

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE ESCOAMENTOS COM CONVECÇÃO FORÇADA SOBRE
ARRANJO ALTERNADO DE CILINDROS EMPREGANDO DESIGN CONSTRUTAL

por

Ana Paula Del Aghenese

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Modelagem Computacional

Rio Grande, julho, 2019.

AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE ESCOAMENTOS COM CONVECÇÃO FORÇADA SOBRE
ARRANJO ALTERNADO DE CILINDROS EMPREGANDO DESIGN CONSTRUTAL

Por

Ana Paula Del Aghenese

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional
(PPGMC), da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do Título de

Mestre em Modelagem Computacional.

Área de concentração: Mecânica Computacional.

Orientador: Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos

Coorientador: Prof. Dr. João Francisco Prolo Filho

Examinadores da banca:

Prof. Dr. Emanuel Da Silva Diaz Estrada FURG

Prof. Dr. Liércio André Isoldi FURG

Prof. Dr. Ruth da Silva Brum UFPEL

Prof. Dr. Wiliam Correa Marques
Coordenador do PPGMC.

Rio Grande, julho de 2019.

Ana Paula Del Aghenese

“Avaliação geométrica de escoamentos com convecção forçada sobre arranjo alternado de cilindros empregando design construtal”

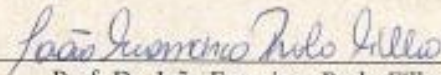
Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área concentração: Modelagem Computacional.

Aprovado em

BANCA EXAMINADORA




Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Orientador – FURG



Prof. Dr. João Francisco Prolo Filho

Coorientador – FURG



Prof. Dr. Liécio André Isoldi
FURG



Prof. Dr. Emanuel da Silva Díaz Estrada
FURG



Prof^a. Dr^a. Ruth da Silva Brum

UFPel

Rio Grande - RS
2019

Ficha catalográfica

A266a Aghenese, Ana Paula Del.

Avaliação geométrica de escoamentos com convecção forçada sobre arranjo alternado de cilindros empregando design construtal / Ana Paula Del Aghenese. – 2019.

115 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Rio Grande/RS, 2019.

Orientador: Dr. Elizaldo Domingues dos Santos.

Coorientador: Dr. João Francisco Prolo Filho.

1. Design construtal 2. Avaliação geométrica 3. Convecção forçada 4. Escoamento sobre cilindros 5. Modelagem computacional I. Santos, Elizaldo Domingues dos II. Prolo Filho, João Francisco III. Título.

CDU 004.41:53

Dedico esse trabalho aos meus pais e meu irmão que não mediram esforços para me apoiar e incentivar durante este período.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pela oportunidade de tal experiência pessoal e profissional, e pelas pessoas que permitiu que conhecesse deste período.

Agradeço aos meus pais, Ivete e Itamar que não mediram esforços para me auxiliar em busca deste sonho. E ao meu irmão Gustavo, pelo constante apoio. Agradeço, a minha família que mesmo distante torceu para que tudo desse certo.

Agradeço aos meus amigos, que por meio de conversas e muito carinho me incentivaram a continuar nos momentos mais difíceis. Em especial a Cristiana, Luciano e Laísa pela ajuda nos estudos sempre dispostos a me auxiliarem perante as minhas dificuldades. E ainda, pelo apoio, incentivo e motivação nos dias difíceis e pelos grandes amigos que tornaram-se nessa jornada.

Agradeço ao meu orientador, professor Elizaldo Domingues dos Santos, por aceitar fazer parte deste trabalho, pelo grande carinho e compreensão, pela amizade, incentivo e por ser este profissional exemplar, que serve como referência fundamental no meu perfil profissional e pessoal.

Agradeço ao meu co-orientador, professor João Francisco Prolo Filho, pelas contribuições realizadas.

Agradeço aos membros da banca examinadora, professores Ruth da Silva Brum, Liércio André Isoldi e Emanuel da Silva Diaz Estrada pelas relevantes sugestões.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC) pelo suporte prestado.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande (FURG) por toda a estrutura disponibilizada para a realização deste estudo.

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo numérico acerca da avaliação geométrica de um escoamento sobre quatro cilindros dispostos alternadamente, com convecção forçada, bidimensional, laminar, transiente e incompressível. A geometria varia de acordo com o método Design Construtal. Os objetivos são a maximização do número de Nusselt (Nu_D) e a minimização do coeficiente de arrasto (C_D) entre os cilindros e o escoamento circundante. As simulações numéricas foram realizadas considerando números de Reynolds de $Re_D = 10, 40$ e 150 , com número de Prandtl de $Pr = 0.71$ (que simula o ar como fluido de trabalho). O problema apresenta três graus de liberdade: S_T/D (relação entre o passo transversal dos cilindros intermediários e o diâmetro), S_{L1}/D (relação entre o passo longitudinal dos cilindros frontal e intermediários e o diâmetro) e S_{L2}/D (relação entre o passo longitudinal dos cilindros intermediários e posterior e o diâmetro). Além disso, as medidas atribuídas para $1.5 \leq S_{L1}/D \leq 4.0$, $1.5 \leq S_{L2}/D \leq 3.0$ e $1.5 \leq S_T/D \leq 5.0$, totalizando 288 simulações. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia são resolvidas utilizando o software FLUENT® 14.5, o qual se baseia no Método dos Volumes Finitos (MVF). Os resultados indicam que o Re_D possui influência sobre a geometria ótima do arranjo e sobre o efeito de cada grau de liberdade sobre os indicadores de performance. Para $Re_D = 10$ notou-se uma configuração assimétrica, onde os cilindros centrais estão posicionados próximos ao cilindro frontal. Para $Re_D = 40$ a melhor configuração foi obtida para os cilindros centrais mais próximos ao cilindro posterior e para $Re_D = 150$ uma configuração levemente assimétrica conduziu ao melhor desempenho. Dessa forma, os resultados indicaram que o uso de passos longitudinais diferentes pode conduzir a um melhor desempenho quando comparado a arranjos simétricos (com um único passo longitudinal S_L).

Palavras-chaves: Design Construtal, Avaliação Geométrica, Convecção forçada, Escoamento sobre cilindros, Modelagem Computacional.

ABSTRACT

This presents a numerical study about the geometric evaluation of flow on four cylinders arranged alternately, with forced convection, two-dimensional, laminar, transient and incompressible flow. The geometry varies according to the Design Construtal method. The aims are the maximization of Nusselt number (Nu_D) and the minimization of drag coefficient (C_D) between the cylinders and the surrounding flow. Numerical simulations were performed considering Reynolds numbers of $Re_D = 10, 40$ and 150 , with Prandtl number of $Pr = 0.71$ (which simulates air as working fluid). The problem has three degrees of freedom: S_T/D (ratio between the cross-section of the intermediate cylinders and the diameter), S_{L1}/D (ratio between the longitudinal pitch of the front and intermediate cylinders and the diameter) and S_{L2}/D (the longitudinal pitch of the intermediate and posterior cylinders and the diameter). In addition, the measures assigned for $S_{L1}/D = 1.5; 3.0$ and 4.0 , for $S_{L2}/D = 1.5; 2.0; 2.5$ and 3.0 and $1.5 \leq S_T/D \leq 5.0$, totaling 288 simulations. The conservation equations of mass, momentum and energy are solved using FLUENT[®] software in its version 14.5, which is based on the Finite Volume Method (MVF). The results indicate that Re_D has influence on the optimal geometry of the arrangement and on the effect of each degree of freedom on the performance indicators. For $Re_D = 10$ an asymmetrical configuration was noted, where the central cylinders are positioned close to the front cylinder. For $Re_D = 40$ the best configuration was obtained for the central cylinders closest to the rear cylinder and for $Re_D = 150$ a slightly asymmetrical configuration led to the best performance. Thus, the results indicated that the use of different longitudinal steps may lead to better performance when compared to symmetrical arrangements (with a single longitudinal pitch S_L).

Keywords: Constructal Design, Geometric evaluation, Forced convection, Flow on cylinders, Computational Modeling.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	21
1.1. Estado da arte	22
1.2. Objetivos	30
1.2.1. Objetivo geral	30
1.2.2. Objetivos específicos	30
1.3. Delineamento do texto	31
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	332
2.1. Conceitos de Transferência de Calor	32
2.2. Lei Construtal e o Método do Design Construtal	377
2.3. Método Numérico	399
2.3.1. O Método dos Volumes Finitos (MVF)	3939
2.4. Tipos de malhas	42
2.5. Feixe de tubos	43
3. MODELAGEM MATEMÁTICA	455
3.1. Definição do problema	455
3.2. Metodologia do Design Construtal	477
3.3. Equações de conservação	499
4. MODELAGEM NUMÉRICA	52
4.1. Parâmetros do CFD	52
4.2. Construção da malha	52
4.3. Teste da solução independente de malha e verificação do modelo	54
5. RESULTADOS	588
5.1. Resultados para $Re_D = 10$	588
5.1.1. Análise do problema fluidodinâmico para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$	58
5.1.2. Análise do problema térmico para o caso $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$	66

	10
5.2. Resultados para $Re_D = 40$	72
5.2.1. Análise do problema fluidodinâmico para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$	72
5.2.2. Análise do problema térmico para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$	79
5.3. Resultados para $Re_D = 150$	84
5.3.1. Análise do problema fluidodinâmico para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$	84
5.3.2. Análise do problema térmico para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$	88
5.4. Efeito do número de Reynolds sobre o desempenho fluidodinâmico, térmico e geometrias ótimas	92
6. CONCLUSÕES	955
7. Proposta de continuidade	966
8. Referências Bibliográficas	977
APÊNDICE 1 – Script do software GMSH para a geração de malha	100
APÊNDICE 2 – Resultados das simulações	1066

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Trocador de calor do tipo casco e tubos encontrado em aplicações industriais (Fonte: Cengel e Ghajar, 2015).	22
Figura 1.2 - Configuração do trocador de calor com dois tubos (Adaptado: Kim <i>et al.</i> , 2010).	23
Figura 1.3 - Domínio computacional formado por dois cilindros lado a lado (Fonte: Hesam e Navid, 2011).	24
Figura 1.4 – Domínio computacional (Fonte: Pedrotti, 2015).	25
Figura 1.5 - Esquema do cilindro com saliências em sua superfície (Fonte: Li <i>et al.</i> , 2016).	26
Figura 1.6 – Dois modos de alinhamento: (a) modo A, a ponta de uma protrusão se alinha com a direção de entrada; (b) modo B, o entalhe de duas protuberâncias vizinhas alinha-se com a direção de entrada (Adaptado: Li <i>et al.</i> , 2016).	26
Figura 1.7 – Domínio computacional do arranjo triangular (Fonte: Barros <i>et al.</i> , 2017).	27
Figura 1.8 – Domínio computacional do arranjo de quatro cilindros alinhados (Fonte: Pereira <i>et al.</i> , 2017).	28
Figura 1.9 – Domínio computacional e condições de contorno (Fonte: Seo <i>et al.</i> , 2018).	29
Figura 2.1 - Tipos de convecção: a) convecção forçada; b) convecção natural; c) ebulição e d) condensação (Fonte: Incropera <i>et al.</i> , 2008).	34
Figura 2.2 – Transição da camada limite laminar para turbulenta sobre uma placa plana (Adaptado: Incropera <i>et al.</i> , 2008).	35
Figura 2.3 – Etapas de aplicação do Design Construtal (Fonte: Dos Santos <i>et al.</i> , 2018).	38
Figura 2.4 - Representação dos volumes de controle e nós: (a) nós nos vértices e (b) nós no centro dos volumes de controle (Adaptado de: Versteeg e Malalasekera, 2007).	40
Figura 2.5 - Finalidade do método numérico (Fonte: Maliska, 2004).	40
Figura 2.6 - Classificação da malha: a) estruturada; b) não estruturada e c) híbrida (Fonte: Bern e Plassmann, 2000).	43
Figura 2.7 – Esboço de feixe de tubos em escoamento cruzado (Fonte: Incropera <i>et al.</i> , 2008).	44

Figura 2.8 – Arranjo dos tubos nas formas: (a) alinhado e (b) alternado (Adaptado: Incropera <i>et al.</i> , 2008).	44
Figura 3.1 – Domínio computacional do problema.	45
Figura 3.2 – Fluxograma do método de Design Construtal.	48
Figura 3.3 - Etapas do processo de otimização do problema para cada Re_D avaliado.	50
Figura 4.1 - Malha do estudo com 145282 células.	53
Figura 4.2 - Região ao redor do cilindro com malha estruturada e o restante do domínio com malha não estruturada.	53
Figura 4.3 – Regiões de refinamento ao redor dos cilindros.	54
Figura 5.1 – Efeito de S_T/D sobre C_D para diferentes razões de S_{L2}/D e para $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.	59
Figura 5.2 – Superfície com C_D em função de S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.	60
Figura 5.3 – Efeito de S_T/D sobre C_D para diferentes razões de S_{L2}/D e para $S_{L1}/D = 3.0$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.	60
Figura 5.4 – Superfície com C_D em função de S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 3.0$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.	61
Figura 5.5 – Efeito de S_T/D sobre C_D para diferentes razões de S_{L2}/D e para $S_{L1}/D = 4.0$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.	62
Figura 5.6 – Superfície com C_D em função de S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 4.0$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.	62
Figura 5.7 – Efeito da razão S_{L2}/D sobre $(C_D)_{min}$ para diferentes razões de S_{L1}/D para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.	63
Figura 5.8 – Superfície com $(C_D)_{min}$ em função de S_{L1}/D e S_{L2}/D para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.	64
Figura 5.9 – Efeito da razão S_{L1}/D sobre o coeficiente de arrasto duas vezes minimizado $(C_D)_{2min}$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.	65
Figura 5.10 – Campo de pressão para caso ótimo $(S_T/D)_{3O,F} = 1.5$, $(S_{L2}/D)_{2O,F} = 1.5$ e $(S_{L1}/D)_{O,F} = 3.0$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.	65

- Figura 5.11 – Campo de pressão para o pior caso $(S_T/D) = 5.0$, $(S_{L2}/D) = 1.5$ e $(S_{L1}/D) = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$. 65
- Figura 5.12 – Campo de velocidade para caso ótimo $(S_T/D)_{3O,F} = 1.5$, $(S_{L2}/D)_{2O,F} = 1.5$ e $(S_{L1}/D)_{O,F} = 3.0$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$. 66
- Figura 5.13 – Campo de velocidade para o pior caso $(S_T/D) = 5.0$, $(S_{L2}/D) = 1.5$ e $(S_{L1}/D) = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$. 66
- Figura 5.14 – Efeito da razão S_T/D sobre o número de Nusselt Nu_D para várias razões de S_{L2}/D e para $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$. 67
- Figura 5.15 - Superfície com número de Nusselt (Nu_D) em função das razões S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$. 68
- Figura 5.19 – Efeito da razão S_T/D sobre o número de Nusselt Nu_D para várias razões de S_{L2}/D e para $S_{L1}/D = 3.0$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$. 69
- Figura 5.17 – Superfície com número de Nusselt (Nu_D) em função das razões S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 3.0$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$. 69
- Figura 5.18 – Efeito da razão S_{L2}/D sobre $(Nu_D)_{\max}$ para razões de S_{L1}/D para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$. 70
- Figura 5.19 – Superfície do $(Nu_D)_{2\max}$ em função dos valores de S_{L2}/D sobre S_{L1}/D para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$. 70
- Figura 5.20 – Efeito da razão S_{L1}/D sobre $(Nu_D)_{2\max}$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$. 71
- Figura 5.21 – Campo de temperatura para o caso de $(S_T/D)_{3O,T} = 5.0$; $(S_{L2}/D)_{2O,T} = 3.0$ e $(S_{L1}/D)_{O,T} = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$. 71
- Figura 5.22 – Campo de temperatura para o pior caso de $(S_T/D) = 1.5$; $(S_{L2}/D) = 1.5$ e $(S_{L1}/D) = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$. 72
- Figura 5.23 – Efeito de S_T/D sobre C_D para diferentes razões de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 73
- Figura 5.24 – Superfície com C_D em função de S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 73
- Figura 5.25 – Efeito de S_T/D sobre C_D para diferentes razões de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 3.0$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 74

Figura 5.26 – Superfície com C_D em função de S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 3.0$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 74

Figura 5.27 - Efeito de S_T/D sobre C_D para diferentes razões de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 4.0$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 75

Figura 5.28 – Superfície com C_D em função de S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 4.0$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 75

Figura 5.29 – Efeito da razão S_{L2}/D sobre $(C_D)_{min}$ para diferentes razões de S_{L1}/D para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 77

Figura 5.30 – Superfície do $(C_D)_{min}$ em função de S_{L2}/D sobre S_{L1}/D para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 77

Figura 5.31 – Efeito da razão S_{L1}/D sobre $(C_D)_{2min}$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 78

Figura 5.32 - Campo de pressão para caso ótimo $(S_T/D)_{3O,F} = 1.5$, $(S_{L2}/D)_{2O,F} = 3.0$ e $(S_{L1}/D)_{O,F} = 4.0$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 78

= 4,0 para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 78

Figura 5.33 - Campo de pressão para o pior caso quando $(S_T/D) = 5.0$, $(S_{L2}/D) = 1.5$ e $(S_{L1}/D) = 1.5$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 78

Figura 5.34 - Campo de velocidade para caso ótimo $(S_T/D)_{3O,F} = 1.5$, $(S_{L2}/D)_{2O,F} = 3.0$ e $(S_{L1}/D)_{O,F} = 4.0$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 79

Figura 5.35 - Campo de velocidade para o pior caso quando $(S_T/D) = 5.0$, $(S_{L2}/D) = 1.5$ e $(S_{L1}/D) = 1.5$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 79

Figura 5.36 – Efeito de S_T/D sobre Nu_D para diferentes razões de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 80

Figura 5.37 – Superfície com Nu_D em função de S_T/D e S_{L2}/D quando $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 81

Figura 5.38 – Efeito da razão S_{L2}/D sobre o Nu_D uma vez maximizado $(Nu_D)_{max}$ para diferentes razões de S_{L1}/D para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 81

Figura 5.39 – Superfície de $(Nu_D)_{2max}$ em função de S_{L2}/D sobre S_{L1}/D para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 82

Figura 5.40 – Efeito de S_{L1}/D sobre $(Nu_D)_{2max}$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 83

Figura 5.41 - Campo de temperatura para caso ótimo (S_T/D)_{3O,T} = 5.0; (S_{L2}/D)_{2O,T} = 1.5 e (S_{L1}/D)_{O,F} = 4.0 para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 83

Figura 5.42 - Campo de temperatura para o pior caso quando (S_T/D) = 1.5; (S_{L2}/D) = 2.0 e (S_{L1}/D) = 1.5 para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$. 83

Figura 5.43 – Efeito de S_T/D sobre C_D para diferentes razões de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$. 84

Figura 5.44 – Superfície com C_D em função de S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$. 85

Figura 5.46 – Efeito da razão S_{L2}/D sobre $(C_D)_{min}$ para diferentes razões de S_{L1}/D para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$. 86

Figura 5.47 – Superfície de $(C_D)_{2min}$ em função de S_{L2}/D sobre S_{L1}/D para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$. 86

Figura 5.48 - Efeito da razão S_{L1}/D sobre $(C_D)_{2min}$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$. 87

Figura 5.49 – Campo de pressão para o caso ótimo (S_T/D)_{3O,F} = 1.5, (S_{L2}/D)_{2O,F} = 3.0 e (S_{L1}/D)_{O,F} = 4.0 para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$. 87

Figura 5.50 – Campo de pressão para o pior caso quando (S_T/D) = 4.5, (S_{L2}/D) = 1.5 e (S_{L1}/D) = 1.5 para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$. 87

Figura 5.51 - Campo de velocidade para caso ótimo (S_T/D)_{3O,F} = 1.5, (S_{L2}/D)_{2O,F} = 3.0 e (S_{L1}/D)_{O,F} = 4.0 para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$. 88

Figura 5.52 – Campo de velocidade para o pior caso quando (S_T/D) = 4.5, (S_{L2}/D) = 1.5 e (S_{L1}/D) = 1.5 para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$. 88

Figura 5.53 – Efeito de S_T/D sobre Nu_D para diferentes razões de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$. 89

Figura 5.54 – Superfície com Nu_D em função de S_T/D e S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 1,5$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$. 89

Figura 5.56 – Efeito da razão S_{L2}/D sobre $(Nu_D)_{max}$ para diferentes razões de S_{L1}/D para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$. 90

Figura 5.57 – Superfície do $(Nu_D)_{2max}$ em função de S_{L2}/D sobre S_{L1}/D para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$. 91

- Figura 5.58 – Efeito da razão S_{L1}/D sobre $(Nu_D)_{2max}$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$. 91
- Figura 5.59 - Campo de temperatura para caso ótimo $(S_T/D)_{O,T} = 5.0$; $(S_{L2}/D)_{2O,T} = 3.0$ e $(S_{L1}/D)_{3O,F} = 4.0$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$. 92
- Figura 5.60 - Campo de temperatura para o pior caso $(S_T/D) = 1.5$; $(S_{L2}/D) = 3.0$ e $(S_{L1}/D) = 4.0$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$. 92
- Figura 5.61 – Efeito do Re_D sobre o estudo fluidodinâmico de arranjo de cilindros. 93
- Figura 5.62 – Efeito dos valores $(C_D)_{3min}$ sobre $Re_D = 10, 40$ e 150 . 93
- Figura 5.63 – Efeito do Re_D sobre o estudo térmico de arranjo de cilindros. 94
- Figura 5.64 – Efeito dos valores $(Nu_D)_{3max}$ sobre $Re_D = 10, 40$ e 150 . 94

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros utilizados no estudo.	46
Tabela 4.1 – Casos para o teste da solução independente de malha.	55
Tabela 4.3 – Resultados do teste de solução independente de malha.	56
Tabela 4.4 – Parâmetros de Grimison (1937) (Fonte: Incropera <i>et al.</i> , 2008).	56
Tabela 4.5 – Valores atribuídos de acordo com N_L para o fator de correção (Fonte: Incropera <i>et al.</i> , 2008).	57
Tabela 4.6 – Verificação do modelo: comparação do Nu_D numérico obtido com o presente estudo e Nu_D analítico proposto por correlações da literatura para um cilindro e para o arranjo com 4 cilindros.	57

LISTA DE SÍMBOLOS

Algarismos Romanos

A	Área [m ²]
A_T	Área total dos quatro cilindros [m ²]
A_o	Área de ocupação dos cilindros [m ²]
C_D	Coefficiente de arrasto [$F_d/(0.5\rho V^2 A)$]
C_P	Calor específico a pressão constante [J/kg.K]
D	Diâmetro dos cilindros [m]
D_1	Diâmetro do cilindro um [m]
D_2	Diâmetro do cilindro dois [m]
D_3	Diâmetro do cilindro três [m]
D_4	Diâmetro do cilindro quatro [m]
F_D	Força de arrasto [N]
Gr	Número de Grashof [$g\beta\Delta TL^3/\nu^2$]
H	Altura do domínio computacional [m]
H_o	Altura da área de ocupação dos cilindros [m]
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção [W/m ² .K]
k	Condutividade térmica do fluido [W/m.K]
L	Comprimento do domínio computacional [m]
L_o	Comprimento da área de ocupação dos cilindros [m]
L_1	Comprimento entre o cilindro frontal e a entrada [m]
Nu_D	Número de Nusselt [$h.D/k$]
P	Pressão [N/m ²]
Pe	Número de Péclet [LV/α]
Pr	Número de Prandtl [ν/α]
q''	Fluxo de calor por convecção [W/m]
Re_D	Número de Reynolds [$\rho V_\infty D/\mu$]
S_L	Passo longitudinal [m]
S_{L1}	Passo longitudinal dos cilindros frontal e o intermediário [m]
S_{L2}	Passo longitudinal dos cilindros intermediário e posterior [m]
S_T	Passo transversal [m]
T	Temperatura [K]
T_∞	Temperatura do fluido [K]
T_W	Temperatura do sólido [K]
u	Velocidade do fluido na direção x [m]

V	Velocidade do fluido na direção y [m]
V_{ent}	Velocidade de entrada do fluido [m/s]
V_{∞}	Velocidade da corrente livre [m/s]

Símbolos gregos

α	Difusividade térmica do fluido [m^2/s]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido [Kg/m.s]
ν	Viscosidade cinemática do fluido [m^2/s]
ρ	Massa específica do fluido [kg/m^3]

Sub índices

D	Referente ao diâmetro do cilindro
ent	Referente a velocidade de entrada do domínio
F	Referente ao problema fluidodinâmico
L	Referente ao comprimento característico
max	Uma vez maximizado
min	Uma vez minimizado
T	Referente ao problema térmico
w	Referente a temperatura dos cilindros
$2max$	Duas vezes maximizado
$3max$	Três vezes maximizado
$2min$	Duas vezes minimizado
$3min$	Três vezes minimizado
o	Uma vez otimizado
$2o$	Duas vezes otimizado
$3o$	Três vezes otimizado

LISTA DE ABREVIATURAS

AR	<i>Aspect Ratio</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
GB	Gigabytes
MVF	Método dos Volumes Finitos
PPGMC	Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional
RAM	<i>Random Access Memory</i>
SIMPLE	<i>Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations</i>
SIMPLEC	<i>Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations – Consistent</i>
SIMPLER	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Revised</i>
VC	Volume de controle

1. INTRODUÇÃO

A busca por equipamentos cada vez mais eficientes tem sido foco de muitas pesquisas no campo da engenharia, desde equipamentos industriais de grande porte a equipamentos domésticos presentes no cotidiano. A análise de escoamentos com transferência de calor é tema de muitos destes estudos, por se tratar de dispositivos como aquecedores, refrigeradores, condensadores, evaporadores, em sistemas de refrigeração, condicionamento de ar, usinas de geração de energia e outros. Esses equipamentos são formados por arranjos de cilindros que possibilitam realizar análises de escoamentos e geometrias que fornecem um melhor desempenho fluidodinâmico e térmico (Çengel e Cimbala, 2006).

Dentre os dispositivos estudados encontra-se o trocador de calor, que consiste na transferência de calor de uma corrente quente para uma corrente fria que podem estar situadas no lado interno ou externo do feixe de tubos. Dentre as diferentes configurações construtivas de trocadores de calor, a do tipo casco e tubos é a mais comumente empregada, conforme ilustrado na Fig. 1.1 onde é possível visualizar o arranjo do feixe de tubos do trocador (Perussi, 2010).

Neste sentido, ainda existem muitos aspectos a serem explorados, tais como a complexidade do problema físico propriamente dito, a representação matemática do modelo computacional, os aspectos geométricos envolvidos, além das dificuldades quanto análise numérica e a comparação com o que é obtido experimentalmente (Bejan, 1996).

Entre as questões investigadas na literatura, está o escoamento externo sobre cilindros, que é um tema de elevada dificuldade devido à formação e desprendimento de vórtices, padrões turbulentos, geometrias complexas, entre outras, que conduzem a dificuldades de abordagem numérica e experimental (Bejan e Lorente, 2008).

Os estudos acerca da geometria são de grande importância pois buscam diminuir o custo de construção desses equipamentos e potencializar seus desempenhos fluidodinâmico e térmico. Uma possibilidade para tal avaliação é o emprego do método Design Construtal, que consiste na avaliação de formas geométricas em sistemas submetidos a alguma espécie de fluxo/escoamento aplicado. Para isto, neste processo o fluxo/escoamento é maleável e a geometria é obtida a partir de um princípio de maximização do desempenho de indicadores de performance do sistema em análise. Além disso, a geometria deve ser submetida a restrições globais e variada de acordo com seus graus de liberdade (Bejan, 2000).



Figura 1.1 – Trocador de calor do tipo casco e tubos encontrado em aplicações industriais
(Fonte: Cengel e Ghajar, 2015).

O uso de técnicas numéricas para a solução de problemas da engenharia e da física é uma realidade devido ao desenvolvimento dos computadores de alta velocidade e capacidade de armazenamento. Com isso, cada vez mais se tem algoritmos que conseguem reproduzir fenômenos e situações mais próximas a realidade desde os mais simples aos mais complexos e assim, com resultados mais realísticos e confiáveis (Maliska, 2004).

O presente trabalho tem por finalidade analisar de forma numérica a geometria de um arranjo com quatro cilindros na forma alternada, sujeito a um escoamento laminar com convecção forçada aplicando o método Design Construtal.

1.1. Estado da arte

A literatura apresenta diversos estudos a respeito de escoamento sobre cilindros e/ou arranjo de cilindros. No entanto, o tema ainda tem questões em aberto devido à sua complexidade para

representação física do problema e a geometria a ser trabalhada. Nesse sentido, são apresentados alguns trabalhos de relevantes contribuições para o presente estudo.

Kim et al. (2010) estudaram a configuração de um trocador de calor em que o fluido frio é impulsionado por convecção natural por meio de tubos com seção transversal circular verticais conectados por dois distribuidores. O fluido quente escoava de forma cruzada aos tubos verticais e os aquece por convecção forçada. Foram testadas três configurações distintas (dois, três e quatro tubos) empregando o método Design Construtal (Fig. 1.2). O estudo tinha por objetivo mostrar que era possível modificar a arquitetura do dispositivo de tal forma que ocorra a maximização da transferência de calor de forma global. Também foram atribuídos os seguintes valores para os números de Grashof, Prandtl e Reynolds, $Gr = 10^4$, $Pr = 0.72$, $Re_{Dh,c} = 500$ (para o fluxo frio) e $Re_{D,h} = 10$ (para o fluxo quente).

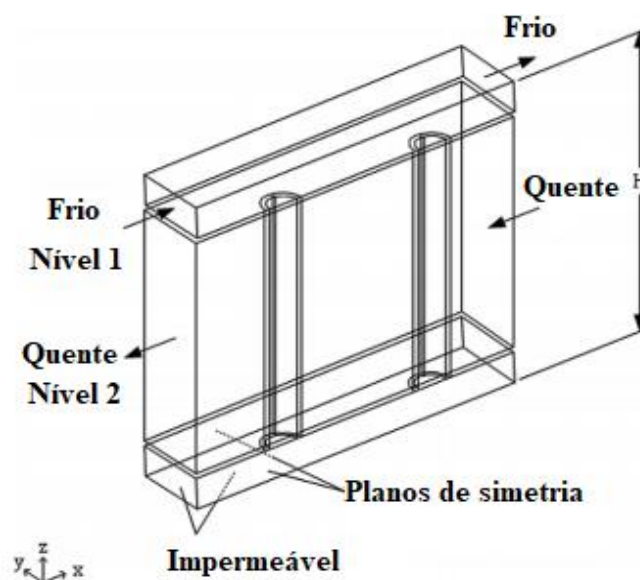


Figura 1.2 - Configuração do trocador de calor com dois tubos (Adaptado: Kim *et al.*, 2010).

Os resultados indicaram que para a configuração mais simples, com apenas dois tubos, o melhor design foi aquele em que os diâmetros eram praticamente iguais. Para o arranjo com três tubos, foi fixado o diâmetro de um dos tubos e variado o valor dos demais. À medida que o diâmetro do tubo do meio se tornava menor, o efeito de alterar sua posição diminuía. O melhor desempenho foi obtido por meio da configuração 2 tubos. Mas utilizando obrigatoriamente 3 tubos é possível conseguir uma geometria ótima mudando a posição do tubo do meio ou o seu diâmetro. Assim, a redução do diâmetro do tubo intermediário torna a sua posição irrelevante para o fenômeno por contribuir pouco para as trocas.

Quando considerados quatro tubos foram usados dois tamanhos, o maior tamanho para os

dois tubos externos ($D_1 = D_4$), e o menor tamanho para os dois tubos internos ($D_2 = D_3$), e então variaram a razão entre os diâmetros adjacentes D_3/D_4 ou D_2/D_1 . Outro olhar sobre o efeito da configuração no desempenho global foi aplicar três tamanhos de tubo: D_2 , D_3 e $D_1 = D_4$. A relação entre os tamanhos internos D_2/D_3 variaram. Quando o fluido frio circulava em quatro tubos verticais, as melhores configurações foram novamente aquelas em que os tubos internos (D_2 , D_3) desapareciam. Variando as taxas de diâmetro D_2/D_3 , descobriram que existe um tamanho relativo ótimo ($D_1 = D_4$ e $D_2 = D_3$).

No estudo de Hesam e Navid (2011) foi considerado dois cilindros dispostos lado a lado submetidos a escoamento transiente, viscoso, bidimensional e incompressível. O arranjo estudado pelos autores é ilustrado pela Fig. 1.3. Para as simulações computacionais foi assumido que a relação entre a distância dos centros dos cilindros (T) e o diâmetro dos cilindros (D), ou seja, T/D variou entre 1.5 e 4.0 m. Para o escoamento laminar o número de Reynolds foi de $Re = 100$ e 200 , enquanto para o turbulento o $Re = 10^4$.

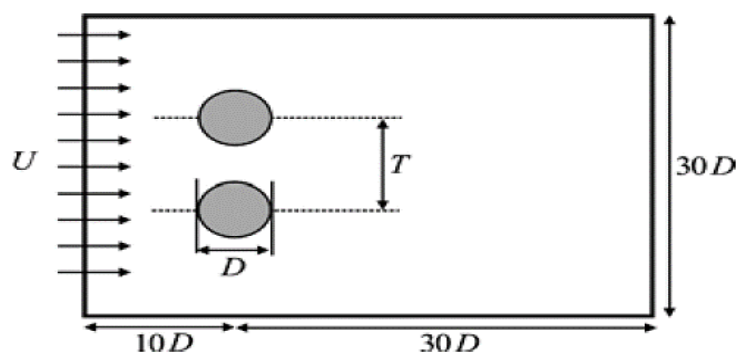


Figura 1.3 - Domínio computacional formado por dois cilindros lado a lado (Fonte: Hesam e Navid, 2011).

Segundo os autores, os resultados encontrados foram coerentes com os esperados, pois as medidas estabelecidas para a relação T/D e o número de Re implicaram significativamente nos resultados do estudo. De maneira geral, pode-se concluir que se tratando de espaçamentos menores entre os cilindros, as forças hidrodinâmicas apresentam variações irregulares, enquanto para distâncias maiores a variação dessas forças acontece de forma regular.

Pedrotti (2015) realizou a avaliação geométrica de um arranjo de tubos por meio do Design Construtal. Os tubos foram submetidos a escoamento externo, com convecção forçada, bidimensional, laminar, permanente e incompressível. O objetivo desse estudo foi obter a maior taxa de transferência de calor entre os cilindros e o escoamento circundante usando-se uma função de construção para a montagem do arranjo de tubos (e não com uma forma pré-definida). Foi

considerado que para a montagem da matriz de tubos, cada um deles pode ocupar qualquer posição dentro de uma área de ocupação. Sendo o diâmetro dos cilindros constantes de $D = 0,1$ m, e quatro diferentes distâncias mínimas entre os tubos para a montagem de um novo tubo no arranjo entre os tubos (Fig. 1.4). Foi avaliada a troca térmica em escoamentos com números de Reynolds $Re_D = 10$, $Re_D = 50$, $Re_D = 100$ e Número de Prandtl $Pr = 0.71$. Os resultados mostraram que as diferentes distâncias mínimas de construção e o número de Reynolds afetam a formação dos arranjos. Dos casos analisados em sua maioria a restrição de $1,5D$ conduziu a construção de arranjos mais eficientes termicamente.

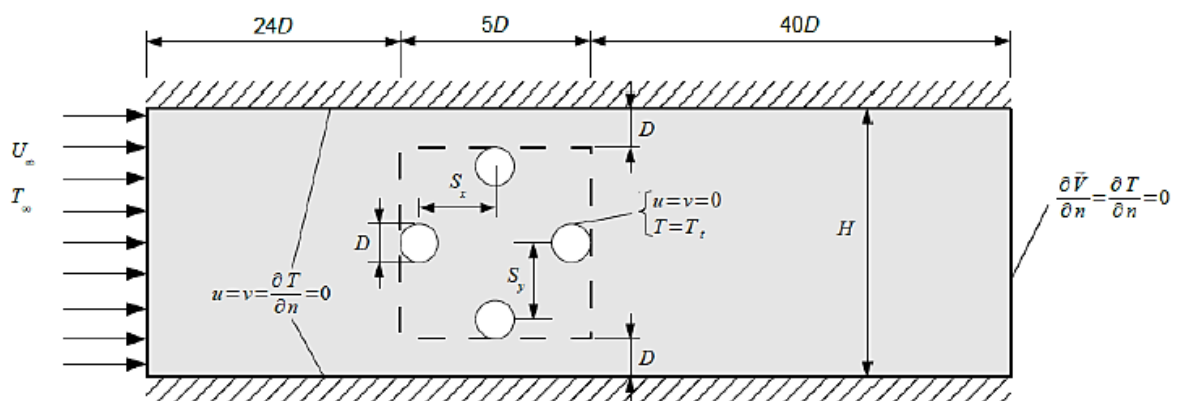


Figura 1.4 – Domínio computacional (Fonte: Pedrotti, 2015).

No estudo de Li *et al.* (2016) foi investigado a transferência de calor com convecção forçada sobre cilindros com protuberâncias montadas nas superfícies, ou seja, com regiões mais salientes, aplicando a metodologia de Design Construtal. Os cilindros possuem temperatura constante e aquecem o ar que flui através deles. Foi analisada a influência do número de saliências no processo de transferência de calor, a altura das protuberâncias e duas configurações de alinhamento dos cilindros. O objetivo foi investigar os efeitos das saliências na transferência de calor e arrasto do cilindro. O número de Prandtl assumido foi $Pr = 0.702$ e o escoamento era laminar com número constante de Reynolds $Re_D = 100$.

Inicialmente foi utilizado um círculo como base e posteriormente adicionado um número de saliências ao longo de sua circunferência. As protuberâncias cobriram a totalidade do círculo base, sem deixar lacuna ou sobreposição. Cada protuberância foi um arco cujo pico recaía sobre um círculo externo imaginário. A seção transversal podia ser adequadamente definida com três parâmetros: o diâmetro do círculo base D_{base} , o diâmetro do círculo externo imaginário externo D e o número de protuberâncias \tilde{N} , conforme apresenta a Fig. 1.5.

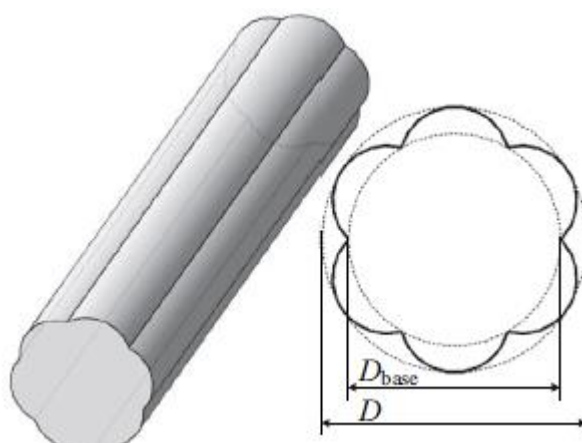


Figura 1.5 - Esquema do cilindro com saliências em sua superfície (Fonte: Li *et al.*, 2016).

O alinhamento das saliências da superfície do cilindro em relação ao escoamento incidente também teve um impacto significativo nas características do escoamento e na transferência de calor. Desta forma, foram analisados dois modos de alinhamento, conforme apresenta a Fig. 1.6.

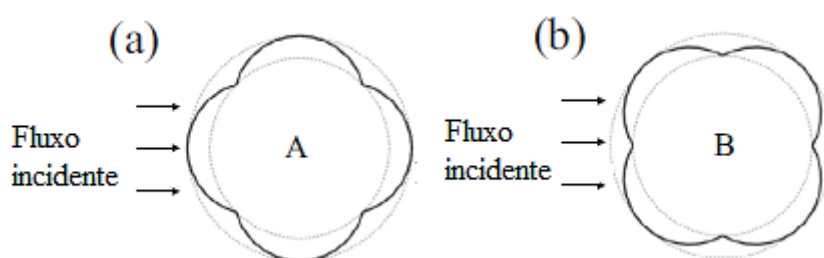


Figura 1.6 – Dois modos de alinhamento: (a) modo A, a ponta de uma protuberância se alinha com a direção de entrada; (b) modo B, o entalhe de duas protuberâncias vizinhas alinha-se com a direção de entrada (Adaptado: Li *et al.*, 2016).

Para os cilindros modificados com não mais do que seis saliências, observou-se um aumento no número de Nusselt médio no tempo e no espaço. Então, foi investigado o número de Nusselt local ao longo do cilindro modificado, bem como os campos de temperatura e escoamento, e descobriram que os entalhes entre as protuberâncias causavam grande deterioração na transferência de calor local. Os resultados obtidos pelos autores sugerem que quando as saliências foram adicionadas ao cilindro circular de maneiras específicas, o desempenho convectivo foi potencialmente aumentado. Também foi constatado que os entalhes entre as saliências foram uma importante fonte de impedimento geral para a convecção.

Barros *et al.* (2017) realizou o estudo de um arranjo triangular de cilindros com mesmo diâmetro sujeitos a escoamentos laminares, transientes, bidimensionais e incompressíveis com

convecção mista. A Figura 1.7 ilustra o domínio computacional do problema estudado nesse trabalho. Nas simulações foram utilizados o número de Reynolds $Re_D = 100$ e número de Prandtl $Pr = 0.71$. Nesse artigo foram estudados 5 diferentes valores do número de Richardson: $Ri = 0.1; 0.5; 1.0; 5.0$ e 10.0 .

O estudo teve por finalidade a avaliação dos efeitos do número de Richardson (Ri) sobre o coeficiente de arrasto (C_D) e o número de Nusselt (Nu_D), ou seja, o problema foi avaliado de forma multiobjetiva. Neste problema os graus de liberdade são as relações: S_T/D (relação entre o passo transversal e o diâmetro do cilindro) que varia entre $1.5 \leq S_T/D \leq 5.0$ e S_L/D (relação entre o passo longitudinal e o diâmetro do cilindro) que assume os valores entre $1.5 \leq S_L/D \leq 5.0$.

Os resultados encontrados pelos autores indicaram que os valores atribuídos ao número de Ri têm grande influência sobre o comportamento dinâmico e térmico do fluido, bem como sobre o C_D e número de Nu_D . Por exemplo, para a análise do número de Nu_D em $Ri = 0.1$ a maximização acontece quando ocorre a maior magnitude para S_T/D , ou seja, $S_T/D = 5.0$. Enquanto que para $Ri = 10.0$, a medida intermediária para S_T/D proporciona o melhor desempenho.

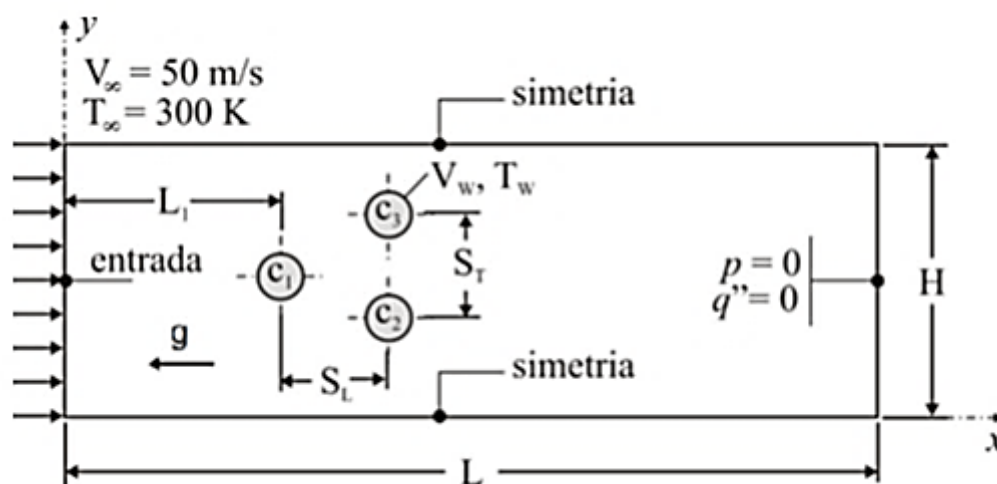


Figura 1.7 – Domínio computacional do arranjo triangular (Fonte: Barros *et al.*, 2017).

