

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GUILHERME HANAUER DE LIMA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA CONVECÇÃO NATURAL EM
CAVIDADE POROSA BI-DISPERSA AQUECIDA POR BAIXO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

GUILHERME HANAUER DE LIMA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA CONVECÇÃO NATURAL EM
CAVIDADE POROSA BI-DISPERSA AQUECIDA POR BAIXO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Luiz de Mello Junqueira.

Co-Orientador: Prof. Dr. Admilson Teixeira Franco.

Co-Orientador: Eng. Fernando César De Lai.

CURITIBA

2013

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Francisco e Nilva, pelo amor e incentivo no caminho dos estudos, sem os quais não seria possível chegar até aqui. Agradeço-lhes de todo coração pela educação que me foi dada.

Aos professores Silvio Junqueira e Admilson Franco pela orientação, suporte incondicional e oportunidade de realizar este trabalho.

Ao engenheiro Fernando De Lai, pela orientação e pela atenção ofertada em momentos de necessidade.

Aos professores da banca, Luciano Rossi e Rigoberto Morales, por sugerirem melhorias e realizarem críticas construtivas que contribuíram no desenvolvimento deste projeto.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – e aos professores que ao longo do curso proporcionaram uma formação profissional de qualidade.

Ao Laboratório de Ciências Térmicas – LACIT – pela estrutura e oportunidade para este projeto.

Aos meus amigos e colegas pelo convívio, apoio e incentivo ao longo deste período tão significativo de minha vida.

Ao apoio financeiro da PETROBRAS por meio do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello – CENPES.



“Nossa maior felicidade não depende da condição de vida em que o acaso nos colocou, mas é sempre o resultado de uma boa consciência, boa saúde, empenho e liberdade em todas as atividades.”

(Thomas Jefferson)

RESUMO

LIMA, Guilherme Hanauer. Simulação Numérica da Convecção Natural em Cavidade Porosa Bi-dispersa Aquecida por Baixo. 2013. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Mecânica. Curitiba, 2013.

Neste trabalho é investigado o fenômeno de transporte através da transferência de calor por convecção natural em uma cavidade quadrada bi-dispersa aquecida por baixo. A cavidade é representada por blocos porosos, quadrados, desconectados e uniformemente distribuídos. A simulação numérica do meio bi-disperso é feita através da solução das equações de balanço de massa, quantidade de movimento e energia para a fase fluida (Navier-Stokes) e para a fase porosa dos blocos (Darcy-Brinkman-Forchheimer). O algoritmo utilizado para o acoplamento pressão-velocidade é o SIMPLEC e o esquema de interpolação para os termos convectivos é o QUICK. Resultados são apresentados para a variação do número de Rayleigh ($Ra = 10^5 - 10^7$), do número de Darcy ($Da = 10^{-4} - 10^{-8}$), da porosidade dos blocos ($\phi_l = 0,4 - 0,6$) e do número de blocos ($N = 1; 4; 16; 36; 64$). A transferência de calor através do meio é avaliada quantitativamente pelo número de Nusselt na superfície inferior da cavidade, e qualitativamente pelas isothermas e linhas de corrente. Com o aumento do número de Rayleigh, observa-se a intensificação da recirculação de fluido na cavidade e, conseqüentemente, o aumento da transferência de calor. Da mesma forma, com o aumento do número de Darcy, verifica-se um aumento da permeabilidade interna dos blocos, reforçando a recirculação geral na cavidade. A variação da porosidade interna dos blocos apresenta pouca influência em relação aos demais parâmetros. De forma geral, o aumento do número de blocos reduz a permeabilidade externa da cavidade, intensificando a resistência ao escoamento do fluido, proporcionando a estratificação horizontal das isothermas. Para determinadas configurações (Ra, Da, ϕ_l, N), a estratificação horizontal é caracterizada para o regime de condução pura.

Palavras-chave: Convecção Natural, Meio Poroso Bi-disperso, Aquecimento Horizontal, Cavidade Quadrada, Simulação Numérica.

ABSTRACT

LIMA, Guilherme Hanauer. Simulação Numérica da Convecção Natural em Cavidade Porosa Bi-dispersa Aquecida por Baixo. 2013. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Mecânica. Curitiba, 2013.

In this work it is investigated the transport phenomenon by heat transfer through natural convection in a bi-disperse square cavity heated from below. The cavity is represented by porous, square, disconnected blocks uniformly distributed. The numerical simulation of the bi-disperse medium is done by solving the balance equations of mass, momentum and energy for the fluid phase (Navier-Stokes) and for the porous phase of the blocks (Darcy-Brinkman-Forchheimer). The algorithm used for the pressure-velocity coupling is the SIMPLEC and the interpolation scheme for the convective terms is the QUICK. Results are presented for the variation of the Rayleigh number ($Ra = 10^5 - 10^7$), the Darcy number ($Da = 10^{-4} - 10^{-8}$), the internal porosity of the blocks ($\phi_i = 0,4 - 0,6$) and the number of blocks ($N = 1; 4; 16; 36; 64$). The heat transfer through the medium is evaluated quantitatively by the Nusselt number on the lower surface of the cavity, and qualitatively by the isothermals and streamlines. Raising the Rayleigh number, it is observed an intensification on the recirculation of fluid inside the cavity and, consequently, an increase on the heat transfer. Likewise, with an increase on the Darcy number, it is verified an increase on the internal permeability of the blocks, enhancing the whole recirculation inside the cavity. The variation on the internal porosity of the blocks presents low influence when compared to the other parameters. Generally, the increase on the number of blocks reduces the external permeability of the cavity, intensifying the resistance to the fluid flow, propitiating the horizontal stratification of the isothermals. For certain configurations (Ra, Da, ϕ_i, N), the horizontal stratification is characterized for the regime of pure conduction.

Keywords: Natural Convection, Bi-disperse Porous Media, Horizontal Heating, Square Cavity, Numerical Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1. Foto de uma rocha arenítica fraturada.	14
Figura 1.2. Amostra de um meio poroso não natural.	15
Figura 1.3. Representação da migração do petróleo a partir de rochas geradoras para o interior de uma rocha reservatório.	17
Figura 1.4. (a) Reservatório de petróleo; (b) Escala macroscópica da rocha fraturada; (c) Idealização geométrica para o modelo bi-disperso; (d) Escala macroscópica do poro; (e) Escala microscópica do poro; (f) Idealização geométrica para o modelo heterogêneo.	20
Figura 3.1. Cavidade bi-dispersa e condições de contorno utilizadas.	28
Figura 3.2. Condições de contorno adimensionais para a cavidade bi-dispersa à esquerda e à direita um detalhe na região de um bloco com as condições de contorno na interface fluido-porosa.	33
Figura 6.8. Linhas de corrente para $Ra = 10^5$ e $\phi_l = 0,4$	48
Figura 6.9. Isotermas para $Ra = 10^5$ e $\phi_l = 0,4$	49
Figura 6.10. Linhas de corrente para $Ra = 10^6$ e $\phi_l = 0,4$	50
Figura 6.11. Isotermas para $Ra = 10^6$ e $\phi_l = 0,4$	51
Figura 6.12. Linhas de corrente para $Ra = 10^7$ e $\phi_l = 0,4$	52
Figura 6.13. Isotermas para $Ra = 10^7$ e $\phi_l = 0,4$	53
Figura 6.1. Variação do número de Rayleigh para $Da = 10^{-5}$, $N = 16$ e $\phi_l = 0,4$	54
Figura 6.2. Número de Nusselt médio versus número de Rayleigh, para $Da = 10^{-5}$	55
Figura 6.3. Variação da permeabilidade para $Ra = 10^6$, $N = 16$ e $\phi_l = 0,4$	56
Figura 6.4. Número de Nusselt médio versus número de Darcy, para $N = 16$	56
Figura 6.5. Número de Nusselt versus número de Darcy, para $N = 4$ e $Ra = 10^7$	57
Figura 6.6. Número de Nusselt médio versus número de blocos, para $Da = 10^{-4}$	58
Figura 6.7. Número de Nusselt médio versus número de blocos, para $Da = 10^{-5}$	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1. Nu_{av} para cavidade quadrada preenchida com fluido aquecida lateralmente com $Da = 10^{+8}$ e $\phi_l = 1$	40
Tabela 5.2. Nu_{av} para cavidade quadrada porosa homogênea aquecida lateralmente.	41
Tabela 5.3. Nu_{av} para a cavidade limpa aquecida por baixo.....	42
Tabela 5.4. Nu_{av} para cavidade quadrada preenchida com um bloco condutivo centralizado aquecida por baixo com $D = 0,8$ e $\kappa = 1$	42
Tabela 6.1. Resumo dos valores dos parâmetros constantes para a cavidade bi-dispersa.	44
Tabela 6.2. Resumo dos valores dos parâmetros variados para a cavidade bi-dispersa.	44
Tabela 6.3. Nu_{av} para cavidade bi-dispersa aquecida por baixo para $Ra = 10^7$	45

NOMENCLATURA

Letras Romanas

A	Razão de aspecto da cavidade	-
A	Área	$[m^2]$
c_P	Calor específico a pressão constante	$[J / kg.K]$
c_F	Coefficiente de Forchheimer	-
d	Comprimento característico dos blocos	$[m]$
D	Comprimento característico adimensional	-
Da	Número de Darcy	-
D / Dt	Operador derivada material	-
EP	Erro percentual relativo	-
F	Vetor força de corpo por unidade de volume	$[N / m^3]$
g	Aceleração da gravidade	$[m / s^2]$
h	Coefficiente de transferência de calor	$[W / m^2.K]$
H	Altura da cavidade	$[m]$
k	Condutividade térmica	$[W / m.K]$
K	Permeabilidade	$[m^2]$
κ	Razão de condutividade	-
L	Largura da cavidade	$[m]$
N	Número de blocos	-
n	Vetor unitário na direção normal	-
Nu	Número de Nusselt	-
p	Pressão	$[Pa]$
P	Pressão adimensional	-

Pr	Número de Prandtl	-
q''	Fluxo de calor em uma superfície	$[W / m^2]$
q'''	Geração de energia interna	$[W / m^3]$
Ra	Número de Rayleigh	-
Re	Número de Reynolds	-
S	Termo fonte para o meio poroso	-
t	Tempo	$[s]$
T	Temperatura	$[^{\circ}C]$
u	Velocidade na direção x	$[m / s]$
U	Velocidade adimensional na direção x	-
v	Vetor velocidade em coordenada cartesiana	$[m / s]$
v	Velocidade na direção y	$[m / s]$
V	Velocidade adimensional na direção Y	-
V	Volume	$[m^3]$
x, y, z	Coordenadas cartesianas	$[m]$
X, Y	Coordenadas cartesianas adimensionais	-

Letras Gregas

α	Difusividade térmica	$[m^2 / s]$
β	Coeficiente de expansão térmica	$[K^{-1}]$
Δx	Comprimento horizontal dos volumes de controle	-
Δy	Comprimento vertical dos volumes de controle	-
ϕ	Porosidade	-
Θ_{cal}	Valor calculado	-

Θ_{ref}	Valor de referência	-
μ	Viscosidade dinâmica	$[kg / m.s]$
ν	Viscosidade cinemática	$[m^2 / s]$
θ	Temperatura adimensional	-
ρ	Massa específica	$[kg / m^3]$
ψ	Função linha de corrente	-

Subscritos

av	Médio
B	Blocos
C	Parede resfriada
E	Externo
f	Fluido
H	Parede aquecida
I	Interno
L	Local
m	Meio poroso
s	Sólido
T	Total

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE TABELAS

NOMENCLATURA

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Meios Porosos	14
1.2	Convecção Natural em Meios Porosos	16
1.3	Caracterização do Problema	18
1.4	Objetivos	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Convecção Natural em Cavidade Limpa	22
2.2	Convecção Natural em Cavidade Porosa	22
2.2.1	Convecção Natural em Cavidade Porosa Heterogênea	23
2.2.2	Convecção Natural em Cavidade Porosa Homogênea	24
2.2.3	Convecção Natural em Cavidade Porosa Bi-dispersa	24
3	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	27
3.1	Hipóteses Simplificadoras	27
3.2	Geometria e Condições de Contorno para o Modelo Bi-Disperso	28
3.3	Adimensionalização das Equações	28
3.4	Equações Adimensionais para o Modelo Bi-disperso	29
4	MODELAGEM NUMÉRICA	35
4.1	Implementação Numérica	35
4.2	Linhas de Corrente	37

4.3	Número de Nusselt	37
5	RESULTADOS	39
5.1	Problemas de verificação	39
5.1.1	Cavidade Limpa Aquecida Lateralmente	40
5.1.2	Cavidade Porosa Homogênea Aquecida Lateralmente	40
5.1.3	Cavidade Limpa Aquecida Por Baixo	41
5.1.4	Cavidade Com Bloco Centralizado Aquecida Por Baixo	42
6	SIMULAÇÃO NUMÉRICA: DA CAVIDADE BI-DISPERSA	44
6.1	Efeito da Variação dos Parâmetros para a Cavidade Bi-dispersa	44
6.2	Teste de Malha para o Modelo Bi-Disperso	45
6.3	Simulação Numérica para Cavidade Bi-dispersa	46
6.3.1	Efeito da Variação do Número de Rayleigh	54
6.3.2	Efeito da Variação do Número de Darcy	55
6.3.3	Efeito da Variação do Número de Blocos	57
7	CONCLUSÕES	60
8	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICE A – LINHAS DE CORRENTE E ISOTERMAS PARA $\phi_1 = 0,6$	66
	APÊNDICE B – RESULTADOS: CAVIDADE BI-DISPERSA	73

1 INTRODUÇÃO

1.1 Meios Porosos

O meio poroso é descrito como uma matriz sólida, rígida ou com deformação desprezível, com vazios interconectados ou não em seu interior. Quando interconectados, os vazios permitem o escoamento de fluido através do meio poroso (NIELD e BEJAN, 2006). Considerando a grande ocorrência de estruturas formadas por meios porosos na natureza, nota-se a importância do estudo dos fenômenos de transporte através desses domínios. Células de combustível, trocadores de calor, o pulmão humano, a camada de vegetação sobre a superfície terrestre, areia e o próprio solo são exemplos de estruturas porosas (DE LEMOS, 2006).

A distribuição dos poros em um meio poroso natural é irregular quanto à forma e tamanho. A Figura 1.1 é um exemplo de um meio poroso encontrado na natureza. Porém avanços na engenharia de processos deram origem a uma série de novos materiais porosos, mais leves e mais regulares do que um meio natural, sintetizados para aplicações estruturais, térmicas e acústicas. Uma metodologia consistente é desejável na produção desses materiais, a fim de obter materiais com propriedades mecânicas e térmicas otimizadas (ZHAO, 2012). A Figura 1.2 é um exemplo de um material poroso sintetizado através de um processo de fabricação.



Figura 1.1. Foto de uma rocha arenítica fraturada.

Fonte: Dietrich *et al.*, 2005



Figura 1.2. Amostra de um meio poroso não natural.

Fonte: Zhao, 2012

O tamanho dos poros no interior da matriz sólida se estende para uma ampla faixa de valores, abrangendo ordens de grandeza molecular, de centímetros, ou ainda maiores. A matriz sólida de um meio poroso pode ser considerada como consolidada, quando o sólido é interconectado (ou seja, é possível ligar um ponto a outro qualquer no meio através de uma linha contínua no mesmo meio), ou não consolidada, quando a região dos vazios é interconectada. Seguindo a mesma linha de classificação, é possível considerar a matriz como ordenada ou desordenada quanto à distribuição de suas fases, quando ordenada, a fase sólida pode ainda ser isotrópica ou anisotrópica. Se o sólido é consolidado e isotrópico, sua estrutura pode ser baseada em uma célula com uma única cavidade, ou em uma célula com várias cavidades em seu interior. Por outro lado, se a matriz é não consolidada e isotrópica, uma célula com uma única partícula, ou uma célula composta de múltiplas partículas pode ser considerada (KAVIANY, 1995).

Os fenômenos de transporte em meios porosos vêm sendo amplamente analisados por diversas áreas da engenharia, devido à sua aplicação em campos como o escoamento de fluido em reservatórios geotérmicos, processos de separação na indústria química, filtração industrial, hidrologia, mecânica dos solos, solidificação de moldes em fundição, migração de umidade em sistemas de armazenamento de grãos, resfriamento evaporativo, meteorologia e um particular interesse na engenharia petrolífera (SATHIYAMOORTHY *et al.*, 2007).

Geralmente associado às condições de não equilíbrio térmico, está o fenômeno da convecção natural, fenômeno de transporte caracterizado pela presença de forças de empuxo em um fluido. É devido à existência de gradientes de massa específica e de forças de corpo que as forças de empuxo se mostram presentes, são elas que mantêm o escoamento do fluido (BEJAN, 2004). A convecção no manto da estrutura terrestre, o isolamento térmico de alta eficiência em edificações e coleta de energia solar são alguns dos casos em que a convecção em meios porosos saturados com fluido tem sua presença evidenciada (TAN *et al.*, 2003).

Na natureza a convecção natural é responsável por fenômenos climáticos na atmosfera, devido à incidência de raios solares sobre a superfície terrestre ou da água em oceanos, rios e mares. Esse aquecimento faz com que existam gradientes de temperatura entre as camadas inferiores e superiores da atmosfera. Ao ser aquecido, o ar tende a se elevar, criando uma região de baixa pressão, por consequência, regiões de alta pressão são resultantes da descida de ar frio. À medida que o ar quente sobe, o vapor d'água presente se condensa e dá origem a nuvens, que podem vir a provocar chuva, neve ou tempestades. Quando o gradiente de temperatura entre as camadas da atmosfera é elevado, associado à rotação da terra, esse movimento de ascensão do ar pode dar a origem a fenômenos mais intensos, como ciclones, furacões e tornados. A convecção natural também pode ser observada nos oceanos, onde a diferença de temperatura entre as águas mais frias nos polos e mais quentes nos trópicos dão origem às correntes marítimas (BEJAN, 2004 e WIKIPEDIA, 2012).

1.2 Convecção Natural em Meios Porosos

Para que a convecção natural exista em um meio poroso, é preciso que o fluido seja capaz de permear a matriz sólida, situação que somente é possível quando os poros são interconectados, como pode ser observado na Figura 1.2.

Nos meios em que a distribuição do tamanho e da forma dos poros é irregular, por exemplo o pulmão humano, experimentos mostram que a maior parte das propriedades de interesse é tomada em relação a uma área que atravessa vários poros. Essas propriedades variam regularmente com o espaço e são tomadas através de uma média (NIELD e BEJAN, 2006).

