

XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS  
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING  
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

## **OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE ESCOAMENTOS COM CONVECÇÃO FORÇADA SOBRE UM ARRANJO TRIANGULAR DE CORPOS ROMBUDOS QUADRADOS**

**Filipe Branco Teixeira**

**Martim dos Santos Pereira**

**Bruno Costa Feijó**

fbrancoteixeira@gmail.com

martimpereyra@gmail.com

bruno.feijo1989@gmail.com

Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, km 8, Carreiros,  
96203-900 – Rio Grande, RS, Brasil.

**Luiz Alberto Oliveira Rocha**

luizrocha@mecanica.ufrgs.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rua  
Sarmiento Leite, 425, 90050-170 - Porto Alegre, RS, Brasil

**Jhon Nero Vaz Goulart**

**Tiago de Melo**

jvaz@unb.br

tiago.melomec@gmail.com

Grupo de Mecânica Experimental e Computacional, Universidade de Brasília, Gama, DF,  
72.405-610, CP 8114, Brasil.

**Liércio André Isoldi**

**Elizaldo Domingues dos Santos**

elizaldosantos@furg.br

liercioisoldi@furg.br

Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, km 8, Carreiros, 96203-900 – Rio Grande, RS, Brasil.

**Resumo.** *O presente estudo consiste na avaliação numérica de um arranjo triangular de corpos rombudos 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 corpos rombudos e dois graus de liberdade:  $S_T/D$  (razão da distância entre o centro dos corpos rombudos posteriores e a dimensão de suas arestas),  $S_L/D$  (razão da distância longitudinal entre os centros dos corpos rombudos, frontal e posteriores, e a dimensão de suas arestas). 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 corpos rombudos e o escoamento circundante, assim como, os valores ótimos de  $S_T/D$  para seis razões de  $S_T/D = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5$  e  $4.0$  e seis passos longitudinais  $S_L/D = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5$  e  $4.0$ . Os resultados mostraram que a alteração da razão  $S_T/D$  e  $S_L/D$  possuem influência sobre os coeficientes de arrasto e número de Nusselt do arranjo triangular de corpos rombudos, bem como, sobre as geometrias que conduzem aos melhores desempenhos fluido dinâmico e térmico do escoamento.*

**Palavras-chave:** *Design Construtal, convecção forçada, arranjo triangular, escoamento externo, corpos rombudos.*

## 1 INTRODUÇÃO

A importância do estudo das formas geométricas e do arranjo dos obstáculos em problemas de transferência de calor tem ficado cada vez mais evidente à medida que novas necessidades surgem. A compactação é um aspecto importante. Atualmente, é cada vez mais necessário reduzir as dimensões dos sistemas embarcados mantendo-se a mesma taxa de transferência de calor. É devida as questões espaciais que o Design Construtal apresenta meios de estudo que possam oferecer métodos de avaliação de desempenho a partir da variação das geometrias do sistema. O Design Construtal 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.

Estudos dedicados a três cilindros foram abordados no trabalho de Bao et al. (2010). Neste estudo, para um escoamento isotérmico, laminar, incompressível e sobre um arranjo triangular de cilindros foi investigada utilizando variações nos ângulos dos vértices e nas distancias dos cilindros. No trabalho de Pouryousssefi et al. (2011) avaliou-se escoamentos em regime laminar e turbulento através de um arranjo triangular de três tubos por meio de um aparato experimental para analisar o efeito do espaçamento dos tubos nos padrões de escoamento e coeficientes aerodinâmicos. Em estudos mais recentes, Galarça et al. (2015) realizou uma avaliação numérica para realizar a otimização geométrica de um arranjo triangular de cilindros submetido a um escoamento laminar e com convecção forçada. Barros et al (2015) também estudou o comportamento de escoamentos em arranjos triangulares de cilindros, porém, neste caso o escoamento avaliado é transiente e com convecção mista, mas também em regime laminar.

Neste trabalho, é realizada a avaliação numérica para um arranjo triangular de corpos rombudos de seção transversal quadrada e sua influência sobre o coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) e Número de Nusselt ( $Nu_D$ ). A geometria do arranjo é variada de acordo com o Design Construtal mantendo-se sempre o corpo frontal centralizado no domínio do escoamento e alterando os passos longitudinais  $S_L/D$  (razão da distância longitudinal entre os centros dos corpos rombudos, frontal e posteriores, e a dimensão de suas arestas) e transversais  $S_T/D$  (razão da distância entre o centro dos corpos rombudos posteriores e a dimensão de suas arestas). A área dos corpos rombudos e área de ocupação dos mesmos são constantes do problema. A dimensão dos corpos rombudos é mantida constante de modo que apenas dois graus de liberdade sejam variados. Este arranjo é submetido a um escoamento laminar, permanente com convecção forçada. 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 ( $Nu_L$ ) entre os corpos rombudos e o escoamento circundante, assim como, os valores ótimos de  $S_T/D$  e  $S_L/D$ .