No trabalho de Pereira *et al.* (2017) foi realizado um estudo numérico de avaliação geométrica de um arranjo formado por quatro cilindros de mesmo diâmetro, submetido a um escoamento laminar com convecção forçada, bidimensional e incompressível. Nas simulações foram utilizados o $Re_D = 10, 50$ e 100 e dois valores para $Pr = 0.71$ e 5.83 . Para este problema foram considerados os seguintes graus de liberdade: S_{T1}/D (relação entre o passo transversal dos cilindros frontais e o diâmetro dos cilindros), S_{T2}/D (relação entre o passo transversal dos cilindros posteriores e o diâmetro dos cilindros) e S_L/D (relação entre o passo longitudinal dos cilindros frontais e posteriores e o diâmetro

dos cilindros). Os graus de liberdade dos cilindros assumiram os seguintes valores: $1.5 \leq S_{T2}/D \leq 4.0$ com incremento de 0.5, para $S_L/D = 1.5; 2.0; 2.5; 3.0; 3.5; 4.0$; e os mesmos valores para S_{T1}/D . A Figura 1.8 apresenta o domínio computacional e as condições de contorno. O objetivo do estudo foi analisar o efeito dos graus de liberdade sobre o coeficiente de arrasto (C_D) e o número de Nusselt (Nu_D) sobre os cilindros.

Os resultados encontrados pelos autores evidenciam que os valores atribuídos ao número de Reynolds têm grande influência sobre o efeito da geometria e conseqüentemente, sobre o desempenho fluidodinâmico e térmico. Para pequenos valores de S_{T1}/D (por exemplo $S_{T1}/D = 1.5$) os arranjos não conduziram a menores valores de C_D pois, em os cilindros estando próximos, a um aumento da resistência à passagem do escoamento e por conseqüência também aumenta a pressão. Para o desempenho térmico, os diferentes números de Prandtl não tem influência significativa no efeito das relações geométricas.

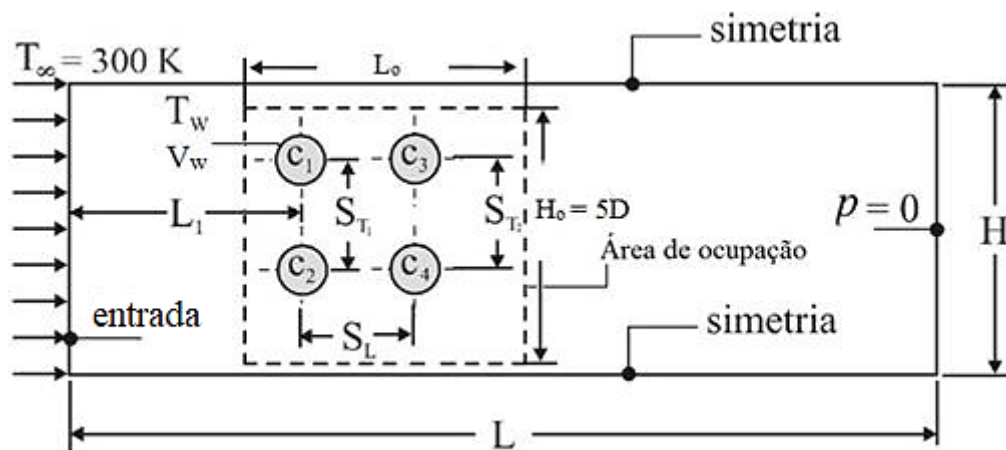


Figura 1.8 – Domínio computacional do arranjo de quatro cilindros alinhados (Fonte: Pereira *et al.*, 2017).

No trabalho de Seo *et al.* (2018) foram realizadas simulações numéricas bidimensionais de fenômenos de convecção natural em uma superfície quadrada fria contendo quatro cilindros elípticos quentes, conforme apresenta a Fig. 1.9. Foram considerados o número de Rayleigh no intervalo de $10^4 \leq Ra \leq 10^6$ e um número de Prandtl de $Pr = 0.7$. O objetivo foi avaliar a influência do número de Rayleigh e a razão de aspecto dos cilindros (AR, do inglês: *aspect ratio*) sobre o comportamento térmico do escoamento e taxas de transferência de calor.

Os resultados obtidos indicam que em $Ra = 10^4$ e $Ra = 10^5$, as soluções numéricas mostraram características independentes do tempo, e as estruturas de escoamento e térmicas mostraram um padrão simétrico em torno da linha central, independentemente da variação em AR. Para um número

de Rayleigh relativamente alto ($Ra = 10^6$), o escoamento e os campos térmicos tinham vários estados instáveis de acordo com a variação em AR. Desta forma, a variação de AR tem influência bastante significativa nas características de transferência de calor nas superfícies dos cilindros e nas paredes do corpo quadrado, ou seja, taxas de transferência de calor local..

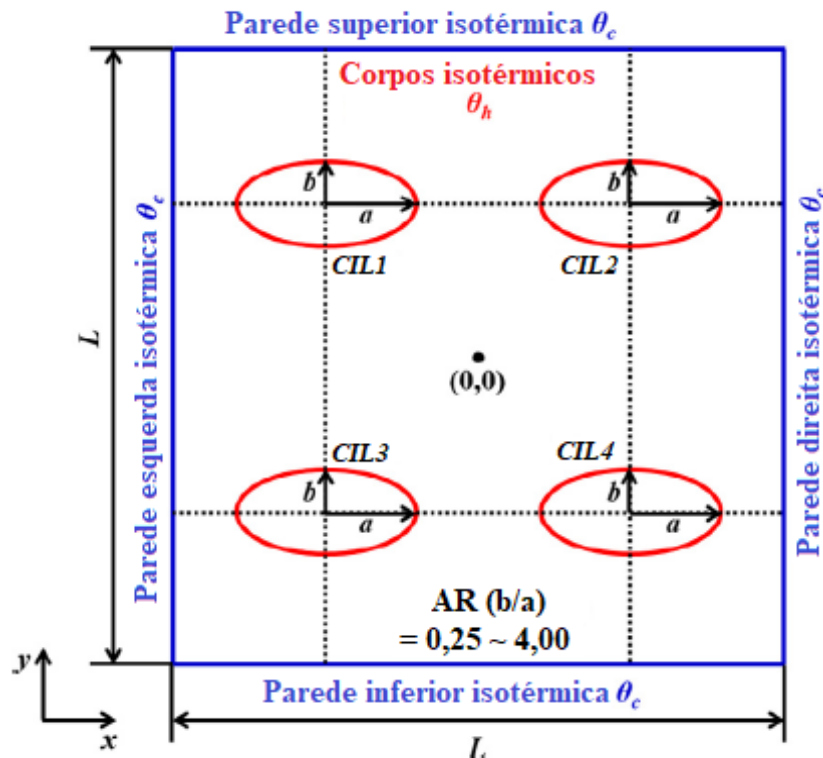


Figura 1.9 – Domínio computacional e condições de contorno (Fonte: Seo *et al.*, 2018).

Dessa forma, com base nos trabalhos mencionados aqui, busca-se com o presente estudo analisar um escoamento com transferência de calor por convecção forçada sobre um arranjo de quatro cilindros alternados aplicando o método de Design Construtal (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008). São avaliados três graus de liberdade com o objetivo de maximizar o número de Nusselt (Nu_D) e de minimizar o Coeficiente de arrasto (C_D) entre os cilindros e o escoamento circundante. As razões dos passos transversal (S_T/D) e longitudinal (S_{L1}/D e S_{L2}/D) são pré-determinadas dentro de uma área de ocupação para o arranjo de cilindros, seguindo as medidas: $1.5 \leq S_{L1}/D \leq 4.0$, $1.5 \leq S_{L2}/D \leq 3.0$ e $1.5 \leq S_T/D \leq 5.0$. As simulações são realizadas considerando os números de Reynolds $Re_D = 10, 40$ e 150 e o número de Prandtl $Pr = 0.71$, totalizando 96 para cada Re_D casos avaliados, completando 288 simulações. Ao melhor conhecimento dos autores não foram observados trabalhos na literatura onde esse tipo de arranjo tivesse sua geometria avaliada pela metodologia de Design Construtal.

1.2. Objetivos

Nesta seção são expostos o objetivo geral, bem como uma descrição detalhada dos objetivos específicos do trabalho.

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho numérico é avaliar o efeito da geometria de um arranjo formado com quatro cilindros alternados, sujeitos a escoamentos laminares com convecção forçada através do método Design Construtal associado ao mecanismo de busca exaustiva. As melhores geometrias serão as que maximizarem o número de Nusselt (Nu_D) e minimizarem o coeficiente de arrasto (C_D). Além disso, pretende-se avaliar o efeito do número de Reynolds sobre o design do arranjo estudado. Os graus de liberdade do problema são: S_T/D (relação entre o passo transversal dos cilindros intermediários e o diâmetro), S_{L1}/D (relação entre o passo longitudinal dos cilindros frontal e intermediário e o diâmetro) e S_{L2}/D (relação entre o passo longitudinal dos cilindros intermediário e posterior e o diâmetro).

1.2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Avaliar o efeito da razão S_T/D sobre o número de Nusselt e sobre o coeficiente de arrasto;
- Avaliar o efeito da razão S_{L2}/D sobre o número de Nu_D uma vez maximizado $(Nu_D)_{max}$, o coeficiente de arrasto uma vez minimizado $(C_D)_{min}$ e a razão S_T/D uma vez otimizada $(S_T/D)_o$;
- Avaliar o efeito da razão S_{L1}/D sobre o número de Nusselt duas vezes maximizado $(Nu_D)_{2max}$, o coeficiente de arrasto duas vezes minimizado $(C_D)_{2min}$, a razão S_T/D duas vezes otimizada $(S_T/D)_{2o}$ e a razão S_{L2}/D uma vez otimizada $(S_{L2}/D)_o$;
- Avaliar a influência do número de Reynolds ($Re_D = 10, 40$ e 150) nos efeitos das razões geométricas sobre os indicadores de performance do problema;
- Investigar o efeito no número de Reynolds (Re_D) sobre as geometrias ótimas do arranjo;
- Avaliar o efeito do cilindro posterior (C_4) em relação as suas contribuições positivas e/ou negativas para o processo de transferência de calor e a resistência do escoamento sobre o arranjo como um todo.

1.3. Delineamento do texto

Este trabalho é estruturado com as seguintes divisões:

- Capítulo 2:

Neste capítulo será apresentado a fundamentação teórica, sendo as definições fundamentais para este estudo, tais como conceitos de transferência de calor, relações entre os números de Nusselt, Reynolds e Prandtl, Lei Construtal, Método Construtal e Método Numérico.

- Capítulo 3:

Este capítulo tratará da Modelagem Matemática detalhada do problema estudado, que consiste na sua descrição, metodologia aplicada, equações de conservação, seus critérios de convergência, definição das restrições, graus de liberdade e indicadores de performance do problema de otimização geométrica.

- Capítulo 4:

O capítulo abordará a abordagem numérica de forma minuciosa, com a reprodução da construção da malha, do mesmo modo que o teste da solução independente de malha. Detalhamento dos parâmetros numéricos empregados e verificação do modelo.

- Capítulo 5:

Especificará os resultados encontrados pelo estudo com tópicos que relatam separadamente as análises térmicas e fluidodinâmicas.

- Capítulo 6:

Incluirá este capítulo as conclusões obtidas para estudo proposto.

- Capítulo 7:

Conta com uma proposta de continuidade do problema apresentado.

- Capítulo 8:

Refere-se às referências bibliográficas consultadas para o desenvolvimento deste trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados os conceitos fundamentais aplicadas neste estudo. Temas como transferência de calor (condução e convecção) são abordados de forma sucinta, assim como as definições dos principais grupos adimensionais envolvidos no processo de transferência de calor por convecção: número de Reynolds, Prandtl e Nusselt. Além disso, são apresentados alguns conceitos sobre o método Design Construtal, como as definições de Lei Construtal, Teoria Construtal e Design Construtal.

2.1. Conceitos de Transferência de Calor

Os processos de transferência de calor possuem hoje um papel muito importante no design de diversos dispositivos. Com o objetivo de proteger ou aumentar a vida útil de equipamentos térmicos, pode-se observar a transferência de calor nos radiadores dos automóveis e até na fuselagem de aviões para evitar o superaquecimento. Em situações em que o aquecimento é desejável, como em coletores solares e caldeiras, dispositivos capazes de maximizar a absorção de calor são empregados. Nas residências, o ar-condicionado e a geladeira, o aquecedor de água e o ferro de passar, são hoje artigos de primeira necessidade. Até nas paredes e telhados das habitações materiais isolantes são utilizados para melhor o conforto térmico de seus ocupantes, minimizando os gastos energéticos (Çengel e Ghajar, 2015).

A transferência de calor é a ciência que procura prever a transferência de energia que pode ocorrer entre corpos materiais como resultado de uma diferença de temperatura. Termodinâmica ensina que esta transferência de energia é definida como calor. A ciência da transferência de calor não busca apenas explicar como a energia térmica pode ser transferida, mas também serve para prever a taxa em que a troca ocorrerá e sob que condições especificadas (Holman, 2010).

A transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido à diferença de temperaturas no espaço. Os mecanismos de transferência de calor são classificados de acordo com a forma em que ocorrem (Incropera *et al.*, 2008; Patankar, 1980).

Para o cálculo da quantidade de energia transferida por unidade de tempo, é utilizada uma equação constitutiva denominada de Lei de Fourier. Considerando uma distribuição unidimensional do campo de temperaturas, $T(x)$, a taxa é representada na forma (Incropera *et al.*, 2008):

$$q_x'' = -kA \frac{dT}{dx}, \quad (2.1)$$

onde a área normal ao fluxo é representada por A (m^2), e o parâmetro k representa a condutividade térmica ($W/(m.K)$) que caracteriza o material da parede. O sinal negativo (-) é consequência do fato de o calor ser transferido na direção da temperatura decrescente.

A Convecção é um mecanismo de transferência de calor relacionado a escoamentos de fluidos ou gases com temperaturas distintas sobre superfícies com diferentes temperaturas. Esse modo de transferência de calor envolve os efeitos combinados de difusão de calor que ocorre na região próxima da superfície e de movimento macroscópico de fluido (advecção). Quanto mais intenso o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção (adectivo dominantes), e na ausência de qualquer movimento do fluido, a transferência de calor entre uma superfície sólida e o líquido ocorre predominantemente por difusão (Cengel e Ghajar, 2015).

Considerando o escoamento de um fluido em uma superfície com temperaturas distintas, para calcular a taxa de transferência de calor por convecção deve-se partir de dois pontos distintos e aplicar a Lei de Resfriamento de Newton, que afirma que o fluxo de calor é proporcional à diferença de temperatura entre a superfície e o fluido (Bejan, 2013):

$$q'' = h(T_{SUP} - T_{\infty}), \quad (2.2)$$

onde o parâmetro h ($W/(m^2.K)$) é denominado de coeficiente de transferência de calor por convecção, no qual seu valor depende das condições da camada limite, geometria, fluido de trabalho e regime de escoamento.

Se tratando da natureza da convecção é possível classificá-la nos modos: natural, forçada, mista, por ebulição e por condensação (Incropera *et al.*, 2008; Bejan, 2013). A Figura 2.1 apresenta os tipos de convecção. Além disso, os escoamentos convectivos podem ser sujeitos à mudança de fase, gerando a troca por ebulição e condensação (os dois últimos tipos não são aqui apresentados de forma mais abrangente, pois não são o foco deste estudo).

No estudo de escoamentos com convecção forçada é usual utilizar parâmetros de similaridade. O número de Nusselt (Nu_L) é um parâmetro adimensional utilizado para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção (h). Ele pode ser descrito da forma (Incropera *et al.*, 2008):

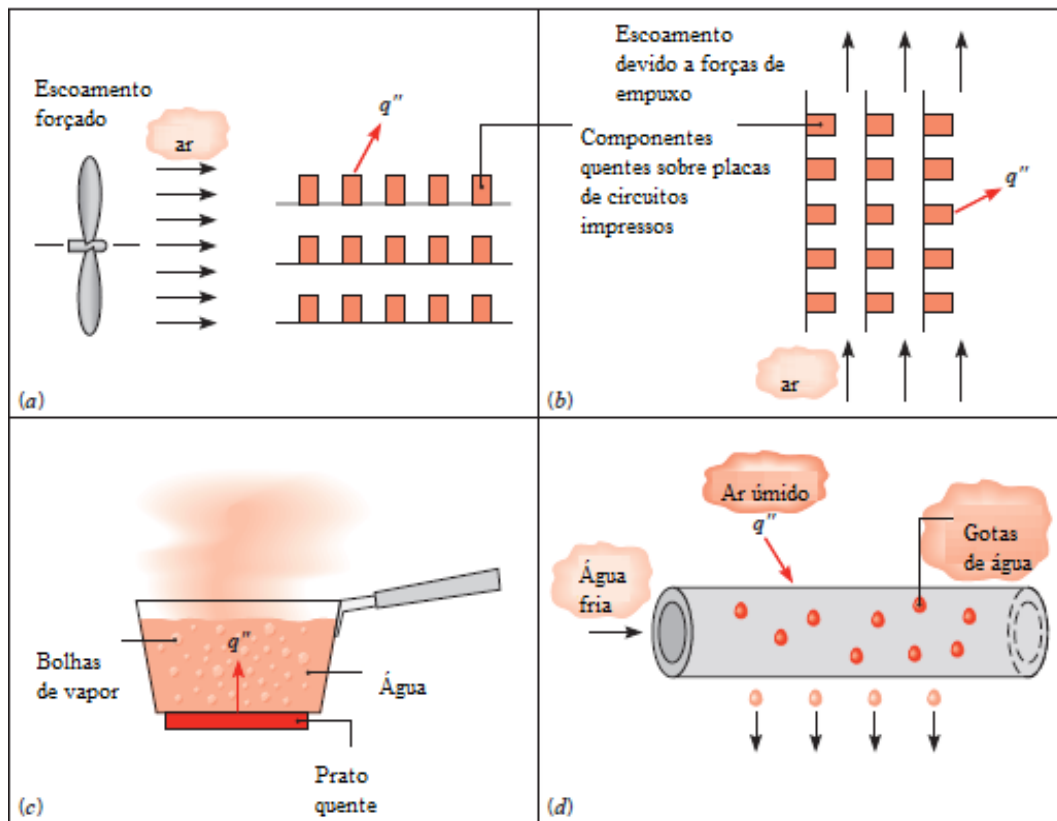


Figura 2.1 - Tipos de convecção: a) convecção forçada; b) convecção natural; c) ebulição e d) condensação (Fonte: Incropera *et al.*, 2008).

$$Nu_L = \frac{\text{Transferência de calor por convecção}}{\text{Transferência de calor por condução}} = \frac{h\Delta T}{k\frac{\Delta T}{L}} = \frac{hL}{k} \quad (2.3)$$

onde h é o coeficiente de transferência de térmica por convecção ($W/(m^2.K)$), L é o comprimento característico (m), k é a condutividade térmica do fluido ($W/(m.K)$), e ΔT é a diferença de temperaturas entre a parede e o fluido na região da corrente livre (K).

Para escoamentos com convecção forçada o número de Nusselt (Nu_L) também pode ser representado como função de dois parâmetros adimensionais, Número de Reynolds (Re_L) e Número de Prandtl (Pr), (Incropera *et al.*, 2008):

$$Nu_L = f(Re_L, Pr). \quad (2.4)$$

O número de Reynolds (Re_L) representa fisicamente o quociente entre duas forças: forças de inércia ($v\rho$) por forças de viscosidade ($\frac{\mu}{D}$), sendo expresso por (Incropera *et al.*, 2008):

$$Re_L = \frac{\text{Forças de inércia}}{\text{Forças de viscosidade}} = \frac{V\rho D}{\mu}, \quad (2.5)$$

onde V é a velocidade média do fluido (m/s), D é o comprimento característico do escoamento (m) que no caso de escoamentos sobre cilindros é dado pelo diâmetro do cilindro, μ é a viscosidade dinâmica do fluido (kg/m.s) e ρ é a massa específica do fluido (kg/m³).

Este parâmetro é essencial para determinar se a camada limite é laminar ou turbulenta. Para valores de $Re_L \leq 2 \times 10^5$ o escoamento é considerado como laminar e quando $Re_L \geq 2 \times 10^5$ a camada limite é turbulenta. Em alguns casos existem as condições de escoamento laminar e turbulento, ou seja, a secção laminar precedendo a turbulenta. O movimento do fluido se afastando da superfície se faz necessário pela desaceleração do fluido próximo à parede na medida em que a camada limite cresce na direção x (Incropera *et al.*, 2008; Bejan, 2013).

Na camada limite laminar, o movimento do fluido é altamente ordenado, sendo possível identificar linhas de correntes ao longo das quais as partículas do fluido se movem. Já no escoamento turbulento este comportamento é altamente irregular, se caracterizando pelo movimento tridimensional aleatório de grande parte do fluido (Incropera *et al.*, 2008; Bejan, 2013).

A Figura 2.2 ilustra as três regiões da camada limite para escoamento turbulento, estas são distintas e podem ser denominadas como: subcamada viscosa, em que o transporte é dominante pela difusão e o perfil de velocidades é aproximadamente linear; camada de amortecimento, a qual a difusão e a mistura turbulenta são comparáveis; e a zona turbulenta, que o transporte é dominado pela mistura turbulenta (Incropera *et al.*, 2008).

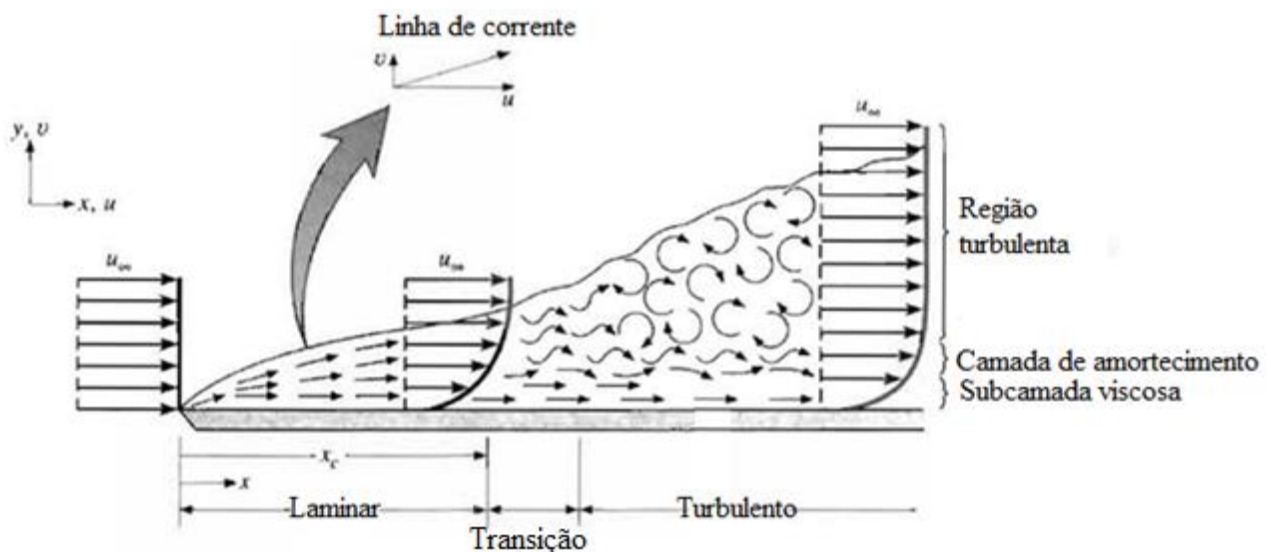


Figura 2.2 – Transição da camada limite laminar para turbulenta sobre uma placa plana

(Adaptado: Incropera *et al.*, 2008).

Outro grupo adimensional importante é o número de Prandtl (Pr), uma vez que a relação entre as camadas limite térmica e fluidodinâmica em um fluido é estimada por esse parâmetro adimensional. Expresso pela Eq. (2.6), é definida pela razão de difusividade de quantidade de movimento pela difusividade térmica de um fluido (Incropera *et al.*, 2008):

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}, \quad (2.6)$$

ou ainda,

$$Pr = \frac{\text{Difusão de quantidade de movimento}}{\text{Difusão de quantidade de calor}} = \frac{C_P \mu}{k}, \quad (2.7)$$

onde ν é a viscosidade cinemática do fluido (m^2/s), α é a difusividade térmica (m^2/s) e C_P é o calor específico ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$).

A convecção natural se caracteriza pelo movimento do fluido que é realizado inteiramente pela ação de uma força de campo (forças de empuxo) que atua em um corpo quando este tem gradientes de massa específica. Geralmente esse gradiente se dá por diferenças de temperatura e a força de empuxo pelo campo gravitacional (Kays *et al.*, 2004).

As velocidades dos escoamentos com convecção livre são geralmente muito menores do que aquelas associadas com convecção forçada. Consequentemente, as taxas de transferência de calor por convecção natural também são inferiores às obtidas em escoamentos por convecção forçada (Incropera *et al.*, 2008).

A convecção mista é a união entre os dois mecanismos: convecção forçada e natural. Sendo que a influência da convecção mista pode ser auxiliar (quando a convecção forçada e a natural estão na mesma direção e sentido), transversal (quando a convecção forçada e a natural estão em direções diferentes) ou oposta ao movimento predominante (mesma direção e sentidos opostos) da convecção forçada (Incropera *et al.*, 2008).

O campo de velocidade se difere entre os dois casos chamadas de: convecção forçada e natural. Em convecção forçada, a velocidade será muito maior em relação à convecção natural. Essa diferença entre as velocidades implicará também na transferência de calor, que ocorrerá com valores muito superiores em convecção forçada do que em convecção natural (Incropera *et al.*, 2008).

Se tratando de dinâmica dos fluidos, uma forma de quantificar a resistência que as superfícies imersas no escoamento causam ao mesmo é através do coeficiente de arrasto (C_D), que é um adimensional dado por (Incropera *et al.*, 2008):

$$C_D = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}, \quad (2.8)$$

onde F_d a força de arrasto (N), V é a velocidade do objeto relativo ao fluido (m/s) e A é área de referência (m²).

2.2. Lei Construtal e o Método do Design Construtal

A Lei Construtal é uma lei física proposta por Adrian Bejan que explica que os designs nos sistemas de fluxo/escoamento são determinísticos e não aleatório, como se acreditava (Bejan e Zane, 2013).

Desta forma, a Lei Construtal foi definida como “para um sistema de fluxo/escoamento de dimensões finitas persistir no tempo (sobreviver) sua configuração deve evoluir no tempo de forma a facilitar o acesso das correntes que fluem/escoam através do mesmo” (Bejan, 1997). Ou ainda, “para um sistema de fluxo/escoamento de dimensões finitas persistir vivo no tempo, sua configuração deve mudar livremente no tempo tal que facilite o acesso as suas correntes (fluido, energia e etc.)”. Como exemplo, pode-se citar os rios que visam atingir o oceano, as veias que visam atingir o pulmão e as pessoas que querem sair de casa e se deslocar para os locais de trabalho (Bejan e Lorente, 2008).

A Lei Construtal coloca os conceitos de "design" e "evolução" como uma questão central da física. Isso significa que os sistemas (animados ou inanimados) encontrados na natureza tem sua forma geométrica construída de forma determinística e não ao acaso (aleatória) (Bejan e Lorente, 2011).

Design Construtal é um método utilizado para a aplicação da Lei Construtal em qualquer sistema de fluxo/escoamento. Ou ainda, pode ser definido como um método utilizado para a avaliação de formas geométricas em sistemas de dimensões finitas submetidos a alguma espécie de fluxo/escoamento aplicado. Para isto, neste processo o fluxo/escoamento é maleável e a geometria é obtida a partir de um princípio de maximização do desempenho de indicadores de performance. Além disso, a geometria deve ser submetida a restrições globais e variada de acordo com seus graus de liberdade (Bejan, 2000). Tendo em vista o método apresentado, a Fig. 2.3 ilustra as etapas do processo.

O passo a passo apresentado é apenas uma representação sucinta do processo, pois um

detalhamento maior poderá ser visto no capítulo 3 - Modelagem matemática, onde será apresentado todos os passos para a avaliação geométrica do trabalho aplicando o Design Construtal e o método de Busca Exaustiva.

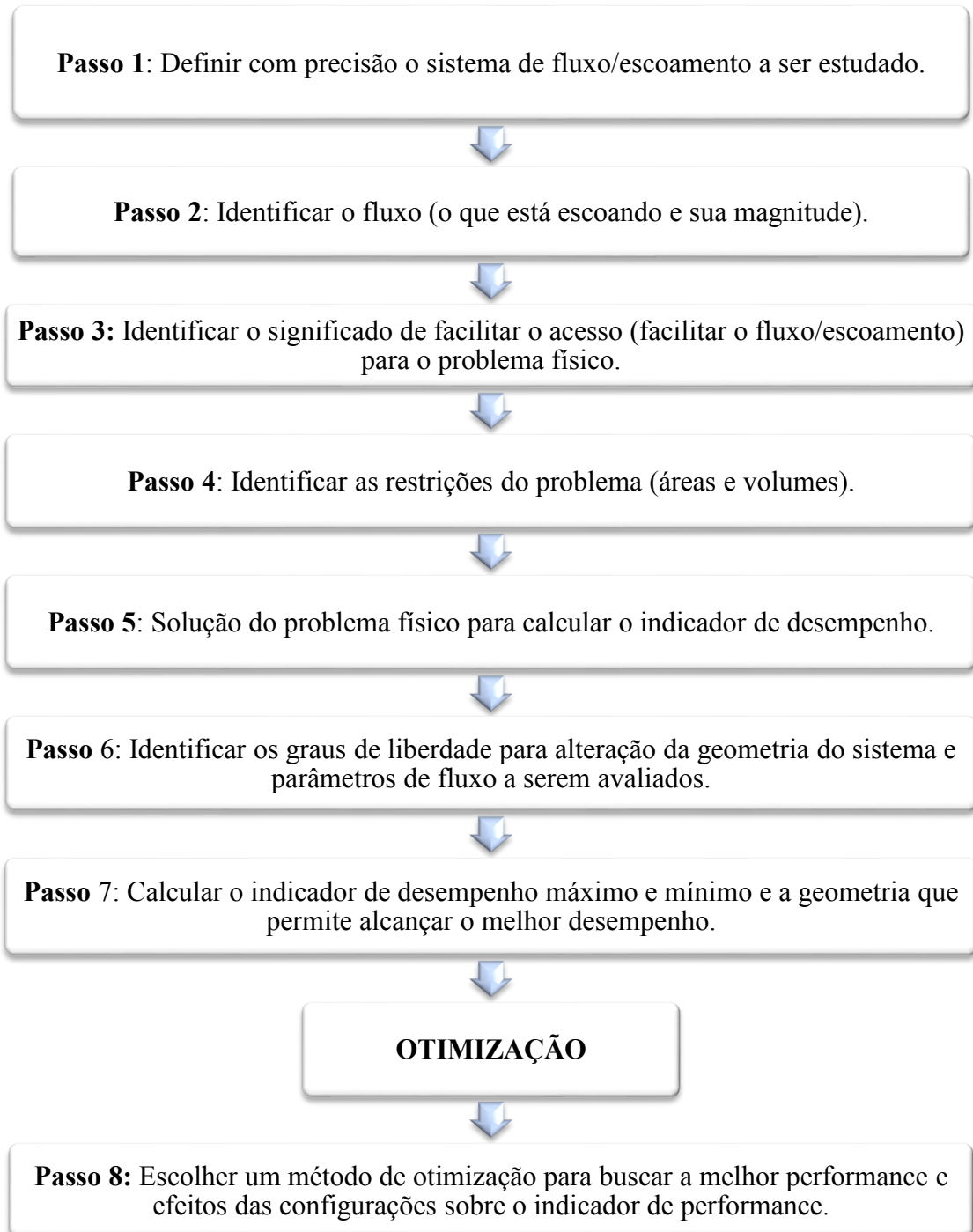


Figura 2.3 – Etapas de aplicação do Design Construtal (Fonte: Dos Santos *et al.*, 2018).

2.3. Método Numérico

O Método Numérico consiste em resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvam a função incógnita. Uma vez que se está resolvendo um sistema algébrico de equações, ao invés de um conjunto de equações diferenciais, a solução passa a ser obtida para um número discreto de pontos ao longo do domínio e não mais em um nível infinitesimal (Maliska, 2004).

Os Métodos Numéricos mais utilizados em transferência de calor são os Métodos das Diferenças Finitas (MDF), de Elementos Finitos (MEF) e de Volumes Finitos (MVF). O que difere os métodos são a maneira como as variáveis de interesse são aproximadas e o processo de discretização. Esses métodos proporcionam após a discretização uma solução algébrica das equações do problema (Maliska, 2004; Versteeg e Malalasekera, 2007; Patankar, 1980).

O presente estudo se baseia no Método dos Volumes Finitos (MVF), que consiste em realizar um balanço da propriedade para cada volume de controle de forma a obter a correspondente equação aproximada, o que o faz ser naturalmente conservativo. Esse recurso possibilita que mesmo para as malhas mais grosseiras, seja possível avaliar se um código atende ao princípio de conservação de qualquer propriedade, fato este que não é possível utilizando os outros dois métodos citados (MDF e MEF) (Maliska, 2004; Versteeg e Malalasekera, 2007).

2.3.1. O Método dos Volumes Finitos (MVF)

O Método dos Volumes Finitos (MVF) é aplicado aos estudos de mecânica dos fluidos e transferência de calor e de massa (McDonald, 1971; MacCormack e Paullay, 1972). De maneira prática, o MVF consiste na decomposição do domínio em pequenos volumes de controle, ou seja, a formação da grade numérica, ou ainda, chamada de malha. Cada volume de controle irá conter os nós, que armazenam as variáveis a serem resolvidas e servem como referência na aproximação com o resto do domínio, desta forma compõem o sistema algébrico a ser resolvido. Os nós podem estar no centro de cada volume de controle ou ainda, em seus vértices. A Figura 2.4 ilustra essa representação.

Formalmente, é possível afirmar que a finalidade do método numérico é transformar uma equação diferencial (ou conjunto de equações diferenciais), definida no domínio D , em um sistema de equações algébricas, como representado na Fig. 2.5 (Maliska, 2004).

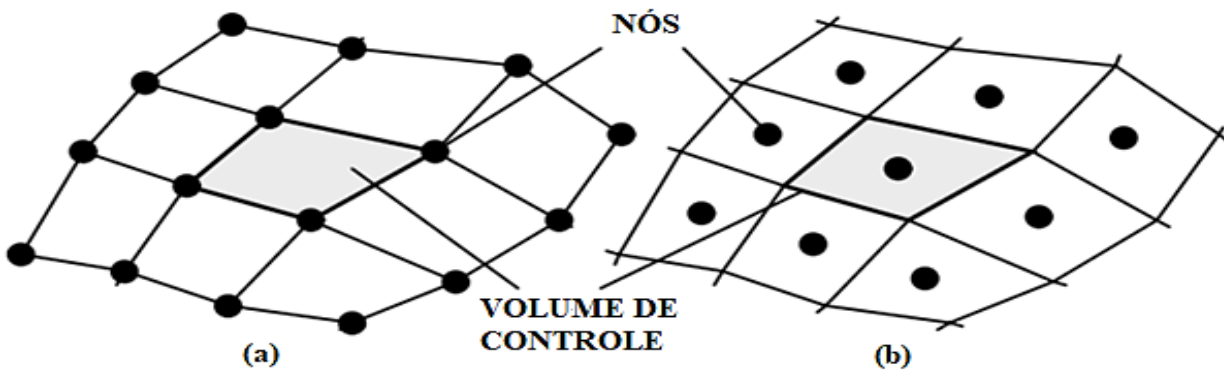


Figura 2.4 - Representação dos volumes de controle e nós: (a) nós nos vértices e (b) nós no centro dos volumes de controle (Adaptado de: Versteeg e Malalasekera, 2007).

Se tratando do MVF existem duas maneiras de se obter as equações, a primeira é realizar balanços da propriedade em questão nos volumes elementares, ou volumes finitos. A segunda é partir da equação diferencial na forma conservativa e integrá-la sobre o volume de controle no espaço e no tempo. Logicamente, as duas maneiras são equivalentes já que basta lembrar que para deduzir as equações diferenciais é necessário primeiro realizar um balanço em um volume infinitesimal, e em seguida o processo de limites para obter a equação (Maliska, 2004). Para mais informações acerca das equações do Método dos Volumes Finitos podem ser encontradas na literatura nos trabalhos de Patankar (1980), Maliska (2004) e Versteeg e Malalasekera (2007).

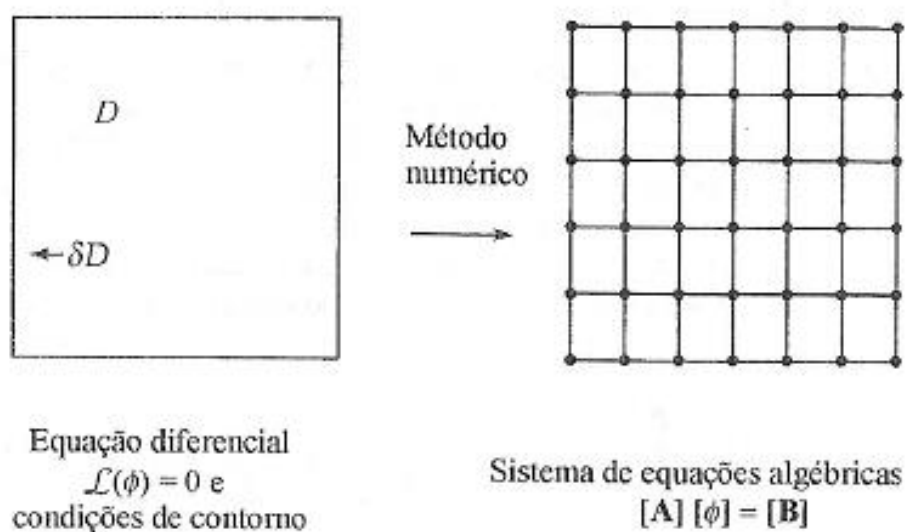


Figura 2.5 - Finalidade do método numérico (Fonte: Maliska, 2004).

A preferência em se obter as equações aproximadas integrando-se a equação diferencial se dá,

principalmente, por dois motivos: o balanço se torna uma tarefa bem difícil em volumes de controle irregulares, e nem todos os balanços são fáceis de deduzir quanto como foi o da conservação da massa. O balanço de quantidade de movimento, por exemplo, requer a identificação e o somatório de todas as tensões atuantes no volume de controle (Maliska, 2004; Versteeg e Malalasekera, 2007; Patankar, 1980).

2.3.2. Tratamento dos termos advectivos das equações de conservação

Com relação à estabilidade dos métodos para escoamentos advectivo-dominantes, a discretização por diferenças finitas centrais para o tratamento dos termos advectivos, em geometrias complexas, produzem soluções com perturbações nos campos de velocidades, pressão e temperaturas. Em problemas mais simples estas oscilações podem ser reduzidas empregando um maior refinamento de malha, porém, não é possível empregar este tipo de refinamento a problemas que utilizem condições de contorno que aproximem ao experimento real, como por exemplo, a massa específica do fluido estar em função da temperatura em um escoamento turbulento para análise da troca térmica por radiação, pois o refinamento excessivo da malha gera elevados esforços computacionais que impossibilitam a simulação (Maliska, 2004).

Para obter resultados que representem o experimento utilizando um menor esforço computacional, foram desenvolvidas técnicas para abordagem destes problemas.

Primeiramente no MVF, as perturbações nos campos de velocidades, pressão e temperatura geradas estão relacionadas à negatividade dos coeficientes dos termos advectivos das equações de conservação, que ocorre quando é utilizada uma discretização por diferenças finitas centrais. Uma forma de evitar isso o emprego de outra aproximação para os termos advectivos nas faces dos volumes de controle (Maliska, 2004; Patankar, 1980).

Uma das primeiras formas de tratamento utiliza-se do esquema de advecção *upwind*. Neste esquema a direção do escoamento é levada em consideração para a realização do cálculo do valor de uma determinada variável (velocidade, temperatura) na face do volume finito.

Além disso, a positividade dos coeficientes dos termos advectivos é sempre garantida, sendo geradas soluções numéricas ausentes de oscilações numéricas, além da vantagem de ser relativamente de simples aplicação em programas *CFD*.

Por ser um esquema acumulativo, ou seja, que utiliza os dados dos volumes anteriores de forma progressiva, uma malha não independente pode conduzir a resultados inadequados para discretização de primeira ordem (falsa difusão) (Maliska, 2004; Versteeg e Malalasekera, 2007).

2.3.3. Esquema de advecção *Upwind*

Os esquemas de advecção *Upwind* são utilizados para a aproximação dos termos convectivos (advectivos), pois a solução numérica requer a melhor precisão dos resultados. No esquema de advecção *Upwind* de primeira ordem, o valor de uma propriedade em uma face de volume é igual ao valor do nó do volume anterior. E ainda, o vizinho que é utilizado é dependente da direção do escoamento. Mais informações acerca do esquema de advecção *Upwind* pode ser encontradas na literatura em FLUENT, 2011.

2.3.4. Acoplamento Pressão-Velocidade

Com relação à variação temporal das variáveis primárias, os campos de velocidade e temperatura podem ser avançados no tempo empregando-se as equações de conservação da quantidade de movimento e energia, respectivamente. No entanto, na solução de escoamentos incompressíveis a pressão não possui uma equação própria para seu avanço no tempo e a equação de conservação de massa, por sua vez, não serve de equação evolutiva para nenhuma variável, sendo apenas uma restrição que deve ser obedecida pelo campo de velocidades (Maliska, 2004). Mais informações sobre acoplamento pressão-velocidade são encontradas na literatura nos trabalhos Patankar e Spalding (1972), Patankar (1980), Versteeg e Malalasekera (2007) e (FLUENT, 2011). Ou ainda, um maior detalhamento desta etapa no tópico 4. Modelagem numérica.

2.4. Tipos de malhas

A geração da malha consiste em dividir o domínio computacional em subdomínios, onde o número de células irá determinar a exatidão dos resultados. Esses volumes de controle podem ter diversas formas e tamanhos. Nos casos mais complexos a malha é construída na forma curvilínea generalizada, que permite que os volumes de controle se conectem entre si através de uma lei de formação no caso das malhas estruturadas, e de forma arbitrária no caso das malhas não estruturadas (Maliska, 2004).