Particularmente para a indústria petrolífera, o estudo da convecção natural em meios porosos desempenha um papel fundamental para o desenvolvimento de inovações tecnológicas que possibilitem melhorias nas atividades de produção de petróleo e gás natural. O estudo da transferência de calor e do escoamento do fluido no interior dos reservatórios de petróleo envolve o conhecimento de características termo-físicas dos domínios porosos, cujas propriedades são fortemente influenciadas pelas interfaces dos constituintes.

Para que o petróleo seja formado, uma quantidade significativa de matéria orgânica deve ser acumulada em determinadas rochas sedimentares, as chamadas rochas geradoras. É no interior dessas rochas, que devido a condições de alta temperatura e pressão, o petróleo e também o gás natural são originados a partir da matéria orgânica armazenada. Uma vez formado o petróleo, a ocorrência de altas pressões na rocha geradora faz com que a rocha geradora se fracture, gerando caminhos preferenciais para o escoamento do fluido. O petróleo migra para zonas de menor pressão, no interior de rochas reservatório, também porosas, onde fica aprisionado sob uma camada de sedimentos impermeável, como representado na Figura 1.3 (MILANI *et al.*, 2001).

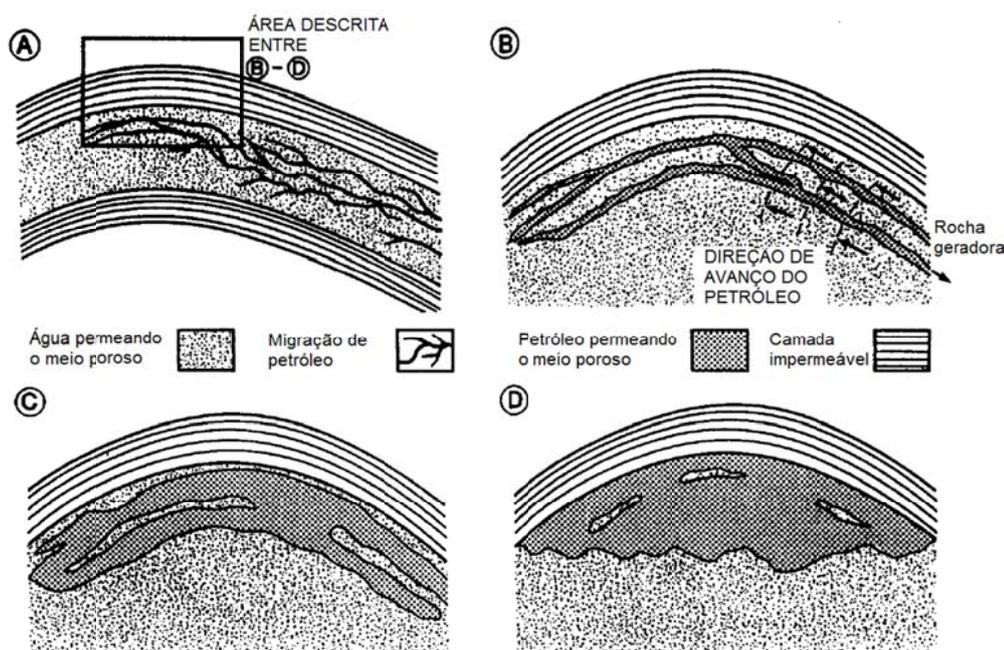


Figura 1.3. Representação da migração do petróleo a partir de rochas geradoras para o interior de uma rocha reservatório.

Adaptado de: England, 1990

Em operações de produção de petróleo e gás, é necessário um estudo aprofundado no que concerne à análise de parâmetros como permeabilidade, porosidade, condutividade térmica e intensidade de recirculação de fluido, uma vez que estes são os parâmetros que definem a maneira como ocorre a transferência de calor e o escoamento do fluido no interior deste domínio poroso. Nestas atividades, comumente são encontrados gás, água e óleo escoando simultaneamente através de meios porosos em processos de recuperação. Logo se percebe que a quantidade de fluidos escoando através da matriz porosa é uma dificuldade apresentada em problemas com aplicação prática.

1.3 Caracterização do Problema

Tendo em vista que o problema da convecção natural em meios porosos é complexo de ser descrito devido à aleatoriedade geométrica do domínio, modelos capazes de representar as diversas características que influenciam sobre a transferência de calor através destes meios são utilizados. As equações que modelam o problema dependem de propriedades termo-hidráulicas do meio. Para que o estudo desses domínios seja possível, é necessário que sejam feitas aproximações geométricas, sem que o problema seja descaracterizado, visando a obtenção de propriedades que sejam semelhantes às encontradas em um problema físico real.

Modelos que permitem o estudo do meio poroso são criados com o intuito de realizar aproximações quanto à forma e a disposição dos poros. Para isto, a técnica da média volumétrica é utilizada. Dentre as diversas abordagens existentes, este trabalho irá tratar dos modelos heterogêneo (MERRIKH e LAGE, 2005), homogêneo (VAFAI, 2000), e bi-disperso (DIETRICH *et al.*, 2005).

Na Figura 1.4 observam-se possíveis geometrias para o meio poroso real em diferentes níveis de detalhamento. Pode se observar a representação de um meio poroso fraturado, em que um reservatório de petróleo apresenta escalas micro e macroscópicas da ordem de grandeza dos poros, das fraturas e suas idealizações. Neste trabalho as idealizações para as fases onde existe sólido ou meio poroso são representadas por blocos quadrados igualmente espaçados.

Quando o meio é tratado de forma microscópica da ordem de grandeza dos poros, é possível observar um domínio heterogêneo constituído de duas fases contínuas distintas, uma fluida e outra sólida. Este é o modelo heterogêneo, contínuo ou microscópico. A interface sólido-fluida é considerada em equilíbrio térmico e as fases são regidas por diferentes equações, para descrever o domínio sólido e o domínio fluido. Nesta abordagem, uma rede de poros conectados e uma matriz sólida desconectada representam o meio poroso, sendo que os detalhes da geometria da matriz sólida são descritos, pois influenciam diretamente sobre o comportamento do fluido (MERRIKH e LAGE, 2005).

Em uma escala macroscópica da ordem de grandeza dos poros, os detalhes geométricos das interfaces entre os constituintes podem ser desprezados, considerando as fases sólida e fluida como um único meio homogêneo. Este modelo é o homogêneo, denominado na literatura também como modelo poro-contínuo ou macroscópico. O comportamento do meio é analisado a partir da média de um volume elementar representativo, que deve apresentar as mesmas propriedades para qualquer que seja o lugar no domínio em que ele é tomado (VAFAI, 2000).

Existe ainda a possibilidade de analisar o meio poroso fraturado, onde a representação das fraturas é de grande importância na análise do comportamento do fluido. Para tanto, o meio pode ser tratado de maneira microscópica da ordem de grandeza das fraturas, de tal forma que o domínio é constituído por uma fase fluida e uma fase porosa homogênea. Esta abordagem é a do modelo poroso bi-disperso, de escala da ordem de grandeza das fraturas. A matriz sólida do modelo contínuo é substituída por uma matriz porosa, sendo que as equações que modelam os fenômenos de transporte nos blocos são as mesmas utilizadas na abordagem macroscópica. Por se tratar de uma abordagem que combina os modelos macro e micro-poro, o domínio apresenta características de dupla permeabilidade e porosidade (NARASIMHAN *et al.* , 2011).

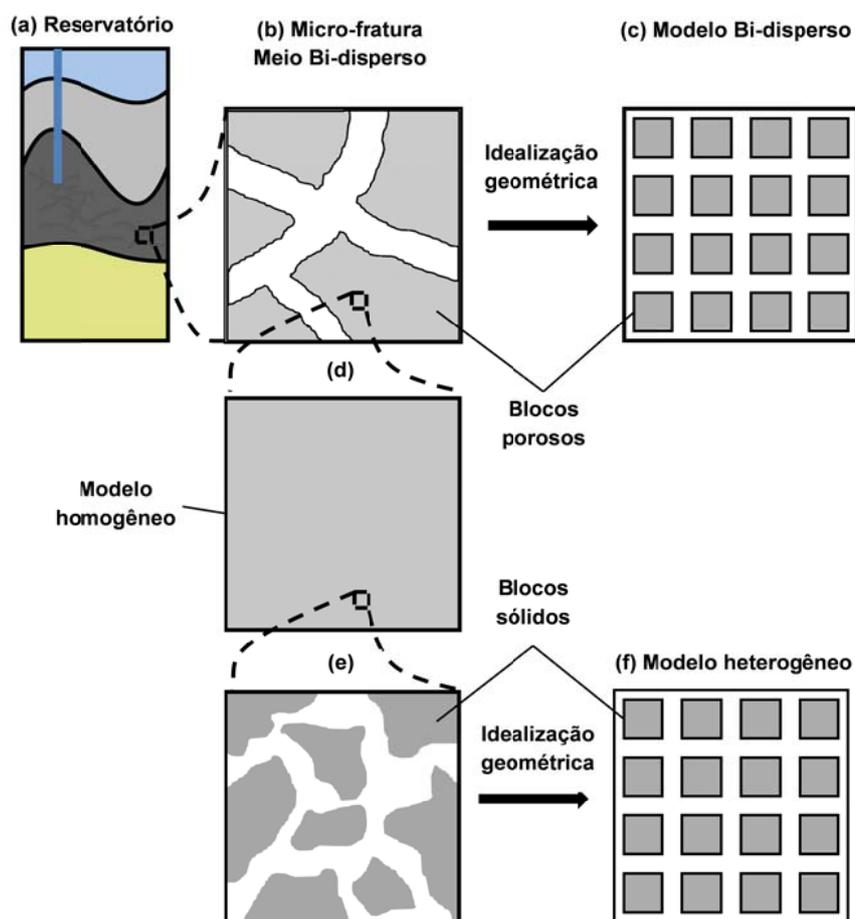


Figura 1.4. (a) Reservatório de petróleo; (b) Escala macroscópica da rocha fraturada; (c) Idealização geométrica para o modelo bi-disperso; (d) Escala macroscópica do poro; (e) Escala microscópica do poro; (f) Idealização geométrica para o modelo heterogêneo.

1.4 Objetivos

Neste trabalho é feita a investigação numérica da convecção natural através de um meio poroso bi-disperso aquecido por baixo. Uma representação da geometria pode ser vista na Figura 1.4 (c). Nesta figura observa-se que a geometria para o problema é uma cavidade quadrada e a região porosa é representada por blocos quadrados igualmente espaçados no interior da cavidade. As paredes laterais são consideradas adiabáticas, sendo a parede inferior isotermicamente aquecida e a parede superior isotermicamente resfriada.

A variação das propriedades termo-hidráulicas exerce influência sobre o comportamento do escoamento e da transferência de calor em meios porosos. O foco deste trabalho está na investigação da variação de parâmetros como número

de blocos, porosidade interna, permeabilidade e intensidade da recirculação de fluido sobre a transferência de calor por convecção através do meio. Linhas de corrente e isotermas servem de auxílio como ferramenta de análise qualitativa na previsão do comportamento do processo de transferência de calor através de meios porosos bi-dispersos. A energia transferida por calor devido à convecção natural através do meio é quantificada pelo número de Nusselt, com isto sendo possível analisar a influência da variação dos parâmetros envolvidos para o fenômeno de transporte investigado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado o estado da arte sobre o desenvolvimento do estudo da convecção natural em meios porosos bi-dispersos. Informações a respeito de trabalhos publicados na mesma linha de pesquisa são apontadas como estudos preliminares, eventualmente são feitas comparações com estes trabalhos para a verificação do problema numérico.

2.1 Convecção Natural em Cavidade Limpa

Estudos que tratam da convecção natural foram produzidos em um primeiro momento para abordar problemas simples, onde não existe restrição no movimento ou confinamento de fluido. A convecção natural em cavidade fechada foi objeto de um estudo realizado por De Vahl Davis (1983), onde se obteve uma base de comparação para a avaliação dos métodos utilizados na obtenção de soluções para este problema.

Um estudo fundamental que trata da convecção natural foi produzido por Hortmann *et al.* (1990), onde medidas quantitativas da transferência de calor por convecção natural em cavidades quadradas aquecidas lateralmente são apresentadas.

Corcione (2003) realizou um trabalho em que a convecção natural foi investigada em cavidades aquecidas por baixo, resfriadas por cima e com diferentes condições de contorno nas paredes laterais da cavidade. Foi concluído que a transferência de calor é maximizada para maiores valores de recirculação de fluido e quando superfícies adiabáticas são substituídas tanto por paredes aquecidas como resfriadas.

2.2 Convecção Natural em Cavidade Porosa

O interesse da convecção natural em meios porosos vem da abrangência de sua ocorrência na natureza. Diversas aplicações, como as atividades de perfuração, recuperação e produção de petróleo, mostram a importância da investigação de fenômenos nestes meios. Devido às características geométricas, o problema é de

grande complexidade de ser descrito, pois as interfaces entre os constituintes apresentam uma grande aleatoriedade nas suas formas e disposições. Os trabalhos apresentados na sequência tratam de modelos onde aproximações geométricas são utilizadas para representar o problema real.

2.2.1 Convecção Natural em Cavidade Porosa Heterogênea

A inserção de blocos sólidos igualmente espaçados em uma cavidade é um dos modelos utilizados no tratamento do domínio poroso, comumente denominado como modelo heterogêneo ou contínuo. House *et al.* (1990) realizaram um trabalho importante nessa área, onde foram analisados os efeitos da presença de um bloco sólido centralizado e condutivo sobre convecção natural em cavidades quadradas aquecidas lateralmente. Um estudo semelhante foi realizado por Lee (2006), onde a transferência de calor foi analisada para uma cavidade onde existe um bloco em que há geração de calor. Bhave (2006) estudou o problema da cavidade aquecida lateralmente, a fim de encontrar o tamanho ideal de um bloco inserido na cavidade, de maneira que a transferência de calor fosse maximizada.

O efeito da variação do número de blocos, da razão de condutividade térmica entre sólido e fluido e da intensidade de recirculação de fluido foi analisada por Merrikh e Lage (2005). Neste mesmo problema, Braga e de Lemos (2005a) analisaram os efeitos da geometria dos elementos sólidos no interior da cavidade, concluíram que para formas quadradas a transferência de calor se dá de forma mais intensa do que para formas cilíndricas, devido à perturbação causada no escoamento. De Lai (2009) realizou um trabalho onde a transferência de calor em cavidades fechadas aquecidas lateralmente foi analisada variando a razão de aspecto da cavidade, a razão de condutividade térmica entre sólido e fluido, o número de blocos, a fração de volume sólido e a intensidade de recirculação de fluido. Um trabalho que trata da convecção natural em cavidades quadradas preenchidas com blocos sólidos quadrados aquecidas por baixo foi realizado por Qiu (2008), onde foram encontrados resultados para a variação do número de blocos e da intensidade de recirculação de fluido.

2.2.2 Convecção Natural em Cavidade Porosa Homogênea

Na abordagem homogênea, ou poro-contínua, as fronteiras entre sólido e fluido são descritas através de propriedades médias, fazendo uso de um modelo que considera o meio como composto por uma única fase. Nithiarasu *et al.* (1997) realizaram um trabalho fundamental em que o domínio apresenta propriedades médias para representar o meio poroso, analisando os efeitos da variação de propriedades como a permeabilidade e a intensidade de recirculação de fluido. Um estudo mais extenso é apresentado por Braga e de Lemos (2005b), onde simulações foram realizadas para as abordagens contínua (heterogênea) e poro-contínua (homogênea), os resultados encontrados foram utilizados para determinar uma correlação entre as abordagens. Resultados para a convecção natural entre duas camadas porosas foram apresentados por Chen *et al.* (2009), onde a permeabilidade, a intensidade de recirculação e a razão entre as espessuras das camadas porosa e fluida exercem influência sobre a transferência de calor. Em um trabalho realizado por Bagchi e Kulacki (2011), o aquecimento por baixo de uma camada porosa sobreposta por uma camada fluida em uma cavidade fechada foi investigado. Neste trabalho concluiu-se que a transferência de calor decresce com a redução da permeabilidade e da razão entre a espessura da camada porosa e fluida, mas também é intensificada com o aumento da intensidade de recirculação.

2.2.3 Convecção Natural em Cavidade Porosa Bi-dispersa

Em estudos onde caminhos preferenciais em um meio poroso são de interesse de investigação, é necessário o uso de um modelo que seja capaz de representar as fronteiras entre meio poroso e fluido, neste caso, o modelo bi-disperso. Por apresentar um domínio em que o fluido escoar através de meios porosos e livremente através da rede de fraturas, o meio bi-disperso apresenta características de dupla permeabilidade.

Um trabalho que trata da transferência de calor através de meios bi-dispersos foi realizado por Chen *et al.* (2000), em que resultados obtidos experimentalmente levaram a conclusão de que a condutividade térmica efetiva em um meio poroso bi-disperso é menor do que em um meio contínuo. A convecção forçada através de um canal poroso bi-disperso foi analisada por Kuznetsov e Nield (2004), onde a

transferência de calor entre o canal poroso e uma matriz sólida foi objeto de análise para diversas configurações. Nield e Kuznetsov (2008) também realizaram um estudo onde uma placa vertical aquecida inserida em um meio poroso bi-disperso foi simulada numericamente, analisando os efeitos da convecção natural em um ambiente aberto.

Esta abordagem pode ser utilizada no tratamento de diversos problemas, como o de um canal onde é inserido um meio poroso. Kuznetsov e Nield (2010) investigaram a convecção forçada através de um canal parcialmente ocupado por um meio poroso bi-disperso, onde existe geração de calor nas paredes do canal, obtendo resultados para faixas de diferentes parâmetros como permeabilidade, razão de condutividade térmica, fração de volume sólido, geração de calor e posição da interface fluido-porosa. A convecção forçada através de um meio bi-disperso também foi estudada por Narasimhan *et al.* (2011), porém com a geração de calor nos blocos porosos, concluindo que a troca de calor é maior com o aumento do número de blocos e da permeabilidade dos blocos. Um trabalho semelhante também foi realizado por Narasimhan *et al.* (2012), onde um canal poroso bi-disperso com geração de calor nos blocos porosos foi analisado, concluindo que a transferência de calor é intensificada quando a porosidade externa e a velocidade média de escoamento do fluido através do canal são maiores.

