

Trabalho de Graduação

**“Redução do coeficiente de Atrito por Adição de Ranhuras
em Escoamentos em Dutos e Placas Planas”**

Aluno: Victor Hideki Iha

Orientador: Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa

11 de Novembro de 2014

Índice

1. Resumo	4
Lista de Figuras	5
Lista de Tabelas	5
Nomenclatura	6
2. Introdução	7
3. Revisão Bibliográfica	9
3.1 Tipos de escoamento e Número de Reynolds	9
3.2 Papel das ranhuras na redução do coeficiente de atrito	10
3.3 Configurações de ranhuras	12
4 Correlações para Cálculo de Coeficiente de Atrito	14
4.1 Dutos.....	14
4.2 Escoamento Externo em Placa Plana.....	19
4.3 Cálculo da redução percentual do coeficiente de atrito	20
5. Método Numérico	21
5.1 Dutos.....	22
5.2 Escoamento Externo em Placa Plana.....	24
6 Resultados.....	26
6.1 Teste de Validade	26
6.1.1 Teste de Validade para Dutos	26
6.1.2 Teste de Validade para Escoamento Externo Em Placa Plana.....	28
6.2 Resultados	30
6.2.1 Resultados para Dutos	30
6.2.1 Resultados para Escoamento Externo em Placa Plana	31
7 Análise.....	33
8. Conclusão.....	34
9. Referências Bibliograficas	35

Agradecimentos:

Este trabalho não poderia ter sido realizado sem a colaboração de diversas pessoas as quais presto minha homenagem:

A minha família que sempre me ajudou a alcançar meus objetivos, em especial minha mãe, Adriana Sato Iha, que sempre me deu todo o suporte e apoio necessário para realizar todos meus sonhos e anseios.

A meus amigos que me ajudam em todos os momentos.

Ao Professor Eugênio Spanó Rosa pela paciência e suporte na realização deste trabalho.

1. Resumo

Foi estudada a redução do coeficiente de atrito em escoamentos em regime turbulento através da adição de ranhuras na superfície orientadas paralelamente ao fluxo.

A redução do coeficiente de atrito observada após a adição de ranhuras é estimada usando o software CFD (Computational Fluid Dynamics) PHOENICS através de simulações numéricas.

As simulações foram feitas usando água escoando em velocidades que variam de 1m/s a 5m/s. Foram feitas simulações para dutos lisos e para placas planas lisas e posteriormente adicionaram-se ranhuras do tipo quadrada para analisar a redução do coeficiente de atrito devido à alteração da superfície.

Com as configurações usadas, foram observadas reduções percentuais de aproximadamente 19% em escoamentos em placas planas e 33% em dutos.

Lista de Figuras

Figura 1 Tipos de Ranhuras Bidimensionais: a) Dente-de-serra b) Parabólica c) Quadrada (lamina).....	12
Figura 2 Diagrama De Moody.....	15
Figura 3 Balanço de forças em uma seção transversal infinitesimal do domínio.....	16
Figura 4 Representação esquemática de escoamento em Duto Liso	18
Figura 5 Camada Limite	19
Figura 6 Malha Unitária	22
Figura 7 Representação esquemática do escoamento em dutos com ranhuras	24
Figura 8 Representação esquemática do escoamento em Placa plana com Ranhuras	25
Figura 9 Sobreposição de Curvas (Método Numerico e Equação 5).....	27
Figura 10 Sobreposição de Curvas (Numérico e Equação 16).....	29
Figura 11 Gráfico Cf x Re para Dutos	31
Figura 12 Gráfico Cf X Re para Placas Planas.....	32

Lista de Tabelas

Tabela 1 Resultados sumarizados para escoamentos externo (esquerda) e em dutos (direta) (Bhushan, B & Bixler, G. (2013)).....	13
Tabela 2 Resultados de Ali & Fatlawie (2011).....	14
Tabela 3 - Tabela de validação de Resultados (Dutos).....	27
Tabela 4 - Tabela de validação de Resultados (Placa Plana).....	29
Tabela 5 - Coeficiente de atrito em Dutos.....	30
Tabela 6 - Coeficiente de atrito em Placas Planas.....	32