As malhas podem ser classificadas como estruturadas e não estruturadas, que consiste na forma em que as células estão organizadas. A malha estruturada - com seus volumes ordenados - é

determinada como famílias de linhas de malha com a propriedade que os membros de uma mesma família não se cruzam entre si, isso facilita a resolução pelos *solvers*. Esse processo não acontece na malha não estruturada (Bern e Plassmann, 2000).

No entanto, em alguns casos a malha não estruturada permite uma discretização adequada do domínio, mas a dificuldade na ordenação de seus volumes elementares dá origem a matrizes mais complexas que impossibilitam a aplicação de muitos métodos numéricos para serem resolvidas. E ainda, em problemas em que há a união de malhas estruturas e não estruturadas, são denominadas como híbridas, conforme apresenta a Fig. 2.6 (Maliska, 2004; Bern e Plassmann, 2000).

A geração da malha pode ser em 2D ou 3D, de acordo com o problema em estudo. Quando o domínio é bidimensional as células serão retangulares e/ou triangulares, e no caso de tridimensional na forma de hexaedro, tetraedro, prisma e/ou pirâmide (Maliska, 2004).

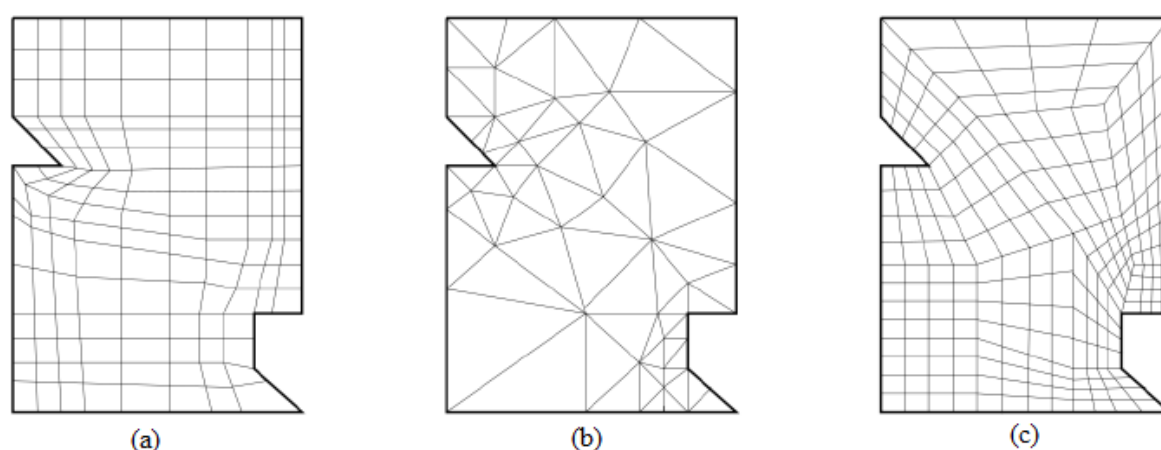


Figura 2.6 - Classificação da malha: a) estruturada; b) não estruturada e c) híbrida (Fonte: Bern e Plassmann, 2000).

2.5. Feixe de tubos

A transferência de calor em feixes de tubos tem diversas aplicações industriais, tais como geração de vapor em uma caldeira ou resfriamento de ar na serpentina de um condicionador de ar. O esquema geométrico de um arranjo de tubos é mostrado pela Fig. 2.7, onde um fluido se move sobre os tubos, enquanto um outro fluido, a uma temperatura diferente, escoar no interior dos tubos. As fileiras de tubos podem estar dispostas nas formas: alternada ou alinhada, conforme a Fig. 2.8 (Incropera *et al.*, 2008; Bejan, 2013).

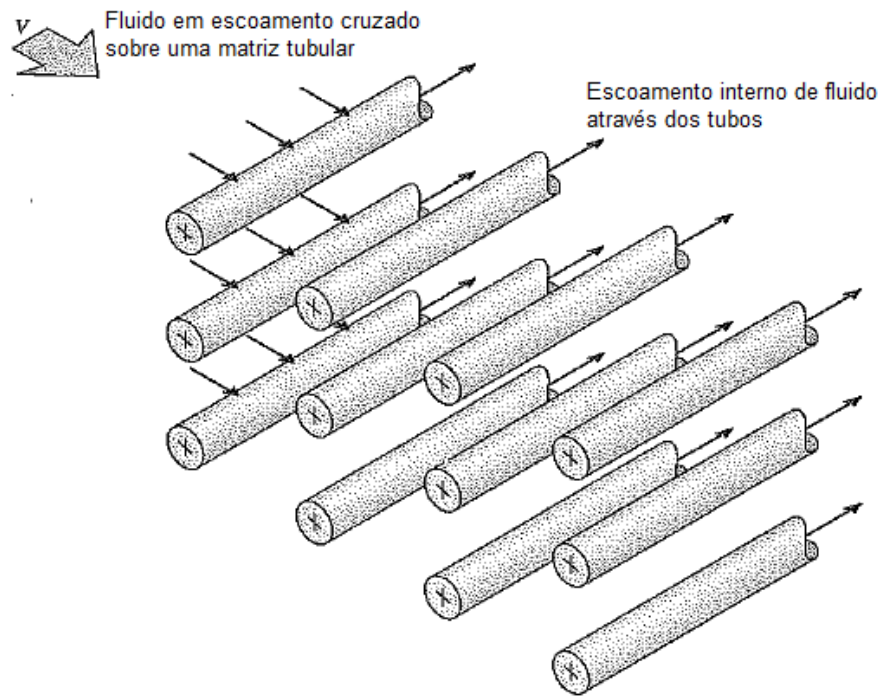


Figura 2.7 – Esboço de feixe de tubos em escoamento cruzado (Fonte: Incropera *et al.*, 2008).

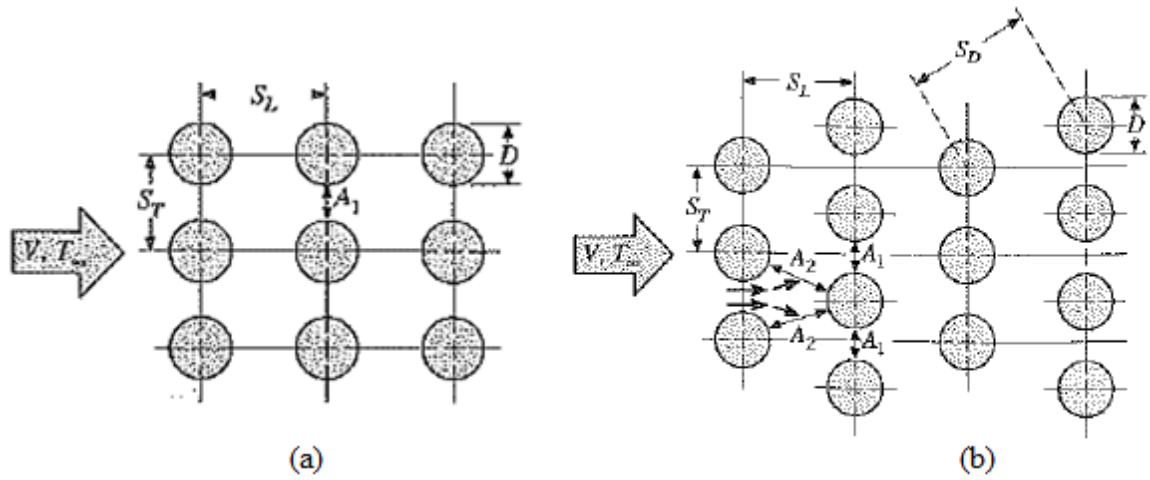


Figura 2.8 – Arranjo dos tubos nas formas: (a) alinhado e (b) alternado (Adaptado: Incropera *et al.*, 2008).

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo é abordado de forma detalhada a Modelagem Matemática, que consiste na descrição do problema, condições de contorno, a metodologia aplicada e equações de conservação aplicadas.

3.1. Definição do problema

O problema em análise considera um escoamento laminar, incompressível, transiente, bidimensional sobre quatro cilindros alternados submetidos à convecção forçada aplicando Design Construtal. Os cilindros têm o mesmo diâmetro de $D = 0.1$ m. O domínio do problema e as principais variáveis geométricas podem ser vistas na Fig. 3.1, que exhibe as dimensões do domínio computacional de: $L = 35D = 3.5$ m; $H = 15D = 1.5$ m; $L_1 = 8D = 0.8$ m, $H_0 = L_0 = 6D = 0.6$ m e $A_0 = 36 D^2$.

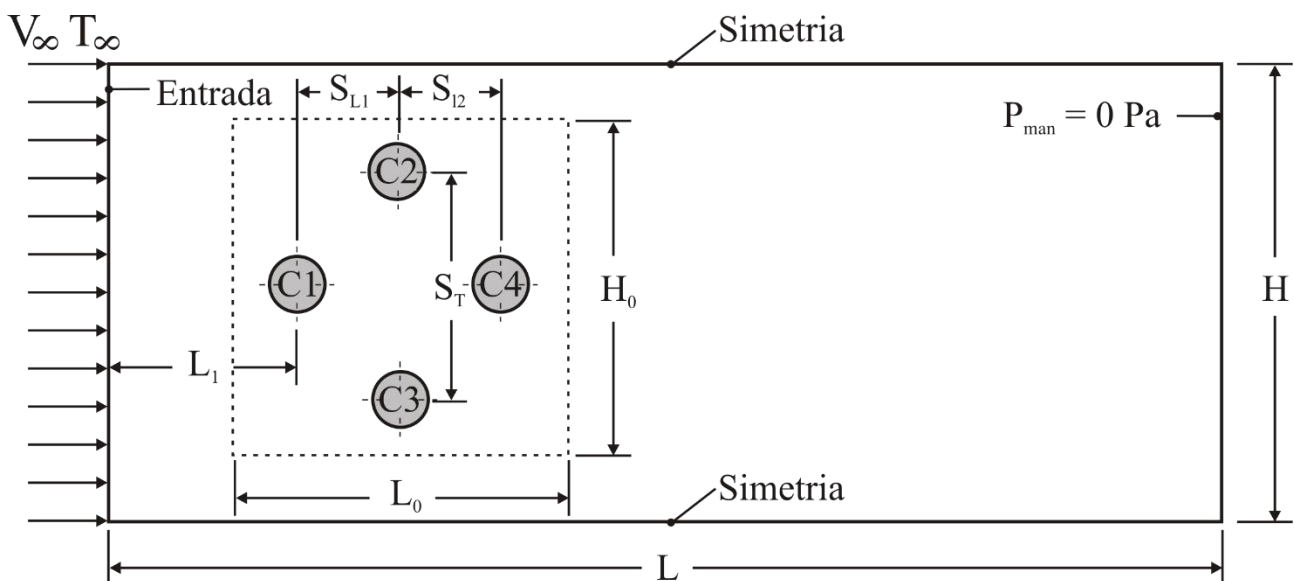


Figura 3.1 – Domínio computacional do problema.

Os graus de liberdade do problema são: S_T/D (relação entre o passo transversal dos cilindros intermediários e o diâmetro), S_{L1}/D (relação entre o passo longitudinal dos cilindros frontal e intermediário e o diâmetro) e S_{L2}/D (relação entre o passo longitudinal dos cilindros intermediário e posterior e o diâmetro). Para este estudo foram estabelecidos os valores de: $S_{L1}/D = 1.5; 3.0$ e 4.0 , para $S_{L2}/D = 1.5; 2.0; 2.5$ e 3.0 e S_T/D varia entre $1.5; 2.0; 2.5; 3.0; 3.5; 4.0; 4.5$ e 5.0 .

O escoamento é ocasionado pela imposição de um perfil de velocidades constante na entrada do domínio (linha esquerda) com velocidades de $V_{ent} = 5, 20$ e 75 m/s, que correspondem, respectivamente, aos valores de $Re_D = 10, 40$ e 150 . Na saída do domínio (linha direita) é imposta uma condição de pressão manométrica nula (atmosférica). E nas superfícies laterais (simetrias 1 e 2) é estabelecida a condição de simetria, ou seja, gradientes nulos de temperatura e velocidade em y . Nas paredes dos cilindros (C_1, C_2, C_3 e C_4) é determinada uma condição de não-deslizamento e impermeabilidade.

Para estabelecer a velocidade de entrada no domínio, utiliza-se a relação apresentada por meio de (Incropera *et al.*, 2008):

$$Re_D = \frac{\rho V_\infty D}{\mu}, \quad (3.1)$$

onde Re_D representa o número de Reynolds, V_∞ é a velocidade de entrada (m/s), D representa o diâmetro dos cilindros (m) e μ é a viscosidade do fluido (kg/m.s).

Para o estudo térmico, é imposta uma temperatura prescrita ao escoamento ($T_\infty = 300$ K), inferior à temperatura prescrita na superfície dos cilindros ($T_W = 320$ K), o que gera a transferência de calor no problema estudado.

A Tabela 3.1 apresenta as propriedades termo físicas e parâmetros aplicados nos casos estudados.

Tabela 3.1 - Parâmetros utilizados no estudo.

Parâmetros	Valores		
Número de Reynolds (Re_D)	10	40	150
Número de Prandtl (Pr)	0.71	0.71	0.71
Massa específica (kg/m ³)	1	1	1
Viscosidade dinâmica (kg/m.s)	0.05	0.05	0.05
Condutividade térmica (W/m.K)	1	1	1
Calor específico (J/(kg.K))	14.2	14.2	14.2
Velocidade na entrada (m/s)	5	20	75
Passo de tempo (s)	0.005	0.005	0.005
Tempo final (s)	4.0	4.0	4.0

3.2. Metodologia do Design Construtal

Para a avaliação geométrica com o método Design Construtal, o problema avaliado é submetido a restrições e graus de liberdade. O presente problema está submetido às seguintes restrições:

i) A área ocupada pelos quatro cilindros é a mesma em todos os casos:

$$A_T = A_{C1} + A_{C2} + A_{C3} + A_{C4}; \quad (3.2)$$

ii) O diâmetro dos cilindros é igual (Fig. 3.1):

$$D = D_1 = D_2 = D_3 = D_4; \quad (3.3)$$

iii) Para restrições físicas do domínio (Fig. 3.1), todas as simulações usam como dimensões:

$$H_o = 6D, \quad (3.4)$$

$$L_o = 6D, \quad (3.5)$$

fazendo com que a área total de distribuição dos cilindros seja:

$$A_o = H_o \times L_o = 36D^2, \quad (3.6)$$

iv) Os valores do espaçamento transversal entre os cilindros não podem exceder a altura da área ocupada pelos cilindros:

$$S_T + D \leq H_o, \quad (3.7)$$

v) Os valores do espaçamento longitudinal entre os cilindros intermediários mais o diâmetro não pode exceder a largura da área ocupada pelos cilindros:

$$S_{L1} + S_{L2} + D \leq L_o. \quad (3.8)$$

Para aplicar o método de Design Construtal na avaliação geométrica de um sistema físico é necessário seguir as 8 etapas identificadas na Fig. 3.2, que são aplicadas ao problema em estudo (Dos Santos *et al.* 2017):

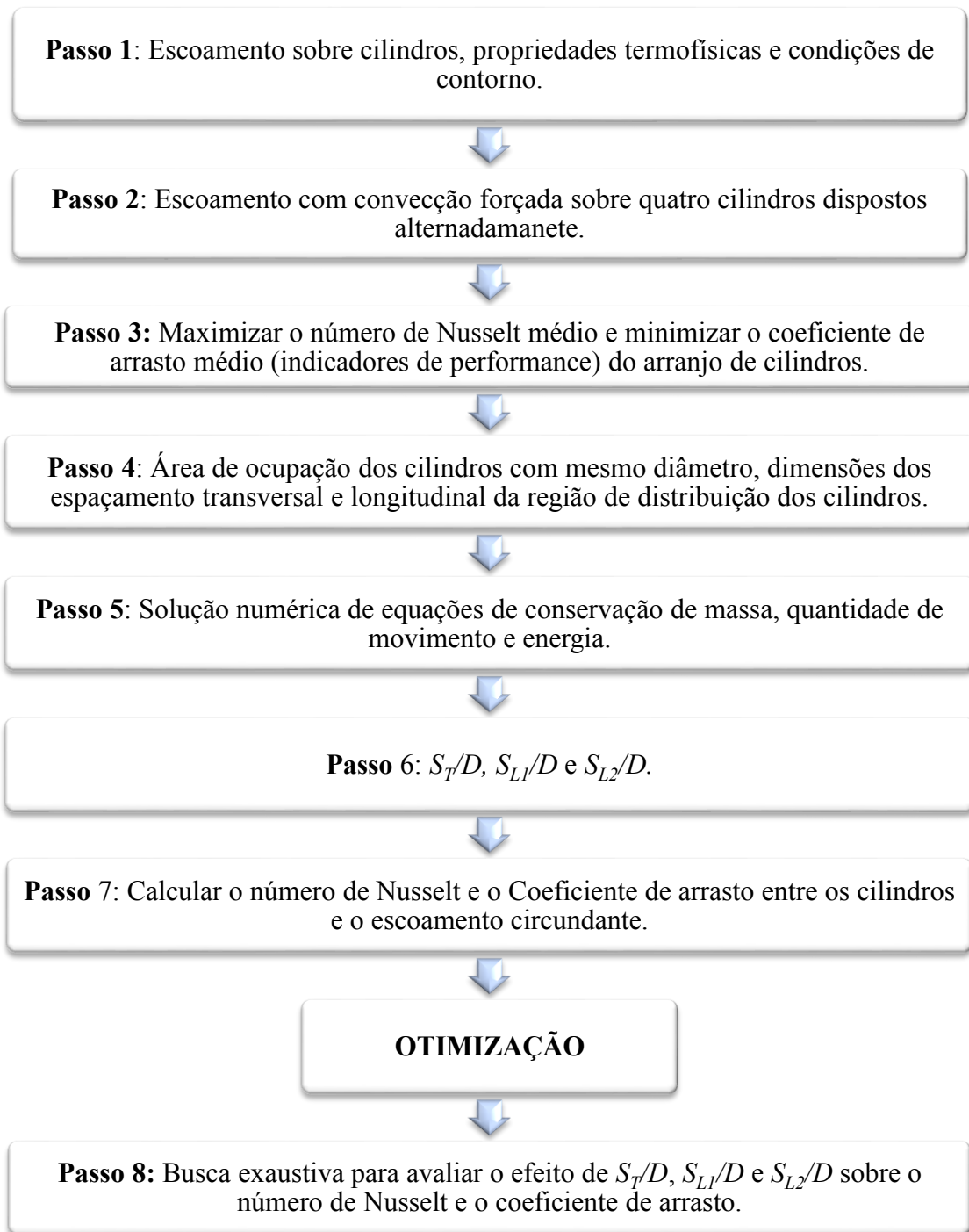


Figura 3.2 – Fluxograma do método de Design Construtal.

O processo de otimização se divide em três etapas:

- 1) A primeira etapa é a avaliação do passo S_T/D para S_{L1}/D e S_{L2}/D constantes. A maior magnitude do Nusselt obtida é o número de Nusselt uma vez maximizado $(Nu_D)_{max}$ e a geometria ótima correspondente é a razão $(S_T/D)_{o,T}$, para o problema térmico. Para o problema fluidodinâmico, o

menor C_D é o Coeficiente de arrasto uma vez minimizado $(C_D)_{min}$ e a geometria ótima correspondente é a razão uma vez otimizada $(S_T/D)_{o,F}$;

2) O segundo passo consiste em realizar o passo 1 (avaliação do efeito de S_T/D sobre Nu_D e C_D) para os diferentes valores de S_{L2}/D . Entre todos os casos avaliados, a maior magnitude de Nu_D é o Nusselt duas vezes maximizado $(Nu_D)_{2max}$ e a geometria ótima correspondente é $(S_{L2}/D)_{o,T}$ e $(S_T/D)_{2o,T}$. A mesma analogia é realizada para a avaliação fluidodinâmica. A menor magnitude de C_D é o Coeficiente de arrasto duas vezes minimizado $(C_D)_{2min}$ e a geometria ótima correspondente é $(S_{L2}/D)_{o,F}$ e $(S_T/D)_{2o,F}$.

3) No último passo, a segunda etapa é repetida para diversos valores de S_{L1}/D sendo obtidas os números de Nu_D e C_D três vezes maximizado e minimizado e as respectivas geometrias ótimas. A maior magnitude de Nu_D é o Nusselt três vezes maximizado $(Nu_D)_{3max}$ e a geometria ótima correspondente é $(S_{L1}/D)_{o,T}$, $(S_{L2}/D)_{2o,T}$ e $(S_T/D)_{3o,T}$. A menor magnitude de C_D é o Coeficiente de arrasto três vezes minimizado $(C_D)_{3min}$ e a geometria ótima correspondente é $(S_{L1}/D)_{o,F}$, $(S_{L2}/D)_{2o,F}$ e $(S_T/D)_{3o,F}$.

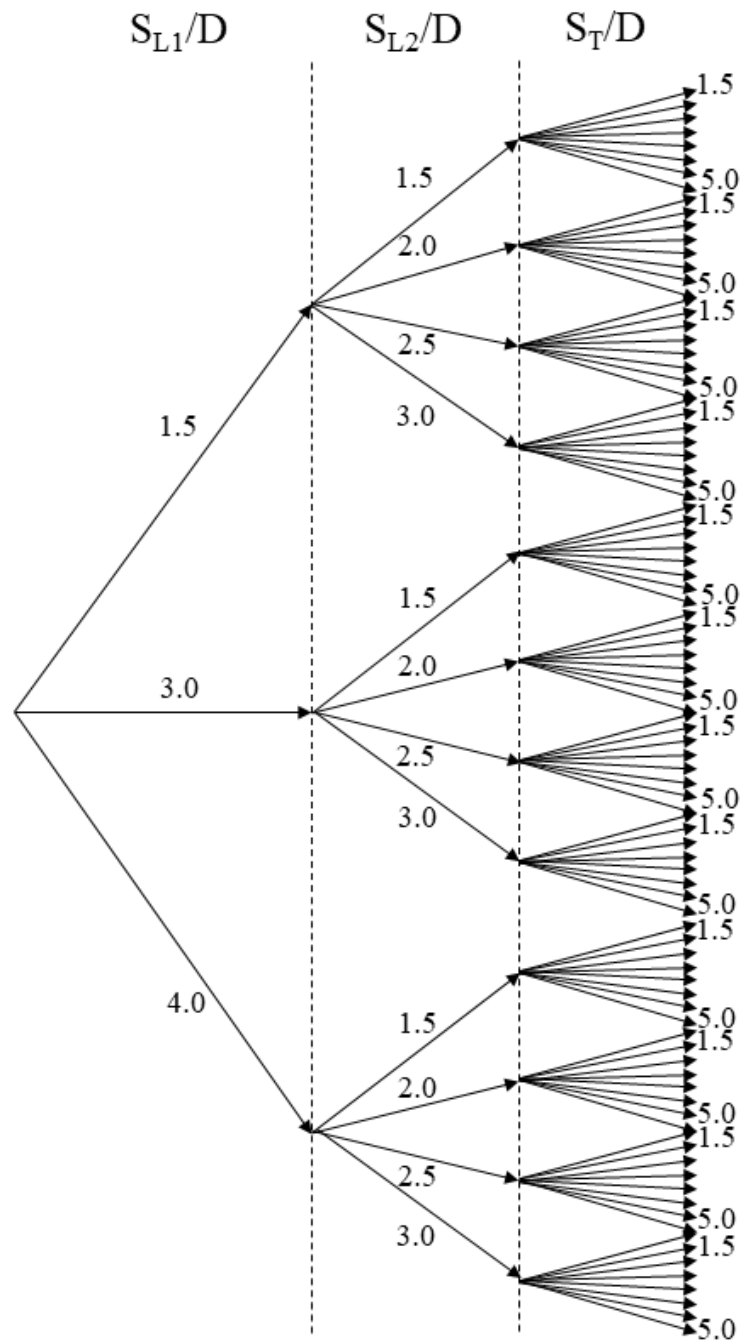
As etapas citadas acima podem ser vistas na Fig. 3.3, que ilustra todos os 96 casos estudados para cada Re_D avaliados. E ainda, com suas respectivas dimensões para os passos transversal e longitudinal.

3.3. Equações de conservação

As equações diferenciais que descrevem os escoamentos laminares, incompressíveis, transientes e com transferência de calor por convecção forçada, pelo ponto de vista teórico, são escritas da seguinte forma (Bejan, 2014; Kays *et al.*, 2004):

Equação da conservação de massa:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad (3.9)$$



Etapa 1) $(C_D)_{\min} \rightarrow (S_T/D)_{O,F}$ e $(Nu_D)_{\max} \rightarrow (S_T/D)_{O,T}$.

Etapa 2) $(C_D)_{2\min} \rightarrow (S_T/D)_{2O,F}$, $(S_{L2}/D)_{O,F}$ e $(Nu_D)_{2\max} \rightarrow (S_T/D)_{2O,T}$,
 $(S_{L2}/D)_{O,T}$.

Etapa 3) $(C_D)_{3\min} \rightarrow (S_T/D)_{3O,F}$, $(S_{L2}/D)_{2O,F}$, $(S_{L1}/D)_{O,F}$ e $(Nu_D)_{3\max} \rightarrow$
 $(S_T/D)_{3O,T}$, $(S_{L2}/D)_{2O,T}$, $(S_{L1}/D)_{O,T}$.

Figura 3.3 - Etapas do processo de otimização do problema para cada Re_D avaliado.

Equação da conservação da quantidade de movimento em x e y :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \quad (3.11)$$

Equação da conservação de energia:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (3.12)$$

onde x e y representam as coordenadas espaciais na direções dos eixos x e y (m), u e v são as componentes da velocidade nas direções dos eixos x e y (m/s), P é a pressão (N/m²) e T é a temperatura (K).

4. MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica consiste em três etapas: pré-processamento, processamento e pós processamento. Neste capítulo são apresentadas as duas etapas iniciais, que abrangem a construção da malha, teste da solução independente de malha, os softwares utilizados e os parâmetros implementados. A construção do domínio computacional é desenvolvida por meio do software livre GMSH[®], na versão 3.0.6 (Geuzaine e Remacle, 2017). As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia são resolvidas pelo código CFD (*Computacional Fluid Dynamics*) baseado no MVF (Maliska, 2004; Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 2007), FLUENT[®] versão 14.5 (FLUENT, 2011).

4.1. Parâmetros do CFD

As Eqs. (3.9) – (3.12) que correspondem às equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia são resolvidas via CFD. Sendo a discretização espacial realizada em volumes retangulares e triangulares, a discretização temporal implícita de segunda ordem e o acoplamento pressão-velocidade realizado pelo método SIMPLEC (Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 2007).

As soluções foram consideradas convergidas quando os resíduos para a equação da conservação de massa e quantidade de movimento, nas direções x e y , eram menores que 10^{-6} e menores que 10^{-8} para a equação da conservação da energia. As simulações numéricas foram realizadas utilizando-se computadores com processador Intel[®] Core™ i7 5820K @ 3.30 GHz de seis núcleos e com 16.0 Gb de memória RAM. O CFD FLUENT[®] foi configurado para usar 2 núcleos em cada simulação através da técnica de paralelismo MPI (do inglês: *Message Passing Interface*) padrão do software.

4.2. Construção da malha

No presente estudo, a geração de malha é feita pelo software GMSH – versão 3.0.6, na forma 2D e híbrida, ou seja, com volumes de formato triangular e retangular. A Figura 4.1 representa uma visão geral da malha construída, enquanto a Fig.4.2 apresenta a malha estruturada ao redor do cilindro e não estruturada no restante do domínio.

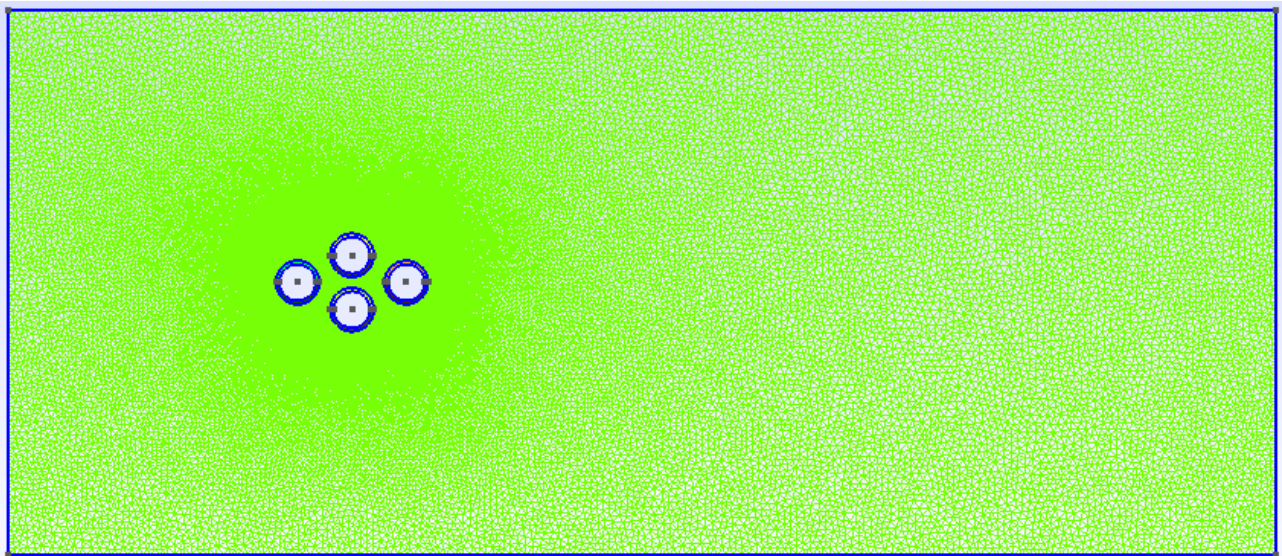


Figura 4.1 - Malha do estudo com 145282 células.

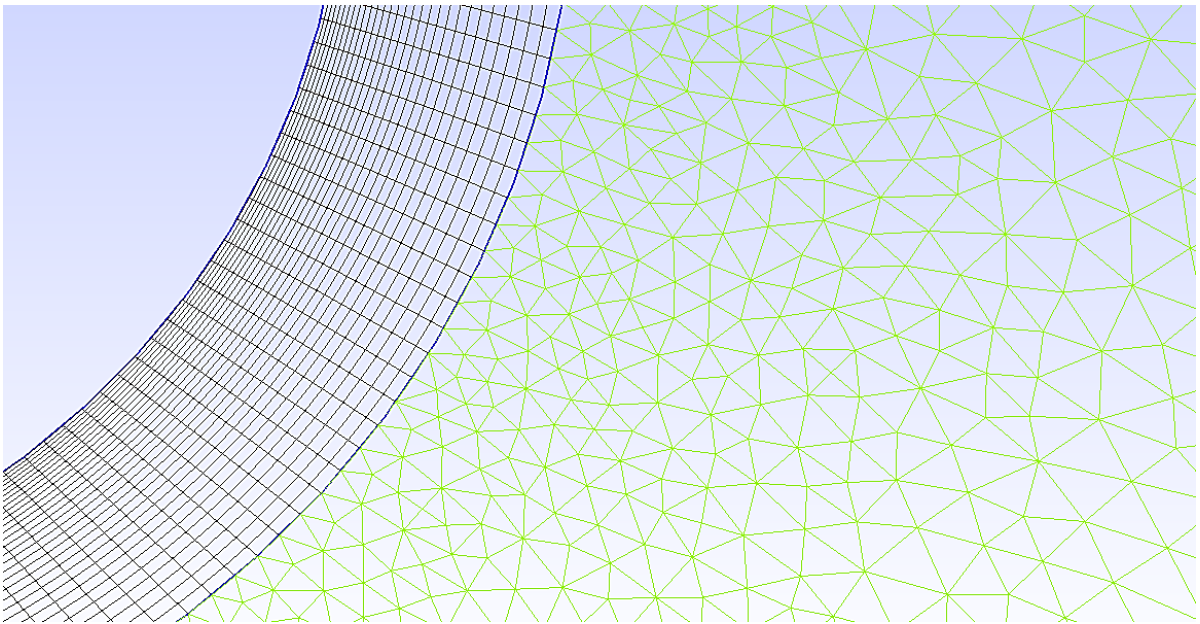


Figura 4.2 - Região ao redor do cilindro com malha estruturada e o restante do domínio com malha não estruturada.

O Apêndice 1 apresenta o script gerado pelo software GMSH que demonstrar os pontos, as linhas, as superfícies, as condições de contorno e o número de nós aplicados aos cilindros, almas e as paredes do domínio. Esse script trata dos dados para a construção da malha para o caso em que: $S_{L1}/D = 1.5$; $S_{L2}/D = 1.5$ e $S_T/D = 1.5$. Para os demais casos ocorre apenas a variação dos pontos dos cilindros C_2 , C_3 e C_4 - pois C_1 se mantém fixo -, já que se trata de outras medidas para os graus de liberdade.

4.3. Teste da solução independente de malha e verificação do modelo

A construção da malha deve ser feita de forma a fornecer resultados confiáveis a um menor esforço computacional. Para isso, se faz uso do teste da solução independente de malha. Neste estudo são analisados cinco casos distintos, ou seja, cada caso com um refinamento diferente. O foco principal para esse refinamento são as regiões ao redor dos cilindros, chamadas de alma (região 1 e 2), e as linhas 5 e 6 que unem as regiões 1 e 2, ilustradas na Fig. 4.3. Para cada caso analisado foi aplicado o mesmo refinamento aos quatro cilindros.

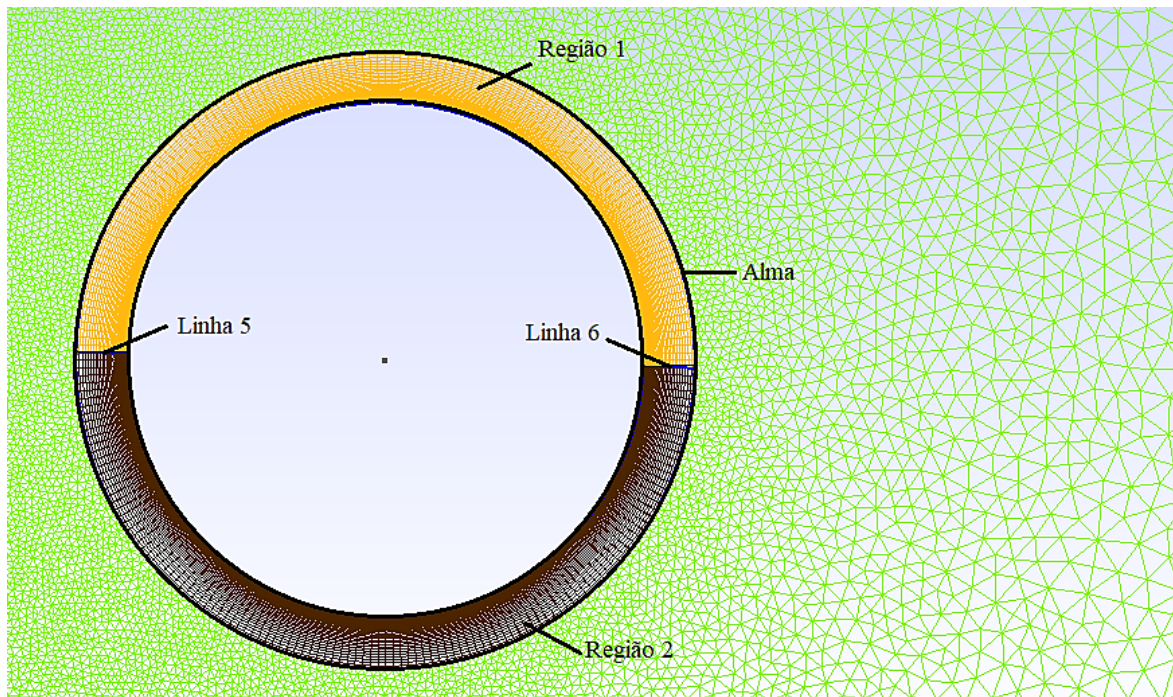


Figura 4.3 – Regiões de refinamento ao redor dos cilindros.

A Tabela 4.1 apresenta os casos investigados, destacando o refinamento na região da alma e o total de células.

São avaliados os casos para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$, pois os casos de $Re_D = 10$ e 40 são contemplados com o mesmo teste. Como parâmetro de análise entre os casos para o teste de solução independente de malha é utilizado o valor do número de Nusselt médio (Nu_D) dos quatro cilindros, definido por (Incropera *et al*, 2008):

$$Nu_D \equiv \frac{\bar{h}D}{k}, \quad (4.1)$$

onde \bar{h} é o coeficiente de transferência de calor por convecção médio (W/(m².K)) estimado numericamente a partir do gradiente de temperaturas na região superficial do cilindro e D corresponde ao diâmetro do cilindro (m).

Tabela 4.1 – Casos para o teste da solução independente de malha.

Caso	Elemento	Nº de nós	Total de células
1	Linhas 5 e 6	5	71300
	Regiões 1 e 2	60	
2	Linhas 5 e 6	10	84756
	Regiões 1 e 2	75	
3	Linhas 5 e 6	20	113524
	Regiões 1 e 2	100	
4	Linhas 5 e 6	30	145282
	Regiões 1 e 2	125	
5	Linhas 5 e 6	40	185890
	Regiões 1 e 2	150	

O cálculo da diferença relativa é expresso por:

$$Diferença\ relativa = \left| \frac{100(Nu_D^j - Nu_D^{j+1})}{Nu_D^j} \right|, \quad (4.3)$$

onde j representa o caso analisado de acordo com o número de células.

As simulações numéricas foram realizadas considerando o passo de tempo de 0.005 s para o total de 800 passos de tempo, ou seja, a simulação de 4 s, de tempo real. E ainda, para cada passo de tempo o máximo de 1000 iterações. O tempo médio de processamento foi de 3 h para o teste de solução independente de malha.

A Tabela 4.3 apresenta todos os casos analisados e a diferença relativa entre os casos.

Conforme pode-se observar nos resultados das simulações a malha 4 com 145282 células e a malha 5 com 185890, os valores de Nu_D são muito próximos e as diferenças relativas são as menores. Desta forma, é possível considerar que a malha 4 – para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$ com o refinamento ao redor dos cilindros com 125 divisões na alma e 30 nós para as linhas 5 e 6, proporciona a solução independente de malha, em que os resultados obtidos são confiáveis e, ainda, o esforço computacional

é menor.

Tabela 4.3 – Resultados do teste de solução independente de malha.

Caso	Total de células	Nu_D^j	Diferença relativa (%)
1	71300	3,6454	13,1545
2	84756	4,1250	3,7631
3	113524	4,2801	3,7030
4	145282	4,1216	0,0010
5	185890	4,1216	-

Para obtermos a verificação do modelo considera-se como referência os parâmetros de Grimison (1937), em que o Coeficiente de transferência de calor médio é expresso pela equação:

$$\overline{Nu_D} = C_1 Re_{D,max}^m, \quad (4.4)$$

onde C_1 e m são valores atribuídos conforme as dimensões de S_L/D e S_T/D que são apresentados na Tab. 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros de Grimison (1937) (Fonte: Incropera *et al.*, 2008).

S_L/D	S_T/D							
	1,25		1,5		2,0		3,0	
	C_1	M	C_1	m	C_1	m	C_1	m
Alinhado								
1,25	0,348	0,592	0,275	0,608	0,100	0,704	0,0633	0,752
1,50	0,367	0,586	0,250	0,620	0,101	0,702	0,0678	0,744
2,00	0,418	0,570	0,299	0,602	0,229	0,632	0,198	0,648
3,00	0,290	0,601	0,357	0,584	0,374	0,581	0,286	0,608
Alternado								
0,600	-	-	-	-	-	-	0,213	0,636
0,900	-	-	-	-	0,446	0,571	0,401	0,581
1,000	-	-	0,497	0,558	-	-	-	-
1,125	-	-	-	-	0,478	0,565	0,518	0,560
1,250	0,518	0,556	0,505	0,554	0,519	0,556	0,522	0,562
1,500	0,451	0,568	0,460	0,562	0,452	0,568	0,488	0,568
2,000	0,404	0,572	0,416	0,568	0,482	0,556	0,449	0,570
3,000	0,310	0,592	0,356	0,580	0,440	0,562	0,428	0,574

Ainda, se deve aplicar o fator de correção representando pela equação a seguir (4.5) e seus

respectivos valores por meio da Tab. 4.5.

$$Nu_D = C_2 \cdot Nu_D, \quad (4.4)$$

onde C_2 corresponde ao fator de correção e N_L representa o número de colunas do feixe de tubos.

Tabela 4.5 – Valores atribuídos de acordo com N_L para o fator de correção (Fonte: Incropera *et al.*, 2008).

N_L	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Alinhado	0,64	0,80	0,87	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	0,99
Alternado	0,68	0,75	0,83	0,89	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99

Desta forma, a Tab. 4.6 expõe a verificação do modelo de acordo com os parâmetros de Grimison (1937), comparando com os valores numéricos encontrados no presente estudo para 1 cilindro e para um arranjo de cilindros alternados com S_{L1}/D , S_{L2}/D e S_T/D de 1,5, 1,5 e 1,5, respectivamente.

Tabela 4.6 – Verificação do modelo: comparação do Nu_D numérico obtido com o presente estudo e Nu_D analítico proposto por correlações da literatura para um cilindro e para o arranjo com 4 cilindros.

Caso	Nu_D numérico	Nu_D analítico	Diferença relativa (%)
1 cilindro	5,9388	6,2936	5,6377
Arranjo	4,1216	4,6365	11,1052

Conforme os resultados apresentados acima o modelo aplicado ao estudo apresenta uma pequena variação em relação ao trabalho analisado da literatura. Desta forma, a partir de caso avaliado pode-se considerar que o modelo apresenta resultados confiáveis e coerentes.

5. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para o trabalho. Conforme já indicado nos tópicos anteriores, este estudo é composto por três graus de liberdade, o passo transversal dos cilindros intermediários e o diâmetro (S_T/D), o passo longitudinal dos cilindros frontal e intermediários e o diâmetro (S_{L1}/D) e o passo longitudinal dos cilindros intermediários e posterior e o diâmetro (S_{L2}/D). O domínio é o mesmo descrito no tópico 3.1 Descrição do problema e os parâmetros da simulação são os mesmos descritos na seção 4.3 Parâmetros do CFD. Foram atribuídos valores as razões para de S_T/D (que varia na faixa de 1.5 a 5.0, com incremento de 0.5), S_{L1}/D (1.5; 3.0 e 4.0) e S_{L2}/D (1.5; 2.0; 2.5 e 3.0), completando 96 casos para os três valores de $Re_D = 10, 40$ e 150, totalizando 288 simulações (4 segundos de simulação para cada caso). Salientando que alguns casos com menores distanciamentos entre os cilindros e Re_D menores ($Re_D = 10$ e 40) o tempo de tempo médio de simulação foi de 10 h, enquanto para casos em que se tratava das maiores distâncias entre os cilindros e para $Re_D = 150$, o tempo médio de processamento dos dados foi de até 72 h, Foi utilizado um computador com processador Intel® Core™ i7 5820K @ 3,30 GHz de seis núcleos e com 16,0 Gb de memória RAM, O CFD FLUENT® foi configurado para usar 2 núcleos em cada simulação através da técnica de paralelismo MPI (do inglês: *Message Passing Interface*) padrão do software. Os tópicos serão organizados de acordo com os valores do número de Reynolds avaliados e quanto ao tipo de análise térmica e/ou hidrodinâmica. O apêndice II apresenta todos os resultados obtidos nas simulações numéricas para os 288 casos.