Na proposição de cavidades fechadas, este modelo poroso teve diversos trabalhos publicados na investigação da convecção natural devida a um gradiente de temperatura horizontal. Revnic *et al.* (2009) realizou um trabalho onde uma cavidade quadrada bi-dispersa aquecida lateralmente foi analisada numericamente, concluindo que quando a recirculação de fluido é pouco intensa, a transferência de calor é dada predominantemente por condução. Um trabalho semelhante foi concluído por Dias *et al.* (2010), onde os efeitos da variação de propriedades termo-hidráulicas e a interferência dos blocos sobre a região de camada limite nas paredes verticais foi objeto de análise. Cavidades bi-dispersas aquecidas lateralmente também foram simuladas numericamente por De Lai *et al.* (2011), onde se conclui que a inserção de fraturas em um meio poroso homogêneo (caracterizando um meio bi-disperso), o aumento da recirculação de fluido e a redução do número de blocos otimizam a transferência de calor através deste domínio.

Com a finalidade de continuar os estudos em cavidades porosas bi-dispersas, o presente trabalho tem por objetivo uma análise da convecção natural devida a um gradiente de temperatura vertical. Uma análise paramétrica dos efeitos da variação do número de blocos, porosidade interna, intensidade de recirculação e da permeabilidade dos blocos é feita com intuito de avaliar seus efeitos sobre os fenômenos de transporte sobre este domínio.

3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia são as equações que modelam o processo de transferência de calor por convecção natural no meio poroso bi-disperso. Estas equações são adimensionalizadas com o objetivo de obter parâmetros e grupos adimensionais característicos a este domínio. O escoamento é representado tanto para o domínio das fraturas, modelado pela equação de Navier-Stokes, como para o meio poroso, representado pela equação de Darcy-Brinkman-Forchheimer (NIELD e BEJAN, 2006). São utilizadas hipóteses simplificadoras a fim de reduzir a complexidade das equações.

Propriedades que definem a maneira como o domínio é descrito são evidenciadas na formulação das equações, sendo elas de vital importância na determinação da maneira como o escoamento ocorre através destes domínios. A definição de tais propriedades é apresentada como complemento ao entendimento da descrição de meio poroso.

3.1 Hipóteses Simplificadoras

As hipóteses simplificadoras são adotadas a fim de permitir a resolução das equações diferenciais, são elas:

1. Escoamento em regime permanente, $\partial()/\partial t = 0$;
2. Escoamento laminar;
3. Escoamento bidimensional, $w = 0$ e $\partial/\partial z = 0$;
4. Escoamento de fluido newtoniano;
5. Escoamento incompressível, exceto para o termo da força de empuxo na equação da quantidade de movimento na direção y , quando ρ não é constante;
6. Escoamento monofásico;
7. O fluido possui propriedades constantes;

8. A gravidade atua somente da direção y , $g_y = -g$;
9. Dissipação viscosa desprezível, $\mu\phi = 0$;
10. Não há geração de calor no meio poroso, $q''' = 0$.

3.2 Geometria e Condições de Contorno para o Modelo Bi-Disperso

A estrutura do meio poroso bi-disperso pode ser vista como um meio poroso homogêneo onde fraturas, ou caminhos preferenciais, foram introduzidos. Esse meio apresenta dupla permeabilidade, através de uma abordagem microscópica com escala da ordem de grandeza das fraturas e as condições de contorno utilizadas neste trabalho podem ser vistas na Figura 3.1. As paredes laterais são mantidas adiabáticas, $\partial T / \partial x = 0$, enquanto a superfície inferior é isotermicamente aquecida à temperatura T_H e a superfície superior é isotermicamente resfriada à temperatura T_C . As componentes da velocidade na direção x e y são u e v , respectivamente. H é a altura e L é o comprimento da cavidade, \vec{g} é a aceleração da gravidade e d o comprimento característico dos blocos.

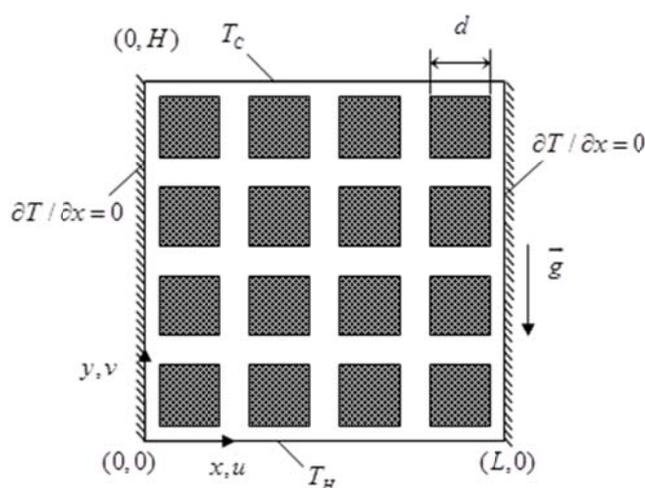


Figura 3.1. Cavidade bi-dispersa e condições de contorno utilizadas.

3.3 Adimensionalização das Equações

As equações de balanço para o modelo bi-disperso são adimensionalizadas utilizando os seguintes parâmetros adimensionais:

- para as coordenadas espaciais,

$$X = \frac{x}{H} \text{ e } Y = \frac{y}{H} \quad (3.1)$$

- para as componentes da velocidade,

$$U = \frac{uH}{\alpha_f} \text{ e } V = \frac{vH}{\alpha_f} \quad (3.2)$$

- para a pressão,

$$P = \frac{\rho H^2}{\rho_f \alpha_f^2} \quad (3.3)$$

- para a temperatura,

$$\theta = \frac{T - T_C}{T_H - T_C} \quad (3.4)$$

3.4 Equações Adimensionais para o Modelo Bi-disperso

As equações adimensionais da conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia podem ser escritas para o modelo bi-disperso da seguinte maneira:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{\phi^2} \left(U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{Pr}{\phi} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) - \left(\frac{Pr}{Da} + \frac{c_F}{Da^{1/2}} |U| \right) U \quad (3.6)$$

$$\frac{1}{\phi^2} \left(U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{Pr}{\phi} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + Ra Pr \theta - \left(\frac{Pr}{Da} + \frac{c_F}{Da^{1/2}} |U| \right) V \quad (3.7)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \kappa_m \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (3.8)$$

Nas equações (3.6) e (3.7), ϕ representa a porosidade, definida como a fração de volume ocupada pelos vazios V_f , dividida pelo volume total ocupado pela matriz sólida V_T , equação (3.9), sendo $(1-\phi)$ a fração de volume sólido.

$$\phi = \frac{V_f}{V_T} \quad (3.9)$$

Tomando uma seção transversal qualquer em um meio poroso isotrópico, dividindo a fração da área correspondente aos poros (A_f) pela área total do meio A_T , obtém-se a porosidade ϕ , equação (3.10).

$$\phi = \frac{A_f}{A_T} \quad (3.10)$$

O modelo bi-disperso apresenta característica de dupla porosidade, sendo uma existente dentro dos blocos porosos (ϕ_I) e outra externa (ϕ_E), referente ao tamanho dos blocos porosos, calculada pela expressão (3.11):

$$\phi_E = 1 - N \left(\frac{d}{H} \right)^2 \quad (3.11)$$

A porosidade interna dos blocos é definida como sendo a razão entre a fração de volumes vazios no interior dos blocos (V_{f_B}) e o volume dos blocos porosos (V_B), sendo calculada pela equação (3.12).

$$\phi_I = \frac{V_{f_B}}{V_B} = \frac{A_{f_B}}{A_B} \quad (3.12)$$

A permeabilidade é um parâmetro hidráulico que depende apenas da geometria do meio, e está relacionado ao número de Darcy (Da) nas equações (3.6) e (3.7). Este parâmetro mede a condutância do escoamento de fluido em uma matriz porosa. Um dos primeiros experimentos realizados a fim de determinar a permeabilidade de um meio poroso foi executado por Henry Darcy, onde água permeava através de uma coluna preenchida com grãos de areia, devido a um gradiente de pressão conhecido (LAGE, 1997). Para um fluido com escoamento laminar, lento e incompressível, através de um meio poroso isotrópico, pode-se obter a expressão (3.13) para a permeabilidade (NIELD e BEJAN, 2006).

$$K = -\frac{\mu_f}{\nabla p} v \quad (3.13)$$

A expressão (3.13) oferece o cálculo da permeabilidade K em função de um gradiente de pressão ∇p , da viscosidade dinâmica do fluido μ_f e do vetor da velocidade de fluido v (LAGE, 1997). Esta expressão é conhecida como a Lei de Darcy para a permeabilidade.

Uma forma de se obter a permeabilidade externa da cavidade (K_E) em um meio poroso bi-disperso é apresentada por Braga e de Lemos (2005b), equação (3.14):

$$K_E = \frac{1}{180} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} d^2 \quad (3.14)$$

A permeabilidade interna (K_I) existente no interior dos blocos porosos em um meio poroso bi-disperso é definida pela expressão (3.15).

$$K_I = -\frac{\mu_f}{\nabla p} v \quad (3.15)$$

O número de Darcy e outros parâmetros adimensionais são apresentados na sequência:

- número de Prandtl,

$$Pr = \nu_f / \alpha_f \quad (3.16)$$

- número de Rayleigh,

$$Ra = \frac{g\beta H^3 (T_H - T_C)}{\nu_f \alpha_f} \quad (3.17)$$

- número de Darcy,

$$Da = \frac{K}{H^2} \quad (3.18)$$

- razão de condutividade térmica do meio poroso em relação ao fluido,

$$\kappa_m = \frac{k_m}{k_f} \quad (3.19)$$

O coeficiente de Forchheimer, c_F , representa o coeficiente de arrasto dinâmico, o qual exerce maior influência em escoamentos com maiores números de Rayleigh e está presente nas equações (3.6) e (3.7). Este coeficiente é dado pela equação (3.20).

$$c_F = \frac{1,75}{(150\phi^3)^{1/2}} \quad (3.20)$$

Pode-se observar que as equações da conservação da quantidade de movimento, equações (3.6) e (3.7), são válidas para o domínio fluido considerando $\phi = 1$ e fazendo com que a permeabilidade tenda a um valor infinito.

Os parâmetros adimensionais que regem o modelo bi-disperso são então, o número de Rayleigh, o número de Prandtl, o número de Darcy e a razão de condutividade térmica do meio poroso em relação ao fluido. A porosidade externa, relacionada ao tamanho e ao número de blocos, exerce influência de caráter geométrico sobre a convecção na cavidade, bem como a razão de aspecto ($A = L / H$).

As condições de contorno adimensionalizadas para o modelo investigado estão apresentadas na Figura 3.2, as condições da interface fluido-porosa estão expostas em detalhes.

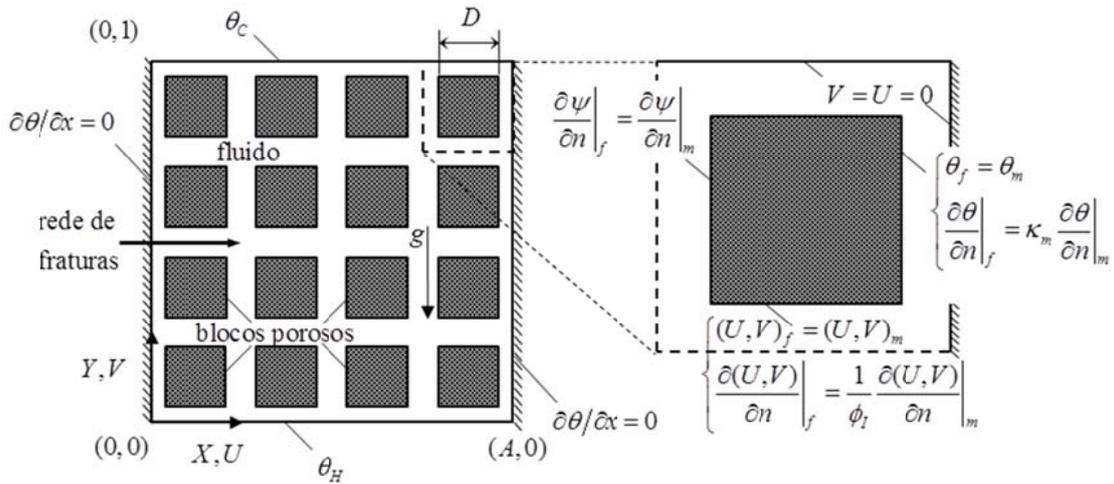


Figura 3.2. Condições de contorno adimensionais para a cavidade bi-dispersa à esquerda e à direita um detalhe na região de um bloco com as condições de contorno na interface fluido-porosa.

As condições de contorno na forma adimensional para a cavidade bi-dispersa podem ser expressas como:

$$Y = 0: U = V = 0, \theta = 1 \quad (3.21)$$

$$Y = 1: U = V = 0, \theta = 0 \quad (3.22)$$

$$\text{para } X = 0 \text{ e } X = 1 = A: \frac{\partial \theta}{\partial X} = U = V = 0 \quad (3.23)$$

nas interfaces entre meio poroso e fluido, as condições de compatibilidade são:

$$\theta_f = \theta_m; \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_f = \kappa_m \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_m \quad (3.24)$$

$$(U, V)_f = (U, V)_m; \frac{\partial (U, V)}{\partial n} \Big|_f = \frac{1}{\phi_f} \frac{\partial (U, V)}{\partial n} \Big|_m \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} \Big|_f = \frac{\partial \psi}{\partial n} \Big|_m \quad (3.26)$$

Neste capítulo foram apresentadas as equações para o fenômeno de transporte da convecção natural em meios porosos bi-dispersos. Definições de propriedades relacionadas ao meio, os parâmetros adimensionais que regem o modelo e as condições de contorno adimensionais foram expostos. A modelagem numérica das equações e uma breve descrição da metodologia são mostradas no capítulo seguinte.

4 MODELAGEM NUMÉRICA

Neste capítulo é apresentada a modelagem numérica das equações para o meio bi-disperso. A metodologia de solução utilizada na resolução do problema pelo programa FLUENT é brevemente descrita. Os critérios para a obtenção de uma solução precisa são apresentados. Parâmetros de monitoramento do fenômeno envolvido, como o número de Nusselt e as linhas de corrente, são calculados através das equações expostas.

4.1 Implementação Numérica

Para a solução numérica das equações diferenciais, o programa FLUENT é a ferramenta de trabalho, fazendo uso do método dos elementos finitos, utilizando o algoritmo SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade na resolução das equações que modelam o meio poroso bi-disperso. A malha numérica é gerada com o auxílio dos programas SOLIDWORKS e ICEM (ANSYS, 2011). A definição das propriedades do meio e do fluido é feita diretamente no FLUENT, os valores definidos para os diversos parâmetros são utilizados no processo iterativo.

A equação da conservação da massa em um volume de controle é descrita como a igualdade entre a taxa de aumento de massa no volume $D\rho_f/Dt$, pelo fluxo de massa $-\nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v})$ através desse volume, a equação (4.1) mostra essa igualdade (NIELD e BEJAN, 2006).

$$\frac{D\rho_f}{Dt} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v}) = 0 \quad (4.1)$$

A forma geral da equação da quantidade de movimento utilizada pelo FLUENT na resolução de problemas onde o escoamento é incompressível e a viscosidade dinâmica é constante apresenta o seguinte formato:

$$\rho_f \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{F} + \mathbf{S} \quad (4.2)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica, p a pressão e \mathbf{F} o vetor força de campo por unidade de volume.

A equação da quantidade de movimento para um meio poroso se diferencia da anterior apenas pela inclusão de um termo fonte (S) a mais no lado direito da equação (4.2), referente à permeabilidade e ao coeficiente de Forchheimer, dado por:

$$\mathbf{S} = -\left(\frac{\mu}{K}\mathbf{v} + \frac{c_F}{K^{1/2}}\rho|\mathbf{v}|\mathbf{v}\right) \quad (4.3)$$

O termo da força de empuxo, presente na equação da conservação da quantidade de movimento na direção y , é modelado pela aproximação de Boussinesq (BEJAN E KRAUSS, 2003). Esta aproximação está presente no contexto do programa, sendo ativada diretamente na determinação das condições do problema. O coeficiente de expansão térmico β é dado pela seguinte expressão:

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right) \quad (4.4)$$

A equação da conservação da energia apresenta a seguinte forma geral para o tratamento da transferência de calor em meios porosos:

$$(\rho c_p)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c_p)_f \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_m \nabla T) \quad (4.5)$$

sendo $(\rho c_p)_m = (1-\phi)(\rho c_p)_s + \phi(\rho c_p)_f$ e $k_m = (1-\phi)k_s + \phi k_f$.

A discretização das equações é realizada através do método dos volumes finitos, que utiliza os valores das variáveis no interior dos volumes de controle na resolução das equações. Valores de propriedades em volumes contidos nas vizinhanças de cada volume de controle são utilizados durante o processo iterativo. As equações de balanço de massa, quantidade de movimento e energia devem ser respeitadas para cada um dos volumes de controle contidos na malha computacional.

O processo iterativo é considerado convergido quando a diferença entre os resíduos é menor que 10^{-6} , ou seja, a diferença relativa entre os resíduos de iterações consecutivas deve ser menor que 10^{-6} para que a solução seja considerada precisa.

4.2 Linhas de Corrente

Para observar os efeitos da recirculação de fluido no interior da cavidade, faz-se uso das linhas de corrente, cuja função é dada pela equação (4.6).

$$\psi = \psi_{i,j} = \psi_{i,j-1} + \int_0^1 U dY = \psi_{i-1,j} + \int_0^1 -V dX \quad (4.6)$$

onde $\psi_{i,j-1}$ é o valor da função linha de corrente no volume de controle abaixo e $\psi_{i-1,j}$ o valor da desta função no volume de controle a esquerda.

4.3 Número de Nusselt

A análise da transferência de calor através da cavidade é descrita pelo gradiente de temperatura adimensional na superfície da cavidade, definido pelo número de Nusselt. Este parâmetro adimensional fornece uma medida quantitativa da transferência de calor por convecção na cavidade em relação à condução.

Aplicando o balanço de energia em uma superfície com condição de contorno conhecida, combinando a lei do resfriamento de Newton com a lei de Fourier, obtém-se o Nusselt local, que vêm da igualdade entre os fluxos condutivo e convectivo em uma superfície.

$$Nu_L = \frac{hH}{k_f} = -\left. \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right|_{Y=0;1} \quad (4.7)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Para analisar a transferência de calor por convecção que ocorre em uma superfície de forma independente da coordenada da mesma, é possível utilizar o gradiente de temperatura adimensional médio, definido por $Nu_{av} = h_{av}H / k_f$. Onde h_{av} é o coeficiente de transferência de calor convectivo médio, obtido pela definição $h_{av} = q_{av}'' / (T_H - T_C)$, q_{av}'' é o fluxo de calor na parede quente, dado por $q_{av}'' = -k_f (\partial T / \partial y)_{av:h}$.

