



OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE ESCOAMENTOS COM CONVECÇÃO FORÇADA SOBRE UM ARRANJO DE QUATRO CILINDROS

Martim dos Santos Pereira

Filipe Branco Teixeira

Bruno Costa Feijó

martimpereyra@gmail.com

fbrancoteixeira@gmail.com

bruno.feijo1989@gmail.com

School of Engineering, Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, km 8, Carreiros, 96203-900 – Rio Grande, RS, Brazil.

Luiz Alberto Oliveira Rocha

luizrocha@mecanica.ufrgs.br

Department of Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Rua Sarmiento Leite, 425, 90050-170 - Porto Alegre, RS, Brazil

Jhon Nero Vaz Goulart

Tiago de Melo

jvaz@unb.br

tiago.melomec@gmail.com

Group of Experimental and Computational of Mechanics, University of Brasilia, Gama, DF, 72.405-610, PO box 8114, Brazil.

Liércio André Isoldi

Elizaldo Domingues dos Santos

elizaldosantos@furg.br

liercioisoldi@furg.br

School of Engineering, Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, km 8, Carreiros, 96203-900 – Rio Grande, RS, Brazil.

Abstract. *O presente estudo consiste na avaliação numérica de um arranjo formado por quatro cilindros submetidos a um escoamento transiente, bidimensional, incompressível, laminar e com convecção forçada. A avaliação geométrica é realizada através do método Design Construtal. O problema possui uma restrição dada pela soma da área dos cilindros e três graus de liberdade: S_{T1}/D (razão entre o passo transversal dos cilindros frontais e o diâmetro dos cilindros), S_{T2}/D (razão entre o passo transversal dos cilindros posteriores e o diâmetro dos cilindros) e S_L/D (razão entre o passo longitudinal dos cilindros frontais e posteriores e o diâmetro dos cilindros). Para todas as simulações são considerados números de Reynolds e Prandtl constantes, $Re_D = 100$ e $Pr = 0.71$. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia são resolvidas através do Método dos Volumes Finitos (FVM). O principal objetivo é avaliar o efeito dos graus de liberdade sobre o coeficiente de arrasto (C_D) e o número de Nusselt (Nu_D) entre os cilindros e o escoamento circundante, assim como, os valores ótimos de S_{T2}/D para três razões de $S_{T1}/D = 1.5$, 3.0 e 4.0 , sendo estes resultados obtidos para a razão $S_L/D = 1.5$ e 4.0 . Os resultados mostraram que a alteração da razão S_{T1}/D e S_{T2}/D possui grande influência sobre os coeficientes de arrasto e número de Nusselt do arranjo formado pelos quatro cilindros.*

Keywords: *Design Construtal, convecção forçada, arranjo quatro cilindros, escoamento externo, estudo numérico.*

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento significativo da indústria moderna, da ciência e tecnologia em sistemas de dimensões cada vez menores, a avaliação geométrica em problemas de transferência de calor tem se tornado cada vez mais importante. A pesquisa e aplicação das técnicas de avaliação geométrica em transferência de calor possuem vasta aplicação, desde os campos tradicionais da indústria, como em trocadores de calor e dispositivos de geração de energia convencionais, como para os novos campos da indústria, tais como a tecnologia eletrônica, espacial e biologia, onde condições extraordinárias como densidade de fluxo de calor elevada e microescala são encontrados (Xie et al., 2010).

Segundo Ganapathy (2003), o papel de caldeiras e geradores de recuperação de calor de vapor na economia industrial tem sido profundo. Caldeiras formam a espinha dorsal de usinas de energia, HRSGs (do inglês: Heat Recovery Steam-Generator), sistemas de cogeração e centrais de ciclo combinado. Existem poucas plantas de processo, refinarias, indústrias químicas, e empresas de energia elétrica que não têm uma planta de vapor uma vez que este se mostra como o fluido de trabalho mais conveniente para o aquecimento, refrigeração, e aplicações de geração de energia em processamento industriais e especialmente em sistemas embarcados, como no caso de plataformas de petróleo, devido ao espaço restrito e a necessidade de grande performance de equipamentos.

Todos esses processos foram sendo otimizados no decorrer dos anos, aumentando o número de tubos, aumentando a área de troca, os materiais utilizados dentre outras

variáveis, porém sempre utilizando a ideia de que quanto maior a área de troca, maior seria a eficiência desses equipamentos o que acabou sendo limitado por alguns fatores: o custo de fabricação, a limitação de área disponível para instalação. Com a evolução da engenharia computacional, foram criados softwares que possibilitam a análise detalhada do funcionamento desses equipamentos e assim foi possível perceber que o aumento de área de troca tem um limitante, pois quando chega a um limite máximo da resistência ao escoamento aumenta a um nível insatisfatório para o princípio de funcionamento. Desta forma se fez necessário analisar qual a influência da geometria em que os tubos são alocados dentro desses equipamentos de troca térmica, como também no passo utilizado (Shah, 2003).