5.1. Resultados para $Re_D = 10$

5.1.1. Análise do problema fluidodinâmico para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$

O processo de avaliação de desempenho fluidodinâmico tem como parâmetro o Coeficiente de arrasto (C_D), que permite quantificar a força de resistência ao ar ou outro fluido por parte de uma dada superfície. Dessa maneira, quanto menor o C_D menos força será necessária para o escoamento cruzar o domínio computacional. Ainda, tendo em vista que nos equipamentos de engenharia, o objetivo da análise geométrica de um arranjo formado por cilindros é o de minimizar o C_D , foi necessário calcular o C_D médio entre os quatro cilindros do arranjo, que é expresso por:

$$C_D = \frac{C_{D,C1} + C_{D,C2} + C_{D,C3} + C_{D,C4}}{4}, \quad (5.1)$$

em que $C_{D,C1}$ corresponde ao C_D do cilindro 1, $C_{D,C2}$ corresponde ao C_D do cilindro 2, $C_{D,C3}$ corresponde ao C_D do cilindro 3 e $C_{D,C4}$ corresponde ao C_D do cilindro 4.

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam o efeito de S_T/D sobre os vários valores de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 1.5$, ilustrando na forma de curvas para cada S_{L2}/D e superfície representando uma visão global. De acordo com o exposto pelos gráficos o comportamento do C_D é crescente para todos os valores de S_T/D . No entanto, na faixa $S_T/D < 2.5$ as magnitudes de C_D são muito semelhantes, sofrendo uma pequena variação a partir de $S_T/D = 2.5$. Conforme o esperado para todos as medidas de S_{L2}/D a minimização do $(C_D)_{\min}$ ocorreu para $S_T/D = 1.5$, ou seja, a geometria ótima correspondente acontece para $(S_T/D)_{O,F} = 1.5$.

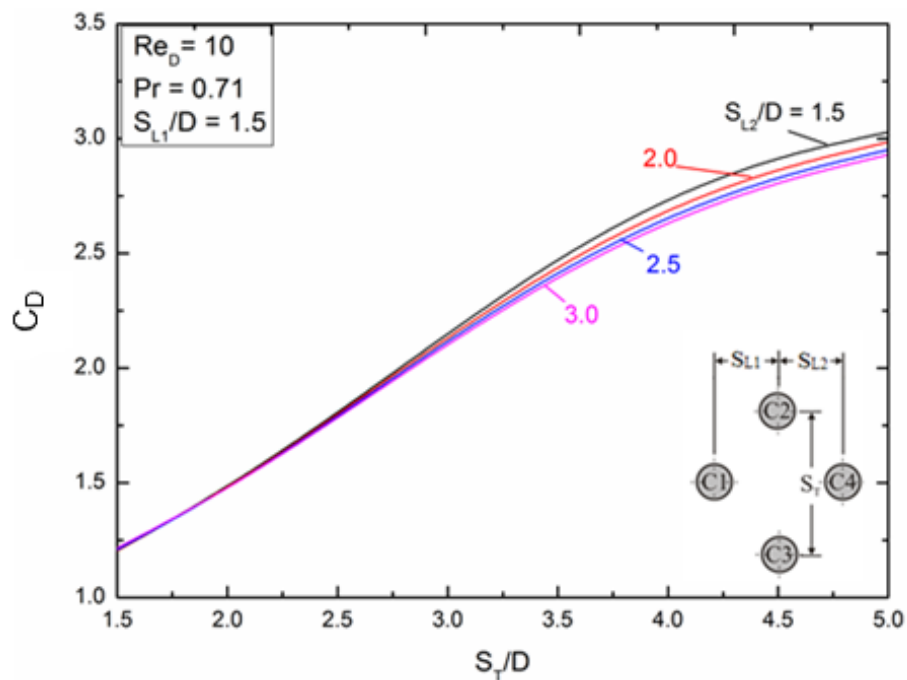


Figura 5.1 – Efeito de S_T/D sobre C_D para diferentes razões de S_{L2}/D e para $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

A Figura 5.3 apresenta o desempenho do C_D na forma de curvas, representando uma visão local e a Fig. 5.4 ilustra a superfície gerada C_D em função de S_T/D e S_{L2}/D . Para a avaliação do C_D quando S_T/D para todos os valores de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 3.0$ e o seu comportamento é muito semelhante com o que acontece para $S_{L1}/D = 1.5$. À medida que o passo transversal S_T/D aumenta, os valores para C_D também crescem. A minimização do C_D ocorreu conforme o esperado, quando $S_T/D = 1.5$, portanto a geometria ótima diz respeito a $(S_T/D)_{O,F} = 1.5$.

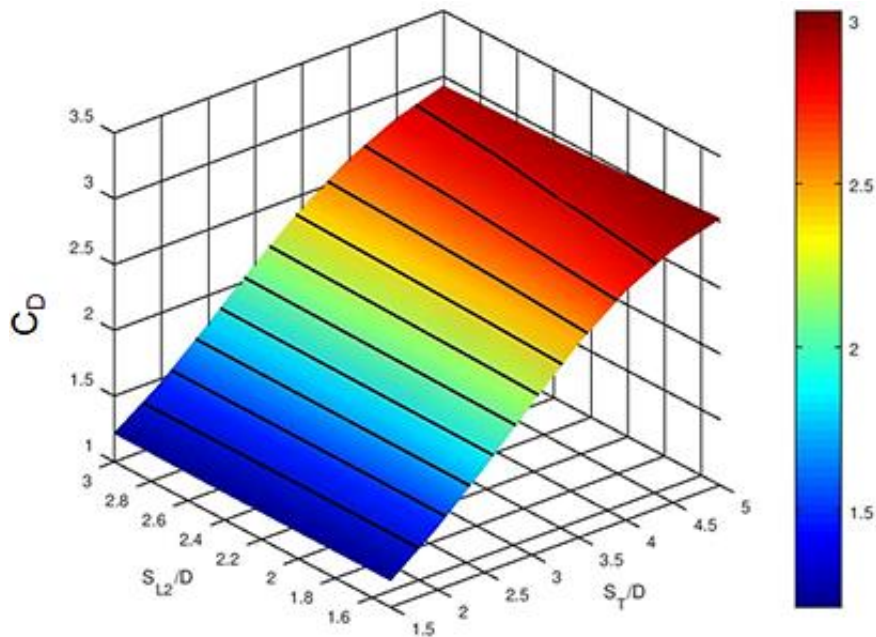


Figura 5.2 – Superfície com C_D em função de S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

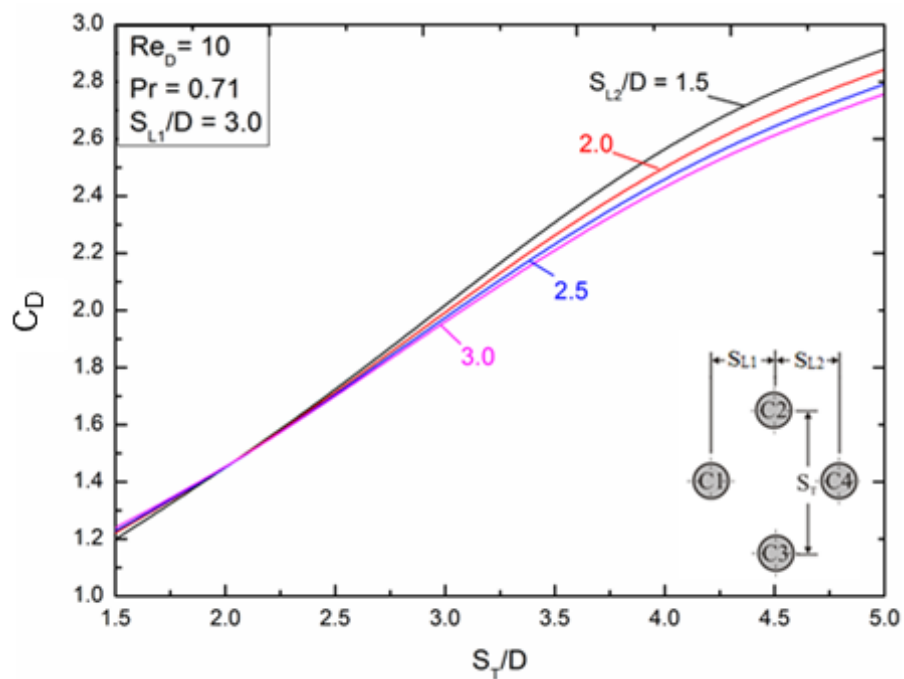


Figura 5.3 – Efeito de S_T/D sobre C_D para diferentes razões de S_{L2}/D e para $S_{L1}/D = 3.0$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

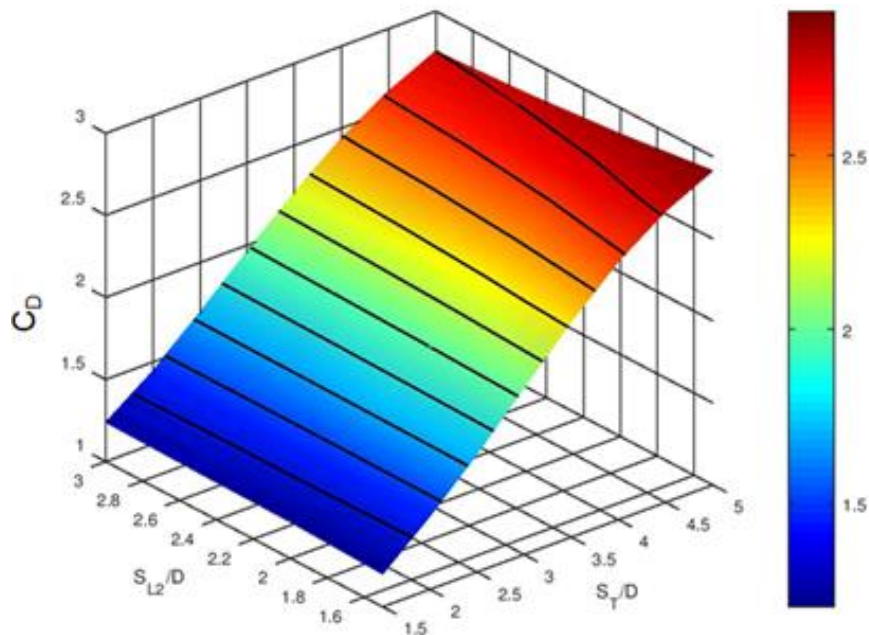


Figura 5.4 – Superfície com C_D em função de S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 3.0$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

As Figuras 5.5 e 5.6 mostram o efeito de S_T/D sobre C_D para os vários S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 4.0$, para seus desempenhos local e global, respectivamente. Em geral, o C_D cresce à medida que o passo transversal dos cilindros a jusante aumenta, principalmente para valores acima de $S_T/D = 2.5$. Os menores valores para C_D foram obtidos para os menores espaçamentos de S_T/D , ou seja, as geometrias ótimas foram alcançadas em $(S_T/D)_{O,F} = 1.5$. Também é possível afirmar que esse gráfico de superfície da Fig. 5.6 corrobora o que foi apresentado na Fig. 5.5, onde a razão S_T/D apresentou uma sensibilidade muito maior do que S_{L2}/D para os casos com $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

Posteriormente, aconteceu a otimização do passo longitudinal entre os cilindros intermediários e o posterior S_{L2}/D , para esta etapa se utilizou as geometrias ótimas encontradas na avaliação da razão anterior, ou seja, $(S_T/D)_{O,F}$. A partir dos melhores valores obtidos para $(S_T/D)_{O,F}$ variou-se S_{L2}/D para os valores de 1.5; 2.0; 2.5 e 3.0. A Figura 5.7 mostra o efeito da razão S_{L2}/D sobre $(C_D)_{\min}$ para diferentes valores de S_{L1}/D ao passo que a Fig. 5.8 ilustra uma superfície do Nu_D em função de S_{L1}/D e S_{L2}/D mostrando de forma mais global a sensibilidade dessas razões geométricas.

Segundo o gráfico representado pela Fig. 5.7, o comportamento do $(C_D)_{\min}$ é muito semelhante para $S_{L1}/D = 1.5$ e 4.0 com uma pequena variação do C_D à medida que S_{L2}/D aumenta. No entanto, para $S_{L1}/D = 3.0$ acontece um crescimento de forma constante do $(C_D)_{\min}$ de forma mais notável, ou seja, uma diferença maior entre o menor valor de S_{L2}/D ($S_{L2}/D = 1.5$) para o maior valor de S_{L2}/D

($S_{L2}/D = 3.0$).

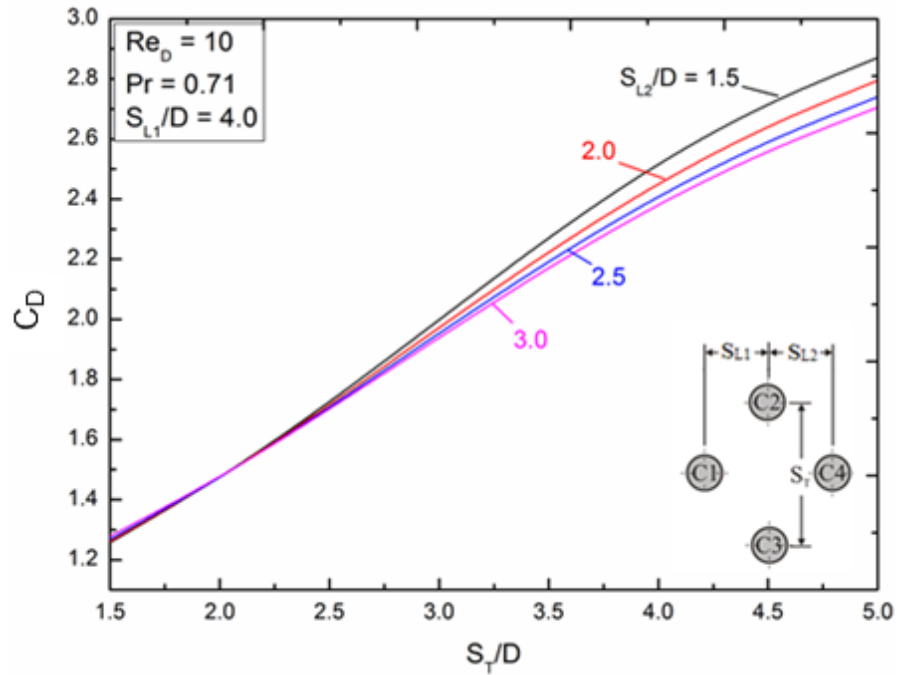


Figura 5.5 – Efeito de S_T/D sobre C_D para diferentes razões de S_{L2}/D e para $S_{L1}/D = 4.0$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

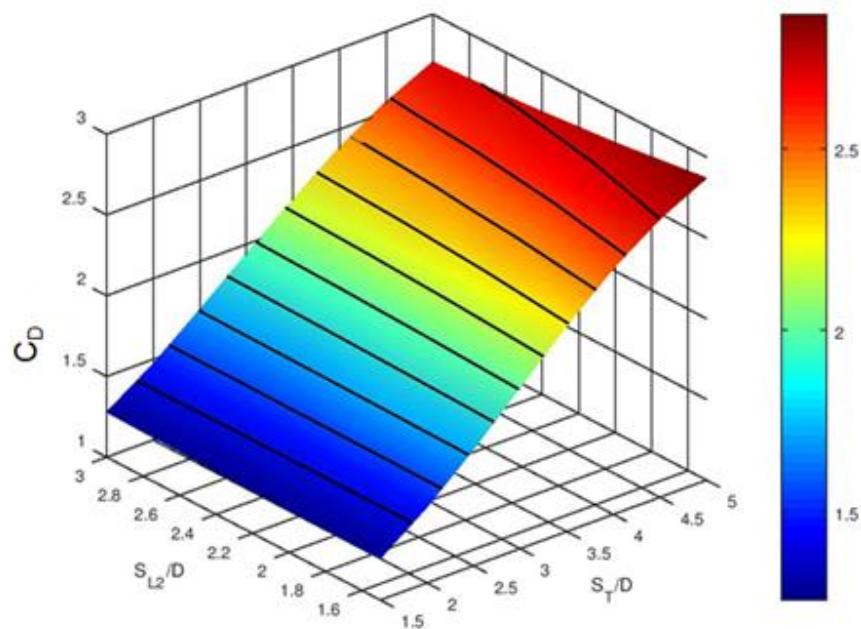


Figura 5.6 – Superfície com C_D em função de S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 4.0$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

Isso acontece devido ao distanciamento dos cilindros intermediários (C_2 e C_3) em relação ao

cilindro posterior (C_4) ser mais sensível ao escoamento, isto é, determinado distanciamento influencia mais que outros. Ou seja, com $S_{L1}/D = 1.5$ e 4.0 os cilindros C_2 e C_3 ficaram posicionados muito próximos de C_1 ou C_4 , já para $S_{L1}/D = 3.0$ o arranjo se configurou de forma mais homogênea dentro da área de ocupação. As geometrias ótimas obtidas da avaliação do S_{L2}/D em relação ao S_{L1}/D ocorreram para o menor valor de S_{L2}/D , isto é, $(S_{L2}/D)_{20,F} = 1.5$.

Vale destacar também que ao longo de quase toda a faixa de S_{L2}/D a razão $S_{L1}/D = 1.5$ conduziu a melhores resultados que a razão $S_{L1}/D = 3.0$. Contudo, para as menores razões de S_{L2}/D , onde localiza-se os ótimos de cada caso, a razão $S_{L1}/D = 3.0$ foi a que conduziu aos melhores resultados. E ainda, que a superfície do $(C_D)_{min}$ mostra que ambos graus de liberdade possuem uma sensibilidade similar sobre o $(C_D)_{min}$ para escoamentos com $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

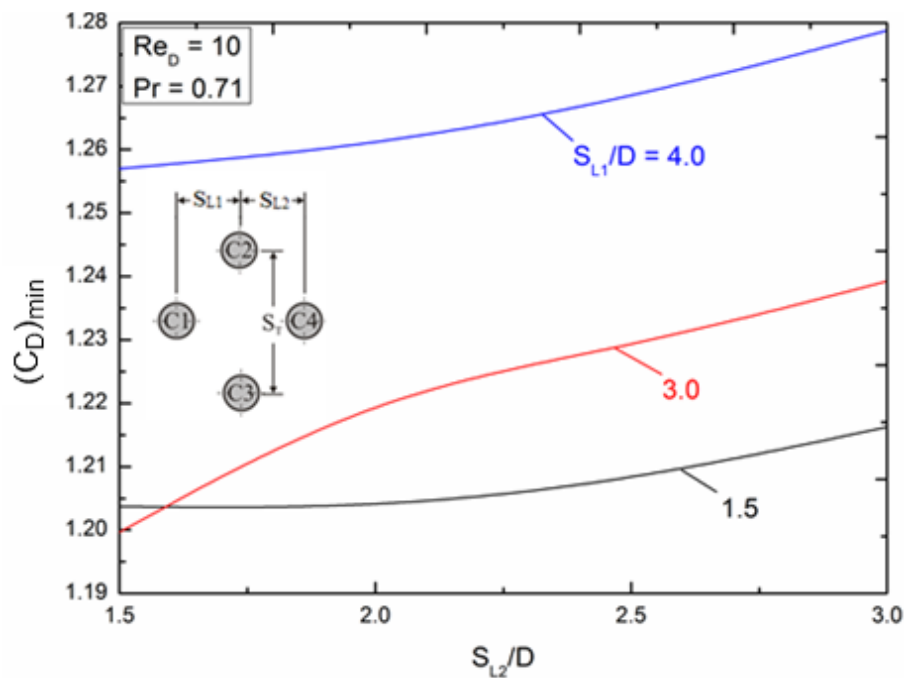


Figura 5.7 – Efeito da razão S_{L2}/D sobre $(C_D)_{min}$ para diferentes razões de S_{L1}/D para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

O gráfico ilustrado pela Fig. 5.9 aponta o efeito de S_{L1}/D sobre $(C_D)_{2min}$ que é resultado das geometrias ótimas encontradas após a avaliação das razões $(S_T/D)_{20,F}$ e $(S_{L2}/D)_{0,F}$. Diferentemente do que se era esperado a geometria ótima para a avaliação de S_{L1}/D decorreu em $(S_{L1}/D)_{30,F} = 3.0$. Desta forma, para o estudo fluidodinâmico o melhor caso transcorre quando $Re_D = 10$ ocorreu para $(S_T/D)_{30,F} = (S_{L2}/D)_{20,F} = 1.5$ e $(S_{L1}/D)_{0,F} = 3.0$. Como pode-se observar, na avaliação de S_{L1}/D o menor distanciamento entre os cilindros frontal (C_1) e intermediários (C_2 e C_3) não proporcionou a

minimização do C_D , e sim para um valor intermediário de $S_{L1}/D = 3.0$. O motivo pelo qual isso acontece é devido à distância muito pequena, gerando uma maior obstrução ao escoamento entre os cilindros e conseqüentemente será necessário maior F_d para o escoamento, como se fossem um corpo único. Assim, um afastamento maior até 3.0 na direção longitudinal diminui a F_d necessário para o escoamento, auxiliando assim na melhor distribuição dos campos de pressão nos cilindros.

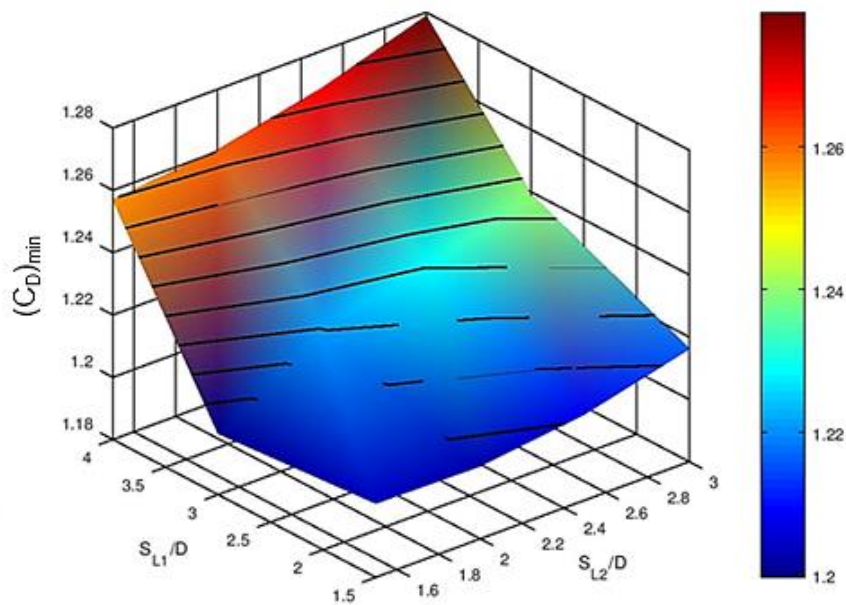


Figura 5.8 – Superfície com $(C_D)_{min}$ em função de S_{L1}/D e S_{L2}/D para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

Ressaltando que o mesmo efeito foi encontrado no trabalho de Perreira *et al.* (2017), quando o passo transversal entre os dois cilindros frontais era muito pequeno. As Figuras 5.10 e 5.11 ilustram os campos de pressão para o caso ótimo $(S_T/D)_{3o,F} = (S_{L2}/D)_{2o,F} = 1.5$ e $(S_{L1}/D)_{o,F} = 3.0$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$, e o pior resultado para o C_D no caso $(S_T/D) = 5.0$, $(S_{L2}/D) = 1.5$ e $(S_{L1}/D) = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$, respectivamente. As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam os campos de velocidade para os casos ótimo e com o pior desempenho, já mencionados acima. A aplicação da metodologia de Design Construtal proporcionou a melhora dos resultados em 152%.

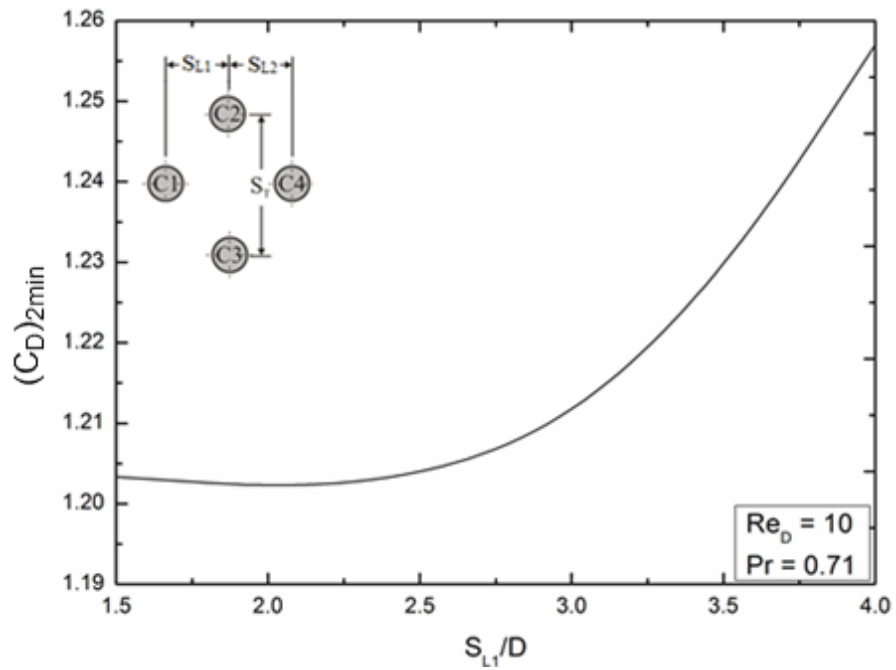


Figura 5.9 – Efeito da razão S_{L1}/D sobre o coeficiente de arrasto duas vezes minimizado $(C_D)_{2min}$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

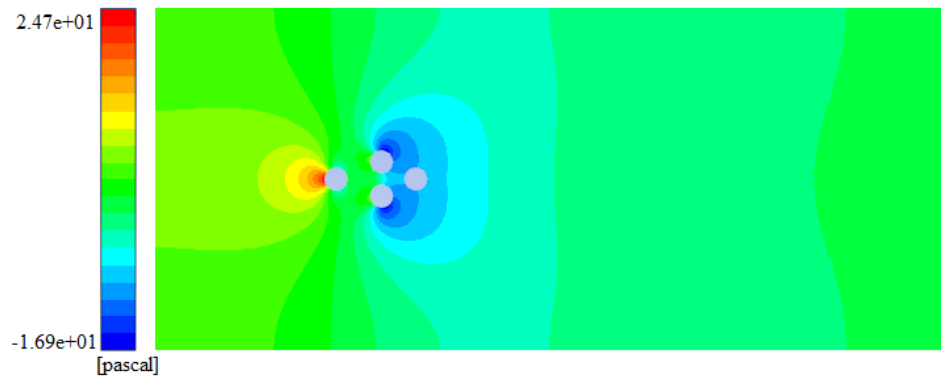


Figura 5.10 – Campo de pressão para caso ótimo $(S_T/D)_{3O,F} = 1.5$, $(S_{L2}/D)_{2O,F} = 1.5$ e $(S_{L1}/D)_{O,F} = 3.0$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

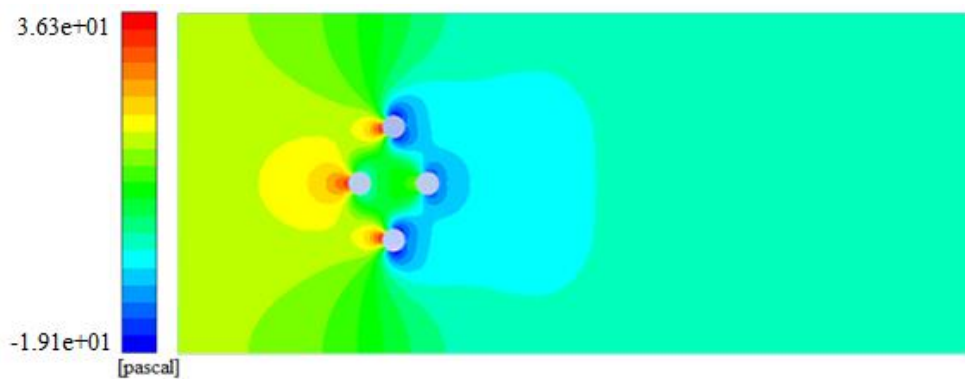


Figura 5.11 – Campo de pressão para o pior caso $(S_T/D) = 5.0$, $(S_{L2}/D) = 1.5$ e $(S_{L1}/D) = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

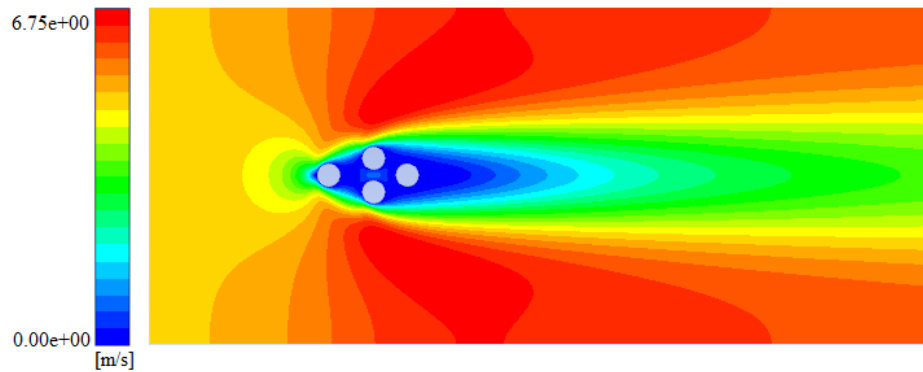


Figura 5.12 – Campo de velocidade para caso ótimo $(S_T/D)_{3O,F} = 1.5$, $(S_{L2}/D)_{2O,F} = 1.5$ e $(S_{L1}/D)_{O,F} = 3,0$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

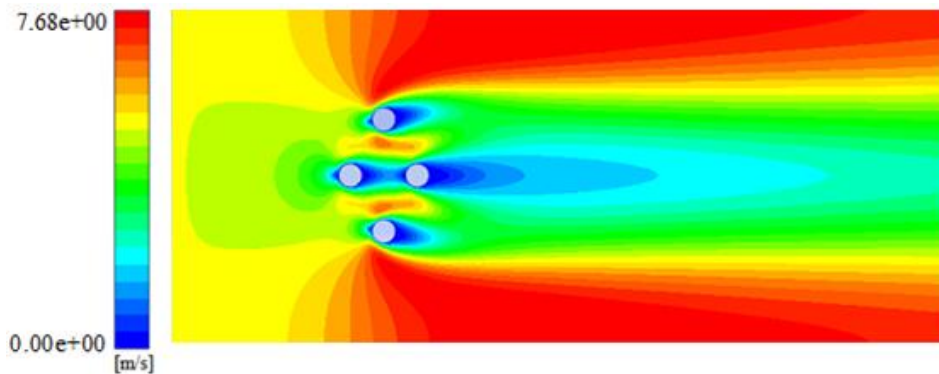


Figura 5.13 – Campo de velocidade para o pior caso $(S_T/D) = 5.0$, $(S_{L2}/D) = 1.5$ e $(S_{L1}/D) = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

5.1.2. Análise do problema térmico para o caso $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$

Para o estudo do problema térmico tem-se como parâmetro de análise o Número de Nusselt (Nu_D) que representa de forma adimensional o coeficiente de transferência de calor por convecção. Em outras palavras, é a capacidade de troca térmica entre o fluido e a superfície. O Nu_D é um importante parâmetro adimensional no estudo de transferência de calor e, no que se refere este estudo, busca-se a maximização deste parâmetro. Assim, da mesma forma como realizado para o estudo fluidodinâmico, fez-se uma média aritmética entre os valores de Nu_D obtidos pelos cilindros, que foi calculado por:

$$Nu_D = \frac{Nu_{D,C1} + Nu_{D,C2} + Nu_{D,C3} + Nu_{D,C4}}{4}, \quad (5.2)$$

em que $Nu_{D,C1}$ corresponde ao Nu_D do cilindro 1, $Nu_{D,C2}$ corresponde ao Nu_D do cilindro 2, $Nu_{D,C3}$ corresponde ao Nu_D do cilindro 3 e $Nu_{D,C4}$ corresponde ao Nu_D do cilindro 4. Vale destacar que o número de Nusselt em cada cilindro é obtido após a realização de uma média espacial e temporal na superfície de cada cilindro quando o escoamento atinge o regime permanente.

As Figuras 5.14 e 5.15 mostram o efeito da razão S_T/D sobre Nu_D para vários valores de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 1.5$, com suas performances representadas nas formas de curva e superfície, nesta ordem. É notado que à medida que os valores de S_T/D aumentam, também ocorre um acréscimo ao Nu_D para todos os S_{L2}/D . Desta forma, as geométricas ótimas ocorreram para $S_T/D = 5.0$, em outras palavras, $(S_T/D)_{O,T} = 5.0$. Também é perceptível que para $S_T/D = 5.0$ acontece uma grande aproximação dos resultados para o Nu_D para todas as razões de S_{L2}/D , por enquanto pode-se afirmar que o maior distanciamento proporciona o melhor resultado para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$. Conforme a Fig. 5.16 o gráfico mostra uma maior sensibilidade da razão S_T/D sobre o Nu_D do que a razão S_{L2}/D quando $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

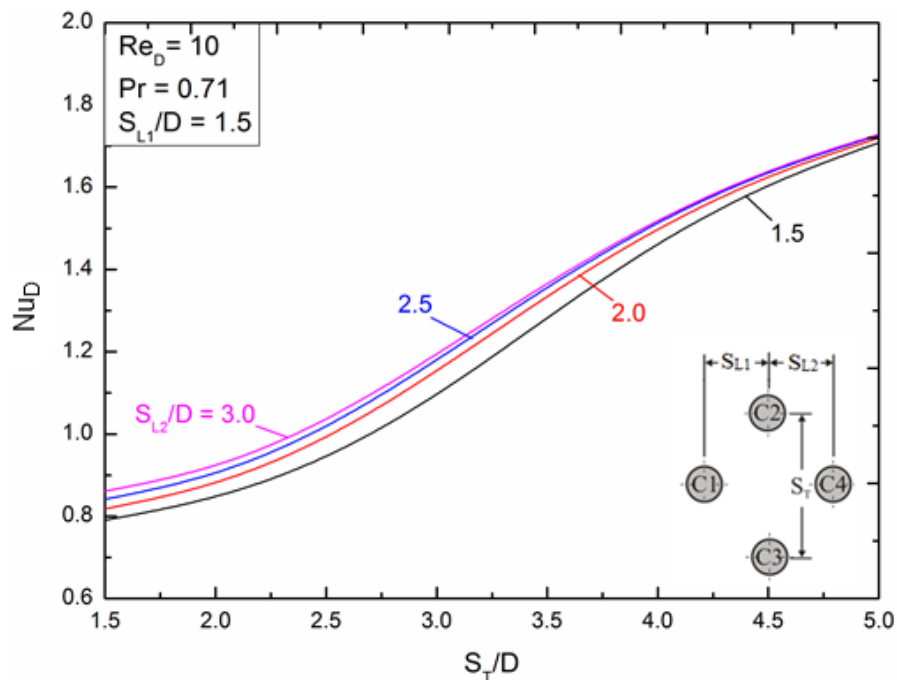


Figura 5.14 – Efeito da razão S_T/D sobre o número de Nusselt Nu_D para várias razões de S_{L2}/D e para $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

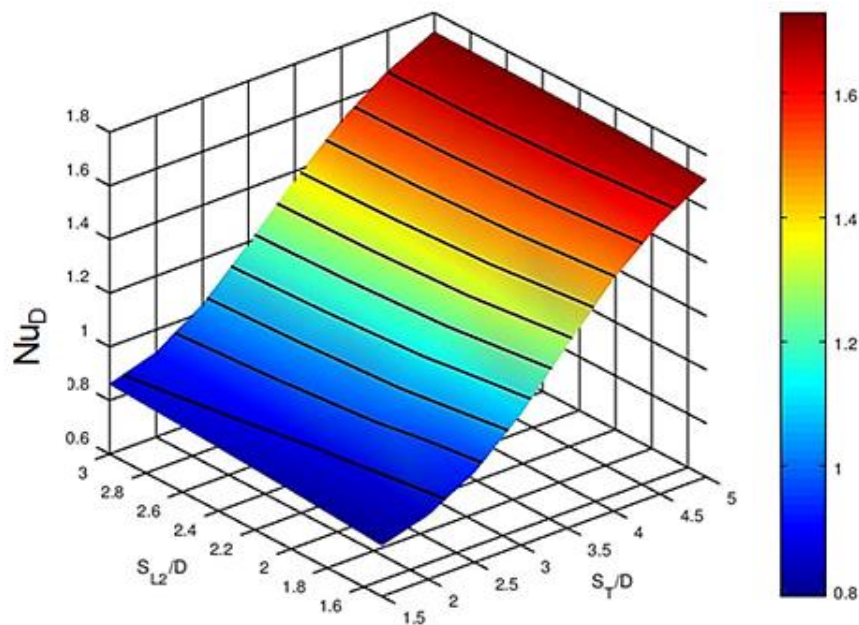


Figura 5.15 - Superfície com número de Nusselt (Nu_D) em função das razões S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

O efeito do Nu_D quando S_T/D para vários valores de S_{L2}/D e ficando em $S_{L1}/D = 3.0$ é apresentado na Fig. 5.16 na forma de curvas para cada S_{L2}/D e Fig. 5.17 ilustra a superfície gerada do Nu_D em função de S_T/D e S_{L2}/D . Conforme ocorreu para $S_{L1}/D = 1.5$, o comportamento é muito semelhante, com o aumento dos valores de S_T/D também se verifica o crescimento do Nu_D para todos os S_{L2}/D avaliados. A maximização dos valores de Nu_D ocorreu para o maior valor de S_T/D , isto é, $(S_T/D)_{O,T} = 5.0$.

O efeito do Nu_D para S_T/D para os valores de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 4.0$ a performance do problema térmico permanece da mesma forma. O aumento de S_T/D implica no acréscimo dos valores de Nu_D . E ainda, as melhores geometrias ocorrem em $(S_T/D)_{O,T} = 5.0$. Os resultados analisados indicam que os maiores espaçamentos entre os cilindros conduzem aos melhores resultados de Nu_D para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

Para a análise do grau de liberdade S_{L2}/D foram coletados os valores considerados como ótimos nos gráficos ao efeito de S_T/D sobre Nu_D , isto é, $(S_T/D)_{O,T}$. Sendo construídas as curvas do efeito de S_{L2}/D sobre o número de Nusselt uma vez maximizado $(Nu_D)_{max}$, e sua razão S_T/D ótima correspondente, $(S_T/D)_{O,T}$, conforme a Fig. 5.18. O gráfico ilustrado exhibe que o desempenho do $(Nu_D)_{max}$ é análogo para as razões de $S_{L1}/D = 3.0$ e 4.0 , onde a maximização do parâmetro aconteceu em $S_{L2}/D = 2.5$, ou seja, $(S_{L2}/D)_{O,T} = 2.5$. Deste modo, ocorre um aumento da magnitude de $(Nu_D)_{max}$ até uma razão intermediária ótima de S_{L2}/D e, após este ponto, é observado uma leve queda na

magnitude de $(Nu_D)_{max}$. Isso ocorre, devido ao fato de que o distanciamento dos cilindros frontal (C_1) e os cilindros intermediários (C_2 e C_3) acabam tendo mais influência sobre o escoamento. Já para $S_{L1}/D = 1,5$ a performance do $(Nu_D)_{max}$ é crescente para todos os valores de S_{L2}/D e com a geometria ótima em $(S_{L2}/D)_{2O,T} = 3,0$. A Figura 5.19 apresenta o desempenho do $(Nu_D)_{max}$ em função de S_{L1}/D e S_{L2}/D , sendo possível visualizar que os passos longitudinais possuem uma sensibilidade em relação ao Nu_D .