O número de Nusselt médio pode ser obtido através da integração do número de Nusselt local em uma superfície. Considerando que o número de Nusselt deve ser o mesmo para a parede fria e para a quente, devido às condições de paredes

adiabáticas nas laterais da cavidade, então o gradiente de temperatura adimensional médio pode ser definido por:

$$Nu_{av} = \frac{h_{av} H}{k_f} = \int_0^1 Nu_L|_{Y=0} dX = -\int_0^1 \frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0} dX \quad (4.8)$$

Neste capítulo foi apresentada a modelagem numérica das equações governantes para o modelo bi-disperso, assim como um breve roteiro do modelo numérico abordado. Ainda neste capítulo foram expostas as equações que descrevem os parâmetros qualitativos e quantitativos para a investigação do problema, como as linhas de corrente, as isothermas e o número de Nusselt médio nas paredes da cavidade.

5 RESULTADOS

Serão apresentados os resultados dos problemas de verificação para o modelo bi-disperso neste capítulo. A caracterização dos resultados é feita através do monitoramento das isothermas, das linhas de corrente, do número de Nusselt médio e dos resíduos locais das equações de transporte entre duas iterações sucessivas.

A solução foi considerada convergida quando os resíduos para as equações de balanço atingiram variações da ordem de 10^{-6} e não havia variação quantitativa no número de Nusselt e nas isolinhas, monitoradas qualitativamente pelas isothermas e linhas de corrente.

O erro percentual relativo, utilizado em testes de malha e verificações em que se comparam resultados obtidos com resultados da literatura, é dado pela seguinte expressão:

$$EP = \left| \frac{\Theta_{ref} - \Theta_{cal}}{\Theta_{ref}} \right| 100\% \quad (5.1)$$

Em resultados de verificação com a literatura, Θ_{cal} representa o valor calculado neste trabalho e Θ_{ref} representa o valor de referência da literatura. Em testes de variação da malha computacional, Θ_{cal} é o valor obtido com uma malha mais refinada que o valor obtido de Θ_{ref} . No presente trabalho, erros da ordem de 1% representam um valor aceitável para a variável calculada.

5.1 Problemas de verificação

A comparação dos resultados obtidos com problemas de mesma natureza não é possível devido à inexistência de estudos realizados com a geometria e condições de contorno do presente trabalho, sendo necessária a verificação com trabalhos que abordem modelos e condições de contorno semelhantes aos aqui tratados. Por se tratarem de estudos preliminares ao problema em questão e por apresentarem

resultados que podem ser utilizados como base para comparação, estes trabalhos conferem credibilidade ao modelo aqui estudado.

5.1.1 Caverna Limpa Aquecida Lateralmente

Na Tabela 5.1 é feita uma comparação com resultados obtidos para a simulação da convecção natural de fluido em uma caverna fechada aquecida lateralmente. Nela foi utilizada uma malha que contém um bloco em seu interior, porém para o bloco foi considerada uma permeabilidade bastante elevada e uma porosidade com valor unitário, ou seja, o volume de sólido é igual a zero. Estas considerações são feitas a fim utilizar o modelo proposto para tratar o meio como composto somente por fluido e compará-lo com trabalhos em que ele foi tratado desta maneira.

Tabela 5.1. Nu_{av} para caverna quadrada preenchida com fluido aquecida lateralmente com $Da = 10^{+8}$ e $\phi_t = 1$.

Ra	Lage e Bejan (1991)	Merrick e Lage (2005)	Presente
10^7	17,900	16,625	16,889
10^8	31,800	31,200	31,143

Nesta tabela é possível observar que os resultados obtidos para o meio bi-disperso em que a região do bloco foi considerada fluida são próximos dos valores obtidos em trabalhos para a caverna limpa. Esta proximidade verifica o tratamento do modelo proposto como uma aproximação para a caverna limpa.

5.1.2 Caverna Porosa Homogênea Aquecida Lateralmente

Resultados para o meio homogêneo também foram verificados, pois constituem o interior dos blocos no modelo bi-disperso. Foram simulados casos que tratam de cavernas porosas homogêneas aquecidas lateralmente com altos valores de número de Rayleigh. A permeabilidade dos blocos teve seu efeito avaliado para meios pouco e muito permeáveis, considerando diferentes porosidades internas e

diferentes números de Darcy. A comparação entre os resultados obtidos e a literatura pode ser observada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Nu_{av} para cavidade quadrada porosa homogênea aquecida lateralmente.

Da	Ra	$\phi_l = 0,4$			$\phi_l = 0,9$		
		Nithiarasu <i>et al.</i> (1997)	Chen <i>et al.</i> (2009)	Presente	Nithiarasu <i>et al.</i> (1997)	Chen <i>et al.</i> (2009)	Presente
10^{-4}	10^7	7,810	7,860	8,054	9,202	9,490	9,546
10^{-6}	10^9	11,460	12,390	12,400	12,010	13,300	13,093

Os resultados obtidos são coerentes com os encontrados nos trabalhos existentes na literatura para a cavidade homogênea aquecida lateralmente. A verificação destes resultados mostra que o modelo proposto é capaz de representar o meio poroso homogêneo.

5.1.3 Cavidade Limpa Aquecida Por Baixo

Foram realizadas simulações para a cavidade quadrada aquecida por baixo sem a influência de blocos porosos ou sólidos em seu interior. A influência da permeabilidade dos blocos é suprimida fazendo com que o número de Darcy seja um valor significativamente elevado, tornando-os bastante permeáveis e facilitando o escoamento de fluido através dos mesmos. O volume de sólido nos blocos é reduzido a um valor nulo, eliminando o efeito da fase sólida sobre o escoamento.

Valores obtidos para o número de Nusselt médio na parede aquecida foram comparados com a solução de referência de Qiu (2008), e podem ser observados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Nu_{av} para a cavidade limpa aquecida por baixo.

Ra	Nu_{av}	
	Qiu (2008)	Presente
10^5	3,895	3,911
10^6	6,171	6,096

A proximidade dos resultados encontrados com os previamente obtidos verifica o modelo aplicado para a convecção natural devida a um gradiente vertical de temperatura. Da mesma forma, percebe-se que o tratamento do bloco como sendo composto por fluido é uma boa aproximação para a cavidade limpa.

5.1.4 Cavidade Com Bloco Centralizado Aquecida Por Baixo

Para tratar do aquecimento por baixo com blocos inseridos em uma cavidade, foi feita uma comparação de resultados obtidos por Qiu (2008), para uma cavidade com bloco centralizado e condutor de calor. Os resultados podem ser vistos na Tabela 5.4, onde D é o comprimento adimensional dos blocos, κ é a razão de condutividade térmica entre sólido e fluido e $Pr = 1$.

Tabela 5.4. Nu_{av} para cavidade quadrada preenchida com um bloco condutivo centralizado aquecida por baixo com $D = 0,8$ e $\kappa = 1$.

Ra	Qiu (2008)	Presente
1×10^5	4,639	4,701
5×10^5	6,265	6,324
1×10^6	6,954	6,991
5×10^6	9,866	9,689

Os resultados encontrados para as verificações são próximos aos observados nos trabalhos de referência apresentados. Estas comparações fornecem credibilidade ao emprego do modelo numérico proposto, de maneira que as soluções encontradas representam o fenômeno de transporte investigado.

6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA: DA CAVIDADE BI-DISPERSA

Neste capítulo são apresentados os parâmetros que foram variados para a simulação da convecção natural através da cavidade porosa bi-dispersa. Os resultados encontrados são analisados através de linhas de corrente, isothermas e números de Nusselt, observando os efeitos da variação dos parâmetros que exercem influência sobre a transferência de calor.

6.1 Efeito da Variação dos Parâmetros para a Cavidade Bi-dispersa

A Tabela 6.1 apresenta os parâmetros fixos ou constantes do problema, sendo eles o número de Prandtl (Pr), a porosidade externa (ϕ_E), a razão de aspecto (A) e a razão de condutividade térmica entre meio poroso e fluido (κ_m).

Tabela 6.1. Resumo dos valores dos parâmetros constantes para a cavidade bi-dispersa.

Pr	ϕ_E	A	κ_m
1	0,36	1	1

Os parâmetros variados, para o presente trabalho, são o número de Rayleigh (Ra), o número de Darcy (Da), a porosidade interna (ϕ_I) e o número de blocos (N). A Tabela 6.2 mostra as faixas dos parâmetros variados.

Tabela 6.2. Resumo dos valores dos parâmetros variados para a cavidade bi-dispersa.

Ra	10^5 ; 10^6 ; 10^7
Da	10^{-4} ; 10^{-5} ; 10^{-6} ; 10^{-8}
N	1; 4; 16; 36; 64
ϕ_I	0,4 ; 0,6 ; 1

Os parâmetros que modelam o problema foram variados para estes determinados valores para abranger uma ampla faixa de resultados. O número de Rayleigh foi variado entre 10^5 e 10^7 , visando abranger resultados para casos em que praticamente não existe convecção, até casos onde a convecção quase atinge um regime turbulento. O número de Darcy foi considerado para uma faixa entre 10^{-4} e 10^{-8} , sendo para blocos muito permeáveis até blocos praticamente sólidos. Os valores de 0,4, 0,6 e 1 foram adotados para a porosidade dos blocos. O número de blocos na cavidade foi variado entre 1 e 64 blocos.

6.2 Teste de Malha para o Modelo Bi-Disperso

Para o problema bi-disperso, inicialmente é feito um teste de malha para condições restritivas do problema e os resultados são avaliados através do número de Nusselt na parede inferior da cavidade. Foi investigado um caso em que a permeabilidade dos blocos é baixa, de número de Darcy igual a 10^{-8} e porosidade interna de 0,6. O número de blocos é igual a 64 e um alto valor de número de Rayleigh (10^7) é utilizado. Os valores encontrados para o número de Nusselt tomado na superfície inferior da cavidade estão apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3. Nu_{av} para cavidade bi-dispersa aquecida por baixo para $Ra = 10^7$.

Ra	Malha	Nu_{av}	Erro Percentual
10^7	100x100	2,727	18,103%
	200x200	2,442	5,760%
	300x300	2,333	1,039%
	400x400	2,309	-

Os erros percentuais encontrados entre uma malha e outra tendem a diminuir com o refino, o que indica que para malhas mais refinadas, os resultados se tornam independentes da malha. Devido ao fato de o erro entre as malhas de 300x300 e 400x400 volumes de controle ser próximo de 1%, a solução encontrada utilizando uma malha de 300x300 elementos se mostra adequada.

6.3 Simulação Numérica para Cavidade Bi-dispersa

Neste capítulo são apresentados os resultados para a variação de Ra , Da e N para as configurações com $\phi_l = 0,4$. Observa-se que a porosidade interna exerce pouca influência sobre o processo de transferência de calor por convecção, uma vez que a permeabilidade, o número de blocos e o número de Rayleigh são os parâmetros que exercem influência significativa sobre a forma com que o fluido irá escoar através da matriz porosa. As isothermas e linhas de corrente para a porosidade interna de 0,6 são mostradas no Apêndice A.

Na Figura 6.1 estão apresentadas as linhas de corrente para $Ra = 10^5$ e $\phi_l = 0,4$ para a variação de N e Da , observa-se que o fluido escoar através dos blocos para configurações de $Da = 10^{-4}$ e $Da = 10^{-5}$, à medida que a permeabilidade é reduzida variando Da para 10^{-6} e 10^{-8} , o fluido é forçado a escoar pelas fraturas. A variação da porosidade interna não exerce efeito significativo sobre o escoamento do fluido. O número de blocos interfere na forma sobre a qual o escoamento ocorre, de maneira que uma ou mais células de recirculação podem ser observadas.

Na Figura 6.2 pode-se observar as isothermas para $Ra = 10^5$ e $\phi_l = 0,4$ para a variação de N e Da , através delas é possível concluir que a transferência de calor é dada puramente por condução, exceto para o caso em que $N = 1$ e $Da = 10^{-4}$. A estratificação horizontal das isothermas é característica fenômeno de condução pura. Quando o escoamento do fluido é pouco convectivo, menores velocidades no escoamento do fluido estão presentes e menos energia térmica é transportada por convecção.

Estão apresentadas na Figura 6.3 as linhas de corrente para $Ra = 10^6$ e $\phi_l = 0,4$ para a variação dos mesmos parâmetros. Nota-se que para baixas permeabilidades o fluido escoar através dos blocos para qualquer configuração. Quando Da é reduzido, o fluido é forçado a escoar preferencialmente pela rede de fraturas. O escoamento tem características de uma ou mais células de recirculação de acordo com o número de blocos.

Na Figura 6.4, para $Ra = 10^6$, $\phi_l = 0,4$ e variação de N e Da , intensifica-se a transferência de calor por convecção, fato observado pela verticalização das isothermas em casos com mais de um bloco e maiores permeabilidades. À medida

que N aumenta e Da diminui, a convecção na cavidade é dificultada e as linhas de temperatura constante são estratificadas, evidenciando a condução como fenômeno de transporte dominante.

Na Figura 6.5 as linhas de corrente para $Ra = 10^7$ e $\phi_l = 0,4$ para a variação de N e Da podem ser visualizadas, verifica-se uma maior invasão de fluido para o interior dos blocos do que nos casos menos convectivos, causada pelas maiores velocidades de escoamento na cavidade. A redução da permeabilidade, porém, restringe o movimento de fluido para o interior dos blocos. O aumento do número de blocos também é responsável pela restrição na convecção do fluido, fazendo com que o escoamento seja dificultado ao contornar os blocos.

Estão apresentadas na Figura 6.6 as isotermas para $Ra = 10^7$, $\phi_l = 0,4$ e variação de N e Da , através delas é possível observar que verticalização das linhas de temperatura constante indica que calor está sendo transferido por convecção. A intensidade com que esta transferência ocorre tende a diminuir com a redução de Da e com o aumento de N , fenômeno observado pela presença de perfis isotérmicos mais horizontalizados.

Conforme comentado, as linhas de corrente e isotermas para os casos com $\phi_l = 0,6$ apresentam comportamento muito semelhante aos com $\phi_l = 0,4$ e podem ser observados no Apêndice A. Os valores para os números de Nusselt pouco variam com a variação na porosidade interna, indicando que a transferência de calor através de meios com diferentes porosidades dos blocos é a praticamente a mesma. Esta semelhança entre os casos com diferentes porosidades internas pode ser observada nas tabelas presentes no Apêndice B, que apresentam os valores de número de Nusselt para todos os casos.

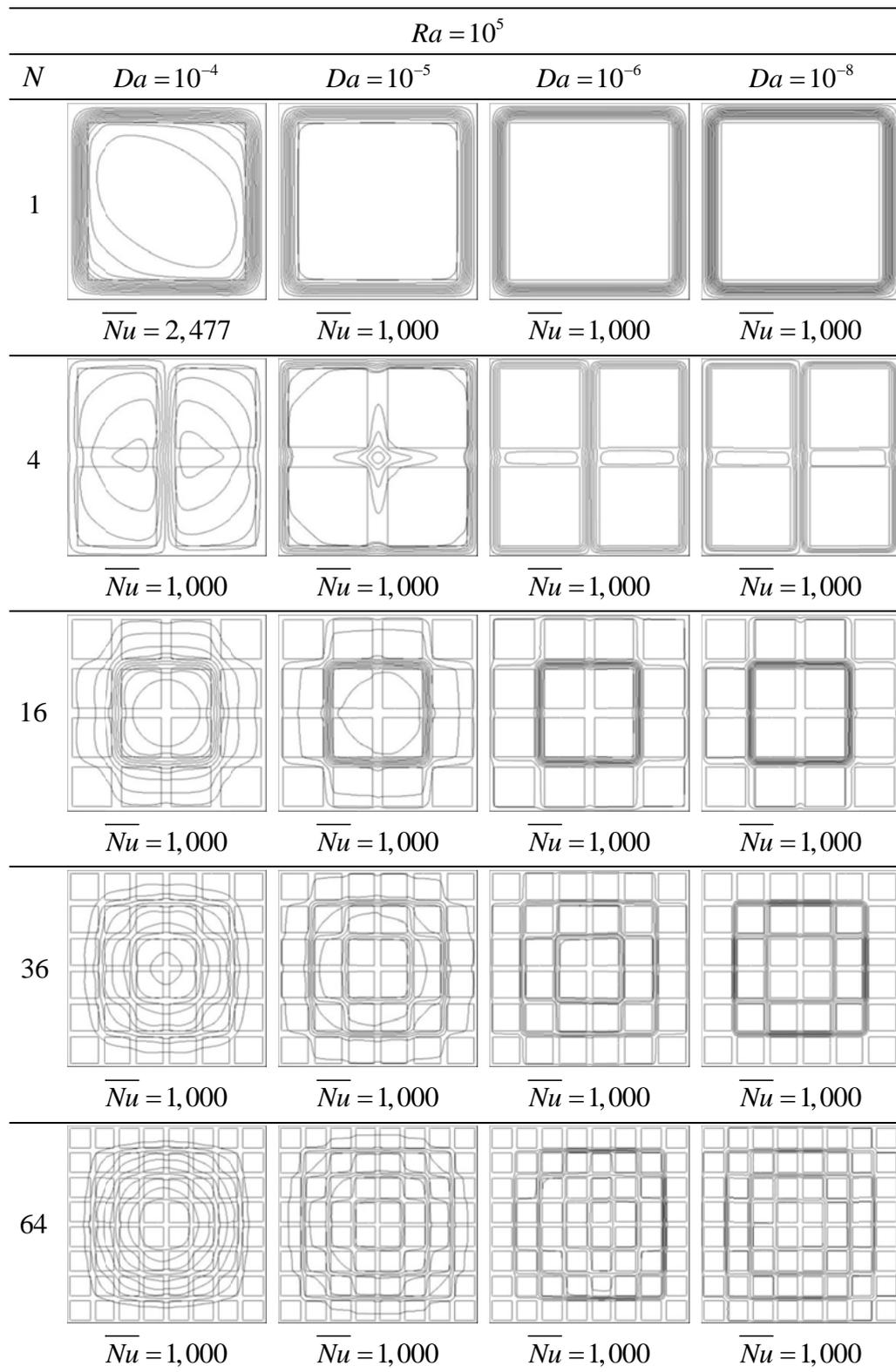


Figura 6.1. Linhas de corrente para $Ra = 10^5$ e $\phi_l = 0,4$.

