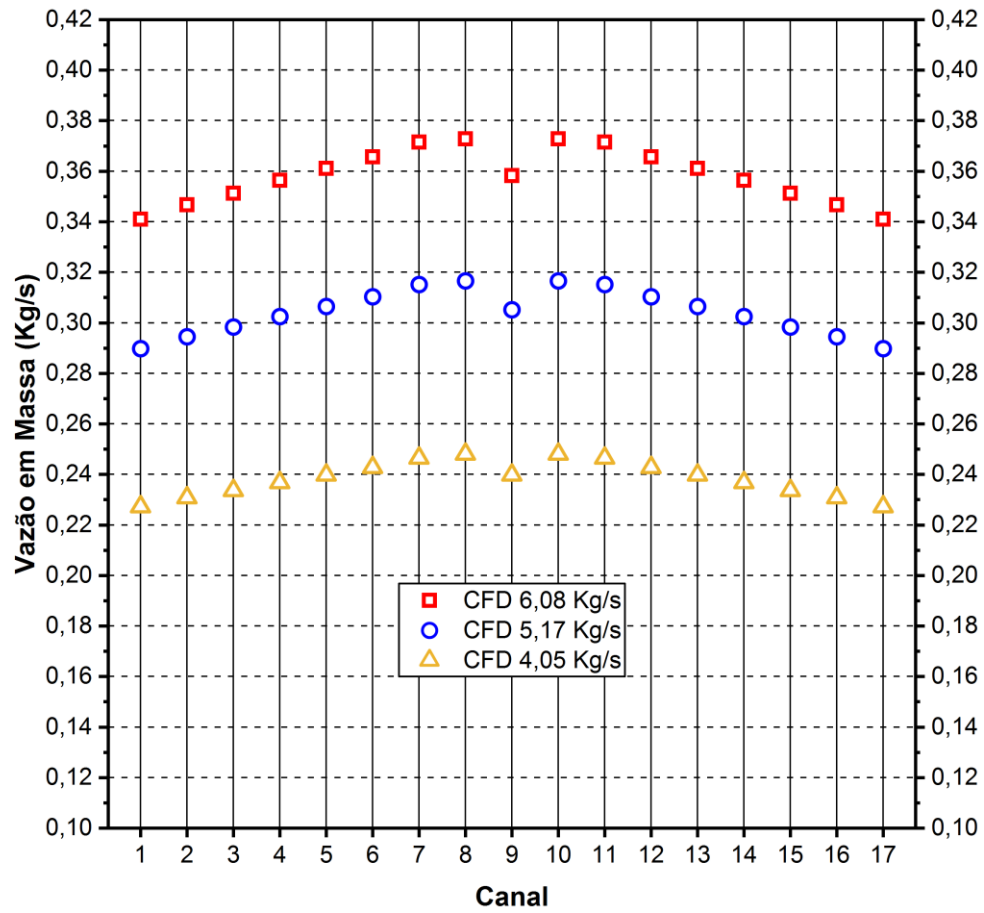
Fonte: Autor

Tabela 3 – Dados computacionais para vazão principal de 4,05 kg/s, elemento com pino de sustentação

Condições de contorno principais						
Vazão de Referência		Vazão considerada para 1/4 de EC		Rugosidade	Vazão Média	
[kg/s]		[kg/s]		x[10 <sup>-6</sup> m]	[kg/s]	
4.05		1.01		22	0.238	
Análise de dados						
Canal	Região	Pressão Estática	Perda de Carga	Vazão CFD	Planos de Simetria	Vazão Real
		[Pa]	[Pa]	[kg/s]		[kg/s]
1	Entrada	4483.60	2098.40	0.114	2	0.227
	Saída	2385.20		0.114	2	0.227
2	Entrada	4441.82	2163.12	0.115	2	0.231
	Saída	2278.70		0.115	2	0.231
3	Entrada	4409.19	2215.99	0.117	2	0.234
	Saída	2193.20		0.117	2	0.234
4	Entrada	4378.63	2274.37	0.118	2	0.237
	Saída	2104.26		0.118	2	0.237
5	Entrada	4357.86	2329.73	0.120	2	0.240
	Saída	2028.13		0.120	2	0.240
6	Entrada	4356.32	2385.31	0.121	2	0.243
	Saída	1971.01		0.121	2	0.243
7	Entrada	4398.62	2455.15	0.123	2	0.246
	Saída	1943.47		0.123	2	0.246
8	Entrada	4413.47	2482.72	0.124	2	0.248
	Saída	1930.75		0.124	2	0.248
9	Entrada	4302.05	2334.80	0.060	4	0.240
	Saída	1967.25		0.060	4	0.240

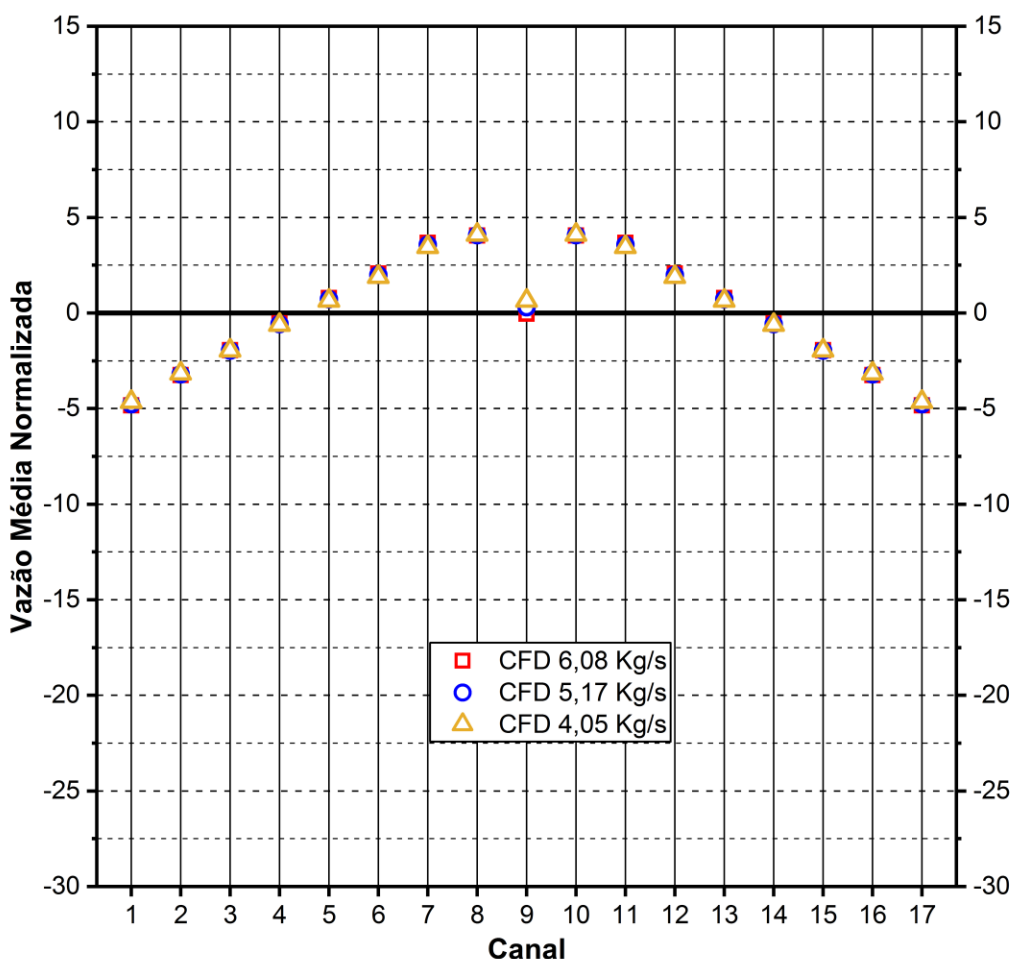
Fonte: Autor

Gráfico 4 – Resultado computacional da distribuição de vazão para as três faixas de vazões estudadas