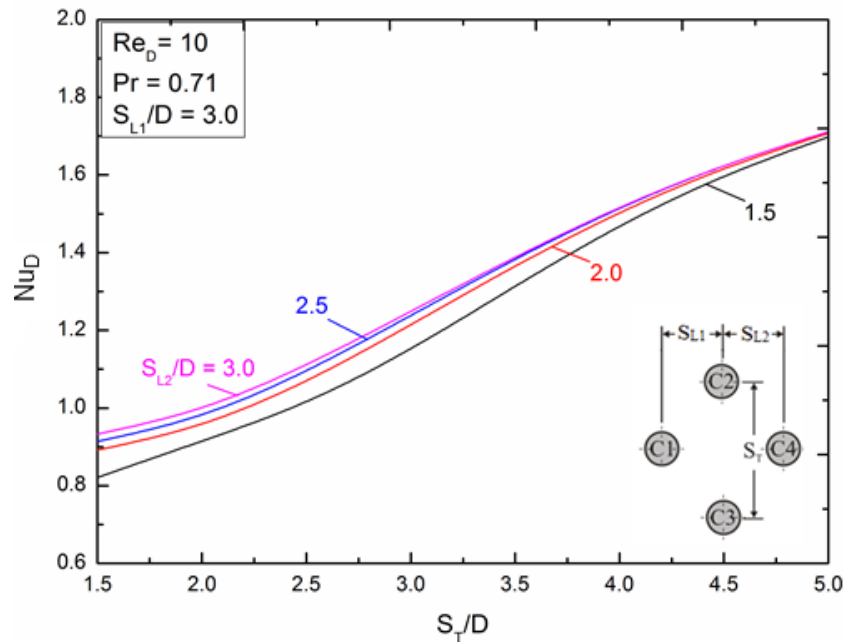


Figura 5.19 – Efeito da razão S_T/D sobre o número de Nusselt Nu_D para várias razões de S_{L2}/D e para $S_{L1}/D = 3.0$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

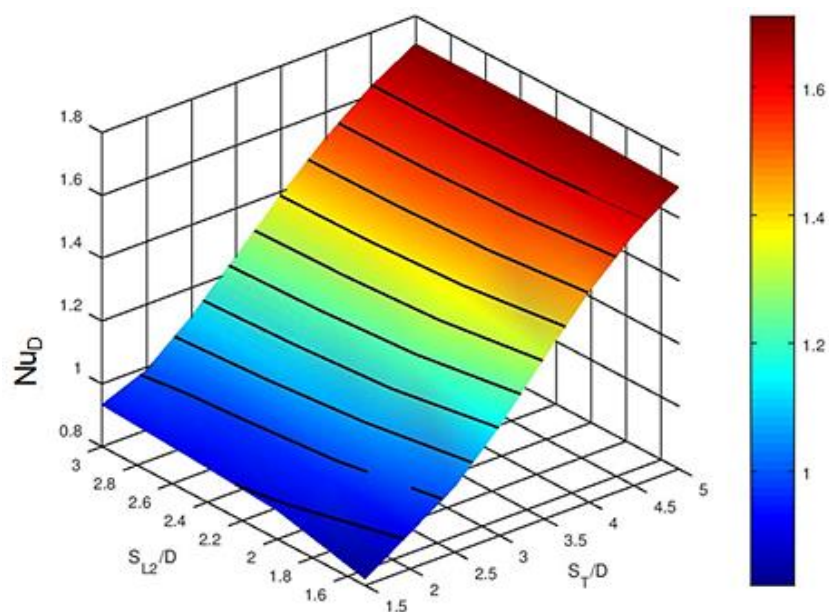


Figura 5.17 – Superfície com número de Nusselt (Nu_D) em função das razões S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 3.0$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

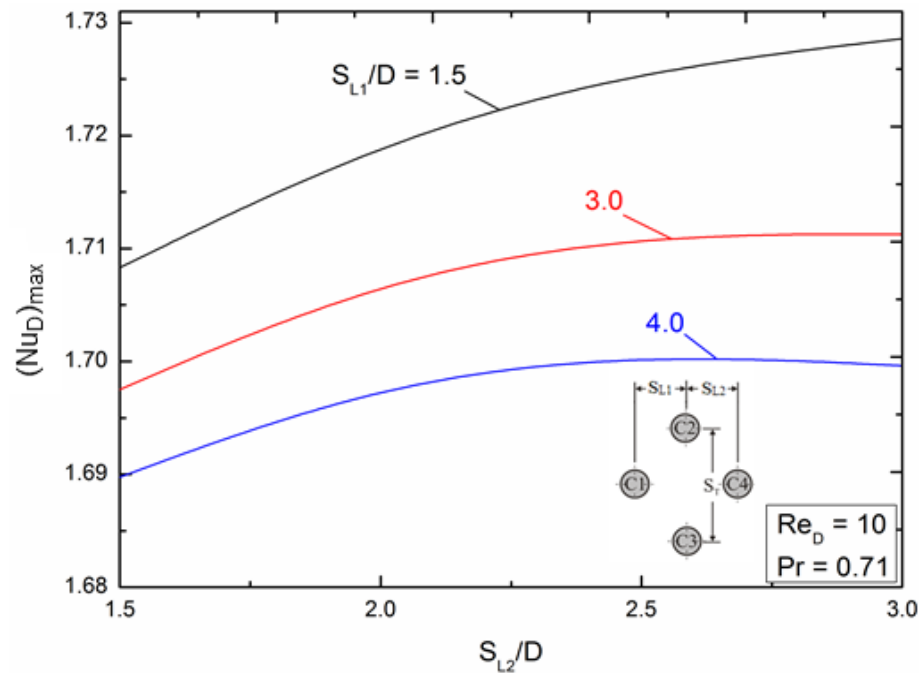


Figura 5.18 – Efeito da razão S_{L2}/D sobre $(Nu_D)_{max}$ para razões de S_{L1}/D para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

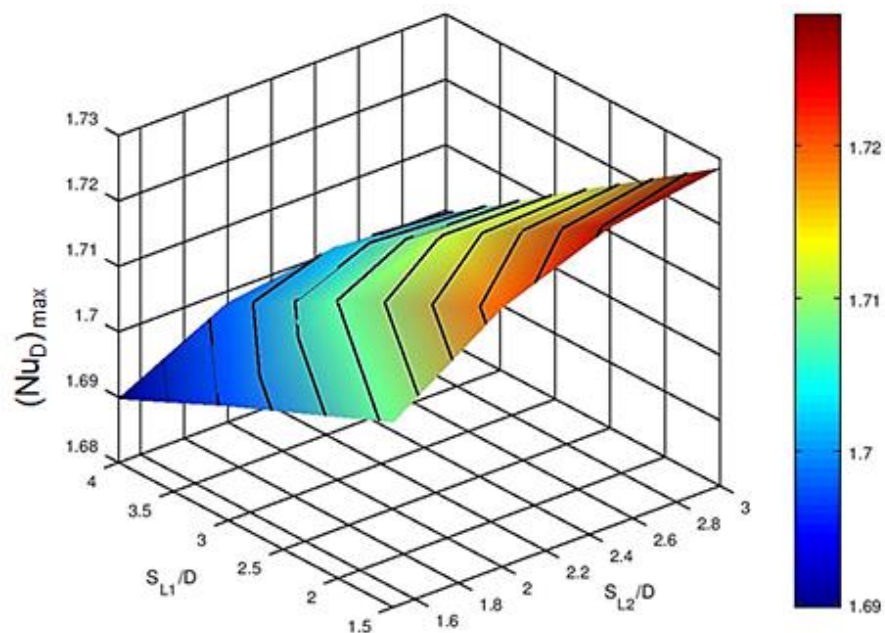


Figura 5.19 – Superfície do $(Nu_D)_{2max}$ em função dos valores de S_{L2}/D sobre S_{L1}/D para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

Para a análise do S_{L1}/D sobre o número de Nusselt duas vezes maximizado $(Nu_D)_{2max}$ utiliza-

se os valores ótimos de $(S_{L2}/D)_{20,T}$ e aplica-se os valores atribuídos para $S_{L1}/D = 1.5$; 3.0 e 4.0. Conforme exposto pelo gráfico da Fig. 5.20, o comportamento do $(Nu_D)_{2max}$ para os diferentes valores de S_{L1}/D decorre de forma decrescente, ou seja, a melhor medida para $S_{L1}/D = 1.5$. O que difere do esperado, pois intuitivamente se imagina que quanto maior as distâncias entre os cilindros melhor seria o seu desempenho térmico. Este fato ocorre, pois com o cilindro C_1 mais afastado dos cilindros C_2 e C_3 faz com que o escoamento os contorne de forma que pareçam cilindros isolados, isto é, sem fazer parte de um arranjo, conforme o campo de temperatura apresentado pela Fig. 5.21, em que $(S_T/D)_{30,T} = 5.0$; $(S_{L2}/D)_{20,T} = 2.5$ e $(S_{L1}/D)_{0,T} = 4.0$. Enquanto a Fig. 5.22 representa o campo de temperatura para o caso com o pior resultado quando $S_T/D = 1.5$; $S_{L2}/D = 1.5$ e $S_{L1}/D = 1.5$, apresentando uma melhora no desempenho térmico em 54%.

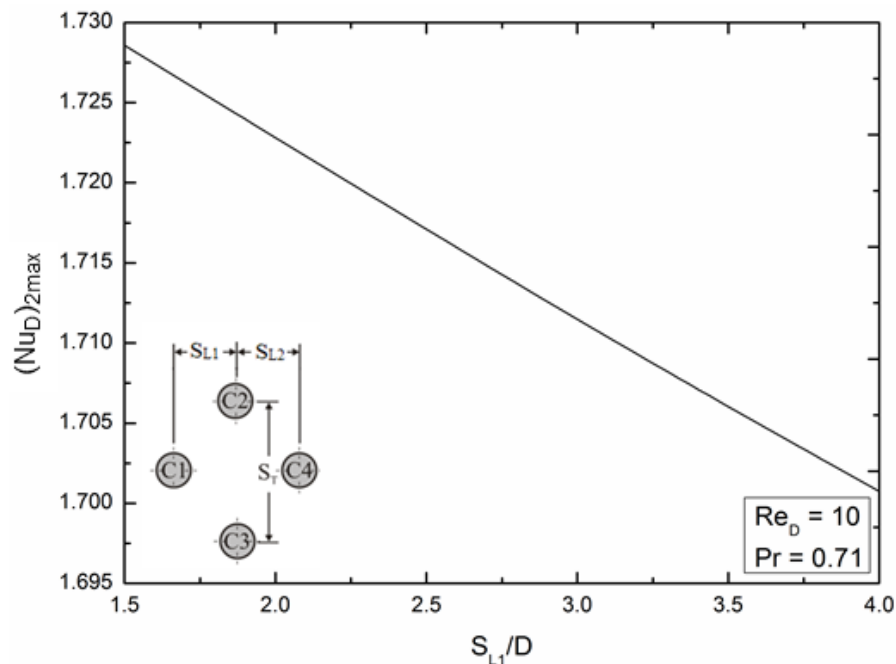


Figura 5.20 – Efeito da razão S_{L1}/D sobre $(Nu_D)_{2max}$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

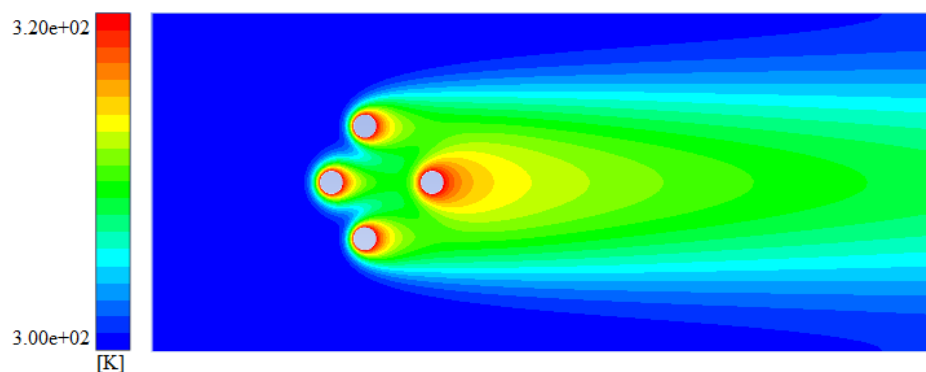


Figura 5.21 – Campo de temperatura para o caso de $(S_T/D)_{30,T} = 5.0$; $(S_{L2}/D)_{20,T} = 3.0$ e $(S_{L1}/D)_{0,T} = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

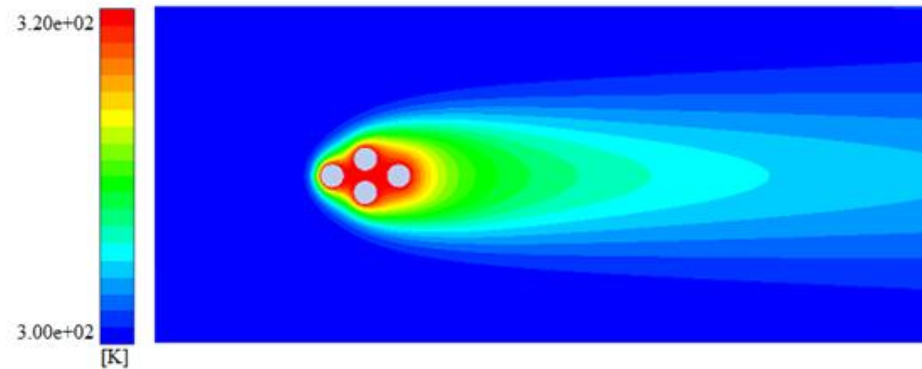


Figura 5.22 – Campo de temperatura para o pior caso de $(S_T/D) = 1.5$; $(S_{L2}/D) = 1.5$ e $(S_{L1}/D) = 1.5$ para $Re_D = 10$ e $Pr = 0.71$.

5.2. Resultados para $Re_D = 40$

5.2.1. Análise do problema fluidodinâmico para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$

De acordo com o já mencionado no estudo para os casos de $Re_D = 10$, o estudo fluidodinâmico do arranjo formado por quatro cilindros ocorre por meio da média aritmética do C_D entre os cilindros. E ainda, as etapas de otimização são as mesmas, modificando apenas o valor do $Re_D = 10$ para $Re_D = 40$. A Figura 5.23 ilustra o efeito da razão S_T/D sobre o coeficiente de arrasto (C_D) para $S_{L1}/D = 1.5$ e diferentes valores de S_{L2}/D ($S_{L2}/D = 1.5$; 2.0; 2.5 e 3.0), enquanto a Fig. 5.24 representa a superfície gerada com a magnitude do número de Nusselt em relação as razões S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 1.5$. Para todos os valores analisados de S_{L2}/D o comportamento do Nu_D é muito semelhante, o aumento da distância do passo transversal acarreta no aumento do C_D . Desse modo a geometria ótima para a minimização do C_D decorre em $S_T/D = 1.5$, isto é, $(S_T/D)_{O,F}$.

Nos casos em que $S_{L1}/D = 3.0$ e 4.0 a performance do Coeficiente de arrasto seguiu de maneira análoga ao caso de $S_{L1}/D = 1.5$. Assim sendo, quanto maior o valor de S_T/D maior o valor C_D , logo a geometria ótima para $S_{L1}/D = 3.0$ dar-se-á em $(S_T/D)_{O,F} = 1.5$. A Figura 5.25 representa o efeito de S_T/D para diferentes magnitudes de S_{L2}/D e Fig. 5.26 a superfície de C_D em função de S_T/D e S_{L2}/D , a mesma indica que apesar de haver uma ligeira influência de S_{L2}/D a razão S_T/D possui uma sensibilidade bem maior que o outro grau de liberdade. E para caso em que $S_{L1}/D = 4.0$ a minimização do C_D acontece em $(S_T/D)_{O,F} = 1.5$, a Fig. 5.27 ilustra o efeito de S_T/D para diferentes magnitudes de S_{L2}/D e Fig. 5.28 a superfície de C_D em função de S_T/D e S_{L2}/D . Desta forma, pode-se concluir que quanto menor a distância entre os cilindros intermediários C_2 e C_3 menor a resistência da superfície

em relação ao fluido para o caso com $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

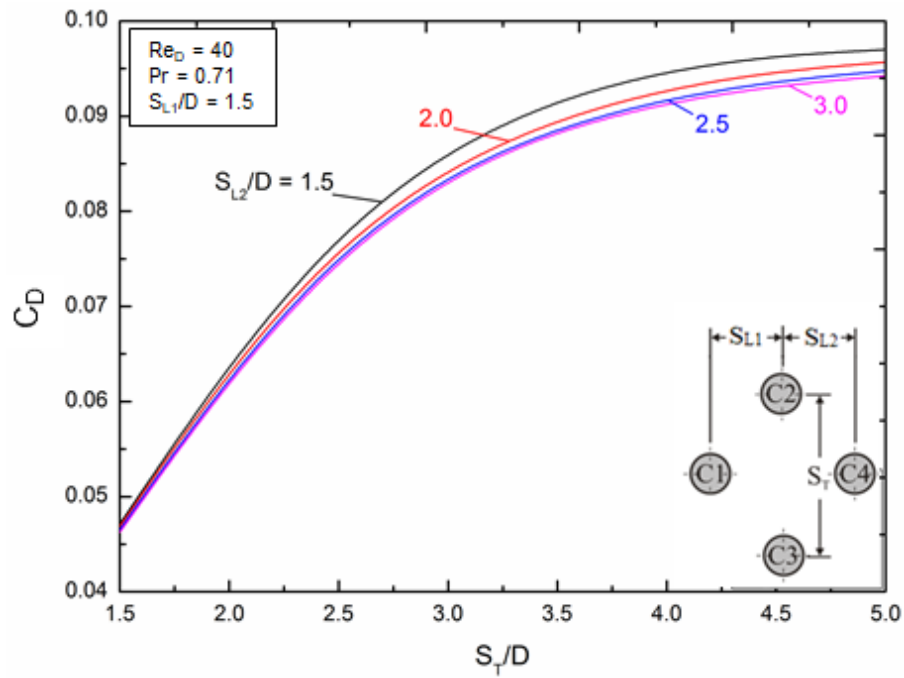


Figura 5.23 – Efeito de S_T/D sobre C_D para diferentes razões de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

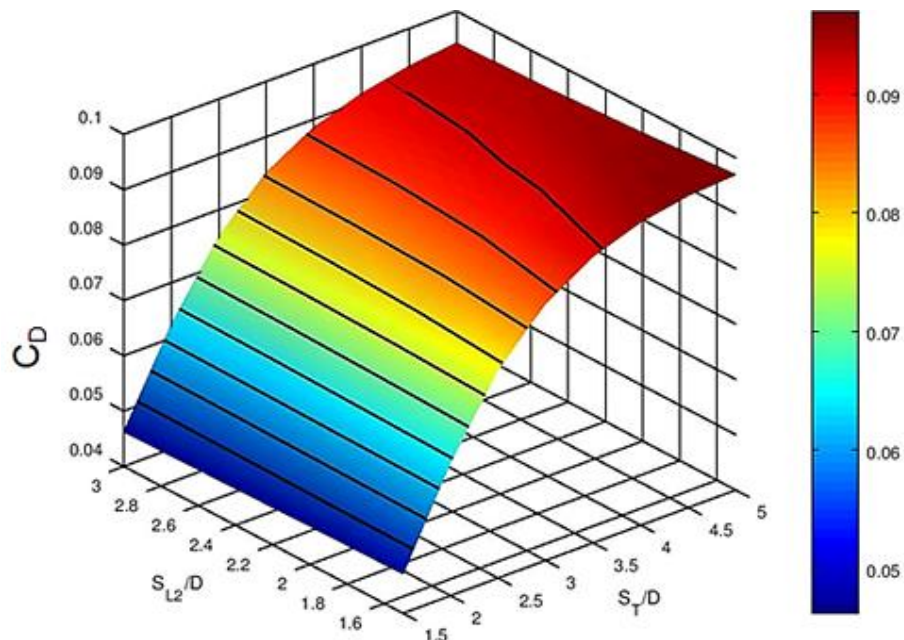


Figura 5.24 – Superfície com C_D em função de S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

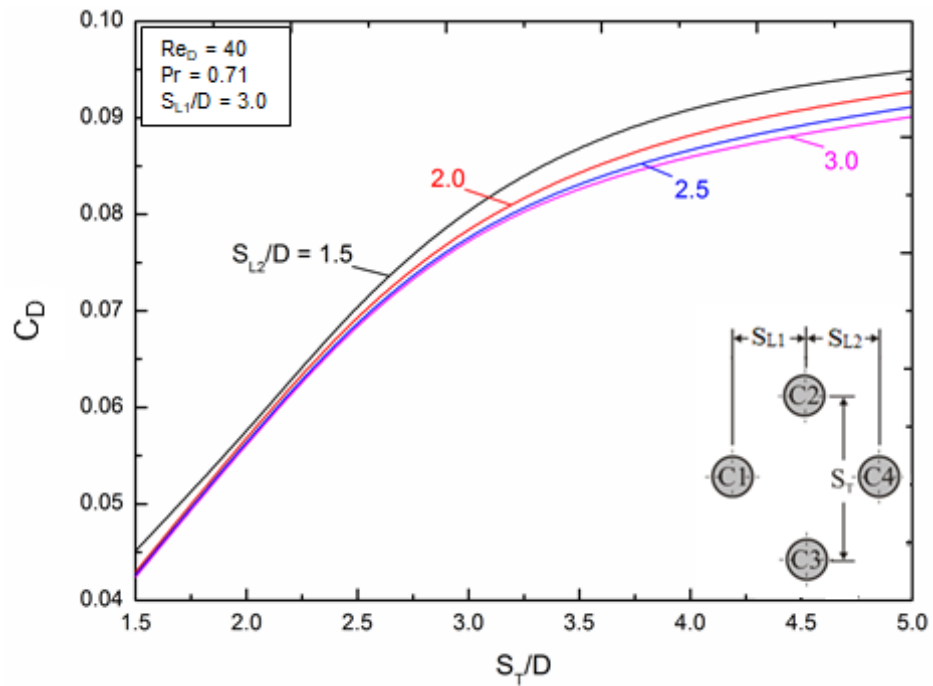


Figura 5.25 – Efeito de S_T/D sobre C_D para diferentes razões de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 3.0$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

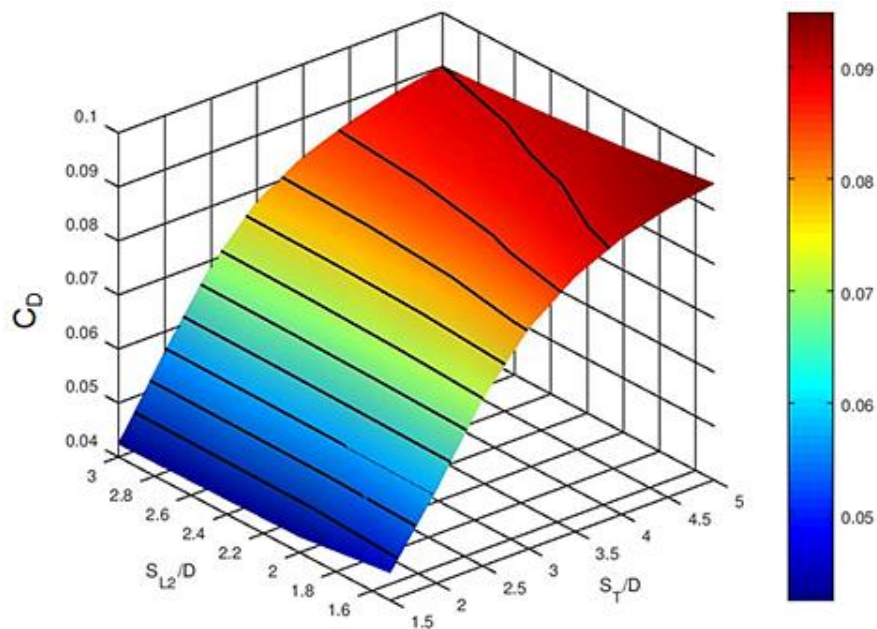


Figura 5.26 – Superfície com C_D em função de S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 3.0$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

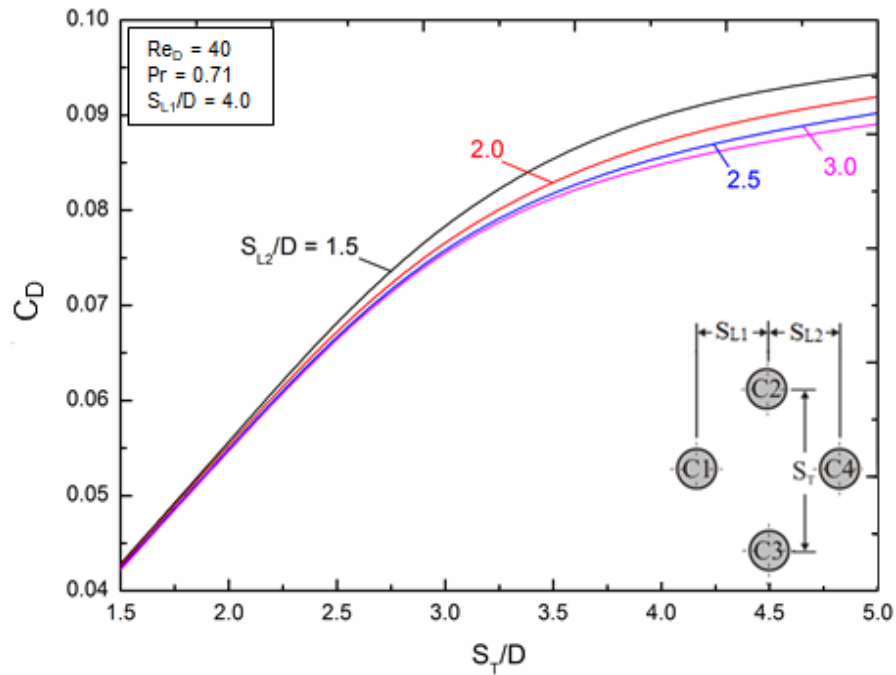


Figura 5.27 - Efeito de S_T/D sobre C_D para diferentes razões de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 4.0$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

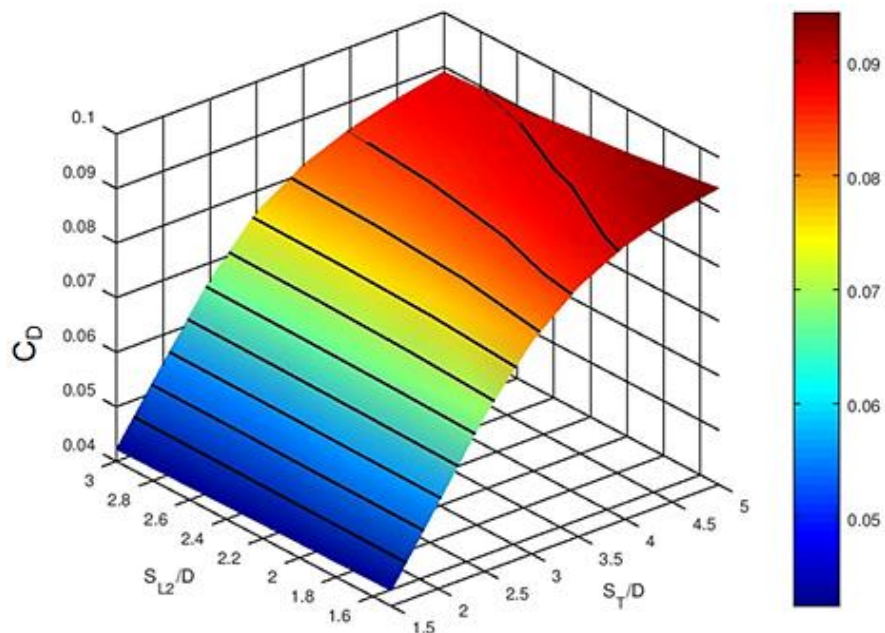


Figura 5.28 – Superfície com C_D em função de S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 4.0$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

A etapa seguinte consistiu em avaliar o efeito da razão S_{L2}/D para as razões dadas ao grau de liberdade S_{L1}/D , sobre o coeficiente de arrasto uma vez minimizado. Conforme ilustrado pela Fig.

5.29, que apresenta as curvas de S_{L1}/D e Fig. 5.30 ilustra a superfície de C_D em função de S_{L2}/D e S_{L1}/D . O comportamento do Coeficiente de arrasto se apresenta na forma decrescente, isto é, à medida de S_{L2}/D aumenta acontece a uma queda do C_D . Para os casos onde $S_{L1}/D = 1.5$ e 4.0 , este decréscimo aconteceu de forma constante, sem ocorrer grande diferença entre os resultados. Já o caso no qual $S_{L1}/D = 3.0$ em $1.5 \leq S_{L2}/D \leq 2.5$ ocorre uma queda significativa do C_D , que tende a estabilizar para $S_{L2}/D > 2.5$.

Em todas as razões de S_{L1}/D investigadas, os melhores resultados foram obtidos quando $(S_{L2}/D)_{O,F} = 3.0$. Desta forma, o cilindro posterior (C_4) mais afastado dos cilindros intermediários (C_2 e C_3) proporcionou a minimização do C_D , pois os campos de pressão e velocidade dos cilindros C_2 e C_3 não afetam mais o escoamento incidente ao cilindro posterior.

A Figura 5.31 apresenta o efeito da razão S_{L1}/D sobre o $(C_D)_{2min}$, de acordo com o gráfico o distanciamento dos cilindros intermediários (C_2 e C_3) do cilindro posterior (C_4) verificou-se a queda do C_D , de forma mais acentuada entre $1.5 \leq S_{L1}/D \leq 3.0$. E ainda, a minimização do Coeficiente de arrasto $(C_D)_{3min}$ ocorreu em $S_{L1}/D = 4.0$, isto é, $(S_{L1}/D)_{O,F} = 4.0$. O arranjo ótimo foi obtido para os casos com $Re_D = 40$ quando $(S_T/D)_{3O,F} = 1.5$; $(S_{L2}/D)_{2O,F} = 3.0$ e $(S_{L1}/D)_{O,F} = 4.0$.

As Figuras 5.32 e 5.34 ilustram os campos de pressão e velocidade para o caso ótimo, respectivamente, onde é possível observar que o maior distanciamento do cilindro C_1 faz com que o escoamento seja totalmente desenvolvido e os campos de pressão e velocidade não afetem diretamente os cilindros intermediários C_2 e C_3 . O mesmo ocorre para a razão S_{L2}/D , onde a distância de C_2 e C_3 para C_4 proporciona a minimização do C_D . Se tratando da avaliação do passo transversal, a menor distância entre os cilindros C_2 e C_3 permite a menor resistência da superfície em relação ao escoamento. As Figuras 5.33 e 5.35 ilustram os campos de pressão e temperatura para o caso de pior desempenho de C_D estudado quando $(S_T/D) = 5.0$, $(S_{L2}/D) = 1.5$ e $(S_{L1}/D) = 1.5$, a otimização realizada no estudo acarretou no aumento 129% do desempenho fluidodinâmico.

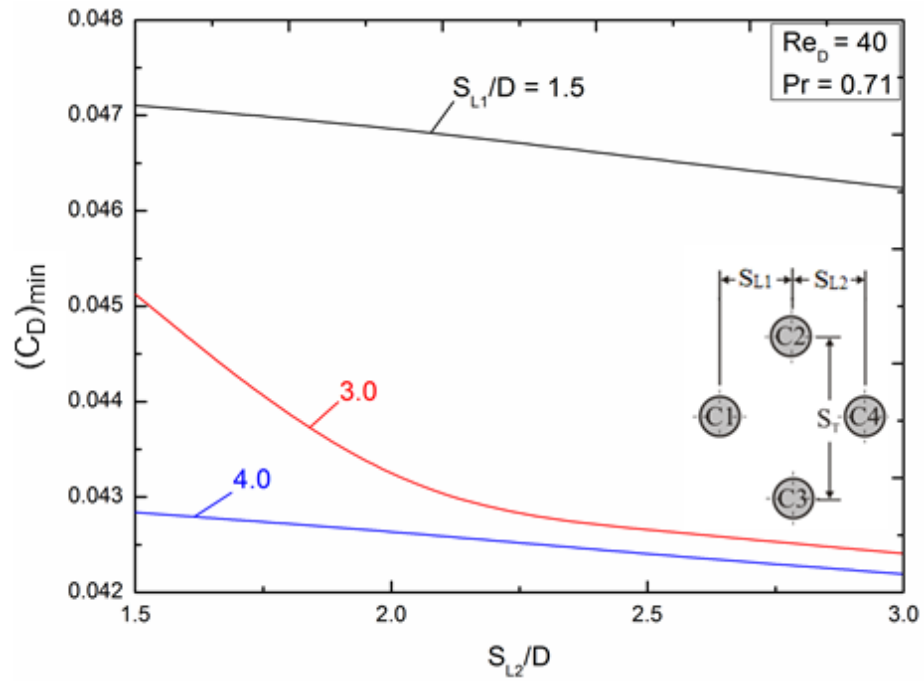


Figura 5.29 – Efeito da razão S_{L2}/D sobre $(C_D)_{min}$ para diferentes razões de S_{L1}/D para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

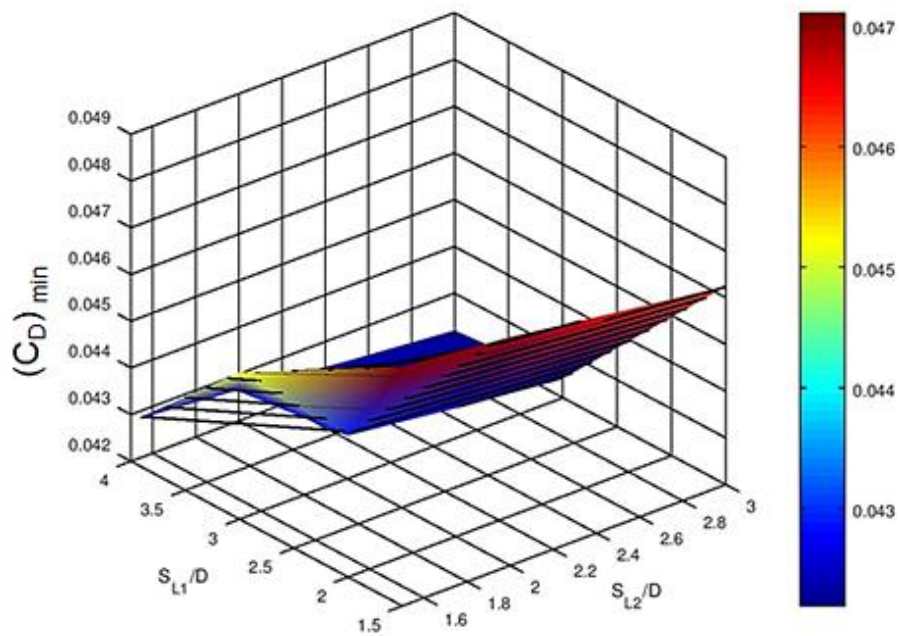


Figura 5.30 – Superfície do $(C_D)_{min}$ em função de S_{L2}/D sobre S_{L1}/D para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

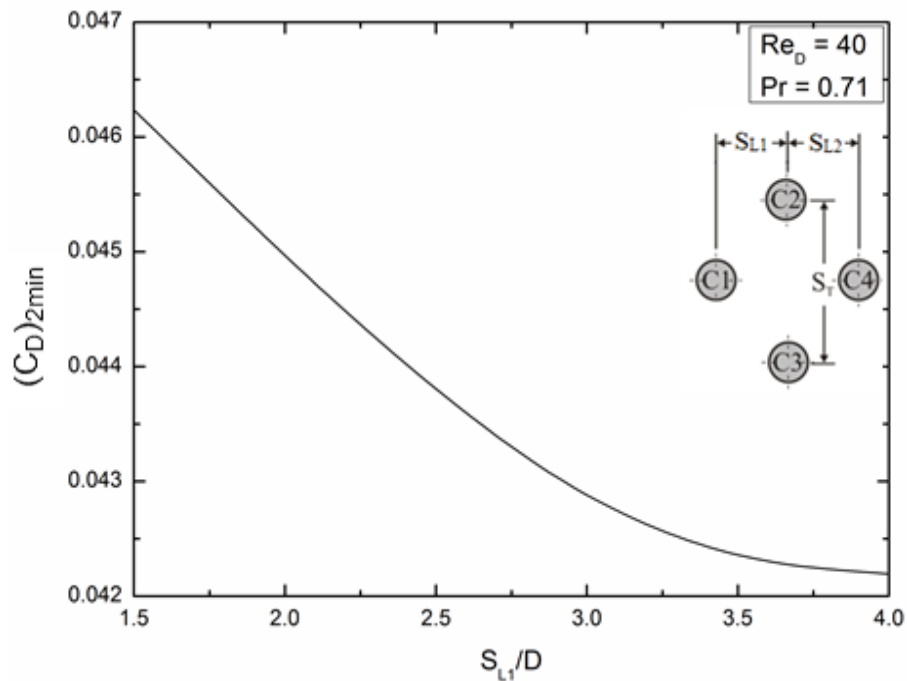


Figura 5.31 – Efeito da razão S_{L1}/D sobre $(C_D)_{2min}$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

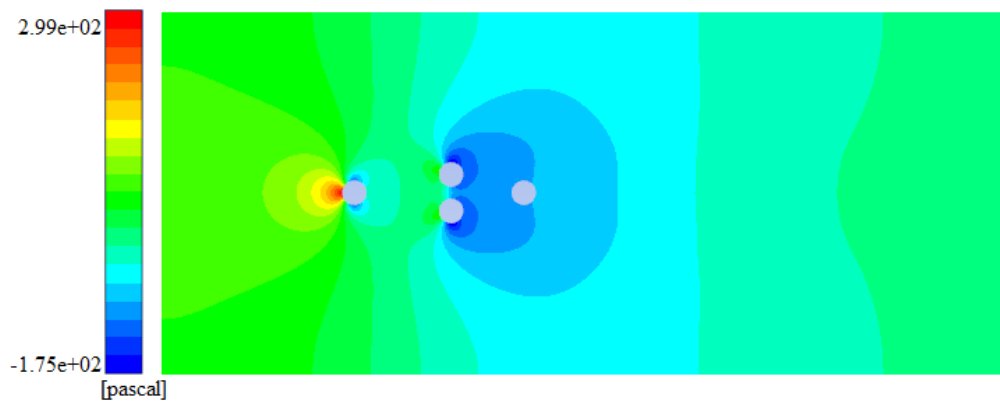


Figura 5.32 - Campo de pressão para caso ótimo $(S_T/D)_{3O,F} = 1.5$, $(S_{L2}/D)_{2O,F} = 3,0$ e $(S_{L1}/D)_{O,F} = 4,0$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

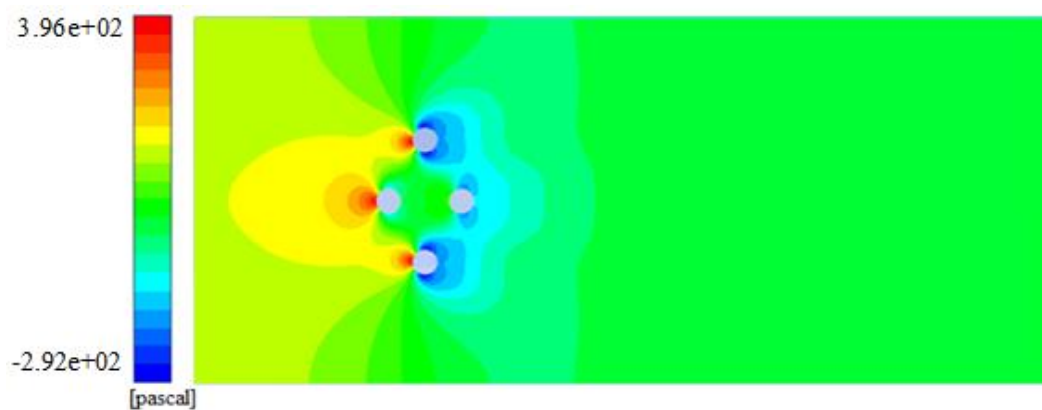


Figura 5.33 - Campo de pressão para o pior caso quando $(S_T/D) = 5.0$, $(S_{L2}/D) = 1.5$ e $(S_{L1}/D) = 1.5$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

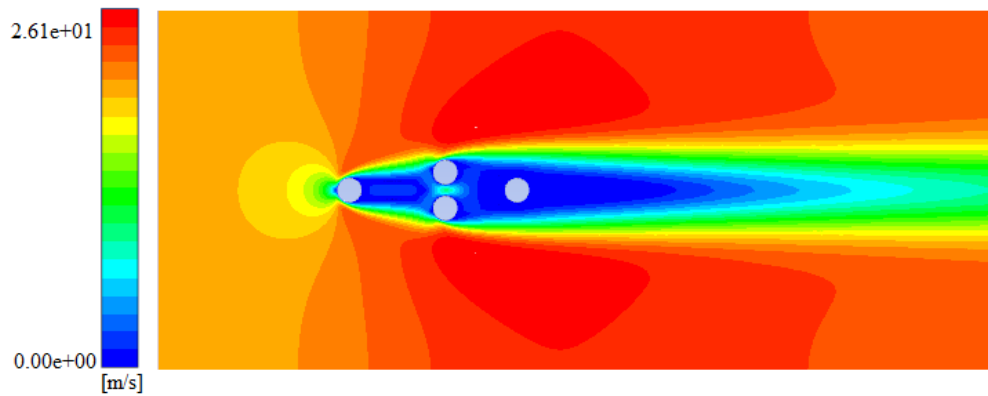


Figura 5.34 - Campo de velocidade para caso ótimo $(S_T/D)_{3O,F} = 1.5$, $(S_{L2}/D)_{2O,F} = 3.0$ e $(S_{L1}/D)_{O,F} = 4.0$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

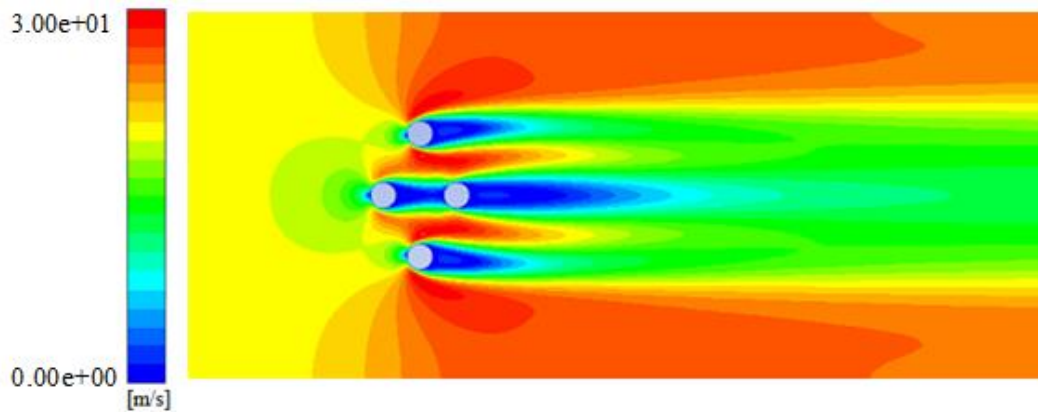


Figura 5.35 - Campo de velocidade para o pior caso quando $(S_T/D) = 5.0$, $(S_{L2}/D) = 1.5$ e $(S_{L1}/D) = 1.5$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

5.2.2. Análise do problema térmico para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$

O estudo térmico para $Re_D = 40$ consiste nas mesmas etapas que para $Re_D = 10$, assim as Figs. 5.36 e 5.37 representam o efeito da razão S_T/D sobre o Nu_D para diferentes razões de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 1.5$, $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$ e, bem como, a superfície com a magnitude do Nu_D em função de S_T/D e S_{L2}/D . Pode-se observar para que $2,5 \leq S_T/D \leq 5,0$ os valores de Nu_D para cada medida de S_{L2}/D são muito semelhantes. Também é perceptível que para todos os casos ocorreu a maximização (Nu_D) em $S_T/D = 5.0$, quer dizer, $(S_T/D)_{O,T} = 5.0$.

Se tratando dos casos em que $S_{L1}/D = 3.0$ e 4.0 a performance do Nu_D é similar, com uma curva do efeito de S_T/D sobre Nu_D crescente, semelhante a observada para $S_{L1}/D = 1.5$. No que tange a configuração ótima, para $S_{L1}/D = 3.0$ e 4.0 obtém-se a melhor geometria quando $(S_T/D)_{O,T} = 5.0$.

Para a avaliação do efeito de S_{L2}/D sobre o $(Nu_D)_{max}$ são coletados os resultados ótimos obtidos do efeito de S_T/D sobre Nu_D . A melhor configuração para este parâmetro é apresentada pela Fig. 5.38 na forma de curvas e a Fig. 5.39 ilustra a superfície de Nu_D em função de S_{L2}/D e S_{L1}/D . Por meio destes, observa-se que a magnitude da superfície, em geral, aumenta com o aumento de S_{L2}/D e diminuição do S_{L1}/D , ou seja, uma configuração assimétrica do arranjo.

Além disso, pode-se notar que para $S_{L1}/D = 1.5$ o parâmetro em análise apresenta uma maior variação para os valores de S_{L2}/D . E ainda, para $S_{L1}/D = 4.0$ aconteceu uma queda à medida que o espaçamento do passo S_{L2}/D aumentava, este fato implicou diretamente na geometria ótima, pois a mesma foi obtida em $(S_{L2}/D)_{O,T} = 1.5$.

Diferentemente dos demais parâmetros de $S_{L1}/D = 3.0$ e 4.0 , onde as geometrias ótimas ocorreram em $(S_{L2}/D)_{O,T} = 3.0$. Também se observou que as diferentes razões de S_{L1}/D influenciam no efeito de S_{L2}/D sobre $(Nu_D)_{max}$. E ainda, pode-se observar que o S_T/D possui uma maior sensibilidade que o S_{L2}/D .

