



SIMULAÇÃO CFD DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR CONJUGADA
CONVECÇÃO NATURAL-CONDUÇÃO EM UMA CAVIDADE
SEMICIRCULAR CONTENDO UM FLUIDO COM GERAÇÃO DE CALOR
INTERNA

Wallthynay Ferreira de Arruda

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Nuclear.

Orientador: Su Jian

Rio de Janeiro
Novembro de 2019

SIMULAÇÃO CFD DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR CONJUGADA
CONVECÇÃO NATURAL-CONDUÇÃO EM UMA CAVIDADE
SEMICIRCULAR CONTENDO UM FLUIDO COM GERAÇÃO DE CALOR
INTERNA

Wallthynay Ferreira de Arruda

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
NUCLEAR.

Examinada por:

Prof. Su Jian, D.Sc.

Prof. Paulo Augusto Berquó de Sampaio, Ph.D.

Dr. Marcos Bertrand de Azevedo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
NOVEMBRO DE 2019

Arruda, Wallthynay Ferreira de

Simulação CFD de transferência de calor conjugada convecção natural-condução em uma cavidade semicircular contendo um fluido com geração de calor interna/Wallthynay Ferreira de Arruda. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XVI, 71 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Su Jian

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Nuclear, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 66 – 71.

1. Acidente Severo. 2. CFD. 3. Transferência de Calor. I. Jian, Su. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

*Dedico este trabalho a Deus, aos
meus pais e aos meus avós que
me ajudaram durante toda minha
jornada.*

Agradecimentos

Há dois anos e meio iniciei uma nova etapa em minha vida e nunca imaginaria que seria uma das mais importantes. No decorrer desses anos, tive medo, insegurança, porém tudo foi superado por minha vontade de ir além e conseguir meus objetivos. Hoje não estaria concluindo mais essa etapa se não tivesse pessoas ao meu lado que incansavelmente me motivaram a seguir em frente sem desistir ou fraquejar.

Agradeço primeiramente a Deus e aos meus pais Adelson Natal e Etiene dos Santos, sem esquecer dos meus avôs, Luiz Januário e Darci dos Santos, que são meus exemplos de força, coragem e determinação. Sempre me apoiando em tudo, quando eu chorava por estar cansado falando que ia desistir, eles com um carinho imenso, dedicação, paciência, amor e todo apoio do mundo falavam: “-você vai continuar e vai conseguir”, e hoje estou aqui, concluindo mais uma etapa da minha vida.

Meu agradecimento ao meu professor orientador Prof. Dr. Su Jian por todo o conhecimento compartilhado com seriedade e dedicação. Seus ensinamentos foram fundamentais para que o resultado final fosse alcançado.

Não posso esquecer-me de agradecer as minhas amigas Mayara e Gleicy que me acolheram aqui no Rio de Janeiro e Natanny, que sem sombra de dúvidas tornaram-se minha família carioca, aos meus amigos do Laboratório de Simulação e Métodos em Engenharia (LASME) pelo apoio e pela companhia ao longo do curso. Todos os conselhos e auxílios que me foram atenciosamente dirigidos, das nossas brincadeiras, das tantas vezes que falamos: “pizza hoje? Já sabendo da resposta”, passamos por tantas dificuldades, inseguranças, alegrias, tristezas, erros e acertos. Mas sempre juntos, um apoiando o outro.

Finalizo agradecendo a todos que ao passarem pela minha vida me acrescentaram um pouco de amor, entusiasmo, fé e persistência. Sigo em frente com a certeza que esse é só o primeiro de vários sonhos que ainda serão realizados e que sem o apoio de todos não teria sido alcançado. Muito obrigado!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SIMULAÇÃO CFD DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR CONJUGADA
CONVECÇÃO NATURAL-CONDUÇÃO EM UMA CAVIDADE
SEMICIRCULAR CONTENDO UM FLUIDO COM GERAÇÃO DE CALOR
INTERNA

Wallthynay Ferreira de Arruda

Novembro/2019

Orientador: Su Jian

Programa: Engenharia Nuclear

Após o acidente de Fukushima, há um claro progresso em estudos e pesquisas envolvendo segurança em usinas nucleares para evitar acidentes com degradação total ou parcial do núcleo do reator, conhecido como acidente severo. Com o propósito de garantir a integridade física do vaso de pressão do reator, em caso de acidente severo, o objetivo desta dissertação é investigar a transferência de calor conjugada em um fluido com geração interna de calor em uma cavidade semicircular com condução de calor na parede sólida e quantificar os efeitos da espessura (b) em razão ao diâmetro (D) e a razão entre a condutividade térmica do sólido e do fluido (K). A condição isotérmica de contorno é imposta na superfície externa da parede da cavidade. Para comparação, também é simulada a convecção natural não conjugada na cavidade semicircular, com a condição de contorno isotérmica imposta na superfície interna da cavidade. As simulações computacionais bidimensionais foram realizadas utilizando o software comercial ANSYS FLUENT v.18.2, em regime laminar, para fluidos com números de Prandtl igual a 0,032, 0,71 e 7,01 em uma cavidade semicircular com e sem parede espessa, realizando assim uma comparação e analisando sua importância ao problema. Os resultados para o caso não conjugado mostraram que os números médios de Nusselt na superfície superior da cavidade semicircular estavam em concordância com as correlações de Mayinger et al (1976) e Kulacki e Emara (1975). O número médio de Nusselt na superfície inferior da cavidade semicircular estava em excelente concordância com Mayinger et al. (1976). Para o caso conjugado, os números médios de Nusselt estavam em concordância com o estudo do Liaqat e Baytas (2001) na faixa do $Ra = 10^6$ a $Ra = 10^{10}$.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

CFD SIMULATION OF HEAT TRANSFER CONJUGATED NATURAL
CONVECTION-CONDUCTION IN A SEMICIRCULAR CAVITY
CONTAINING A FLUID WITH INTERNAL HEAT GENERATION

Wallthynay Ferreira de Arruda

November/2019

Advisor: Su Jian

Department: Nuclear Engineering

Following the Fukushima accident, there is clear progress in studies and researches involving safety in nuclear power plants to prevent accidents with total or partial degradation of the reactor core, known as a severe accident. In order to ensure the physical integrity of the reactor pressure vessel in the event of a severe accident, the aim of this dissertation is to investigate the conjugate heat transfer in a fluid with internal heat generation in a semicircular cavity with heat conduction in the wall and quantify the effects of thickness (b) on diameter (D) and a reason of solid and fluid thermal conductivity (K). Isothermal conduction of the boundary is imposed on the outer surface of the cavity wall. For comparison, unconjugated natural convection in the semicircular cavity is also simulated, with the isothermal boundary condition imposed on the cavity's inner surface. Two-dimensional computer simulations were performed using the ANSYS FLUENT v.18.2 commercial software for laminar flow. With Prandtl numbers equal to 0.032, 0.71 and 7.01 in a semicircular cavity with and without thick wall, thus making a comparison and analyzing its importance to the problem. The results for the unconjugated case showed that the mean numbers of Nusselt on the upper surface of the semicircular cavity were in agreement with the correlations of Mayinger et al (1976) and Kulacki and Emara (1975). The mean number of Nusselt on the lower surface of the semicircular cavity was in excellent agreement with Mayinger et al. (1976). For the conjugated case, the average numbers of Nusselt were in line with the study by Liaqat and Baytas (2001) in the range of $Ra = 10^6$ a $Ra = 10^{10}$.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Símbolos	xiv
Lista de Abreviaturas	xvi
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Acidente Severo	4
1.3 Convecção Natural	8
1.4 Fluidodinâmica Computacional (CFD)	9
1.5 Motivação	10
1.6 Objetivos	11
1.7 Organização do Trabalho	12
2 Revisão Bibliográfica	13
2.1 Correlações de transferência de calor para a convecção de Rayleigh-Benard	13
2.2 Trabalhos numéricos	15
2.3 Trabalhos experimentais	18
2.4 Conclusão	25
3 Metodologia	26
3.1 Problema Físico	26
3.1.1 Convecção natural na cavidade	27
3.1.2 Convecção natural na cavidade com condução na parede	27
3.1.3 Aproximação de Boussinesq	28
3.2 Formulação matemática	29
3.2.1 Equações governantes para os casos não conjugado	29
3.2.2 Equações governantes para os casos conjugado	31

3.3	Metodologia computacional	32
3.3.1	Método dos volumes finitos	33
3.3.2	CFD	34
3.3.3	Criação Geometria/Malha	34
3.3.4	Definição do problema	34
3.3.5	Processamento	35
3.3.6	Pós-processamento	35
3.3.7	Verificação e validação	35
4	Resultados e Discussões	37
4.1	Simulações em geometria representativa do experimento BALI	37
4.2	Simulações em cavidade semicircular não conjugada	45
4.3	Simulações em cavidade semicircular conjugada	53
5	Conclusões e Sugestões	63
5.1	Conclusões	63
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	65

Lista de Figuras

1.1	Diagrama de Funcionamento de um reator tipo PWR (Azevedo, M. B., 2016).	2
1.2	Escala Internacional de acidentes Nucleares (INES), (IAEA, 2018)	4
1.3	Núcleo do reator da usina TMI (Rempe et al., 2008).	5
1.4	Corium no plenum inferior do vaso de pressão do reator (Bayout, 1997).	7
2.1	Esquema do sistema de coordenadas e problema fisico estudado por Liaqat e Baytas (2001).	17
2.2	Esquema do experimento conduzido por Asfia et al. (1996)	20
2.3	Esquema da seção semi-circular utilizada nos testes experimentais Mini-Sigma Taylor et al. (2012).	22
3.1	Representação 2D das cavidades estudadas (a) Metade de um semicírculo, (b) semicírculo, sem a transferência de calor conjugada com a parede do vaso.	27
3.2	Representação 2D da cavidade semicircular com a parede de espessura (b).	28
3.3	Representação de um volume de controle do MVF (Versteeg e Malalasekera, 2005)	33
4.1	Geometria do experimento BALI (Bernaz et al.,2001)	38
4.2	Análise gráfica da convergência de malha, em cavidade de metade de um semicírculo.	39
4.3	Distribuição do Nu ao longo da parede do fundo da cavidade, em geometria de metade de um semicírculo, na faixa de $Ra_i = 10^8$ a 10^{12}	41
4.4	Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade de metade de um semicírculo, para $Ra_i = (10^7)$ e $Pr = 7,0$	42
4.5	Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade de metade de um semicírculo, para $Ra_i = (10^8)$ e $Pr = 7,0$	43
4.6	Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade de metade de um semicírculo, para $Ra_i = (10^9)$ e $Pr = 7,0$	43

4.7	Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade de metade de um semicírculo, para $Ra_i = (10^{10})$ e $Pr = 7, 0$	44
4.8	Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade de metade de um semicírculo, para $Ra_i = (10^{11})$ e $Pr = 7, 0$	44
4.9	Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade de metade de um semicírculo, para $Ra_i = (10^{12})$ e $Pr = 7, 0$	45
4.10	Distribuição local do número de Nusselt em torno do fundo da cavidade semicircular não conjugada para $Pr = 7, 0$ e Rayleigh (10^{11}), (a) Presente trabalho (b) Vieira, 2010.	47
4.11	Número de Nusselt em função dos números de Rayleigh, em cavidade semicircular não conjugada.	48
4.12	Número de Nusselt em função do número de Rayleigh interno (Ra_i) em cavidade semicircular não conjugada, para $Pr = 7, 0$ (a) Número de Nusselt fundo, (b) Número de Nusselt topo.	50
4.13	Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade semicircular não conjugada, para $Ra_i = (10^9)$ e $Pr = 7, 0$	51
4.14	Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade semicircular não conjugada, para $Ra_i = (10^{10})$ e $Pr = 7, 0$	51
4.15	Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade semicircular não conjugada, para $Ra_i = (10^{11})$ e $Pr = 7, 0$	52
4.16	Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade semicircular não conjugada, para $Ra_i = (10^{12})$ e $Pr = 7, 0$	52
4.17	Número de Nusselt em função do número de Rayleigh interno (Ra_i), em cavidade semicircular conjugada, para $Pr = 7, 0$ (a) Número de Nusselt fundo e (b) Número de Nusselt topo.	55
4.18	Número de Nusselt em função do número de Rayleigh interno (Ra_i) para $Pr = 7, 0$ e $K = 1$ em cavidade semicircular conjugada, (a) Fundo (b) Topo.	57
4.19	Número de Nusselt em função do número de Rayleigh interno (Ra_i) para $Pr = 7, 0$ e $K = 5$ em cavidade semicircular conjugada, (a) Fundo (b) Topo.	58
4.20	Número de Nusselt em função do número de Rayleigh interno (Ra_i) para $Pr = 7, 0$ e $K = 12, 49$ em cavidade semicircular conjugada, (a) Fundo (b) Topo.	59
4.21	Número de Nusselt em função do número de Rayleigh interno (Ra_i) para $Pr = 7, 0$ e $K = 27, 16$ em cavidade semicircular conjugada, (a) Fundo (b) Topo.	60

4.22	Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade semicircular conjugada, para $Ra_i = (10^9)$, $Pr = 7,0$, $K = 12,49$ e $b/D = 0,2$	61
4.23	Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade semicircular conjugada, para $Ra_i = (10^{10})$, $Pr = 7,0$, $K = 12,49$ e $b/D = 0,2$	61
4.24	Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade semicircular conjugada, para $Ra_i = (10^{11})$, $Pr = 7,0$, $K = 12,49$ e $b/D = 0,2$	62
4.25	Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade semicircular conjugada, para $Ra_i = (10^{12})$, $Pr = 7,0$, $K = 12,49$ e $b/D = 0,2$	62

Lista de Tabelas

2.1	Correlações de transferência de calor em camada de fluido	14
2.2	Correlações de transferência de calor em camada de fluido	24
2.3	Correlações de transferência de calor em cavidade semicircular	24
4.1	Sensibilidade de malha, em cavidade de metade de um semicírculo, contendo fluido com $Pr = 7,0$ e $Ra_i = 10^{12}$: dados das malhas.	38
4.2	Sensibilidade de malha, em cavidade de metade de um semicírculo: valores globais do número de Nusselt e temperatura média	39
4.3	Critérios avaliados na convergência de malha, em geometria de metade de um semicírculo.	41
4.4	Estatísticas das simulações, em cavidade de metade de um semicírculo.	42
4.5	Dados das malhas utilizadas para convergência, em cavidade semicircular não conjugada.	46
4.6	Número de Nusselt e temperatura média ao longo do fundo da cavidade semicircular não conjugada, para $Pr = 7,0$ e $Ra_i = 10^{10}$	46
4.7	Critérios avaliados na convergência de malha em cavidade semicircular não conjugada.	46
4.8	Casos analisados na cavidade semicircular não conjugada, com diferentes número de Pr	49
4.9	Dados das malhas utilizadas para convergência na parede, em geometria semicircular conjugada.	53
4.10	Dados das malhas utilizadas para convergência na cavidade, em geometria semicircular conjugada.	53
4.11	Critérios avaliados na convergência de malha, em cavidade semicircular conjugada.	53

Lista de Símbolos

Ra_i	Número de Rayleigh interno, p. 8
T_w	Temperatura na parede [K], p. 25
ΔT	Temperatura de referência, p. 30
α	Difusividade térmica [m^2/s], p. 8
β	Expansividade Térmica [K^{-1}], p. 8
ϵ	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta [m^2/s^3], p. 17
κ	Condutividade térmica [W/m K], p. 8
ν	Viscosidade cinemática [m^2/s], p. 8
ω	Taxa de dissipação turbulenta específica [1/s], p. 17
ϕ	Componente de direção, p. 28
ρ	Densidade, p. 26
θ_f	Temperatura adimensional do fluido, p. 30
θ_s	Temperatura adimensional do sólido, p. 30
θ	Temperatura adimensional, p. 28
f	Termo da aproximação de boussinesq, p. 28
h	Coefficiente de transferência de calor, p. 8
p	Pressão [pa], p. 28
q_v	Taxa volumétrica de geração de calor [W/m^3], p. 8
u	Componente velocidade em r, p. 28
v	Componente velocidade em r, p. 28

D	Diâmetro [m], p. 11
Gr	Número de Grashof, p. 9
H	Altura da cavidade [m], p. 8
K	Razão de condutividade térmica [K_s/K_f], p. 11
Nu	Número de Nusselt, p. 8
P	Pressão adimensional, p. 28
Pr	Número de Prandtl, p. 8
R	Raio [m], p. 30
Re	Número de Reynolds, p. 17
T	Temperatura [K], p. 26
U	Vetor velocidade, p. 28
V	Componente de velocidade adimensional, p. 28
b	Espessura da parede [m], p. 11
g	Aceleração gravitacional [m/s^2], p. 8

Lista de Abreviaturas

AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica, p. 4
CFD	Fluidodinâmica Computacional, p. 1
DBA	Acidente base de projeto, p. 3
INES	Escala Internacional de acidentes Nucleares, p. 4
IVMR	in-vessel melt retention, p. 7
LES	Large Eddy Simulation, p. 17
LOCA	Acidente por perda de refrigerante do reator, p. 3
MVF	Método de volumes finitos, p. 24
PWR	Reator de Água Pressurizada, p. 1
RANS	Reynolds-Avareged Navier-Stokes, p. 23
SST	Shear-Stress Transport, p. 23
TMI	Three Mile Island , p. 4

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo aborda a motivação da realização deste trabalho, a qual trata-se da possibilidade de ocorrência de acidente severo, ou seja, quando ocorre a degradação total ou parcial do núcleo do reator, em usinas nucleares. A partir disso, é realizada a análise detalhada da convecção natural que é tratada em cavidades com um fluido gerador de calor.

A fim de facilitar a compreensão do assunto abordado, serão apresentados na Seção 1.1 alguns conceitos relacionados ao funcionamento de uma central nuclear de reator à água pressurizada (PWR). Uma vez apresentados tais conceitos, serão mostradas na seção 1.2 definições diretamente relacionadas ao acidente severo. Na seção 1.3 é retratada a importância do estudo de convecção natural para a garantia da integridade física do vaso de pressão do reator nuclear e a coibição de consequências mais severas após esse tipo de acidente. E também é mostrada uma breve abordagem na seção 1.4, sobre simulações de CFD e principais características da ferramenta de simulação utilizada nesse trabalho, o ANSYS-Fluent.

1.1 Contextualização

Nos últimos 60 anos, a usina nuclear cresceu de um novo desenvolvimento científico para se tornar uma parcela importante da matriz energética em muitos países. De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), atualmente estão operando 452 usinas nucleares em 30 estados membros da mesma, sendo 299 reatores do tipo PWR (Reator de Água Pressurizada), um dos reatores mais utilizados em todo o mundo devido à sua maior confiabilidade operacional, fornecendo cerca de 15% da eletricidade do mundo e 56 unidades estão em construção. No Brasil temos em operação, atualmente, as usinas nucleares Angra 1 e Angra 2 ambas equipadas com reatores do tipo PWR, o mais comum do mundo, e temos em processo de construção a usina Angra 3.

O reator do tipo PWR originou-se como uma usina para propulsão de submarino, onde utiliza água leve como refrigerante e moderador. O projeto deste reator distingue-se por ser composto por três circuitos independentes de operação, como mostrado pela Fig. 1.1.

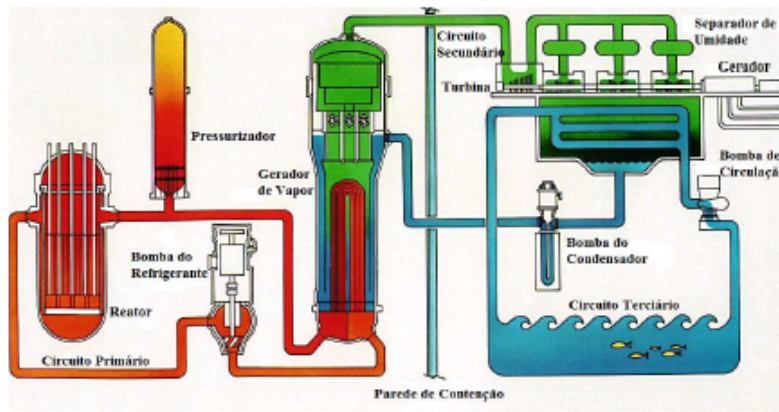


Figura 1.1: Diagrama de Funcionamento de um reator tipo PWR (Azevedo, M. B., 2016).

Numa usina PWR, o circuito primário é formado por bombas principais de arrefecimento do reator, um reator nuclear (configurado pelo núcleo que é formado por elementos combustíveis, que são: um conjunto de pastilhas combustíveis compostas de dióxido de urânio enriquecido, empilhadas em uma estrutura de zircaloy, chamada de vareta combustível. Estas pastilhas são responsáveis por fornecer calor ao reator através da fissão nuclear do urânio 235), um pressurizador (equipamento que mantém a alta pressão, para que a água mesmo à elevadas temperaturas se encontre no estado líquido) e geradores de vapor (elemento responsável pela transferência de calor do circuito primário para o secundário).

O circuito secundário é constituído do gerador de vapor, turbina (local onde há transformação da energia térmica em energia mecânica), um condensador (equipamento onde o vapor de água que sai da turbina transforma-se em líquido ao trocar calor com a água de refrigeração) e bombas.

E por fim, o circuito terciário onde a água de refrigeração (muitas vezes retirada do mar ou de um rio localizado próximo à central nuclear) é bombeada para o condensador e retorna para um reservatório ou torre de refrigeração.

O estudo dessa dissertação tem foco no circuito primário de uma PWR, mais especificamente no núcleo do reator, região afetada durante um acidente severo. Um dos elementos mais importantes em questão de segurança é o vaso de pressão

do reator, onde está contido o núcleo. Este vaso de pressão é uma barreira, que impede o vazamento do elemento combustível do interior do núcleo para o meio ambiente e protege o exterior contra radiação e partículas provenientes da reação nuclear.

A fim de entender com mais clareza o que vem a ser um acidente severo, é necessário, portanto, ter conhecimento a respeito do que se trata um acidente base de projeto (DBA).

Acidentes de base de projeto são os acidentes propostos com ajuda de considerações probabilísticas durante o projeto de uma usina, ou seja, acidentes de possível ocorrência durante o funcionamento da mesma, visando principalmente o desenvolvimento de um sistema de segurança viável para o tratamento de tais acidentes (Petrangeli, 2006). O aumento de reatividade em virtude da perda de moderador é um exemplo de acidente de possível ocorrência em atividades normais de um reator.

Alguns exemplos de DBA's são:

- Falha na válvula de segurança do pressurizador;
- Perda de potência das bombas de refrigeração;
- Perda de refrigerante do reator (LOCA).

Em condições de acidentes mais significativas do que aquelas denominadas como DBA em usinas nucleares, existem os acidentes severos, que são acidentes possíveis, mas, não totalmente classificados no processo de projeto, porque são considerados muito pouco prováveis de ocorrer. O acidente além da base de projeto, por exemplo, impossibilita a refrigeração do núcleo, resultando na degradação significativa do mesmo, gerando falhas nas barreiras de proteção e no sistema de segurança.

Esse tipo de acidentes devem ser considerados e mitigados através de especificações técnicas, equipamentos relacionados à segurança ou projetos de defesa em profundidade para a usina nuclear. E ter como objetivo final, manter a integridade da contenção, evitando, assim, a liberação do material radioativo.