Fonte: Autor

Gráfico 5 – Respostas computacionais normalizadas em relação a vazão média



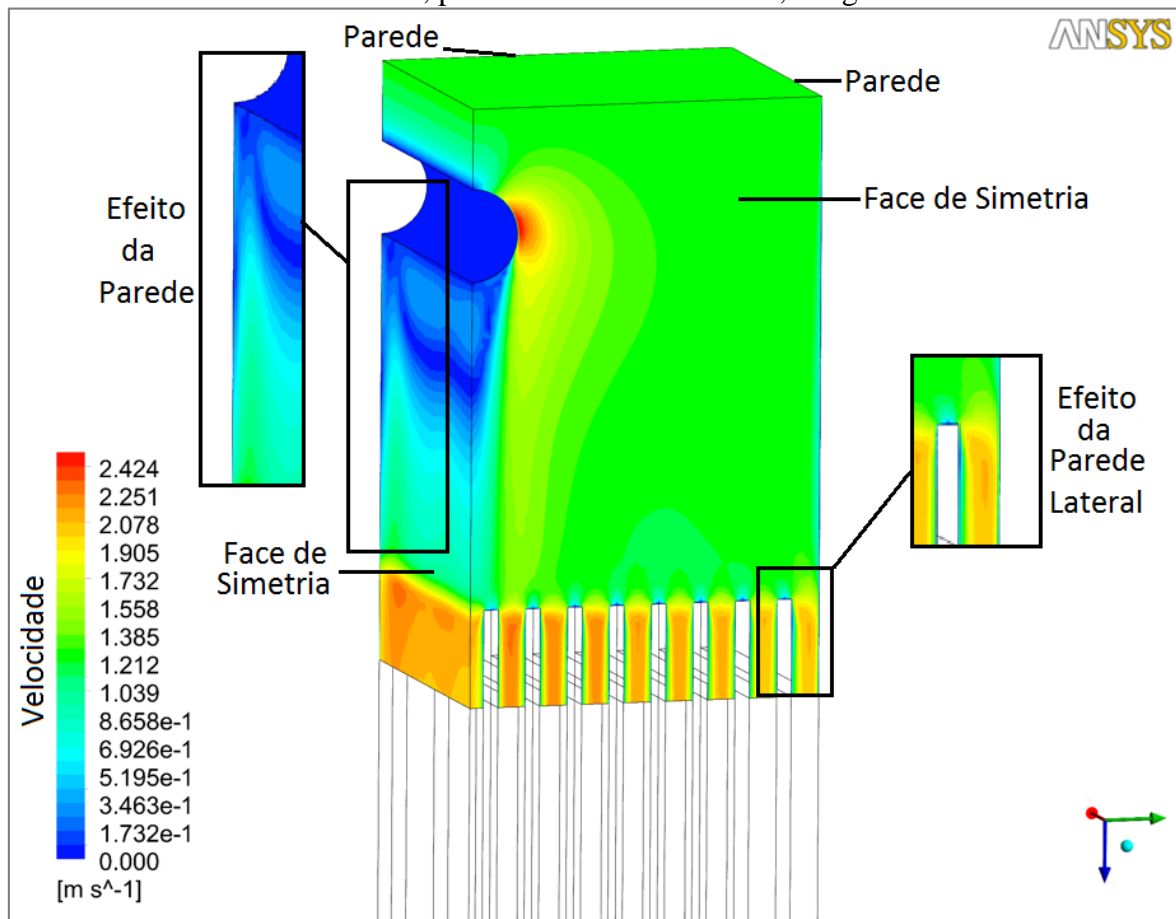
Fonte: Autor

Analisando os resultados do Gráfico 5 é interessante notar que de um modo geral o comportamento da vazão é homogêneo e muito similar para as faixas de interesse. Os canais periféricos 1 ao 4 recebem uma vazão menor do que o valor médio estimado, já os canais centrais 5 ao 8 acabam recebendo uma vazão maior do que a média, sendo que o canal central 9 sofre notavelmente influência do pino de sustentação como pode ser visto na Figura 41.

A baixa vazão nos canais periféricos, principalmente no canal 1 e 2 é atrelada ao efeito da parede na região de entrada do elemento combustível que cria região de velocidade baixa no escoamento devido a camada limite, enquanto a baixa vazão no canal central 9 é relacionada ao efeito causado pelo pino de sustentação. A Figura 41 ilustra para a vazão de 6,08 kg/s em detalhes o efeito da parede lateral na entrada do canal 1 e o efeito do pino de

sustentação nos canais centrais, enquanto a Figura 42 e Figura 43 demonstra respectivamente a distribuição de vazão na região de entrada para a vazão de 5,17 kg/s e 4,05 kg/s.

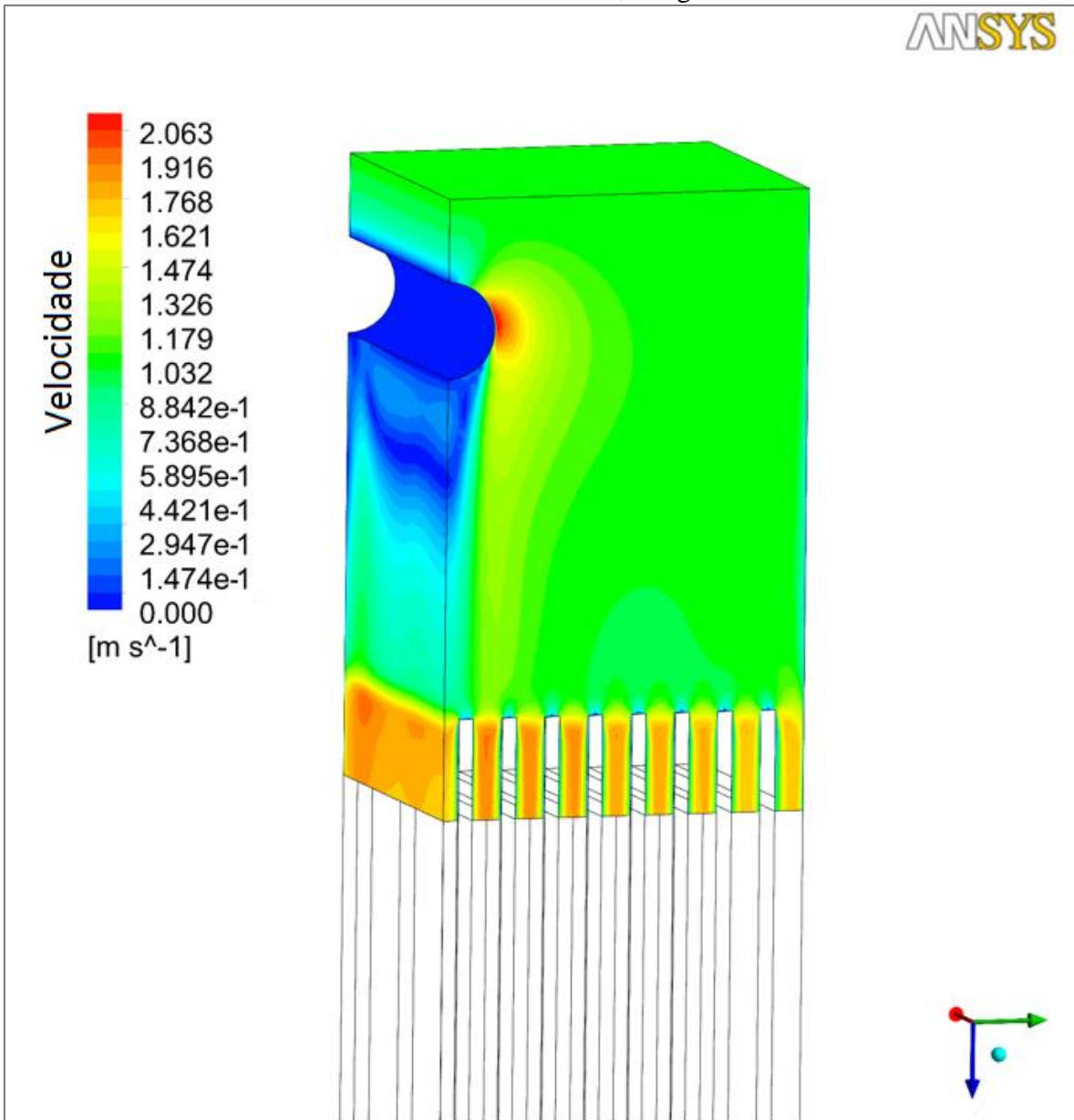
Figura 41 – Detalhamento do Efeito da parede lateral e pino de sustentação na distribuição de vazão, para vazão de entrada de 6,08 kg/s