Escoamentos sobre arranjo triangulares de cilindros foram estudados por Barros et al. (2015) com os mesmos parâmetros do presente trabalho, $Pr = 0.71$ e $Re_D = 100$, porém avaliando três diferentes números de Richardson, 0.1, 1,0 e 10,0 a fim de analisar o escoamento com convecção preponderante natural, mista e forçada. As variações geométricas foram efetuadas em razão de dois graus de liberdade, o passo transversal dos cilindros posteriores e o diâmetro e o passo longitudinal pelo diâmetro. A variação do mecanismo motriz do escoamento (causado pela variação do número de Richardson) não somente afetou as magnitudes de C_D e Nu_D , mas também alterou o comportamento das camadas limite fluidodinâmica e térmica conduzindo a alterações no efeito da razão S_T/D sobre C_D e Nu_D .

Lam et al. (2007) realizou um estudo de escoamento para um conjunto de quatro cilindros in-line para Reynolds 100 e 200 fazendo uma variação da razão da distância entre os centros dos cilindros (L) e seus diâmetros (D) definidos em 1.6, 2.5, 3.5, 4.0 e 5.0. Para tal foram observados três padrões de escoamento distintos: (i) um fluxo estável; (II) um fluxo com variação da esteira e (III) um fluxo de vórtices. Em $Re_D = 100$ a transformação do padrão de fluxo de (I) para (II) gerou um aumento da amplitude da pressão máxima de flutuação na superfície do cilindro a jusante em uma magnitude de 4 a 12 vezes, enquanto que na transformação de (II) para (III) o aumento da pressão flutuante foi de 2 a 3 vezes.

O Construtal Design é um método de avaliação geométrica baseado no princípio de restrições e objetivos e em um princípio físico de maximização do acesso ao fluxo. Esse princípio é denominado de Lei Constructal definida por Bejan (2000): “Para um sistema de tamanho finito persistir no tempo (sobreviver), o mesmo precisa evoluir sua forma e estrutura para providenciar um melhor acesso às correntes que fluem através dele”. Em Bejan e Lorente, (2008), são apresentadas diversas aplicações da Lei Constructal para avaliação geométrica em problemas de transferência de calor.

No presente trabalho é avaliada numericamente a influência da geometria de um arranjo de quatro cilindros sobre o coeficiente de arrasto e o número de Nusselt entre o escoamento e as superfícies dos cilindros, utilizando o método Constructal Design. O diâmetro dos cilindros é mantido constante para todas as simulações, e são feitas diversas variações com três graus de liberdade: S_{T1}/D (razão do passo transversal dos cilindros frontais), S_{T2}/D (razão do passo transversal dos cilindros posteriores e o diâmetro) e S_L/D (razão do passo longitudinal entre os cilindros, frontal e posteriores, e o diâmetro). O arranjo está submetido a um escoamento laminar, permanente e com convecção forçada. O principal objetivo é determinar o arranjo ótimo que maximiza a transferência de calor entre o escoamento que está a uma temperatura inferior à temperatura da superfície do canal, como também diminuir o coeficiente de arrasto. Para isso são feitas diversas simulações, todas com $Re_D = 100$ e $Pr = 0,71$. As equações

de conservação de massa, quantidade de movimento e energia são resolvidas com o Método de Volumes Finitos (MVF) (Versteeg e Malalasekera, 2007; Patankar, 1980), mais precisamente empregando o código de dinâmica dos fluidos computacional FLUENT[®] (FLUENT, 2006).

2 MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA

A modelagem dos escoamentos bidimensionais, incompressíveis, laminares, por convecção forçada no regime permanente é baseada na solução das equações de conservação em conjunto com as condições de contorno e iniciais do problema. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia são dados, respectivamente, por (Bejan, 2004):

$$\frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0 \quad (j = 1 \text{ e } 2) \text{ em } t \times \Omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (v_i v_j) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} \delta_{ij} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right\} = 0 \quad (j = 1 \text{ e } 2) \text{ em } t \times \Omega \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (v_j T) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \alpha \frac{\partial T}{\partial x_j} \right\} - q''' = 0 \quad (j = 1 \text{ e } 2) \text{ em } t \times \Omega \quad (3)$$

onde ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3); ν é a viscosidade cinemática do fluido (m^2/s); α é a difusividade térmica (m^2/s); v_i é a velocidade do fluido na direção i , $i = 1, 2$ e 3 (m/s); x_i corresponde a coordenada espacial na direção i , $i = 1, 2$ e 3 (m); P é a pressão (N/m^2); T é a temperatura (K); δ_{ij} é o operador delta de Kronecker; g_i é a aceleração da gravidade na direção i ; Ω é o domínio espacial (m); t representa o domínio de tempo (s), e q''' é o termo fonte de energia, que para os casos simulados no presente trabalho é nulo (W/m^3).

As Eqs. (1) – (3) são resolvidas através de um software comercial de dinâmica dos fluidos computacional (CFD – do inglês: *Computational Fluid Dynamics*) que é baseado no método de volumes finitos (MVF) (Versteeg e Malalasekera, 2007; Patankar, 1980). O solver é baseado na pressão, o acoplamento pressão-velocidade é realizado com o uso do algoritmo SIMPLE e para o tratamento dos termos advectivos emprega-se o esquema de interpolação *Upwind* de segunda ordem para as equações de conservação de quantidade de movimento e energia. Além disso, os cálculos foram considerados convergidos quando os resíduos para as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia entre duas iterações consecutivas foram menores do que 10^{-6} , 10^{-6} e 10^{-8} , respectivamente. Maiores detalhes relacionados com o MVF podem ser encontrados em (Versteeg e Malalasekera, 2007; Patankar, 1980).