## 2 MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA

Levando em consideração um escoamento com propriedades físicas constantes, incompressível, laminar, permanente, bidimensional e com uma convecção forçada, sua modelagem 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  $\rho$  é a massa específica do fluido ( $\text{kg/m}^3$ );  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $\alpha$  é a difusividade térmica ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $v_i$  é a velocidade do fluido na direção  $i$ ,  $i = 1, 2$  e  $3$  ( $\text{m/s}$ );  $x_i$  corresponde a coordenada espacial na direção  $i$ ,  $i = 1, 2$  e  $3$  ( $\text{m}$ );  $P$  é a pressão ( $\text{N/m}^2$ );  $T$  é a temperatura ( $\text{K}$ );  $\delta_{ij}$  é o operador delta de Kronecker;  $g_i$  é a aceleração da gravidade na direção  $i$ ;  $\Omega$  é o domínio espacial ( $\text{m}$ );  $t$  representa o domínio de tempo ( $\text{s}$ ), e  $q'''$  é o termo fonte de energia, que para os casos simulados no presente trabalho é nulo ( $\text{W/m}^3$ ).

## 3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema em questão trata de um escoamento laminar, incompressível em regime permanente onde há transferência de calor através de convecção forçada por um sistema que consiste em um arranjo triangular de corpos rombudos quadrados conforme pode ser visto na Fig. 1. O escoamento é causado pela imposição de um perfil de velocidades ( $V_\infty = 50 \text{ m/s}$ ) constante na entrada do canal. Este escoamento possui uma temperatura prescrita ( $T_\infty = 300\text{K}$ ) inferior a temperatura dos corpos rombudos ( $T_s = 320\text{K}$ ), e assim, a transferência de calor por convecção forçada ocorre devido à diferença de temperatura acima citada. As outras condições de contorno incluem superfícies do domínio sem deslizamento e impermeável ( $V_1 = V_2 = 0 \text{ m/s}$ ). Na saída do domínio, é imposta uma condição de fluxo de calor nulo e pressão atmosférica ( $101,325 \times 10^3 \text{ Pa}$ ). A Figura 1 ainda mostra as dimensões do domínio, onde os parâmetros  $S_T/D$  e  $S_L/D$  referem-se respectivamente à razão do passo transversal do corpo rombudo frontal e a dimensão de sua aresta, e razão do passo longitudinal entre o corpo rombudo frontal e os corpos rombudos posteriores e a dimensão de sua aresta.

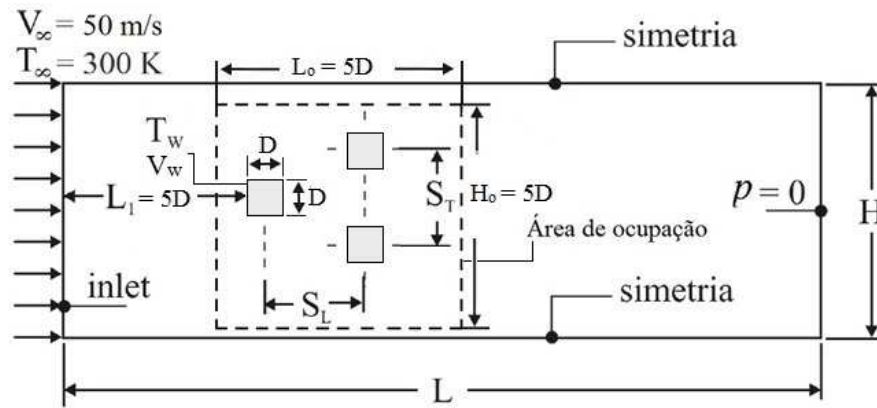


Figura 1. Domínio computacional empregado nas simulações do presente trabalho.

O método Design Construtal (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008) foi empregado para avaliação geométrica do problema em questão. Este método baseia-se no princípio de objetivos e restrições (locais e globais) sendo o método usado para aplicação da Lei Constructal. Para o problema analisado, foram definidas como restrições geométricas do problema:

- 1) A área ocupada pelos três corpos rombudos quadrados é a mesma em todos os casos e também são considerados corpos de arestas iguais.  $A_t = A_{c1} + A_{c2} + A_{c3}$
- 2) A área de ocupação da simulação é definida como  $A_0 = H_0 \times L_0 = 25D^2$
- 3) Restrição física do tamanho do domínio, todas simulações tem o mesmo valor fixado em  $H = 10D$  e  $L = 50D$ . Onde  $D$  é a dimensão da aresta do corpo rombudo quadrado ( $D = 0,1$  m).
- 4) Os valores do espaçamento transversal entre os corpos rombudos posteriores não pode exceder a altura do domínio computacional utilizado.  $S_T + D < H_0$ .
- 5) Os valores do espaçamento longitudinal entre os corpos rombudos deve ser maior do que uma dimensão, e menor que a largura do domínio computacional utilizado.  $S_L > D$  e  $S_L + D < L_0$

Os dois graus de liberdade do problema são as razões:  $S_T/D$  (razão do passo transversal dos corpos rombudos posteriores), e  $S_L/D$  (razão do passo longitudinal entre o corpo rombudo frontal e os corpos rombudos posteriores, e a dimensão da aresta deles) os quais concedem ao arranjo uma forma triangular. É considerado também que os corpos rombudos posteriores estão à mesma distância longitudinal do corpo rombudo a montante podendo assumir quaisquer relações de proporção geométrica dentro da restrição de área total constante.