Nomenclatura

Letras Latinas

U	Velocidade	(m/s)
U_m	Velocidade Média	(m/s)
D_h	Diâmetro Hidraulico	(m)
Y_+	Distância Adimensional da Parede	-
Re	Número de Reynolds	-
C_f	Fator De Atrito de Fanning	-
P	Pressão	(Pa)
S	Perímetro	(m)
A	Área	(m ²)
f	Fato de Atrito de Darcy-Weisbach	-
k	Rugosidade na parede	-

Letras Gregas

μ	viscosidade dinâmica	(Pa.s)
ρ	massa específica do fluido	(Kg/m ³)
τ_w	Tensão de cisalhamento	(Pa)
δ	espessura da camada limite	(m)

2. Introdução

A natureza está repleta de exemplos de estruturas e materiais de extrema engenhosidade. Frequentemente, usando a engenharia reversa, estas características podem ser estudadas e usadas como base para inovações em aplicações comerciais. Um exemplo, e inspiração deste trabalho, pode ser visto na pele de certos tubarões de nado rápido que possuem escamas tipo placoides cuja microestrutura é reconhecida por diminuir o coeficiente de atrito. Tal estrutura é tema de diversas pesquisas e aplicações comerciais, como em trajes de natação, revestimento de lanchas e aviões.

Para o estudo deste trabalho, é conveniente iniciar com a tipificação dos escoamentos. Serão estudados os escoamentos ditos internos e externos.

Em situações reais, é comum encontrar escoamentos na superfície de objetos não confinados, como por exemplo, escoamento em torno de um avião ou carro. Estes são chamados de escoamentos externos.

Também são comuns escoamentos confinados, ou seja, completamente envolvido por uma superfície sólida, as quais afetam as características do escoamento na região de análise. Para estes casos, é dado o nome de escoamento interno.

Escoamentos externos e internos estão sujeitos a forças contrárias ao sentido de escoamento. Estes são chamados de arrasto de pressão e o arrasto de atrito. *“A contribuição relativa de cada uma varia com o regime do escoamento e com as condições da superfície do corpo. O arrasto de pressão depende, basicamente, da forma do corpo e pode ser reduzido a um mínimo como, por exemplo, em um elipsoide de revolução exposto a um escoamento paralelo ao eixo de simetria do corpo. O arrasto de atrito não depende significativamente da forma do corpo; entretanto, é influenciado pelas características da superfície.”*, Fox et al. (2004).

Este último tipo de arrasto pode ser entendido simplificadaamente se comparado com um deck de cartas de baralho deslizando por uma mesa. O atrito atua entre a mesa e a primeira carta, assim como entre cada carta até o topo, e é análogo às interações viscosas entre as moléculas de um fluido escoando. Portanto, a medida que se afasta da superfície de um objeto dentro de um escoamento, cada camada de fluido tem uma velocidade maior até atingir a velocidade de corrente livre de escoamento. Assim pode-se entender o arrasto de atrito como uma medida para transferir momento entre o fluido e o objeto para criar o gradiente de velocidade na camada entre o mesmo e a parte não perturbada do escoamento.

Usando um software de simulação numérica CFD (Computational Fluid Dynamics), é possível simular escoamentos em diferentes condições e usar método numérico para resolver equações de mecânica dos fluidos. Através do software, será mostrada a redução do coeficiente de atrito devido à adição de ranhuras na superfície onde ocorre o escoamento.

Foram estudadas quatro condições de escoamento. Primeiramente, com o objetivo de validar os modelos usados, foram criados casos em escoamento interno e externo com superfícies lisas. No segundo momento foram acrescentadas, aos escoamentos (interno e externo), ranhuras paralelas do tipo quadrada as quais, os resultados numéricos mostram reduções percentuais de até 33% e 19% respectivamente.