1.2 Acidente Severo

A avaliação da operação atípica em uma usina nuclear varia de pequena a significativa, com consequências mínimas e de longo alcance, respectivamente. Em 1990, a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) desenvolveu uma escala para categorizar a gravidade e o alcance dos eventos nucleares com relação à liberação do material radioativo e ao impacto radiológico, chamado de Escala Internacional de acidentes Nucleares (INES). A fim de “permitir a comunicação imediata sem falta de informações significativas em caso de acidentes nucleares”, como visto na Fig.1.2.

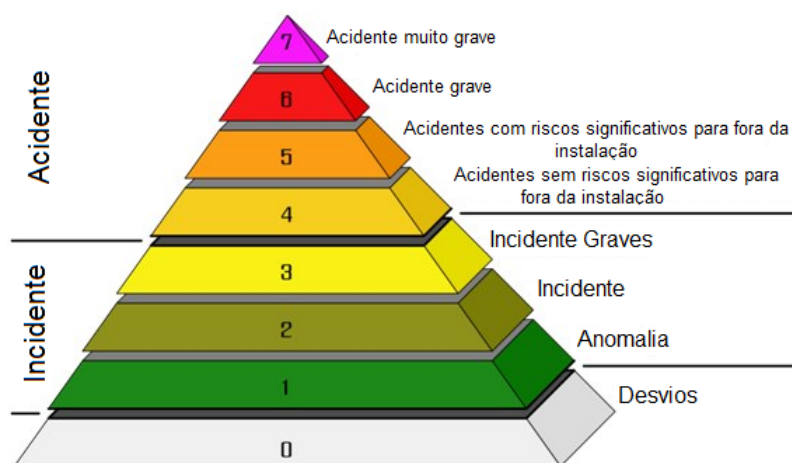


Figura 1.2: Escala Internacional de acidentes Nucleares (INES), (IAEA, 2018)

Na escala, a gravidade e a frequência dos eventos são capturadas: as frequências maiores são representadas por uma área de base maior na pirâmide (níveis 1-3), onde não existe consequência significativa sobre a população e o meio ambiente classificados como, incidentes. Enquanto as gravidades maiores são representadas por uma elevação mais alta na pirâmide (níveis 4-7), logo, classificados por sua vez de acidentes.

Os últimos níveis da INES, correspondem a um acidente cuja gravidade é comparável aos ocorridos na usina de Three Mile Island (TMI), nos Estados Unidos, em 1979, seguido pelo acidente de Chernobyl, na Ucrânia, em 1986 e recentemente de Fukushima, no Japão, em 2011, os quais foram caracterizados por serem acidentes onde houve deformação no núcleo do reator. Estes são considerados os acidentes nucleares mais graves até hoje.

O acidente da usina de TMI foi o primeiro acidente severo no mundo, porém, não o mais grave, classificado como nível 5 na INES, embora não tenha tido efeito perceptível na ocorrência de câncer ou incidência de problemas de saúde nos moradores próximos da central nuclear. Iniciou-se após um defeito causado no sistema do circuito secundário da usina, sucessivo de uma falha do operador onde ocasionou a perda de grande quantidade de água do circuito primário. Isto ocorreu devido a abertura da válvula de alívio no sistema primário, comprometendo o núcleo do reator e causando o derretimento parcial do mesmo (Vieira, 2010), como mostra a Fig. 1.3.

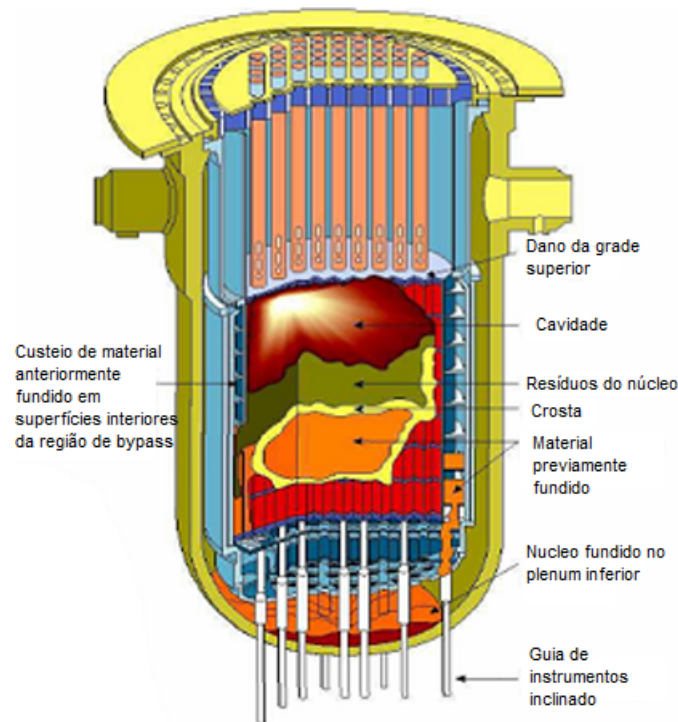


Figura 1.3: Núcleo do reator da usina TMI (Rempe et al., 2008).

No caso do acidente de Chernobyl, considerado o pior acidente nuclear da história, sendo o primeiro classificado com a nota máxima (nível 7) na International Nuclear Event Scale (INES).

O acidente nuclear mais recente ocorrido foi na usina de Fukushima, no Japão. O acidente se iniciou após a planta ter sido atingida por um tsunami provocado por um terremoto de magnitude 9,0 na escala Richter, ocorrendo o derretimento de três dos seis reatores da usina, com liberação de material radioativo para o ambiente, fato que atribuiu um grau de evento nível 7 de gravidade, assim como Chernobyl.

Na hipótese de um acidente severo chegando a causar liberação de material radioativo, os problemas gerados representam uma ameaça à população que residem próximo a central nuclear.

Para entender melhor, um acidente severo é iniciado quando a degradação do núcleo é significativa, mas para chegar a esse ponto, o núcleo do reator precisa atingir temperaturas em que os componentes principais, como barras de controle e/ou combustível, comecem a derreter. O acidente pode ocorrer até o ponto em que a contenção primária será violada. Segundo Bayout (1997), as fases da evolução de um acidente até o ponto de falha da Tampa Inferior do Vaso de Pressão são:

- Fase 1 (Dano inicial ao combustível):
 - Aquecimento da Barra de Combustível até $1400^{\circ}C$;
 - Oxidação do revestimento da barra de combustível;
 - Fusão das Barras de Controle em $2850^{\circ}C$

- Fase 2 (Fusão do Núcleo e Realocação):
 - Falha do revestimento; interações entre materiais causam a liquefação parcial do combustível e a formação de detritos de partículas;
 - Núcleo fundido e detritos se realocam no plenum inferior do vaso de pressão;
 - Os detritos se acumulam nas estruturas de suporte da parte inferior do núcleo e na tampa inferior do vaso de pressão.

- Fase 3 (Falha da Tampa Inferior do Vaso de Pressão):
 - Descarga de detritos do núcleo na contenção;
 - Interações dos detritos do núcleo com as estruturas da contenção.

Assim que o revestimento de Zircaloy começa a fundir $1760^{\circ}C$, a pastilha de UO_2 pode ser quimicamente dissolvida e então liquefeita em uma temperatura de cerca de $1800^{\circ}C$. Em temperaturas acima de $2850^{\circ}C$, todos os componentes do núcleo do reator, incluindo o material de maior ponto de fusão, UO_2 , como as misturas eutéticas, que se formam no decorrer do acidente são fundidos.

As misturas eutéticas, são constituídas em uma proporção cujo o ponto de fusão (ponto eutético) é inferior à temperatura de fusão de cada material individual. Se durante o derretimento do núcleo houver a formação de misturas eutéticas, há um favorecimento para o deslocamento do mesmo para o plenum inferior. Caso, não haja detritos sólidos de parte do núcleo no plenum inferior e o material líquido cair diretamente na parede inferior do vaso de pressão por meio de jatos de colisão (impinging jets), o mesmo sofre maior chance de ruptura (Rempe et al., 2008).

Após o derretimento inicial do núcleo, detritos derretidos do mesmo, comumente chamado de corium, se depositam no plenum inferior do vaso de pressão, como mostrado na Fig.1.4 e pode ser estratificado em uma camada metálica. Esta é composta principalmente pelo refletor, aço, ferro e zircaloy, localizada acima de uma piscina de material óxido, formado basicamente por ZrO_2 e UO_2 .

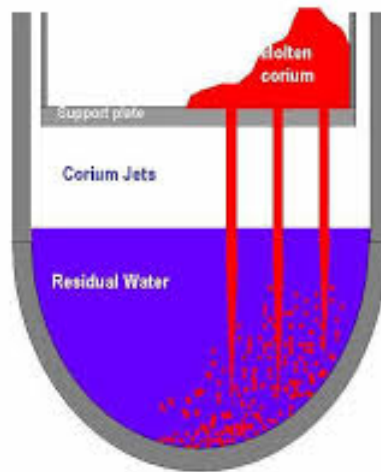


Figura 1.4: Corium no plenum inferior do vaso de pressão do reator (Bayout, 1997).

A estratégia de gerenciamento do acidente severo no qual é denominado de retenção de material derretido dentro do vaso de pressão, do inglês “in-vessel melt retention” (IVMR), tem como objetivo manter o fluxo de calor residual dos produtos de fissão para a parede do vaso, abaixo do limite de capacidade de refrigeração externa.

A IVMR requer a descrição de como o núcleo derretido realoca para o plenum inferior do vaso de pressão. Além da determinação da possibilidade de uma falha no vaso de pressão devido ao ataque do material derretido e a explosão de vapor gerada pela inserção do corium na água contida no plenum inferior.

Essa estratégia de retenção do núcleo derretido também requer a determinação da configuração do corium, assim como a descrição do processo de convecção natural

do mesmo, a fim de determinar o fluxo de calor ao longo da parede do fundo do vaso.

1.3 Convecção Natural

A convecção natural tem sido estudada em diversas áreas e seu avanço aumentou na engenharia nuclear, em razão da prevenção de um acidente severo em uma usina de energia nuclear, visto que a transferência de calor por convecção natural determina as cargas térmicas na parede do vaso de pressão (Bernaz et al., 2001).

O conhecimento dos fenômenos de transferência de calor em um núcleo fundido é essencial, uma vez que, o carregamento termomecânico total é basicamente controlado pela convecção natural gerada pelo calor residual dos produtos de fissão.

O fenômeno físico da convecção natural de um fluido gerador de calor em uma cavidade, em geral, é descrito por dois parâmetros adimensionais, o número de Prandtl e o número de Rayleigh interno, definidos respectivamente por:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}, \quad (1.1)$$

$$Ra_i = \frac{g\beta q_v H^5}{\nu\alpha k}, \quad (1.2)$$

em que g é aceleração gravitacional, β o coeficiente de expansividade térmica, q_v a taxa volumétrica de geração de calor, H a altura, ν a viscosidade cinemática, α a difusividade térmica e k a condutividade térmica.

Os números de Ra_i em caso de acidente severos chegam a uma ordem de 10^{17} , onde o fluido é uma mistura eutética.

A convecção natural em cavidades é um fenômeno que depende fortemente da geometria, condições de contorno e propriedades termofísicas do fluido. A variação espacial e temporal do fluxo de calor nas paredes do sistema, em que se encontra a convecção natural, depende do padrão de escoamento, o qual dependendo da combinação de Pr e Ra_i , pode ser laminar ou turbulento, cujas características de transferência de calor são completamente diferentes. Portanto, as análises de convecção natural buscam obter correlações que definem a taxa de transferência de

calor, a qual é determinada pelo número de Nusselt, em função dos números de Rayleigh e Prandtl.

$$Nu = f(Ra, Pr) = C_1 Ra_i^{c_2} Pr^{c_3}, \quad (1.3)$$

onde, C_1 , C_2 e C_3 são constantes obtidas experimentalmente. Segundo, Bernaz et al. (2001) a constante C_2 pode assumir os valores de 1/4 para escoamentos laminares e 1/3 para escoamentos turbulentos.

O número de Nusselt relaciona a transferência de calor por condução e convecção, definido por:

$$Nu = \frac{hD}{k}, \quad (1.4)$$

sendo, h o coeficiente de transferência de calor por convecção, onde em muitos trabalhos, inclusive neste, é utilizado em função do número de Ra e Pr , o D é o diâmetro da cavidade em que o fluido se encontra.

Alguns autores também utilizam o número de Grashof (Gr), que se relaciona com o número de Prandtl (Pr) e Rayleigh (Ra_i) da seguinte forma:

$$Gr = \frac{Ra_i}{Pr}, \quad (1.5)$$

tais números são muito aplicados em diversos estudos como parâmetros de análises do comportamento de regimes de escoamentos, possibilitando a identificação simplificada de regiões laminares, transientes e turbulentas de fluidos em convecção natural.

1.4 Fluidodinâmica Computacional (CFD)

De acordo com Anderson et al. (2013), a fluidodinâmica computacional é um mecanismo de simulação numérica de fluidos, com a capacidade de obter os campos de concentração, velocidade, pressão e temperatura tanto espacial quanto temporal. Isso ocorre por meio de modelos microscópicos baseados nos princípios da conservação de massa, da energia e da quantidade de movimento.

O ANSYS-Fluent 18.0 é um programa comercial especialmente desenvolvido para resolver problemas de fluxo com fluidos baseado na técnica numérica CFD, onde utiliza o métodos de volume finitos para resolução das equações que governam o

movimento do fluido, utiliza técnicas numéricas, método de volumes finitos, para discretização do domínio estudado, a fim de converter as equações diferenciais parciais em sistemas algébricos. A discretização do domínio estudado é feita pela geração de malhas, estruturadas uniformes ou não uniformes, não estruturadas e híbridas.

O método de volume finito originou-se do método de diferenças finitas aplicado à mecânica dos fluidos para tratamento das não linearidades das equações de Navier-Stokes e utilizam-se de um volume de controle para realizar um balanço das variáveis, tendo como objetivo minimizar as diferenças entre os resultados da equação diferencial e de uma equação algébrica que a possa representar.

A metodologia do CFD é baseada em quatro etapas:

1. Criação de Geometria;
2. Definição do modelo físico;
3. Resolução do problema;
4. Visualização dos resultados.

A partir disto, esse trabalho utilizou o programa ANSYS-Fluent 18.0 para melhor compreensão da transferência de calor por convecção em cavidades, para a resolução dos problemas gerados.

1.5 Motivação

Dados os riscos operacionais de uma planta de geração de energia elétrica baseada em fissão nuclear, engenheiros, físicos entre outros profissionais, têm exigido cada vez mais esforços de modo a garantir uma operação segura nas centrais e diminuir o máximo possível a incidência de acidentes e mitigar as consequências dos mesmos.

Com o aumento da demanda de energia elétrica, novas plantas de geração de energia nuclear têm sido construídas e novos tipos de reatores têm sido projetados, o que aumenta a preocupação no que tange a possíveis acidentes. Já, quando se fala de segurança nuclear, o que está em causa é justamente a retenção das substâncias radioativas, as quais são produzidas no reator, durante o seu funcionamento.

Após os primeiros acidentes severos, Three Mile Island (TMI-2) ocorrido na Pensilvânia-Estados Unidos, em 1979, Chernobyl, na Ucrânia, em 1986 e o recente na usina de Fukushima, no Japão, em março de 2011, houve o aumento de estudos e trabalhos desenvolvidos na área de controle e prevenção de acidentes. O intuito era de prever o comportamento de vasos de pressão de reatores nucleares em condição de acidentes. Dessa forma, todo esforço é válido no que diz respeito à tentativa de melhorar a compreensão desse tipo de acidente.

A compreensão científica de todos os fenômenos que ocorrem no vaso de pressão do reator em condições de acidentes com derretimento do núcleo (corium) ainda não é possível. Então, a pesquisa exerce uma importante função na implementação de projetos de gerenciamento de acidentes. É importante ter em mente, a complexidade do problema decorrente após um acidente severo e o papel da pesquisa para uma melhor visão sobre os acontecimentos em um núcleo derretido. Esse trabalho teve por motivação a importância do estudo da convecção natural conjugada no favorecimento da integridade física do vaso de pressão e coibição de severas consequências.

Com isso, o trabalho abordou a aplicação de simulações numéricas por meio da metodologia de fluidodinâmica computacional (CFD) na investigação da transferência de calor conjugada, fenômeno físico tratado por esse trabalho.

1.6 Objetivos

O objetivo desta dissertação tem como base a importância da convecção natural para a análise da transferência de calor em um núcleo fundido e para avaliações de gerenciamento de acidentes. Também é importante mencionar o papel das simulações CFD para uma melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem dentro de uma camada de óxido de um corium após um acidente severo. Logo, investiga a transferência de calor conjugada em um fluido com geração interna de calor em uma cavidade semicircular com convecção natural no fluido e condução de calor na parede sólida. E, finalmente, quantifica os efeitos da espessura (b) em razão ao diâmetro (D) e a razão entre a condutividade térmica do sólido e do fluido (K), no comportamento do regime de escoamento e de transferência de calor em função de números de Prandtl e Rayleigh interno.

Visando uma compreensão ampla das características de tal fenômeno, para o fluido analisado foram identificadas faixas de regime de escoamento laminar estacionário,

laminar transiente e turbulento, de forma que seja possível se ter uma noção de como determinado fluido se comportará sob determinadas condições de contorno.

Dessa forma, este trabalho apresenta simulações numéricas bidimensionais de convecção natural em um fluido com geração interna de calor distribuída em um semicírculo com e sem parede espessa. As simulações foram realizadas em regime laminar, estado estacionário, com o uso do código de fluidodinâmica Computacional (CFD), para um fluido com número de Prandtl igual a 0,0321, 0,7 e 7,0 e número de Rayleigh variando na faixa de 10^6 a 10^{12} .

1.7 Organização do Trabalho

O trabalho foi dividido em 5 capítulos, entre os quais, o capítulo 1 apresenta uma breve introdução dos temas abordados de forma geral, os assuntos relacionados à acidente severo com uma contextualização dos acidentes nucleares ocorridos até o momento. O capítulo ainda aborda um resumo sobre convecção natural e a Fluidodinâmica Computacional (CFD).

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica de correlações de transferência de calor para convecção de Rayleigh-Bernard, trabalhos experimentais realizados com objetivo de investigar e obter dados sobre a convecção natural em fluidos representativos do corium, assim como uma revisão de trabalhos numéricos.

O capítulo 3 apresenta o problema físico do estudo e a metodologia utilizada para obtenção dos resultados. Mostra também as equações governantes da convecção natural nas formas bidimensionais, analisadas por esse estudo, e por fim, demonstra o software utilizado para resolução do problema e suas características de simulação numérica e as etapas para obtenção e processamento dos resultados.

O capítulo 4 trata-se dos resultados, onde apresenta detalhes das simulações realizadas, como malha, dados de controle da simulação e os principais resultados gerados em cada etapa desse trabalho. O capítulo 5, o último, retrata a conclusão da dissertação com uma análise crítica do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo aborda os trabalhos realizados de modo experimental quanto numéricos desenvolvidos anteriormente por diversos autores com relação às análises de convecção natural em cavidades e a fluidodinâmica computacional (CFD). Uma revisão a respeito das principais correlações desenvolvidas de transferência de calor para convecção de Rayleigh-Benard é apresentada na primeira seção deste capítulo. Na seção seguinte, são discutidos os principais trabalhos experimentais que tiveram como objetivo o estudo do comportamento do núcleo derretido no plenum inferior de um vaso de pressão. Por fim na terceira seção, são discutidos alguns trabalhos numéricos sobre convecção natural em cavidades.

2.1 Correlações de transferência de calor para a convecção de Rayleigh-Benard

O movimento do fluido entre dois planos horizontais mantidos a diferentes temperaturas constantes é comumente chamado de convecção de Rayleigh-Bénard, em homenagem a Henri Bénard, que em 1900 observou a formação de células hexagonais em uma fina camada de fluido aquecida na parte inferior, e Lord Rayleigh, que em 1916 derivou o critério de instabilidade no caso de limites sem estresse.

De fato, a convecção térmica estudada por Bénard foi motivada pela variação da tensão superficial com a temperatura e instabilidades desse tipo são geralmente chamadas de efeitos de Marangoni (que são alterações sofridas pelos fluidos nas superfícies delimitadoras, devido a gradientes na tensão superficial). A estabilidade do sistema Rayleigh-Bénard foi estudado pela primeira vez por Jeffreys H. (1928), que previu a condição para o início da convecção no $Ra_c = 1708$. Em números Ra suficientemente altos, ocorre uma transição para turbulência, dependendo do

número de Prandtl.

Existem diversas literaturas sobre a convecção de Rayleigh-Bénard (por exemplo, Chavanne et al., 2001). Aqui resumimos algumas das correlações mais conhecidas, apresentadas na forma $Nu = C Ra^n Pr^m$, na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Correlações de transferência de calor em camada de fluido

Referência	Correlação	Pr	Ra_i
Glob and Dropkin (1959)	$Nu = 0,069 Ra^{0,333} Pr^{0,074}$	0,02 - 8750	$1,05 \times 10^5$ $6,8 \times 10^8$
O'Toole and Silveston (1961)	$Nu = 0,104 Ra^{0,301} Pr^{0,084}$		$10^5 - 10^9$
Chu and Goldstein (1973)	$Nu = 0,183 Ra^{0,278}$	7,0	$2,76 \times 10^5$ $1,05 \times 10^8$
Castainf et al. (1989)	$Nu = 0,23 Ra^{0,2857}$	0,7	

Em geral, as correlações conhecidas para convecção natural fornece valores de n entre $1/4$ e $1/3$. Argumentos baseados no raciocínio dimensional rendem $n = 1/3$, e essa relação pode ser facilmente derivada (Bejan A., 1994). A lei $1/3$ significa que a taxa real de transferência de calor q é independente da espessura da camada L .

Com base na análise teórica da camada limite ou observações experimentais, Heslot et al (1987) identificaram diferentes tipos de turbulência, turbulência “suave” e “forte”, a distinção entre as duas que ocorrem no $Ra = 4 \times 10^7$. Verificou-se que a relação $Nu - Ra$ retém $1/3$ do valor somente em turbulência “suave” e diminui para cerca de $2/7$ no regime de turbulência “forte”.

Além disso, Chavanne et al.(2001) realizaram experimentos usando gás criogênico de hélio em baixas temperaturas para Ra de 2×10^4 variando o Pr e encontraram um aumento de n , até cerca de $n = 0,4$. Essa mudança foi interpretada como a transição para um “regime assintótico”. No entanto, as questões da existência de uma lei de potência estrita na relação $Nu - Ra$ e no estado assintótico permanecem em aberto. Os efeitos do número de Prandtl, isto é, os valores relativos das espessuras da camada limite térmica e de velocidade, também não são bem compreendidos.

Recentemente, Niemela et al. (2000) investigaram o transporte térmico ao longo de onze ordens de magnitude do número de Rayleigh ($10^6 < Ra < 10^{17}$), usando

gás hélio criogênico como fluido de trabalho. Seus dados foram correlacionados por uma única lei de potência com o expoente de escala $n = 0,31$, e nenhuma evidência de qualquer transição foi encontrada.

Visto que o número adimensional (Rayleigh) tem grande aplicação na análise de estabilidade do estado de repouso de uma lâmina de fluido sob aquecimento e pode ser utilizado como parâmetro de análise de regimes de escoamento. E o trabalho faz uso da transferência de calor para convecção de Rayleigh-Bernad. A seção subsequente dará continuidade à revisão bibliográfica retratando os trabalhos numéricos desenvolvidos sobre convecção natural em cavidades.