Fonte: Autor

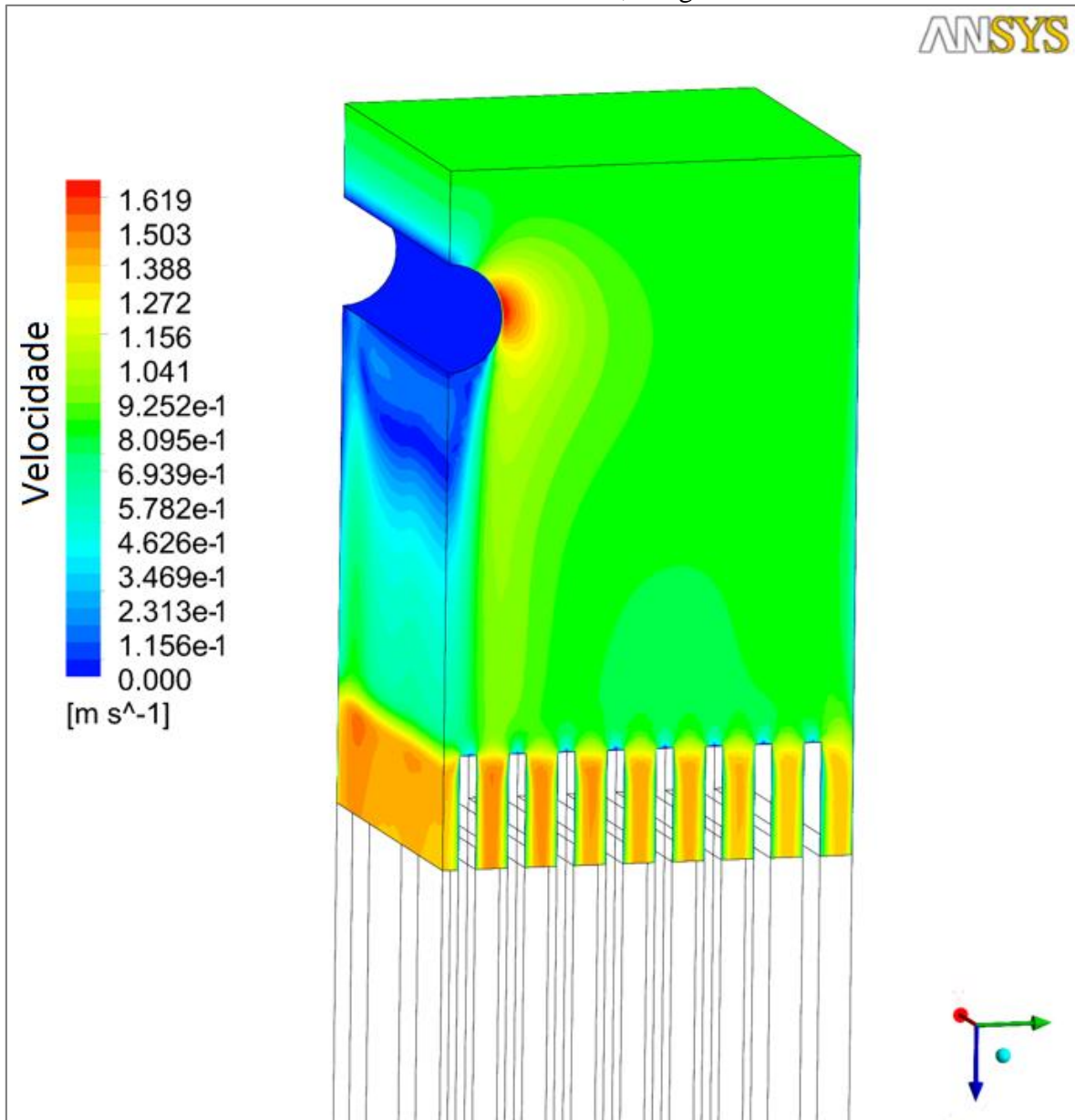


Figura 42 –Efeito da parede lateral e pino de sustentação na distribuição de vazão, para vazão de entrada de 5,17 kg/s



Fonte: Autor

Figura 43 –Efeito da parede lateral e pino de sustentação na distribuição de vazão, para vazão de entrada de 4,05 kg/s



Fonte: Autor

Outros fatores que influenciam a distribuição de refrigerante são os fenômenos causados na região de saída dos canais, esta região apresenta pontos de estagnação e recirculação de fluido além do efeito de contração do bocal. A Figura 44 ilustra para a vazão de 6,08 kg/s em detalhes o efeitos na região de saída enquanto a Figura 45 e Figura 46 ilustram o mesmo efeito sem detalhamento para a vazão de 5,17 kg/s e 4,05 kg/s.

Figura 44 – Detalhamento da zonas de recirculação e contração do fluido na região do bocal com paredes laterais, vazão de entrada de 6,08 kg/s