Tendo em vista que nos parâmetros que foi efetuado o estudo a transformação do padrão de um fluxo estável para um fluxo com variação da esteira gera um aumento da amplitude da pressão máxima de flutuação na superfície do cilindro a jusante em uma magnitude de 4 a 12 vezes (Lam et al. 2007) gerando um padrão instável de vórtices nas linhas de corrente, o problema foi resolvido de forma transiente até que o estado estacionário fosse estabelecido, sendo utilizado um passo de tempo de 10^{-2} s em 100 steps.

As simulações numéricas foram realizadas usando um computador com um processador quad-core Intel com 3,6 GHz e 8GB de memória RAM. O tempo de processamento para cada simulação foi de aproximadamente $14,4 \times 10^3$ s.

3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema analisado consiste de um escoamento laminar, no regime permanente, com transferência de calor por convecção forçada sobre um arranjo formado por quatro cilindros, conforme ilustrado na Fig. 1. O escoamento é causado pela imposição de um perfil de velocidades ($V_\infty = 50$ m/s) constante na entrada do canal. Este escoamento possui uma temperatura prescrita ($T_\infty = 300$ K) inferior a temperatura dos cilindros ($T_S = 320$ K), e assim, a transferência de calor por convecção forçada ocorre devido à diferença de temperatura acima citada. Com relação às demais condições de contorno, as superfícies do domínio possuem condição de não-deslizamento e impermeabilidade ($V_1 = V_2 = 0$ m/s). Na saída do domínio, é imposta uma condição de fluxo de calor nulo e pressão atmosférica ($101,325 \times 10^3$ Pa). Ainda pode ser visto na “Fig. 1” as dimensões do domínio, onde os parâmetros S_{T1}/D , S_{T2}/D e S_L/D referem-se respectivamente à razão do passo transversal dos cilindros frontais e o diâmetro, razão do passo transversal dos cilindros posteriores e o diâmetro, e razão do passo longitudinal entre os cilindros, frontal e posteriores, e o diâmetro.

Para a avaliação geométrica do problema é empregado o método Design Construtal (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008). Este método é baseado no princípio de objetivos e restrições (locais e globais) sendo o método usado para aplicação da Lei Construtal. Para o problema analisado, foram definidas como restrições geométricas do problema:

- 1) A área de ocupação é restrita às dimensões de ocupação. ($A_o = H_o \times L_o$)
- 2) A área ocupada pelos quatro cilindros é a mesma em todos os casos e também são considerados cilindros com diâmetros iguais. ($A_t = A_{c1} + A_{c2} + A_{c3} + A_{c4}$)
- 3) Restrição física do tamanho do domínio, todas simulações tem o mesmo valor fixado em ($H = 10D$ e $L = 50D$).
- 4) Os valores do espaçamento transversal entre os cilindros não pode exceder a altura do domínio computacional utilizado. ($S_{T1} + D < H_o$ e $S_{T2} + D < H_o$).
- 5) Os valores do espaçamento longitudinal entre os cilindros deve ser maior do que um diâmetro, e menor que a largura do domínio computacional utilizado. ($S_L > D$ e $S_L + D < L_o$).

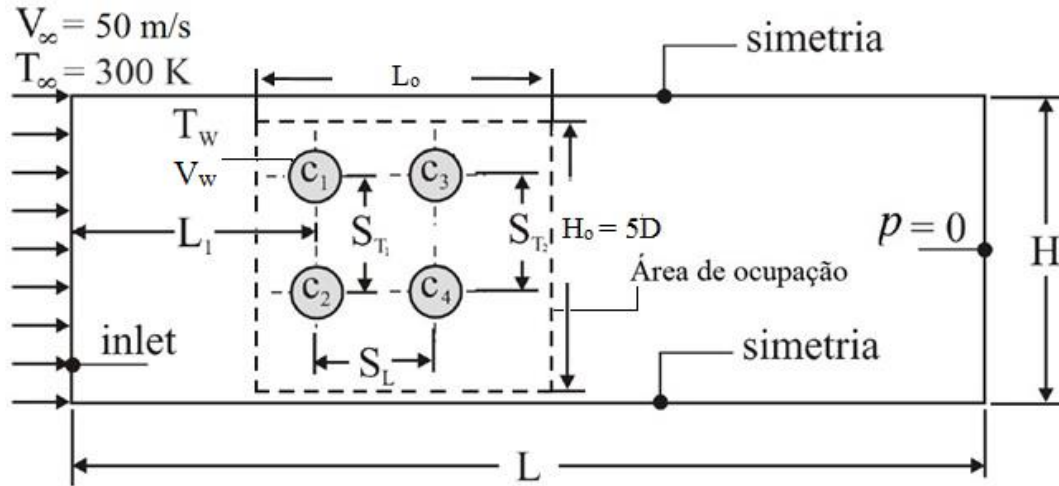


Figura 1. Domínio computacional empregado nas simulações do presente trabalho.

Os três graus de liberdade do problema são as razões: S_{T1}/D (razão do passo transversal dos cilindros frontais), S_{T2}/D (razão do passo transversal dos cilindros posteriores e o diâmetro) e S_L/D (razão do passo longitudinal entre os cilindros, frontal e posteriores, e o diâmetro) os quais concedem ao arranjo, formado pelos quatro cilindros, a liberdade para assumir quaisquer relações de proporção geométrica dentro da restrição de área total constante.