2.2 Trabalhos numéricos

Como não são conhecidos todos fenômenos que ocorrem no corium, as pesquisas vêm crescendo nesta área a fim de desempenhar um papel importante na avaliação do acidente. Dessa forma, são realizados diversos trabalhos numéricos sobre convecção natural, dentre eles:

A análise do número de Prandtl na convecção natural foi realizada por Emará e Kulacki (1980), que trabalharam com um domínio retangular e números de Rayleigh interno na faixa de 5×10^4 a 5×10^8 e Pr de 0,05 a 20. Emará e Kulacki (1980) constataram que o comportamento do fluido foi similar para Pr iguais a 1 e 6,5 com diferença do número de células de convecção, uma vez que para o primeiro caso observou-se 4 células em Ra_i igual a 5×10^6 . Já para o segundo foram observadas apenas duas. Nesta condição de Ra_i igual a 5×10^6 percebeu-se a perda da simetria e possivelmente início da periodicidade.

May (1991) também analisou a influência da inclinação de cavidades no fenômeno da convecção natural por meio de um método numérico de diferença central, bidimensional, implícito de alternância de direção (ADI) e os resultados foram similares aos obtidos experimentalmente por Lee e Goldstein (1988).

Fusegi et al. (1992) também avaliaram a interferência da razão de aspecto no comportamento da convecção natural em cavidades retangulares com aquecimento diferenciado, e ainda com fonte interna de calor. A razão de aspecto, definida como a razão entre a altura e largura da cavidade, variou na faixa de 0,3 a 5,0 e o número de Prandtl do fluido analisado foi de 5,85. Os números de Rayleigh externo e interno variaram nas faixas de 4×10^5 a 5×10^7 e 4×10^7 a 5×10^9 , respectivamente. Todos os resultados apresentados por Fusegi et al. (1992) não indicaram transição

para escoamentos instáveis, ou seja, foi observado a ocorrência apenas de regimes estacionários.

Churbanov et al. (1994) estudaram convecção natural em um fluido com geração interna de calor com o número de Prandtl = 7,0 variando o número de Rayleigh entre 10^5 a 10^8 , cujas geometrias eram uma cavidade retangular e uma quadrada. Ambas com paredes adiabáticas e isotérmicas, observando que para o $Ra = 10^8$ existem flutuações randômicas, com probabilidade de transição do regime laminar para o turbulento. Concluíram que com o aumento do Ra ocorrem oscilações periódicas de todos parâmetros básicos.

Shim e Hyun (1997) estudaram o efeito da transferência de calor com aquecimento interno em uma cavidade quadrada com diferença de temperatura nas paredes, utilizando como fluido o ar, cujo o numero de Prandtl é 0,7 variando assim o número de Rayleigh interno na faixa de 10^5 a 10^8 e Rayleigh externo na faixa de 10^5 a 10^7 . Observa-se que para número de Rayleigh baixo a diminuição do Nu com o tempo é pequena e quando cresce a razão Ra_i e Ra_e aumenta-se a taxa de transferência de calor.

Dinh e Nourgaliev (1997) criaram a geometria semi-elíptica, similar ao experimento COPO, e realizaram também simulações em cavidades retangular e semicircular. A fim de estudar convecção natural para fluido com $Pr = 7,0$ e $0,2$ e altos Rayleigh ($10^{12} < Ra < 10^{15}$) aplicando modelo de turbulência $k-\epsilon$. Analisando os resultados percebe-se que fluidos com menores Pr propiciam a transferência de calor nas paredes do fundo da cavidade, devido à alta condutividade e alta difusividade térmica. Fluidos com maiores Pr mostram ser mais resistentes ao escoamento contribuindo para melhor transferência de calor nas regiões superiores da cavidade.

Loktionov et al. (1999) investigaram numericamente o comportamento da pressão do reator em condições de acidentes severos, levando em consideração os processos combinados de fluência do vaso. Equações de Navier-Stokes bidimensionais com um modelo de turbulência e números de Reynolds baixos foram resolvidos para a predição da convecção natural na piscina.

Liaqat e Baytas (2001) realizaram um estudo numérico de transferência de calor conjugada e não conjugada em uma cavidade semicircular. O esquema do problema físico analisado pelos mesmos pode ser visto na Fig. 2.1. O algoritmo utilizado foi o SIMPLER, o fluido apresentava o número de Prandtl = 7,0 e o número de Rayleigh

foi entre 10^6 e 10^{11} . Com o objetivo de validar o método numérico utilizado Liaqat e Baytas (2003) fizeram um estudo com as mesmas condições e compararam com a Mayinger et al. (1976), concluindo que existe uma boa concordância entre os dados.

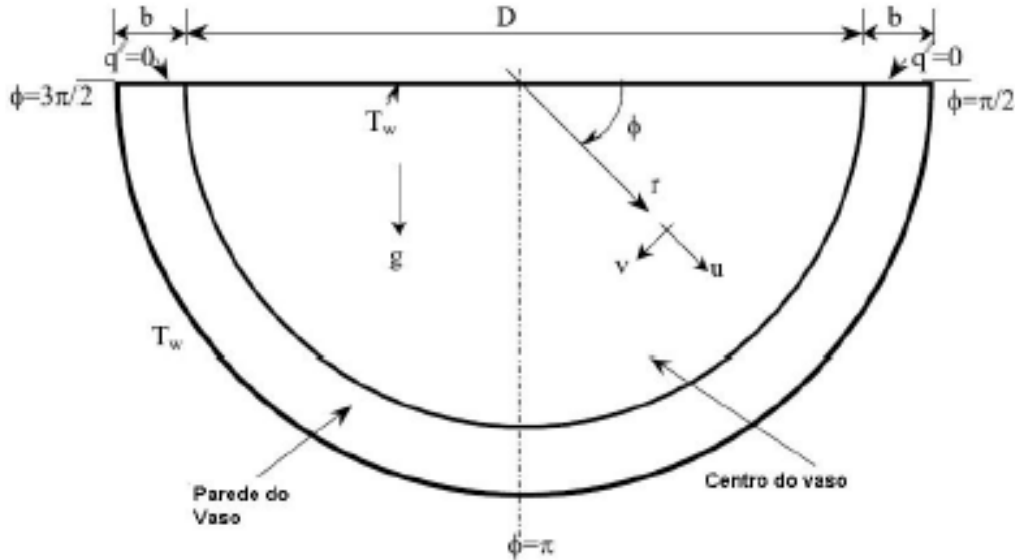


Figura 2.1: Esquema do sistema de coordenadas e problema físico estudado por Liaqat e Baytas (2001).

Horvart et al. (2001) realizaram um estudo numérico da convecção natural gerada por fonte volumétrica de calor com o modelo LES, para Pr iguais a 0,25 e 0,6. A geometria em questão foi um quadrado com paredes isotérmicas e a faixa de Rayleigh foi entre 10^6 e 10^{11} , observando que o número de Prandtl menor não interferiu na transferência de calor na geometria em estudo. Ao mesmo tempo, que o fluido com maior número de Prandtl provocou um aumento na transferência de calor na região próxima ao topo, como evidenciado por Nourgaliev et al. (1997).

A validação dos modelos $k-\epsilon$, $k-\omega$ e de Transporte de Tensão de Cisalhamento (SST) foi realizada por Rundle e Lighstone (2007), por meio de comparação com os resultados experimentais fornecidos por Ampofo e Karayiannis (2003). Aounallah et al. (2007) também investigaram os modelos RANS ($k-\epsilon$, $k-\omega$ e $k-\omega$ -SST), além de simulações numéricas diretas em malhas não muito finas, em casos de convecção natural, em cavidades diferentemente aquecidas contendo fluido com $Pr = 0,7$ e Ra entre 10^9 e 10^{12} .

Otic et al. (2005) também utilizaram o tratamento algébrico dos fluxos de calor turbulento e obtiveram comportamentos do perfil de produção, difusão e dissipação

da variação da temperatura similares aos resultados obtidos por Boudjemadi et al.(1996) e Versteegh e Nieuwstadt (1998).

Fukasawa et al. (2008) examinaram modelos de baixo número de Reynolds e o modelo de grandes escalas (LES) por meio de simulações em cavidade similar ao do experimento BALI, Bonnet (1999), com diferentes condições de contorno na parede superior. Foi observado que para a condição de contorno de topo adiabático, apenas uma pequena diferença entre os modelos foi notada. Além, de um escoamento com estratificação mais estável em comparação com a condição de parede isotérmica.

Vieira (2010) executou uma investigação da convecção natural em fluidos com geração de calor volumétrica, realizando simulações em cavidades bidimensionais quadradas e semicirculares, com fluidos com números de Pr de 0,03, 0,71 e 7,0 a 8,52, utilizou o software o ANSYS CFX 12.0 e comparou seus resultados numéricos com outros resultados computacionais disponíveis na literatura. Com o objetivo de investigar a convecção natural turbulenta em fluidos com geração de calor volumétrica. Vieira et al. (2014) realizaram simulações em cavidade cuja sua geometria era quadrado e metade de um semicírculo com fluido variando o número de Pr de 0,6 a 8,52 e o número de Ra_i na faixa de 10^6 e 10^{16} , usando o OpenFOAM.

Vista a complexidade do estudo, muito esforço tem sido aplicado com propósito de melhorar a compreensão dos fenômenos que ocorrem durante o processo de derretimento do núcleo até seu realocamento para o plenum inferior no vaso de pressão. Os estudos realizados experimentalmente são importantes para gerar dados de validação de modelos numéricos tanto para softwares de programação como MELCOR e RELAP, quanto para softwares de simulação como fluido dinâmica computacional para investigação da convecção natural no núcleo do reator. Em função disso, a próxima sessão irá retratar o principais trabalhos experimentais relacionados a estudos práticos sobre o comportamento do corium no plenum inferior do vaso de pressão.

2.3 Trabalhos experimentais

A formação de um núcleo derretido, o desenvolvimento de uma piscina de corium no plenum inferior do vaso de pressão, assim como o comportamento dos mesmos são assuntos críticos para a aplicação de medidas de gerenciamento de acidente severo em usinas nucleares. Dessa forma, muito esforço tem sido feito com a finalidade de melhorar a compreensão dos fenômenos que ocorrem durante o processo de derretimento do núcleo até seu realocamento para a parte inferior do vaso de pressão.

Durante as últimas décadas, os processos de transferência de calor em material de núcleo fundido têm sido de interesse na área nuclear, um esforço para melhorar as medidas de segurança nas instalações nucleares. Diversos estudos experimentais, mais recentes, como UCLA (USA), COPO I, COPO II-Lo e COPO II-AP (Finlândia e França), ACOPO (USA), BALI (França) e LIVE (Alemanha) foram realizados para compreender os processos e para prever o comportamento do material de núcleo fundido resfriado externamente.

Mayinger et al. (1976) foram os primeiros a relatar dados experimentais e computacionais a respeito de convecção natural em cavidades semicirculares com fonte interna de calor, relataram um estudo experimental de convecção natural em uma cavidade semicircular de fluido gerador de calor. Seu fluido de trabalho foi água, cujo número de Prandtl é igual a 7,0 e foi analisado no intervalo de Rayleigh de 10^7 a 5×10^{10} , enquanto todas as paredes da cavidade foram resfriadas .

Alguns estudos experimentais foram realizados a fim de investigar a convecção natural em cavidades quadradas e fornecer resultados viáveis para a análise numérica de tal fenômeno físico. Lee e Goldstein (1988) realizaram um experimento em uma cavidade quadrada inclinada com o objetivo de estudar a distribuição da temperatura e a transferência de calor em um fluido, com propriedades similares às da água, com geração volumétrica de calor. Os números de Rayleigh aplicados no estudo experimental foram de 10^4 a $1,5^5$, sendo possível a obtenção do perfil simétrico da distribuição da temperatura para Ra_i de $1,5 \times 10^5$, em 0° de inclinação em relação à horizontal e o aumento da inclinação culminou no comprometimento da simetria.

A resistência do vaso de pressão mediante um acidente severo foi a base do estudo realizado por Henry e Fauske (1993), que fizeram uma avaliação detalhada da capacidade de remoção de calor pelo sistema de refrigeração externa do vaso de pressão do reator, como forma de prevenção do comprometimento físico do mesmo no caso de acidente com perda de refrigerante. As análises experimentais com água circundante no espaço entre o vaso de pressão e um revestimento o envolvendo mostrou bons resultados a cerca da remoção de calor por convecção natural da água.

Asfia et al. (1996) realizaram experimentos para diferentes fluidos (água, etanol, óleo de oliva e um helocarbono conhecido como R-113) na instalação UCLA, cuja geometria é denominada como uma cavidade hemisférica com geração interna de calor por micro-ondas e resfriamento externo, com o objetivo de investigar a

transferência de calor por convecção natural. Três diferentes condições de contorno foram avaliadas (superfície livre, isolada e refrigerada), as quais apresentaram uma ligeira diferença nos coeficientes médios de transferência de calor. O esquema do experimento pode ser visualizado na Fig. 2.2. As análises foram realizadas para números de Rayleigh variando de 10^{10} a 10^{14} e os resultados de Nu ao longo da parede inferior comparados com a correlação concedida por Kulacki e Nagle (1975), verificando que o coeficiente de transferência de calor máximo ocorreu na região ligeiramente abaixo da superfície superior da cavidade.

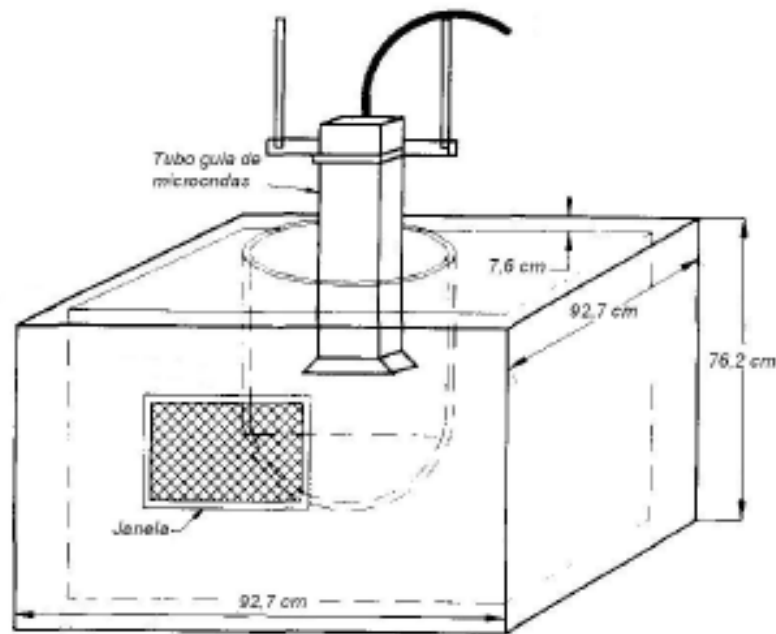


Figura 2.2: Esquema do experimento conduzido por Asfia et al. (1996)

Os experimentos COPO I e II-Lo foram realizados em geometrias similares à cavidade toro esférica do plenum inferior do reator VVER-440, em Loviisa- Finlândia. O material simulante aquecido uniformemente (solução de H_2O e $ZnSO_4$) foi arrefecido dos lados e da parte superior com o intuito de investigar a transferência de calor na piscina causada pela convecção natural (Kymalainen et al. 1997).

Em relação ao experimento COPO-II-AP a sua geometria é uma fatia bidimensional escalada de 1:2 do plenum inferior de um PWR ocidental (AP-600). Já, na COPO-II, a instalação experimental é arrefecida por nitrogênio líquido, permitindo a investigação da estratificação na formação da massa fundida e da crosta (Kymalainen et al. 1997).

Theofanous et al. (1997) reportaram os primeiros resultados do experimento ACOPO, o qual foi realizado em uma cavidade hemisférica na faixa de números de Rayleigh de (10^{15} e 10^{16}). A principal limitação do experimento foi o fato do aquecimento volumétrico do fluido (água) ter sido reproduzido por pré-aquecimento do mesmo à altas temperaturas antes da sua introdução na cavidade do vaso, culminando conseqüentemente, em números inferiores de Nusselt em relação a outros experimentos, visto que a perda de calor pelas paredes não pôde ser suprida por uma fonte interna de calor. Nos experimentos LIVE, essa limitação foi superada visto que o fluido continha uma grade interna de aquecimento elétrico o qual o mantinha aquecido durante todo o experimento (Buck et al., 2010).

Um dos experimentos mais conhecidos, cujo projeto teve como finalidade a investigação termohidráulica do corium tanto dentro quanto fora do vaso de pressão foram realizados na instalação BALI, localizada na CEA (Grenoble-França), Bonnet (1999). Os experimentos conduzidos em uma cavidade, cuja geometria era metade de um semicírculo, forneceram base de dados de transferência de calor para números de Rai na faixa de (10^{15} a 10^{16}). Bonnet (1999) apresentou os resultados experimentais nessa cavidade, cuja razão de aspecto ($H = R$) foi de 1:1, a cerca da distribuição da temperatura axial e fluxo de calor ao longo das paredes da piscina contendo água como fluido simulante do material óxido do corium, sendo os primeiros dados obtidos para número de Rayleigh superior a 10^{16} ($Ra_i = 10^{17}$). O programa experimental BALI também avaliou o efeito de concentração do fluxo de calor na camada metálica estratificada, a cima de uma camada de material óxido, em uma cavidade retangular. O fluido simulante também foi água e a cavidade foi aquecida no fundo e refrigerada no topo.

Dentre os poucos experimentos em cavidade quadrada, além do experimento BALI, um outro experimento que se destaca é o SIGMA RP. Lee et al.(2007) apresentaram resultados desse experimento acerca da influência do efeito do número de Prandtl para Ra_i variando de 10^9 a 10^{14} . Variando-se o Pr de 4 a 8, diferentes condições de contorno foram analisadas e comportamentos diferentes de transferência de calor foram notados para cada Pr . No caso da parede superior isotérmica e inferior adiabática, os resultados mostraram baixa dependência de Pr para os valores de Nu ao longo da parede do topo (Nu_{up}). Enquanto que para paredes superior e inferior isotérmicas, os valores baixos de Pr levaram ao aumento na transferência de calor na parede do fundo (Nu_{dn}).

Taylor et al. (2012) relataram resultados dos testes Mini-SIGMA (Simulação de acumulação de fusão interna gravada) com números de Rayleigh até 10^{10} . A seção

de teste era fatia bidimensional com 250 mm de diâmetro, 125 mm de altura e 50 mm espessura como mostrado na Fig.2.3. Eles concluíram que o perfil de fluxo de calor ao longo da parede inferior e a transferência média de calor para cima, com Ra variando de 10^7 a 10^{10} , estavam de acordo com os dados obtidos de outros estudos numéricos e experimentais relatados na literatura.

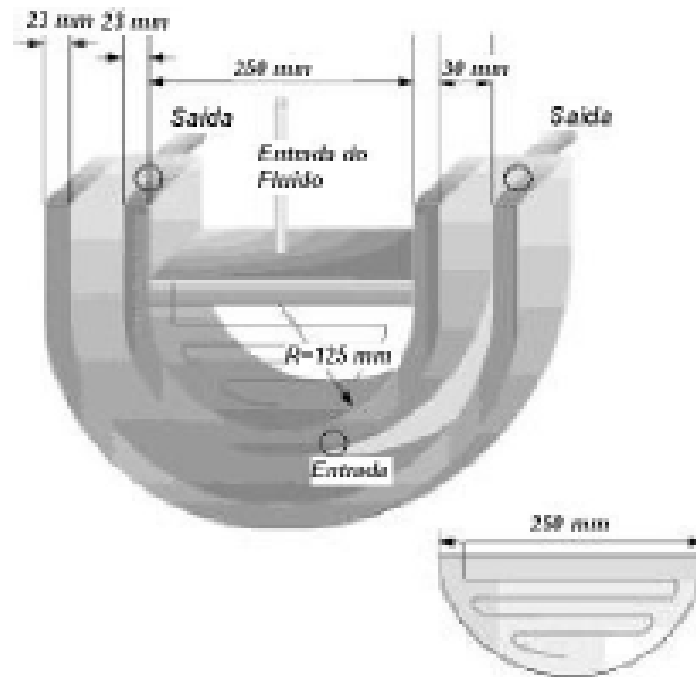


Figura 2.3: Esquema da seção semi-circular utilizada nos testes experimentais Mini-Sigma Taylor et al. (2012).

Lee e Suh (2003) apresentaram resultados do experimento na cavidade semicircular da instalação Mini-Sigma, o qual teve como objetivo investigar a distribuição do fluxo de calor e temperatura em água desmineralizada para Ra até 10^{10} . Sendo obtida uma boa concordância da distribuição de Nu ao longo da parede superior da cavidade com os resultados do experimento BALI, correlações empíricas e numéricas, respectivamente, geradas pelas análises feitas por Mayinger et al. (1976) e Steinberner e Reineke (1978). Notou-se também que o valor mais baixo do fluxo de calor ocorreu no fundo da cavidade, enquanto que o maior foi verificado no canto superior da mesma.

Sehgal et al. (2006) investigaram a instalação experimental do Instituto Real de Tecnologia (KTH) da CE-FOREVER (Comissão Europeia de Falha de Reabilitação de Reator), a falha do vaso de pressão por material de núcleo fundido no plenum inferior. Sendo assim, utilizou como simulante uma massa fundida salina constituída por óxido de cálcio (CaO) e óxido de boro (B_2O_3). Para fins de resfriamento, o vaso

de pressão pode ser inundado com água para arrefecer o material fundido da parte superior, a fim de proporcionar condições de refrigeração semelhantes às do acidente TMI-2.

A análise do procedimento de despressurização como maneira de prevenção de derretimento de núcleos de reatores do tipo CANDU foi realizada por Mehedinteanu (2009). O método estudado por Mehedinteanu (2009) é definido como ASQR e consiste na despressurização do reator e subsequente rebombeamento da água criando uma diferença de pressão no núcleo. Os resultados obtidos mostram uma completa prevenção do derretimento do núcleo dos tubos de pressão do reator CANDU e podendo também ter aplicação em reatores a água leve (LWR).

Buck et al. (2010) apresentaram os resultados do experimento LIVE, no qual sua geometria foi representada por uma cavidade hemisférica com condições de contorno, parede do fundo isotérmica e a do topo adiabática, utilizando como fluido a água e uma solução de $KNO_3 - NaNO_3$. Os resultados obtidos por tal estudo são utilizados para o desenvolvimento e validação de modelos para a descrição do comportamento de uma piscina de material de núcleo derretido.

Muitos experimentos obtiveram dados a respeito da transferência de calor em fluidos com convecção natural gerada por fonte interna de calor. Mesmo que em condições reais a temperatura no corium alcance proporções de aproximadamente 3000°C , a maioria dos experimentos utilizaram água, ar ou mesmo gases a base de clorofluorcarbonos (como o freon 113). Eles são capazes de reproduzir o comportamento do fluido à elevado número de Ra_i , sem que a temperatura do material em questão torne-se superior à 400°C . Logo, tornando mais acessível a coleta de dados sem a danificação dos equipamentos responsáveis para tal finalidade.

Ao longo das últimas décadas, muitas correlações empíricas envolvendo números de Nu e Ra_i foram geradas, as quais até hoje são utilizadas em comparação com dados experimentais ou numéricos.

As tabelas 4.8 e 2.3 apresentam algumas das principais correlações geradas em sistemas com geração interna de calor e que, até atualmente, são utilizadas em análises de validação de resultados numéricos em cavidades semicirculares.