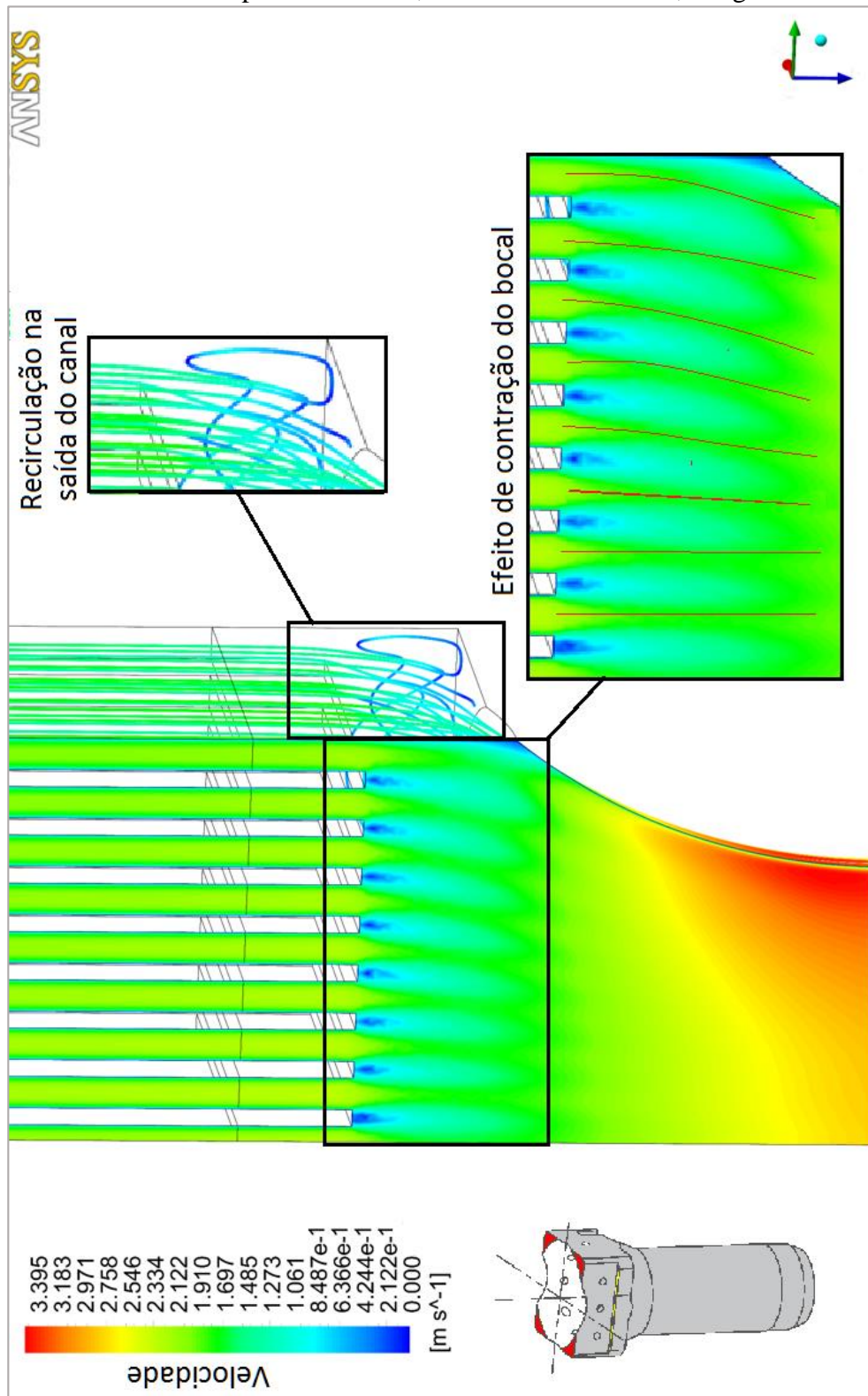
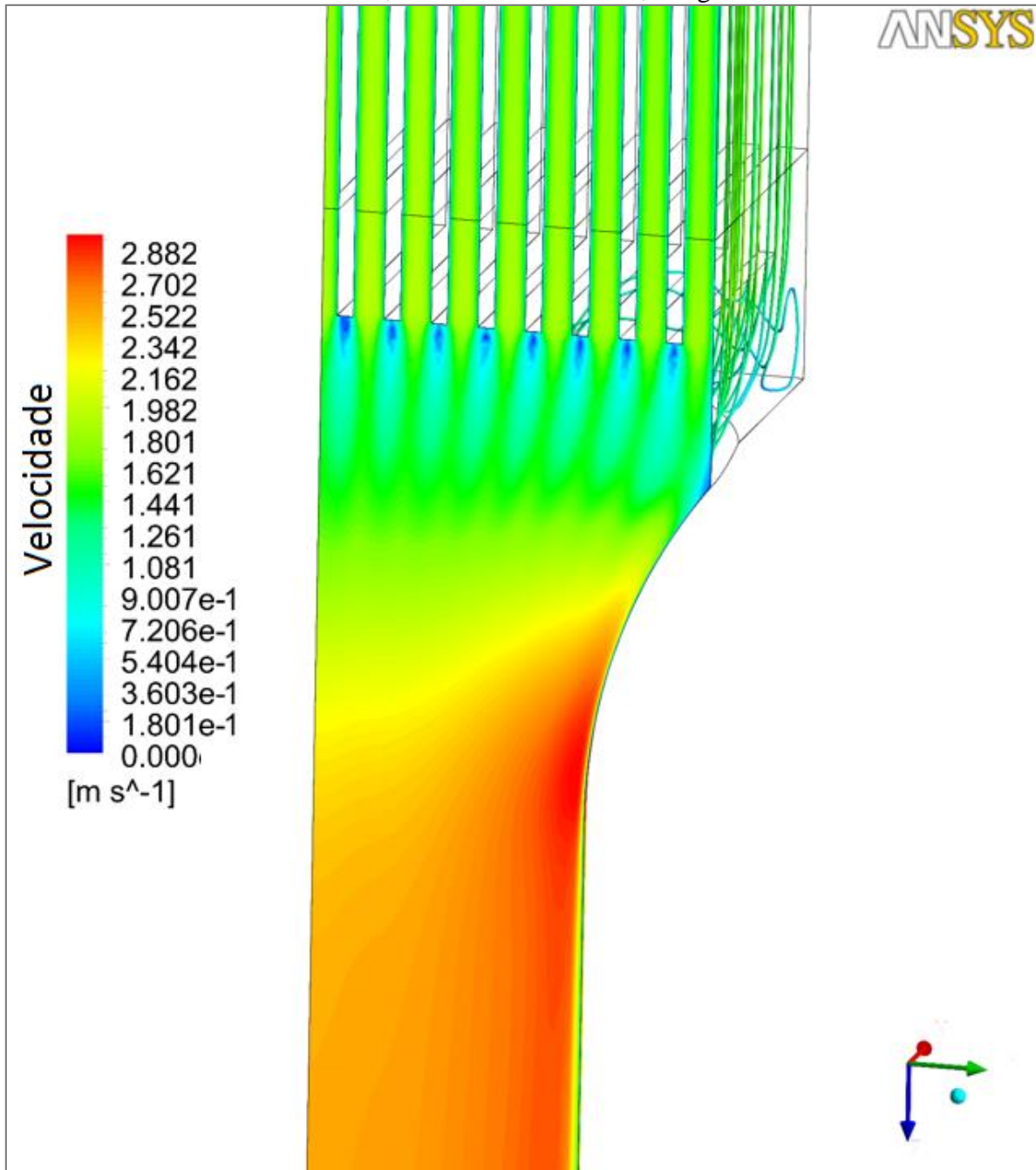
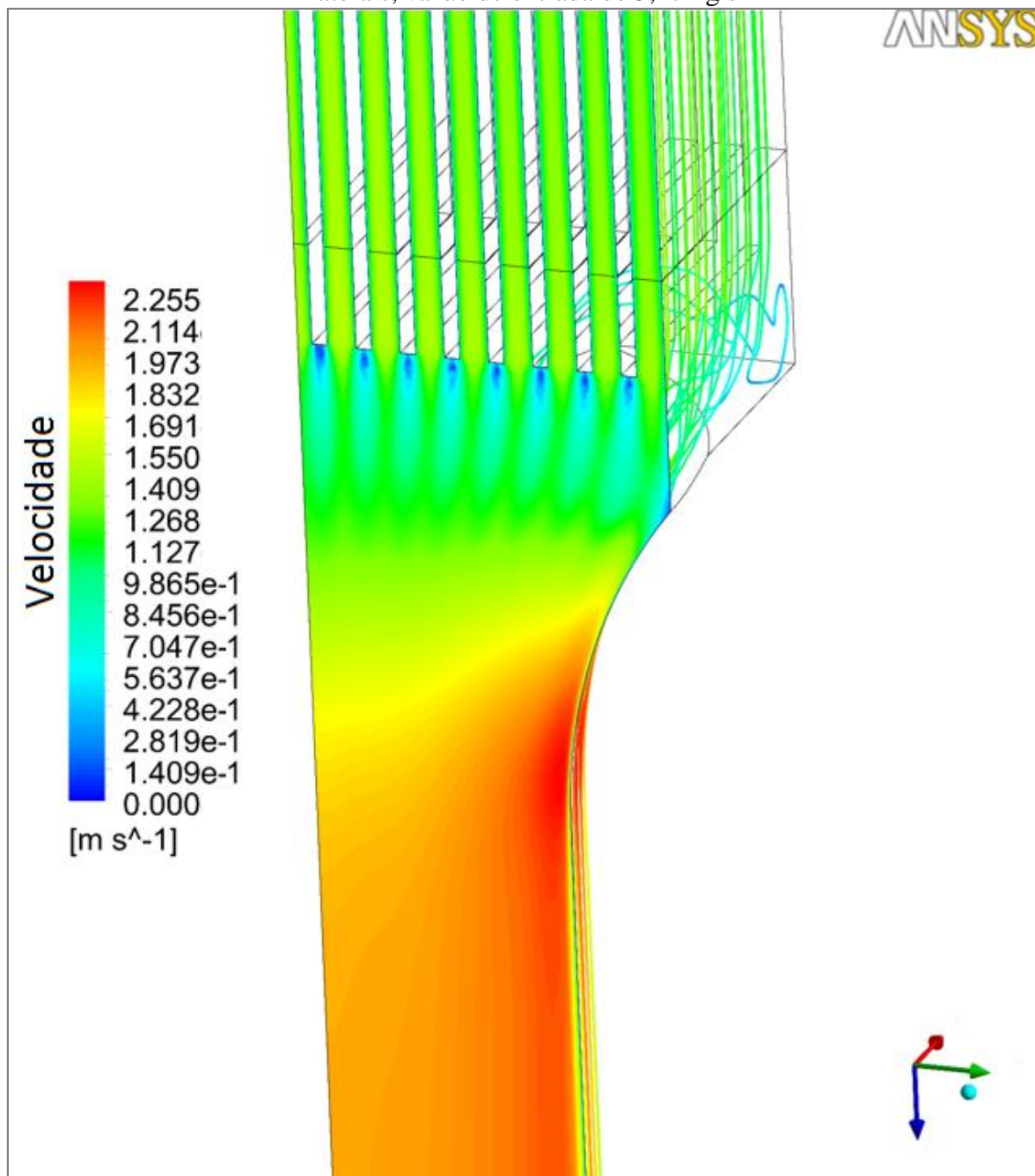


Figura 45 – Zonas de recirculação e contração do fluido na região do bocal com paredes laterais, vazão de entrada de 5,17 kg/s



Fonte: Autor

Figura 46 – Zonas de recirculação e contração do fluido na região do bocal com paredes laterais, vazão de entrada de 5,17 kg/s



Fonte: Autor

### 7.2.1 Efeito do pino de sustentação

Ainda que as análises experimentais e analíticas de Torres et al 2003 [33] e Andrade et al [24] para o DMPV-01 tenham sido realizados apenas com o pino de sustentação, a remoção do pino da geometria para estudar o efeito causado é um fenômeno de interesse para

a distribuição de vazão. Alguns elementos combustíveis de outros reatores são projetados sem pino de sustentação central como é o caso do estudo de Jong-Hark Park et al [36] em um elemento MTR placa plana, ou mesmo devido ao formato e posicionamento das placas o pino de sustentação é posicionado em locais onde não afeta a distribuição de vazão como nos estudos de Guillen e Russel [30] e Jong-Hark Park et al em 2017 [44] para arranjos de placa curva.