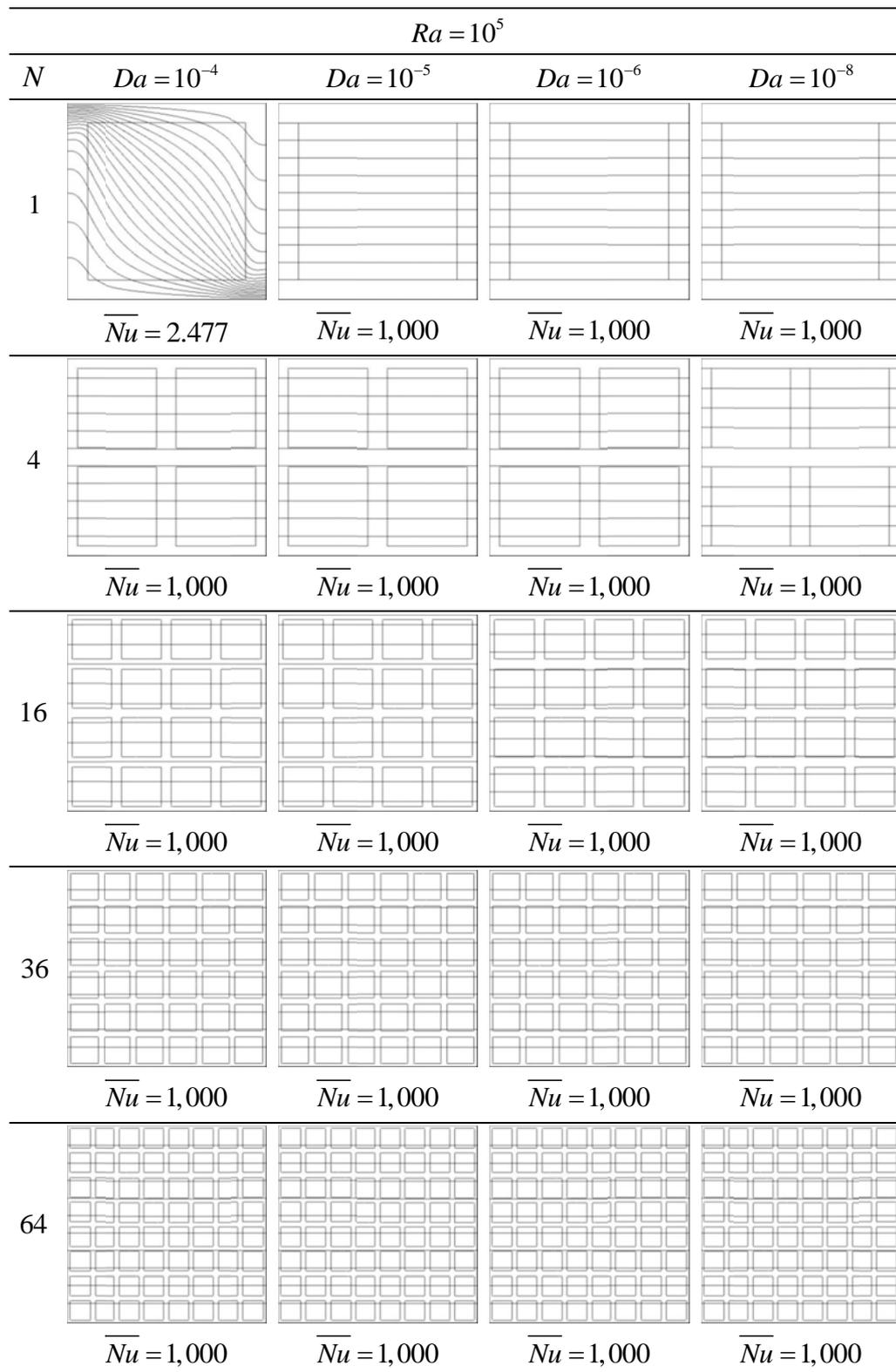


Figura 6.2. Isotermas para $Ra = 10^5$ e $\phi_l = 0,4$.

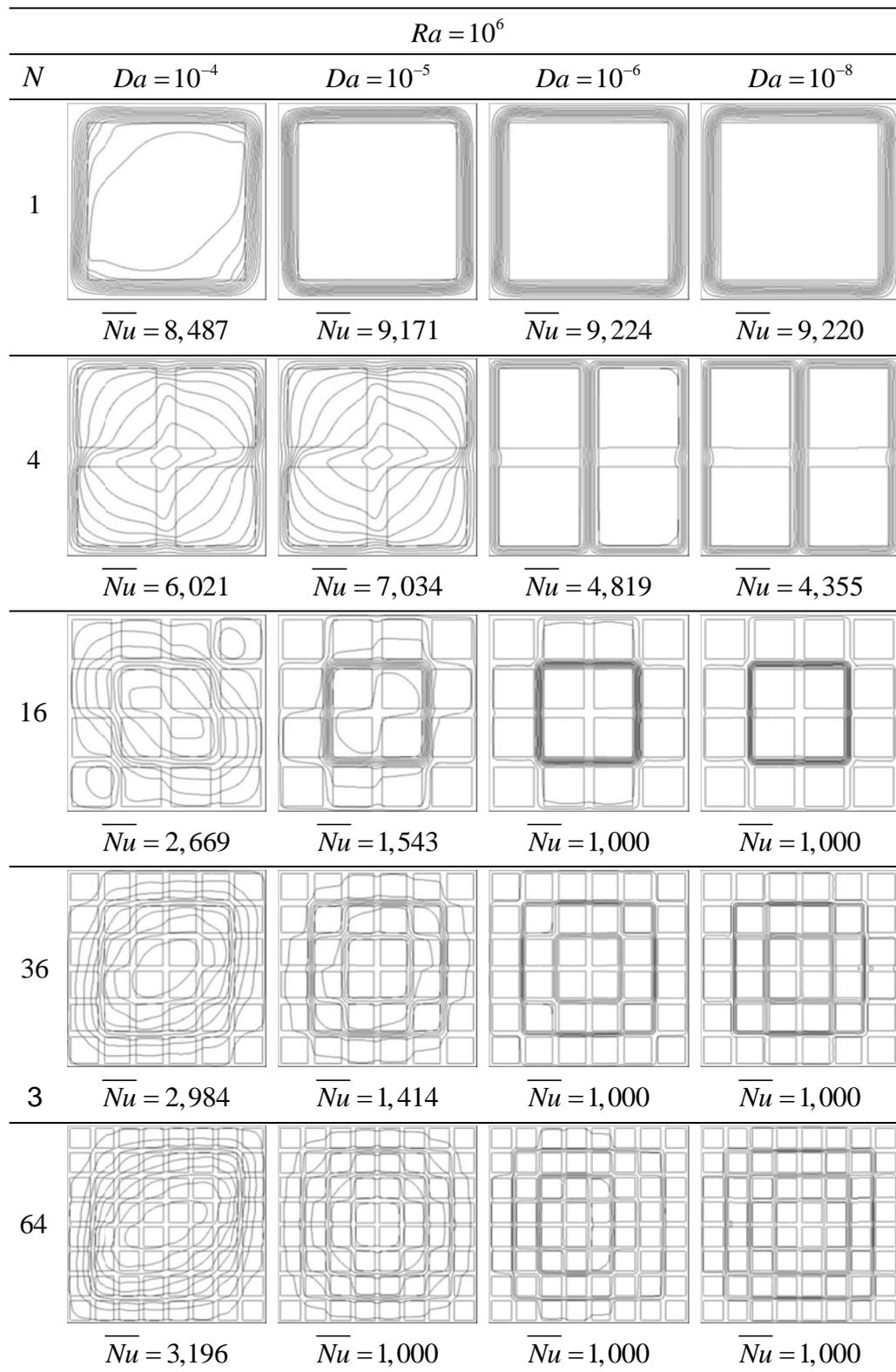


Figura 6.3. Linhas de corrente para $Ra = 10^6$ e $\phi_l = 0,4$.

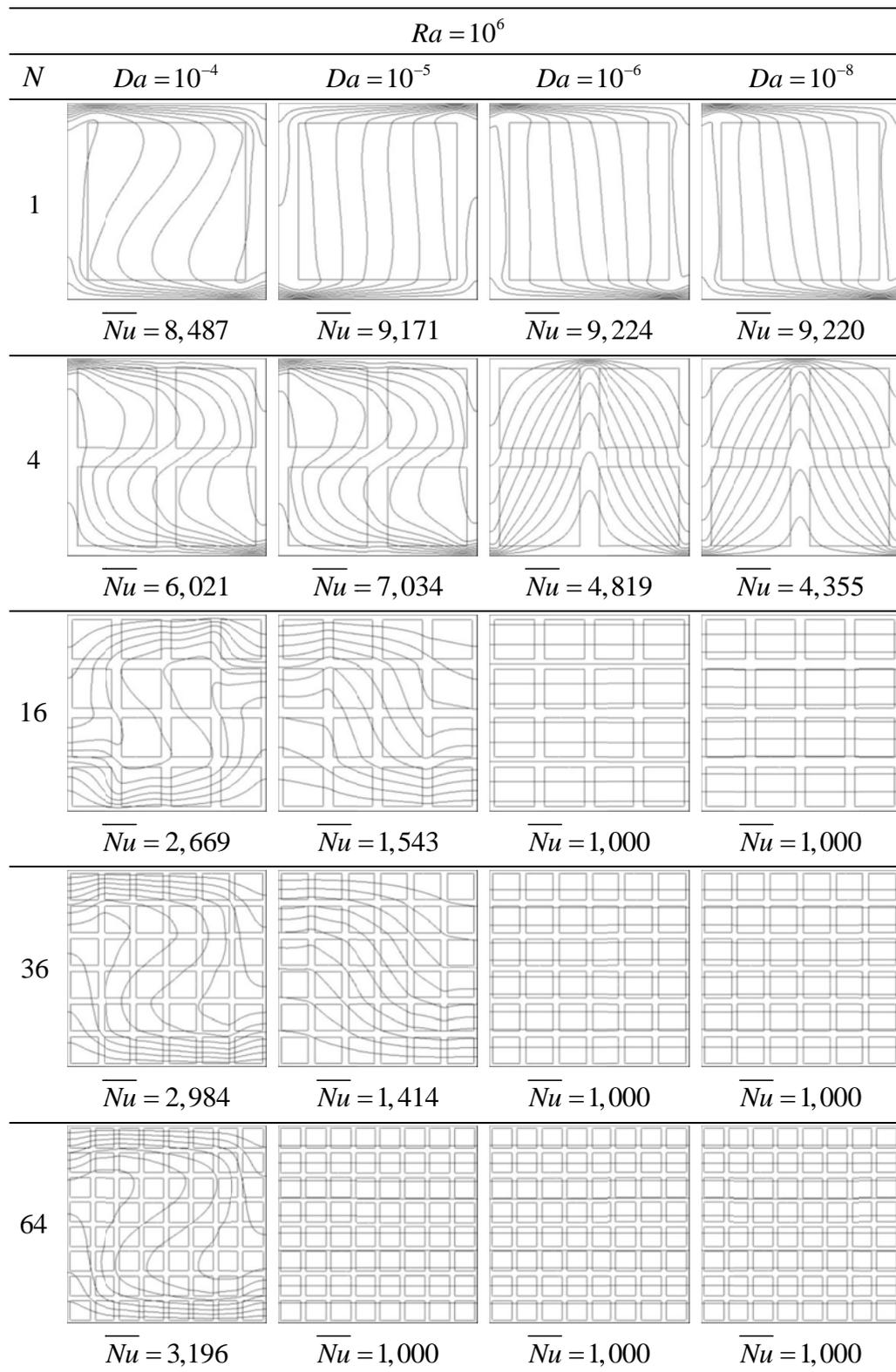


Figura 6.4. Isotermas para $Ra = 10^6$ e $\phi_l = 0,4$.

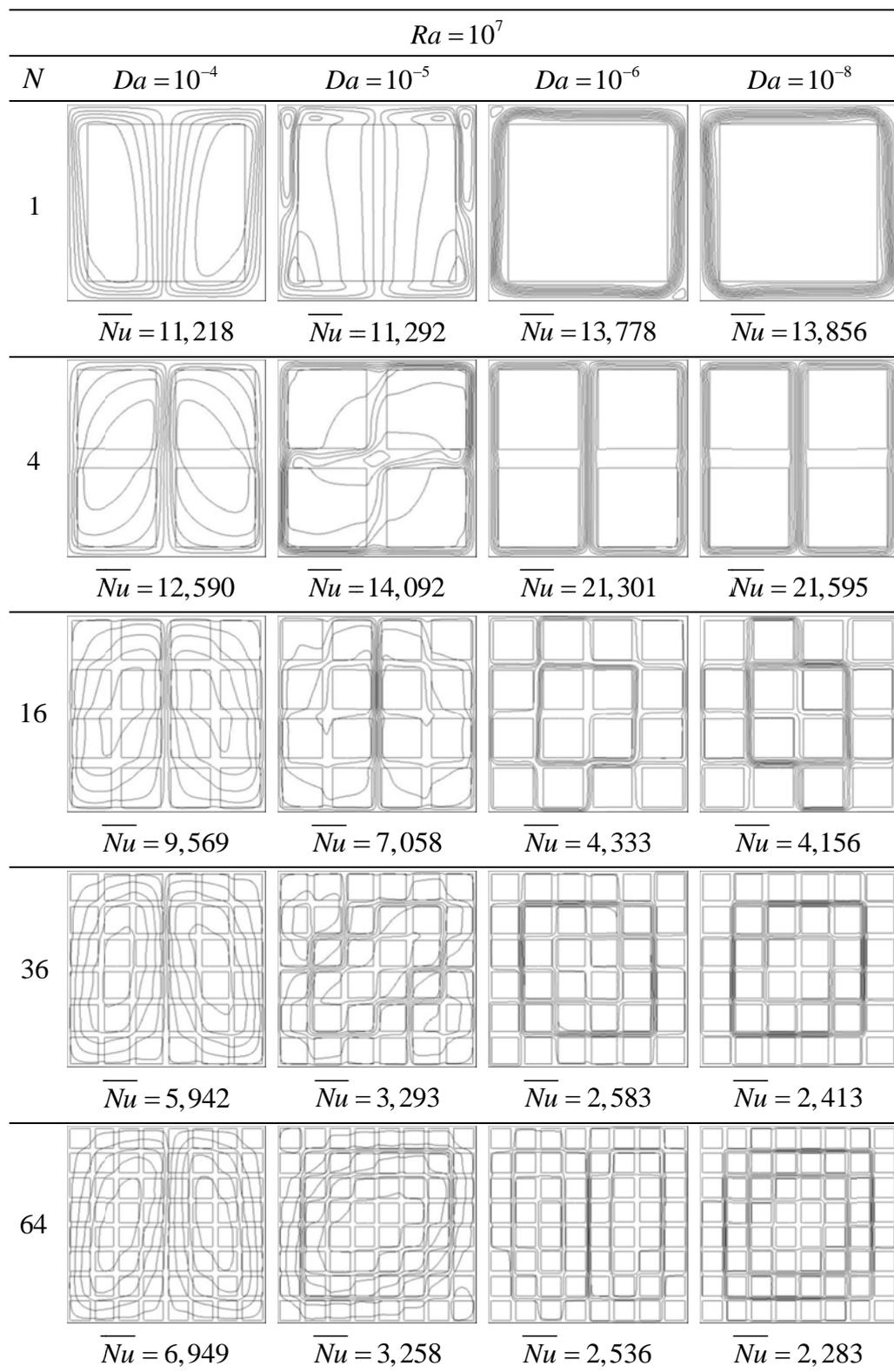


Figura 6.5. Linhas de corrente para $Ra = 10^7$ e $\phi_l = 0,4$.

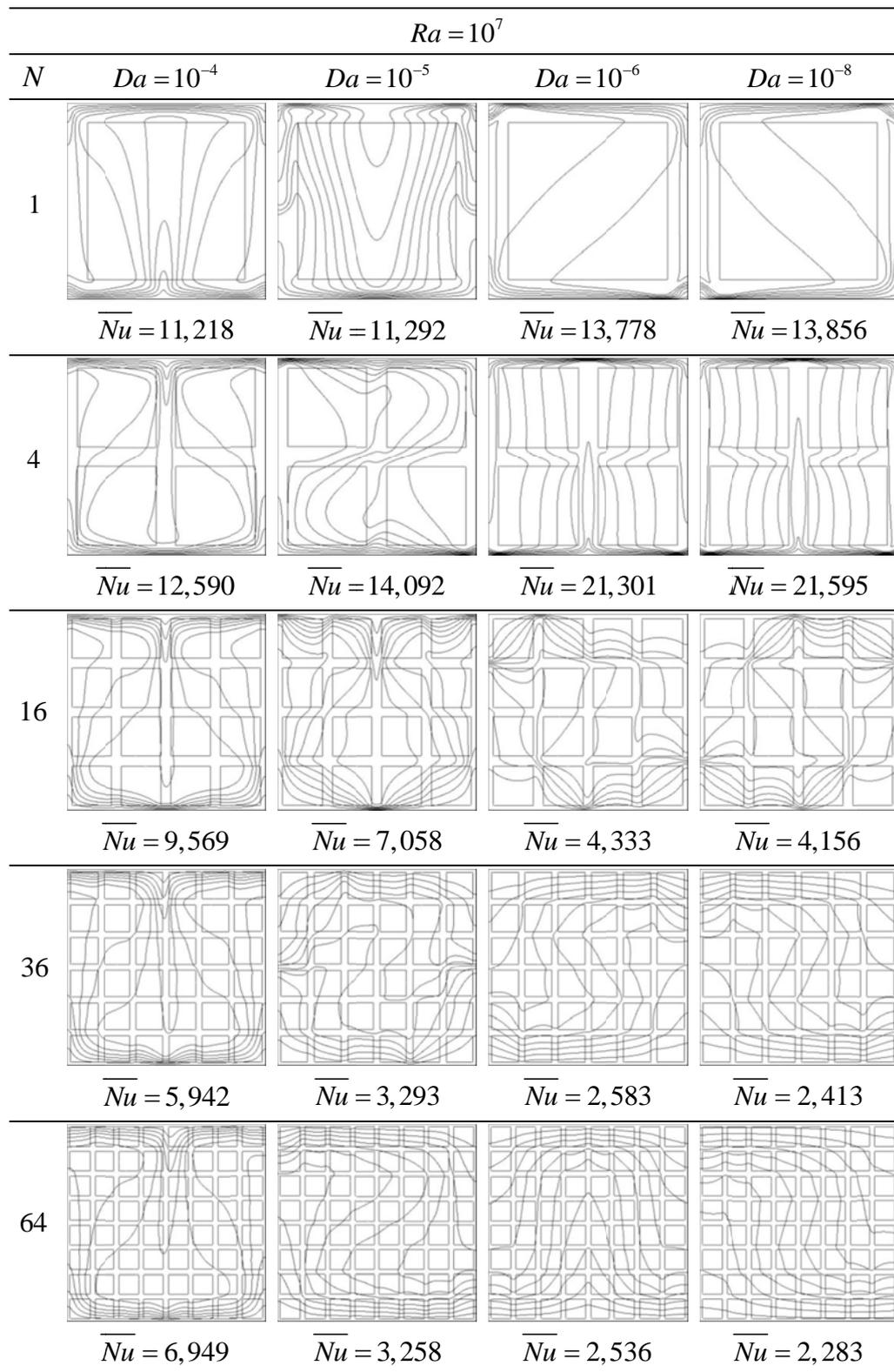


Figura 6.6. Isotermas para $Ra = 10^7$ e $\phi_l = 0,4$.