Tabela 2.2: Correlações de transferência de calor em camada de fluido

Referência	Correlação	Pr	Ra_i
Ralf e Roberts (1974)	$Nu_{up} = 0,381Ra_i^{0,25}$	6,0	$2,3 \times 10^5$ 6×10^9
Jahn e Reineke (1974)	$Nu_{up} = 0,345Ra_i^{0,233}$ $Nu_{dn} = 1,389Ra_i^{0,095}$	7,0	$6,4 \times 10^4$ $3,2 \times 10^4$
Kulacki e Nagle (1975)	$Nu_{up} = 0,254Ra_i^{0,25}$	6,21 - 6,64	$1,5 \times 10^5$ $2,5 \times 10^9$
Mayinger et al. (1976)	$Nu_{up} = 0,405Ra_i^{0,233}$ $Nu_{dn} = 1,484Ra_i^{0,095}$	7,0	4×10^4 5×10^4

Tabela 2.3: Correlações de transferência de calor em cavidade semicircular

Referência	Correlação	Pr	Ra_i
Bonnet (1999)	$Nu_{up} = 0,383Ra_i^{0,233}$ $Nu_{dn} = 10,116Ra_i^{0,25}(H/R)^{0,32}$	7,0	10^{13} 10^{17}
Garon e Goldstein (1973)	$Nu_{up} = 0,130Ra_i^{0,293}$	6,0	$1,3 \times 10^7$ $3,3 \times 10^9$
Mayinger et al. (1976)	$Nu_{up} = 0,36Ra_i^{0,23}$ $Nu_{dn} = 0,54Ra_i^{0,18}(H/R)^{0,26}$	7,0	10^7 5×10^{10}
Jahn e Reineke (1974)	$Nu_{dn} = 0,54Ra_i^{0,18}$	7,0	10^7 5×10^{10}
Goldstein e Tokuda (1980)	$Nu_{up} = 0,0556Ra_i^{0,333}$	6,5	10^8 $2,26 \times 10^{11}$

2.4 Conclusão

Pode-se concluir a partir da descrição de alguns trabalhos, que devido às dificuldades de realização de estudos experimentais de fluidos sob condições de acidente severo, existe uma quantidade maior de trabalhos numéricos investigando a convecção natural em diversas geometrias com aquecimento diferenciado e alguns com geração interna de calor, tanto em regimes laminares quanto em turbulentos. Em relação aos trabalhos numéricos, observou-se que os modelos RANS têm sido bastante utilizados para análises de convecção natural turbulenta, destacando-se a aplicação do modelo de baixo número de Reynolds $k-\epsilon$ e SST.

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo, serão apresentados o problema físico e a metodologia utilizada para obtenção dos resultados, os quais serão discutidos no capítulo seguinte. Inicialmente, será discutido o problema físico que constitui de uma análise no plenum inferior do vaso de pressão do reator, em 3 casos. No primeiro caso, é estudado metade de um semicírculo. No segundo, um semicírculo, ambos não conjugados. E no terceiro, um semicírculo, este sendo conjugado. Em seguida serão apresentadas as equações que governam o estudo na sua forma dimensional e adimensional, após mostrar o modelo de volumes finitos (MVF). Este sendo primordial para fluidodinâmica computacional, no qual desenvolve a solução das equações de Navier Stokes para escoamentos complexos, utilizando métodos numéricos para resolução das equações de conservação, tornando um sistema de equações diferenciais parciais em um sistema algébrico, para assim, obter a solução do problema iterativamente. Posteriormente, são mostradas as características computacionais admitidas, mais especificamente, o software utilizado e a metodologia de criação das geometrias e malhas.

3.1 Problema Físico

O problema físico estudado consiste no plenum inferior do vaso de pressão do reator nuclear em condições de acidente severo, onde, a convecção natural será o mecanismo dominante de transferência de calor no interior do plenum inferior do vaso do reator, nesta condição.

A avaliação da carga térmica no plenum inferior do vaso do reator durante o acidente severo requer compreensão e cálculo da transferência de calor por convecção natural de um fluido gerador de calor em cavidades semicirculares.

Portanto o estudo foi realizado em 3 configurações bidimensionais, que são mostradas nas seguintes seções 3.1.1 e 3.1.2.

3.1.1 Convecção natural na cavidade

As geometrias em consideração são metade de um semicírculo e um semicírculo, conforme fig 3.1, com diâmetro (D), sob a influência de um campo gravitacional (g), contendo um fluido geração volumétrica de calor (q_v), com a condição de contorno de temperatura constante imposta na superfície interna da cavidade. O efeito de transferência de calor conjugada com a condução de calor na parede do vaso não será considerado.

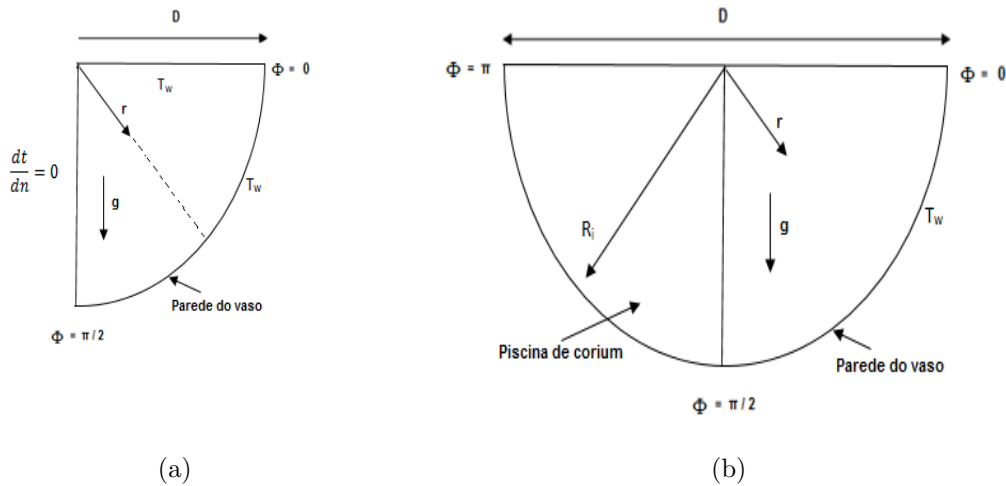


Figura 3.1: Representação 2D das cavidades estudadas (a) Metade de um semicírculo, (b) semicírculo, sem a transferência de calor conjugada com a parede do vaso.

Os principais parâmetros adimensionais que estão relacionados nas análises são número de Rayleigh interno (Ra_i), diretamente relacionado com a geração volumétrica de calor, e o número de Prandtl relacionado com as propriedades do fluido. Tais parâmetros foram explicados na seção 1.3.

3.1.2 Convecção natural na cavidade com condução na parede

A geometria em consideração é uma cavidade semicircular bidimensional, conforme fig 3.2, com diâmetro (D) e parede (b) no qual envolve o plenum inferior do vaso de pressão. Ela é considerada como tendo propriedades condutivas finitas e é mantida a uma temperatura constante (T_w) na sua superfície externa, sob a influência de um campo gravitacional (g) contendo um fluido com geração volumétrica de calor (q_v).

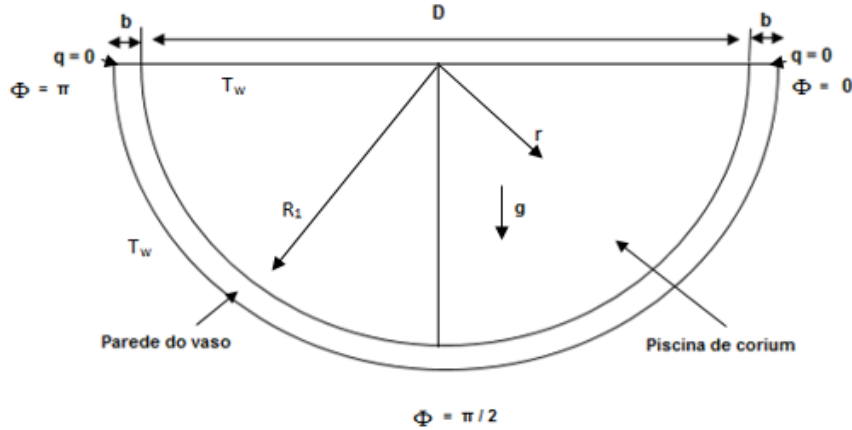


Figura 3.2: Representação 2D da cavidade semicircular com a parede de espessura (b).

Neste caso, o problema completo de convecção natural com condução de calor na parede sólida é governado por quatro parâmetros adimensionais. Estes são os números de Rayleigh, Prandtl, a espessura de parede inferior adimensional (b/D) e a relação de condutividade do sólido com o fluido (K). Para o presente trabalho, b/D varia entre 0,05 a 0,2, o intervalo do número de Rayleigh é de 10^6 a 10^{12} , o número de Prandtl é 7,0 e a condutividade K varia em 1; 5; 12, 49 e 27, 16.

Ambos estudos, convecção natural sem e com efeitos conjugados com a parede sólida, foram realizados assumindo o fluido como incompressível, onde todas as propriedades do fluido utilizados foram obtidas na plataforma NIST chemistry WebBook, com uso do modelo de aproximação Boussinesq, explicado na próxima subseção.

3.1.3 Aproximação de Boussinesq

A aproximação de Boussinesq considera a densidade como um valor constante em todas as equações, exceto pelo termo de empuxo na equação movimento demonstrada na seção 3.2.

$$\rho - \rho_0 = \rho_0(1 - \beta(T - T_0)), \quad (3.1)$$

onde, β é o coeficiente de expansividade térmica.

Essa aproximação é precisa desde que as mudanças na densidade real sejam pequenas, especificamente, a aproximação de Boussinesq é válida quando:

$$\beta(T - T_0) \ll 1.$$

3.2 Formulação matemática

A mecânica dos fluidos estuda o comportamento do fluido e os fenômenos que ocorrem nos escoamentos. As equações que governam o movimento de um fluido no problema físico de convecção natural são as de conservação de Navier-Stokes. Estas podendo ser resolvidas dependendo da condição do fluido, do escoamento, considerando ou não o tratamento de empuxo das equações de movimento. E também aplicando o modelo de Boussinesq, o qual considera que a massa específica do fluido é constante em todos os termos das equações de transporte em que está envolvida, exceto no termo de empuxo.

No entanto, neste trabalho as equações foram resolvidas na forma bidimensional, para fluido incompressível com escoamento laminar, em estado estacionário, usando a aproximação de Boussinesq e considerando geração volumétrica uniforme de calor, para ambos casos, conjugado e não conjugado.

3.2.1 Equações governantes para os casos não conjugado

As equações de conservação de massa, movimento e energia podem ser escritas, respectivamente, na seguinte forma (Todreas e Kazimi, 1990):

Equação de conservação de massa (continuidade):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v}{\partial \phi} \right) = 0. \quad (3.2)$$

Equação de movimento (momentum):

$$\rho \left[u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \phi} - \frac{v^2}{r} \right] = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \phi^2} - \frac{u}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \phi} \right] + \rho f_r, \quad (3.3)$$

$$\rho \left[u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \phi} - \frac{uv}{r} \right] = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \phi} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \phi^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \phi} - \frac{v}{r^2} \right] + \rho f_\phi. \quad (3.4)$$

Equação de energia (para domínio no fluido):

$$\rho_f c_{pf} \left(u \frac{\partial T_f}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial T_f}{\partial \phi} \right) = k_f \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_f}{\partial \phi^2} \right) + q_v + \Phi, \quad (3.5)$$

onde,

$$\Phi = \mu_f \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_\Theta}{\partial \phi} + \frac{u_r}{r} \right)^2 \right\} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \phi} + \frac{\partial u_\Theta}{\partial r} - \frac{u_\Theta}{r} \right)^2 \right].$$

onde, u e v são as componentes de velocidade em r , ϕ componente de direção, ρ a massa específica, p pressão, f o termo da aproximação de boussinesq, k condutividade térmica, c_p a capacidade calorica, T temperatura e q_v a geração volumétrica de calor.

O estudo da convecção natural, não conjugado, que ocorre no plenum inferior de um reator em condição de acidente severo é realizado com base nas Eqs. 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 em suas formas adimensionalizadas de acordo com as equações a seguir:

Equação de conservação de massa (continuidade):

$$\frac{\partial U}{\partial R} + \frac{U}{R} + \frac{1}{R} \frac{\partial V}{\partial \phi} = 0. \quad (3.6)$$

Equação de movimento (momentum):

$$U \frac{\partial U}{\partial R} + \frac{V}{R} \frac{\partial U}{\partial \phi} - \frac{V^2}{R} = -\frac{\partial P}{\partial R} + \frac{Pr}{(RaPr)^{2/5}} \left(\nabla^2 U - \frac{U}{R} - \frac{2}{R^2} \frac{\partial V}{\partial \phi} \right) - \Theta_f \sin \phi, \quad (3.7)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial R} + \frac{V}{R} \frac{\partial V}{\partial \phi} - \frac{UV}{R} = -\frac{1}{R} \frac{\partial P}{\partial \phi} + \frac{Pr}{(RaPr)^{2/5}} \left(\nabla^2 V - \frac{V}{R^2} - \frac{2}{R^2} \frac{\partial U}{\partial \phi} \right) - \Theta_f \cos \phi. \quad (3.8)$$

Equação de energia (para domínio no fluido):

$$U \frac{\partial \theta_f}{\partial R} + \frac{V}{R} \frac{\partial \theta_f}{\partial \phi} = \frac{1}{(RaPr)^{2/5}} (\nabla^2 \theta_f) + (RaPr)^{-1/5}. \quad (3.9)$$

As Eqs.(3.6 a 3.9) estão sujeitas às condições de contorno abaixo :

$$U = V = 0, \text{ em } R = 1/2 \text{ para } 0 \leq \phi \leq \pi,$$

$$U = V = \theta_f = 0 \text{ em } \phi = 0, \text{ e } \pi \text{ para } R = 0 \text{ para } 1/2,$$

na qual as variáveis adimensionais são definidas como:

$$R = \frac{r}{D}, \quad U, V = \frac{u, v}{\frac{\alpha_f}{D} (RaPr)^{2/5}}, \quad Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f},$$

$$\theta = \frac{T - T_w}{\Delta T}, \quad P = \frac{pD^2}{\rho \alpha_f^2 (RaPr)^{4/5}}, \quad Ra_i = \frac{g \beta q_v D^5}{\nu_f \alpha_f k_f},$$

onde, ν_f é a viscosidade cinemática e α_f difusividade térmica e o ΔT a temperatura de referência, sendo definida pela equação abaixo:

$$\Delta T = \frac{q''' D^2}{k_f (RaPr)^{1/5}}.$$

3.2.2 Equações governantes para os casos conjugado

Nesta seção serão expostas as formulações na forma dimensional e adimensional da equação de energia no caso de convecção natural com geração volumétrica uniforme de calor, em escoamento laminar, bidimensional e incompressível.

Equação de energia (para domínio no sólido, na sua forma dimensional):

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_s}{\partial \phi^2} = 0. \quad (3.10)$$

Equação de energia (para domínio no sólido, na sua forma adimensional):

$$\frac{1}{(RaPr)^{2/5}} (\nabla^2 \theta_s) = 0, \quad (3.11)$$

onde,

$$\nabla^2 \theta_s = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \theta_s}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial \phi^2}.$$

As Eqs.(3.6 a 3.19 e 3.11) estão sujeitas às seguintes condições de contorno:

$$U = V = 0, \text{ em } R = 1/2 \text{ para } 0 \leq \phi \leq \pi,$$

$$U = V = \theta_f = 0, \text{ em } \phi = 0, \text{ e } \pi \text{ para } R = 0 \text{ para } 1/2,$$

$$\theta_s = 0 \text{ para } R = 1/2 + (b/D),$$

$$\theta_f = \theta_s, \frac{\partial \theta_f}{\partial R} = K \frac{\partial \theta_s}{\partial R} \text{ em } R = 1/2,$$

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \phi} = 0 \text{ em } R = 1/2 \text{ para } 1/2 + (b/D) \text{ para } \phi = 0, \text{ e } \pi.$$

$$\text{onde, } K = \frac{k_s}{k_f}.$$

A solução numérica das equações que regem a convecção natural pode ser obtida por métodos diferentes, seja por elementos finitos, por diferença finita ou por volumes finitos, este último sendo melhor explicitado na seguinte seção 3.3.1 .

3.3 Metodologia computacional

Como dito anteriormente, a metodologia aplicada foi a fluidodinâmica computacional, a qual é uma ferramenta que surgiu nas últimas décadas como uma alternativa confiável para a simulação de sistemas e processos em que utiliza códigos em softwares e solvers para tal fim.

Os códigos presentes nos softwares de CFD são estruturados de maneira que o algoritmo é apto para resolver desde os problemas mais simples até os mais complexos tornando possível, inclusive, a simulação de condições reais e a obtenção de resultados, onde haja a impossibilidade ou inviabilidade de que o processo ocorra na prática.

No contexto da fluidodinâmica computacional, o método utilizado no software ANSYS-fluent é o método de volumes finitos, explicado na seção seguinte.

3.3.1 Método dos volumes finitos

A fluidodinâmica computacional, é uma ferramenta utilizada para simular o comportamento do escoamento, a transferência de calor e outros processos físicos em um sistema determinado. O software comercial, ANSYS-Fluent, utiliza o método de volumes finitos (MVF) para realizar balanços de conservação de massa, quantidade de movimento e energia nos volumes elementares. Obtendo, portanto, as equações diferenciais para solução do problema (Versteeg e Malalasekera, 2005).

No MVF a região de interesse é dividida em pequenas sub-regiões chamadas volumes de controle, para realizar um balanço de variáveis, conforme a equação abaixo e a figura 3.3.

$$\rho u \Delta y_e - \rho u \Delta y_w + \rho v \Delta x_n - \rho v \Delta x_s = 0, \quad (3.12)$$

onde, as letras e, w, n e s representam, as laterias leste, oeste, norte e sul do volume, respectivamente.

As equações são discretizadas e resolvidas iterativamente para cada volume de controle. Como resultado, uma aproximação do valor de cada variável pode ser obtida para cada ponto específico do domínio. Desta forma, pode-se observar o comportamento do escoamento em cada ponto da região de interesse.

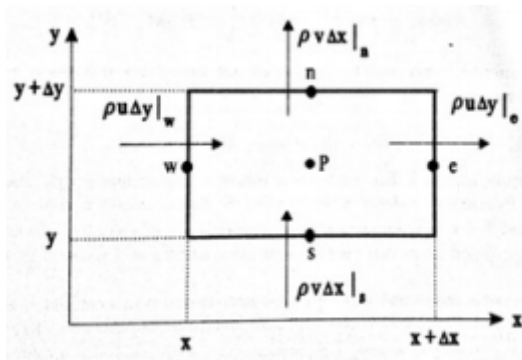


Figura 3.3: Representação de um volume de controle do MVF (Versteeg e Malalasekera, 2005)

Devido à sua eficiência em resolver problemas relacionados à mecânica dos fluidos em sistemas com mais de uma fase ou até mesmo que envolvam reações, é muito utilizado por quem busca resolver problemas relacionados à mecânica dos fluidos e sólidos.

3.3.2 CFD

De acordo com Versteeg e Malalasekera (1995), os códigos que fazem parte do CFD são estruturados em torno de algoritmos numéricos que solucionam os problemas de fluidodinâmica. De forma a fornecer fácil acesso ao seu poder de solução numérica todos os pacotes comerciais de CFD incluem uma sofisticada interface para que o usuário possa introduzir os parâmetros do problema e analisar seus resultados. O software requer uma sequência definida de etapas a serem realizadas para resolução das equações governantes do problema. Nesta seção são apresentadas essas etapas na sequência determinada pelo método.

3.3.3 Criação Geometria/Malha

Uma malha deve possuir características diretamente ligadas ao problema para o qual foi gerada, incluindo se é ou não estruturada, refinada ou grossa, se deve conter refino nas paredes para tratamento da camada limite, além, de quais tipos de elementos comportam: triangulares ou quadrangulares, ambos bidimensionais, e tetraédricos ou hexaédricos, ambos tridimensionais.

Softwares utilizados para gerar malhas apresentam bons métodos para malhas estruturadas e não estruturadas, porém apenas a estratégia multi-bloco foi utilizada pelo software ANSYS-ICEM, criando um bloco inicial associado à geometria e particionando-o.

Em resumo, esta etapa envolve o processo de estabelecer a geometria da região de interesse, criação das regiões de escoamento e de condições de contorno e, por fim, determinar as propriedades da malha.

3.3.4 Definição do problema

Esta etapa tem por finalidade fornecer ao solver um conjunto de informações que descrevam o problema físico. Por exemplo, as propriedades do fluido que serão utilizadas e as condições de contorno, sendo nessa parte importante colocar todas informações sobre a simulação para que a mesma ocorra sem erros.

Em geral, no software utilizado, o ANSYS-FLUENT, a definição do problema a ser resolvido contém as seguintes etapas:

- Definição do regime de escoamento;
- Definição do modelo de turbulência;

- Definição dos parâmetros e domínios dos fluidos e/ou sólidos;
- Definição das condições iniciais e de contorno;
- Definição dos métodos e dos controles da solução;
- Definição dos parâmetros de convergência.

3.3.5 Processamento

O processamento feito pelo código ANSYS-FLUENT é realizado a partir das resoluções das equações diferenciais parciais que são integradas em todos os volumes de controle da região de interesse. Tais equações são convertidas em um sistema algébrico pela geração de aproximação de termos nas equações integrais, assim as equações algébricas são resolvidas iterativamente. Após a resolução dessas equações, o solver gera arquivos de resultados intermediários, podendo assim, ser utilizados no pós-processamento.

3.3.6 Pós-processamento

O pós-processamento é a etapa final da simulação CFD, no qual analisa, visualiza e apresenta os resultados por meios de técnicas qualitativas e quantitativas (geração de gráficos de variações), possibilitando, dessa forma, a observação do comportamento do fluido ao longo da simulação.

Nesta etapa, o software utilizado, CFD-POST, é usado para criar novos objetos (tais como localizadores, tabelas e gráficos), variáveis e expressões. Por meio de objetos localizadores é possível visualizar o perfil de distribuição de determinados parâmetros na região selecionada e, até mesmo, obter os perfis das variáveis geradas.

3.3.7 Verificação e validação

As simulações feitas pelos códigos comerciais do CFD, por exemplo, estão sujeitas à uma série de erros numéricos, de modelagem, dos usuários do software e incertezas de aplicações. Portanto, devem ser verificados e validados para que tenham utilidade prática. A verificação de solução está justamente relacionada à quantificação de erros numéricos, como erros de arredondamento, de iteração e de discretização. A validação é um procedimento importante para uma maior confiança na aplicação de determinado código computacional e resolução de um problema físico.

É por meio desta etapa que o usuário pode certificar-se quanto a capacidade do modelo em reproduzir a física real do problema. Porém, requer a existência de dados experimentais suficientes, o que em muitos casos, como por exemplo, dados de temperatura de um reator em situação de acidente severo não são fáceis de se obter em virtude da necessidade de equipamentos sofisticados e resistentes às condições impostas ao experimento.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo foram analisados 3 casos com diferentes geometrias e condições de contorno, demonstrados no capítulo 3. Na seção 4.1 foi estudado de forma mais detalhada o experimento BALI (Bonnet, 1999), cuja geometria é representada por metade de um semicírculo. Na seção 4.2 o estudo foi feito com uma geometria semicircular representando um vaso de pressão do reator em condições de acidente severo. Na seção 4.3 é utilizada a geometria de um semicírculo com a presença de parede, com propósito de estudar a influência da parede no estudo e fazer uma comparação com o caso do não conjugado (sem parede).