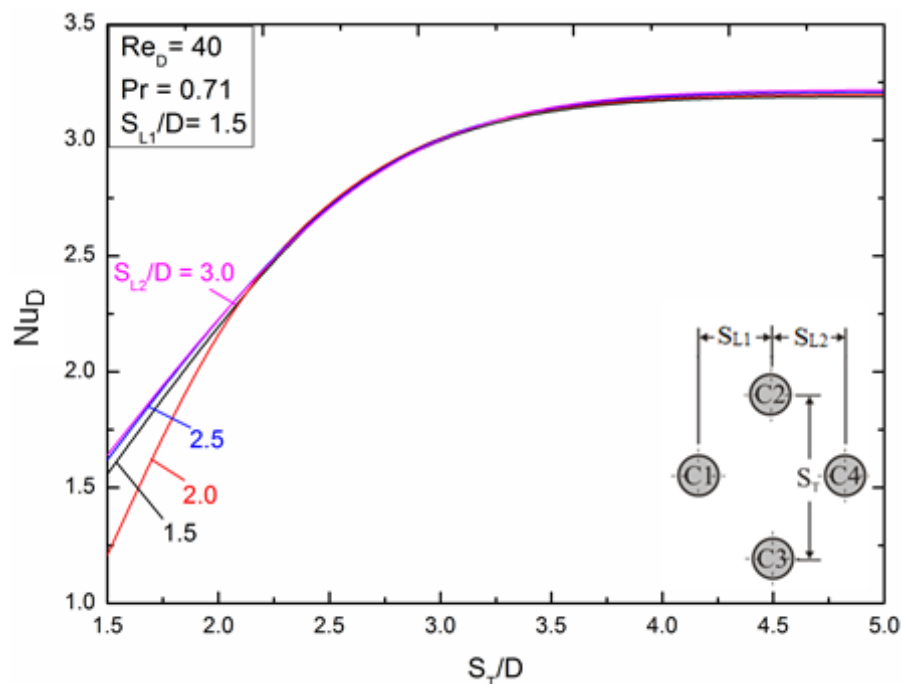


Figura 5.36 – Efeito de S_T/D sobre Nu_D para diferentes razões de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

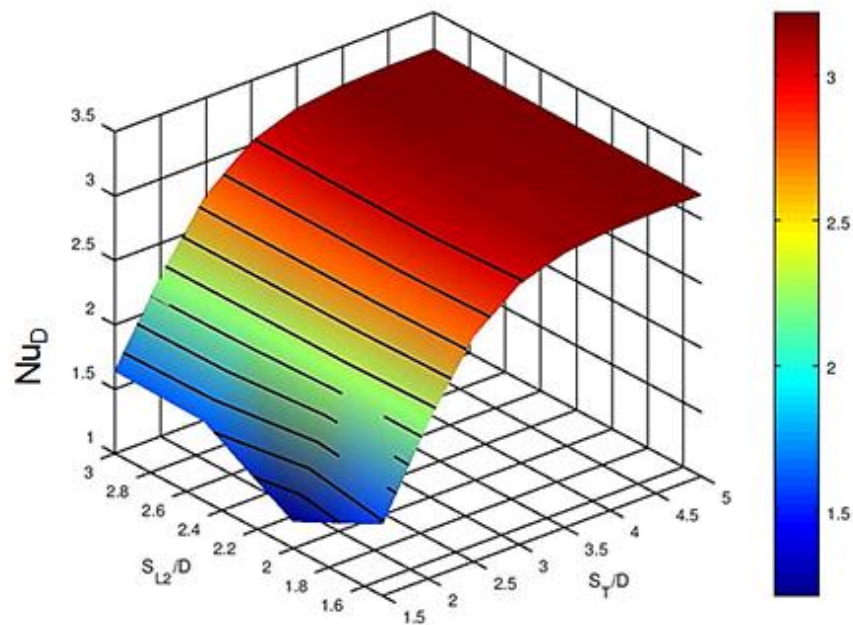


Figura 5.37 – Superfície com Nu_D em função de S_T/D e S_{L2}/D quando $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

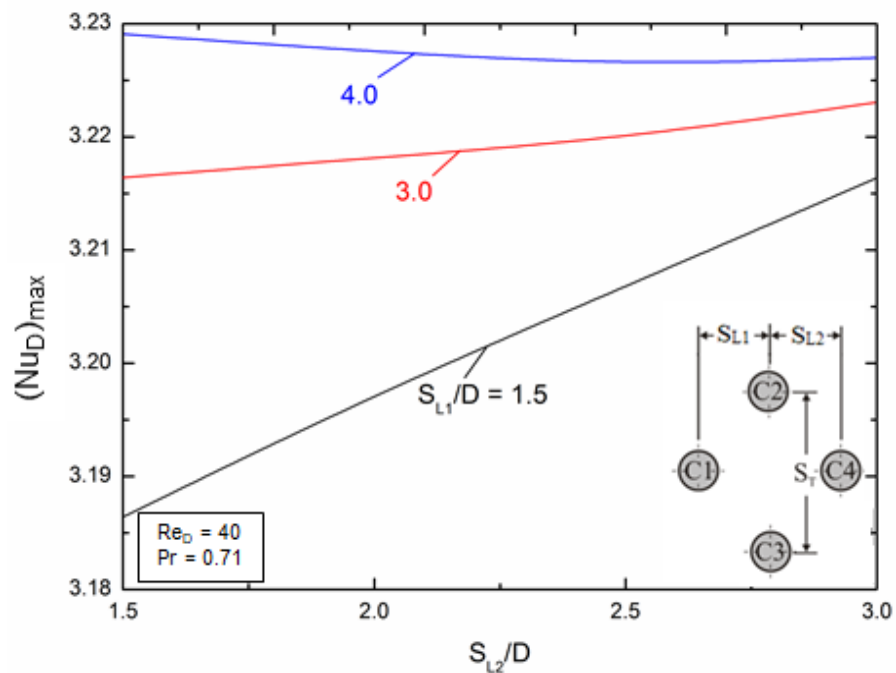


Figura 5.38 – Efeito da razão S_{L2}/D sobre o Nu_D uma vez maximizado $(Nu_D)_{max}$ para diferentes razões de S_{L1}/D para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

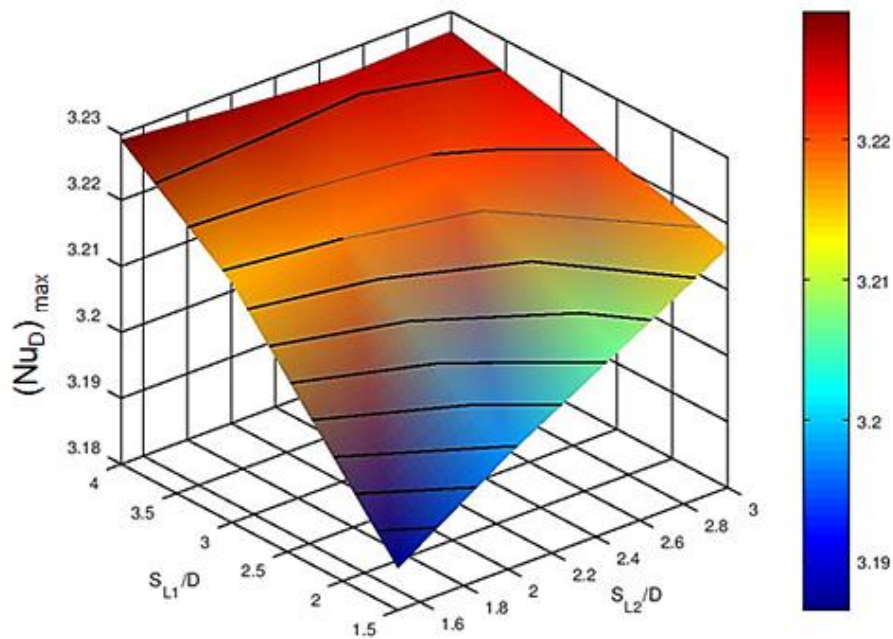


Figura 5.39 – Superfície de $(Nu_D)_{2max}$ em função de S_{L2}/D sobre S_{L1}/D para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

O efeito da razão S_{L1}/D sobre $(Nu_D)_{2max}$ é ilustrado pela Fig. 5.40, neste é possível perceber que a partir do crescimento da medida de S_{L1}/D também cresce o valor de $(Nu_D)_{2max}$. Dessa forma, o número de Nusselt três vezes maximizado é obtido para a maior razão de S_{L1}/D , ou seja, $(S_{L1}/D)_{O,T} = 4.0$. A Figura 5.41 apresenta o campo de temperatura para o arranjo ótimo de $Re_D = 40$, onde é representado pelas seguintes razões: $(S_T/D)_{3O,T} = 5.0$; $(S_{L2}/D)_{2O,T} = 1.5$ e $(S_{L1}/D)_{O,T} = 4.0$. A Figura 5.42 ilustra o campo de temperatura quando $(S_T/D) = 1.5$; $(S_{L2}/D) = 2.0$ e $(S_{L1}/D) = 1.5$ que corresponde ao pior caso estudado para o problema térmico, assim em relação ao caso ótimo se obteve o melhoramento de 62% na transferência de calor.

Na análise dos graus de liberdade pode-se observar que para S_T/D e S_{L1}/D ocorreu a maximização do Nu_D para o maior espaçamento, diferentemente do S_{L2}/D onde a menor distância entre os cilindros intermediários e posterior que proporciona o melhor desempenho de Nu_D . Assim, os resultados indicaram que, ao contrário do que foi observado no caso com $Re_D = 10$, a melhor configuração ocorre quando os cilindros centrais estão mais próximos do cilindro posterior e mais afastados do cilindro frontal. Com tudo, o Design se adaptou a intensidade do escoamento incidente sobre o arranjo de cilindros.

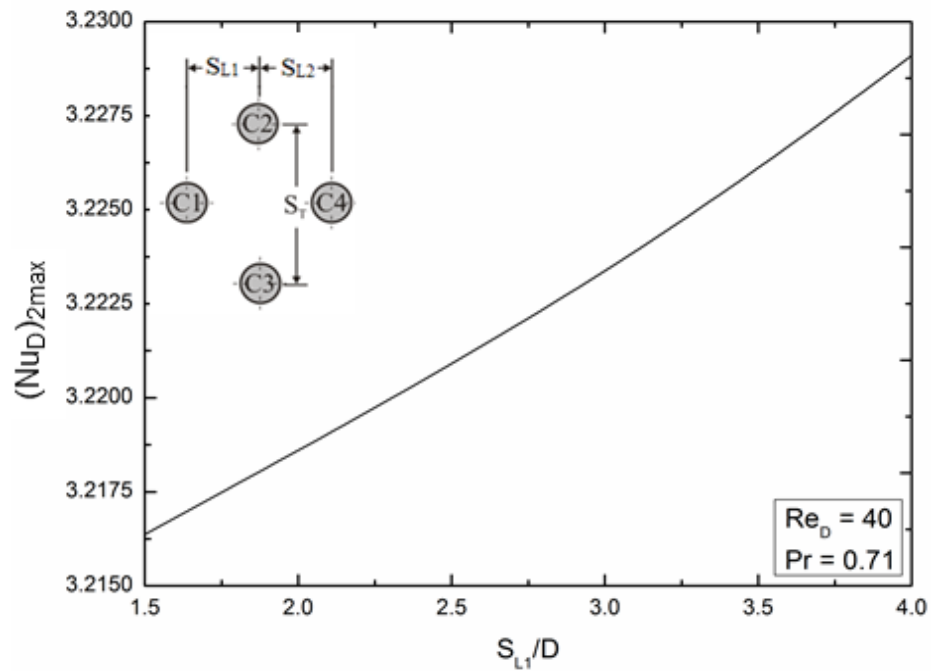


Figura 5.40 – Efeito de S_{L1}/D sobre $(Nu_D)_{2max}$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

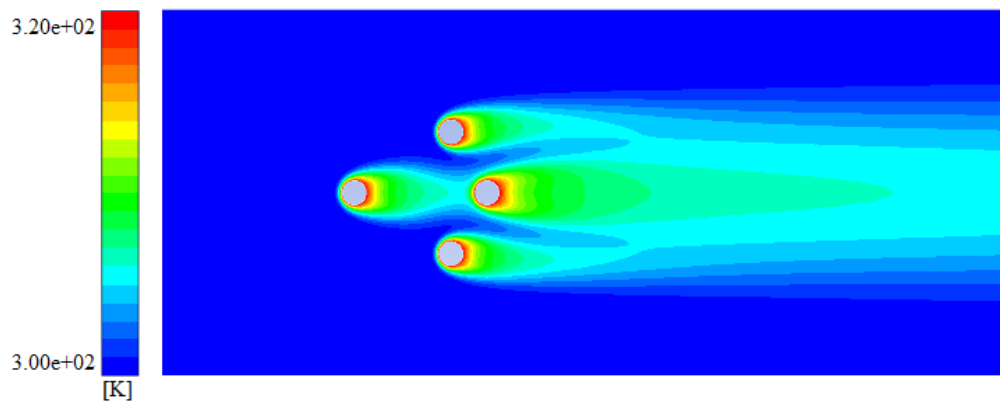


Figura 5.41 - Campo de temperatura para caso ótimo ($(S_T/D)_{3O,T} = 5.0$; $(S_{L2}/D)_{2O,T} = 1.5$ e $(S_{L1}/D)_{O,F} = 4.0$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

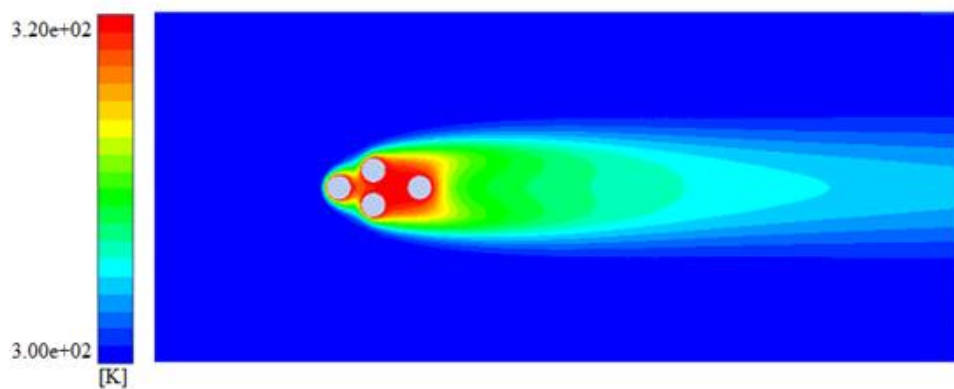


Figura 5.42 - Campo de temperatura para o pior caso quando $(S_T/D) = 1.5$; $(S_{L2}/D) = 2.0$ e $(S_{L1}/D) = 1.5$ para $Re_D = 40$ e $Pr = 0.71$.

5.3. Resultados para $Re_D = 150$

5.3.1. Análise do problema fluidodinâmico para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$

A etapa de avaliação das razões sobre o Coeficiente de arrasto segue a mesma sequência que o exposto nos casos de $Re_D = 10$ e 40 . Assim, primeiramente realiza-se a análise da razão S_T/D sobre o coeficiente de arrasto para os vários valores de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 1.5$. As Figuras 5.43 e 5.44 ilustram os desempenhos local e global desta avaliação da respectiva razão. Ao observar os gráficos pode-se concluir que o comportamento do C_D é sensível ao distanciamento dos cilindros C_2 e C_3 , ou seja, entre $1.5 \leq S_T/D \leq 4.0$ ocorre um crescimento da curva para todos os valores de S_{L2}/D e após $S_T/D = 4.0$ acontece uma pequena queda dos valores de C_D . Isso decorre porque a partir da razão $S_T/D = 4.0$ a geometria acarreta na queda da resistência do fluxo em relação a superfície para as razões de $S_T/D > 3.0$. Além disso, a minimização do parâmetro ocorreu para o menor valor de S_T/D , isto é, $(S_T/D)_{O,F} = 1.5$, resultado coerente com o esperado.

Para os demais casos de $S_{L1}/D = 3.0$ e 4.0 o comportamento do Coeficiente de arrasto é crescente a medida que S_T/D aumenta. Nessas condições o $(C_D)_{min}$ também ocorre na menor medida de S_T/D , ou seja, $(S_T/D)_{O,F} = 1.5$. Desta forma, independente do distanciamento dos cilindros intermediários (C_2 e C_3) e o cilindro posterior (C_4) o menor C_D será obtido quando a distância entre C_2 e C_3 for mínima, similarmente ao que foi observado na literatura para arranjos triangulares de cilindros (Barros *et al.*, 2017).

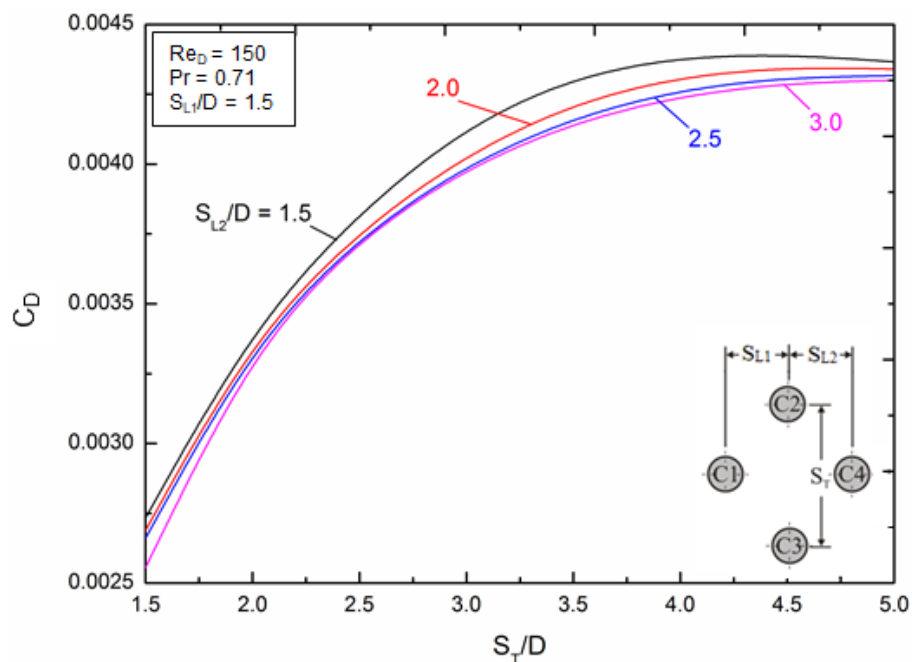


Figura 5.43 – Efeito de S_T/D sobre C_D para diferentes razões de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$.

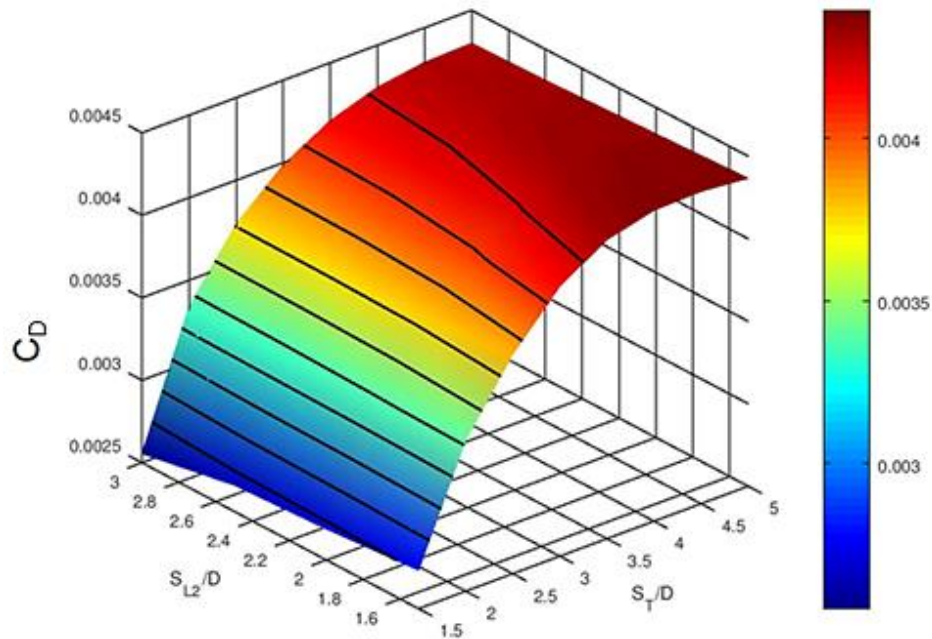


Figura 5.44 – Superfície com C_D em função de S_T/D e S_{L2}/D para $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$.

A análise da razão de S_{L2}/D sobre S_{L1}/D é representada pelas Figs. 5.45 e 5.46, nas formas local e global. Os gráficos mostram que o C_D tem comportamentos distintos para cada medida de S_{L1}/D . Para o caso em que $S_{L1}/D = 1.5$ à medida que S_{L2}/D cresce acarreta na diminuição do Coeficiente de arrasto, ocorrendo a minimização deste parâmetro em $S_{L2}/D = 3.0$, ou seja, $(S_{L2}/D)_{O,F} = 3.0$. Além disso, é importante destacar que as diferentes razões de S_{L1}/D afetam consideravelmente o efeito de S_{L2}/D sobre $(C_D)_{min}$.

Para $S_{L1}/D = 3.0$ a queda do $(C_D)_{min}$ é mais acentuada entre $1.5 \leq S_{L2}/D \leq 2.5$ e após este espaçamento a curva se estabiliza, tendo como $(S_{L2}/D)_{2O,T} = 3.0$. Em $S_{L1}/D = 4.0$ o decréscimo de $(C_D)_{min}$ ocorre de forma menos acentuada, ou seja, o aumento de S_{L2}/D implica em pequenas quedas nos valores do $(C_D)_{min}$. Conclui-se que a razão S_{L2}/D é sensível a variação de S_{L1}/D .

O efeito da razão S_{L1}/D sobre é ilustrado pela Fig. 5.47, onde observa-se que o aumento de S_{L1}/D acarreta na minimização do C_D , desta forma o maior distanciamento dos cilindros frontal (C_1) e intermediários (C_2 e C_3) possibilita a menor resistência do escoamento em relação à superfície dos cilindros. Isto resulta pelo fato da distância entre os cilindros ser suficiente para que o cilindro C_1 não interfira diretamente no escoamento incidente nos cilindros C_2 e C_3 . Os campos de pressão e velocidade para o caso ótimo para $Re_D = 150$ ocorre em $(S_T/D)_{3O,F} = 1.5$, $(S_{L2}/D)_{2O,F} = 3.0$ e $(S_{L1}/D)_{O,F} = 4.0$, que são apresentados pelas Figs. 5.48 e 5.50. Já as Figs. 5.49 e 5.51 ilustram os campos de pressão e velocidade para o pior caso estudado, em que $(S_T/D) = 4.5$, $(S_{L2}/D) = 1.5$ e $(S_{L1}/D) = 1.5$.

Desta forma, comparando os dois casos a partir da metodologia de Design Construtural se obteve um melhor desempenho fluidodinâmico em 119%.

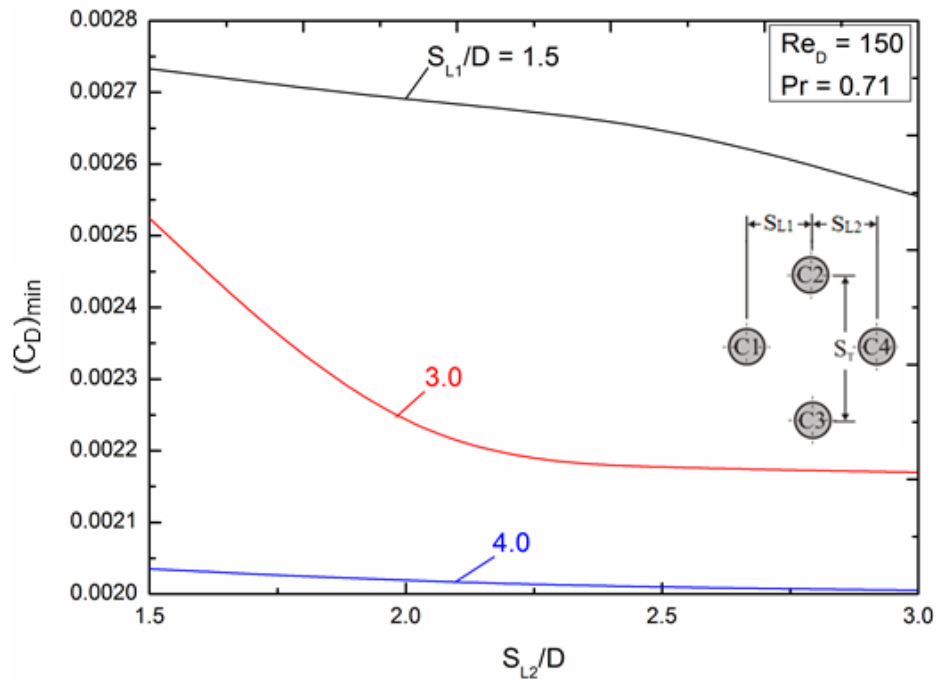


Figura 5.46 – Efeito da razão S_{L2}/D sobre $(C_D)_{min}$ para diferentes razões de S_{L1}/D para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$.

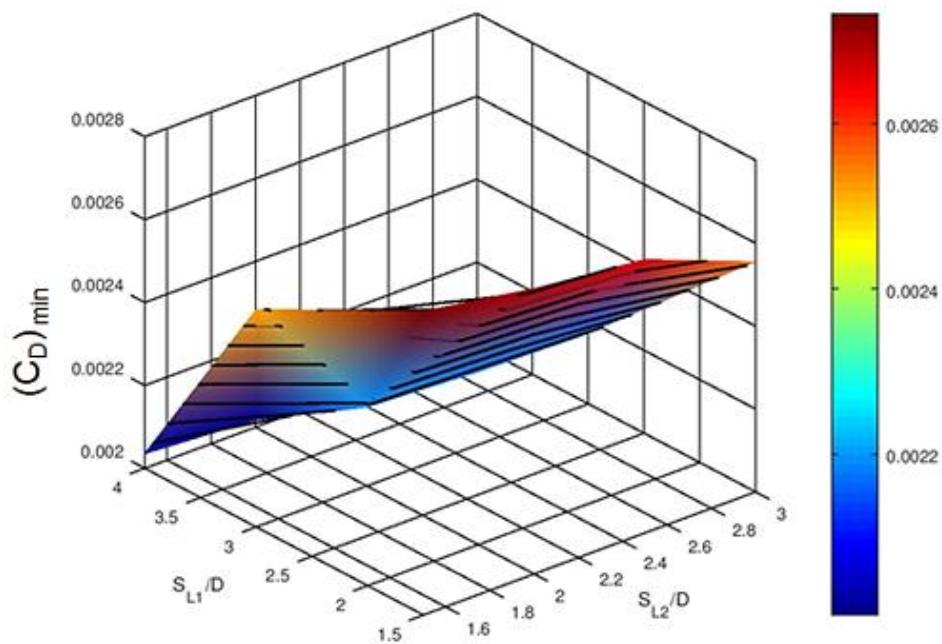


Figura 5.47 – Superfície de $(C_D)_{min}$ em função de S_{L2}/D sobre S_{L1}/D para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$.

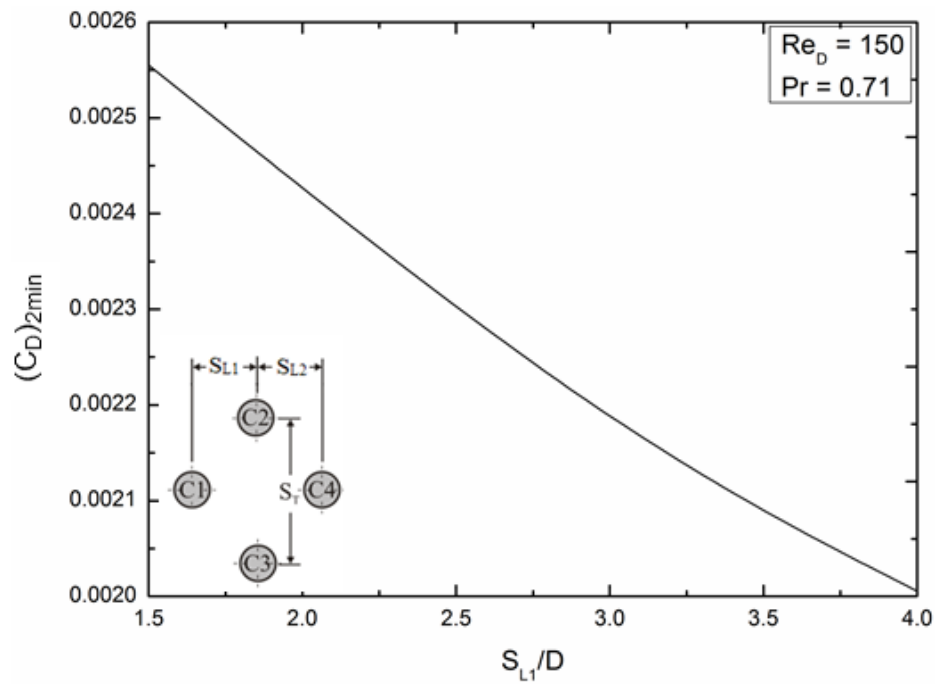


Figura 5.48 - Efeito da razão S_{L1}/D sobre $(C_D)_{2min}$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$.

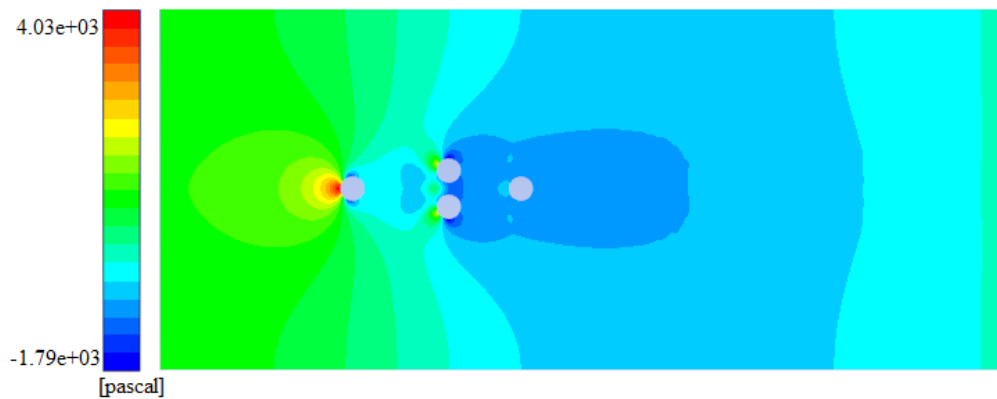


Figura 5.49 – Campo de pressão para o caso ótimo $(S_T/D)_{3O,F} = 1.5$, $(S_{L2}/D)_{2O,F} = 3.0$ e $(S_{L1}/D)_{O,F} = 4.0$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$.

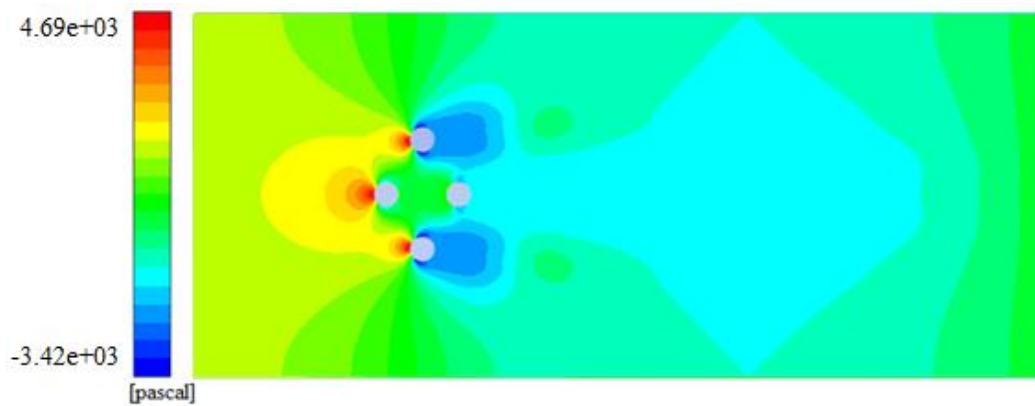


Figura 5.50 – Campo de pressão para o pior caso quando $(S_T/D) = 4.5$, $(S_{L2}/D) = 1.5$ e $(S_{L1}/D) = 1.5$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$.

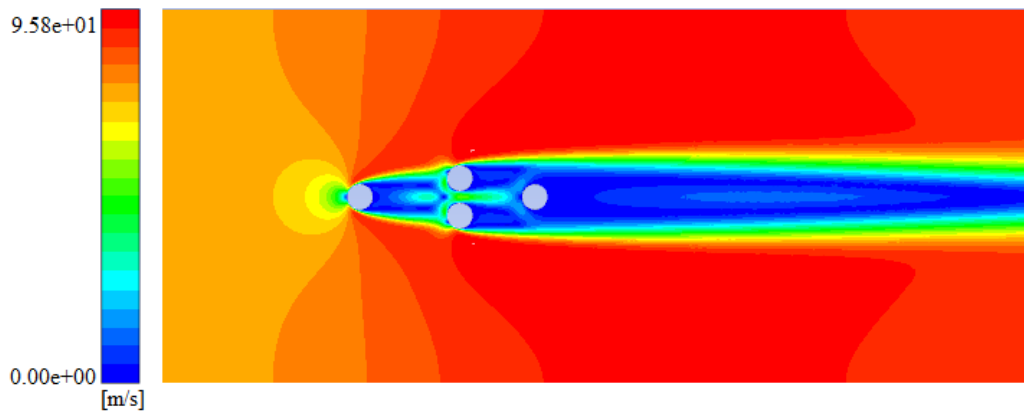


Figura 5.51 - Campo de velocidade para caso ótimo $(S_T/D)_{3O,F} = 1.5$, $(S_{L2}/D)_{2O,F} = 3.0$ e $(S_{L1}/D)_{O,F} = 4.0$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$.

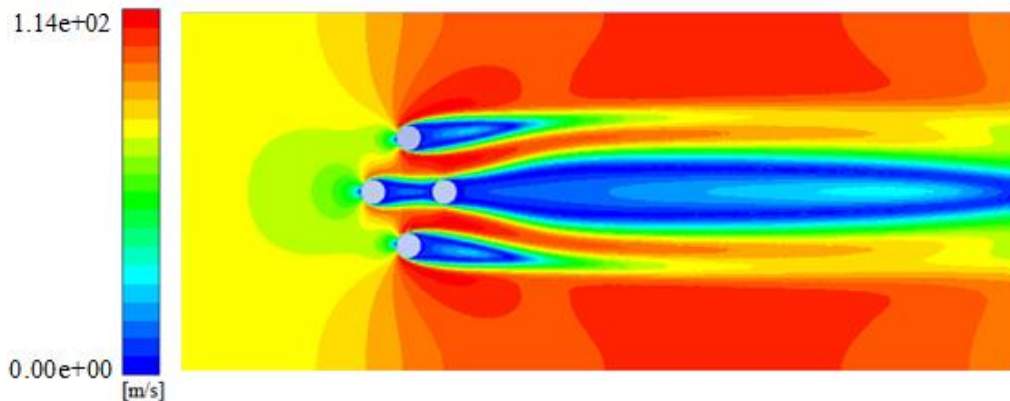


Figura 5.52 – Campo de velocidade para o pior caso quando $(S_T/D) = 4.5$, $(S_{L2}/D) = 1.5$ e $(S_{L1}/D) = 1.5$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$.

5.3.2. Análise do problema térmico para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$

De acordo com o estudo térmico realizado nas etapas anteriores o que se difere é apenas o valor de Re_D , que neste caso é assumido como $Re_D = 150$. A Figura 5.53 ilustra o efeito de S_T/D sobre Nu_D para diferentes razões de S_{L2}/D e a Fig. 5.54 ilustra a superfície de Nu_D em função das duas variáveis. Para $1.5 \leq S_T/D \leq 2.5$ os valores resultantes para o Nu_D são muito semelhantes, quase que coincidentes. A partir de $S_T/D = 2.5$ a performance tem algumas pequenas variações entre as diferentes razões de S_{L2}/D seguidos de uma queda dos valores. Contudo, a partir de $S_T/D = 3.0$ quase não há variação do Nu_D . A maximização deste parâmetro ocorreu em $3.5 \leq S_T/D \leq 4.5$ para a variação de S_{L2}/D . Para os demais valores de $S_{L1}/D = 3.0$ e 4.0 o comportamento é muito semelhante ao analisado anteriormente, inicialmente os valores de Nu_D são parecidos e à medida que S_T/D aumenta, a curva também cresce.

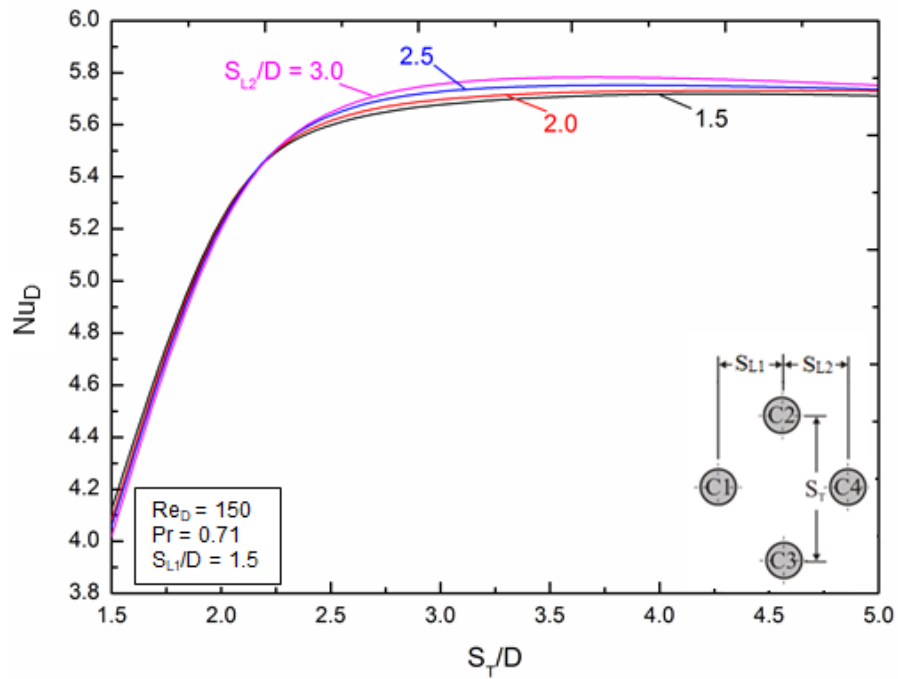


Figura 5.53 – Efeito de S_T/D sobre Nu_D para diferentes razões de S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 1.5$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$.

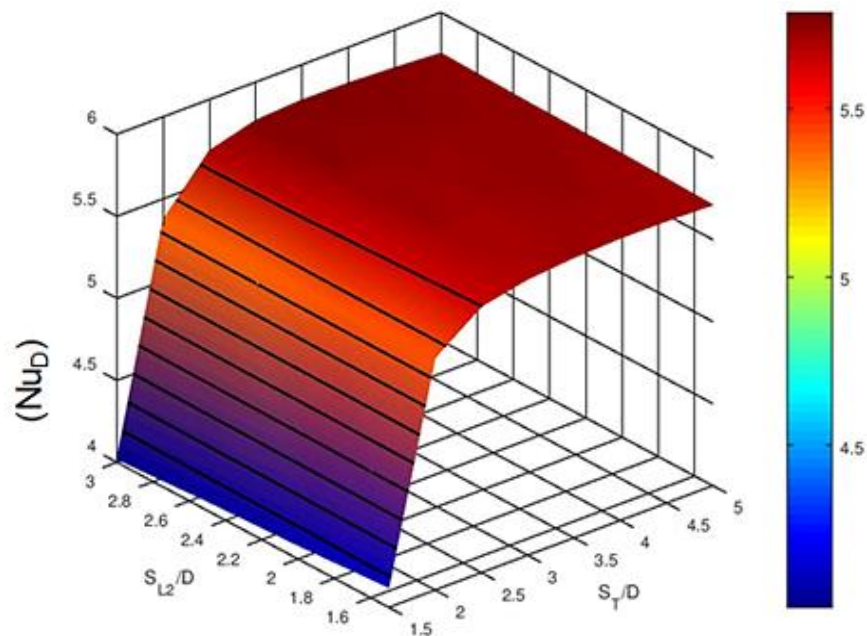


Figura 5.54 – Superfície com Nu_D em função de S_T/D e S_{L2}/D e $S_{L1}/D = 1,5$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$.

Para a avaliação do grau de liberdade S_{L2}/D varia-se os valores de $S_{L1}/D = 1.5; 3.0$ e 4.0 , logo as Figs 5.56 e 5.57 apresentam a performance do Nu_D nesta etapa de avaliação referente a visão local

e com a superfície visão global. Segundo os gráficos, para $S_{L1}/D = 1.5$ com uma variação maior nos valores de S_{L2}/D , e enquanto para $S_{L1}/D = 4.0$ o efeito de Nu_D é linear. Desta forma, o $(Nu_D)_{max}$ acontece para a maior distância de S_{L2}/D , ou seja, $(S_{L2}/D)_{O,T} = 3.0$. Assim, a maior distância entre os cilindros intermediários (C_2 e C_3) e o cilindro posterior (C_4) possibilita uma melhor transferência de calor no arranjo.

Para a análise do último grau de liberdade, toma-se as geometrias ótimas obtidas de $(S_T/D)_{20,T}$ e $(S_{L2}/D)_{O,T}$ e as diferentes razões de $S_{L1}/D = 1.5; 3.0$ e 4.0 . A Figura 5.58 ilustra o efeito de S_{L1}/D sobre $(Nu_D)_{2max}$, é possível identificar que o aumento da razão S_{L1}/D afeta diretamente no crescimento Nu_D . Deste modo, a maximização do Nu_D ocorre no maior distanciamento dos cilindros frontal (C_1) e intermediários (C_2 e C_3), ou seja, $(S_{L1}/D)_{O,T} = 4.0$. O campo de temperatura apresentado pela Fig. 5.59, ilustra a influência de $S_{L1}/D = 4.0$ sobre o desempenho térmico do arranjo, onde os cilindros estão afastados o suficiente para que não ocorra interferência dos cilindros nas camadas limite térmicas dos demais cilindros. Assim, como as geometrias das demais razões analisadas, isto é, para $Re_D = 150$ a geometria que possibilita a melhor taxa de transferência de calor ocorre quando $(S_T/D)_{30,T} = 5.0$; $(S_{L2}/D)_{20,T} = 3.0$ e $(S_{L1}/D)_{O,T} = 4.0$. A Figura 5.60 representa o arranjo do caso com o pior resultado para o Nu_D , em que $(S_T/D) = 1.5$; $(S_{L2}/D) = 3.0$ e $(S_{L1}/D) = 4.0$, se potencialização em 36% o desempenho térmico em relação ao melhor caso. Comparando com os casos de $Re_D = 10$ e 40 , a tendência é um arranjo apenas levemente assimétrico.