Ha e Garland [34] estudam o efeito do pino na distribuição comparando os resultados com a análise computacional de Yu e Lightstone [35], embora Yu e Lightstone [35] afirme que a influência do pino é nula na visão geral da distribuição de vazão no elemento do Reator MNR.

Mantendo as mesmas faixas de vazão anteriores um modelo tridimensional sem a geometria do pino foi desenvolvido com as mesmas características impostas anteriormente na etapa de criação da malha volumétrica. O volume de controle final ficou com aparência e número de elementos muito similar ao modelo com pino de sustentação.

Como foram mantidos os mesmos parâmetros de desenvolvimento da malha anterior, a aproximação proposta por Stern et al [46] e Wilson et al [47] não foi realizada, ficando a malha final com 13.185.328 elementos.

As Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6, a seguir, demonstram os resultados computacionais sem pino de sustentação. O Gráfico 6 demonstra os resultados obtidos na distribuição de vazão para as três faixas de vazão estudadas anteriormente. O Gráfico 7 compara as análises computacionais com e sem pino de sustentação.

A comparação dos resultados no Gráfico 7 demonstra que a influência do pino de sustentação é muito pequena na distribuição geral da vazão. Os canais periféricos tiveram um aumento insignificante na vazão e os centrais tiveram um pequeno decréscimo em virtude da vazão maior no canal central, condizendo com a afirmação de Yu e Lightstone [35]. Entretanto analisando localmente o canal central 9, é notável um acréscimo significativo da vazão que anteriormente no Gráfico 4 era muito baixa e próxima a vazão média.



Tabela 4 – Dados computacionais para vazão principal de 6,08 kg/s, elemento sem pino de sustentação

Condições de contorno principais				
Vazão de Referência	Vazão considerada para 1/4 de EC	Rugosidade	Vazão Média	
[kg/s]	[kg/s]	$\times 10^{-6} \text{ m}$	[kg/s]	
6,08	1,52	22	0,358	
Análise de dados				
Canal	Região	Vazão CFD	Planos de Simetria	Vazão Real
		[kg/s]		[kg/s]
1	C1E	0,171	2	0,342
	C1S	0,171	2	0,342
2	C2E	0,174	2	0,348
	C2S	0,174	2	0,348
3	C3E	0,176	2	0,352
	C3S	0,176	2	0,352
4	C4E	0,179	2	0,357
	C4S	0,179	2	0,357
5	C5E	0,181	2	0,361
	C5S	0,181	2	0,361
6	C6E	0,182	2	0,364
	C6S	0,182	2	0,364
7	C7E	0,183	2	0,366
	C7S	0,183	2	0,366
8	C8E	0,184	2	0,368
	C8S	0,184	2	0,368
9	C9E	0,092	4	0,370
	C9S	0,092	4	0,370

Fonte: Autor

Tabela 5 – Dados computacionais para vazão principal de 5,17 kg/s, elemento sem pino de sustentação

Condições de contorno principais				
Vazão de Referência	Vazão considerada para 1/4 de EC	Rugosidade	Vazão Média	
[kg/s]	[kg/s]	$\times 10^{-6} \text{ m}$	[kg/s]	
5,17	1,52	22	0,304	
Análise de dados				
Canal	Região	Vazão CFD	Planos de Simetria	Vazão Real
		[kg/s]		[kg/s]
1	C1E	0,145	2	0,291
	C1S	0,145	2	0,291
2	C2E	0,148	2	0,296
	C2S	0,148	2	0,296
3	C3E	0,150	2	0,299
	C3S	0,150	2	0,299
4	C4E	0,152	2	0,303
	C4S	0,152	2	0,303
5	C5E	0,153	2	0,307
	C5S	0,153	2	0,307
6	C6E	0,155	2	0,309
	C6S	0,155	2	0,309
7	C7E	0,155	2	0,311
	C7S	0,155	2	0,311
8	C8E	0,156	2	0,312
	C8S	0,156	2	0,312
9	C9E	0,079	4	0,316
	C9S	0,079	4	0,316

Fonte: Autor

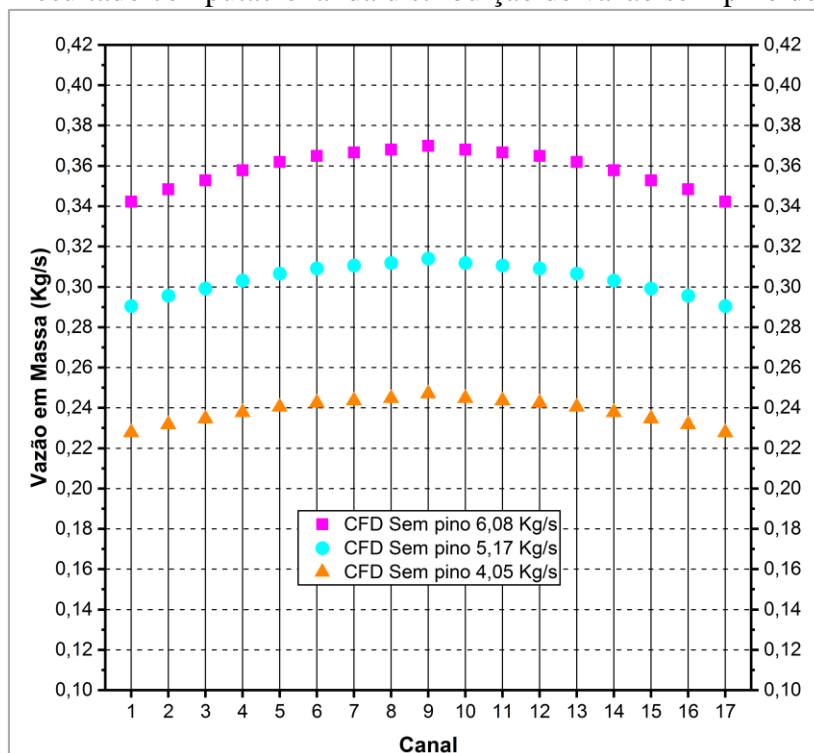


Tabela 6 – Dados computacionais para vazão principal de 4,05 kg/s, elemento sem pino de sustentação

Condições de contorno principais				
Vazão de Referência	Vazão considerada para 1/4 de EC	Rugosidade	Vazão Média	
[kg/s]	[kg/s]	$\times 10^{-6} \text{ m}$	[kg/s]	
4,05	1,52	22	0,238	
Análise de dados				
Canal	Região	Vazão CFD	Planos de Simetria	Vazão Real
		[kg/s]		[kg/s]
1	C1E	0,114	2	0,227
	C1S	0,114	2	0,227
2	C2E	0,116	2	0,231
	C2S	0,116	2	0,231
3	C3E	0,117	2	0,234
	C3S	0,117	2	0,234
4	C4E	0,119	2	0,237
	C4S	0,119	2	0,237
5	C5E	0,120	2	0,240
	C5S	0,120	2	0,240
6	C6E	0,121	2	0,242
	C6S	0,121	2	0,242
7	C7E	0,122	2	0,243
	C7S	0,122	2	0,243
8	C8E	0,122	2	0,244
	C8S	0,122	2	0,244
9	C9E	0,062	4	0,247
	C9S	0,062	4	0,247