6.3.1 Efeito da Variação do Número de Rayleigh

Como observado, o efeito do aumento do número de Rayleigh é o de intensificar a recirculação de fluido no interior da cavidade, o que faz com que o processo convectivo seja mais expressivo na transferência de calor. O efeito da variação do número de Rayleigh sobre as linhas de corrente e isothermas em um caso em que $Da = 10^{-5}$, $N = 16$ e $\phi_l = 0,4$ podem ser vistos na Figura 6.7.

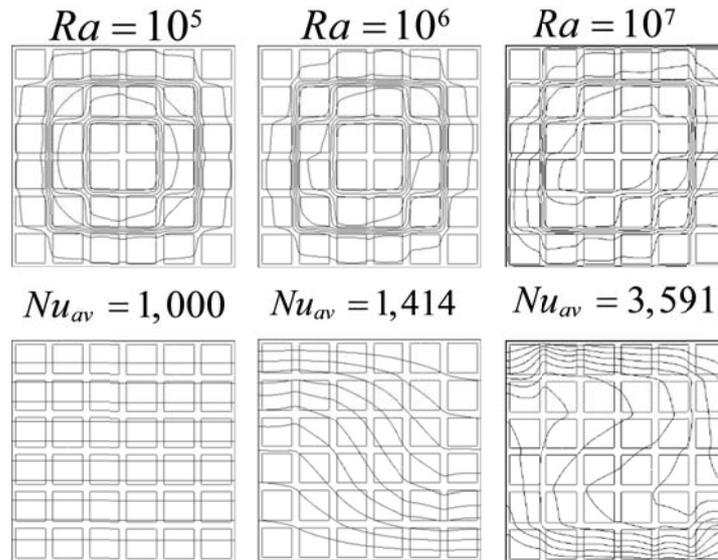


Figura 6.7. Variação do número de Rayleigh para $Da = 10^{-5}$, $N = 16$ e $\phi_l = 0,4$.

Neste caso o fluido escoia na cavidade preferencialmente em único sentido, formando uma grande célula de recirculação, como observado através das linhas de corrente. No caso em que $Ra = 10^5$ as isothermas estão estratificadas na horizontal, indicando um regime puramente condutivo, com o aumento de Rayleigh, a transferência de calor por convecção através do meio é intensificada, como observado pela verticalização das isothermas.

Na Figura 6.8, percebe-se que para uma mesma configuração de permeabilidade e número de blocos, o aumento de Ra faz com que haja um aumento no Nu_{av} . Em praticamente todos os casos em que $Ra = 10^5$ e em boa parte dos casos em que $Ra = 10^6$, o escoamento apresenta um comportamento puramente condutivo, caracterizado pelo número de Nusselt unitário e como observado pela estratificação horizontal das isothermas. Nos casos em que $Ra = 10^7$ nota-se que a

transferência de calor por convecção é mais intensa do que nas demais configurações.

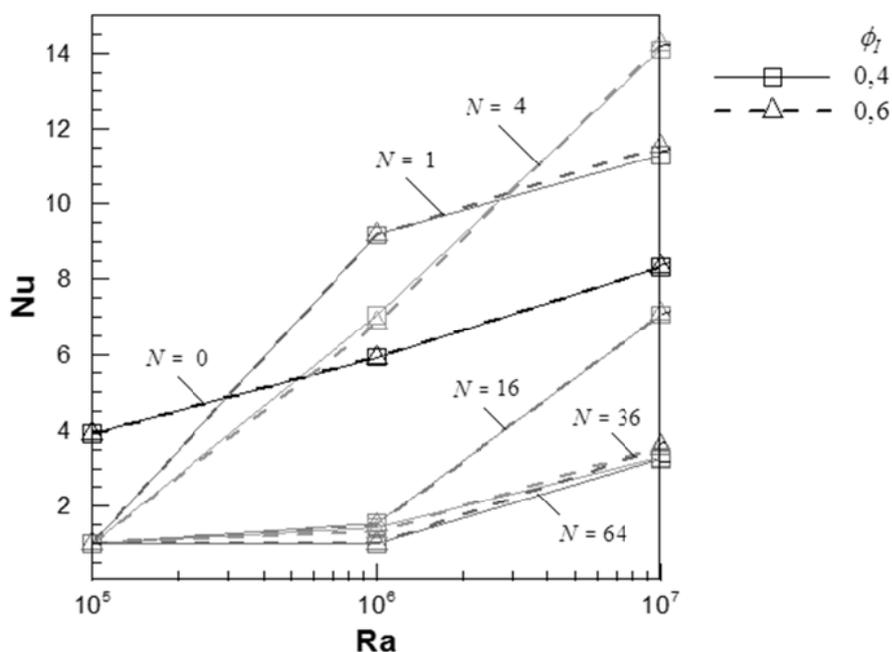


Figura 6.8. Número de Nusselt médio versus número de Rayleigh, para $Da = 10^{-5}$.

O aumento no número de Nusselt em relação aos casos sem nenhum bloco somente é observado para $N = 1$ e $N = 4$, pois nestes casos os blocos atuam como formadores de caminhos preferenciais para o escoamento do fluido. Em casos em que $N = 16$, 36 ou 64 os blocos exercem influência sobre o escoamento do fluido, reduzindo a transferência de calor.

6.3.2 Efeito da Variação do Número de Darcy

A Figura 6.9 mostra como a redução do número de Darcy nos blocos exerce influência sobre a transferência de calor para o caso onde $Ra = 10^6$, $N = 16$ e $\phi_1 = 0,4$. Quando a permeabilidade é reduzida, as linhas de corrente indicam que o fluido deixa de escoar através dos blocos porosos e as isothermas indicam que a transferência de calor se dá predominantemente por condução, fenômeno de transporte observado pela estratificação horizontal das isothermas.

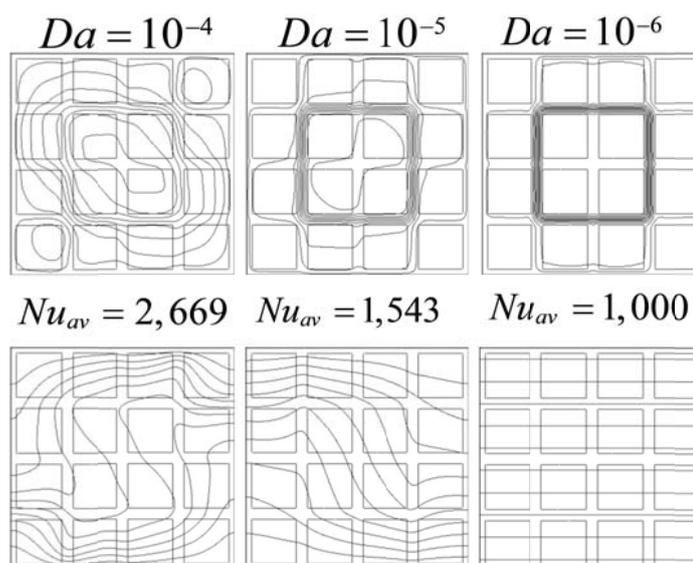


Figura 6.9. Variação do número de Darcy para $Ra = 10^6$, $N = 16$ e $\phi_l = 0,4$.

Ao perder energia contornando obstáculos pouco permeáveis, em casos em o número de Darcy é menor, a transferência de calor por condução passa a ser mais pronunciável, em geral reduzindo a troca de calor através da cavidade.

Na Figura 6.10, percebe-se que para $N = 16$ a tendência na redução do número de Nusselt com a redução do número de Darcy ocorre para qualquer valor de número de Rayleigh.

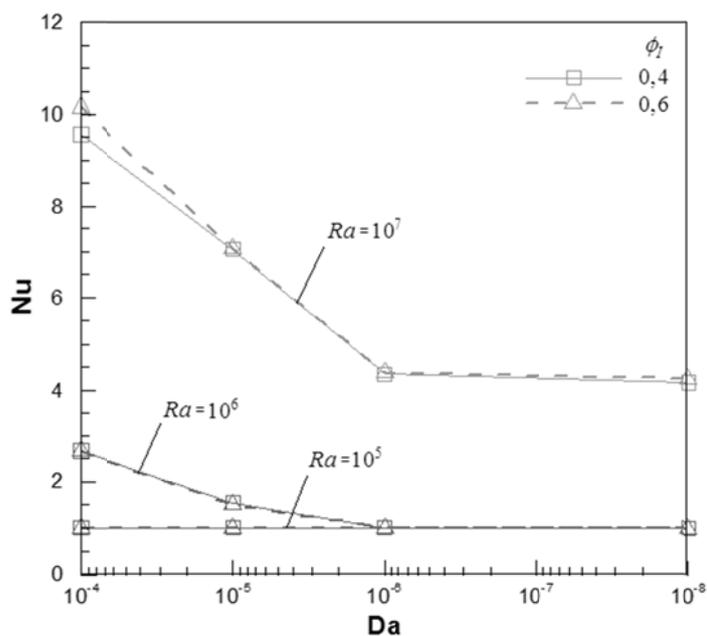


Figura 6.10. Número de Nusselt médio versus número de Darcy, para $N = 16$.

O mesmo não ocorre para $N=4$ e $Ra=10^7$, neste caso, ao reduzir a permeabilidade dos blocos, o fluido é forçado a escoar através dos caminhos preferenciais. Como o número de obstáculos é menor, o fluido perde menos energia ao reduzir sua velocidade contornando os blocos, aumentando o número de Nusselt e a transferência de calor, como pode ser visto na Figura 6.11.

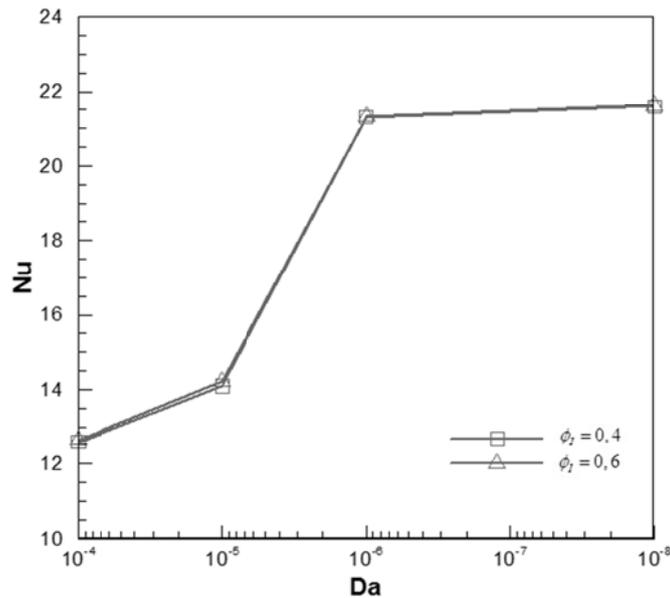


Figura 6.11. Número de Nusselt versus número de Darcy, para $N=4$ e $Ra=10^7$.

A intensificação da transferência de calor com a redução do número de Darcy para os casos em que $N=1$, $Ra=10^6$ e 10^7 também é observada. Este efeito ocorre devido ao escoamento preferencial de fluido entre os blocos, observado pelas linhas de corrente limitadas à região das fraturas e pode ser visto pela verticalização das isoterms.

6.3.3 Efeito da Variação do Número de Blocos

O aumento de N tende a reduzir a transferência de calor, devido à extensão no número de obstáculos no interior da cavidade, o que reduz a magnitude do processo convectivo. Porém em casos em que $Ra=10^7$, é possível observar um aumento no Nu para $N=1$ e $N=4$. No caso em que existe apenas um bloco poroso, o fluido perde velocidade ao escoar através do bloco para $Da=10^{-4}$ e

$Da = 10^{-5}$. Quando $Da = 10^{-6}$ e $Da = 10^{-8}$, o fluido deixa de escoar através do bloco e é forçado a recircular em uma única direção, o que intensifica a transferência de calor. Em geral, como observado nas Figuras 6.1, 6.3 e 6.5, quando mais de 16 blocos estão presentes no interior da cavidade, o escoamento do fluido é dificultado pois um número maior de obstáculos deve ser contornado, reduzindo a transferência de calor por convecção.

Na Figura 6.12 observa-se um caso em que $Da = 10^{-4}$, para a variação de N com diferentes Ra . Para $Ra = 10^5$, a transferência de calor diminui quando o número de blocos aumenta até 4 blocos na cavidade e a condução pura é o fenômeno observado nos casos com mais blocos, efeito percebido pelo valor unitário do número de Nusselt. Para $Ra = 10^6$ existe uma tendência na redução da transferência de calor até 16 blocos, quando o número de blocos aumenta, existe um pequeno aumento na transferência de calor através do meio. Com o fluido ainda mais convectivo, para $Ra = 10^7$ nota-se que a transferência de calor é intensificada para $N = 64$. Este efeito pode ser explicado pela relativamente baixa permeabilidade dos blocos e como visto pelas linhas de corrente, o fluido escoar através dos blocos sem grandes alterações no seu trajeto, aumentando o número de Nusselt.

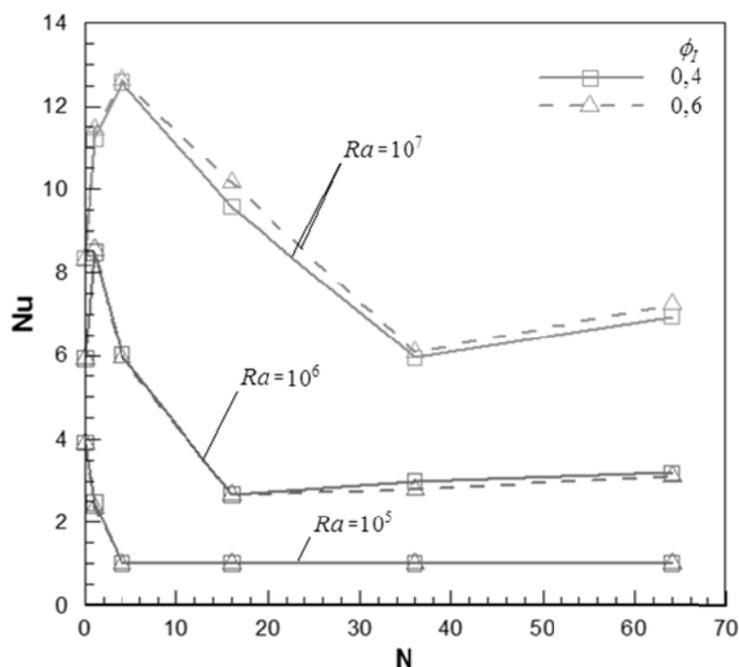


Figura 6.12. Número de Nusselt médio versus número de blocos, para $Da = 10^{-4}$.

Porém quando a permeabilidade nos blocos é reduzida, caso mostrado na Figura 6.13, os blocos atuam como obstáculos e o fluido é forçado a escoar na região entre os blocos. Quando o fluido se depara com estes obstáculos, perde velocidade e o processo de transferência de calor por convecção tende a ser reduzido.

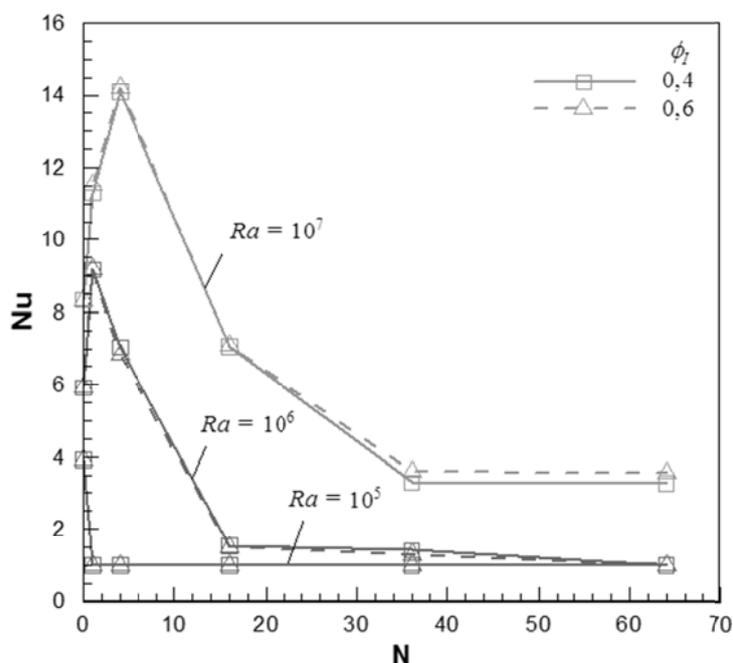


Figura 6.13. Número de Nusselt médio versus número de blocos, para $Da = 10^{-5}$.

Para $Ra = 10^5$, o número de blocos exerce pouca influência sobre a transferência de calor por convecção, uma vez que para a grande maioria dos casos ela é dada puramente por condução. Como observado nas Figuras 6.2, 6.4 e 6.6, a transferência de calor aumenta com o aumento do número de Rayleigh. Nos casos em que $Ra = 10^6$ e $Ra = 10^7$, a variação do número de Nusselt para $Da = 10^{-6}$ e $Da = 10^{-8}$ ocorre de maneira semelhante ao caso observado na Figura 6.13 com $Da = 10^{-5}$, sendo observada uma tendência análoga na redução da transferência de calor por convecção.

7 CONCLUSÕES

Um meio poroso real apresenta uma grande complexidade geométrica, conferindo a necessidade da elaboração de modelos que sejam capazes de representar um meio poroso real. As equações que representam esses meio apresentam características de não linearidade, o que evidencia uma grande dificuldade na modelagem numérica do problema. A dificuldade no tratamento destas equações se traduz na necessidade do uso de ferramentas computacionais que auxiliam a obtenção de soluções válidas.