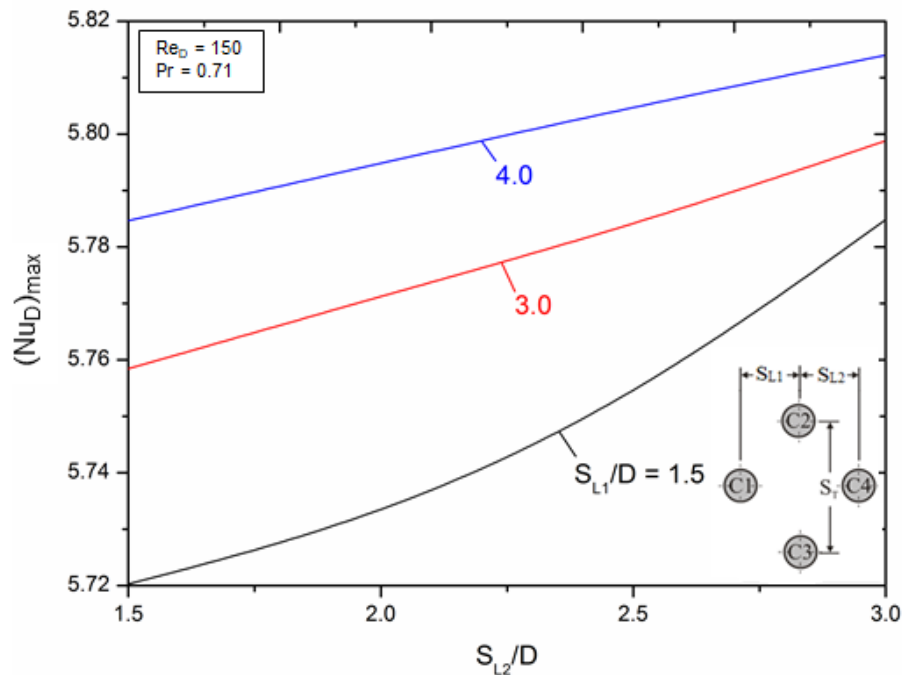


Figura 5.56 – Efeito da razão S_{L2}/D sobre $(Nu_D)_{max}$ para diferentes razões de S_{L1}/D para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$.

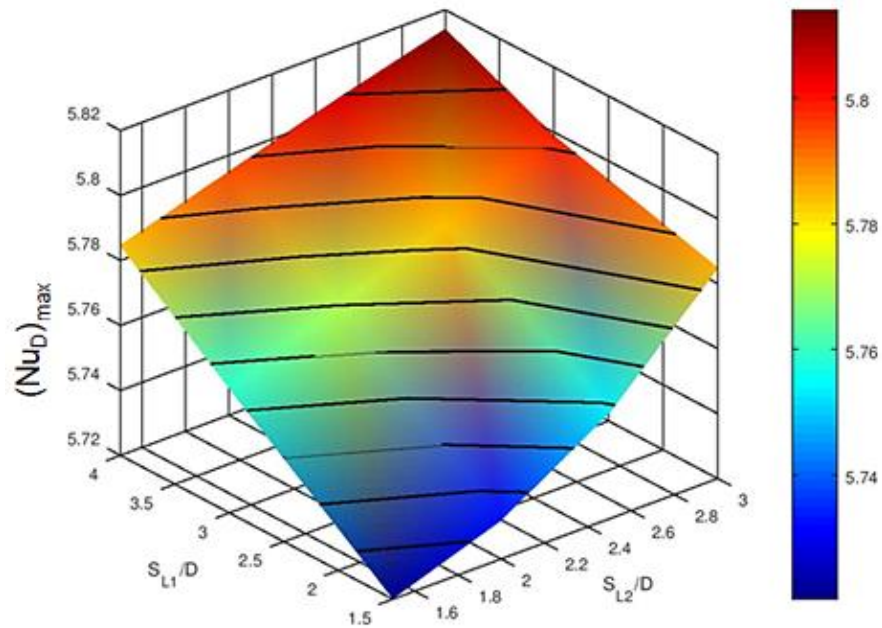


Figura 5.57 – Superfície do $(Nu_D)_{2max}$ em função de S_{L2}/D sobre S_{L1}/D para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$.

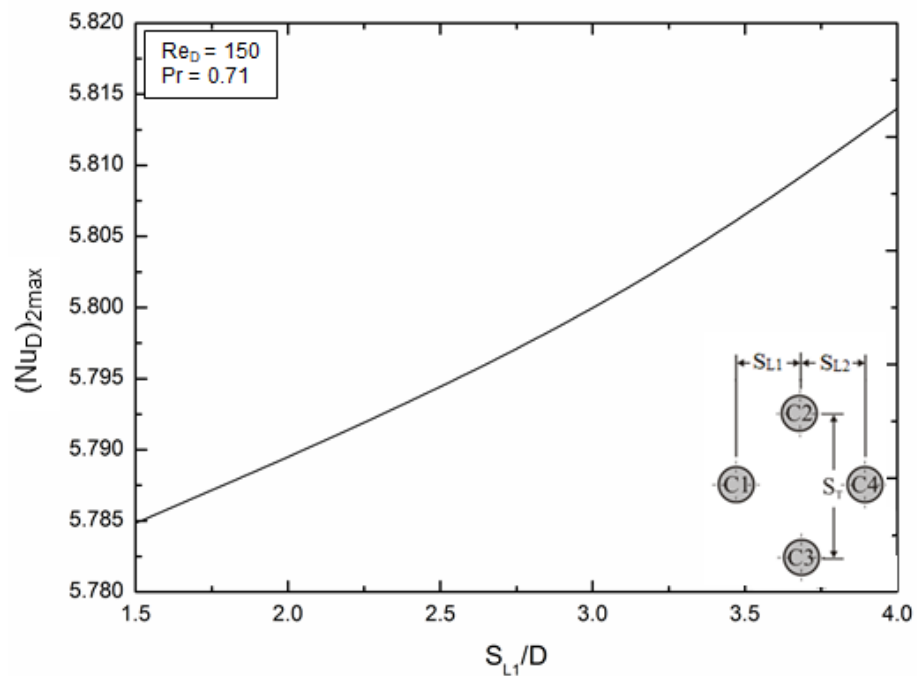


Figura 5.58 – Efeito da razão S_{L1}/D sobre $(Nu_D)_{2max}$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$.

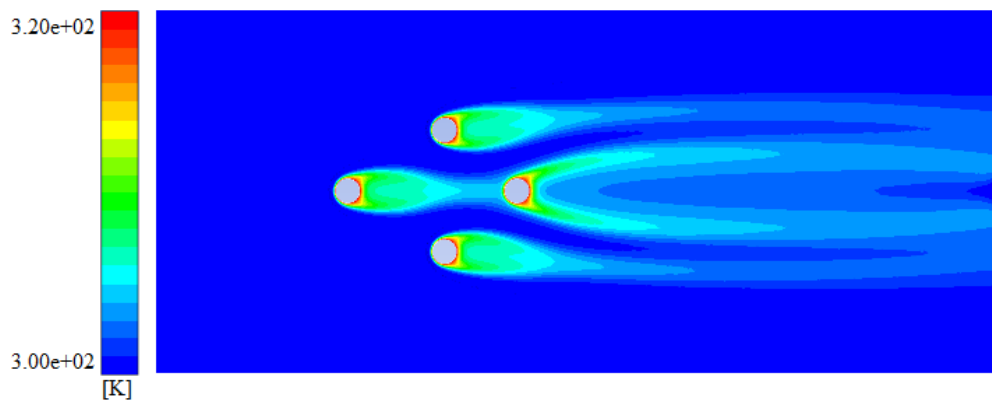


Figura 5.59 - Campo de temperatura para caso ótimo $(S_T/D)_{O,T} = 5.0$; $(S_{L2}/D)_{2O,T} = 3.0$ e $(S_{L1}/D)_{3O,F} = 4.0$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$.

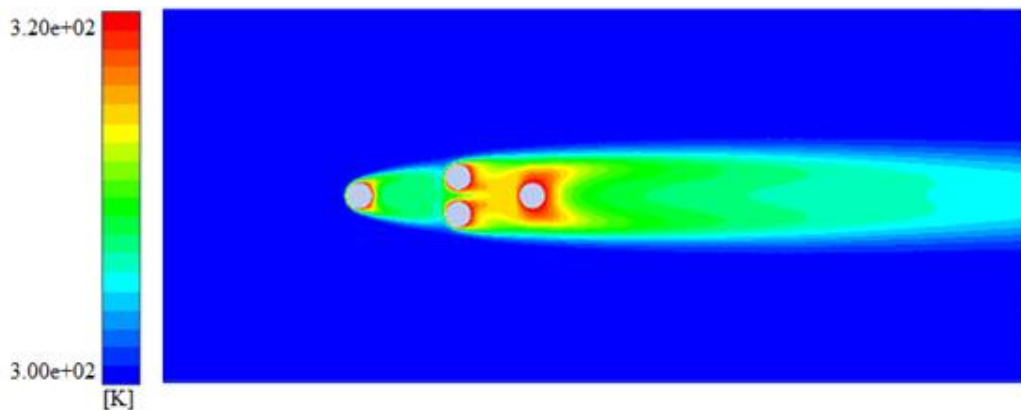


Figura 5.60 - Campo de temperatura para o pior caso $(S_T/D) = 1.5$; $(S_{L2}/D) = 3.0$ e $(S_{L1}/D) = 4.0$ para $Re_D = 150$ e $Pr = 0.71$.

5.4. Efeito do número de Reynolds sobre o desempenho fluidodinâmico, térmico e geometrias ótimas

Nesta seção é feita a análise da influência dos valores de Reynolds sobre os coeficientes de arrasto três vezes minimizado, o número de Nusselt três vezes maximizado e suas respectivas geometrias.

A Figura 5.61 mostra o efeito do número de Reynolds ($Re_D = 10, 40$ e 150) sobre o coeficiente de arrasto do arranjo para as configurações ótimas. Para $(S_T/D)_{3O,F}$ as geometrias ótimas encontradas para todos os Re_D se manteve constante, ou seja, o menor distanciamento dos cilindros intermediários (C_2 e C_3) para o estudo fluidodinâmico é a melhor condição para todos os Re_D . O comportamento do efeito de Re_D sobre $(S_{L2}/D)_{2O,F}$ e $(S_{L1}/D)_{O,F}$ são similares em todas faixas de Reynolds, com diferenças

nas magnitudes das configurações ótimas. A partir disso evidencia-se que de acordo com o valor atribuído ao número de Reynolds, o mesmo influencia diretamente nas geometrias ótimas encontradas no estudo. A Figura 5.62 ilustra o efeito de $(C_D)_{3min}$ para todos os casos de Re_D analisados, o gráfico tem comportamento decrescente quando aos valores de Re_D são crescentes.

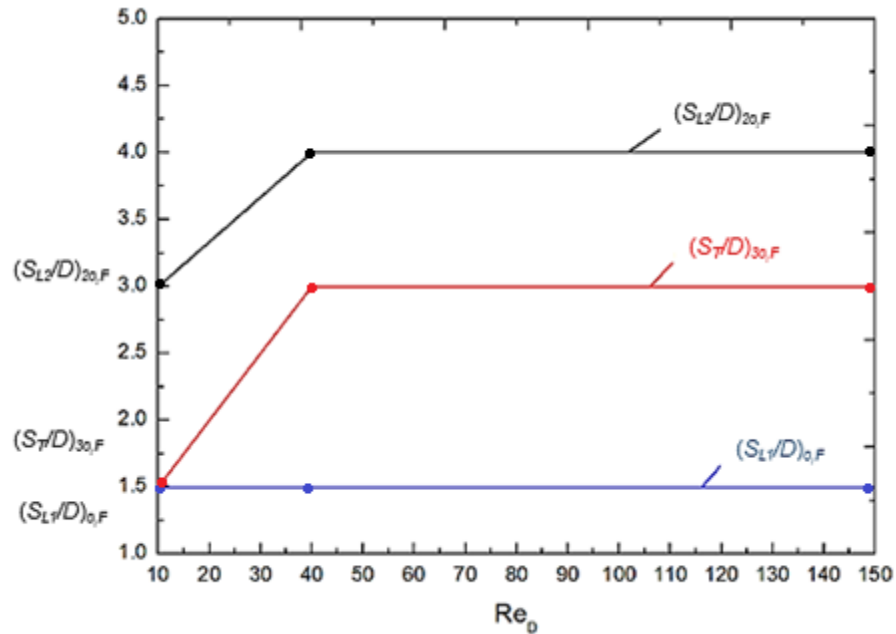


Figura 5.61 – Efeito do Re_D sobre o estudo fluidodinâmico de arranjo de cilindros.

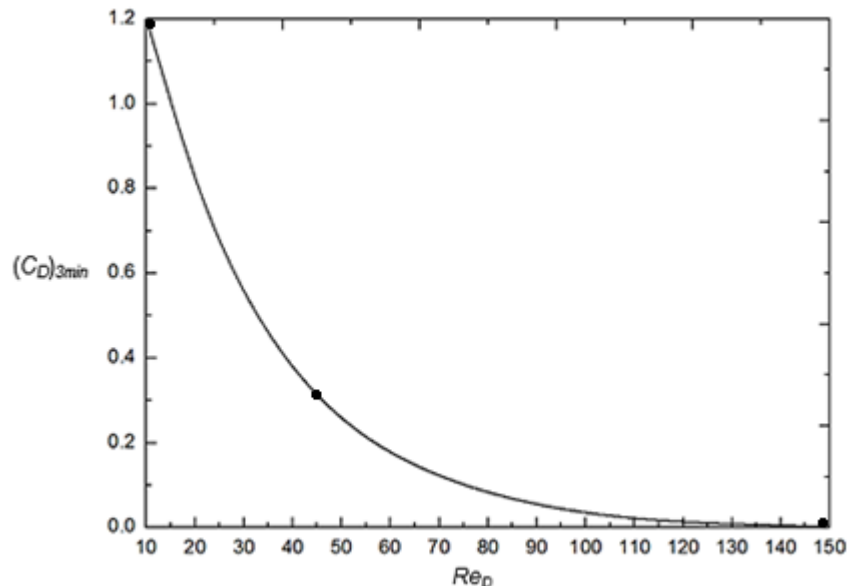


Figura 5.62 – Efeito dos valores $(C_D)_{3min}$ sobre $Re_D = 10, 40$ e 150 .

A Figura 5.63 ilustra o efeito do Re_D sobre o $(Nu_D)_{3max}$ o estudo térmico do arranjo dos cilindros e as geometrias ótimas obtidas. Para $(S_T/D)_{30,T}$ a variação do número de Reynolds não afetou

diretamente a configuração dos cilindros. Para as outras razões de $(S_{L2}/D)_{20,T}$ e $(S_{L1}/D)_{0,T}$ o número de Reynolds possui influência considerável sobre as configurações ótimas obtidas e sobre o design. A Figura 5.64 ilustra o efeito de $(Nu_D)_{3max}$ para todos os casos de Re_D analisados, o gráfico tem comportamento crescente à medida que o valor de Re_D são aumenta.

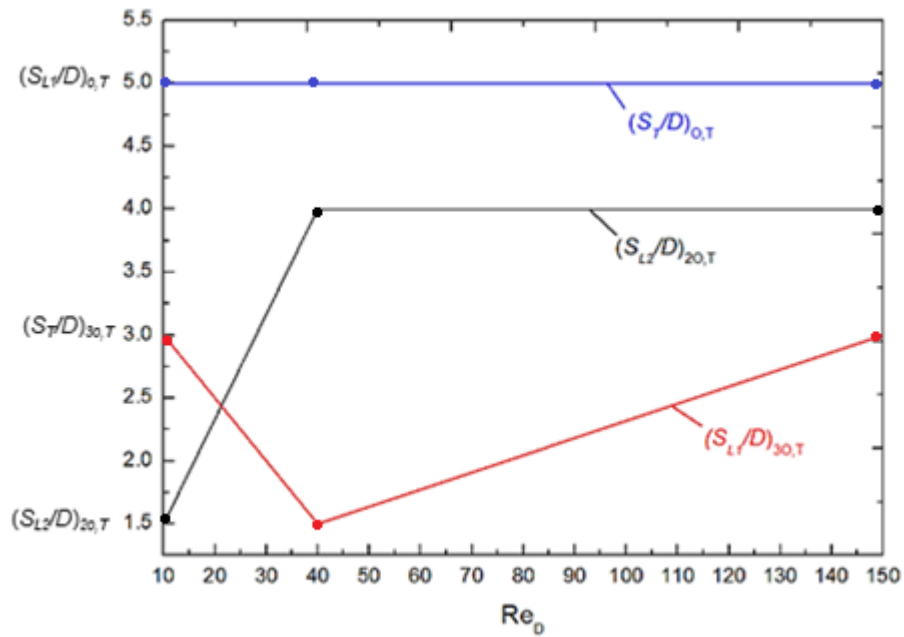


Figura 5.63 – Efeito do Re_D sobre o estudo térmico de arranjo de cilindros.

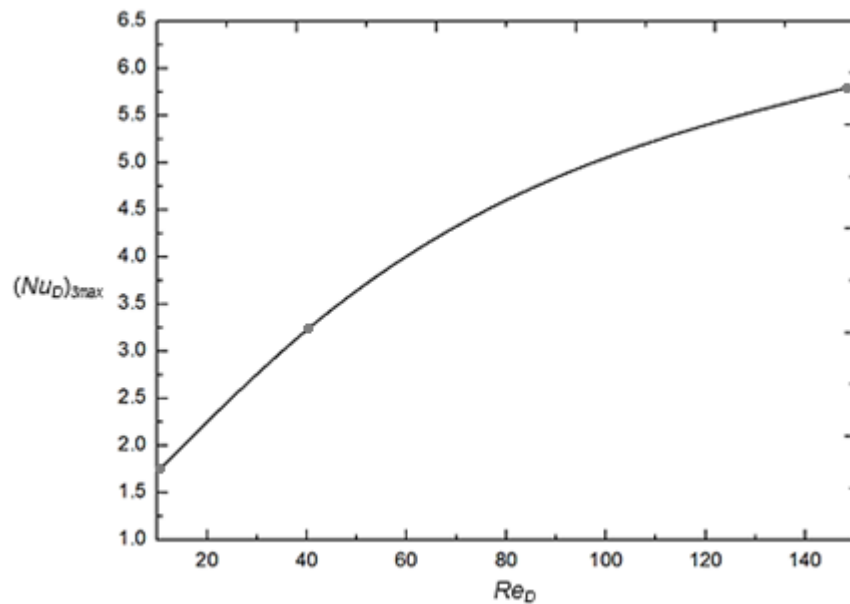


Figura 5.64 – Efeito dos valores $(Nu_D)_{3max}$ sobre $Re_D = 10, 40$ e 150 .

6. CONCLUSÕES

Um estudo numérico foi realizado para avaliar as geometrias de um arranjo formado por quatro cilindros na forma alternada para um escoamento laminar com convecção forçada aplicando o Design Construtal. As simulações numéricas foram realizadas considerando números de Reynolds de $Re_D = 10, 40$ e 150 , com número de Prandtl de $Pr = 0.71$ para caracterizar o ar como fluido de trabalho. Foram avaliados três graus de liberdade, S_T/D (relação entre o passo transversal dos cilindros intermediários e o diâmetro), S_{L1}/D (relação entre o passo longitudinal dos cilindros frontal e intermediários e o diâmetro) e S_{L2}/D (relação entre o passo longitudinal dos cilindros intermediários e posterior e o diâmetro). Além disso, as medidas atribuídas para $S_{L1}/D = 1.5; 3.0$ e 4.0 , para $S_{L2}/D = 1.5; 2.0; 2.5$ e 3.0 e S_T/D varia na faixa $1.5 \leq S_T/D \leq 5.0$. Os principais objetivos foram a maximização do número de Nusselt (Nu_D) e a minimização do coeficiente de arrasto (C_D) entre os cilindros e o escoamento circundante.

A geração das malhas ocorreu utilizando o software GMSH[®]. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia são resolvidas utilizando o software FLUENT[®] em sua versão 14.5, o qual se baseia no Método dos Volumes Finitos (MVF). Sendo a discretização espacial realizada em volumes retangulares e triangulares, a discretização temporal é implícita de segunda ordem e o acoplamento pressão-velocidade resolvido pelo algoritmo SIMPLEC.

Para ambos indicadores de performance estudados, minimização do C_D e maximização do Nu_D , foi identificado que a razão S_T/D possui uma grande sensibilidade. A sensibilidade para essa razão foi maior do que as observadas para as outras razões longitudinais (S_{L1}/D) e (S_{L2}/D).

Os resultados também permitiram identificar que as variações nas razões geométricas mantidas constantes afetam sensivelmente os efeitos das razões que estão sendo variadas sobre o coeficiente de arrasto e número de Nusselt.

Também é observada uma importante influência do número de Reynolds sobre o design do arranjo de cilindros. Para $Re_D = 10$ notou-se uma configuração assimétrica, onde os cilindros centrais estão posicionados próximos ao cilindro frontal. Para $Re_D = 40$ a melhor configuração foi obtida para os cilindros centrais mais próximos ao cilindro posterior e para $Re_D = 150$ uma configuração levemente assimétrica conduziu ao melhor desempenho. Dessa forma, os resultados indicaram que o uso de passos longitudinais diferentes pode conduzir a um melhor desempenho quando comparado a arranjos simétricos (com um único passo longitudinal S_L).

7. Proposta de continuidade

A partir dos resultados obtidos com o presente estudo, tem-se como proposta de continuidade:

- Avaliar a mesma geometria para outros valores de Re_D ;
- Propor outra geometria com os cilindros frontal e posterior desalinhados;
- Avaliar a mesma geometria para convecção mista.

8. Referências Bibliográficas

- BARROS, G. M.; LORENZINI, G; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O. S; dos SANTOS, E. D. **Influence of mixed convection laminar flows on the geometrical evaluation of a triangular arrangement of circular cylinders**, International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 114, p. 1188-1200, 2017.
- BEJAN, A. **Construtal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume**, International Journal Heat Mass Transfer, v. 40, p. 799–816, 1997.
- BEJAN, A. **Convection Heat Transfer**, John Wiley, Durham, USA, 2013.
- BEJAN, A., **Advanced Engineering Thermodynamics**, John Wiley, 2ed., New York, 1996.
- BEJAN, A. **Shape and Structure**, from Engineering to Nature, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
- BEJAN, A.; LORENTE, S. **Design with Construtal Theory**, John Wiley, New Jersey, 2008.
- BEJAN, A.; LORENTE, S. **The Construtal law and the evolution of design in Nature, Physics of life: Reviews**, v. 8, n 3, p. 209–240, 2011.
- BEJAN, A.; ZANE, J. P. **Design in nature: how the constructal law governs evolution in biology, physics, technology, and social organization**, 1ª ed., Doubleday, USA, 2013.
- BERN, M.; PLASSMANN, P, **Mesh Generation**, In: Handbook of Computational Geometry, Elsevier Science B, 2ª ed., p. 290 - 332, 2000.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Heat and mass transfer: fundamentals & applications**, McGraw-Hill: 2015.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fluid Mechanics: fundamentals and application**, New York, McGraw-Hill; 2006.
- DAWOOD, M. M. K.; TEAMAH, M. A.; SHEHATA, A. I.; ABOELAZM, M.; NABIL, T. **Experimental and numerical investigation of turbulent natural convection between two horizontal concentric cylinders at different axis ratios and orientation angles**, Experimental Thermal and Fluid Science, v. 91, p. 20-34, 2018.
- DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A.; GOMES, M. N.; ROCHA, L. A. O. **The constructal design applied to renewable energy systems**, in: Eduardo Rincón-Mejía, Alejandro de las Heras (Org.), Sustainable Energy Technologies, 1 ed., v. 1, CRC Press - Taylor & Francis Group, Boca Raton, p. 63 – 87, 2017.
- FLUENT, **Theory Guide**. ANSYS-FLUENT 14.5, Canonsburg: ANSYS Inc., 2011.
- GEUZAIN, C.; REMACLE, J. F. **Gmsh: A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities**, 2017.

- GRIMISON, E. D. Correlation and utilization of new data on flow resistance and heat transfer for cross flow of gases over tube banks. *Trans. ASME*, n. 59, p. 583 - 594, 1937.
- HESAM, S. M.; NAVID, N. **Numerical simulation of flow over two side-by-side circular cylinders**, *Journal of Hydrodynamics*, v. 23, n. 6, p. 792 - 805, 2011.
- HOLMAN, J. P. **Heat transfer**, 10th ed. Higher Education, 2010.
- INCROPERA, D. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de calor e massa**, 6ª ed., Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos da Editora S. A., 2008.
- KAWAHARA, M.; HIRANO, H. **A finite element method for high Reynolds number viscous fluid flow using two step explicit scheme**, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 3, n. 2, p. 137 - 163, 1983.
- KAYS, W.; CRAWFORD, M. E.; WEIGAND, B. **Convective Heat and Mass Transfer**, 4th ed., McGraw-Hill Professional, 2004.
- KIM, L.; LORENTE, S.; BEJAN, A. **Constructal multi-tube configuration for natural and forced convection in cross-flow**, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 53, n. 23 - 24, p. 5121 - 5128, 2010.
- LI, S.; ZHOU, T.; SUN, Z.; DONG, Z. **External forced convection from circular cylinders with surface protrusions**, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 99, p. 20 - 30, 2016.
- MACCORMACK, R. W.; PAULLAY, A. J. **Computational efficiency achieved by time splitting of finite difference operators**, *AIAA Paper*, n. 72 - 154, p. 1 - 8, 1972.
- MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**, 2ª ed., Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2004.
- MCDONALD, P. W. **The Computation of Transonic Flow through Two-Dimensional Gas Turbine Cascades**, *ASME*, n. 71, p. 89, 1971.
- PATANKAR, S. V.; SPALDING, D. B. **A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows**, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 15, n. 10, p. 1787 - 1806, 1972.
- PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**, McGraw-Hill, New York, USA, 1980.
- PEDROTTI, V. A. **Otimização geométrica de arranjos tubulares submetido a escoamento externo utilizando Constructal Design**, Dissertação de Mestrado, Rio Grande, RS, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande - FURG, 2015.
- PEREIRA, M. S.; FEIJÓ, B. C.; TEIXEIRA, F. B.; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O.; GOULART, J. N. V.; DOS SANTOS, E. D. **Geometric Evaluation of Forced Convective Flows across**

an Arrangement of Four Circular Cylinders, Defect and Diffusion Forum, v. 372, p. 110 - 121, 2017.

PERUSSI, R. **Análise do desempenho de trocadores de calor de fluxo cruzado por simulação numérica**, Master Thesis, São Carlos, SP, Brazil: Universidade de São Paulo, 2010.

SEO, Y. M.; HA, M. Y.; PARK, Y. G. **The effect of four elliptical cylinders with different aspect ratios on the natural convection inside a square enclosure**, International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 122, p. 491 - 503, 2018.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method**, 1^a ed., Longman, England, 2007.

APÊNDICE 1 – Script do software GMSH para a geração de malha

```
//PONTOS DOMÍNIO
//+
Point(1) = {0, 0, 0, 1,0};
//+
Point(2) = {3,5, 0, 0, 1,0};
//+
Point(3) = {3,5, 1,5, 0, 1,0};
//+
Point(4) = {0, 1,5, 0, 1,0};

//PONTOS CILINDRO 1
//+
Point(5) = {0,8, 0,75, 0, 1,0};
//+
Point(6) = {0,75, 0,75, 0, 1,0};
//+
Point(7) = {0,85, 0,75, 0, 1,0};
//+
Point(8) = {0,86, 0,75, 0, 1,0};
//+
Point(9) = {0,74, 0,75, 0, 1,0};

//PONTOS CILINDRO 2
//+
Point(10) = {1,1, 0,75, 0, 1,0};
//+
Point(11) = {1,05, 0,75, 0, 1,0};
//+
Point(12) = {1,15, 0,75, 0, 1,0};
//+
Point(13) = {1,16, 0,75, 0, 1,0};
//+
Point(14) = {1,04, 0,75, 0, 1,0};

//PONTOS CILINDRO 3
//+
Point(16) = {0,95, 0,825, 0, 1,0};
//+
Point(17) = {1, 0,825, 0, 1,0};
//+
Point(18) = {1,01, 0,825, 0, 1,0};
//+
Point(19) = {0,9, 0,825, 0, 1,0};
//+
```

Point(20) = {0,89, 0,825, 0, 1,0};

//PONTOS CILINDRO 4

//+

Point(21) = {0,95, 0,675, 0, 1,0};

//+

Point(22) = {1, 0,675, 0, 1,0};

//+

Point(23) = {1,01, 0,675, 0, 1,0};

//+

Point(24) = {0,9, 0,675, 0, 1,0};

//+

Point(25) = {0,89, 0,675, 0, 1,0};

//LINHAS

//DOMÍNIO

//+

Line(1) = {1, 2};

//+

Line(2) = {2, 3};

//+

Line(3) = {3, 4};

//+

Line(4) = {4, 1};

//LINHAS CILINDRO 1

//+

Line(5) = {7, 8};

//+

Line(6) = {9, 6};

//LINHAS CILINDRO 2

//+

Line(11) = {12, 13};

//+

Line(12) = {14, 11};

//LINHAS CILINDRO 3

//+

Line(17) = {17, 18};

//+

Line(18) = {20, 19};

//LINHAS CILINDRO 4

//+

Line(23) = {22, 23};

//+

Line(24) = {25, 24};

```
//CÍRCULOS
//CÍRCULOS CILINDRO 1
//+
Circle(7) = {6, 5, 7};
//+
Circle(8) = {7, 5, 6};
//+
Circle(9) = {8, 5, 9};
//+
Circle(10) = {9, 5, 8};

//CÍRCULOS CILINDRO 2
//+
Circle(13) = {11, 10, 12};
//+
Circle(14) = {12, 10, 11};
//+
Circle(15) = {13, 10, 14};
//+
Circle(16) = {14, 10, 13};

//CÍRCULOS CILINDRO 3
//+
Circle(19) = {19, 16, 17};
//+
Circle(20) = {17, 16, 19};
//+
Circle(21) = {20, 16, 18};
//+
Circle(22) = {18, 16, 20};

//CÍRCULOS CILINDRO 4
//+
Circle(25) = {24, 21, 22};
//+
Circle(26) = {22, 21, 24};
//+
Circle(27) = {25, 21, 23};
//+
Circle(28) = {23, 21, 25};

//SUPERFÍCIES
//DOMÍNIO
//+
Line Loop(29) = {4, 1, 2, 3};
//+
Line Loop(30) = {9, 10};
//+
Line Loop(31) = {15, 16};
```

```

//+
Line Loop(32) = {22, 21};
//+
Line Loop(33) = {28, 27};
//+
Plane Surface(34) = {29, 30, 31, 32, 33};
//+
Line Loop(35) = {6, 7, 5, -10};
//+
Plane Surface(36) = {35};
//+
Line Loop(37) = {9, 6, -8, 5};
//+
Plane Surface(38) = {37};
//+
Line Loop(39) = {12, 13, 11, -16};
//+
Plane Surface(40) = {39};
//+
Line Loop(41) = {15, 12, -14, 11};
//+
Plane Surface(42) = {41};
//+
Line Loop(43) = {18, 19, 17, -21};
//+
Plane Surface(44) = {43};
//+
Line Loop(45) = {22, 18, -20, 17};
//+
Plane Surface(46) = {45};
//+
Line Loop(47) = {24, 25, 23, -27};
//+
Plane Surface(48) = {47};
//+
Line Loop(49) = {28, 24, -26, 23};
//+
Plane Surface(50) = {49};

//TRANSFINITE
//+
Transfinite Line {5, 11, 17, 23} = 30 Using Progression 1,05;
//+
Transfinite Line {6, 12, 18, 24} = 30 Using Progression 0,95;
//+
Transfinite Line {8, 7, 10, 9, 16, 15, 14, 13, 21, 19, 20, 22, 28, 27, 25, 26} = 125 Using
Progression 1;
//+
Transfinite Line {4} = 80 Using Progression 1;

```

```
//+
Transfinite Line {3, 1} = 160 Using Progression 1;
//+
Transfinite Line {2} = 80 Using Progression 1;
//Transfinite surface
//+
Transfinite Surface {38};
//+
Transfinite Surface {36};
//+
Transfinite Surface {42};
//+
Transfinite Surface {40};
//+
Transfinite Surface {46};
//+
Transfinite Surface {44};
//+
Transfinite Surface {50};
//+
Transfinite Surface {48};

//RECOMBINE
//+
Recombine Surface {38};
//+
Recombine Surface {36};
//+
Recombine Surface {42};
//+
Recombine Surface {40};
//+
Recombine Surface {46};
//+
Recombine Surface {44};
//+
Recombine Surface {50};
//+
Recombine Surface {48};

//CONDIÇÕES DE CONTORNO
//+
Physical Line("inlet") = {4};
//+
Physical Line("symmetry-1") = {1};
//+
Physical Line("symmetry-2") = {3};
//+
Physical Line("outlet") = {2};
```



```
//+
Physical Line("alma-1") = {9, 10, 6, 5};
//+
Physical Line("alma-2") = {15, 16, 12, 11};
//+
Physical Line("alma-3") = {22, 21, 18, 17};
//+
Physical Line("alma-4") = {28, 27, 24, 23};
//+
Physical Line("cilindro-1") = {8, 7};
//+
Physical Line("cilindro-2") = {14, 13};
//+
Physical Line("cilindro-3") = {20, 19};
//+
Physical Line("cilindro-4") = {26, 25};
//+
Physical Surface("Fluid") = {34, 38, 36, 42, 40, 46, 44, 50, 48};
```

APÊNDICE 2 – Resultados das simulações

$Re_D = 10$

Caso	S_{L1}/D	S_{L2}/D	S_T/D	Re_D	Número de Nusselt (Nu_D)						Coeficiente de arrasto (C_D)					
					C_1	C_2	C_3	C_4	Soma	Média	C_1	C_2	C_3	C_4	Soma	Média
1	1,5	1,5	1,5	10	1,5258	0,6192	0,6192	0,3992	3,1633	0,7908	1,7471	1,5725	1,5726	- 0,0772	4,8149	1,2037
2	1,5	1,5	2,0	10	1,5418	0,7614	0,7614	0,2971	3,3617	0,8404	1,8441	1,8932	1,8931	0,2838	5,9141	1,4785
3	1,5	1,5	2,5	10	1,6109	0,9550	0,9550	0,2253	3,7462	0,9365	1,9966	2,2518	2,2518	0,7156	7,2159	1,8040
4	1,5	1,5	3,0	10	1,7149	1,2014	1,2014	0,2439	4,3615	1,0904	2,1782	2,6393	2,6393	1,1513	8,6081	2,1520
5	1,5	1,5	3,5	10	1,8129	1,4657	1,4657	0,3903	5,1345	1,2836	2,3617	3,0030	3,0030	1,5590	9,9267	2,4817
6	1,5	1,5	4,0	10	1,8776	0,6056	1,6947	1,6947	5,8725	1,4681	2,5139	3,2929	3,2929	1,8855	10,9852	2,7463
7	1,5	1,5	4,5	10	1,9131	1,8617	1,8617	0,8077	6,4441	1,6110	2,6275	3,4912	3,4912	2,0902	11,7002	2,9250
8	1,5	1,5	5,0	10	1,9334	1,9704	1,9704	0,9590	6,8332	1,7083	2,7155	3,6097	3,6096	2,1762	12,1110	3,0277
9	1,5	2,0	1,5	10	1,5272	0,6344	0,6343	0,4762	3,2720	0,8180	1,7541	1,5872	1,5873	- 0,1153	4,8134	1,2033
10	1,5	2,0	2,0	10	1,5610	0,7902	0,7902	0,7902	3,4909	0,8727	1,9270	1,9427	1,9427	0,0820	5,8944	1,4736
11	1,5	2,0	2,5	10	1,6556	1,0148	1,0149	0,2531	3,9386	0,9846	2,1641	2,2852	2,2852	0,4534	7,1878	1,7969
12	1,5	2,0	3,0	10	1,7714	1,2810	1,2810	0,2702	4,6036	1,1509	2,3939	2,6299	2,6299	0,8896	8,5432	2,1358
13	1,5	2,0	3,5	10	1,8641	1,5333	1,5333	0,4194	5,35003	1,3375	2,5876	2,9426	2,9425	1,3173	9,7900	2,4475
14	1,5	2,0	4,0	10	1,9193	1,7345	1,7346	0,6273	6,0157	1,5039	2,7248	3,1975	3,1976	1,6682	10,7881	2,6970
15	1,5	2,0	4,5	10	1,9471	1,8784	1,8784	0,8210	6,5248	1,6312	2,8094	3,3877	3,3877	1,9080	11,4928	2,8732
16	1,5	2,0	5,0	10	1,9609	1,9737	1,9737	0,9701	6,87856	1,7196	2,8631	3,5163	3,5163	2,0402	11,9359	2,98397
17	1,5	2,5	1,5	10	1,5266	0,6472	0,6472	0,5444	3,3653	0,8413	1,7515	1,5786	1,5787	- 0,0781	4,8307	1,2077
18	1,5	2,5	2,0	10	1,5652	0,8043	0,8043	0,4084	3,5823	0,8956	1,9453	1,9596	1,9597	0,0149	5,8795	1,4699
19	1,5	2,5	2,5	10	1,6702	1,0419	1,0419	0,2890	4,0430	1,0107	2,2199	2,3066	2,3066	0,3225	7,1557	1,7889
20	1,5	2,5	3,0	10	1,7925	1,3165	1,3165	0,2872	4,7128	1,1782	2,4792	2,6332	2,6332	0,7381	8,4837	2,1209
21	1,5	2,5	3,5	10	1,8860	1,5631	1,5631	0,4260	5,4383	1,3596	2,6914	2,9144	2,9145	1,1694	9,6897	2,4224
22	1,5	2,5	4,0	10	1,9412	1,7527	1,7527	0,6299	6,0766	1,5191	2,8437	3,1391	3,1392	1,5346	10,6566	2,6642

23	1,5	2,5	4,5	10	1,9685	1,8857	1,8857	0,8240	6,5640	1,6410	2,9344	3,3113	3,3113	1,7942	11,3511	2,8378
24	1,5	2,5	5,0	10	1,9806	1,9734	1,9735	0,9760	6,9035	1,7259	2,9806	3,4366	3,4366	1,9511	11,8049	2,9512
25	1,5	3,0	1,5	10	1,5259	0,6571	0,6571	0,6034	3,4436	0,8609	1,7484	1,5682	1,5682	- 0,0198	4,8649	1,2162
26	1,5	3,0	2,0	10	1,5660	0,8122	0,8122	0,4667	3,6570	0,9143	1,9485	1,9639	1,9639	0,0010	5,8772	1,4693
27	1,5	3,0	2,5	10	1,6748	1,0544	1,0544	0,3309	4,1146	1,0286	2,2374	2,3187	2,3188	0,2520	7,1269	1,7817
28	1,5	3,0	3,0	10	1,7997	1,3325	1,3325	0,3061	4,7708	1,1927	2,5087	2,6404	2,6403	0,6391	8,4284	2,1071
29	1,5	3,0	3,5	10	1,8943	1,5765	1,5765	0,4270	5,4743	1,3686	2,7319	2,9070	2,9070	1,0641	9,6100	2,4025
30	1,5	3,0	4,0	10	1,9514	1,7611	1,7611	0,6237	6,0972	1,5243	2,9007	3,1116	3,1117	1,4403	10,5643	2,6411
31	1,5	3,0	4,5	10	1,9808	1,8888	1,8888	0,8193	6,5777	1,6444	3,0088	3,2655	3,2654	1,7186	11,2583	2,8146
32	1,5	3,0	5,0	10	1,9939	1,9720	1,9720	0,9764	6,9143	1,7286	3,0630	3,3799	3,3798	1,8955	11,7181	2,9295
33	3,0	1,5	1,5	10	1,6588	0,6178	0,6178	0,3913	3,2857	0,8214	1,8701	1,4921	1,4921	- 0,0556	4,7986	1,1997
34	3,0	1,5	2,0	10	1,7881	0,7900	0,7900	0,2918	3,6598	0,9150	2,0285	1,7021	1,7021	0,3527	5,7854	1,4463
35	3,0	1,5	2,5	10	1,7978	0,9823	0,9824	0,2727	4,0352	1,0088	2,0259	2,0215	2,0216	0,8086	6,8775	1,7194
36	3,0	1,5	3,0	10	1,8150	1,2022	1,2022	0,3763	4,5957	1,1489	2,0633	2,3818	2,3817	1,2455	8,0723	2,0181
37	3,0	1,5	3,5	10	1,8355	1,4230	1,4230	0,5765	5,2580	1,3145	2,1339	2,7408	2,7408	1,6419	9,2574	2,3144
38	3,0	1,5	4,0	10	1,8555	1,6173	1,6173	0,7988	5,8889	1,4722	2,2203	3,0503	3,0501	1,9746	10,2953	2,5738
39	3,0	1,5	4,5	10	1,8732	1,7719	1,7720	0,9880	6,4051	1,6013	2,3074	3,2848	3,2849	2,2204	11,0975	2,7744
40	3,0	1,5	5,0	10	1,8886	1,8874	1,8874	1,1267	6,7901	1,6975	2,3897	3,4455	3,4454	2,3742	11,6548	2,9137
41	3,0	2,0	1,5	10	1,7906	0,6600	0,6599	0,4559	3,5664	0,8916	2,0716	1,4311	1,4311	- 0,0465	4,8874	1,2218
42	3,0	2,0	2,0	10	1,7961	0,8326	0,8326	0,3382	3,7996	0,9499	2,0519	1,7729	1,7730	0,1807	5,7784	1,4446
43	3,0	2,0	2,5	10	1,8151	1,0702	1,0703	0,3039	4,2595	1,0649	2,0852	2,0757	2,0758	0,6081	6,8448	1,7112
44	3,0	2,0	3,0	10	1,8366	1,2999	1,2999	0,4179	4,8542	1,2136	2,1495	2,3832	2,3832	1,0610	7,9769	1,9942
45	3,0	2,0	3,5	10	1,8570	1,4987	1,4987	0,6151	5,4695	1,3674	2,2303	2,6837	2,6837	1,4744	9,0722	2,2680
46	3,0	2,0	4,0	10	1,8751	1,6637	1,6637	0,8228	6,0252	1,5063	2,3151	2,9504	2,9505	1,8168	10,0328	2,5082
47	3,0	2,0	4,5	10	1,8906	1,7953	1,7953	1,0001	6,4813	1,6203	2,3954	3,1666	3,1667	2,0732	10,8019	2,7005
48	3,0	2,0	5,0	10	1,9036	1,8960	1,8959	1,1342	6,8297	1,7074	2,4681	3,3284	3,3284	2,2462	11,3711	2,8428
49	3,0	2,5	1,5	10	1,7903	0,6722	0,6722	0,5218	3,6565	0,9141	2,0704	1,4230	1,4229	- 0,0013	4,9150	1,2287
50	3,0	2,5	2,0	10	1,7981	0,8508	0,8508	0,3926	3,8923	0,9731	2,0580	1,7971	1,7971	0,1237	5,7758	1,4440
51	3,0	2,5	2,5	10	1,8211	1,1067	1,1067	0,3324	4,3668	1,0917	2,1070	2,1058	2,1058	0,4972	6,8158	1,7039