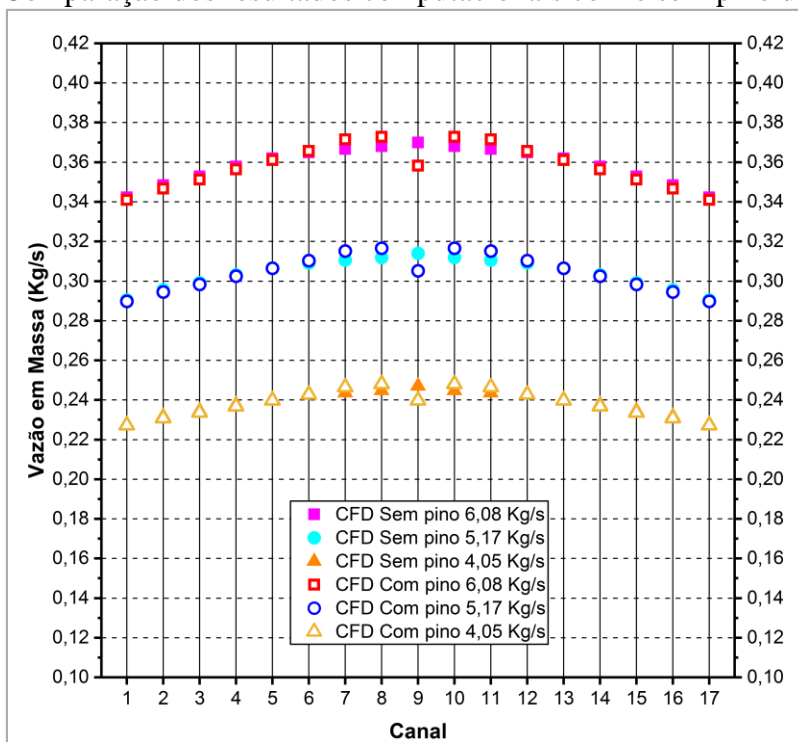
Fonte: Autor

Gráfico 6 – Resultado computacional da distribuição de vazão sem pino de sustentação



Fonte: Autor

Gráfico 7 – Comparação dos resultados computacionais com e sem pino de sustentação

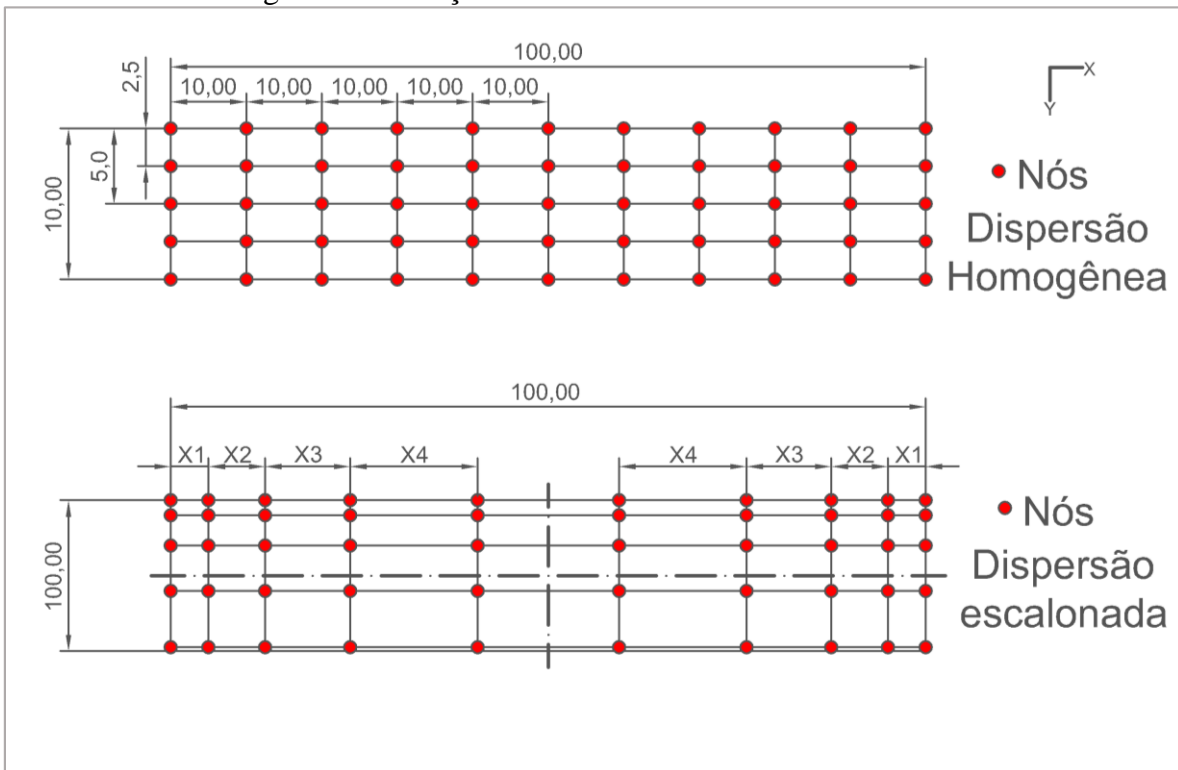


Fonte: Autor

### 7.3 Comparação da malha estruturada com malha não estruturada

Gerada inteiramente de elementos mistos e aleatórios conforme pode ser visto no capítulo anterior (metodologia geração de malha) existem outras possibilidades para a geração da malha tridimensional, uma opção que pode ser empregada na discretização dos canais é utilizar o controle local de criação de malha para fixar a maneira como os nós dos elementos serão dispersos em uma aresta. A Figura 47 demonstra como é possível impor a uma aresta a maneira como essa irá dispor os elementos gerados. Com isso é possível ter um controle melhor sobre a qualidade da malha e até mesmo criar elementos prismáticos para medição de valores na camada limite de maneira mais controlada. Andrade et al [24] e Jong-Hark Park e t al [44] utilizam essa abordagem para criar a malha na região dos canais.

Figura 47 – Criação de malha com controle estruturado

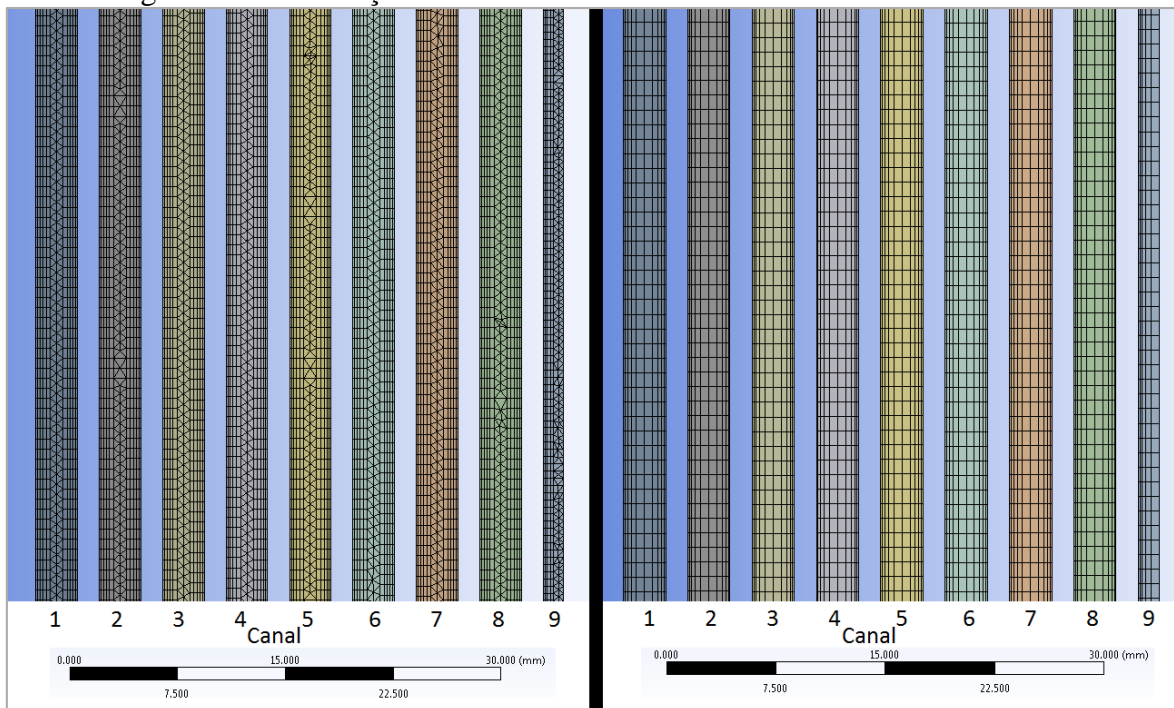


Fonte: Autor

A metodologia de malha estruturada comparada a não estruturada pode ser vista na Figura 48, onde os canais do elemento combustível aparecem em destaque com as duas metodologias. De fato, a malha estruturada consegue criar uma camada limite muito mais fina do que a utilização do método *inflation layers* nas regiões

próximas as paredes, essa ocorrência beneficia muitos estudos que buscam observar fenômenos como circulação natural ou escoamento laminar. No caso de escoamento turbulento a malha não estruturada apresenta uma camada de elementos perpendiculares ao escoamento suficiente para capturar o perfil de velocidade na região já desenvolvida.