4.1 Simulações em geometria representativa do experimento BALI

Simulações em uma cavidade, cuja geometria é metade de um semicírculo com duas paredes isotérmicas e uma adiabática contendo água como fluido simulante e sob condição de $Ra_i = 10^{12}$. Elas foram realizadas no intuito de validar e verificar a malha do modelo a ser estudado. Embora a cavidade seja de simples geometria, a mesma é comumente utilizada para validar modelos de plenum inferior de vasos de pressão em condições de acidente severo. O experimento BALI foi selecionado em razão do mesmo fornecer dados locais de temperatura em condições de acidente severo.

As primeiras análises realizadas foram referentes à convergência de malha, as quais foram realizadas em regime laminar, para o caso de $Ra_i = 10^{12}$. A geometria bidimensional do experimento BALI (Bonnet, 1999), metade de um semicírculo, conforme Fig. 4.1, foi reproduzida com a razão de aspecto ($H = R$) 1 : 1.

Essas análises foram feitas com o intuito de obter os valores do fluxo de calor ao longo da parede inferior, para realizar o cálculo do número de Nusselt e assim realizar comparações para observar qual melhor malha poderá ser utilizada no estudo.

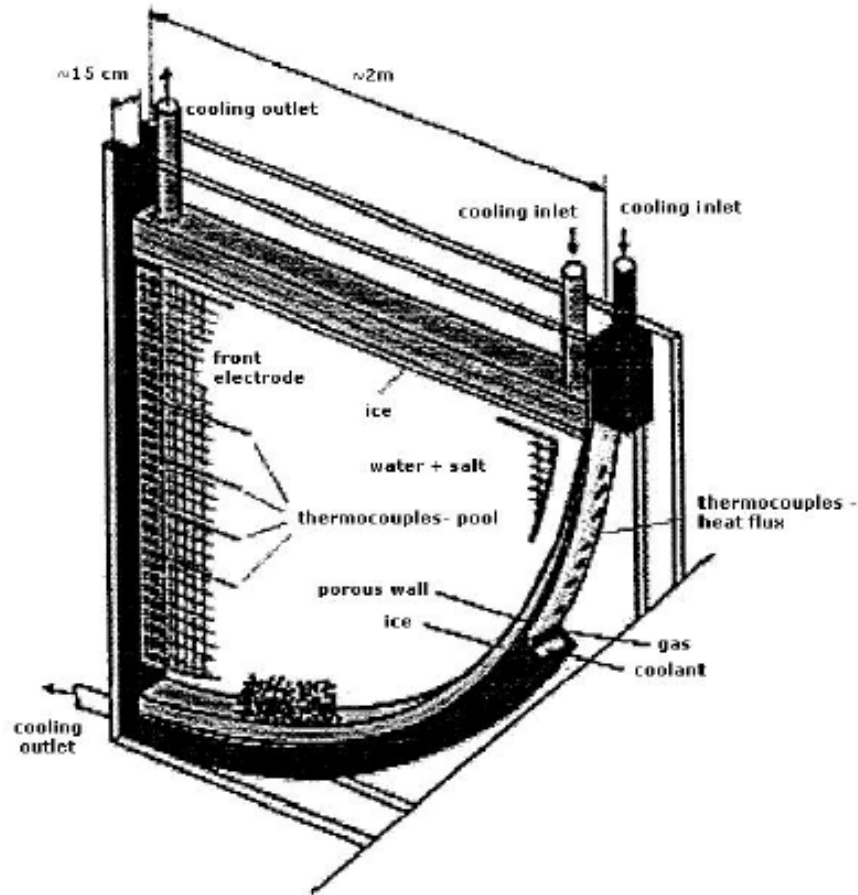


Figura 4.1: Geometria do experimento BALI (Bernaz et al.,2001)

Quatro malhas foram geradas pelo programa ANSYS ICEM 18.0 e importadas para o ANSYS Fluent 18.0, todas com refinamento nas regiões próxima à parede. A Tabela 4.1 mostra os dados estatísticos das malhas utilizadas no procedimento de sensibilidade, executado para $Pr = 7,0$ e $Ra_i = 10^{12}$, a fim de observar se as soluções numéricas obtidas em cada malha são similares, ou seja, se ocorre convergência.

Tabela 4.1: Sensibilidade de malha, em cavidade de metade de um semicírculo, contendo fluido com $Pr = 7,0$ e $Ra_i = 10^{12}$: dados das malhas.

	Números de elementos	Números de nós
Malha 1	273541	174907
Malha 2	372969	232429
Malha 3	437497	254631
Malha 4	570478	284059

A tabela 4.2 mostra os valores do número de Nusselt médio fornecidos por cada uma das malhas avaliadas, assim como a temperatura média.

Tabela 4.2: Sensibilidade de malha, em cavidade de metade de um semicírculo: valores globais do número de Nusselt e temperatura média

	Número de Nusselt	Temperatura média
Malha 1	26,2745	303,04
Malha 2	34,8406	326,12
Malha 3	36,0265	326,14
Malha 4	36,3527	326,47

A figura 4.2 mostra a distribuição local dos valores do número Nusselt ao longo da parede do plenum inferior fornecidos pelas quatro malhas. De acordo com a figura em destaque, observa-se que a solução tornou-se independente da malha a partir da malha 2, onde estiveram na faixa assintótica de convergência.

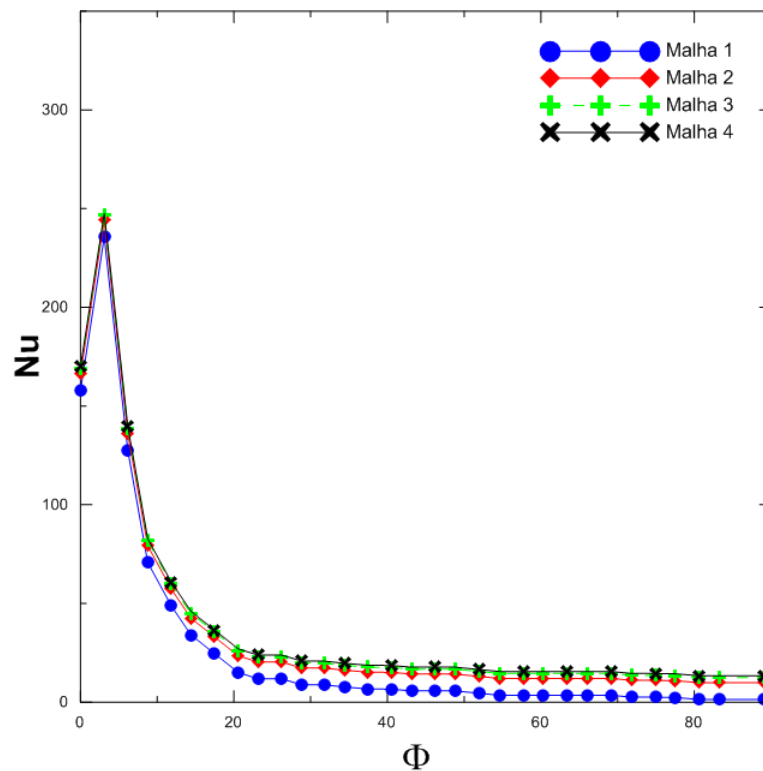


Figura 4.2: Análise gráfica da convergência de malha, em cavidade de metade de um semicírculo.

Os dados estatísticos das malhas analisadas, assim como os valores globais de Nu , os quais foram utilizados nos cálculos feitos nas análises de convergência de malha (apresentados nas equações 4,1 a 4,5). Levando em consideração isto, os valores do

número Nusselt fornecidos pelas malhas (1, 2 e 4), o cálculo da ordem de acurácia foi determinado conforme a equação 4.1,

$$p = \frac{\ln\left(\frac{Nu_4 - Nu_2}{Nu_2 - Nu_1}\right)}{\ln(r)}, \quad (4.1)$$

sendo r a razão de refinamento da malha, neste caso utilizado o valor 2.

Substituindo os valores médios do número Nusselt na equação 4.1, o valor de ordem de acurácia obtido foi de 2,5022. A partir deste valor encontrado, é possível obter uma estimativa (f_{ex}) do número de Nusselt quando o espaçamento dos elementos da malha tendem a zero, de acordo com a equação 4.2.

$$f_{ex} = Nu_1 + \frac{(Nu_1 - Nu_2)}{(r^p - 1)}. \quad (4.2)$$

O índice de convergência de malha (GCI) também foi analisado baseado na equação 4.3.

$$GCI_{12} = \frac{\left(1, 25 \frac{Nu_1 Nu_2}{Nu_1}\right)}{r^p - 1} 100\%. \quad (4.3)$$

A partir dos valores encontrados de GCI , foi possível checar se as soluções estiveram na faixa assintótica de convergência de malha, de acordo com a equação 4.4.

$$c_a = \frac{GCI_{12}}{(r^p - GCI_{24})}. \quad (4.4)$$

Obtendo o valor de c_a aproximadamente um, a solução tem um alto indicativo de estar presente na faixa assintótica de convergência.

Em seguida, são calculados os erros relativos aproximados, de acordo com a equação 4.5, e o erro relativo extrapolado. Os valores obtidos pelas malhas 1 e 2 foi de $E_1 = 0,3959$, enquanto as malhas 2 e 4 foi de $E_2 = 0,05270$. Ambos estiveram bem inferiores a um e tenderam a diminuir com o refinamento da malha.

$$E_1 = \frac{\varepsilon}{r^p - 1}. \quad (4.5)$$

A tabela 4.3 demonstra todos critérios analisados de acordo com os métodos descritas anteriormente, exibindo que as soluções foram independentes da malha, a partir da malha 2 e apresentaram boa acurácia, visto que o valor de c_a apresentou

um valor aproximadamente 1 (um) e forneceram baixos valores de erros (E_1 e E_2), os quais representam uma boa acurácia. A Malha 3 foi a selecionada para as demais simulações, como forma de reduzir o esforço computacional.

Tabela 4.3: Critérios avaliados na convergência de malha, em geometria de metade de um semicírculo.

f_{ex}	c_a	E_1	E_2
36,6778	0,9314	0,3959	0,05270

Após feita a escolha da malha 3 pra realizar as simulações, pode-se obter o número de Nusselt ao longo da parede do fundo da cavidade, obtendo a Fig.4.3.

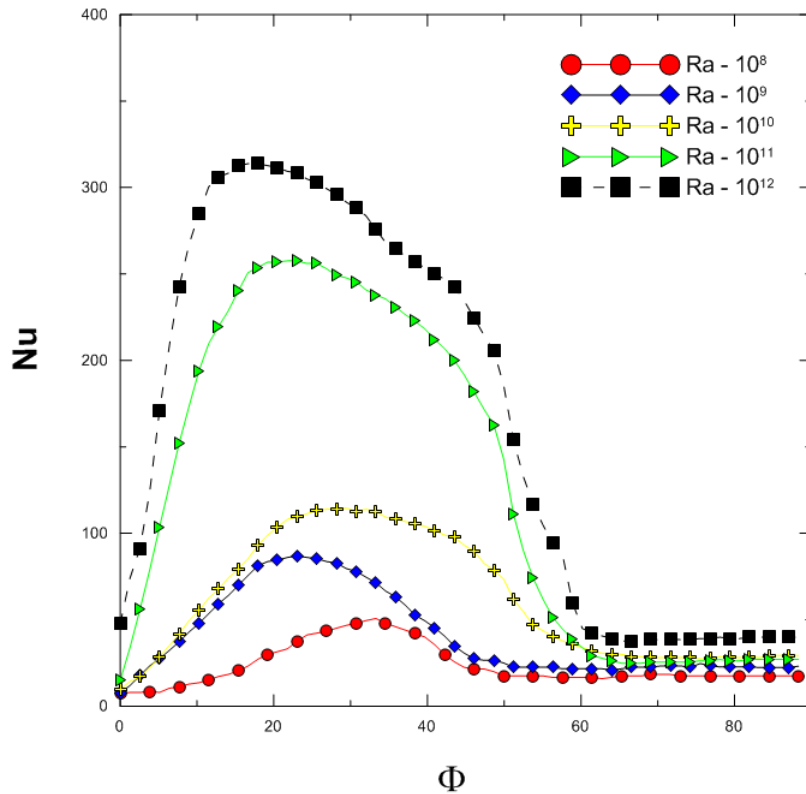


Figura 4.3: Distribuição do Nu ao longo da parede do fundo da cavidade, em geometria de metade de um semicírculo, na faixa de $Ra_i = 10^8$ a 10^{12} .

As condições de contorno impostas foram paredes isotérmicas ($T = 273K$), representando a camada de óxido formada ao redor do corium em contato com as paredes do vaso de pressão e as simulações laminares ocorreram na faixa de $Ra_i = 10^8$ a 10^{12} em estado estacionário.

Os campos de distribuição de temperatura e velocidade obtidos pelas simulações numéricas atuais são mostrados para $Pr = 7,0$ na faixa de $Ra_i = 10^7$ a 10^{12} ,

com geometria do experimento BALI (Bonnet,1999), cujas informações estão mais detalhadas na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Estatísticas das simulações, em cavidade de metade de um semicírculo.

Análise do tempo	Estacionário
Passo de tempo	-
Modelo	Laminar
Discretização do termo aditivo	Alta resolução
Discretização do termo transiente	-
Critério de Convergência	Resíduos máximos menores ou iguais a 10^6

As Figuras 4,5; 4,6; 4,7; 4,8; 4,9 mostram os campos de temperatura e velocidade fornecidos por simulações para faixa de $Ra_i = 10^7$ a 10^{12} , onde todos as simulações conseguiram fornecer camadas estratificadas de temperatura, com valores maiores no centro da cavidade.

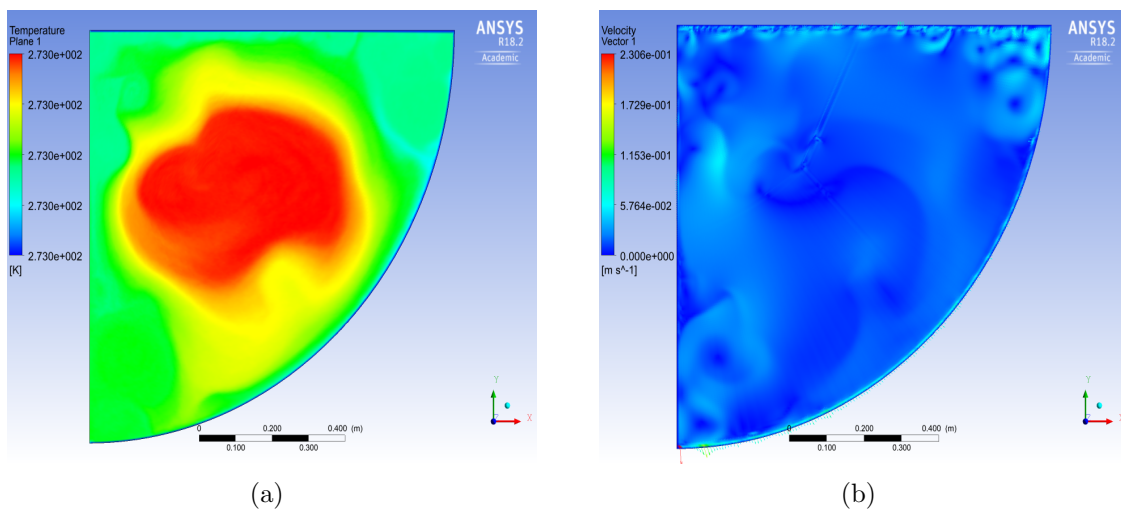
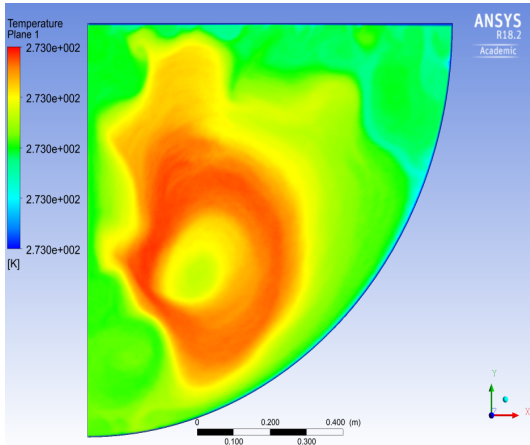
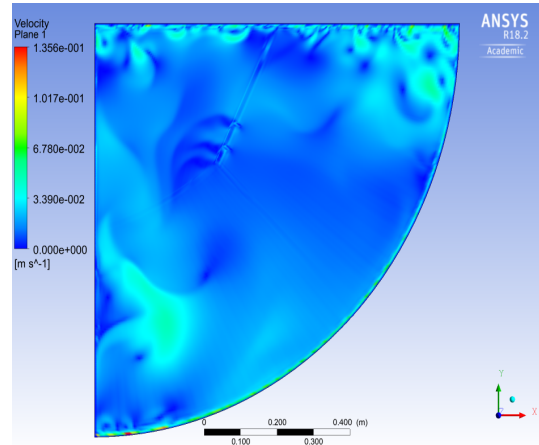


Figura 4.4: Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade de metade de um semicírculo, para $Ra_i = (10^7)$ e $Pr = 7, 0$.

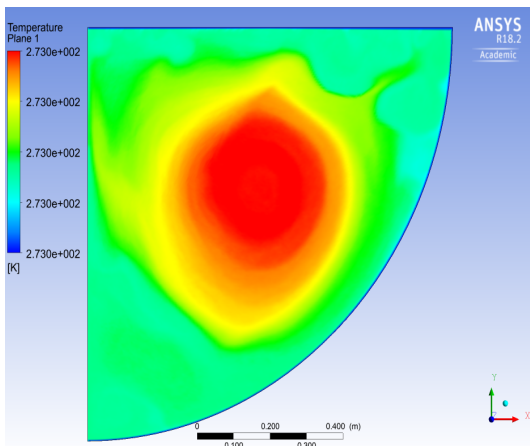


(a)

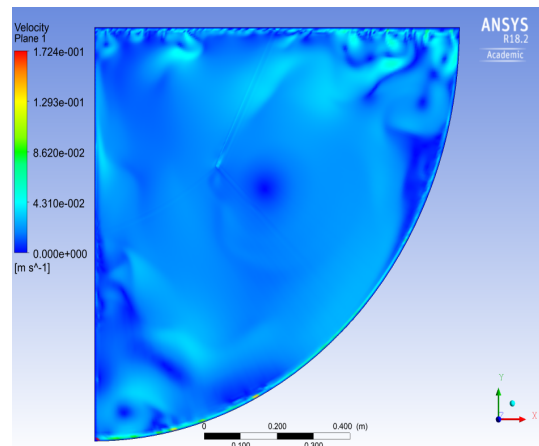


(b)

Figura 4.5: Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade de metade de um semicírculo, para $Ra_i = (10^8)$ e $Pr = 7, 0$.

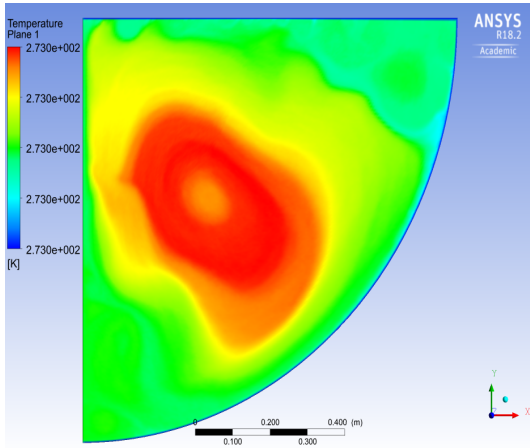


(a)

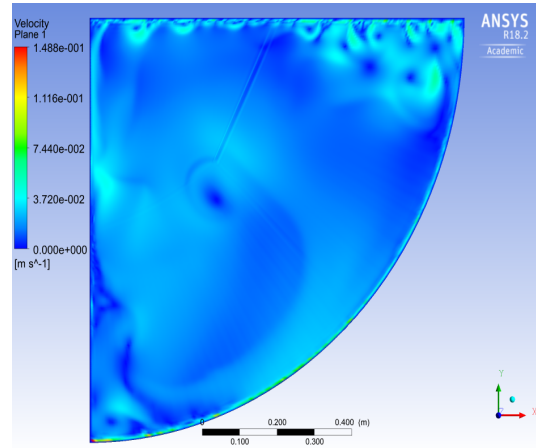


(b)

Figura 4.6: Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade de metade de um semicírculo, para $Ra_i = (10^9)$ e $Pr = 7, 0$.

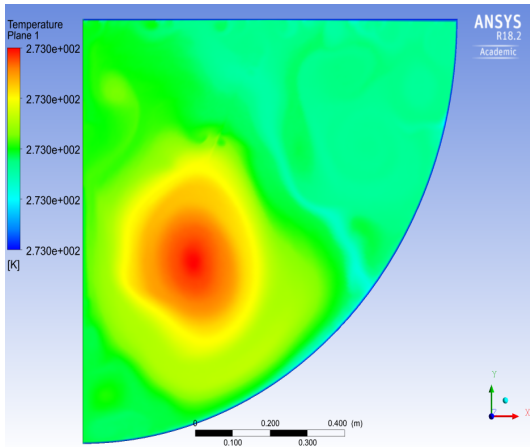


(a)

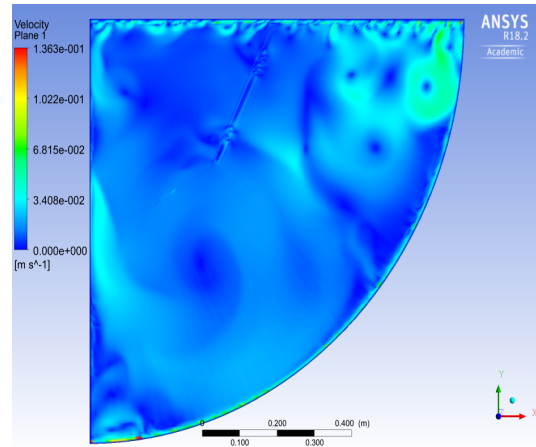


(b)

Figura 4.7: Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade de metade de um semicírculo, para $Ra_i = (10^{10})$ e $Pr = 7,0$.



(a)



(b)

Figura 4.8: Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade de metade de um semicírculo, para $Ra_i = (10^{11})$ e $Pr = 7,0$.

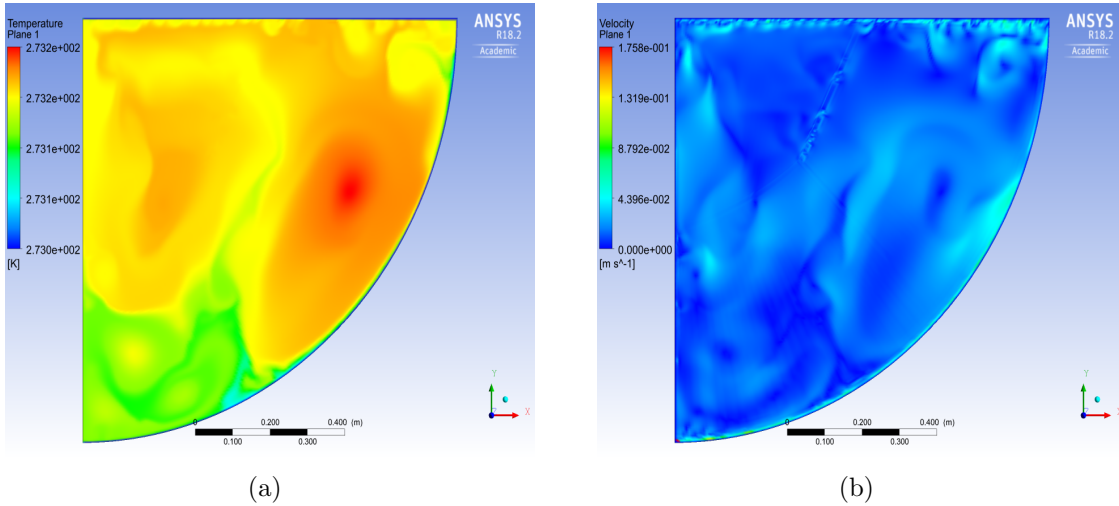


Figura 4.9: Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade de metade de um semicírculo, para $Ra_i = (10^{12})$ e $Pr = 7,0$.