Este trabalho foi dividido em seções. A seção 3 mostra uma revisão bibliográfica de outros estudos semelhante aos aqui conduzidos. Em sequência, na seção 4, foram explicitadas as bases teóricas usadas nas correlações matemáticas para os cálculos do coeficiente de atrito tanto em dutos como em Placas Planas. O método numérico, validações e resultados estão na seção 5 e 6. Por fim, tem-se uma análise e conclusão na seção 7 e 8 respectivamente. A lista de referência bibliográfica utilizada encontra-se na seção 9.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Tipos de Escoamento e Número de Reynolds

Para execução deste trabalho, os estudos estão limitados apenas a escoamentos viscosos, incompressíveis. Tendo isso em vista, podemos simplificarmente, separar os escoamentos em laminar ou turbulento que segundo Fox et al. (2004):

“Um escoamento laminar é aquele no qual as partículas fluidas movem-se em camadas, ou lâminas; um escoamento turbulento é aquele no qual as partículas fluidas rapidamente se misturam, enquanto se movimentam ao longo do escoamento, devido a flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidades.”

Em 1880, Osborne Reynolds, engenheiro britânico propôs um número adimensional que permite avaliar o tipo de escoamento (laminar/turbulento), sendo este a razão entre as forças inerciais e forças viscosas presentes em um escoamento (Equação 1).

$$RE_L = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} \quad (1)$$

Onde, “U” é a velocidade do escoamento, “L” é a distância característica da placa, “μ” é a viscosidade dinâmica do fluido e “ρ” é a massa específica do fluido. Para dutos, “L” torna-se “D_h” diâmetro hidráulico para o fluxo no duto, e “U” a velocidade média do fluido. Para placas planas “L” torna-se a distância do bordo de ataque e “U” a velocidade na posição “L”.

A transição entre escoamento laminar e turbulento depende dos parâmetros descritos pelo número de Reynolds, rugosidade da superfície e de perturbações

externas. Tal transição ocorre por volta de $Re = 2.300$ para dutos e $Re = 500.000$ para escoamentos em placas planas.

Neste trabalho, foram estudados apenas os escoamentos em regime turbulento.

3.2 Papel das Ranhuras na Redução do Coeficiente de Atrito

A adição de ranhuras é a primeira vista contra intuitivo para redução do coeficiente de atrito, já que as ranhuras aumentam a superfície molhada do escoamento, o que normalmente aumentaria o coeficiente de atrito. Contudo, a presença das ranhuras possui dois efeitos, dos quais podemos destacar:

“... um é elevar e fixar os vórtices, e o outro é diminuir o arrasto (atrito) devido as próprias ranhuras” Bhushan, B. & Bixler G. D.(2013)”

Com a adição das ranhuras, os vórtices gerados no escoamento turbulento, onde as velocidades instantâneas são maiores, passam a se formar acima das ranhuras, portanto interagem somente com as pontas das mesmas. Deste modo, somente a área reduzida das pontas das ranhuras experimentam elevadas tensões de cisalhamento, enquanto a maior parte da superfície esta sujeita a tensões consideravelmente menores devido às velocidades instantâneas menores.

“Outra consideração para otimização das ranhuras inclui o uso de parâmetros adimensionais (distância adimensional da parede). Estes são denotados pelo simbolo “+”, o que permite melhor comparação dos experimentos...” Bhushan, B. & Bixler G. D.(2013)

A distância adimensional da parede (Y^+) pode ser calculada pela equação 2, que multiplica a velocidade de atrito (equação 3) pela distância de atuação da subcamada limite laminar (y) e dividida pela viscosidade cinemática, ν .

$$Y^+ = \frac{y \cdot U^*}{\nu} \quad (2)$$

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3)$$

Onde τ_w é tensão de cisalhamento e ρ é a densidade do fluido.

A função de se determinar Y^+ e a dimensão da subcamada laminar é criar ao menos um elemento de malha dentro deste espaço, de forma que os efeitos ali contidos sejam capturados pela simulação.

As ranhuras possuem ainda outro efeito citado por Bhushan, B. & Dean, B. (2010).