O processo de otimização é dividido em duas etapas, conforme ilustra a Fig. 2. No primeiro passo, a geometria é otimizada pela variação do grau de liberdade  $S_T/D$ . A geometria que conduzir ao maior valor do número de Nusselt ( $Nu_{Dm}$ ) será uma vez otimizada  $(S_T/D)_o$ . Contudo, para o coeficiente de arrasto, o objetivo é minimizar sua magnitude, portanto o mesmo processo é utilizado para encontrar o valor do coeficiente de arrasto uma vez minimizado  $C_{Dm}$ . Em um passo posterior, a razão  $S_T/D$  é variada para diferentes valores de  $S_L/D$ . O maior número de Nusselt obtido será o número de Nusselt duas vezes maximizado ( $Nu_{Dmm}$ ) e a geometria ótima correspondente será  $(S_T/D)_{oo}$  (duas vezes otimizada) e  $(S_L/D)_o$  (uma vez otimizada), sendo o mesmo procedimento efetuado para atingir o valor do coeficiente de arrasto duas vezes minimizado ( $C_{Dmm}$ ).

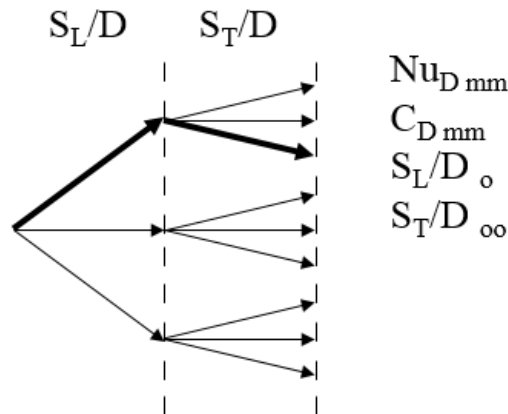


Figura 2. Diagrama ilustrando o processo de avaliação da geometria do canal.

#### 4 VERIFICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

As Eqs. (1) – (3) são resolvidas através do software comercial de dinâmica dos fluidos computacional FLUENT (CFD – do inglês: *Computational Fluid Dynamics*) que é baseado no método de volumes finitos (MVF) (Versteeg e Malalasekera, 2007; Patankar, 1980; FLUENT, 2007). Em todas as simulações foram empregados volumes finitos triangulares, com uma malha de 60,000 volumes para o teste de independência de malha. A malha foi refinada próxima as superfícies dos corpos rombudos para capturar os maiores gradientes de velocidades e temperaturas. Cada linha das faces dos corpos rombudos foi dividida em 20 volumes. Um exemplo de malha empregada pode ser visualizado na Fig. 3 para o caso com  $S_L/D = 3,0$  e  $S_T/D = 1,5$ .

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).

As simulações numéricas foram realizadas usando um computador com um processador quad-core Intel core i7 com 3,6 GHz e 16GB de memória RAM. O tempo de processamento para cada simulação foi de aproximadamente  $12,6 \times 10^3$  s

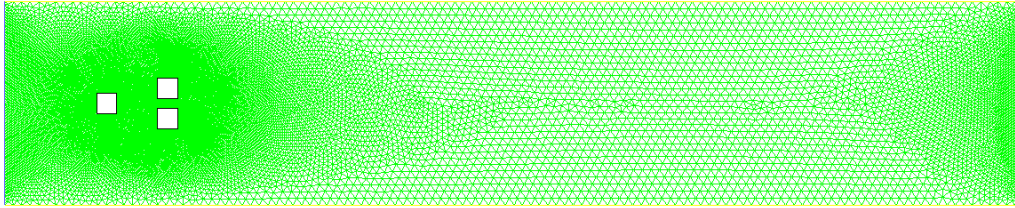


Figura 3. Discretização empregada no domínio com corpos rombudos.

Para verificar o código, a simulação foi rodada e comparada aos trabalhos de Sahu et. al. (2009) e dos Santos et. al. (2009) com os devidos parâmetros ajustados. Na figura 4 pode-se notar que os resultados estão de acordo, apresentando diferenças inferiores a 3%. Além disso, foram utilizados  $Re_D = 100$  e  $Pr = 0,71$ .