Os dados atingidos mostram uma boa concordância com os dados de referências. Os campos de temperatura gerados nas simulações, destacados nas figuras acima com $Ra_i = 10^7$ a 10^{12} mostram que ao aumentar a fonte volumétrica de calor, as camadas de acúmulo ficaram mais notórias, ou seja, com uma camada de fluido mais quente ao centro da cavidade e algumas mais frias próximas à parede.

Enquanto, os campos instantâneos de velocidade mostrados pela figuras acima apresentam diferentes tamanhos de vórtices e uma faixa estreita de escoamento ao longo da parede do fundo, região que necessitou de maior atenção durante a geração de malha. Com a finalidade de evitar divergência da solução provocados por altos gradientes nessa localização.

4.2 Simulações em cavidade semicircular não conjugada

Assim como no estudo da Vieira (2010), uma análise da independência de malha foi gerada antes da aquisição dos resultados. Os dados estatísticos das malhas analisadas são mostrados pela tabela 4.5.

As simulações foram realizadas bidimensionalmente no software ANSYS-Fluent, em escoamento laminar por método SIMPLE em estado estacionário, com $Pr = 7,0$ e $Ra = 10^{11}$, com o objetivo de verificar e validar o modelo utilizando a geometria e condições de contorno desenvolvidas pela Vieira (2010). Os resultados obtidos foram comparados com as respostas apresentadas pela mesma.

Tabela 4.5: Dados das malhas utilizadas para convergência, em cavidade semicircular não conjugada.

	Números de nós	Números de elementos
Malha 1	14213	6438
Malha 2	49603	26988
Malha 3	118370	59018
Malha 4	209497	101342

Ao obter os valores do fluxo de calor ao longo da parede, é possível encontrar o número de Nusselt e a temperatura média (para cada malha). De acordo com a tabela 4.6 e a Figura 4.10, estas são observadas como soluções que estão na faixa assintótica de convergência.

Tabela 4.6: Número de Nusselt e temperatura média ao longo do fundo da cavidade semicircular não conjugada, para $Pr = 7,0$ e $Ra_i = 10^{10}$

	Número de Nusselt	Temperatura média
Malha 1	37,022	386,74
Malha 2	41,142	417,15
Malha 3	41,203	417,2
Malha 4	41,210	417,6

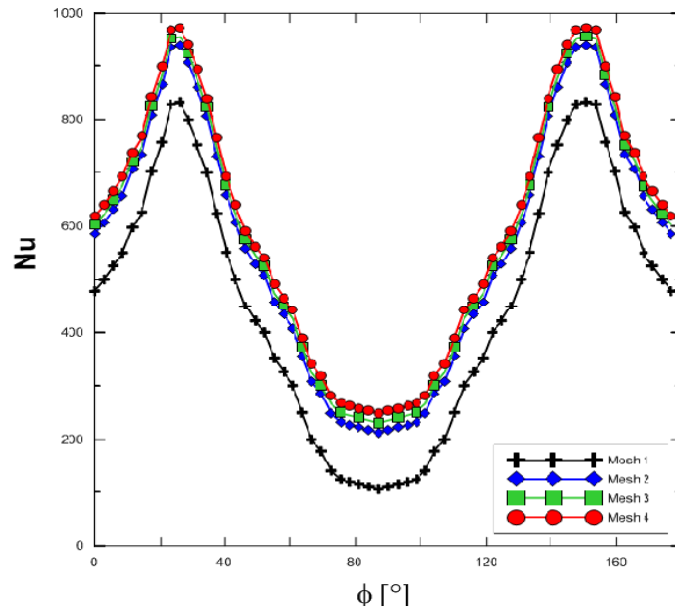
A partir disto, pode-se obter os valores de fluxo de calor ao longo do plenum inferior, mostrados na Fig. 4.10 (a), localizada abaixo, comparando-a com a Fig 4.10 (b), percebe-se que os números de Nusselt no plenum inferior, obtidos pela presente simulação estão em concordância, realizando o mesmo comportamento com a simulação proposta por Vieira (2010), a suavização da curva do trabalho a ser validado se dar ao numero de pontos utilizados.

Os critérios avaliados na convergência de malha, explicados na seção anterior (4.1), mostra que as soluções foram independentes da malha a partir da malha 2 e apresenta uma boa acurácia, como mostra a tabela abaixo.

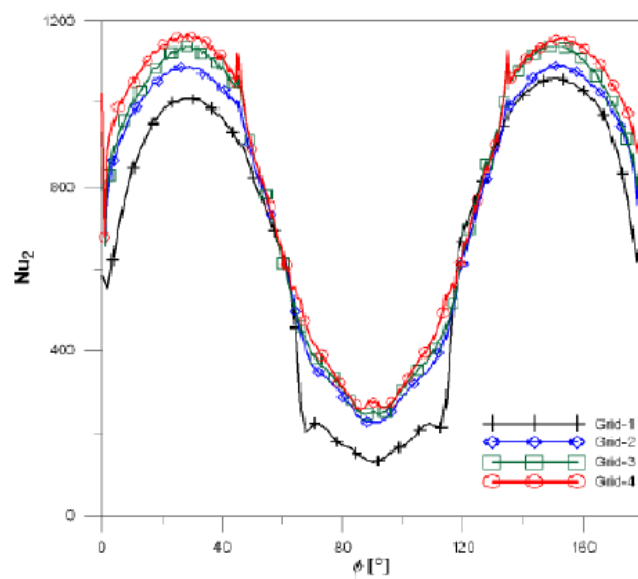
Tabela 4.7: Critérios avaliados na convergência de malha em cavidade semicircular não conjugada.

f_{ex}	c_a	E_1	E_2
38.44	0.9838	0.0818	0.0137

Logo abaixo, na Fig. 4.10, percebe-se que a malha 3 é a melhor a ser utilizada para os demais casos, visto que c_a mostrado na tab.4.7 apresentou um valor aproximadamente 1 (um) e forneceram baixos valores de erros fracionais (E_1 e E_2), demonstrando uma boa acurácia.



(a)



(b)

Figura 4.10: Distribuição local do número de Nusselt em torno do fundo da cavidade semicircular não conjugada para $Pr = 7,0$ e Rayleigh (10^{11}), (a) Presente trabalho (b) Vieira, 2010.

Um estudo do comportamento de fluidos com Pr iguais a 0,0321, 0,71 e 7,0 foi realizado aplicando-se na faixa de $Ra_i = 10^6$ a 10^{12} . Tais análises tiveram por objetivo avaliar a influência do número de Prandtl, ou seja, das propriedades do fluido na taxa de transferência de calor em uma cavidade de geometria semicircular.

Considere-se que a superfície semicircular inferior e a superfície plana superior são mantidas em condições de parede isotérmica, com uma temperatura constante T_0 igual a 293K.

A figura 4.11 mostra o comportamento do número de Nusselt (taxa de transferência de calor) em função do número de Rayleigh. Podendo ser observado que com o aumento do Prandtl ocorre um aumento nos valores do Nusselt.

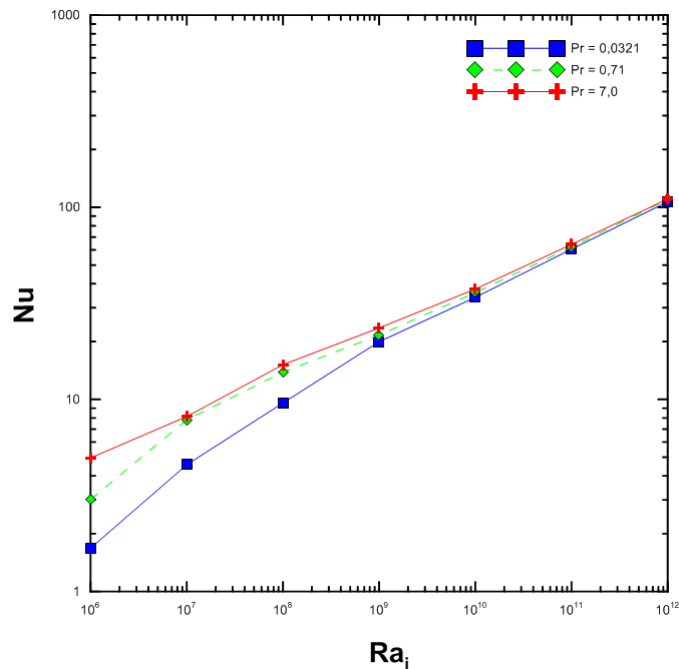


Figura 4.11: Número de Nusselt em função dos números de Rayleigh, em cavidade semicircular não conjugada.

Foram realizadas sete simulações para cada número de Prandtl analisados, variando o $Ra_i = 10^6$ a 10^{12} . Sendo possível perceber que com o aumento do número de Prandtl e Rayleigh o regime torna-se turbulento. Esse fato ocorre devido à maior resistência dos fluidos com maior viscosidade sofrer flutuações.

A tabela 4.8 mostra todos os casos investigados na cavidade com tal condição de contorno apresentada nessa seção.

Tabela 4.8: Casos analisados na cavidade semicircular não conjugada, com diferentes número de Pr .

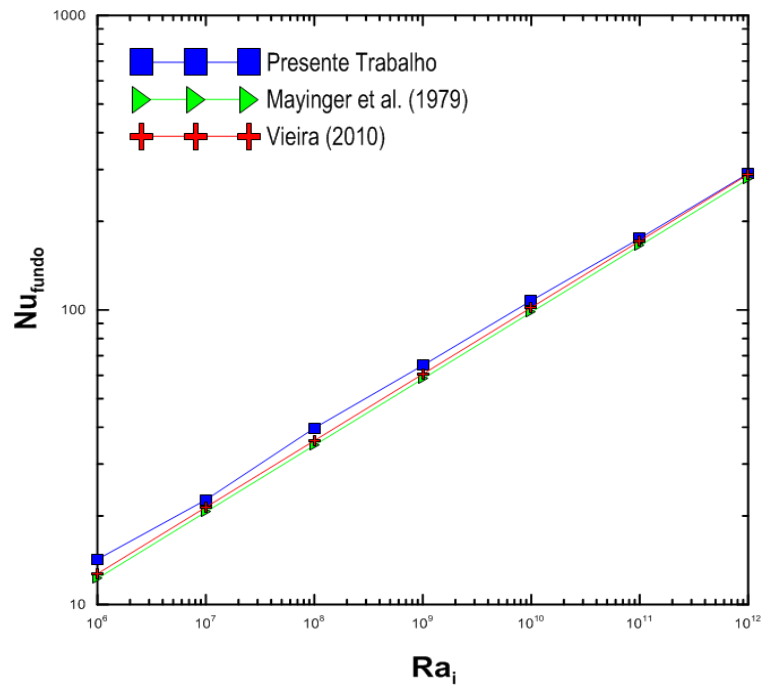
	Pr		
Ra_i	0,0321	0,71	7,0
10^6	Lam- Est	Lam- Est	Lam- Est
10^7	Lam- Est	Lam- Est	Lam- Est
10^8	Lam-trans	Lam- Est	Lam- Est
10^9	Lam-trans	Lam- Est	Lam- Est
10^{10}	Lam-trans	Lam- Est	Lam- Est
10^{11}	Lam-trans	Lam-trans	Lam- Est
10^{12}	Turb	Lam-trans	Lam- Est

Os números de Nusselt observados por valores numéricos através das correlações experimentais para paredes isotérmicas inferiores e superiores obtidos por Mayinger et al. (1976), equação 4.6, e inferiores por Kulachi e Emara (1975), equação 4.7, além do estudo da Vieira (2010), foram utilizados para comparar a presente análise. Essa comparação para os números médios de tempo de Nusselt das paredes superior e inferior é mostrada na Fig. 4.12.

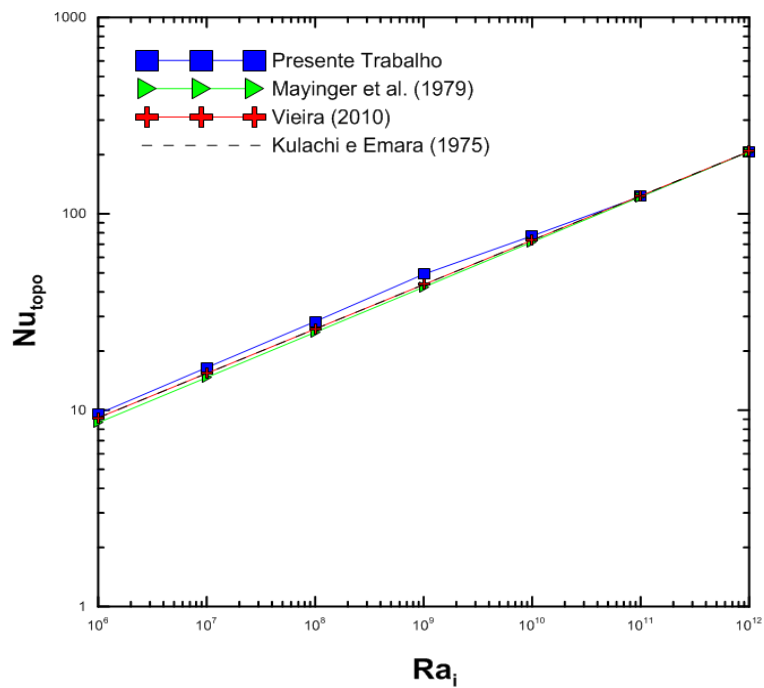
$$Nu_{fundo} = 0,54Ra^{0,226}, \quad Nu_{topo} = 0,36Ra^{0,23}. \quad (4.6)$$

$$Nu_{fundo} = 0,403Ra^{0,226}. \quad (4.7)$$

Como pode ser observado na Fig.4.12, os presentes resultados se comparam muito bem aos da bibliografia, ou seja, os valores de Nusselt na parede do fundo da cavidade foram bem próximos aos valores experimentais. Isso confirma a precisão da metodologia numérica adotada para a presente análise.



(a)



(b)

Figura 4.12: Número de Nusselt em função do número de Rayleigh interno (Ra_i) em cavidade semicircular não conjugada, para $Pr = 7,0$ (a) Número de Nusselt fundo, (b) Número de Nusselt topo.

Observa-se que os valores de Nusselt tanto no topo quanto no fundo foram bem próximos aos valores experimentais.

Os perfis de temperatura do caso obtidos pelas simulações, realizados por $Pr = 7,0$ e Rayleigh variando de 10^9 a 10^{12} , são mostrados nas figuras 4,13; 4,14; 4,15 e 4,16.

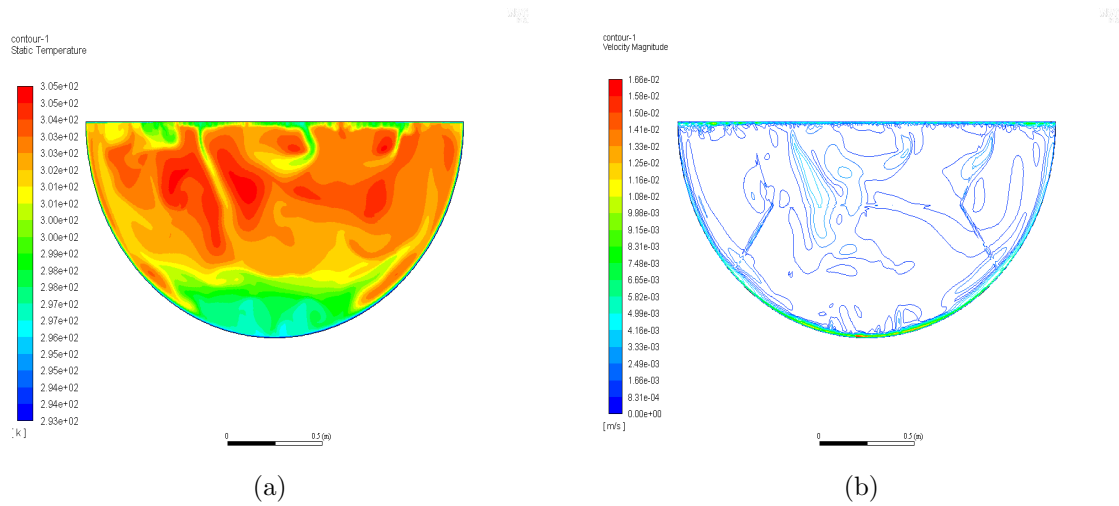


Figura 4.13: Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade semicircular não conjugada, para $Ra_i = (10^9)$ e $Pr = 7,0$.

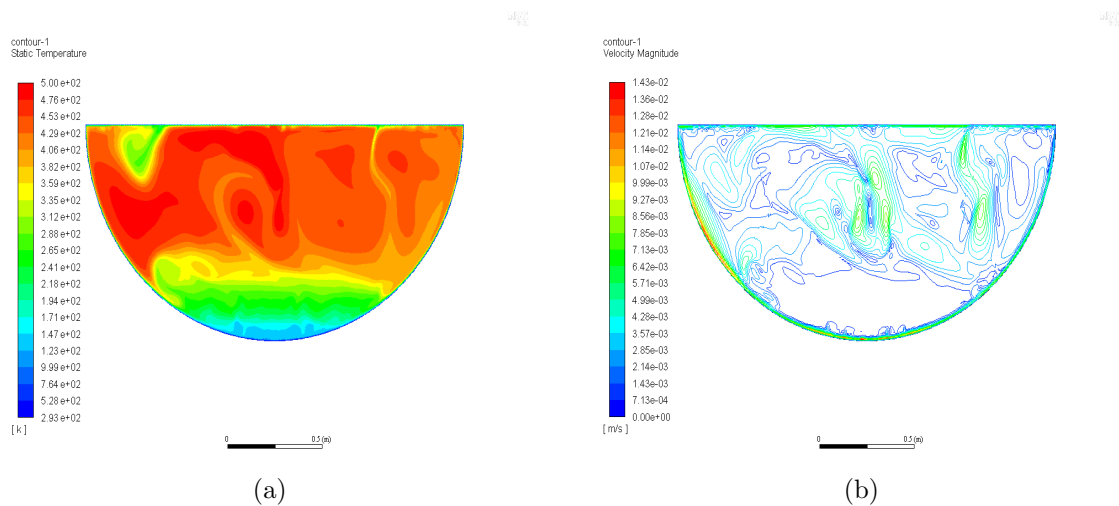


Figura 4.14: Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade semicircular não conjugada, para $Ra_i = (10^{10})$ e $Pr = 7,0$.

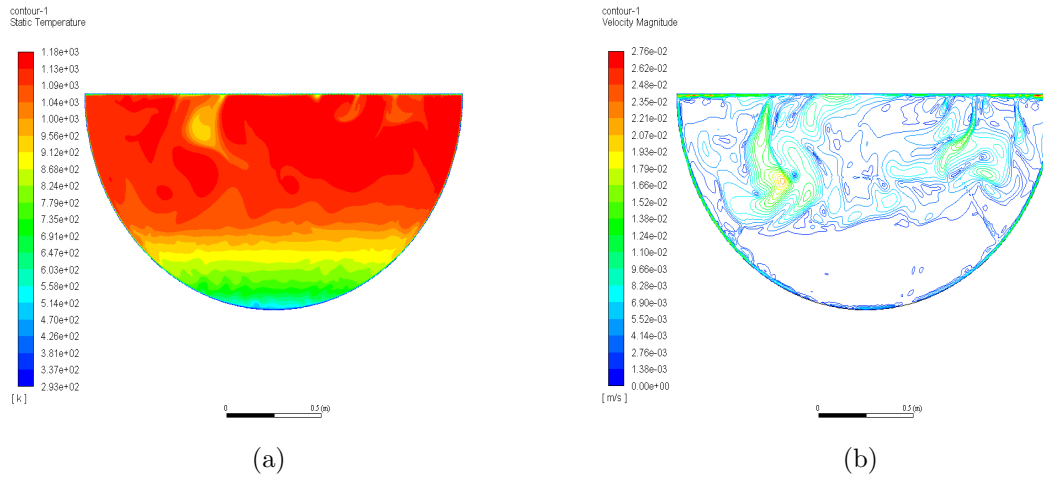


Figura 4.15: Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade semicircular não conjugada, para $Ra_i = (10^{11})$ e $Pr = 7,0$.

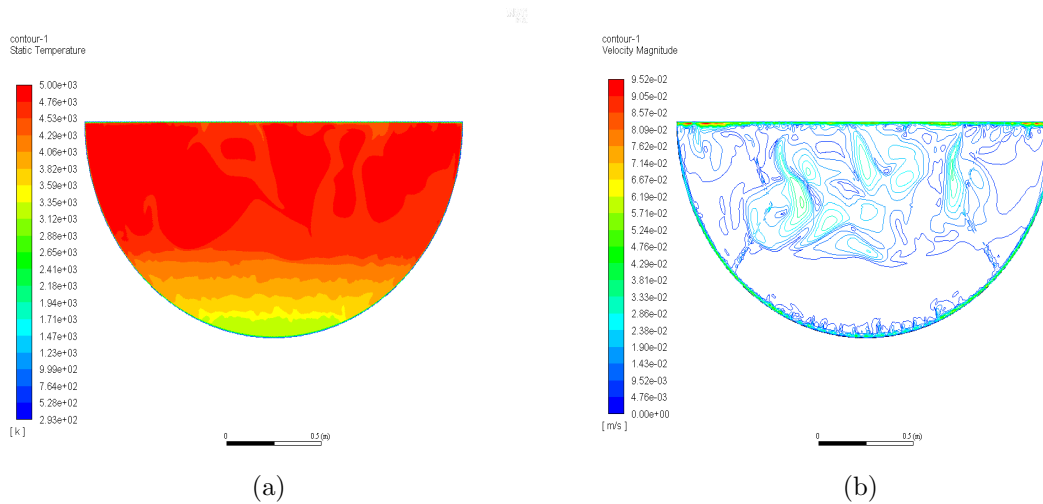


Figura 4.16: Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade semicircular não conjugada, para $Ra_i = (10^{12})$ e $Pr = 7,0$.

Observa-se a partir dos dados obtidos que existe uma estratificação constante na parte inferior do vaso para os menores Rayleigh que diminui com o aumento do número do Rayleigh. Concluindo que com o aumento do mesmo a distribuição de temperatura na cavidade se torna mais uniforme. Nourgaliev et al. (1997) explicaram que, quanto maior o número de Prandtl do fluido, maior é a resistência encontrada pelos escoamentos descendentes em quebrar as camadas de estratificação nas regiões periféricas devido à sua alta viscosidade.