O processo de otimização é dividido em 2 etapas, conforme ilustra a Fig. 2. No primeiro passo, a geometria é otimizada pela variação do grau de liberdade S_{T2}/D mantendo-se fixos os parâmetros S_{T1}/D e S_L/D . A geometria que conduzir ao maior valor do número de Nusselt (Nu_{Dm}) será uma vez otimizada $(S_{T2}/D)_o$, o mesmo processo é válido para encontrar o valor do coeficiente de arrasto uma vez minimizado C_{Dm} . Em um segundo momento, a variação da razão S_{T2}/D é realizada para diferentes valores do parâmetro S_{T1}/D , mantendo-se ainda constante a razão S_L/D . A maior magnitude encontrada para o número de Nusselt é duas vezes maximizada ($Nu_{D,mm}$) e as respectivas geometrias ótimas são: $(S_{T1}/D)_o$ (uma vez otimizada) e $(S_{T2}/D)_{oo}$ (duas vezes otimizada). O procedimento é análogo para o coeficiente de arrasto (C_D), contudo o objetivo neste caso é minimizar a magnitude desse parâmetro, obtendo-se um coeficiente duas vezes minimizado (C_{Dmm}). As razões ótimas possuem a mesma nomenclatura do caso térmico, contudo podem apresentar magnitudes diferentes. Para tanto foram simulados 36 casos, sendo estes $S_{T1}/D = 1,5; 3,0$ e $4,0$; $S_L/D = 1,5$ e $4,0$; e $S_{T2}/D = 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5$ e $4,0$.

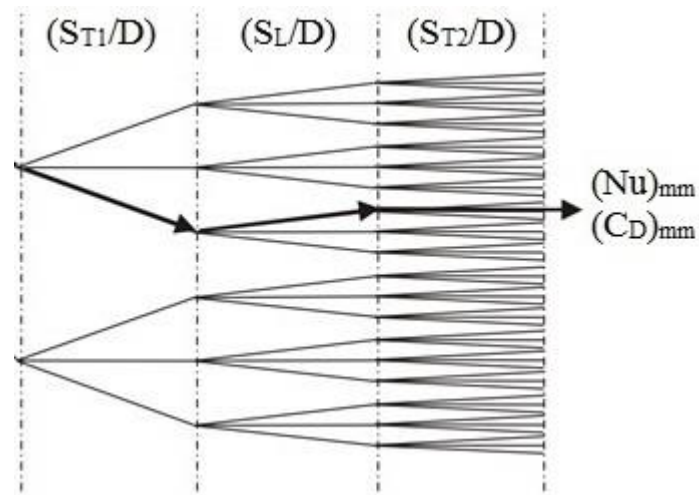


Figura 2. Diagrama ilustrando o processo de avaliação da geometria do canal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 mostra o efeito da razão de S_{T2}/D no coeficiente de arrasto do arranjo (C_D) e o número de Nusselt para $S_{T1}/D = 1,5$ e $S_L/D = 1,5$ e $4,0$. Em geral, a figura mostra que o coeficiente de arrasto cresce à medida que o passo transversal dos cilindros posteriores aumenta, principalmente para valores acima de $2,5$. Porém os menores valores de C_D não foram obtidos quando os cilindros estavam alinhados em relação ao passo transversal, $S_{T1}/D = S_{T2}/D = 1,5$, mas quando $(S_{T2}/D)_o = 2,0$. Dessa forma, para estes casos há uma geometria ótima intermediária para a minimização do C_D . Já para o caso térmico, há uma tendência de crescimento do Nusselt com o aumento do S_{T2}/D . Além disso, a razão $S_L/D = 1,5$ conduz aos melhores resultados, contudo, para $S_{T1}/D = 1,5$ a razão $S_L/D = 4,0$ leva aos melhores desempenhos.