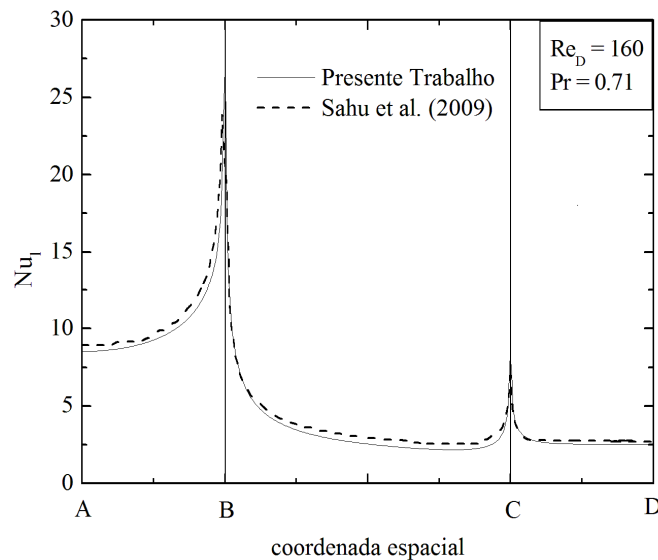


Figura 4. Comparação do número de Nusselt local entre o código do presente trabalho e o apresentado em Sahu et. al (2009).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para este trabalho, foi realizada uma modelagem utilizando três corpos rombudos com o objetivo de analisar a taxa de transferência de calor que ocorre entre o fluido e os corpos rombudos. A Figura 5 mostra o efeito do passo transversal ( $S_T/D$ ) sobre o coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) para vários valores de  $S_L/D$  do arranjo triangular de corpos rombudos. Conforme mencionado anteriormente, em todos os casos simulados os parâmetros do escoamento foram mantidos constantes  $Re_D = 100$  e  $Pr = 0,71$ .

É possível notar que o comportamento das curvas é bastante semelhante e que para todas as razões de  $S_L/D$  o coeficiente de arrasto tende a cair com a diminuição da razão de  $S_T/D$ . Isto pode ser explicado pela redução do efeito de “barreira” causado pelos corpos rombudos com o seu afastamento longitudinal ocasionando uma performance aerodinâmica superior. Por outro

lado, o distanciamento transversal aumenta esse efeito para todas as razões de  $S_L/D$  o que nos leva a um desempenho aerodinâmico inferior.

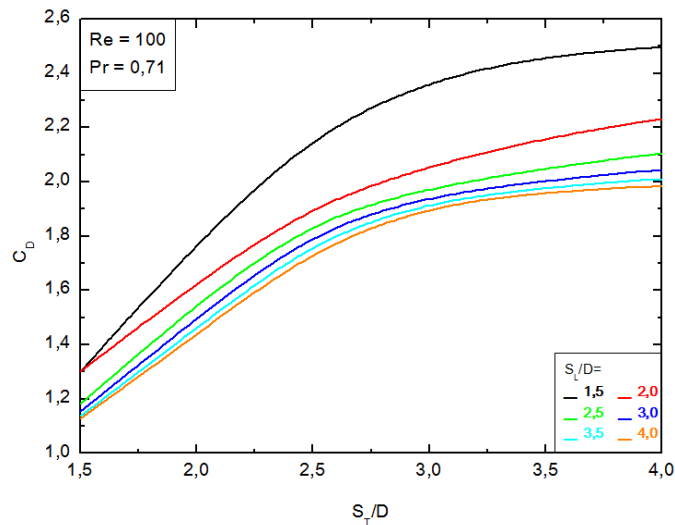


Figura 5. Efeito da razão  $S_T/D$  sobre o coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) para várias razões de  $S_L/D$ .

Para o coeficiente de arrasto o objetivo é a sua minimização. Vemos que o melhor caso ( $S_T/D = 1,5$  e  $S_L/D = 4,0$ ) apresentou  $C_D$  74,61% inferior ao pior ( $S_T/D = 4,0$  e  $S_L/D = 1,5$ ). Analisando-se do ponto de vista de minimização do  $C_D$ , o afastamento transversal dos corpos rombudos é prejudicial pois, como nota-se na Figura 6, o aumento da razão  $S_T/D$  causa um aumento na área que resiste ao escoamento, independente do passo longitudinal estudado. Pode ser observado pelos campos de velocidades que, para a menor razão  $S_L/D = S_T/D = 1,5$  o conjunto de corpos rombudos se comporta como um único corpo (Fig. 6(a)). Enquanto, para maiores razões de  $S_L/D$ , mesmo a menor razão de  $S_T/D$  conduz a uma variação do campo de velocidades do corpo a montante para os corpos a jusante, conforme pode ser visto nas Figs. 6(a) e 6(c) para  $S_T/D = 1,5$  e Figs. 6(b) e 6(d) para  $S_T/D = 4,0$ .