4.3 Simulações em cavidade semicircular conjugada

Como nos casos anteriores, uma análise da independência de malha foi realizada antes da aquisição dos resultados. Os dados estatísticos das malhas analisadas são mostrados pelas tabelas 4.9 e 4.10.

Tabela 4.9: Dados das malhas utilizadas para convergência na parede, em geometria semicircular conjugada.

	Números de nós	Números de elementos
Malha 1	9781	4304
Malha 2	26584	14925
Malha 3	92936	31736
Malha 4	136375	63387

Tabela 4.10: Dados das malhas utilizadas para convergência na cavidade, em geometria semicircular conjugada.

	Números de nós	Números de elementos
Malha 1	19274	8481
Malha 2	52381	29410
Malha 3	183120	62531
Malha 4	268712	124897

As simulações foram realizadas bidimensionalmente no software ANSYS-Fluent, em escoamento laminar por método SIMPLE em estado estacionário, com $Pr = 7,0$ e $Ra_i = 10^{11}$.

Os critérios avaliados na convergência de malha, explicados na seção 4.1, mostra que as soluções foram independentes da malha a partir da malha 2 e apresenta uma boa acurácia, como mostra a tabela abaixo.

Tabela 4.11: Critérios avaliados na convergência de malha, em cavidade semicircular conjugada.

f_{ex}	c_a	E_1	E_2
37,12	0,9721	0,0941	0,0112

Com base nessa análise de sensibilidade da malha, decidiu-se usar a malha 3 em todas as simulações a seguir realizadas na cavidade, contendo um fluido $Pr = 7,0$ e $Ra_i = 10^6$ a 10^{12} .

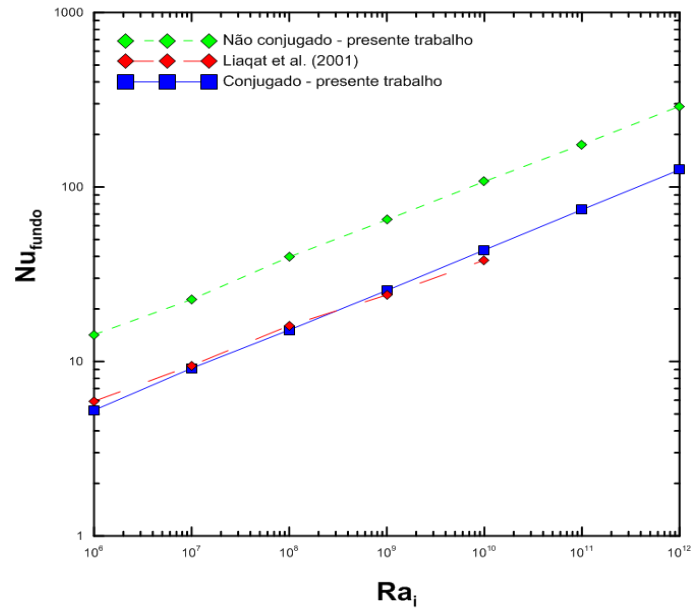
A análise conjugada em uma cavidade semicircular, preenchida com um fluido gerador de calor, foi realizada aplicando códigos CFD com base no MVF. Neste método, o fluxo dentro da cavidade e a condução através da parede são resolvidos simultaneamente. O estudo relacionado ao comportamento do corium está focando na modelagem da transição de fase líquida/sólida, se ocorrerá ou não a estratificação do corium, transferência de calor, propriedades dos materiais e propriedades físicas dependentes da temperatura dos materiais.

O problema conjugado é governado por quatro parâmetros adimensionais. Estes são: o número Rayleigh (Ra), a razão da espessura da parede inferior e o diâmetro (b/D), a relação de condutividade do sólido para fluido (K).

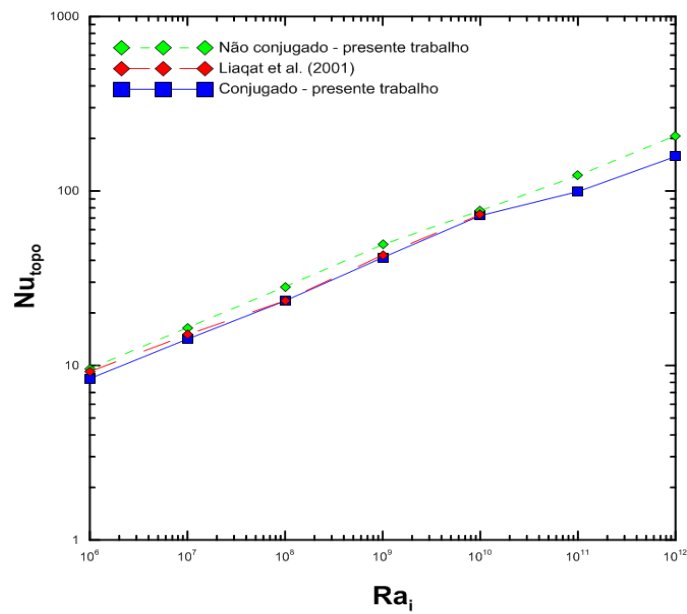
Para o presente trabalho as distribuições de temperatura dentro da parede sólida e do corpo do fluido foram obtidas para o número de Rayleigh na faixa de 10^6 a 10^{12} , cujo fluido no valor de $Pr = 7,0$, taxa de condutividade K variando em 1; 5; 12, 49 e 27, 16 e a razão da espessura da parede inferior. Além, do diâmetro (b/D) variar entre 0,05 a 0,2.

Primeiramente, será discutido a comparação do problema físico não conjugado, conjugado e o trabalho encontrado na literatura obtido por Liaqat e Baytas (2001). Esse experimento foi reproduzido devido ao fato do mesmo ter sido realizado em características de conjugado em uma cavidade semicircular, representativa do plenum inferior, com fonte volumétrica de calor. Essa comparação é apresentada na Fig. 4.17, onde mostra o número Nusselt em função do Rayleigh.

O número de Nusselt fundo é menor para os casos conjugados em relação ao não conjugado, enquanto o nusselt topo é quase o mesmo. O número de Nusselt para os casos conjugado e do Liaqat e Baytas (2001) mostrado nas fig. 4.17, ambas as figuras indicam uma excelente concordância em relação ao estudo realizado comparado com a literatura.



(a)



(b)

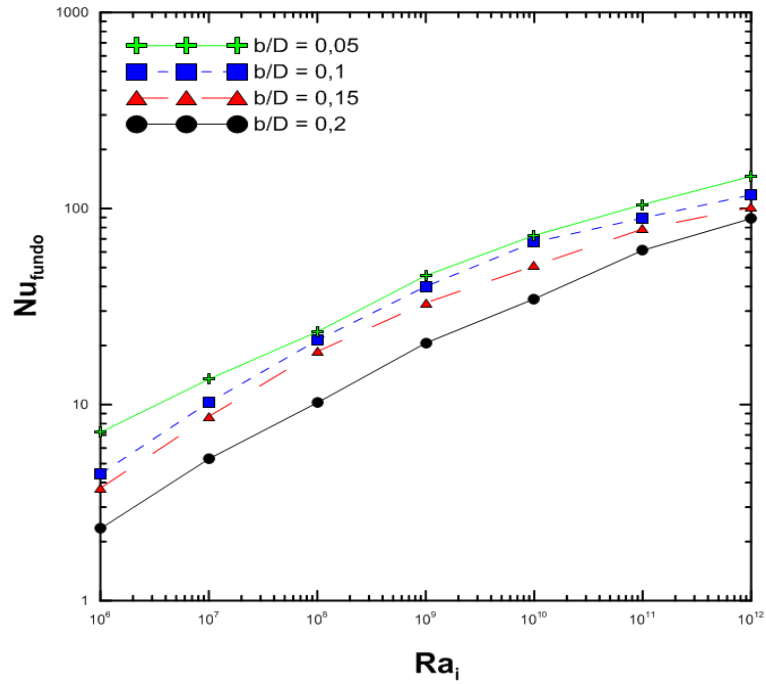
Figura 4.17: Número de Nusselt em função do número de Rayleigh interno (Ra_i), em cavidade semicircular conjugada, para $Pr = 7,0$ (a) Número de Nusselt fundo e (b) Número de Nusselt topo.

A distribuição dos números de Nusselt em função do Rayleigh, para determinada espessura adimensional (b/D) e razão da taxa de condutividade (K), são as variáveis que mais afetam os resultados na faixa paramétrica investigada.

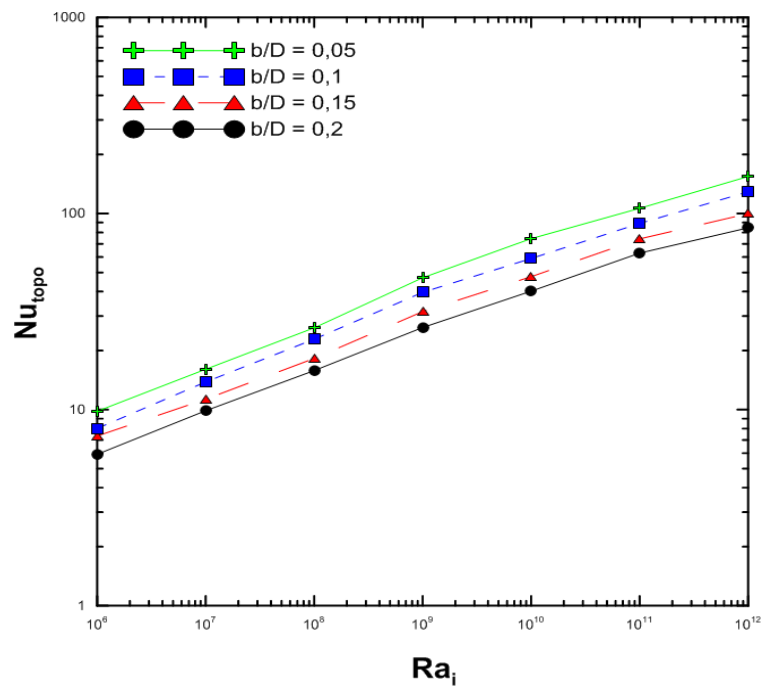
O comportamento do número de Nusselt médio em função do número de Rayleigh de todos casos simulados são mostrados graficamente nas fig. 4.18 até 4.21. Os gráficos foram separados para cada valor da razão da condutividade térmica (K), no qual são 1; 5; 12, 49 e 27, 16. A obtenção deste importante parâmetro de transferência de calor foi realizada através da integração numérica de Nu ao longo do fundo da cavidade semicircular.

Assim, percebe-se que com o aumento da espessura (b/D) existe uma diminuição do número de Nusselt ao longo do fundo da cavidade semicircular, indicando que quanto menor a espessura, maior a transferência de calor por convecção natural. Também observa-se um pequeno aumento de Nu com o aumento da razão de condutividade térmica (K), existe um pequeno aumento do Nu . Isso ocorre para todas as variações da razão da condutividade térmica (K).

Portanto, observa-se que os valores do número médio de Nusselt aumentam com o número Ra , enquanto o número médio Nusselt fundo é sempre menor ao seu valor quando comparado ao Nusselt topo.

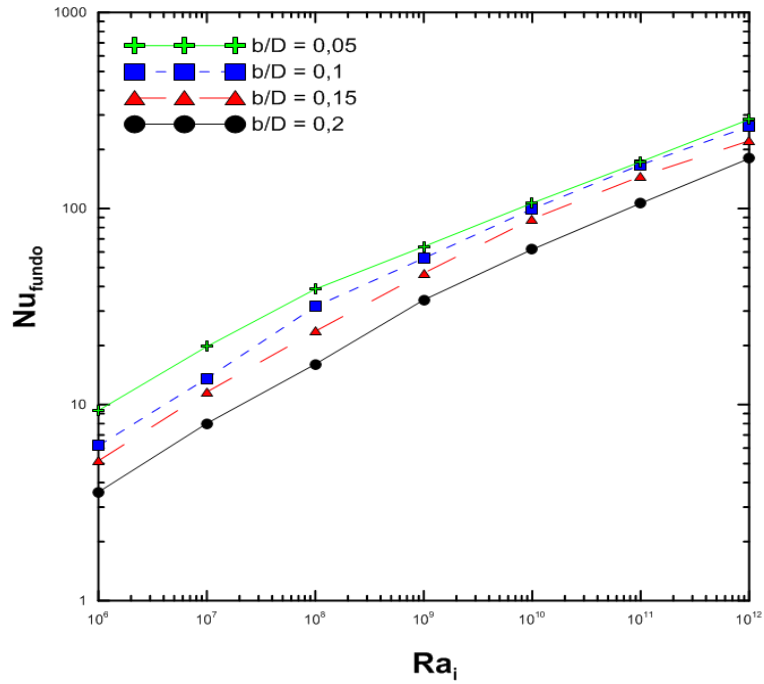


(a)

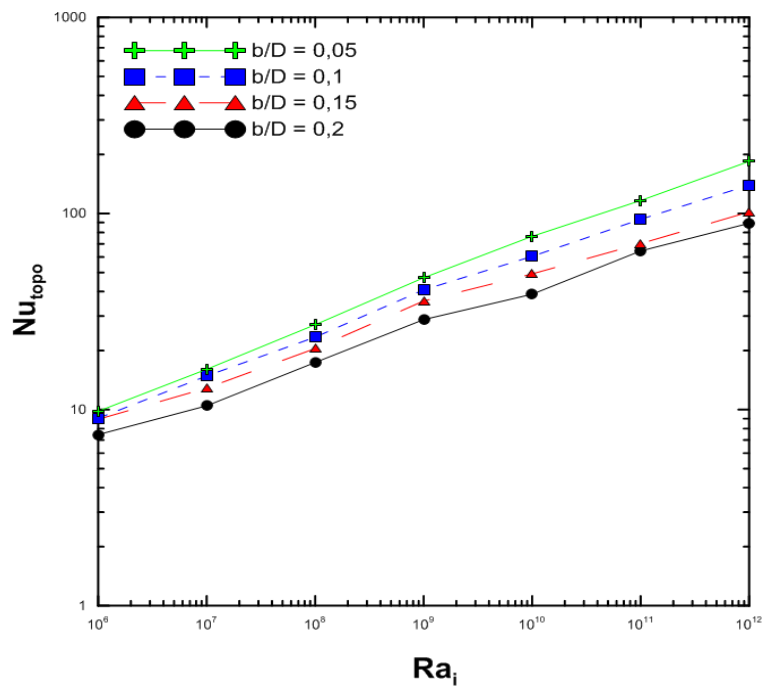


(b)

Figura 4.18: Número de Nusselt em função do número de Rayleigh interno (Ra_i) para $Pr = 7,0$ e $K = 1$ em cavidade semicircular conjugada, (a)Fundo (b) Topo.

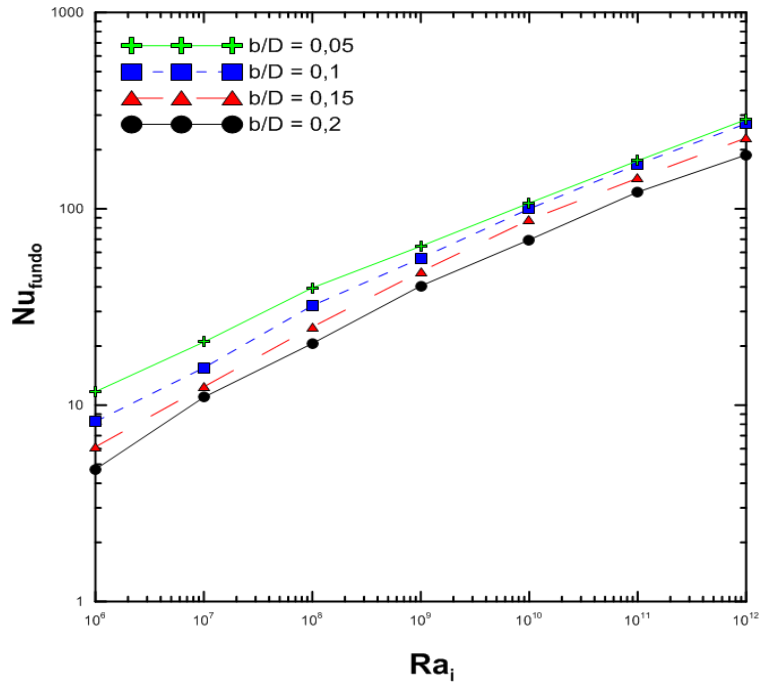


(a)

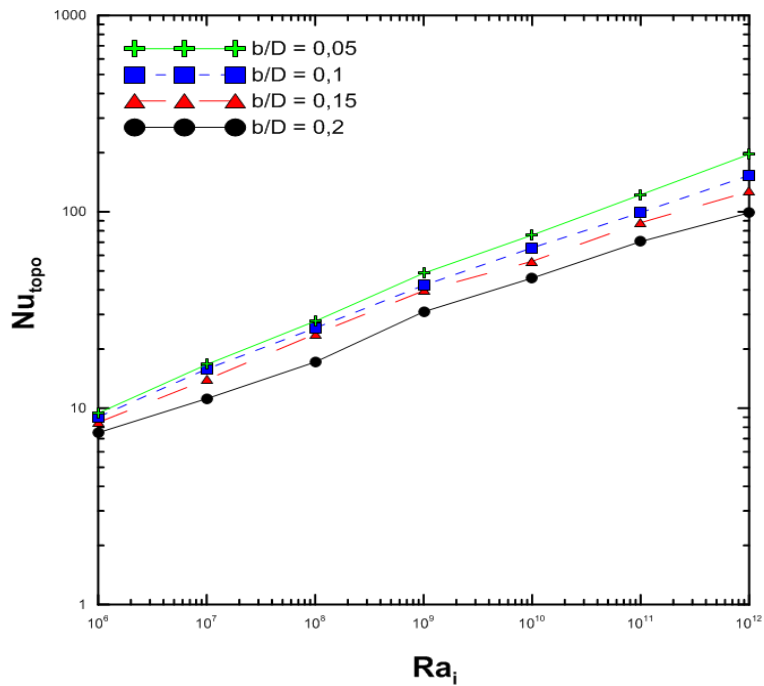


(b)

Figura 4.19: Número de Nusselt em função do número de Rayleigh interno (Ra_i) para $Pr = 7,0$ e $K = 5$ em cavidade semicircular conjugada, (a)Fundo (b) Topo.

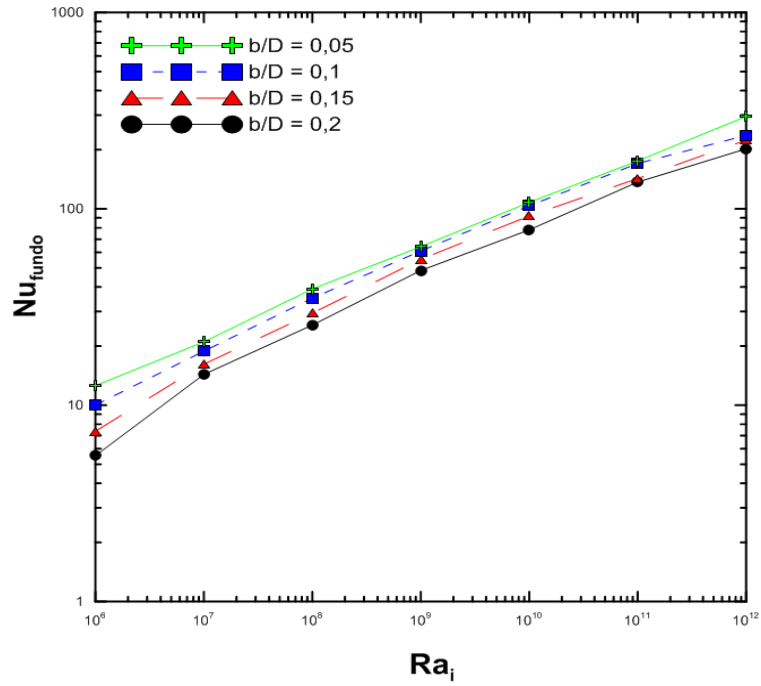


(a)

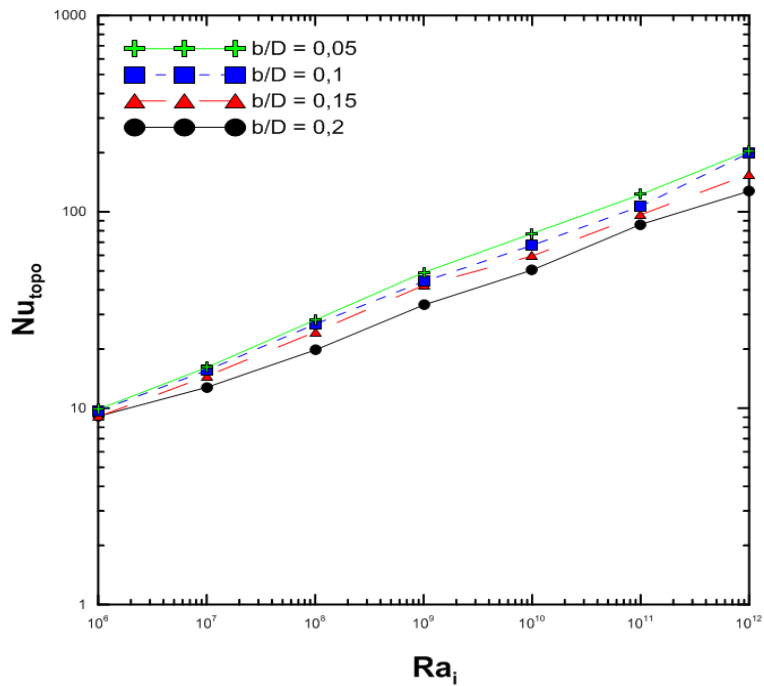


(b)

Figura 4.20: Número de Nusselt em função do número de Rayleigh interno (Ra_i) para $Pr = 7,0$ e $K = 12,49$ em cavidade semicircular conjugada, (a)Fundo (b) Topo.



(a)



(b)

Figura 4.21: Número de Nusselt em função do número de Rayleigh interno (Ra_i) para $Pr = 7,0$ e $K = 27,16$ em cavidade semicircular conjugada, (a)Fundo (b) Topo.

Os campos de temperatura e velocidade são mostrados nas figs. 4.22 a 4.25 para Ra na faixa de 10^9 a 10^{12} .

De acordo com o campo de velocidade, mostrado pela Figura 4.22 (b), pode se observar uma fina camada limite hidrodinâmica, que descende ao longo da parede curva, local que mereceu mais atenção durante a geração da malha, a fim de evitar divergência causada por altos gradientes de velocidade e também temperatura. A Figura 4.24 mostra de forma mais detalhada o comportamento do fluido na região próxima à parede do topo, a qual é caracterizada por um escoamento completamente caótico, sem presença de camadas de estratificação.