“O mecanismo no qual as ranhuras interagem e impedem a translação dos vórtices é complexa, e o fenômeno não é completamente conhecido. A nível prático, o escoamento acima de suas pontas, as ranhuras reduzem a translação transversal dos vórtices presentes na subcamada viscosa, diminuindo a transferência de momento transversal e conseqüentemente o arrasto de atrito experimentado pelo corpo.”

3.3 Configurações de Ranhuras

A formação dos vórtices em local desejado, ou seja, acima das ranhuras depende completamente da geometria e dimensões das ranhuras. Os tipos mais comuns de ranhuras estudadas são as ranhuras bidimensionais que consistem na extrusão contínua de uma seção transversal dada na direção do escoamento.

Segundo Bhushan & Bixler (2013), os tipos de ranhuras mais usadas são as do tipo dente-de-serra, parabólica e quadrada (lamina), esta última o alvo de estudo deste trabalho, as quais estão representadas abaixo na figura 1.

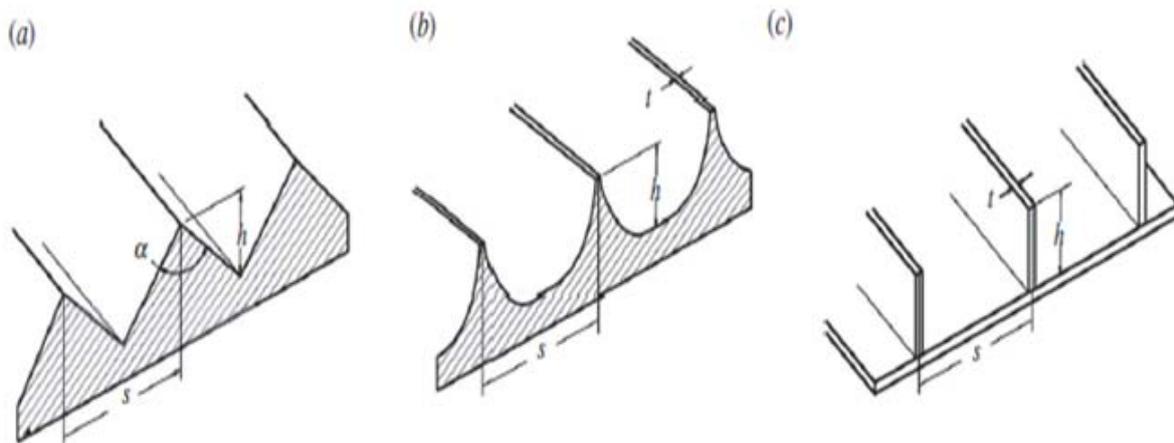


Figura 1 Tipos de Ranhuras Bidimensionais: a) Dente-de-serra b) Parabólica c) Quadrada (lamina)

As principais dimensões, que estão representadas na figura 1, são a altura (h), espaçamento (s) e espessura (t).

Uma avaliação experimental da redução de atrito para escoamento interno e externo com diferentes tipos de ranhuras foi sumarizada por Bhushan & Bixler (2013) e estão mostradas na tabela 1 a seguir.

Fluid	Riblet design	Riblet configuration	Riblet material	Maximum turbulent drag reduction	Fluid	Riblet design	Riblet configuration	Riblet material	Maximum turbulent pressure drop/drag reduction		
Water	Sawtooth	Continuous	Polymer	8%	Water	Blade	Aligned segmented	Acrylic	23% ^{a)}		
	Sawtooth	Continuous	Vinyl	9%		Blade and sawtooth	Aligned segmented and continuous	Vinyl and acrylic	22% ^{a)}		
	Sawtooth	Continuous	Vinyl	6%			Sawtooth	Continuous	Vinyl	9%	
	Sawtooth	Continuous	Vinyl	13%				Sawtooth	Continuous	Polymer	28%
	Sawtooth	Continuous	Polymer	7%					Sawtooth	Continuous	Vinyl
Oil	Blade, sawtooth and scalloped	Continuous	Brass and Plexiglas	9.9%	Oil		Blade	Aligned segmented and continuous		Acrylic	7% ^{a)}
	Blade	Staggered segmented	Brass	7%	Air	Blade	Continuous	Polymer	3%		
	Blade	Continuous	Titanium & nickel	4.9%		Blade and sawtooth	Aligned segmented and continuous	Vinyl and acrylic	11% ^{a)}		
	Sawtooth	Continuous	Polyurethane	7.6%			Sawtooth	Continuous	Epoxy	7%	
Air	Blade	Continuous	Metal & polymer	8.5%							
	Blade	Staggered segmented	Epoxy	7%							
	Sawtooth, scalloped and bullnose	Continuous	Aluminum and vinyl	8%							
	Sawtooth, scalloped and bullnose	Continuous	Aluminum and vinyl	8%							