52	3,0	2,5	3,0	10	1,8450	1,3385	1,3385	0,4306	4,9526	1,2381	2,1850	2,3899	2,3899	0,9402	7,9050	1,9762
53	3,0	2,5	3,5	10	1,8665	1,5281	1,5281	0,6174	5,5400	1,3850	2,2749	2,6566	2,6566	1,3605	8,9485	2,2371
54	3,0	2,5	4,0	10	1,8854	1,6825	1,6825	0,8197	6,0702	1,5175	2,3664	2,8917	2,8916	1,7138	9,8636	2,4659
55	3,0	2,5	4,5	10	1,9013	1,8050	1,8050	0,9971	6,5085	1,6271	2,4516	3,0855	3,0855	1,9815	10,6041	2,6510
56	3,0	2,5	5,0	10	1,9143	1,8984	1,8984	1,1340	6,8451	1,7113	2,5255	3,2370	3,2370	2,1660	11,1655	2,7914
57	3,0	3,0	1,5	10	1,7900	0,6818	0,6818	0,5789	3,7324	0,9331	2,0690	1,4134	1,4133	0,0614	4,9570	1,2392
58	3,0	3,0	2,0	10	1,7986	0,8596	0,8596	0,4480	3,9659	0,9915	2,0595	1,8039	1,8039	0,1161	5,7835	1,4459
59	3,0	3,0	2,5	10	1,8231	1,1220	1,1220	0,3654	4,4325	1,1081	2,1147	2,1220	2,1219	0,4342	6,7928	1,6982
60	3,0	3,0	3,0	10	1,8479	1,3541	1,3541	0,4389	4,9950	1,2487	2,1980	2,3992	2,3992	0,8522	7,8486	1,9622
61	3,0	3,0	3,5	10	1,8702	1,5398	1,5398	0,6092	5,5591	1,3898	2,2925	2,6501	2,6501	1,2688	8,8615	2,2154
62	3,0	3,0	4,0	10	1,8901	1,6903	1,6903	0,8055	6,0762	1,5190	2,3904	2,8662	2,8660	1,6325	9,7550	2,4388
63	3,0	3,0	4,5	10	1,9072	1,8090	1,8090	0,9846	6,5098	1,6275	2,4828	3,0404	3,0404	1,9150	10,4786	2,6197
64	3,0	3,0	5,0	10	1,9211	1,8985	1,8985	1,1270	6,8451	1,7113	2,5626	3,1771	3,1771	2,1130	11,0298	2,7574
65	4,0	1,5	1,5	10	1,8415	0,6789	0,6789	0,3762	3,5755	0,8939	2,1955	1,4138	1,4138	0,0050	5,028	1,257
66	4,0	1,5	2,0	10	1,8361	0,8283	0,8283	0,2907	3,7834	0,9459	2,1628	1,6651	1,6650	0,3848	5,8776	1,4694
67	4,0	1,5	2,5	10	1,8362	1,0151	1,0151	0,2915	4,1578	1,0394	2,1536	1,9525	1,9524	0,8301	6,8885	1,7221
68	4,0	1,5	3,0	10	1,8411	1,2162	1,2161	0,4209	4,6943	1,1736	2,1687	2,2859	2,2858	1,2534	7,9938	1,9984
69	4,0	1,5	3,5	10	1,8497	1,4128	1,4128	0,6359	5,3112	1,3278	2,2051	2,6287	2,6287	1,6380	9,1004	2,2751
70	4,0	1,5	4,0	10	1,8602	1,5874	1,5874	0,8614	5,8964	1,4741	2,2541	2,9370	2,9370	1,9665	10,0947	2,5237
71	4,0	1,5	4,5	10	1,8711	1,7314	1,7315	1,0496	6,3836	1,5959	2,3077	3,1833	3,1834	2,2204	10,8948	2,7237
72	4,0	1,5	5,0	10	1,8817	1,8449	1,8449	1,1875	6,7590	1,6898	2,3622	3,3628	3,3628	2,3946	11,4824	2,8706
73	4,0	2,0	1,5	10	1,8417	0,6943	0,6943	0,4490	3,6794	0,9198	2,1961	1,4337	1,4337	- 0,0212	5,0423	1,2606
74	4,0	2,0	2,0	10	1,8399	0,8753	0,8753	0,3353	3,9258	0,9814	2,1780	1,7404	1,7404	0,2150	5,8739	1,4685
75	4,0	2,0	2,5	10	1,8451	1,1063	1,1063	0,3253	4,3829	1,0957	2,1920	2,0103	2,0103	0,6413	6,8539	1,7135
76	4,0	2,0	3,0	10	1,8532	1,3117	1,3117	0,4662	4,9428	1,2357	2,2241	2,2905	2,2905	1,0857	7,8909	1,9727
77	4,0	2,0	3,5	10	1,8626	1,4849	1,4849	0,6749	5,5073	1,3768	2,2669	2,5763	2,5761	1,4882	8,9075	2,2269
78	4,0	2,0	4,0	10	1,8725	1,6319	1,6319	0,8833	6,0195	1,5049	2,3151	2,8425	2,8423	1,8252	9,8251	2,4563
79	4,0	2,0	4,5	10	1,8824	1,7550	1,7551	1,0587	6,4512	1,6128	2,3647	3,0687	3,0686	2,0869	10,5889	2,6472
80	4,0	2,0	5,0	10	1,8917	1,8548	1,8548	1,1915	6,7929	1,6982	2,4138	3,2456	3,2456	2,2742	11,1792	2,7948
81	4,0	2,5	1,5	10	1,8415	0,7064	0,7065	0,5138	3,7683	0,9421	2,1953	1,4269	1,4269	0,0229	5,0719	1,2680
82	4,0	2,5	2,0	10	1,8409	0,8947	0,8947	0,3879	4,0182	1,0046	2,1821	1,7664	1,7664	0,1592	5,8742	1,4685
83	4,0	2,5	2,5	10	1,8483	1,1432	1,1432	0,3521	4,4868	1,1217	2,2064	2,0417	2,0416	0,5355	6,8252	1,7063

84	4,0	2,5	3,0	10	1,8581	1,3482	1,3482	0,4774	5,0319	1,2580	2,2472	2,2984	2,2984	0,9728	7,8167	1,9542
85	4,0	2,5	3,5	10	1,8685	1,5118	1,5118	0,6750	5,5670	1,3918	2,2956	2,5513	2,5513	1,3828	8,7809	2,1952
86	4,0	2,5	4,0	10	1,8790	1,6493	1,6493	0,8775	6,0552	1,5138	2,3479	2,7872	2,7871	1,7308	9,6530	2,4133
87	4,0	2,5	4,5	10	1,8893	1,7647	1,7647	1,0524	6,4712	1,6178	2,4006	2,9909	2,9909	2,0026	10,3850	2,5963
88	4,0	2,5	5,0	10	1,8988	1,8582	1,8582	1,1878	6,8030	1,7007	2,4510	3,1558	3,1556	2,1990	10,9614	2,7403
89	4,0	3,0	1,5	10	1,8413	0,7159	0,7159	0,5702	3,8434	0,9608	2,1942	1,4182	1,4183	0,0844	5,1151	1,2788
90	4,0	3,0	2,0	10	1,8412	0,9040	0,9040	0,4418	4,0911	1,0228	2,1833	1,7742	1,7742	0,1524	5,8841	1,4710
91	4,0	3,0	2,5	10	1,8495	1,1586	1,1586	0,3823	4,5490	1,1372	2,2117	2,0586	2,0586	0,4754	6,8042	1,7010
92	4,0	3,0	3,0	10	1,8599	1,3626	1,3626	0,4828	5,0678	1,2670	2,2559	2,3085	2,3084	0,8887	7,7614	1,9403
93	4,0	3,0	3,5	10	1,8708	1,5223	1,5223	0,6642	5,5796	1,3949	2,3072	2,5464	2,5464	1,2958	8,6958	2,1739
94	4,0	3,0	4,0	10	1,8821	1,6563	1,6563	0,8605	6,0553	1,5138	2,3633	2,7636	2,7635	1,6539	9,5442	2,3861
95	4,0	3,0	4,5	10	1,8931	1,7686	1,7686	1,0369	6,4671	1,6168	2,4203	2,9485	2,9486	1,9396	10,2570	2,5643
96	4,0	3,0	5,0	10	1,9032	1,8589	1,8589	1,1775	6,7985	1,6996	2,4744	3,0983	3,0982	2,1483	10,8193	2,7048

$Re_D = 40$

Caso	SL_1/D	SL_2/D	ST/D	Re_D	Número de Nusselt (Nu_D)						Coeficiente de arrasto (C_D)					
					C_1	C_2	C_3	C_4	Soma	Média	C_1	C_2	C_3	C_4	Soma	Média
1	1,5	1,5	1,5	40	3,0026	1,4208	1,4210	0,3879	6,2323	1,5581	0,0591	0,0631	0,0631	0,0031	0,1884	0,0471
2	1,5	1,5	2,0	40	3,2677	2,4801	2,4801	0,6279	8,8558	2,2140	0,0676	0,0818	0,0818	0,0252	0,2565	0,0641
3	1,5	1,5	2,5	40	3,3819	3,1352	3,1355	1,3556	11,0082	2,7521	0,0791	0,0953	0,0954	0,0410	0,3108	0,0777
4	1,5	1,5	3,0	40	3,4135	3,4471	3,4471	1,7838	12,0915	3,0229	0,0857	0,1049	0,1049	0,0504	0,3460	0,0865
5	1,5	1,5	3,5	40	3,4143	3,5796	3,5796	1,9651	12,5386	3,1347	0,0884	0,1115	0,1115	0,0557	0,3671	0,0918
6	1,5	1,5	4,0	40	3,4162	3,6298	3,6298	2,0244	12,7002	3,1751	0,0904	0,1152	0,1152	0,0583	0,3791	0,0948
7	1,5	1,5	4,5	40	3,4235	3,6439	3,6439	2,0326	12,7438	3,1859	0,0923	0,1169	0,1169	0,0593	0,3855	0,0964
8	1,5	1,5	5,0	40	3,4335	3,6434	3,6434	2,0253	12,7457	3,1864	0,0941	0,1173	0,1173	0,0592	0,3879	0,0970
9	1,5	2,0	1,5	40	3,0197	0,4276	0,4276	0,4276	6,3852	1,5963	0,0597	0,0646	0,0646	-0,0014	0,1875	0,04688
10	1,5	2,0	2,0	40	3,2954	2,5382	2,5381	0,6124	8,9841	2,2460	0,0697	0,0813	0,0813	0,0216	0,2539	0,0635
11	1,5	2,0	2,5	40	3,4192	3,1468	3,1469	1,3499	11,0628	2,7657	0,0829	0,0919	0,0919	0,0388	0,3055	0,0764
12	1,5	2,0	3,0	40	3,4665	3,4291	3,4290	1,8146	12,1392	3,0348	0,0915	0,0996	0,0996	0,0478	0,3385	0,0846
13	1,5	2,0	3,5	40	3,4690	3,5491	3,5491	2,0070	12,5741	3,1435	0,0946	0,1061	0,1061	0,0520	0,3588	0,0897
14	1,5	2,0	4,0	40	3,4627	3,6002	3,6002	2,0708	12,7340	3,1835	0,0957	0,1108	0,1108	0,0541	0,3714	0,0929
15	1,5	2,0	4,5	40	3,4596	3,6206	3,6207	2,0815	12,7824	3,1956	0,0965	0,1136	0,1136	0,0552	0,3789	0,0947

16	1,5	2,0	5,0	40	3,4604	3,6272	3,6272	2,0742	12,7891	3,1973	0,0972	0,1150	0,1150	0,0554	0,3827	0,0957
17	1,5	2,5	1,5	40	3,0235	1,4837	1,4838	0,4892	6,4802	1,6200	0,0599	0,0651	0,0651	-0,0038	0,1862	0,0465
18	1,5	2,5	2,0	40	3,2965	2,5479	2,5479	0,5803	8,9727	2,2432	0,0698	0,0814	0,0814	0,0188	0,2513	0,0628
19	1,5	2,5	2,5	40	3,4227	3,1438	3,1439	1,2982	11,0087	2,7522	0,0833	0,0912	0,0912	0,0369	0,3026	0,0756
20	1,5	2,5	3,0	40	3,4828	3,4156	3,4156	1,8118	12,1258	3,0314	0,0934	0,0975	0,0975	0,0473	0,3356	0,0839
21	1,5	2,5	3,5	40	3,4987	3,5270	3,5270	2,0423	12,5950	3,1487	0,0981	0,1029	0,1029	0,0513	0,3552	0,0888
22	1,5	2,5	4,0	40	3,4959	3,5760	3,5760	2,1170	12,7649	3,1912	0,0996	0,1074	0,1074	0,0529	0,3673	0,0918
23	1,5	2,5	4,5	40	3,4898	3,5989	3,5990	2,1297	12,8174	3,2044	0,1001	0,1106	0,1106	0,0535	0,3748	0,0937
24	1,5	2,5	5,0	40	3,4856	3,6097	3,6099	2,1220	12,8272	3,2068	0,1002	0,1126	0,1126	0,0536	0,3790	0,0948
25	1,5	3,0	1,5	40	3,0250	1,4889	1,4891	0,5619	6,5648	1,6412	0,0599	0,0653	0,0653	-0,0057	0,1849	0,0462
26	1,5	3,0	2,0	40	3,2980	2,5548	2,5547	0,5665	8,9740	2,2435	0,0699	0,0816	0,0816	0,0166	0,2498	0,0624
27	1,5	3,0	2,5	40	3,4236	3,1454	3,1455	1,2528	10,9674	2,7418	0,0834	0,0911	0,0911	0,0352	0,3008	0,0752
28	1,5	3,0	3,0	40	3,4875	3,4118	3,4117	1,7928	12,1037	3,0259	0,0939	0,0967	0,0967	0,0469	0,3343	0,0836
29	1,5	3,0	3,5	40	3,5135	3,5160	3,5160	2,0661	12,6115	3,1529	0,0998	0,1012	0,1012	0,0518	0,3540	0,0885
30	1,5	3,0	4,0	40	3,5177	3,5597	3,5597	2,1613	12,7984	3,1996	0,1022	0,1052	0,1052	0,0531	0,3657	0,0914
31	1,5	3,0	4,5	40	3,5132	3,5818	3,5818	2,1783	12,8551	3,2138	0,1029	0,1083	0,1083	0,0534	0,3728	0,0932
32	1,5	3,0	5,0	40	3,5071	3,5943	3,5942	2,1699	12,8655	3,2164	0,1028	0,1105	0,1105	0,0532	0,3769	0,0942
33	3,0	1,5	1,5	40	3,0724	1,4302	1,4302	0,3949	6,3277	1,5819	0,0628	0,0578	0,0578	0,0021	0,1805	0,0451
34	3,0	1,5	2,0	40	3,2084	2,3244	2,3246	0,7564	8,6139	2,1535	0,0699	0,0689	0,0689	0,0217	0,2295	0,0574
35	3,0	1,5	2,5	40	3,2358	2,8999	2,9000	1,5340	10,5697	2,6424	0,0723	0,0865	0,0865	0,0388	0,2840	0,0710
36	3,0	1,5	3,0	40	3,2596	3,2665	3,2666	2,0055	11,7981	2,9495	0,0747	0,0993	0,0993	0,0503	0,3237	0,0809
37	3,0	1,5	3,5	40	3,2786	3,4719	3,4719	2,2044	12,4268	3,1067	0,0766	0,1074	0,1074	0,0576	0,3490	0,0872
38	3,0	1,5	4,0	40	3,2968	3,5736	3,5735	2,2692	12,7131	3,1783	0,0785	0,1119	0,1119	0,0622	0,3644	0,0911
39	3,0	1,5	4,5	40	3,3154	3,6149	3,6149	2,2812	12,8264	3,2066	0,0805	0,1141	0,1141	0,0652	0,3738	0,0935
40	3,0	1,5	5,0	40	3,3337	3,6269	3,6270	2,2780	12,8656	3,2164	0,0825	0,1150	0,1150	0,0670	0,3794	0,0949
41	3,0	2,0	1,5	40	3,1816	1,5049	1,5048	0,4486	6,6399	1,6600	0,0691	0,0527	0,0527	-0,0027	0,1717	0,0429
42	3,0	2,0	2,0	40	3,2179	2,3817	2,3819	0,7498	8,7312	2,1828	0,0707	0,0693	0,0693	0,0188	0,2281	0,0570
43	3,0	2,0	2,5	40	3,2501	2,9244	2,9244	1,5253	10,6242	2,6561	0,0737	0,0843	0,0843	0,0374	0,2798	0,0699
44	3,0	2,0	3,0	40	3,2815	3,2727	3,2728	2,0275	11,8545	2,9636	0,0769	0,0949	0,0949	0,0491	0,3157	0,0789
45	3,0	2,0	3,5	40	3,3043	3,4568	3,4569	2,2369	12,4550	3,1138	0,0792	0,1020	0,1020	0,0552	0,3384	0,0846
46	3,0	2,0	4,0	40	3,3221	3,5463	3,5464	2,3046	12,7192	3,1798	0,0811	0,1067	0,1067	0,0589	0,3534	0,0884
47	3,0	2,0	4,5	40	3,3379	3,5861	3,5862	2,3179	12,8282	3,2070	0,0828	0,1097	0,1097	0,0615	0,3637	0,0909
48	3,0	2,0	5,0	40	3,3530	3,6029	3,6027	2,3141	12,8726	3,2181	0,0845	0,1115	0,1115	0,0633	0,3708	0,0927

49	3,0	2,5	1,5	40	3,1827	1,5181	1,5180	0,5238	6,7426	1,6856	0,0692	0,0531	0,0531	-0,0048	0,1706	0,0427
50	3,0	2,5	2,0	40	3,2194	2,3900	2,3901	0,7139	8,7134	2,1784	0,0709	0,0695	0,0695	0,0164	0,2263	0,0566
51	3,0	2,5	2,5	40	3,2522	2,9223	2,9223	1,4601	10,5569	2,6392	0,0739	0,0838	0,0838	0,0358	0,2774	0,0693
52	3,0	2,5	3,0	40	3,2879	3,2658	3,2659	2,0051	11,8247	2,9562	0,0775	0,0932	0,0932	0,0487	0,3126	0,0782
53	3,0	2,5	3,5	40	3,3167	3,4414	3,4414	2,2553	12,4548	3,1137	0,0805	0,0991	0,0991	0,0549	0,3336	0,0834
54	3,0	2,5	4,0	40	3,3379	3,5233	3,5233	2,3379	12,7224	3,1806	0,0827	0,1032	0,1032	0,0581	0,3473	0,0868
55	3,0	2,5	4,5	40	3,3547	3,5609	3,5611	2,3556	12,8324	3,2081	0,0846	0,1062	0,1062	0,0602	0,3572	0,0893
56	3,0	2,5	5,0	40	3,3687	3,5792	3,5793	2,3523	12,8795	3,2199	0,0862	0,1083	0,1083	0,0617	0,3645	0,0911
57	3,0	3,0	1,5	40	3,1832	1,5229	1,5228	0,6068	6,8356	1,7089	0,0692	0,0533	0,0533	-0,0061	0,1696	0,0424
58	3,0	3,0	2,0	40	3,2204	2,3970	2,3972	0,6973	8,7119	2,1780	0,0710	0,0699	0,0699	0,0145	0,2253	0,0563
59	3,0	3,0	2,5	40	3,2530	2,9245	2,9245	1,4051	10,5071	2,6268	0,0740	0,0839	0,0839	0,0342	0,2760	0,0690
60	3,0	3,0	3,0	40	3,2898	3,2639	3,2639	1,9696	11,7871	2,9468	0,0777	0,0926	0,0926	0,0484	0,3114	0,0778
61	3,0	3,0	3,5	40	3,3222	3,4337	3,4337	2,2610	12,4506	3,1126	0,0811	0,0976	0,0976	0,0553	0,3317	0,0829
62	3,0	3,0	4,0	40	3,3471	3,5089	3,5090	2,3667	12,7317	3,1829	0,0837	0,1011	0,1011	0,0585	0,3443	0,0861
63	3,0	3,0	4,5	40	3,3660	3,5430	3,5431	2,3920	12,8441	3,2110	0,0858	0,1037	0,1037	0,0602	0,3534	0,0884
64	3,0	3,0	5,0	40	3,3809	3,5606	3,5605	2,3902	12,8922	3,2231	0,0875	0,1058	0,1058	0,0613	0,3604	0,0901
65	4,0	1,5	1,5	40	3,2302	1,5037	1,5039	0,3876	6,6253	1,6563	0,0722	0,0490	0,0490	0,0012	0,1714	0,0428
66	4,0	1,5	2,0	40	3,2392	2,3117	2,3116	0,7886	8,6510	2,1627	0,0726	0,0646	0,0645	0,0209	0,2226	0,0556
67	4,0	1,5	2,5	40	3,2519	2,8144	2,8144	1,5699	10,4506	2,6126	0,0738	0,0817	0,0817	0,0372	0,2744	0,0686
68	4,0	1,5	3,0	40	3,2646	3,1678	3,1677	2,0525	11,6526	2,9131	0,0752	0,0957	0,0957	0,0489	0,3155	0,0789
69	4,0	1,5	3,5	40	3,2759	3,3969	3,3969	2,2680	12,3376	3,0844	0,0764	0,1051	0,1051	0,0568	0,3433	0,0858
70	4,0	1,5	4,0	40	3,2877	3,5289	3,5289	2,3451	12,6906	3,1726	0,0776	0,1106	0,1106	0,0620	0,3608	0,0902
71	4,0	1,5	4,5	40	3,3008	3,5925	3,5926	2,3658	12,8517	3,2129	0,0790	0,1133	0,1133	0,0656	0,3712	0,0928
72	4,0	1,5	5,0	40	3,3145	3,6163	3,6163	2,3693	12,9164	3,2291	0,0804	0,1144	0,1144	0,0680	0,3773	0,0943
73	4,0	2,0	1,5	40	3,2325	1,5527	1,5529	0,4460	6,7841	1,6960	0,0724	0,0503	0,0503	-0,0024	0,1706	0,0426
74	4,0	2,0	2,0	40	3,2452	2,3652	2,3651	0,7868	8,7624	2,1906	0,0732	0,0651	0,0651	0,0182	0,2215	0,0554
75	4,0	2,0	2,5	40	3,2611	2,8365	2,8366	1,5602	10,4944	2,6236	0,0748	0,0800	0,0800	0,0361	0,2708	0,0677
76	4,0	2,0	3,0	40	3,2785	3,1804	3,1804	2,0691	11,7084	2,9271	0,0766	0,0919	0,0919	0,0480	0,3084	0,0771
77	4,0	2,0	3,5	40	3,2924	3,3918	3,3918	2,2945	12,3706	3,0926	0,0781	0,1001	0,1002	0,0547	0,3331	0,0833
78	4,0	2,0	4,0	40	3,3044	3,5084	3,5084	2,3742	12,6955	3,1739	0,0793	0,1055	0,1055	0,0591	0,3494	0,0874
79	4,0	2,0	4,5	40	3,3163	3,5660	3,5662	2,3962	12,8447	3,2112	0,0806	0,1088	0,1088	0,0623	0,3604	0,0901
80	4,0	2,0	5,0	40	3,3280	3,5914	3,5914	2,3993	12,9100	3,2275	0,0818	0,1107	0,1107	0,0646	0,3678	0,0919
81	4,0	2,5	1,5	40	3,2332	1,5661	1,5663	0,5254	6,8909	1,7227	0,0724	0,0507	0,0507	-0,0043	0,1696	0,0424

82	4,0	2,5	2,0	40	3,2463	2,3730	2,3730	0,7514	8,7438	2,1859	0,0733	0,0654	0,0654	0,0160	0,2200	0,0550
83	4,0	2,5	2,5	40	3,2627	2,8342	2,8343	1,4928	10,4240	2,6060	0,0749	0,0796	0,0796	0,0345	0,2687	0,0672
84	4,0	2,5	3,0	40	3,2825	3,1755	3,1754	2,0397	11,6732	2,9183	0,0770	0,0904	0,0904	0,0477	0,3055	0,0764
85	4,0	2,5	3,5	40	3,3002	3,3809	3,3809	2,3050	12,3671	3,0918	0,0789	0,0975	0,0975	0,0546	0,3284	0,0821
86	4,0	2,5	4,0	40	3,3147	3,4893	3,4894	2,4005	12,6939	3,1735	0,0804	0,1021	0,1021	0,0585	0,3431	0,0858
87	4,0	2,5	4,5	40	3,3274	3,5424	3,5424	2,4273	12,8395	3,2099	0,0818	0,1052	0,1052	0,0611	0,3533	0,0883
88	4,0	2,5	5,0	40	3,3390	3,5675	3,5675	2,4313	12,9053	3,2263	0,0830	0,1074	0,1074	0,0631	0,3608	0,0902
89	4,0	3,0	1,5	40	3,2334	1,5708	1,5710	0,6119	6,9871	1,7468	0,0724	0,0509	0,0509	-0,0054	0,1688	0,0422
90	4,0	3,0	2,0	40	3,2471	2,3799	2,3798	0,7353	8,7421	2,1855	0,0733	0,0658	0,0658	0,0141	0,2191	0,0548
91	4,0	3,0	2,5	40	3,2634	2,8365	2,8366	1,4363	10,3729	2,5932	0,0750	0,0798	0,0798	0,0330	0,2675	0,0669
92	4,0	3,0	3,0	40	3,2838	3,1742	3,1742	1,9987	11,6309	2,9077	0,0473	0,0900	0,0900	0,0473	0,3044	0,0761
93	4,0	3,0	3,5	40	3,3036	3,3753	3,3754	2,3033	12,3576	3,0894	0,0792	0,0550	0,0962	0,0962	0,3266	0,0816
94	4,0	3,0	4,0	40	3,3205	3,4772	3,4772	2,4222	12,6971	3,1743	0,0810	0,1001	0,1001	0,0588	0,3400	0,0850
95	4,0	3,0	4,5	40	3,3348	3,5254	3,5255	2,4571	12,8427	3,2107	0,0825	0,1028	0,1028	0,0611	0,3493	0,0873
96	4,0	3,0	5,0	40	3,3471	3,5490	3,5489	2,4629	12,9079	3,2270	0,0839	0,1049	0,1048	0,0627	0,3563	0,0891

$Re_D = 150$

Caso	S_{L1}/D	S_{L2}/D	S_T/D	Re_D	Número de Nusselt (Nu_D)						Coeficiente de arrasto (C_D)					
					C_1	C_2	C_3	C_4	Soma	Média	C_1	C_2	C_3	C_4	Soma	Média
1	1,5	1,5	1,5	150	5,5928	4,6230	4,6233	1,6475	16,4866	4,1216	0,0030	0,0036	0,0036	0,0007	0,0109	0,0027
2	1,5	1,5	2,0	150	5,8762	6,0846	6,0846	3,6186	21,6640	5,4160	0,0036	0,0042	0,0042	0,0017	0,0137	0,0034
3	1,5	1,5	2,5	150	5,9574	6,3395	6,3397	3,8571	22,4937	5,6234	0,0039	0,0046	0,0046	0,0022	0,0153	0,0038
4	1,5	1,5	3,0	150	5,9685	6,4455	6,4454	3,8724	22,7318	5,6829	0,0040	0,0050	0,0050	0,0025	0,0165	0,0041
5	1,5	1,5	3,5	150	5,9987	6,5056	6,5051	3,8248	22,8342	5,7086	0,0041	0,0053	0,0053	0,0026	0,0173	0,0043
6	1,5	1,5	4,0	150	6,0230	6,5354	6,5351	3,7876	22,8811	5,7203	0,0042	0,0054	0,0054	0,0025	0,0175	0,0044
7	1,5	1,5	4,5	150	6,0284	6,5473	6,5473	3,7550	22,8781	5,7195	0,0043	0,0054	0,0054	0,0023	0,0176	0,0044
8	1,5	1,5	5,0	150	6,0326	6,5486	6,5485	3,7171	22,8468	5,7117	0,0044	0,0054	0,0054	0,0021	0,0175	0,0044
9	1,5	2,0	1,5	150	5,5862	4,6428	4,6434	1,4614	16,3338	4,0835	0,0030	0,0036	0,0036	0,0006	0,0108	0,0027
10	1,5	2,0	2,0	150	5,8739	6,0858	6,0860	3,5821	21,6278	5,4070	0,0036	0,0041	0,0041	0,0017	0,0135	0,0034
11	1,5	2,0	2,5	150	6,0177	6,2932	6,2934	3,9770	22,5813	5,6453	0,0041	0,0044	0,0044	0,0021	0,0150	0,0038
12	1,5	2,0	3,0	150	6,0632	6,3833	6,3835	3,9784	22,8084	5,7021	0,0043	0,0048	0,0048	0,0023	0,0161	0,0040
13	1,5	2,0	3,5	150	6,0806	6,4524	6,4524	3,9148	22,9001	5,7250	0,0043	0,0051	0,0051	0,0024	0,0169	0,0042

14	1,5	2,0	4,0	150	6,1043	6,4972	6,4973	3,8274	22,9262	5,7316	0,0044	0,0053	0,0053	0,0024	0,0173	0,0043
15	1,5	2,0	4,5	150	6,1255	6,5216	6,5216	3,7594	22,9281	5,7320	0,0045	0,0053	0,0053	0,0022	0,0174	0,0043
16	1,5	2,0	5,0	150	6,1257	6,5318	6,5321	3,7272	22,9169	5,7292	0,0045	0,0054	0,0054	0,0021	0,0174	0,0043
17	1,5	2,5	1,5	150	5,5856	4,6494	4,6496	1,3441	16,2287	4,0572	0,0030	0,0036	0,0036	0,0005	0,0106	0,0027
18	1,5	2,5	2,0	150	5,8699	6,0959	6,0956	3,5058	21,5673	5,3918	0,0036	0,0017	0,0041	0,0041	0,0134	0,0034
19	1,5	2,5	2,5	150	6,0319	6,2888	6,2890	4,0773	22,6870	5,6717	0,0041	0,0044	0,0044	0,0021	0,0150	0,0037
20	1,5	2,5	3,0	150	6,1157	6,3541	6,3537	4,1164	22,9399	5,7350	0,0044	0,0046	0,0046	0,0023	0,0160	0,0040
21	1,5	2,5	3,5	150	6,1475	6,4117	6,4119	4,0389	23,0101	5,7525	0,0046	0,0049	0,0049	0,0023	0,0167	0,0042
22	1,5	2,5	4,0	150	6,1613	6,4605	6,4606	3,9286	23,0110	5,7528	0,0046	0,0051	0,0051	0,0023	0,0171	0,0043
23	1,5	2,5	4,5	150	6,1772	6,4940	6,4933	3,8205	22,9850	5,7462	0,0046	0,0052	0,0052	0,0022	0,0172	0,0043
24	1,5	2,5	5,0	150	6,1936	6,5114	6,5124	3,7288	22,9461	5,7365	0,0046	0,0020	0,0053	0,0053	0,0173	0,0043
25	1,5	3,0	1,5	150	5,5842	4,6160	4,5742	1,3018	16,0762	4,0190	0,0030	0,0034	0,0037	0,0001	0,0102	0,0026
26	1,5	3,0	2,0	150	5,8699	6,0997	6,0994	3,4259	21,4949	5,3737	0,0036	0,0041	0,0041	0,0016	0,0134	0,0033
27	1,5	3,0	2,5	150	6,0339	6,2891	6,2892	4,1359	22,7481	5,6870	0,0041	0,0043	0,0043	0,0021	0,0149	0,0037
28	1,5	3,0	3,0	150	6,1368	6,3434	6,3431	4,2430	23,0663	5,7666	0,0045	0,0046	0,0046	0,0023	0,0159	0,0040
29	1,5	3,0	3,5	150	6,1910	6,3868	6,3867	4,1749	23,1393	5,7848	0,0047	0,0048	0,0048	0,0023	0,0166	0,0041
30	1,5	3,0	4,0	150	6,2118	6,4289	6,4288	4,0578	23,1274	5,7819	0,0048	0,0050	0,0050	0,0023	0,0170	0,0042
31	1,5	3,0	4,5	150	6,2208	6,4643	6,4647	3,9296	23,0794	5,7698	0,0048	0,0051	0,0051	0,0021	0,0172	0,0043
32	1,5	3,0	5,0	150	6,2293	6,4899	6,4891	3,7980	23,0062	5,7516	0,0048	0,0052	0,0052	0,0020	0,0172	0,0043
33	3,0	1,5	1,5	150	5,7309	4,3147	4,3152	1,4935	15,8543	3,9636	0,0032	0,0032	0,0032	0,0006	0,0101	0,0025
34	3,0	1,5	2,0	150	5,8720	5,6259	5,6257	3,5883	20,7119	5,1780	0,0035	0,0036	0,0036	0,0015	0,0122	0,0030
35	3,0	1,5	2,5	150	5,8837	6,1713	6,1712	4,0601	22,2862	5,5716	0,0036	0,0043	0,0043	0,0021	0,0142	0,0035
36	3,0	1,5	3,0	150	5,8848	6,3633	6,3639	4,1613	22,7733	5,6933	0,0036	0,0048	0,0048	0,0025	0,0156	0,0039
37	3,0	1,5	3,5	150	5,8969	6,4497	6,4496	4,1654	22,9615	5,7404	0,0036	0,0051	0,0051	0,0028	0,0165	0,0041
38	3,0	1,5	4,0	150	5,9213	6,4928	6,4930	4,1171	23,0242	5,7560	0,0037	0,0052	0,0052	0,0029	0,0170	0,0042
39	3,0	1,5	4,5	150	5,9516	6,5164	6,5161	4,0496	23,0337	5,7584	0,0038	0,0053	0,0053	0,0029	0,0172	0,0043
40	3,0	1,5	5,0	150	5,9793	6,5273	6,5273	3,9855	23,0194	5,7549	23,0194	0,0053	0,0053	5,7549	0,0173	0,0043
41	3,0	2,0	1,5	150	5,7995	4,0442	4,0439	1,1526	15,0403	3,7601	0,0034	0,0025	0,0025	0,0004	0,0088	0,0022
42	3,0	2,0	2,0	150	5,8719	5,6294	5,6292	3,4678	20,5983	5,1496	0,0035	0,0035	0,0035	0,0015	0,0121	0,0030
43	3,0	2,0	2,5	150	5,8994	6,1531	6,1529	4,1298	22,3352	5,5838	0,0036	0,0041	0,0041	0,0020	0,0139	0,0035
44	3,0	2,0	3,0	150	5,9206	6,3087	6,3089	4,2476	22,7857	5,6964	0,0037	0,0045	0,0045	0,0023	0,0151	0,0038
45	3,0	2,0	3,5	150	5,9399	6,3854	6,3854	4,2594	22,9700	5,7425	0,0037	0,0048	0,0048	0,0025	0,0159	0,0040
46	3,0	2,0	4,0	150	5,9608	6,4362	6,4367	4,2222	23,0558	5,7639	0,0038	0,0050	0,0050	0,0027	0,0165	0,0041

47	3,0	2,0	4,5	150	5,9850	6,4703	6,4708	4,1591	23,0851	5,7713	0,0039	0,0052	0,0052	0,0027	0,0168	0,0042
48	3,0	2,0	5,0	150	6,0114	6,4929	6,4931	4,0788	23,0761	5,7690	0,0039	0,0052	0,0052	0,0027	0,0170	0,0043
49	3,0	2,5	1,5	150	5,7999	4,0583	4,0582	1,0663	14,9827	3,7457	0,0034	0,0025	0,0025	0,0003	0,0087	0,0022
50	3,0	2,5	2,0	150	5,8717	5,6411	5,6412	3,3449	20,4988	5,1247	0,0035	0,0035	0,0035	0,0014	0,0120	0,0030
51	3,0	2,5	2,5	150	5,9025	6,1576	6,1577	4,1728	22,3906	5,5976	0,0036	0,0041	0,0041	0,0020	0,0138	0,0035
52	3,0	2,5	3,0	150	5,9371	6,2887	6,2886	4,3339	22,8482	5,7121	0,0037	0,0044	0,0044	0,0023	0,0149	0,0037
53	3,0	2,5	3,5	150	5,9680	6,3457	6,3456	4,3557	23,0149	5,7537	0,0038	0,0025	0,0047	0,0047	0,0156	0,0039
54	3,0	2,5	4,0	150	5,9936	6,3897	6,3901	4,3189	23,0924	5,7731	0,0039	0,0026	0,0048	0,0048	0,0162	0,0040
55	3,0	2,5	4,5	150	6,0168	6,4258	6,4269	4,2621	23,1317	5,7829	0,0040	0,0050	0,0050	0,0026	0,0165	0,0041
56	3,0	2,5	5,0	150	6,0386	6,4538	6,4547	4,1880	23,1350	5,7838	0,0040	0,0051	0,0051	0,0026	0,0168	0,0042
57	3,0	3,0	1,5	150	5,8011	4,0684	4,0684	1,0085	14,9464	3,7366	0,0034	0,0025	0,0025	0,0002	0,0087	0,0022
58	3,0	3,0	2,0	150	5,8720	5,6491	5,6490	3,2390	20,4092	5,1023	0,0035	0,0035	0,0035	0,0014	0,0119	0,0030
59	3,0	3,0	2,5	150	5,9027	6,1612	6,1612	4,1911	22,4162	5,6040	0,0036	0,0041	0,0041	0,0020	0,0138	0,0035
60	3,0	3,0	3,0	150	5,9432	6,2821	6,2818	4,4043	22,9114	5,7278	0,0038	0,0044	0,0044	0,0023	0,0148	0,0037
61	3,0	3,0	3,5	150	5,9831	6,3252	6,3255	4,4425	23,0762	5,7691	0,0039	0,0046	0,0046	0,0025	0,0155	0,0039
62	3,0	3,0	4,0	150	6,0158	6,3601	6,3601	4,4116	23,1476	5,7869	0,0040	0,0047	0,0047	0,0025	0,0159	0,0040
63	3,0	3,0	4,5	150	6,0425	6,3921	6,3926	4,3628	23,1901	5,7975	0,0041	0,0048	0,0048	0,0025	0,0163	0,0041
64	3,0	3,0	5,0	150	6,0645	6,4191	6,4191	4,2924	23,1951	5,7988	0,0041	0,0050	0,0050	0,0025	0,0166	0,0041
65	4,0	1,5	1,5	150	5,8303	3,9242	3,9242	1,2049	14,8836	3,7209	0,0034	0,0022	0,0022	0,0004	0,0081	0,0020
66	4,0	1,5	2,0	150	5,8916	5,3822	5,3825	3,5291	20,1855	5,0464	0,0035	0,0033	0,0033	0,0014	0,0114	0,0029
67	4,0	1,5	2,5	150	5,8989	6,0284	6,0283	4,0953	22,0509	5,5127	0,0035	0,0041	0,0041	0,0020	0,0136	0,0034
68	4,0	1,5	3,0	150	5,8982	6,2999	6,3002	4,2330	22,7312	5,6828	0,0035	0,0046	0,0046	0,0024	0,0152	0,0038
69	4,0	1,5	3,5	150	5,9036	6,4207	6,4206	4,2697	23,0146	5,7537	0,0036	0,0050	0,0050	0,0027	0,0162	0,0041
70	4,0	1,5	4,0	150	5,9185	6,4751	6,4752	4,2447	23,1136	5,7784	0,0036	0,0052	0,0052	0,0029	0,0168	0,0042
71	4,0	1,5	4,5	150	5,9393	6,5029	6,5031	4,1933	23,1386	5,7846	0,0037	0,0029	0,0053	0,0053	0,0171	0,0043
72	4,0	1,5	5,0	150	5,9623	6,5164	6,5172	4,1281	23,1239	5,7810	0,0037	0,0029	0,0053	0,0053	0,0172	0,0043
73	4,0	2,0	1,5	150	5,8295	3,9299	3,9298	1,0661	14,7552	3,6888	0,0034	0,0022	0,0022	0,0003	0,0081	0,0020
74	4,0	2,0	2,0	150	5,8919	5,3845	5,3848	3,3881	20,0493	5,0123	0,0035	0,0032	0,0032	0,0013	0,0113	0,0028
75	4,0	2,0	2,5	150	5,9081	6,0254	6,0254	4,1464	22,1052	5,5263	0,0036	0,0040	0,0040	0,0019	0,0134	0,0034
76	4,0	2,0	3,0	150	5,9204	6,2621	6,2620	4,3107	22,7551	5,6888	0,0036	0,0044	0,0044	0,0023	0,0147	0,0037
77	4,0	2,0	3,5	150	5,9320	6,3597	6,3602	4,3528	23,0048	5,7512	0,0037	0,0047	0,0047	0,0025	0,0156	0,0039
78	4,0	2,0	4,0	150	5,9463	6,4158	6,4159	4,3429	23,1208	5,7802	0,0037	0,0050	0,0050	0,0027	0,0163	0,0041
79	4,0	2,0	4,5	150	5,9633	6,4524	6,4527	4,3067	23,1750	5,7938	0,0037	0,0051	0,0051	0,0027	0,0166	0,0042

80	4,0	2,0	5,0	150	5,9823	6,4769	6,4767	4,2435	23,1794	5,7949	0,0038	0,0052	0,0052	0,0027	0,0169	0,0042
81	4,0	2,5	1,5	150	5,8302	3,9466	3,9466	0,9935	14,7170	3,6793	0,0035	0,0022	0,0022	0,0002	0,0080	0,0020
82	4,0	2,5	2,0	150	5,8920	5,3996	5,3999	3,2517	19,9431	4,9858	0,0035	0,0032	0,0032	0,0013	0,0113	0,0028
83	4,0	2,5	2,5	150	5,9098	6,0347	6,0351	4,1704	22,1500	5,5375	0,0036	0,0039	0,0039	0,0019	0,0133	0,0033
84	4,0	2,5	3,0	150	5,9304	6,2482	6,2487	4,3791	22,8064	5,7016	0,0036	0,0043	0,0043	0,0022	0,0145	0,0036
85	4,0	2,5	3,5	150	5,9500	6,3237	6,3234	4,4356	23,0328	5,7582	0,0037	0,0046	0,0046	0,0024	0,0153	0,0038
86	4,0	2,5	4,0	150	5,9682	6,3704	6,3704	4,4309	23,1399	5,7850	0,0038	0,0048	0,0048	0,0026	0,0159	0,0040
87	4,0	2,5	4,5	150	5,9857	6,4067	6,4063	4,4017	23,2004	5,8001	0,0038	0,0049	0,0049	0,0026	0,0163	0,0041
88	4,0	2,5	5,0	150	6,0031	6,4346	6,4341	4,3475	23,2193	5,8048	0,0039	0,0050	0,0050	0,0027	0,0166	0,0041
89	4,0	3,0	1,5	150	5,8314	3,9587	3,9587	0,9460	14,6949	3,6737	0,0035	0,0022	0,0022	0,0002	0,0080	0,0020
90	4,0	3,0	2,0	150	5,8925	5,4092	5,4094	3,1396	19,8507	4,9627	0,0035	0,0032	0,0032	0,0012	0,0112	0,0028
91	4,0	3,0	2,5	150	5,9100	6,0398	6,0401	4,1702	22,1601	5,5400	0,0036	0,0039	0,0039	0,0019	0,0133	0,0033
92	4,0	3,0	3,0	150	5,9340	6,2450	6,2449	4,4359	22,8597	5,7149	0,0037	0,0043	0,0043	0,0022	0,0145	0,0036
93	4,0	3,0	3,5	150	5,9594	6,3053	6,3053	4,5061	23,0760	5,7690	0,0037	0,0045	0,0045	0,0024	0,0152	0,0038
94	4,0	3,0	4,0	150	5,9824	6,3417	6,3416	4,5088	23,1745	5,7936	0,0038	0,0047	0,0047	0,0025	0,0157	0,0039
95	4,0	3,0	4,5	150	6,0026	6,3717	6,3718	4,4842	23,2304	5,8076	0,0039	0,0048	0,0048	0,0026	0,0160	0,0040
96	4,0	3,0	5,0	150	6,0210	6,3987	6,3981	4,4381	23,2560	5,8140	0,0039	0,0049	0,0049	0,0026	0,0163	0,0041