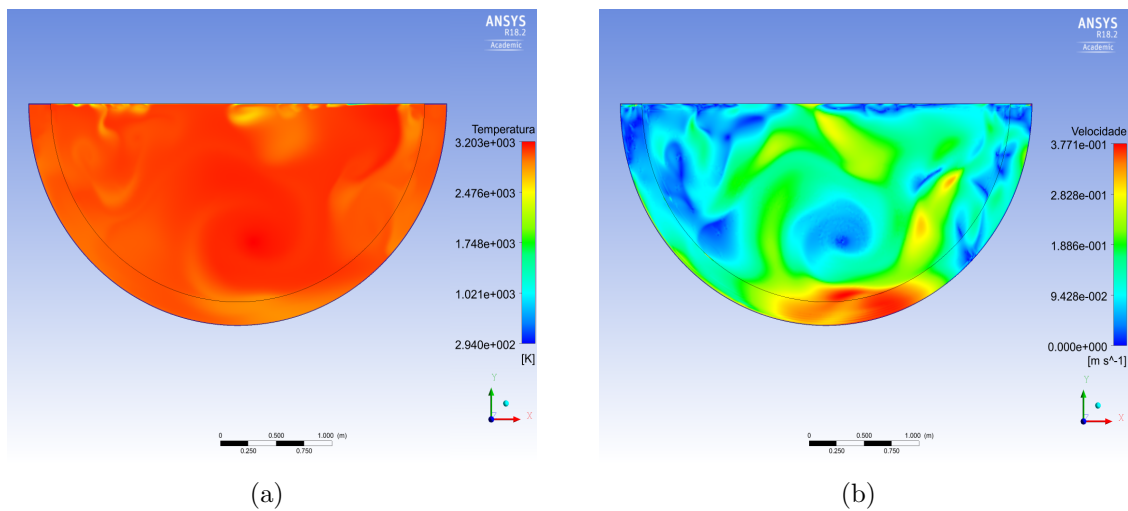


Figura 4.22: Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade semicircular conjugada, para $Ra_i = (10^9)$, $Pr = 7,0$, $K = 12,49$ e $b/D = 0,2$.

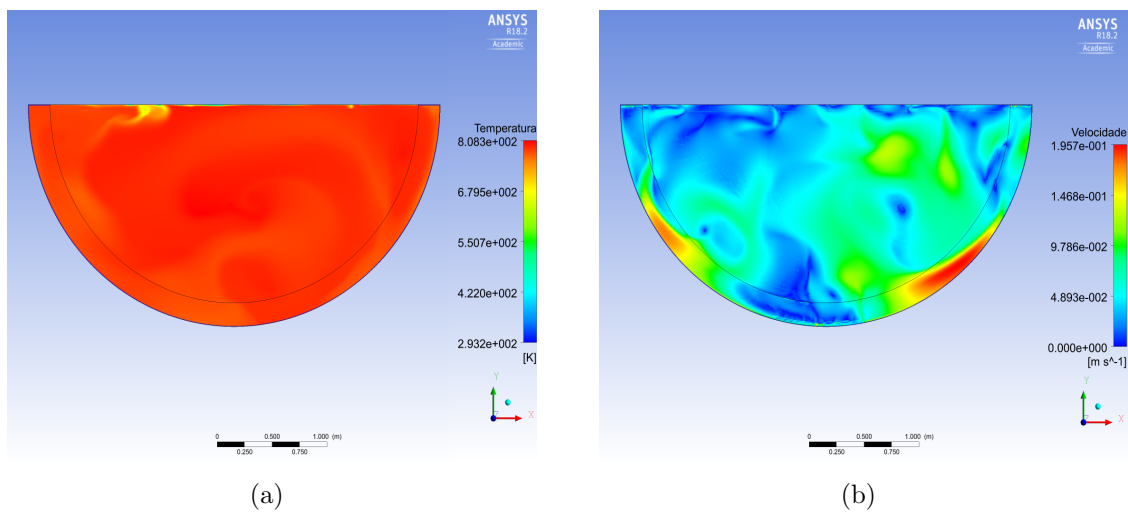


Figura 4.23: Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade semicircular conjugada, para $Ra_i = (10^{10})$, $Pr = 7,0$, $K = 12,49$ e $b/D = 0,2$.

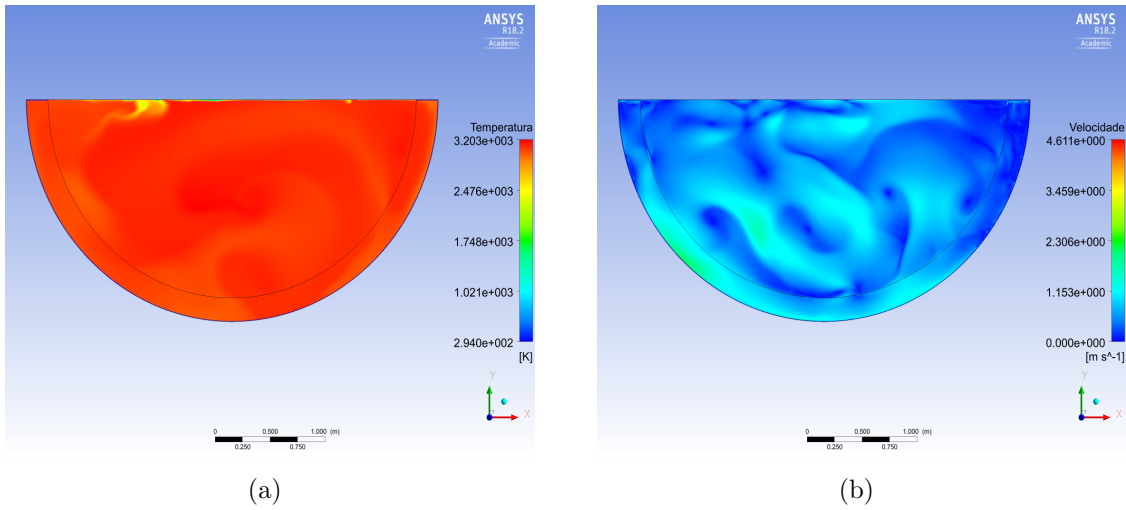


Figura 4.24: Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade semicircular conjugada, para $Ra_i = (10^{11})$, $Pr = 7,0$, $K = 12,49$ e $b/D = 0,2$.

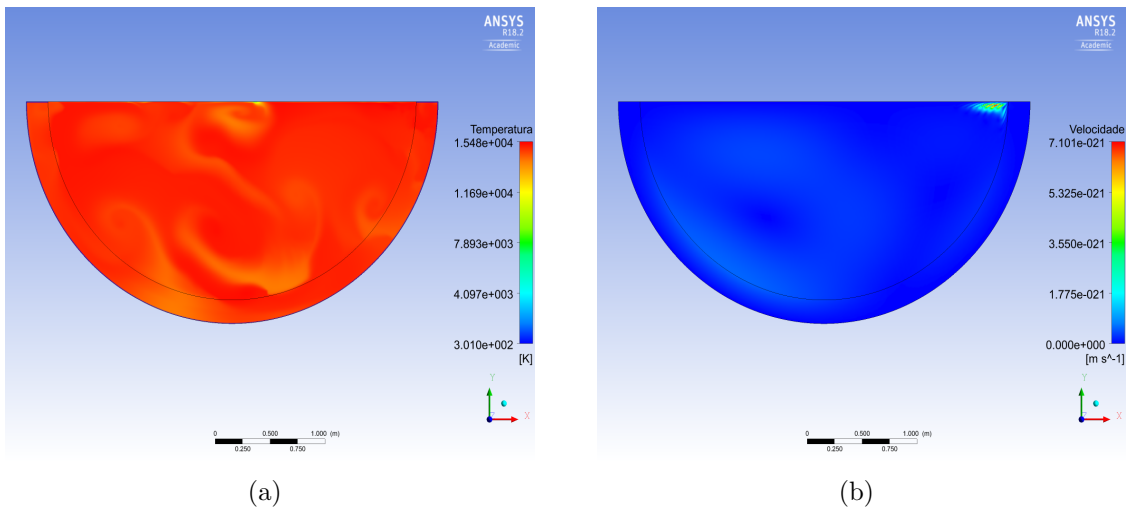


Figura 4.25: Contorno de Temperatura (a) e velocidade (b) em cavidade semicircular conjugada, para $Ra_i = (10^{12})$, $Pr = 7,0$, $K = 12,49$ e $b/D = 0,2$.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões

Visto a importância do estudo de convecção natural conjugada, muito esforço tem sido aplicado com o propósito de melhorar a compreensão dos fenômenos que ocorrem durante o processo de derretimento do núcleo até seu realocamento para o plenum inferior no vaso de pressão. A fim de garantir a integridade física do mesmo, este trabalho foi realizado a partir de estudos numéricos e experimentais relacionados à transferência de calor em cavidade semicircular com fonte interna de calor, simulando os processos de transferência de calor do corium para o plenum inferior do vaso.

As simplificações levadas em consideração foram: a geometria bidimensional e o fluido incompressível Newtoniano sem mudança de fase. As simulações foram realizadas, em escoamento laminar no estado estacionário, usando a aproximação de Boussinesq. Desta forma, elas provaram ser válidas para as análises dos casos estudados por esse trabalho.

Neste capítulo, serão apresentadas as principais conclusões obtidas, assim como, as sugestões propostas para pesquisas futuras nesta área.

5.1 Conclusões

O objetivo de investigar a transferência de calor não conjugada e conjugada, em um fluido com geração interna de calor em uma cavidade semicircular com convecção natural no fluido e condução de calor na parede sólida. A fim de quantificar os efeitos da espessura (b) em razão ao diâmetro (D) e a razão de condutividade térmica (K), no comportamento do regime de escoamento e de transferência de calor em função de números de Prandtl e Rayleigh interno, no qual foi alcançado com sucesso.

Baseado nas simulações computacionais realizadas, pode-se concluir que:

Na avaliação de diferentes números de Prandtl (0,0321; 0,71; 7,0), em uma cavidade semicircular não conjugada, pode-se observar que na faixa de $Ra_i = 10^5$ a 10^8 , o comportamento do fluido foi estacionário. O número de Rayleigh crítico para mudança de regimes laminar estacionário para o laminar transiente, no caso do Pr igual a 0,0321 foi de 10^9 (iniciando o regime turbulento a partir do $Ra_i = 10^{11}$), para Pr igual a 0,71 foi de 10^{11} (iniciando o regime turbulento a partir do $Ra_i = 10^{12}$) e para Pr igual a 7,0 foi de 10^{13} .

Os resultados obtidos a partir da simulação na cavidade semicircular não conjugada forneceram valores de Nu bastante próximos, ou seja, estavam em excelente concordância com as correlações de Mayinger et al. (1976), Kulacki e Emara (1975) e Vieira (2010). Eles demonstraram ainda um melhor resultado para Rayleigh acima de 10^{10} , enquanto que para números mais baixos de Rayleigh, em relação aos números calculados de Nusselt, estes eram um pouco menores aos valores dados pelas correlações empíricas. Pode-se assim concluir que, à medida que o número de Rayleigh aumenta, a distribuição de temperatura na cavidade se torna mais uniforme.

Já para os resultados obtidos a partir da simulação na cavidade semicircular conjugada, primeiramente, foi realizada uma comparação com resultados obtidos da análise não conjugada e com o trabalho do Liaqat e Baytas. (2001), no qual, observa-se que as temperaturas no caso de uma cavidade conjugada são menores em comparação com uma cavidade não conjugada e estão em concordância com o trabalho encontrado na literatura.

Foi investigado também a transferência de calor conjugado por condução e convecção natural. Com o fluido gerador de calor e parede isotérmica com espessura variando de 0,05 a 0,2, o número de Rayleigh variou de 10^6 a 10^{12} , taxa de condutividade de 1; 5; 12,49 e 27,16 e o número de Prandtl 7,0.

Pode-se perceber que com aumento da espessura (b/D) existe uma diminuição do número de Nusselt ao longo do fundo da cavidade semicircular, indicando que quanto menor a espessura maior a transferência de calor por convecção natural. Também é notável que com o aumento da razão de condutividade térmica (K), existe um pequeno aumento do Nu . Isso ocorre para todas as variações da razão da condutividade térmica (K).

Portanto, observa-se que os valores do número de Nusselt aumentam com o número Ra , enquanto o número médio Nusselt fundo é sempre menor ao seu valor quando comparado ao Nusselt topo.

Esse trabalho contribuiu para uma visão geral do papel das simulações numéricas computacionais no estudo da convecção natural conjugada em condição de um acidente severo. Todas as análises realizadas foram fundamentais para um melhor entendimento dos fatores que podem atuar na transferência de calor conjugada por convecção natural e condução, como a geometria e propriedades do fluido, por exemplo.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho, sugere-se as seguintes propostas para trabalhos futuros:

1. Realizar simulações computacionais bidimensionais e tridimensionais, aplicando modelo de turbulência para altos números de Ra .
2. Realizar simulações computacionais tridimensionais, investigando o regime de escoamento e comportamento da transferência de calor, em função do Ra e Pr .
3. Desenvolver soluções numéricas das equações de Navier-Stokes para convecção natural conjugadas em cavidades de fluidos com geração interna de calor, usando a técnica de transformada integral generalizada (GITT).

Referências Bibliográficas

Anderson, J., Menter, F., Dick, E., Degrez, G., e Vierendeels, J. Introduction to computational fluid dynamics. Annual Lecture Series, 2013.

Ampofo, F. e Karayiannis, T. G. Experimental benchmark data for turbulent natural convection in an air filled square cavity. International Journal of Heat and Mass Transfer, 46(19):3551-3572, 2003.

Aounallah, M., Addad, Y., Benhamadouche, S., Imine, O., Adjlout, L., e Laurence, D. Numerical investigation of turbulent natural convection in an inclined square cavity with a hot wavy wall. International Journal of Heat and Mass Transfer, 50:1683-1693, 2007.

Asfia, F. J., Frantz, B., e Dhir, V. K. Experimental investigation of natural convection heat transfer in volumetrically heated spherical segments. Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, 118(1):31-37, 1996.

Azevedo, M. B., Estudos experimentais da ascensão de bolhas de taylor individuais em tubos verticais e ligeiramente inclinados, Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2016.

Bayout M. A, Aspectos regulatórios dos acidentes severos no projeto de usinas nucleares, Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 1997.

Bejan, A., Convection Heat Transfer, 2nd edition, John Wiley Sons, Inc., 1994.

Bernaz, L., Bonnet, J., e Seiler, J. Investigation of natural convection heat transfer to the cooled top boundary of a heated pool. Nuclear Engineering and Design, 204:413-427, 2001.

Bonnet, J. Thermal hydraulic phenomena in corium pools: BALI experiment. Proceeding of Workshop on Severe Accident Research, paginas 79-86, 1999.

Boudjemadi, R., Maupu, V., Laurence, D., e Le Qu, P. Direct numerical simulation of natural convection in a vertical channel, a tool for second moment closure modeling. International Engineering Turbulence Modeling and Experiments, 3:39-48, 1996.

Buck, M., Burger, M., Miassoedov, A., Gaus-Liu, X., Palagin, A., Jacqmin-Godin, L., Tran, C., Ma, W., e Chudanov, V. The live program - results of test 11 and joint analyses on transient molten pool thermal hydraulics. Progress in Nuclear Energy, 52:46-60, 2010.

Castaing B., Gunaratne G., Heslot F. , Kadanoff L., Libchaber A., Thomae S., X. Z. Wu, S. Zaleski, S. Zanetti, Scaling of Hard Turbulence in Rayleigh-Benard Convection, Journal of Fluid Mechanics, vol.204, pp. 1-30, 1989.

Chavanne X., Chilla F., Chabaud B.,Castaing B., and Hebral B., Turbulent Rayleigh-Benard Convection in Gaseous and Liquid He, Ed: Phys. Fluids, vol.13(5), pp. 1300-1320, May 2001.

Chu, T. Y. and Goldstein, R. J, Turbulent Convection in a Horizontal Layer of Water, J. Fluid Mechanics, vol.60, pp. 141-159, 1973.

Churbanov, A. G., Vabishchevich, P. N., Chudanov, V. V., e Strizhov, V. F. A numerical study on natural-convection of a heat-generating fluid in rectangular enclosures. International Journal of Heat and Mass Transfer, 37(18):2969-2984, 1994.

Dinh, T. e Nourgaliev, R. On turbulence modelling for large volumetrically heated liquid pools. Nuclear Engineering and Design, 169:131-150, 1997.

Emara, A. e Kulacki, F. A numerical investigation of thermal convection in a heat generating fluid layer. Journal of Heat Transfer, 102:531-537, 1980.

Fukasawa, M., Hyakawa, S., e Saito, M. Thermal-hydraulic analysis for inversely-stratified molten corium in lower vessel. Journal of Nuclear Science and Technology, 45:873-888, 2008.

Fusegi, T., Hyun, J. M., e Kuwahara, K. Numerical study of natural convection in a differentially heated cavity with internal heat generation effects of the aspect ratio. *Journal of Heat Transfer Transactions of the ASME* 114(3):773-777, 1992.

Garon, A. M., Goldstein, R. J. Velocity and heat transfer measurements in thermal convection. *Journal Physics of Fluids*, 16(11), 1818-1825, 1973.

Glob S. and Dropkin D., Natural Convection Heat Transfer in Liquids Confined Between Two Horizontal Plates, *J. Heat Transfer*, 81C, pp. 24-28, 1959.

Goldstein, R. and Tokuda, S., Heat transfer by thermal convection at high rayleigh numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 23, pp. 738-740, 1980.

Henry, R. e Fauske, H. External cooling of reactor vessel under severe accident conditions. *Nuclear Engineering and Design*, 139:31-43, 1993.

Heslot F., Castaing B., and Libchaber A., Transition to Turbulence in Helium Gas, Ed: *Phys. Review A*, vol.36, p.58-71, 1987.

Horvat, A., Kljenak, I., e Marn, J. Two-dimensional large-eddy simulation of turbulent natural convection due heat generation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44:3985-3995, 2001.

IAEA - The international event scale, Disponivel em < www.iaea.org/Publication/Factsheets/English/ines.pdf >. Acesso em 15 abr.2018.

Jahn M., and Reineke H. H. , Free Convection Heat Transfer with Internal Heat Sources: Calculations and Measurements, Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf., Tokyo, Japan, vol.3, paper NC-2.8, pp. 74-78, 1974.

Jeffreys H., Some cases of instability in fluid motion, Proc. Ed: Royal Society. Lond. A, vol.118, 2053-9150, 1928.

Kulacki, F. e Emara, A. Steady and transient thermal convection in a

fluid layer with uniform volumetric energy sources. *Journal of Fluid Mechanics*, 83(2):375-395, 1975.

Kulacki, F. A. e Nagle, M. E. Natural-convection in a horizontal fluid layer with volumetric energy-sources. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 97(2):204-211, 1975.

Kymalainen, O., Tuomisto, H., e Theofanous, T. In-vessel retention of corium at loviisa plant. *Nuclear Engineering and Design*, 169:109-130, 1997.

Lee, S., Lee, J. K., e Suh, K. Natural convection thermo fluid dynamics in a volumetrically heated rectangular pool. *Nuclear Engineering and Design*, 237:473-483, 2007.

Lee, J. e Goldstein, R. J. An experimental study on natural convection heat transfer in an inclined square enclosure containing internal energy sources. *Journal of Heat Transfer*, 110:345-349, 1988.

Lee, S. e Suh, K. Natural convection heat transfer in two-dimensional semi-circular slice pool. *Journal of Nuclear Science and Techonlogy.*, 40(10):775-782, 2003.

Liaqat, A. e Baytas, A. Numerical comparison of conjugate and nonconjugate natural convection for internally heated semi-circular pools. *International Journal of Heat and Fluid flow*, 22:650-656, 2001.

Liaqat, A. e Baytas, A. C. Numerical analysis of buoyant flow in a hemispherical enclosure at high rayleigh numbers. *Heat and Mass Transfer*, 40(1-2):99-104, 2003.

Loktionov V.D., Mukhtarov E.S., Yaroshenko N.I. and Orlov V.E., Numerical investigation of the reactor pressure vessel behaviour under severe accident conditions taking into account the combined processes of the vessel creep and the molten pool natural convection. *Nuclear Eng. Des.*, 191, pp. 31-52, 1999.

May, H. O. A numerical study on natural convection in an inclined square enclosure containing internal heat sources. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34:919-928, 1991.

Mayinger, F., Jahn, M., Reineke, H., e Steinbrenner, V. Examination of thermohydraulic processes and heat transfer in a core melt. Technical report, Institut für Verfahrenstechnik der T.U, 1976.

Mehedinteanu, S. The evaluation of rcs depressurization to prevent core melting in pressure tube reactors (CANDU-type). *Annals of Nuclear Energy*, 36:537-545, 2009.

Niemela J. J., Skribek L., Sreenivasan K. R., and Donnelly R. J., Turbulent Convection at Very High Rayleigh Numbers, *J. Fluid Mech*, vol.404(20), pp. 837-840, 2000.

Nourgaliev, R., Dinh, T., e Sehgal, B. Effect of fluid prandtl number on heat transfer characteristics in internally heated liquid pools with rayleigh numbers up to 1012. *Nuclear Engineering and Design*, 169:165-184, 1997.

O'Toole O. J. L., and Silveston P. L., Correlations of Convective Heat Transfer in Confined Horizontal Layers, *A.I.Ch.E. Chem. Engng. Progr. Symp. Ser.*, 57(32), pp. 81-86, 1961.

Otic, I., Groetzbach, G., e Worner, M. Analysis and modelling of the temperature variance equation in turbulent natural convection for low-prandtl-number fluids. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 525, páginas 237-261, 2005.

Petrangeli, G. (2006). *Nuclear safety*. Ed: Butterworth-Heinemann; 3:53-62.

Ralf, J. e Roberts, D. Free convection heat transfer measurements in horizontal liquid layers with internal heat generation. AERE-R784, UKAEA Research Group Harwell, 1974.

Rempe, J. L., Suh, K. Y., Cheung, F. B., e KIM, S. B. In-vessel retention of molten corium: Lessons learned and outstanding issues. *Nuclear Technology*, 161:210-267, 2008.

Rundle, C. e Lighthstone, M. Validation of turbulent natural convection in a square cavity for application of cfd modelling to heat transfer and fluid flow in atria geometries, 2nd Canadian Solar Buildings Conference, 2007.

Sehgal, B., Giri, A., Chikkanagoudar, U., e Karbojian, A. Experiments on-in vessel melt coolability in the EC-FOREVER program. Nuclear Engineering and Design, 236:2199-2210, 2006.

Shim, Y. e Hyun, J. Transient confined natural convection with internal heat generation. International Journal Heat and Fluid Flow, 18:328-333, 1997.

Steinberner, U. e Reineke, H. Turbulent buoyancy convection heat transfer with internal heat sources. Proceedings of the Sixth Internal Heat Transfer Conference, 2:305-310, 1978.

Taylor, P., Lee, S. D., Suh, K. Y. Natural Convection Heat Transfer in Two-Dimensional Semicircular Slice Pool Natural Convection Heat Transfer in Two-Dimensional Semicircular Slice Pool, Journal of Nuclear Science and Technology, v. 31, n. September, pp. 37-41, 2012.

Theofanous, T., Maguire, M., Angelini, S., e Salmassi, T. The first results from ACOPO experiment. Nuclear Engineering and Design, 169:49, 1997.

Todreas, N.E e Kazimi, M. S. Nuclear Systems I - Thermal Hydraulic Fundamentals - Volume 1. Ed: Taylor Francis Publishing, 1990.

Versteeg, H. F. e Malalasekera, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics, Ed: Loughman scientific e technical, volume 5, 2005.

Versteegh, T. A. M. e Nieuwstadt, F. T. M. Turbulent budgets of natural convection in an infinite differentially heated vertical channel. International Journal of Heat Fluid Flow, 19:135-149, 1998.

Vieira, C. B. Simulação computacional da convecção natural em cavidade contendo um fluido com geração interna de calor, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2010.

Vieira, C., Niceno, B., e Su, J. Computational simulation of turbulent natural convection in a volumetrically heated hemispherical cavity. 22nd International Conference on Nuclear Engineering, 2014.