Tabela 1 Resultados sumarizados para escoamentos externo (esquerda) e em dutos (direta) (Bhushan, B & Bixler, G. (2013))

Pode-se verificar que as maiores reduções do coeficiente de atrito em dutos (tabela a direita) são para o caso em que foi usada ranhura do tipo quadrada. Neste caso, foi observada uma redução percentual de 23% em relação ao caso liso.

No experimento conduzido por Ali & Fatlawie (2011), foram feitos dois tipos de experimentos. O primeiro com escoamento uma superfície aberta e lisa, e em um segundo momento, foram adicionadas as ranhuras de diversas dimensões, por fim os resultados foram comparados obtendo reduções percentuais de redução de arrasto. Os resultados estão mostrados abaixo na tabela 2.

Riblet cases	Width, w (mm)	Spacing, s (mm)	Height, h (mm)	Drag Reduction R_D %
2D Straight model				
<i>(w, s) constant</i>				
Case. 1	1	1	0.125	5
Case. 2	1	1	0.25	14
Case. 3	1	1	0.5	10.3
Case. 4	1	1	0.75	-15
<i>(w, h) constant</i>				
Case. 5	2	1	0.25	14
Case. 6	2	2	0.25	2
Case. 7	2	3	0.25	-15
<i>(s, h) constant</i>				
Case. 8	1	2	0.25	13.2
Case. 6	2	2	0.25	2
Case. 9	3	2	0.25	1.5
3D Sinusoidal model				
<i>(w, s) constant</i>				
Case. 1	1	2	0.125	8.6
Case. 2	1	2	0.25	14
Case. 3	1	2	0.5	4
Case. 4	1	2	0.75	1.3
<i>(s, h) constant</i>				
Case. 1	1	2	0.125	8.6
Case. 5	2	2	0.125	19
<i>(w, h) constant</i>				
Case. 6	1	1	0.125	3.5
Case. 1	1	2	0.125	8.6

Tabela 2 Resultados de Ali & Fatlawie (2011)

Pode-se verificar que as maiores reduções do coeficiente de atrito são para o caso em que foi usada ranhura do tipo quadrada com dimensões do tipo 2 da tabela 2. Neste caso, foi observada uma redução percentual de 14% em relação ao caso liso.

4 Correlações para Cálculo de Coeficiente de Atrito

4.1 Dutos

Em 1944, L.D. Moody, criou experimentalmente um diagrama para dutos, com fatores de atrito para diferentes números de Reynolds, usando o fator de atrito de Darcy-Weisbach, como visto na figura 2.

O fator de atrito de Darcy-Weisbach pode ser calculado de diversas formas, sendo que as formas mais usuais para seu cálculo são feitas através de duas equações; uma para regime laminar, equação 4, e outra para regime turbulento,

equação 5, a equação de Colebrook-White, que é um ajuste matemático para a curva encontrada experimentalmente por Moody. Ambas as equações mostradas a seguir, respectivamente.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k}{3.7 \cdot D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (5)$$

Onde “k” é a rugosidade na parede e o número de Reynolds (Re) é definido pela equação 6 (equação 1 modificada para dutos).

$$Re = \frac{D_h \rho U}{\mu} \quad (6)$$

Sendo D_h o diâmetro hidráulico, “ ρ ” a massa específica do fluido e “ μ ” a viscosidade dinâmica do fluido.