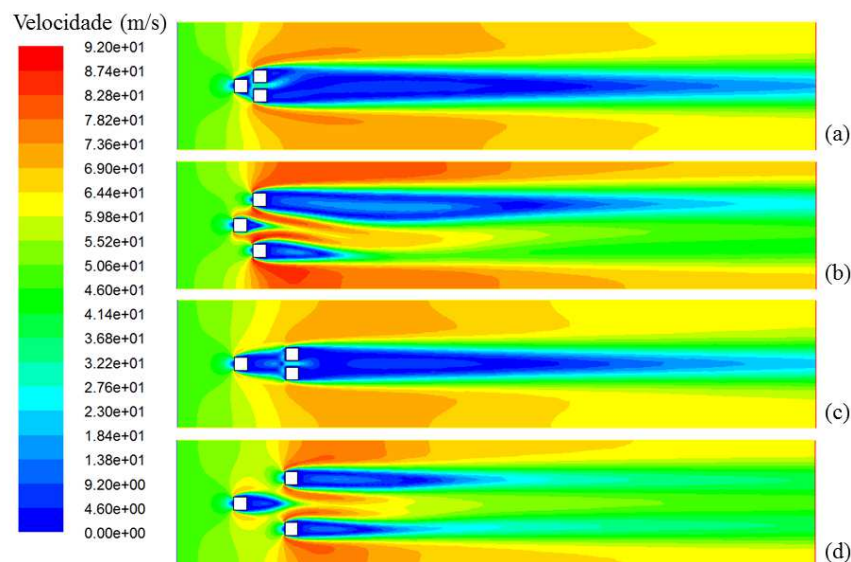


Figura 6. Campo de velocidades para (a)  $S_T/D=1,5$  e  $S_L/D=1,5$ ; (b)  $S_T/D=4,0$  e  $S_L/D=1,5$ ; (c)  $S_T/D=1,5$  e  $S_L/D=4,0$  e (d)  $S_T/D=4,0$  e  $S_L/D=4,0$ .



Na Figura 7 analisam-se os efeitos dos passos longitudinais e transversais quanto ao número de Nusselt. Aqui, percebe-se que os maiores passos transversais são os que conduzem aos melhores desempenhos. Também se observa que a menor razão  $S_L/D = 1,5$  leva ao melhor desempenho entre os passos longitudinais. Isto ocorre devido ao aumento da quantidade de movimento entre os corpos rombudos o que ocasiona também uma maior taxa de transferência de calor.

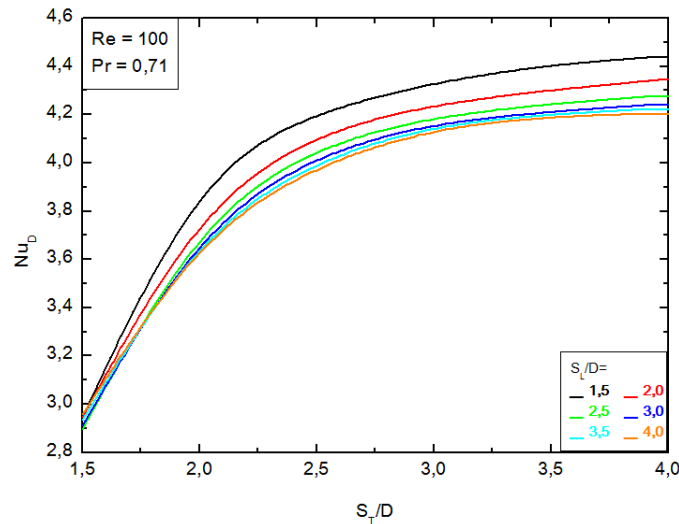


Figura 7. Efeito da razão  $S_T/D$  sobre o número de Nusselt ( $Nu_D$ ) para várias razões de  $S_L/D$ .

Para o número de Nusselt o objetivo é a sua maximização. Vemos que o melhor caso ( $S_T/D = 4,0$  e  $S_L/D = 1,5$ ) apresentou  $Nu_D$  33,42% superior ao pior ( $S_T/D = 1,5$  e  $S_L/D = 4,0$ ). A avaliação do campo de temperaturas demonstra a importância do passo transversal  $S_T/D$  na troca térmica ocorrida. A Figura 8 apresenta o comportamento da temperatura nos casos extremos de melhor e pior  $Nu_D$ . Aqui observa-se que para um  $S_T/D = 4,0$  e  $S_L/D = 1,5$  (Fig.8 (b)), o espaçamento que proporcionou a maior velocidade de escoamento também propiciou as menores temperaturas no domínio. O aumento da quantidade de movimento na fenda gerada pelo espaçamento transversal dos corpos rombudos explica a diminuição de temperatura no entorno destes. Este comportamento era esperado uma vez que a geometria em questão gera também o maior arrasto no sistema, como visto na Fig. 5.