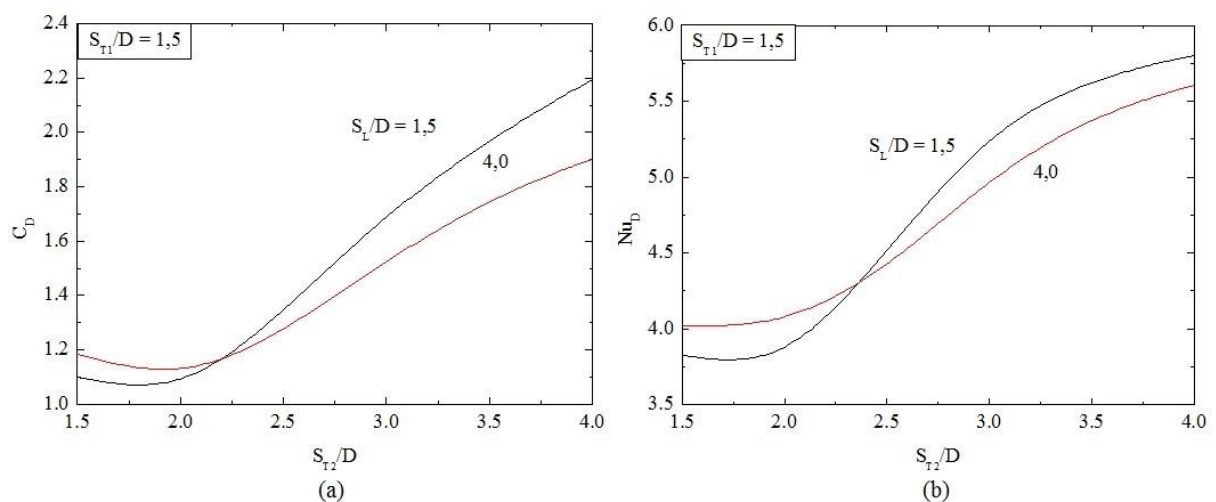


Figura 3 Efeito do parâmetro S_{T2}/D sobre C_D (a) e Nu_D (b) para $S_{T1}/D = 1,5$ e $S_L/D = 1,5$ e $4,0$.

Com o intuito de investigar a queda no coeficiente de arrasto entre $S_{T2}/D = 1,5$ para $(S_{T2}/D)_o = 2,0$ deve-se observar os campos de pressão para o escoamento no regime permanente. O fenômeno causador dessa diferença no coeficiente de arrasto entre essas duas configurações é a diminuição da pressão na região interna do arranjo causada pelo

pequeno afastamento dos cilindros, o que ocasiona uma diminuição na resistência ao escoamento devido à suavização no campo de pressão na área frontal dos cilindros posteriores. Esse comportamento é bastante evidente na comparação das Figs. 4(a) e 4(b) que mostram respectivamente as razões $S_{T2}/D = 1.5$ e 2.0 , principalmente para o campo de pressões na região frontal aos cilindros posteriores. Observa-se que quando o campo de pressões é suavizado melhora-se o desempenho fluidodinâmico do escoamento.

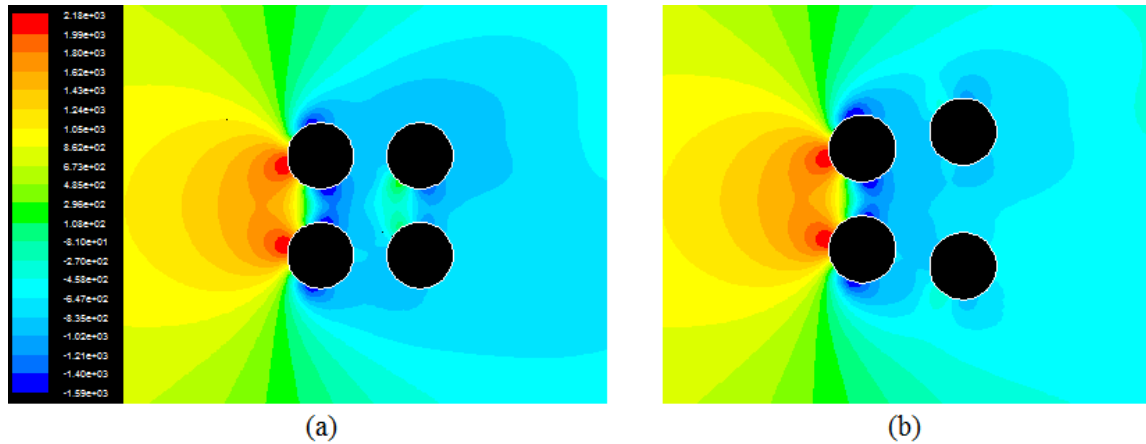


Figura 4 – Campos de pressão (Pa) para a geometria $S_{T1}/D = 1,5$, $S_L/D = 1,5$ e (a) $S_{T2}/D = 1,5$ e (b) $S_{T2}/D = 2,0$.

Pode-se perceber que os valores máximos ocorreram quando os cilindros posteriores encontravam-se desencontrados com os cilindros frontais ($S_{T2}/D = 4,0$), sendo que nessa configuração a pequena diferença de valores em relação ao passo transversal deve-se que ao menor valor deste ($S_L/D = 1,5$) os cilindros posteriores receberem uma maior parte do escoamento sem interferência das esteiras dos cilindros frontais.

A Figura 5 mostra o efeito da razão de S_{T2}/D no coeficiente de arrasto do arranjo (C_D) e o número de Nusselt (Nu_D) para $S_{T1}/D = 3,0$ e $S_L/D = 1,5$ e $4,0$. Tendo em vista que o espaçamento transversal dos cilindros frontais encontra-se a três diâmetros de distância ($3D$) o valor de C_D máximo ocorreu em $S_{T2}/D = 1,5$, como esperado, com valor decrescente até o ponto de mínimo quando o arranjo ficar alinhado $S_{T2}/D = S_{T1}/D = 3,0$. Após esse ponto o coeficiente de arrasto volta a ter um aumento de magnitude.

Para todas as variações investigadas até o momento com o parâmetro $S_{T1}/D = 3,0$, o valor mínimo do coeficiente de arrasto foi encontrado quando o parâmetro $S_L/D = 1,5$ entre o intervalo de $3,0 \leq S_{T2}/D \leq 3,5$, porém fora desse intervalo os menores valores de C_D foram obtidos quando $S_{T2}/D = 3,0$.