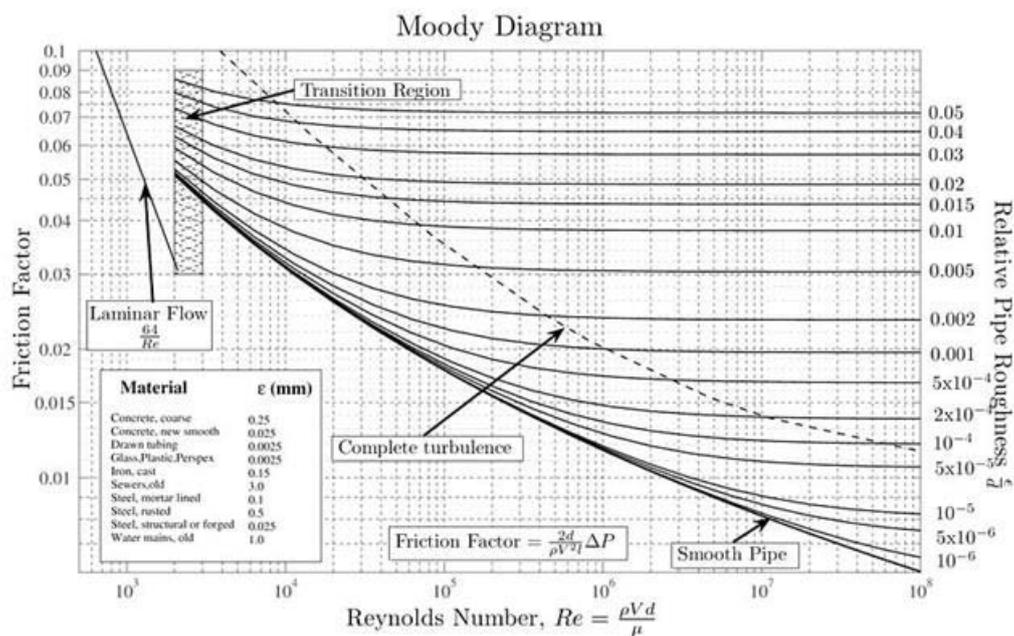


Figura 2 Diagrama De Moody

Os resultados deste trabalho serão quantificados através da determinação de um número adimensional, o fator de atrito de Fanning C_f , que está relacionado à tensão de cisalhamento na parede, e é dado pela equação 7.

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (7)$$

Onde, τ_w é a tensão de cisalhamento na parede, ρ é a densidade do fluido e U é a velocidade média do fluido no duto.

O fator de atrito de Fanning é um quarto do fator de atrito de Darcy-Weisbach usado no diagrama de Moody, ou seja:

$$C_f = \frac{f}{4} \quad (8)$$

Portanto, torna-se fácil, através do fator de atrito de Fanning usar o diagrama de Moody para verificação dos resultados obtidos.

O cálculo da tensão de cisalhamento τ_w para escoamento completamente desenvolvido pode ser facilmente feito para dutos de seção uniforme com um simples balanço de forças em uma seção transversal infinitesimal do domínio como mostrado a seguir na figura 3 e equações 9 e 10.