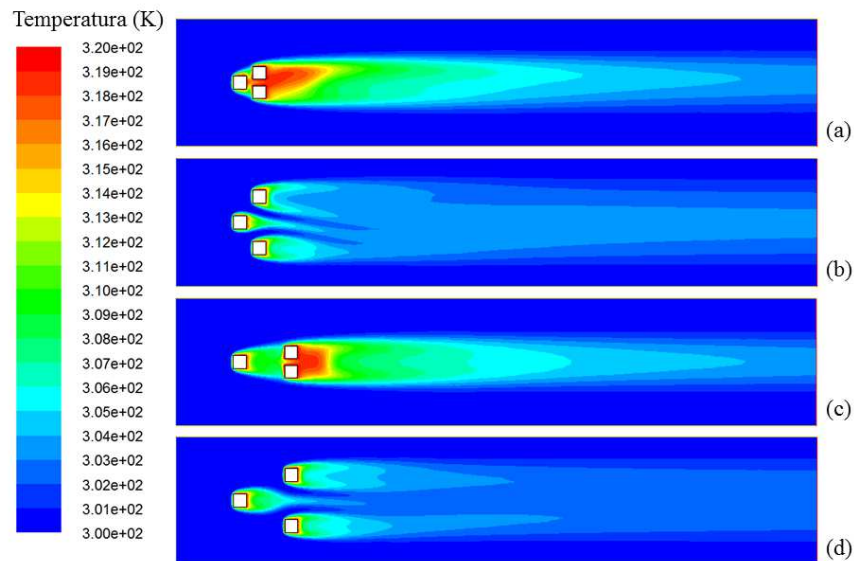


Figura 8. Campo de temperaturas para (a)  $S_T/D=1,5$  e  $S_L/D=1,5$ ; (b)  $S_T/D=4,0$  e  $S_L/D=1,5$ ; (c)  $S_T/D=1,5$  e  $S_L/D=4,0$  e (d)  $S_T/D=4,0$  e  $S_L/D=4,0$ .

A Figura 9 nos mostra os valores de  $C_D$  mínimos para  $S_L/D$  uma vez otimizado. Como pode-se notar, o comportamento do  $C_D$  foge ao esperado para os passos de  $S_L/D = 1,5$  e  $2,0$  que não apresentam a redução imaginada, o que pode se dever ao fato do distanciamento longitudinal ser muito pequeno não ocasionando variação apreciável no arrasto em um escoamento laminar.

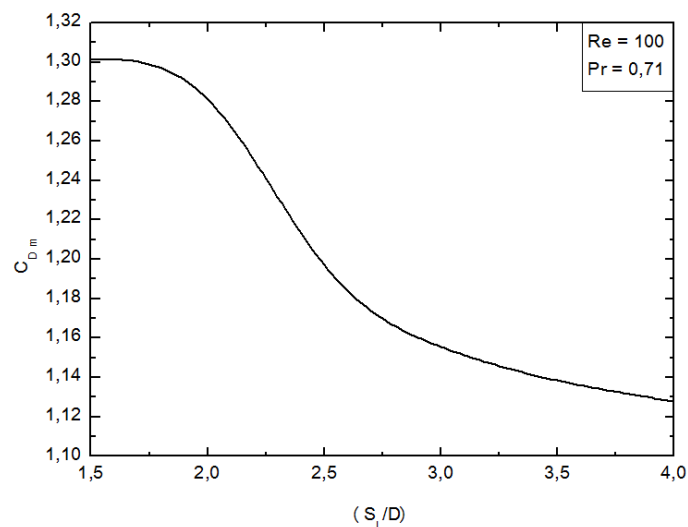


Figura 9. Efeito da razão  $S_L/D$  sobre  $C_D$  uma vez minimizado ( $C_{D,m}$ ).

Contudo, como pode-se observar na Figura 10, que um maior distanciamento longitudinal dos corpos rombudos ( $S_L/D \geq 2,5$ ) acarreta em uma diferença de pressão notável, especialmente na face dos corpos a montante do escoamento. A redução de pressão nesta face entre os passos  $S_L/D=1,5$  e  $4,0$  na ordem de 80% (Fig.10 (a) e (d)) justificam a melhor performance fluidodinâmica e conseqüente queda no valor de  $C_D$ .