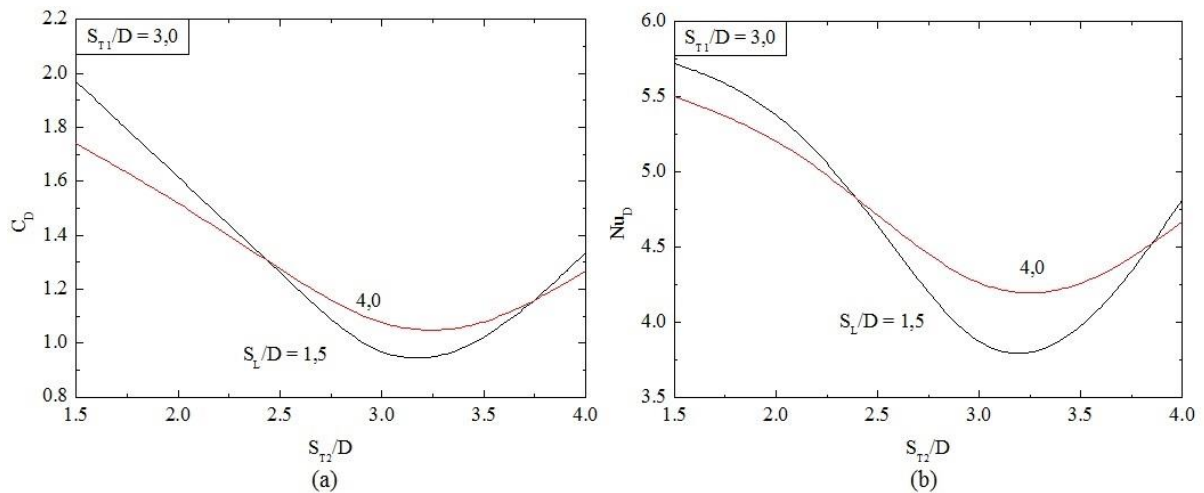


Figura 5 Efeito do parâmetro S_{T2}/D no C_D (a) e Nu_D (b) para cada passo longitudinal (S_L/D) com $S_{T1}/D = 3,0$.

A análise do número de Nusselt do arranjo de quatro cilindros acompanhou a tendência do coeficiente de arrasto, apresentando os valores maximizados quando $S_{T1}/D = 1,5$. Porém, mesmo não sendo o objetivo do estudo, quando analisamos as geometrias que obtiveram os piores resultados em $S_{T1}/D = 3,0$, é demonstrada uma maior sensibilidade quanto ao passo longitudinal, mostrando uma influência desse parâmetro superior a 10%.

A Figura 6 mostra o efeito da razão de S_{T2}/D no coeficiente de arrasto do arranjo (C_D) para $S_{T1}/D = 4,0$ e $S_L/D = 1,5$ e $4,0$. Para os casos estudados, o coeficiente decresceu em todos os casos com o crescimento do passo longitudinal dos cilindros posteriores.

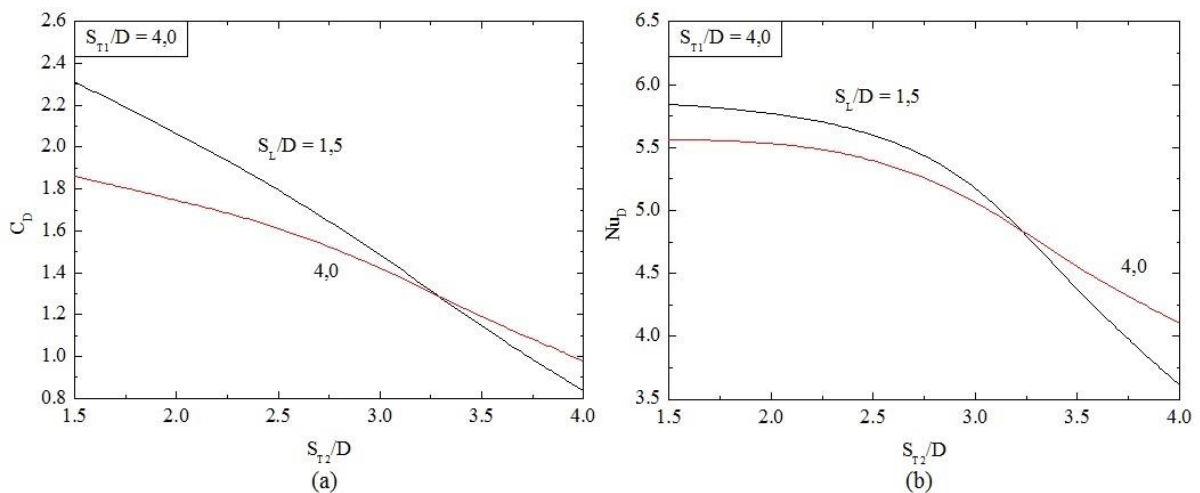


Figura 6 Efeito do parâmetro S_{T2}/D sobre C_D (a) e Nu_D (b) para $S_{T1}/D = 4,0$ e $S_L/D = 1,5$ e $4,0$.

A tendência dos valores ocorreu conforme esperado, o que faz com que a menor resistência ao escoamento ocorra quando os cilindros estiverem alinhados uma vez que o passo longitudinal entre os cilindros frontais está em seu valor mínimo.