Uma metodologia de solução para o modelo bi-disperso foi desenvolvida no presente trabalho. Com esta metodologia foi possível a obtenção de resultados que corroboram com o entendimento dos fenômenos de transporte em cavidades porosas fraturadas aquecidas por baixo. A variação de parâmetros que interferem sobre a transferência de calor através do meio tiveram seus efeitos avaliados.

Foram investigados os efeitos da variação simultânea de propriedades termo-hidráulicas como N , Ra , Da e ϕ_l . A transferência de calor e o escoamento preferencial do fluido na cavidade são afetados por estes parâmetros e seus efeitos foram analisados isoladamente.

Com o aumento no número de Rayleigh, existe um favorecimento na troca térmica através do meio. Este favorecimento é devido à maior recirculação de fluido e a existência de maiores velocidades no escoamento do fluido, fazendo com que transferência de calor por convecção na cavidade seja intensificada.

A redução da permeabilidade dos blocos faz com que o fluido seja conduzido através das fraturas e os blocos atuem como obstáculo para a convecção natural. Em casos onde a permeabilidade é mais elevada a transferência de calor é facilitada. A porosidade interna exerce pouca influencia sobre o comportamento do fluido, uma vez que os demais parâmetros são mais significativos para o escoamento do fluido na cavidade.

O aumento do número de blocos na cavidade tende a reduzir a convecção de fluido, fazendo com que a direção de escoamento seja alterada com maior

frequência. Estas mudanças no escoamento do fluido fazem com que o fluido tenha sua velocidade reduzida na convecção, assim reduzindo a transferência de calor.

Como perspectiva de elaboração de outros trabalhos realizados na mesma linha de projeto de pesquisa está a implementação do modelo investigado considerando diferentes razões de aspecto para a cavidade bi-dispersa, bem como a variação das razões de condutividade térmica entre as fases constituintes.

8 REFERÊNCIAS

ANSYS, Inc.; **ANSYS FLUENT Theory Guide**. Canonsburg, PA, 2011.

BEJAN, A. **Convection heat transfer**. Third ed., John Wiley & Sons Inc., New York, U.S.A., 2004.

BHAVE, P.; NARASIMHAN, A.; REES, D. A. S.; **Natural convection heat transfer enhancement using adiabatic block: Optimal block size and Prandtl number effect**. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 49, pp. 3807-3818, 2006.

BRAGA, E. J.; LEMOS, M. J. S.; **Laminar natural convection in cavities filled with circular and square rods**. International Communications in Heat and Mass Transfer, vol 32, pp. 1289-1297, 2005a.

BRAGA, E. J.; LEMOS, M. J. S.; **Heat transfer in enclosures having fixed amount of solid material simulated with heterogeneous and homogeneous models**. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol 48, pp. 4748-4765, 2005b.

CHEN, X. B.; YU, P.; SUI, Y.; WINOTO, S. H.; LOW, H. T.; **Natural convection in a cavity filled with porous layers on the top and bottom walls**. Transport in Porous Medium, vol. 78, pp. 259-276, 2009.

CORCIONE, M.; **Effects of the thermal boundary conditions at the sidewalls upon natural convection in rectangular enclosures heated from below and cooled from above**. International Journal of Thermal Sciences, vol. 42, pp. 199-208, 2003.

DE LAI, F. C.; **Simulação numérica da convecção natural em cavidade preenchida com meio poroso heterogêneo**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Industrial Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

DE LAI, F. C.; **Modelagem e simulação de fenômenos de transporte em maços porosos**. Aplicação do método da média volumétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de pós-graduação em engenharia mecânica e de materiais. Curitiba, 2011.

DE LAI, F. C.; JUNQUEIRA, S. L. M.; FRANCO, A. T.; LAGE, J. L.; MARTINS, A. L.; WALDMANN, A. T. A.; **Transferência de calor em cavidade com meio poroso bi-disperso: Abordagem Microscópica para fraturas discretas.** ENAHPE 2011, IV Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás, 2011.

DE LEMOS, M. J. S.; **Turbulence in porous media; Modeling and applications.** Elsevier, Amsterdam, 2006.

DE VAHL DAVIS, G.; **Natural convection in a square cavity: a comparison exercise.** International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 3, pp. 227-248, 1983.

DIETRICH, P.; HELMIG, R.; SAUTER, M.; HÖTZL, H.; KÖNGETER, J.; TEUTSCH, G.; **Flow and Transport in Fractured Porous Media.** Springer, Holanda, 2005.

DIAS, R.; DE LAI, F. C.; JUNQUEIRA, S. L. M.; FRANCO, A. T.; MARTINS, A. L.; LOMBA, R. F. T.; LAGE, J. L.; **Convecção natural em cavidade preenchida com meio poroso bi-disperso.** Rio Oil & Gas Expo and Conference, 2010.

ENGLAND, W. A.; **The organic geochemistry of petroleum reservoirs.** Organic Geochemistry, vol. 16, pp. 415-425, 1990.

HOUSE, J. M.; BECKERMANN, C.; SMITH, T. F.; **Effect of a centered conducting body on natural convection heat transfer in an enclosure.** Numerical Heat Transfer, parte A, vol. 18, pp. 213-225, 1990.

HORTMANN, M.; PERIC, M.; SCHEUERER, G.; **Finite volume multigrid prediction of laminar natural convection: bench-mark solutions.** International Journal of Numerical Methods Fluids, vol. 11, pp. 189-207, 1990.

QIU, H.; **Natural convection in a non-homogeneous enclosure.** Southern Methodist University, Dallas, U.S.A., 2008.

KAVIANY, M.; **Principles of heat transfer in porous media.** Second edition, Mechanical engineering series, Springer, 1995.

KUZNETSOV, A. V.; NIELD, D. A.; **Forced convection in a bi-disperse porous medium channel: a conjugate problem.** International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 47, pp. 5375-5380, 2004.

KUZNETSOV, A. V.; NIELD, D. A.; **Forced convection in a channel partly occupied by a bidisperse porous medium: asymmetric case.** International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 53, pp. 5167-5175, 2010.

LAGE, J. L.; **The fundamental theory of flow through permeable media from Darcy to turbulence.** Mechanical Engineering Department, Southern Methodist University, Dallas, Texas, 1997.

LEE, J. R.; HÁ, M. Y.; **A numerical study of natural convection in a horizontal enclosure with a conducting body.** International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 48, pp. 3308-3318, 2006.

MERRIKH, A. A.; LAGE, J. L.; **Natural convection in an enclosure with disconnected and conducting solid blocks.** International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 48, pp. 1361-1372, 2005.

MILANI, E. J.; BRANDÃO, J. A. S. L.; ZALÁN, P. V.; GAMBOA, L. A. P.; **Petróleo na margem continental brasileira: geologia, exploração, resultados e perspectivas.** Brazilian Journal of Geophysics, vol. 18(3), 2001.

NARASIMHAN, A.; REDDY, B. V. K.; **Laminar forced convection in a heat generating bi-disperse porous medium channel.** International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 54, pp. 636-644, 2011.

NARASIMHAN, A.; REDDY, B. V. K.; DUTTA, P.; **Thermal management using the bi-disperse porous medium approach.** International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 55, pp. 538-546, 2012.

NIELD, D. A.; BEJAN, A.; **Convection in porous media.** Third ed., Springer-Verlag, New York, U.S.A., 2006.

NIELD, D. A.; KUZNETSOV, A. V.; **Natural convection about a vertical plate embedded in a bidisperse porous medium.** International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 51, pp. 1658-1664, 2008.

NITHIARASU, P.; SEETHARAMU, K. N.; SUNDARARAJAN, T. **Natural convective heat transfer in a fluid saturated variable porosity medium.** International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 40, pp. 3955-3967, 1997.

REVNIC, C.; GROSAN, T.; POP I.; INGHAM, D. B.; **Free convection in a square cavity filled with bidisperse porous medium.** International Journal of Thermal Sciences, vol. 48, pp. 1876-1883, 2009.

SATHIYAMOORTHY, M.; BASAK, T.; ROY, S.; POP, I.; **Steady natural convection flow in a square cavity filled with a porous medium for linearly heated side wall.** International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 50, pp. 1892-1901, 2007.

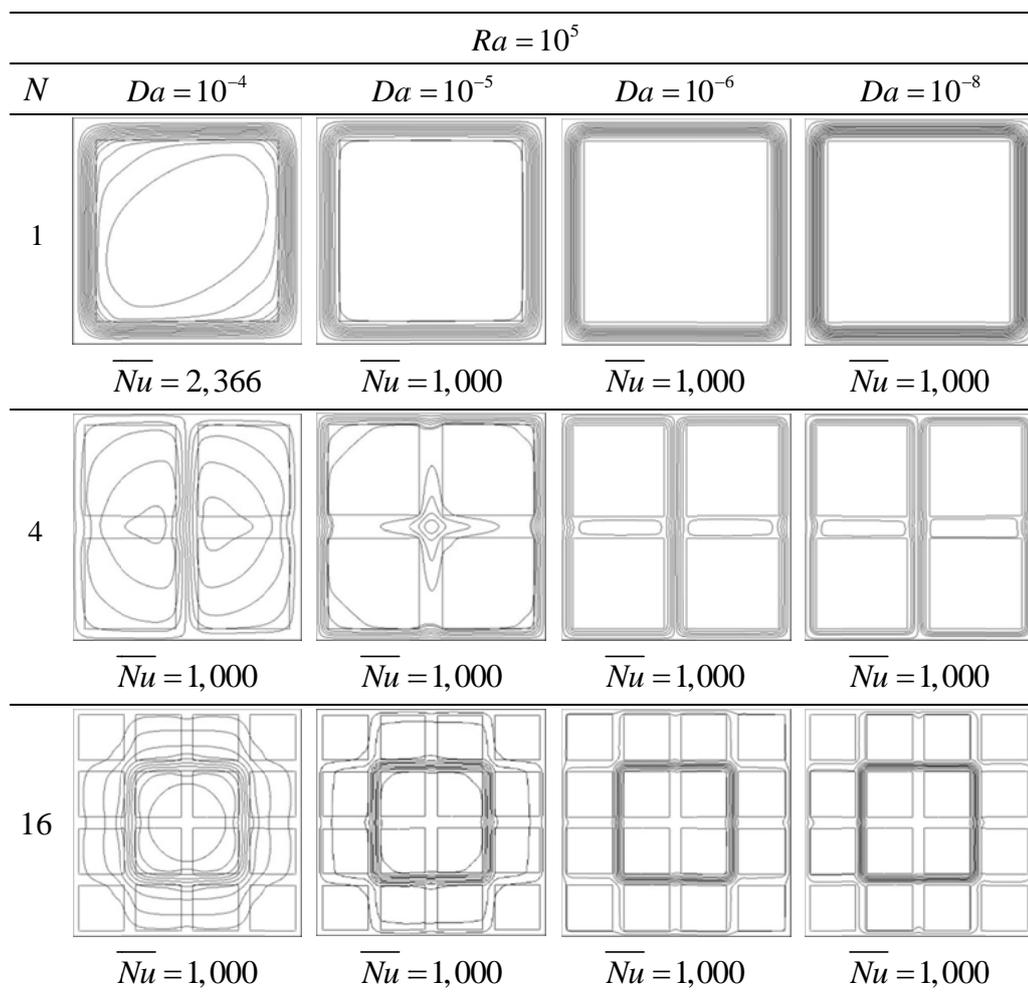
TAN, K. K.; SAM, T.; JAMALUDIN, H.; **The onset of transient convection in bottom heated porous media.** International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 46, pp. 2857-2873, 2003.

WIKIPEDIA, the free encyclopedia. **Convecção natural.** Versão editada: Março, 2012. Disponível em: <pt.wikipedia.org/wiki/Convecção_natural> Acesso em outubro 29, 2012.

ZHAO, C. Y.; **Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells.** International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 55, pp. 3618-3632, 2012.

APÊNDICE A – LINHAS DE CORRENTE E ISOTERMAS PARA $\phi_I = 0,6$

Nas Figuras A.1, A.3 e A.5 são apresentadas as linhas de corrente para $\phi_I = 0,6$ e variação de Da e N para $Ra = 10^5$, 10^6 e 10^7 , respectivamente. As isotermas estão apresentadas nas Figuras A.2, A.4 e A.6 para a variação dos mesmos parâmetros e $Ra = 10^5$, 10^6 e 10^7 , na sequência. Conforme comentado, estes resultados apresentam características semelhantes às observadas nos casos com $\phi_I = 0,4$ e estão dispostas separadamente por conveniência.



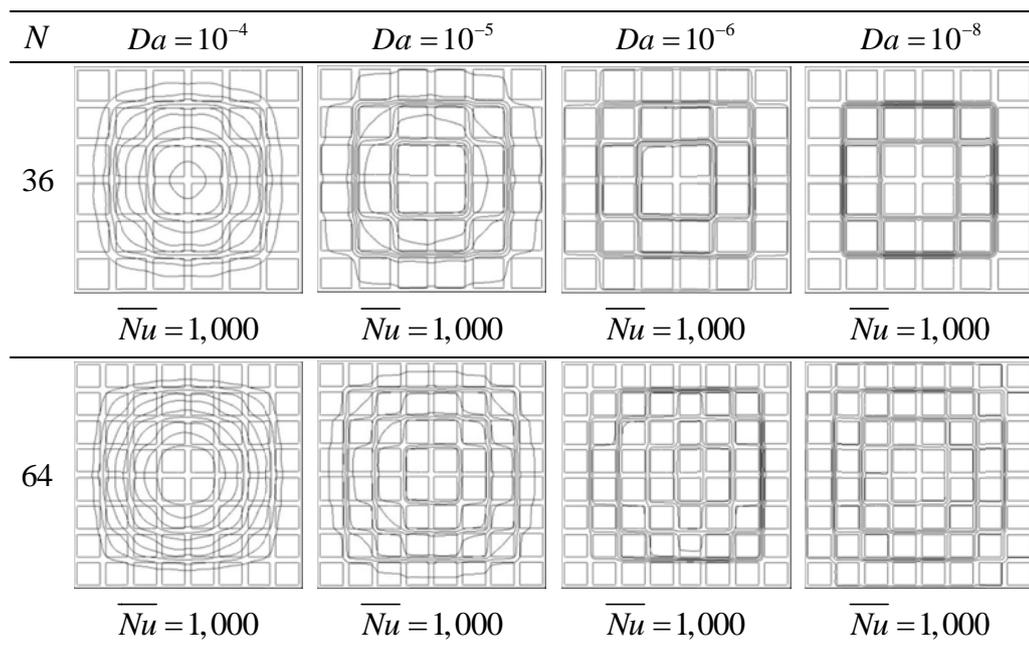


Figura A.1. Linhas de corrente para $Ra = 10^5$ e $\phi_r = 0,6$.

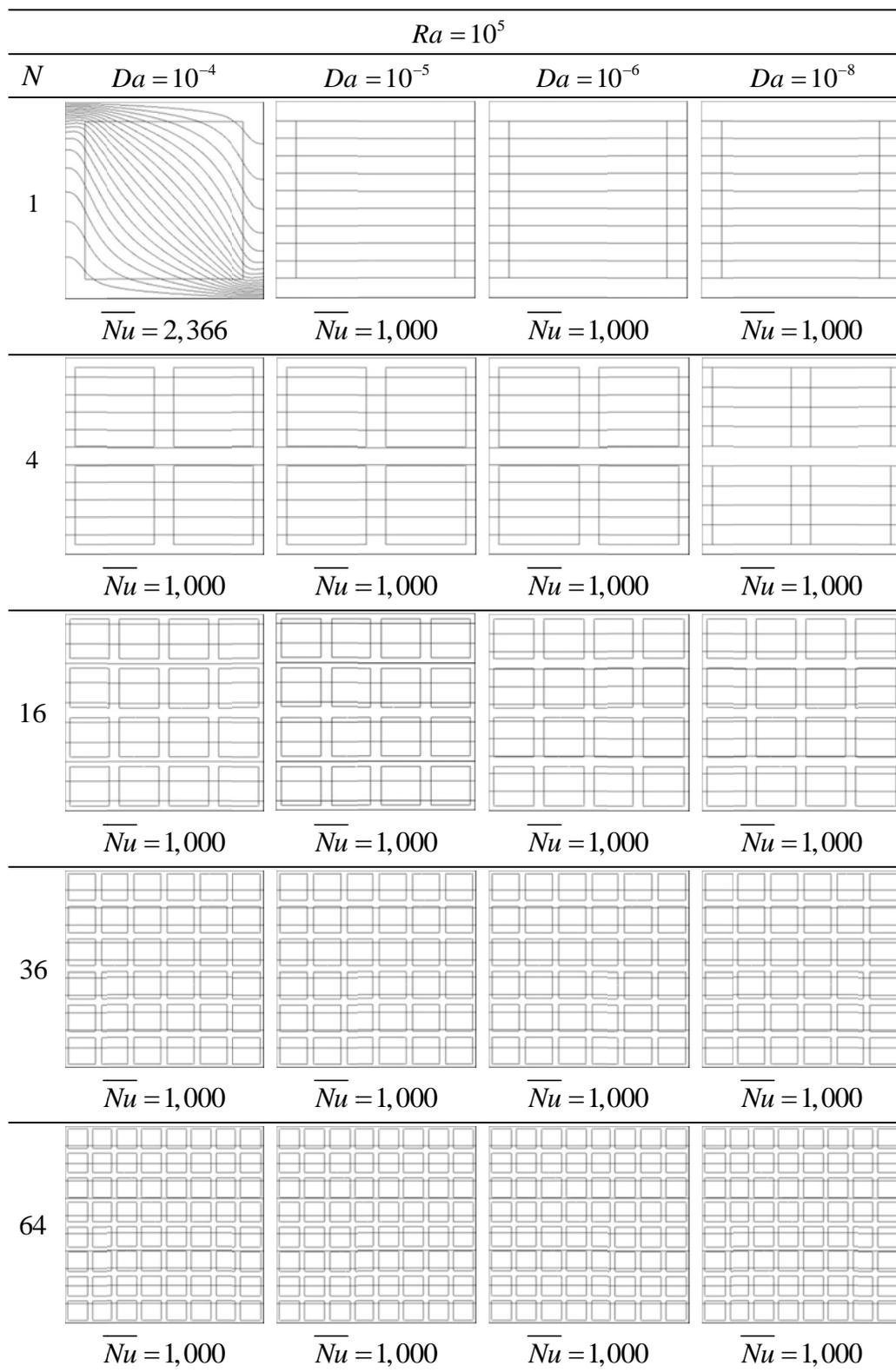


Figura A.2. Isotermas para $Ra = 10^5$ e $\phi_l = 0,6$.