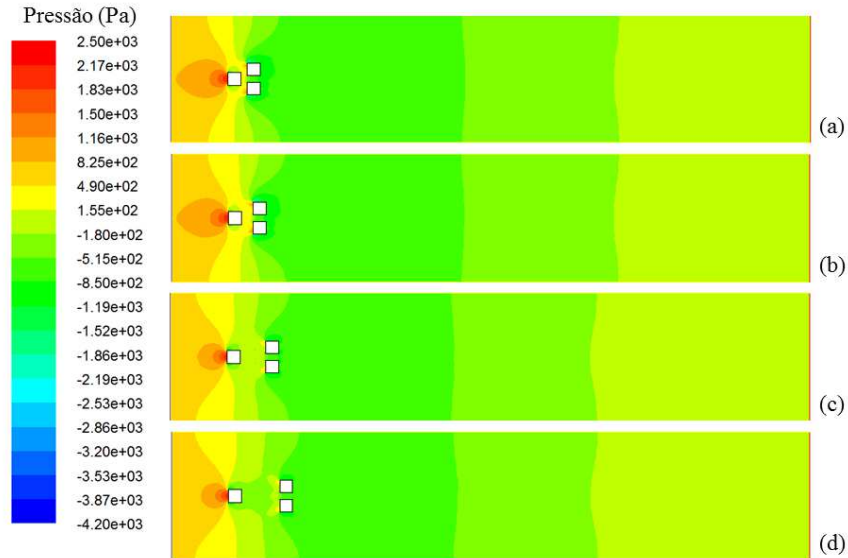


Figura 10. Campo de pressões para (a)  $S_T/D=1,5$  e  $S_L/D=1,5$ ; (b)  $S_T/D=1,5$  e  $S_L/D=2,0$ ; (c)  $S_T/D=1,5$  e  $S_L/D=3,0$  e (d)  $S_T/D=1,5$  e  $S_L/D=4,0$ .

A Figura 11 comprova a redução do número de Nusselt em cada passo longitudinal dado o que colocaria o valor de  $S_L/D=2,0$  sendo o pior possível com praticamente o mesmo  $C_D$  e pior  $Nu_D$  se comparado à  $S_L/D=1,5$ .

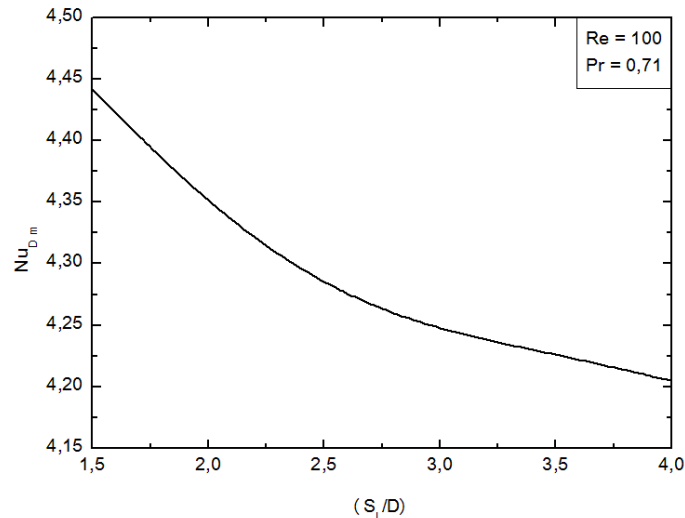


Figura 11. Efeito da razão  $S_L/D$  sobre  $Nu_D$  uma vez maximizado ( $Nu_{D,m}$ ).

A Figura 12 esquematiza o melhor passo transversal  $S_T/D_m$  para  $C_D$  minimizado (a) e  $Nu_D$  maximizado (b) respectivamente. Observa-se que a tendência esperada para o menor coeficiente de arrasto quando o passo transversal foi o menor analisado realmente ocorreu e da mesma forma, o maior número de Nusselt ocorreu para o maior passo transversal analisado.

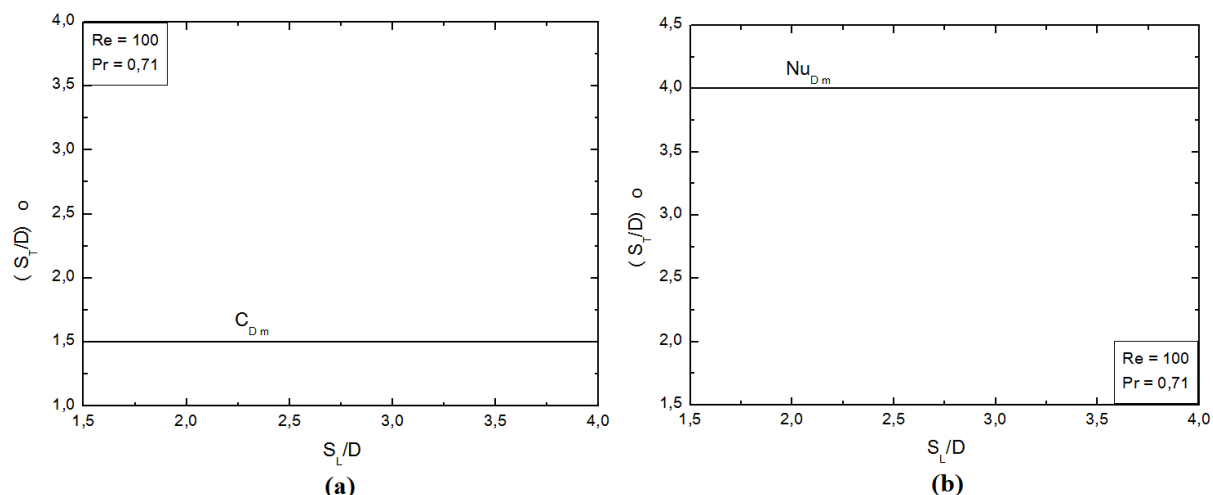


Figura 12.  $S_T/D$  otimizado em função de  $S_L/D$  para  $C_D$  minimizado (a) e  $S_T/D$  otimizado em função de  $S_L/D$  para  $Nu_D$  maximizado (b)