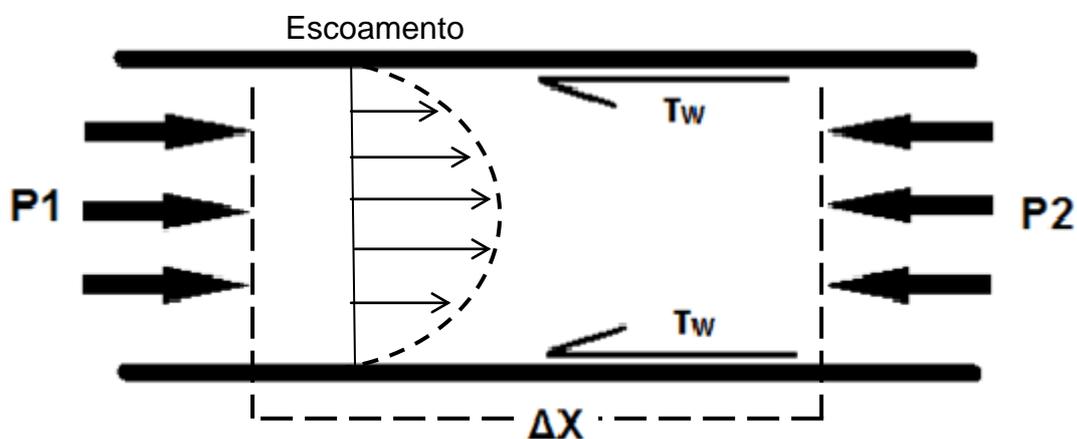


Figura 3 Balanço de forças em uma seção transversal infinitesimal do domínio

$$P_1 A - P_2 A = \tau_w S \Delta x \Leftrightarrow \tau_w = \frac{(P_1 - P_2)A}{\Delta x S} = \frac{dP}{dx} \cdot \frac{A}{S} \quad (9)$$

Onde “A” é a área da seção transversal, “S” o perímetro e “P” as pressões de entrada e saída.

$$\tau_w = \frac{(P_1 - P_2)A}{\Delta x S} = \frac{dP}{dx} \cdot \frac{A}{S} \quad (10)$$

Ou seja, a tensão de cisalhamento, e conseqüentemente o fator de atrito em uma seção uniforme, depende apenas do gradiente de pressão do escoamento desenvolvido:

$$C_f = \frac{2}{\rho \cdot U^2} \cdot \frac{dP}{dx} \cdot \frac{A}{S} \quad (11)$$

Para um canal formado por placas paralelas infinitas (figura 4), e desprezando as ranhuras devido a sua área extremamente pequena, pode-se dizer que a área e o perímetro da seção transversal são dados por:

$$A = H \cdot L \quad (12)$$

$$S = 2 \cdot (H + L) \quad (13)$$

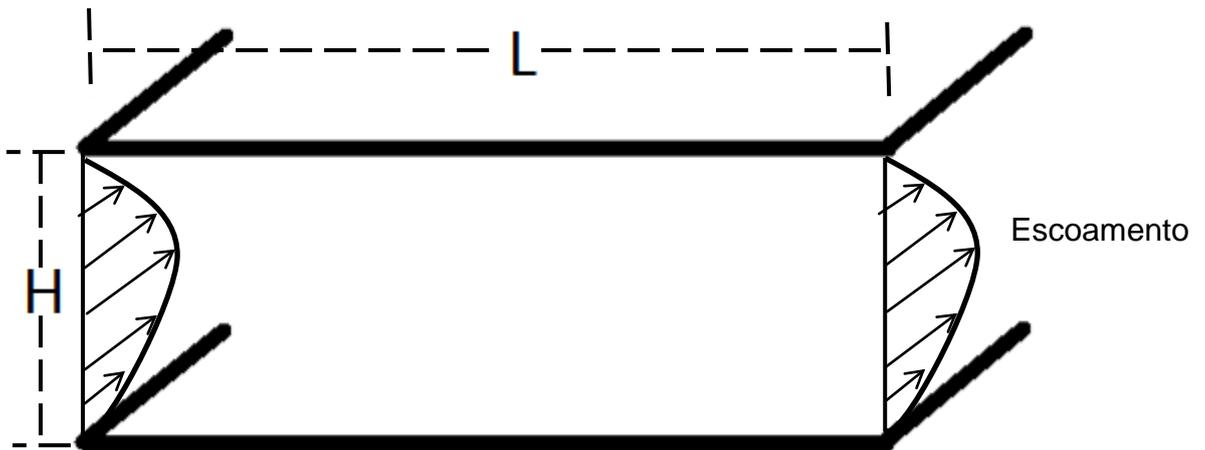


Figura 4 Representação esquemática de escoamento em Duto Liso

Onde “L” é a largura da seção transversal e “H” a distância entre as placas.