Figura 48 – Diferença entre malha estruturada e não estruturada nos canais



Fonte: Autor

A Tabela 7 apresenta o resultado da malha estruturada nos canais de escoamento. É possível notar que os valores observados na análise são idênticos a malha não estruturada. Isso ocorre pois ambas as malhas são baseadas na aproximação proposta por Stern et al [46] e Wilson et al [47] a qual cria resultados independente da qualidade da malha volumétrica, entretanto a malha estruturada apresentou uma resposta muito boa com um número de elementos muito inferior ao utilizado pela malha mista e não estruturada. Para a criação da malha estruturada foram utilizado apenas 9 milhões de elementos.

Tabela 7 – Resultados computacionais para vazão principal de 6,08 kg/s com o modelo de malha estruturada nos canais

Condições de contorno principais						
Vazão de Referência	Vazão considerada para 1/4 de EC	Rugosidade		Vazão Média		
[kg/s]	[kg/s]	x[10 <sup>-6</sup> m]		[kg/s]		
6,08	1,52	22		0,358		
Análise de dados						
Canal	Região	Pressão Estática	Perda de Carga	Vazão CFD	Planos de Simetria	Vazão Real
		[Pa]	[Pa]	[kg/s]		[kg/s]
1	C1E	9789,18	4466,52	0,170	2	0,341
	C1S	5322,66		0,170		0,341
2	C2E	9697,32	4590,13	0,174	2	0,347
	C2S	5107,19		0,174		0,347
3	C3E	9622,00	4706,78	0,176	2	0,352
	C3S	4915,22		0,176		0,352
4	C4E	9549,88	4841,07	0,179	2	0,357
	C4S	4708,81		0,179		0,357
5	C5E	9504,57	4968,95	0,181	2	0,362
	C5S	4535,62		0,181		0,362
6	C6E	9506,44	5091,94	0,183	2	0,367
	C6S	4414,50		0,183		0,367
7	C7E	9601,54	5246,95	0,186	2	0,372
	C7S	4354,59		0,186		0,372
8	C8E	9594,02	5261,01	0,186	2	0,373
	C8S	4333,01		0,186		0,373
9	C9E	9359,83	5036,86	0,089	4	0,355
	C9S	4322,97		0,089		0,355

Fonte: Autor

A comparação dos resultados entre a malha estruturada com 9 milhões de elementos (Tabela 7) e a malha não estruturada com 13,5 milhões (Tabela 1, página 81) é apresentada na Tabela 8, onde na terceira coluna está presente o erro ou diferença percentual entre as duas análises para a vazão em cada canal.

Tabela 8 – Comparação da malha não estruturada e estruturada nos canais

	Malha não estruturada	Malha estruturada	Diferença percentual
Canal	Q (Kg/s)	Q (Kg/s)	%
1	0,339	0,341	-0,32%
2	0,346	0,347	-0,45%
3	0,351	0,352	-0,40%
4	0,356	0,357	-0,38%
5	0,360	0,362	-0,40%
6	0,365	0,367	-0,36%
7	0,371	0,372	-0,32%
8	0,372	0,373	-0,15%
9	0,358	0,355	0,82%

Fonte: Autor

## 8 CONCLUSÕES

O objetivo dessa dissertação foi plenamente atingido com a aplicação da Fluido Dinâmica Computacional Tridimensional em um modelo baseado no elemento combustível padrão do reator IEA-R1. Dessa forma, o estudo proporciona um melhor conhecimento da dinâmica do fluido nos canais do elemento do reator IEA-R1 e fornece subsídios para projetos de novos elementos combustíveis, ou estudos em outros componentes do reator que necessitem de análise hidrodinâmica.

A metodologia estabelecida se mostrou confiável e o presente poderá ser aplicado ao desenvolvimento de futuros reatores como o RMB, auxiliando e complementando testes experimentais.

Os resultados do trabalho apontam que o modelo computacional desenvolvido foi capaz de reproduzir o comportamento esperado na distribuição de vazão do elemento apontando vazões menores nos canais periféricos quando comparados ao centrais. O estudo aponta como causa dessa diferença de vazão as características geométricas na região de entrada e saída dos canais, assim como o efeito criado pelo pino de sustentação e a contração do bocal de saída.

Desenvolvido apenas com base nas medidas nominais de projeto, a etapa de criação do modelo tridimensional descartou qualquer variação dimensional prevista dentro da tolerância de fabricação do elemento. Os fenômenos de interesse na dinâmica dos fluidos foram estabelecido e resolvido respeitando-se as hipóteses simplificadoras assumidas na elaboração do modelo e as condições de contorno impostas.

A malha tridimensional foi elaborada e otimizada de maneira a apresentar resultado independente do número de elementos com base na aproximação proposta e apresentada na metodologia científica. Os canais de escoamento e as demais regiões de interesse foram discretizadas com maior grau de refinamento enquanto as regiões de saída e entrada sofreram uma refinamento mais grosseiro sem comprometer os resultados finais observados.

O modelo CFD mostrou-se capaz de reproduzir a fenomenologia de distribuição de vazão existentes no elementos combustíveis do reator IEA-R1, demonstrando assim que a

ferramenta computacional tem potencial de somar resultados e confiança nas análises de segurança de reatores.



## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, D. KVASNICKA, TECHNOLOGY OFFICE OF NUCLEAR ENERGY SCIENCE, U.S. GOVERNMENT. **The History of Nuclear Energy**. 1ª. ed. [S.l.]: U.S. Government , v. I, 2011.
2. U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **International Energy Outlook 2016**. U.S. Energy Information Administration. Washington, p. 276. 2016. (DOE/EIA-0484(2016)).
3. ELETROBRAS ELETRONUCLEAR. **Panorama da Energia Nuclear no Mundo**. Eletrobras Eletronuclear. [S.l.], p. 207. 2016.
4. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics**. International Energy Agency. Paris, p. 81. 2015.
5. NUCLEAR ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap: Nuclear Energy**. Nuclear Energy Agency. [S.l.], p. 64. 2015.
6. MARCOLIN, N. Átomos. **FAPESP**, São Paulo, v. I, p. 10-11, Novembro 2006.
7. OLIVEIRA, A. F. **Estudo da circulação natural para o projeto de um reator de pesquisas utilizando as técnicas de fluidodinâmica computacional e computação evolucionária**. Instituto de Engenharia Nuclear -CENEN. Rio de Janeiro, p. 78. 2012.
8. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **BIG - Banco de Informações de Geração. BIG ANEEL, 2016. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 3 Novembro 2016.**
9. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica nº 382/2012-SRE/ANEEL**. ANEEL. [S.l.], p. 60. 2012. (Processo nº 48500.000755/2012-41).
10. FGV ENERGIA. **Energia Nuclear**. 6ª. ed. Rio de Janeiro: FGV ENERGIA, v. III, 2016.