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, os efeitos da variação geométrica de um arranjo triangular de corpos rombudos com seção transversal quadrada foram analisados de forma numérica para um escoamento laminar permanente e com convecção forçada empregando o Design Construtal. As simulações foram realizadas para números de Reynolds e Prandtl de  $Re_D = 100$  e  $Pr = 0,71$  respectivamente, avaliando dois graus de liberdade,  $S_T/D$  (razão da distância entre o centro dos corpos rombudos posteriores e suas arestas),  $S_L/D$  (razão da distância longitudinal entre os centros dos corpos rombudos, frontal e posteriores, e suas arestas).

O estudo avaliou a influência da geometria do arranjo no coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) e no número de Nusselt ( $Nu_D$ ) entre os corpos rombudos. As simulações foram executadas para seis razões de  $S_T/D = 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5$  e  $4,0$  e seis razões de  $S_L/D = 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5$  e  $4,0$ .

Foi observado que para todo passo longitudinal dado, os menores valores de  $C_D$  ocorreram sempre para o menor passo transversal ( $S_T/D = 1,5$ ) e de maneira oposta, para todo passo longitudinal dado o maior valor de  $Nu_D$  ocorreu para as maiores razões do passo transversal ( $S_T/D = 4,0$ ). Além disso, para o número de Nusselt, a menor razão de  $S_L/D$  foi a que conduziu ao melhor desempenho, mesmo que os corpos rombudos posteriores estejam mais próximos ao corpo rombudo a montante, o que poderia ser prejudicial do ponto de vista de formação de camada limite térmica. Contudo, a quantidade de movimento é aumentada na fenda e conduz a um aumento da energia transferida. Com isso, para o coeficiente de arrasto, o melhor caso ( $S_T/D = 1,5$  e  $S_L/D = 4,0$ ) apresentou  $C_D$  74,61% inferior ao pior ( $S_T/D = 4,0$  e  $S_L/D = 1,5$ ) e para o  $Nu_D$ , o melhor caso ( $S_T/D = 4,0$  e  $S_L/D = 1,5$ ) apresentou  $Nu_D$  33,42% superior ao pior ( $S_T/D = 1,5$  e  $S_L/D = 4,0$ ) o que comprova a importância em analisar o problema do ponto de vista geométrico.

## **7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Bejan, A., 2000, *Shape and structure, from engineering to nature*, Cambridge University, Cambridge, UK.

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.

Bao, Y., Zhou, D. and Huang, C., 2010, Numerical simulation of flow over three circular cylinders in equilateral arrangements at low Reynolds number by a second-order characteristic-based split finite element method, *Computers & Fluids*, Vol. 39, N. 5, pp. 882-899.

Pouryoussefi, S.G., Mirzaei, M. and Pouryoussefi, S.M.-H., 2011, Force coefficients and Strouhal numbers of three circular cylinders subjected to a cross-flow, *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 81, N. 11, pp. 1725-1741.

Galarça, M. M., Cardoso, F. R., Razera, A. L., Acunha Jr., I. C., Isoldi, L. A., Porte, A. F., Rocha, L. A. O., dos Santos, E. D., Otimização geométrica de um arranjo triangular de cilindros submetido a escoamento laminar com convecção forçada, *Scientia Plena*, Vol.11, Num.02 (2015)

Barros, G. M., do Carmo, D. M., Cermin, R., Galarça, M. M., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., dos Santos, E. D., Influência da convecção mista sobre a otimização geométrica de um arranjo triangular de cilindros em escoamentos laminares., *Scientia Plena*, Vol.11, Num.08 (2015)

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

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

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

Sahu, A. K., Chhabra, R. P., Eswaran, V., 2009, “Effects of Reynolds and Prandtl numbers on heat transfer from a square cylinder in the unsteady flow regime”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 839 – 850.

dos Santos, E.D., Dall’Agnol, A., Petry, A.P., Rocha, L.A.O., *Heat Transfer Optimization of Cross-Flow Over Assemblies of Bluff Bodies Employing Constructal Principle*, COBEM 2009.

FLUENT 6.3.26. “*User’s Guide*”. Fluent Inc, 2007.

## **8 AVISO DE RESPONSABILIDADE**

O autor é o único responsável pelo material impresso incluído neste paper.