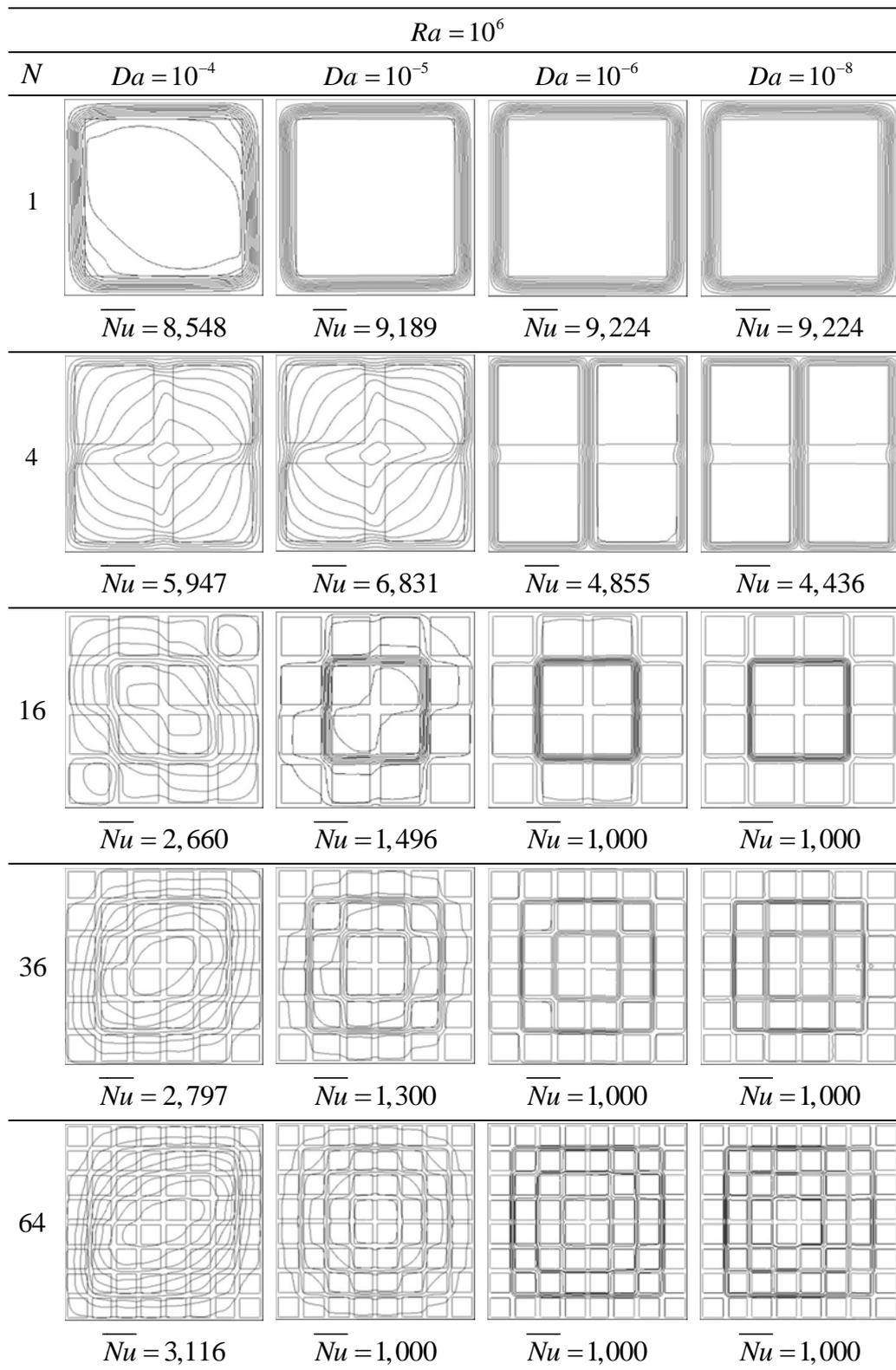


Figura A.3. Linhas de corrente para $Ra = 10^6$ e $\phi_r = 0,6$.

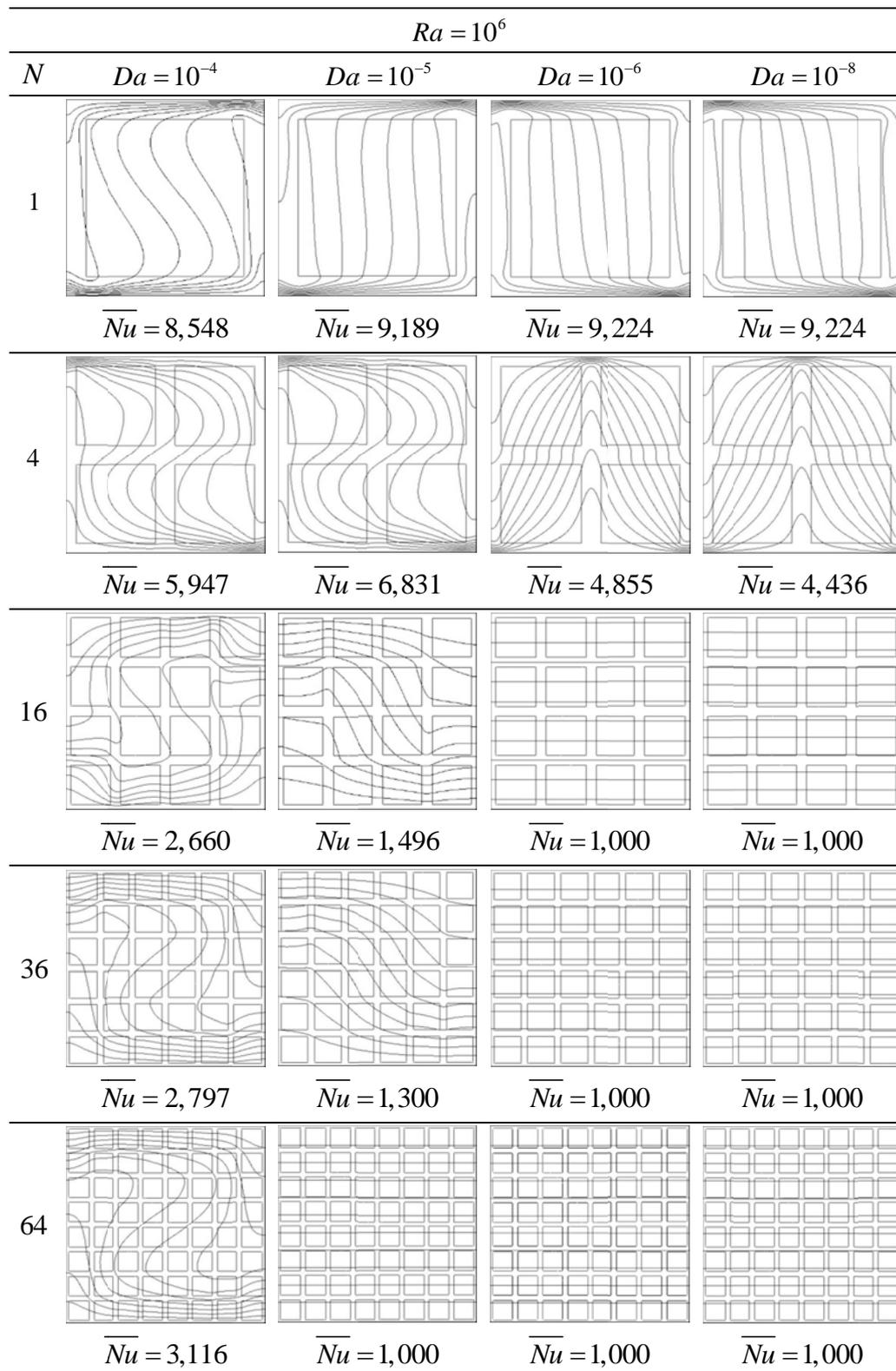


Figura A.4. Isotermas para $Ra = 10^6$ e $\phi_l = 0,6$.

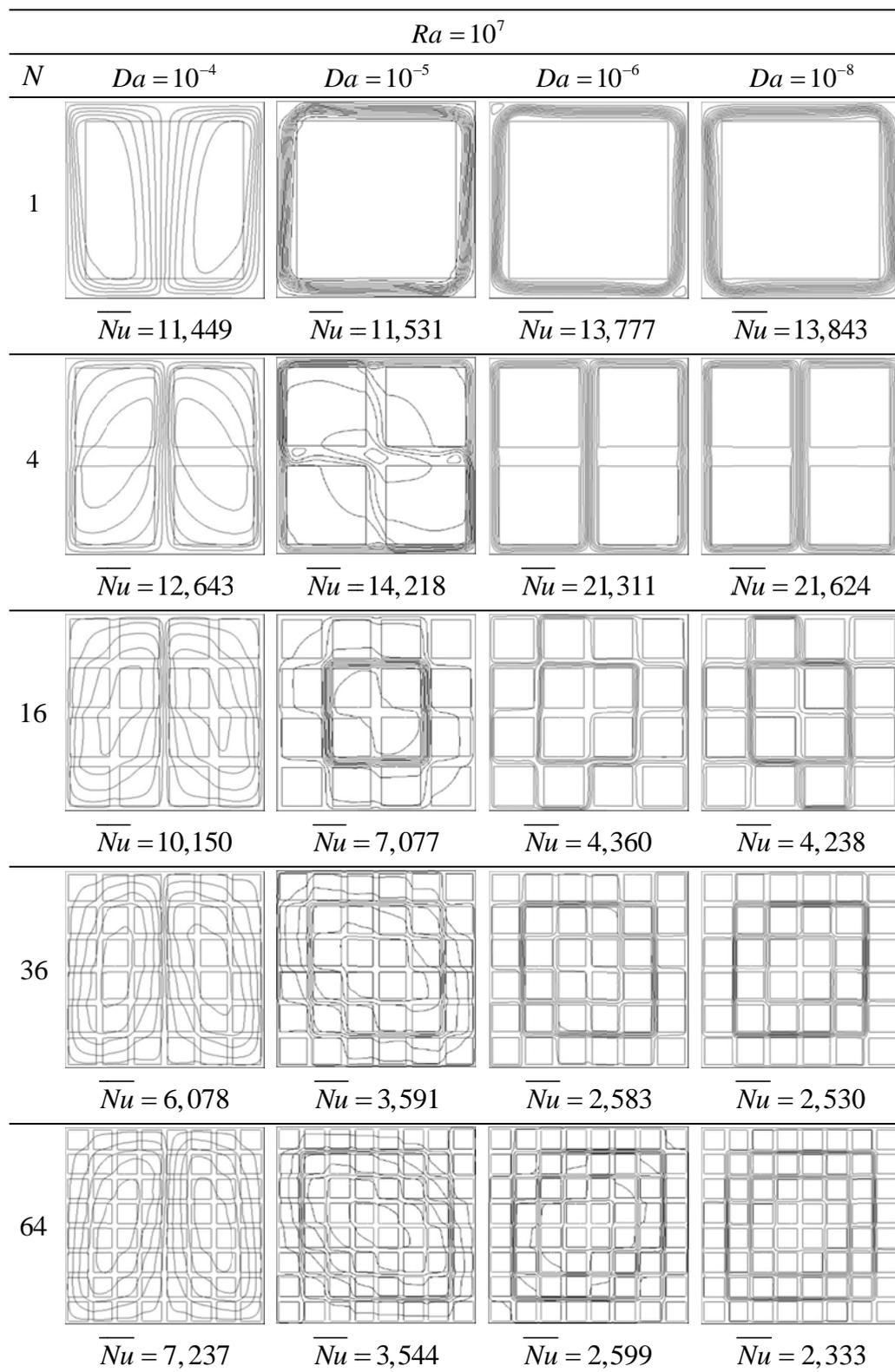


Figura A.5. Linhas de corrente para $Ra = 10^7$ e $\phi_r = 0,6$.

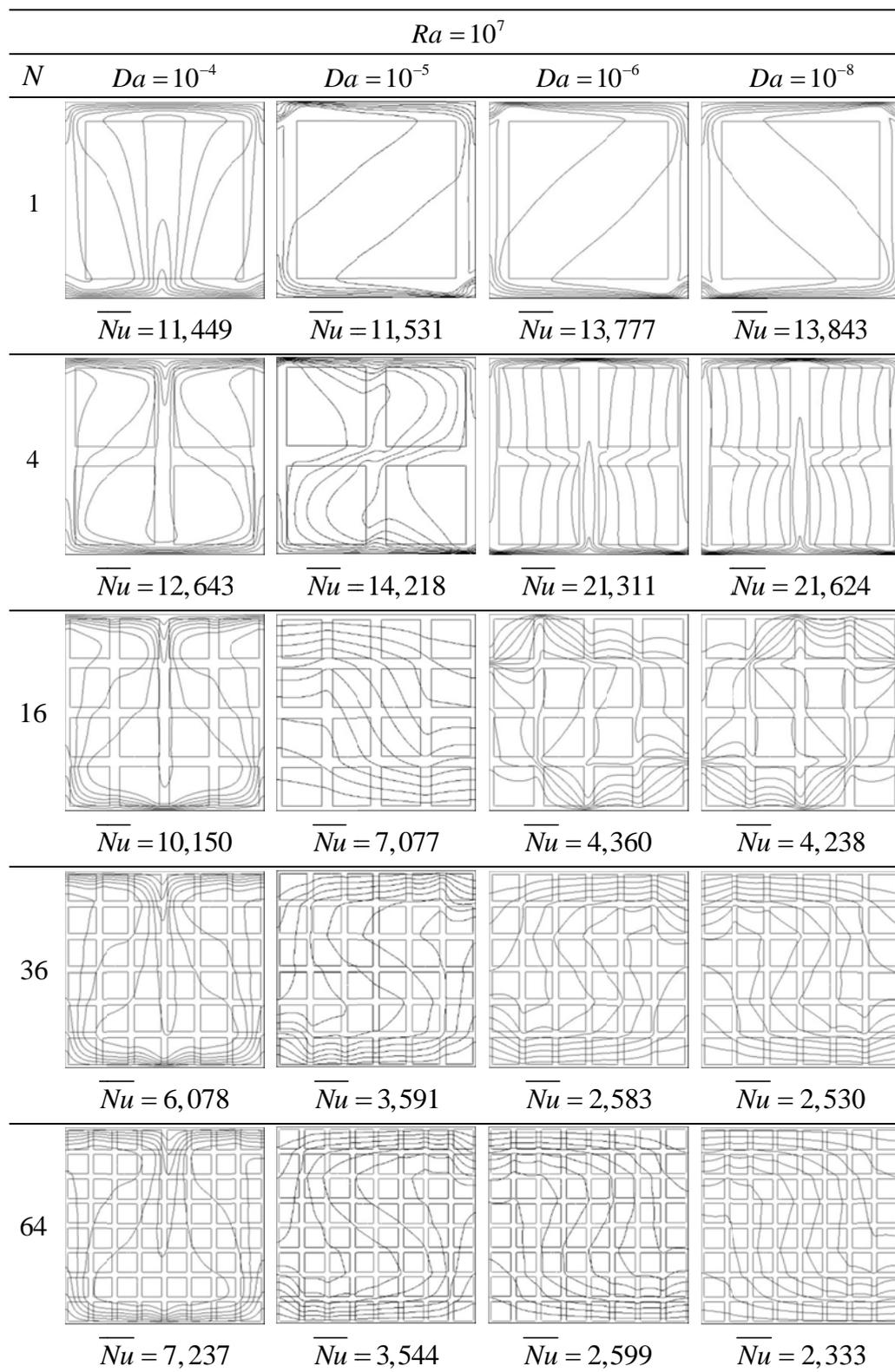


Figura A.6. Isotermas para $Ra = 10^7$ e $\phi_l = 0,6$.

APÊNDICE B – RESULTADOS: CAVIDADE BI-DISPERSA

A Tabela B.1 mostra os valores obtidos para o número de Nusselt avaliado na superfície inferior do bloco, para as diversas configurações com porosidade interna igual a 0,4. Foram variados parâmetros como o número de Rayleigh, o número de blocos e a permeabilidade dos blocos a fim de investigar seus efeitos sobre os fenômenos de transporte através do meio.

Tabela B.1. Nu_{av} avaliado na superfície inferior para os casos com $\phi_l = 0,4$.

Ra	N	$Da = 10^{-4}$	$Da = 10^{-5}$	$Da = 10^{-6}$	$Da = 10^{-8}$
10^5	1	2,477	1,000	1,000	1,000
	4	1,000	1,000	1,000	1,000
	16	1,000	1,000	1,000	1,000
	36	1,000	1,000	1,000	1,000
	64	1,000	1,000	1,000	1,000
10^6	1	8,487	9,171	9,224	9,220
	4	6,021	7,034	4,819	4,355
	16	2,669	1,543	1,000	1,000
	36	2,984	1,414	1,000	1,000
	64	3,196	1,000	1,000	1,000
10^7	1	11,218	11,292	13,778	13,856
	4	12,590	14,092	21,301	21,595
	16	9,569	7,058	4,333	4,156
	36	5,942	3,293	2,583	2,413
	64	6,949	3,258	2,536	2,283

Para os casos em que a porosidade interna é igual a 0,6, os resultados obtidos para o número de Nusselt médio tomado na superfície inferior da cavidade estão apresentados na Tabela B.2. Os parâmetros variados são os mesmos para o caso em que $\phi_l = 0,4$.

Tabela B.2. Nu_{av} avaliado na superfície inferior para os casos com $\phi_l = 0,6$.

Ra	N	$Da = 10^{-4}$	$Da = 10^{-5}$	$Da = 10^{-6}$	$Da = 10^{-8}$
10^5	1	2,366	1,000	1,000	1,000
	4	1,000	1,000	1,000	1,000
	16	1,000	1,000	1,000	1,000
	36	1,000	1,000	1,000	1,000
	64	1,000	1,000	1,000	1,000
10^6	1	8,548	9,189	9,224	9,224
	4	5,947	6,831	4,866	4,436
	16	2,660	1,496	1,000	1,000
	36	2,797	1,300	1,000	1,000
	64	3,116	1,000	1,000	1,000
10^7	1	11,449	11,531	13,777	13,843
	4	12,643	14,218	21,311	21,624
	16	10,150	7,077	4,360	4,238
	36	6,078	3,591	2,583	2,530
	64	7,237	3,544	2,599	2,333