Referente ao campo térmico, em geral, a Fig. 6(b) mostra que o número de Nusselt segue a mesma tendência dos resultados de C_D , decrescendo à medida que o

passo transversal dos cilindros posteriores aumenta, principalmente para valores acima de 2,5.

As Figuras 7(a) e 7(b) mostram o efeito da razão S_{T1}/D sobre os valores de C_D uma vez minimizado (C_{Dm}) e Nu_D uma vez maximizado (Nu_{Dm}) para as duas diferentes razões de passo longitudinal estudadas ($S_L/D = 1,5$ e $4,0$).

Nos casos analisados o C_D sofre um decréscimo com o aumento da razão S_{T1}/D , obtendo-se o C_{Dm} para a maior razão de S_{T1}/D . Também nota-se que a taxa de decréscimo de C_{Dm} com S_{T1}/D é maior para $S_L/D = 1.5$ do que para 4.0 , devido a maior interação das camadas limite fluidodinâmicas. Com relação ao campo térmico, os maiores Nu_{Dm} foram obtidos para as maiores razões de S_{T1}/D para ambos casos de S_L/D . Por fim, observou-se também que há um ponto de ótimo local para as menores razões de S_{T1}/D e os piores desempenhos foram obtidos para razões intermediárias de S_{T1}/D .

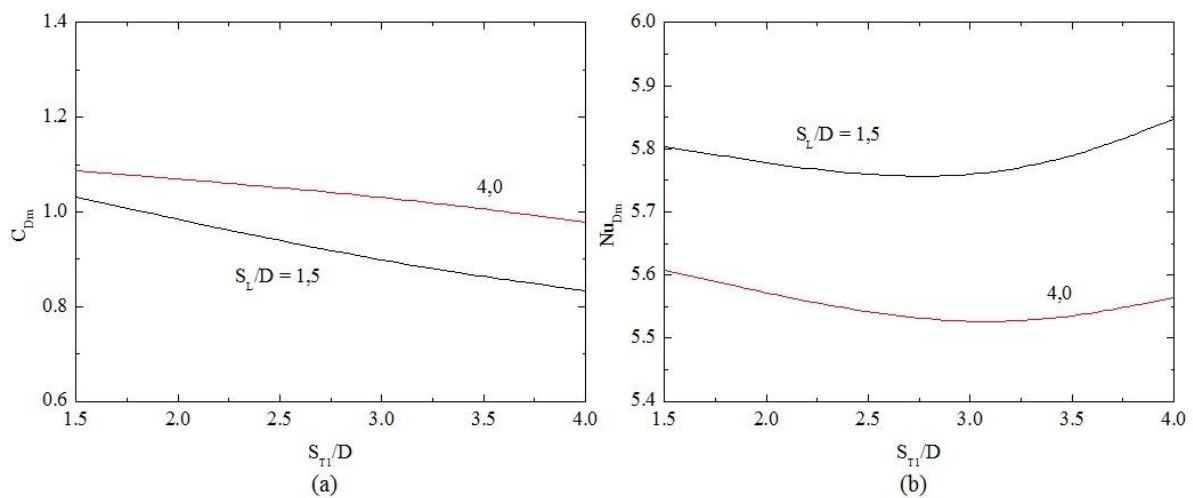


Figura7 – Valores de C_D uma vez minimizado (a) e Nu_D uma vez maximizado (b) para cada passo transversal dos cilindros frontais S_{T1}/D em função do passo longitudinal S_L/D .

A Figura 8 apresenta o efeito da razão S_{T1}/D sobre o $(S_{T2}/D)_o$ para o C_D (a) e Nu (b). Para os casos estudados a razão S_L/D não mostrou sensibilidade no efeito de S_{T1}/D sobre $(S_{T2}/D)_o$, independente da função objetivo estudada. Com relação ao efeito de S_{T1}/D sobre $(S_{T2}/D)_o$ observou-se que o aumento do S_{T1}/D conduz a um aumento de $(S_{T2}/D)_o$ para o caso onde o coeficiente de arrasto é uma vez minimizado (C_{Dm}). Dessa forma observa-se que a geometria recomendada para o C_{Dm} tende a ser obtida para arranjos alinhados, com exceção das menores razões de S_{T1}/D , onde o escoamento entre os cilindros passa a ter grande importância. Para o caso térmico é observado justamente o efeito contrário, no qual os valores de $(S_{T2}/D)_o$ decrescem com o aumento da razão S_{T1}/D .