11. TOLMASQUIM, M. T. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro, p. 417. (ISBN 978-85-60025-05-3).
12. LEE, I. J. et al. Risk factors and dose--effect relationship for mandibular osteoradionecrosis in oral and oropharyngeal cancer patients. **International Journal of Radiation Oncology\* Biology\* Physics**, v. 75, n. 4, p. 1084-1091, 2009.
13. RIOS, I. A. **Impacto da Redução na Concentração de Urânio nas Placas Laterais dos Elementos Combustíveis do Reator IEA-R1 nas Análises Neutrônica e Termo-Hidráulica**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN CNEN/SP. São Paulo, p. 88. 2013.
14. IAEA. **Research Reactor Core Conversion Form the Use of Highly Enriched Uranium to the Use of low Enriched Uranium Fuels Handbook: TECDOC - 233**. International Atomic Energy Agency. Vienna, p. Austria. 1980.
15. DURAZZO, M.; RAMANATHAN, L. V. Corrosão do Combustível do Reator Nuclear de Pesquisas IEA-R1 do IPEN. **INTERCORR 2008**, Recife, Maio 2008. 18.
16. CASTRO, A. J. A. D.; MAPRELIAN, E.; TING, D. K. S. Onset of Nucleate Boiling and Onset of Fully Developed Subcooled Boiling Using Pressure Transducers Signals Spectral Analysis. **J. Braz. Soc. Mech. Sci**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 512-522, 2001. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-73862001000400012>>. Acesso em: 25 Outubro 2016.
17. MILLER, D. R. Critical Flow Velocities For Collapse Of Reactor Parallel-Plate Fuel Assemblies. **ASME J. Eng. Power Tram ASME**, 1960. 83-95.
18. CEKIRGE, H. M.; URAL, E. Critical coolant flow velocities in reactors having parallel fuel plates. **Computers & Mathematics with Applications**, Inglaterra, v. 4, p. 153-156. ISSN DOI: 10.1016/0898-1221(78)90025-1.
19. BEJAN, A. **Transferência de Calor**. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1996.

20. GLASSTONE, S.; SESONSKE, A. Energy Transport: Boiling Crisis. In: GLASSTONE, S.; SESONSKE, A. **Nuclear Reactor Engineering: Reactor Systems Engineering**. 6<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Springer Science & Business Media, v. II, 2012. p. 548-549.
21. ANDRZEJEWSKI, C. D. S. **AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE COMBUSTÍVEL TIPO PLACA PARA REATORES DE PEQUENO PORTE**. IPEN. São Paulo, p. 83. 2015.
22. RODRIGUES, I. D. S. **Estudos de limites termo-hidráulicos para projeto de varetas combustível de reatores nucleares**. Instituto de Engenharia Nuclear/ CNEN. Rio de Janeiro, p. 79. Dissertação de Mestrado, 2012.
23. UMBEHAUN, P. E. **Metodologia para análise termo-hidráulica de reatores das placas externas de um elemento combustível tipo placa**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN CNEN/SP. São Paulo, p. 110. 2000.
24. ANDRADE, D. A. D. et al. A CFD numerical model for the flow distribution in a MTR fuel element. **2015 International Nuclear Atlantic Conference**, São Paulo, 4-9 Outubro 2015. 9.
25. KHERDR, A. Thermal-Hydraulic Analysis of Heated Plate under Asymmetrical Cooling Conditions. **Arab Journal of Nuclear Science and Applications**, Egito, v. 46(3), p. 219-230, Janeiro 2013. ISSN ISSN 1110-0451.
26. PIETRALIK, J. M. The Role of Flow in Flow-Accelerated Corrosion under Nuclear Power Plant Conditions. **E-Journal of Advanced Maintenance**, Japão, v. 4, n. 2, p. 63-78, Julho 2012.
27. AHMED, W. H. Flow Accelerated Corrosion in Nuclear Power Plants. In: AHMED, W. H. **Nuclear Power – Practical Aspects**. DOI: 10.5772/51346. ed. [S.l.]: InTech, 2012. Cap. 6, p. 153-178.
28. NAITOH, M. et al. Evaluation Methods for Corrosion Damage of Components in Cooling Systems of Nuclear Power Plants by Coupling Analysis of Corrosion and Flow

- Dynamics (I). **Journal of Nuclear Science and Technology**, v. 45, n. 11, p. 1116-1128, Maio 2008. ISSN DOI: 10.1080/18811248.2008.9711900.
29. STROMQUIST, W. K.; SISMAN, O. **High Flux Reactor Fuel Assemblies – Vibration and Water Flow**. Oak Ridge Natl. Lab. [S.l.]. Junho, 1948. ( ORNL-50).
30. GUILLEN, D. P.; RUSSELL, M. J. **Estimation of Critical Flow Velocity for Collapse of Gas Test Loop Booster Fuel Assembly**. 14th International Conference on Nuclear Engineering. Maiame: Battelle Energy Alliance, LLC. 2006. p. 199-122.
31. TORRES, W. M. et al. **Distribuição de Vazão no Núcleo do Reator de Pesquisas IEA-R1**. Proceedings Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. Uberlândia, Minas Gerais: [s.n.]. 2001.
32. LIMA, R. M. . O. F. S. **Relatório Descritivo de Fabricação do Elemento DMPV-01**. IPEN Internal Report No.RDF-DMPV-01/01. [S.l.]. 2000.
33. TORRES, W. M. et al. A MTR fuel element flow distribution measurement preliminary results. **International meeting on reduced enrichment for research reactor - RERTR**, Chicago, USA, v. 1, p. 1-6, 2003.
34. HA, T.; GARLAND, W. J. Hydraulic study of turbulent flow in MTR-type nuclear fuel assembly. **Elsevier**, v. 236, n. 6, p. 975-984, Maio 2006.
35. YU, R.; LIGHTSTONE, M. F. Numerical investigation of turbulent heattransfer and fluid flow in a nuclear fuelplate assembly. **Nuclear Energy**, v. 43, n. 0, p. 1-8, Agosto 2004. ISSN DOI: 10.1680/nuen.43.4.225.41196.
36. JONG-HARK PARK A, D. J. A. C. A. B. L. Prediction for the flow distribution and the pressure drop of a plate type fuel assembly. **Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting**, p. 27-28, October 2011.
37. SILVA, A. T. et al. Qualification program of research reactor fuelsmanufactured at IPEN-CNEN/SP. **Progress in Nuclear Energy 50- Elsevier**, p. 795-799, 2007.

38. ANDERSON, J. D. **Computational Fluid Dynamics – The Basics with Applications**. McGraw-Hil. New York, NY – United States. 1995.
39. PLETCHER, R. H.; TANNEHILL, J. C.; ANDERSON, D. A. **Computational Fluid Mechanics and Heat**. **CRC Press: New York**, New York, NY – United States, n. 3ed, 2012.
40. SANTIAGO, C. D. **Estudo de parâmetros do método multigrid para sistemas de equações 2D**. 155f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba - PR, p. 155f. 2010.
41. ANSYS-CFX®. **12.0, User Manual**. Canonsburg, Pennsylvania – United States: ANSYS Inc., 2010.
42. ANGELO, G. E. A. **Aplicações de Mecânica dos Fluidos Computacional usando ANSYS CFX®**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN CNEN/SP. São Paulo. [200-].
43. SOLIDWORKS. Dassault Systemes SolidWorks Corporation. **SOLIDWORKS**, 2016. Disponível em: <<http://www.solidworksbrasil.com.br/>>. Acesso em: janeiro 2016.
44. JONG-HARK PARK ET AL. Experimental and Numerical Study on the Flow Distribution and the Pressure Drop of a Tubular Fuel. **Nuclear Technology**, p. 5, Abril 2017. ISSN DOI: 10.13182/NT07-A3905.
45. JOHN D. ANDERSON, J. **Computational Fluid Dynamics – The Basics with Applications**. New York, NY – United States: McGraw-Hill, 1995.
46. STERN, F. E. A. Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations-Part. **Journal of Fluids Engineering**, v. 123, p. 793-802, DECEMBER 2001.
47. WILSON, R. V. E. A. Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations. **Journal of Fluids**, v. 123, p. 803-809, DECEMBER 2001.

48. LAUNDER, B. E. & S. D. B. **The numerical computation of turbulent flows.** **Computer methods in applied mechanics and engineering**, 3(2). [S.l.], p. pp. 269-289. 1974.
49. ROLANDER, N. E. A. . An approach to robust design of turbulent convective systems.. **American Society of Mechanical Engineers**, v. 128, p. 844-855, 2006.
50. AHSAN, M. **Numerical analysis of friction factor for a fully developed turbulent flow using k-epsilon turbulence model with enhanced wall treatment..** Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 3(4). [S.l.], p. pp. 269-277. 2014.
51. ANDRZEJEWSKI, C. D. S. **AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE COMBUSTÍVEL TIPO PLACA PARA REATORES DE PEQUENO PORTE.** IPEN. São Paulo, p. 83. 2015.

---

---

**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.**

---

---