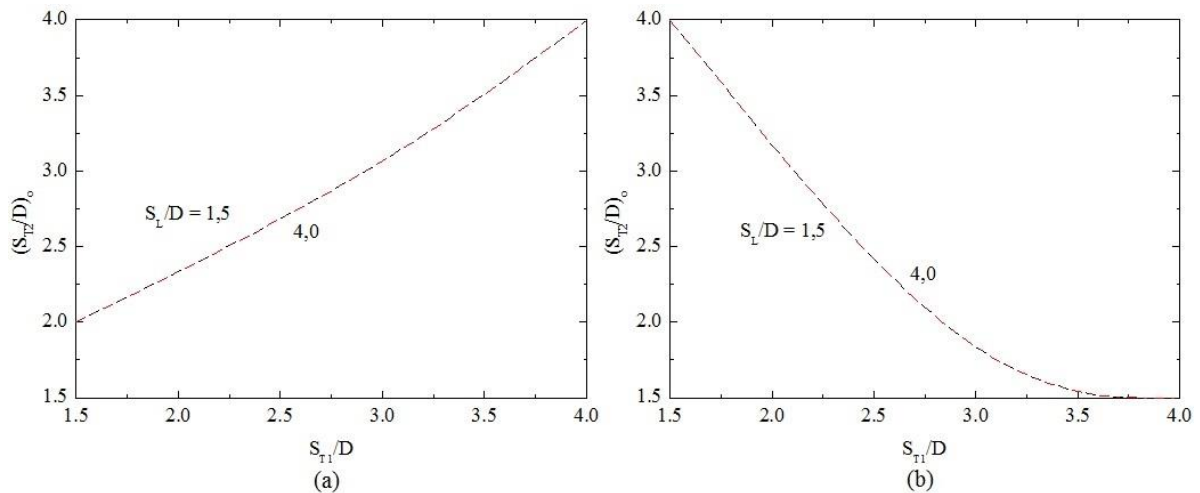


Figura 8 – Valores de C_D uma vez minimizado (a) e Nu_D uma vez maximizado (b) para cada passo transversal dos cilindros frontais S_{T1}/D em função do passo longitudinal S_L/D .

5 CONCLUSÕES

Um estudo numérico foi conduzido para avaliar o efeito da mudança de geometria do arranjo formado por quatro cilindros em um escoamento laminar com convecção forçada empregando Design Construtal. As simulações foram realizadas para números de Reynolds e Prandtl de $Re_D = 100$ e $Pr = 0,71$ respectivamente, avaliando o efeito de três graus de liberdade, S_{T1}/D (razão entre o passo transversal entre os cilindros frontais e o diâmetro), S_L/D (razão do passo longitudinal, entre os cilindros frontais e posteriores, e o diâmetro) e S_{T2}/D (razão entre o passo longitudinal entre os cilindros posteriores e o diâmetro).

O principal objetivo foi avaliar a influência da geometria do arranjo no coeficiente de arrasto (C_D) e no número de Nusselt (Nu_D) entre os cilindros e o escoamento circundante. Para essa análise preliminar foram utilizados os valores de $S_{T1}/D = 1,5; 3,0$ e $4,0$, $S_L/D = 1,5$ e $4,0$ e $S_{T2}/D = 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5$ e $4,0$.

Os resultados mostraram que em $S_{T1}/D = 1,5$ o arranjo alinhado não conduziu ao menor valor de C_D , o que se deve a grande proximidade dos cilindros causar uma região de maior pressão ocasionando em uma maior resistência à passagem do escoamento. Vale destacar que esse não era o comportamento intuitivamente esperado, justificando um estudo de avaliação geométrica nesse tipo de problema. Neste caso o menor C_D ocorreu no primeiro afastamento dos cilindros posteriores, em $S_{T2}/D = 2,0$.

Para os casos em que $S_{T1}/D = 3,0$ e $4,0$, as geometrias que levaram a um menor C_D foram as do arranjo alinhado, $S_{T2}/D = 3,0$ e $4,0$ respectivamente, ambas com o menor passo longitudinal admitido, $S_L/D = 1,5$.

O efeito da razão S_{T2}/D sobre o C_D e sobre o Nu_D é fortemente dependente da razão S_{T1}/D . Dessa forma, os resultados indicam que não há um comportamento universal para a influência de uma razão geométrica sobre o desempenho fluidodinâmico ou térmico

A fim de ampliar a análise da influência geométrica sobre o comportamento do escoamento sobre o arranjo de quatro cilindros, faz-se necessário novos estudos que contemplem outras razões de S_L/D e S_{T1}/D , como também um maior refinamento nos pontos em que forem obtidos os melhores resultados das variáveis analisadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barros et al. “Mixed Convective Influence over the Geometrical Optimization of a Triangular Arrangement of Cylinders in Laminar Flows”, Scientia Plena 2015.

Bejan, A., Shape and Structure, from Engineering to Nature. Cambridge University Press, Cambridge, UK; 2000.

Bejan, A., “Convection Heat Transfer”, John Wiley, Durham, USA, 2004.

Bejan A, Lorente S, Lee J. Unifying Constructal theory of tree roots, canopies and forests. Journal of Theoretical Biology; vol 254: pp.529–40, 2008.

FLUENT 6.3.26. “User’s Guide”. Fluent Inc, 2006.

Ganapathy, V., Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators Design, Applications, and Calculations. ISBN: 0-8247-0814-8

Lam et al. (2007) “Numerical simulation of cross-flow around four cylinders in an in-line square configuration, Journal of fluids and structures. 24 (2008) 34–57.

Patankar, S.V. “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, McGraw-Hill, New York, USA, 1980.

Shah, R. K. Fundamentals of heat exchanger design / Ramesh K. Shah, Dus̃an P. Sekulic´ . p. cm. ISBN 0-471-32171-0, 2003 by John Wiley & Sons, Inc

Versteeg, H. K., Malalasekera, W., “An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method”, 1st Ed, Longman, England, 2007.

Xie Z H, Chen L G, Sun F R. Constructal optimization of twice level Y-shaped assemblies of fins by taking maximum thermal resistance minimization as objective. Sci China Tech Sci, 2010, 53(10): 2756–2764.