Assim, no limite onde “L” tende a infinito, tem-se que a relação “A/S” tende a H/2:

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{A}{S} = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{H \cdot L}{2(H + L)} = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{H \cdot L}{2L \left(1 + \frac{H}{L}\right)} = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{H}{2 \left(1 + \frac{H}{L}\right)} = \frac{H}{2} \quad (14)$$

Portanto, tem-se que a tensão de cisalhamento τ_w , equação 10, na parede é dada simplificada por:

$$\tau_w = \frac{dP}{dx} \frac{H}{2} \quad (15)$$

Deste modo, podemos calcular o fator de atrito de Fanning (Equação 7), através do gradiente de pressão aplicado ao duto, e da velocidade média na direção do escoamento, como na equação 16.

$$C_f = \frac{\frac{dP}{dx} \frac{H}{2}}{\frac{1}{2} \rho U_m^2} \quad (16)$$

4.2 Escoamento Externo em Placa Plana

Em uma seção transversal de um escoamento em placa plana, a velocidade varia de zero até a velocidade de corrente livre (longe da superfície e de suas influências) como visto na figura 5. A variação da velocidade ocorre devido ao atrito. Pode-se dizer que existe uma região de influência do atrito, e quando esta adquire uma pequena espessura, toma a forma de uma camada e é chamada de camada limite (δ). Já muito longe da superfície de contato do fluido com a superfície, não existe mais a influência nem da superfície nem da viscosidade.

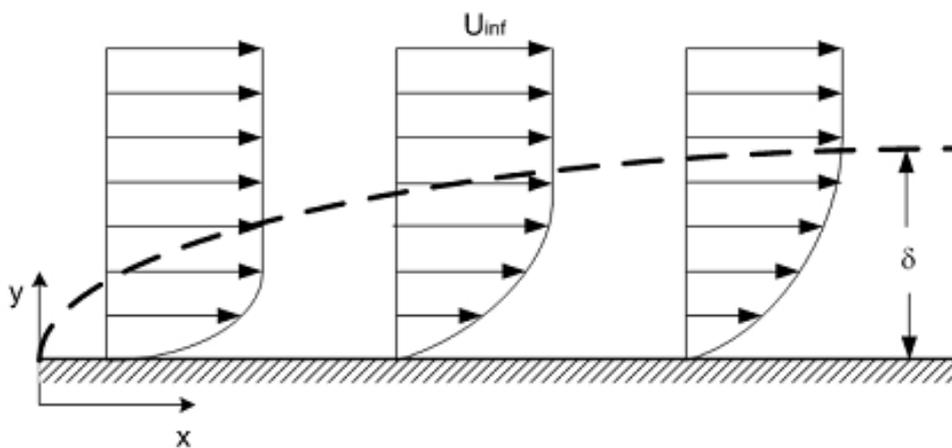


Figura 5 Camada Limite

Por Fox et al. (2004), a espessura da camada limite para placa plana para escoamentos em regime turbulento é:

$$\frac{\delta}{x} = 0.382 \left(\frac{\nu}{U \cdot x} \right)^{\frac{1}{5}} = \frac{0.382}{Re_x^{\frac{1}{5}}} \quad (17)$$

Onde “ ν ” é a viscosidade cinemática, “ U ” a velocidade e “ x ” a distância do bordo de ataque.

Definida a espessura da camada limite (δ) para escoamento turbulento em placas planas, pode-se então determinar o coeficiente de atrito para placa plana que será usada para usada para quantificar este trabalho, que por Incropera et al. (2006), é:

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho U^2} = \frac{0.0594}{Re_x^{1/5}} \quad (18)$$

Experimentalmente, foi mostrado que a equação 18, é válida para Reynolds até 10^8 , Incropera et al.(2006).

4.3 Cálculo da redução percentual do coeficiente de atrito

Para determinar se a adição de ranhuras causam ou não uma redução no coeficiente de atrito (C_f), é introduzido o fator R_{Cf} , que faz uma comparação relativa entre o coeficiente de atrito (C_f) para o duto liso ou placa plana lisa, contra o coeficiente de atrito para o duto com ranhura ou placa plana com ranhura ($C_{f,n}$), utilizando método numérico.

$$R_{Cf} = \frac{C_f - C_{f,n}}{C_f} \quad (19)$$

5. Método Numérico

Foi usado o CFD-PHOENICS (Computational Fluid Dynamics) para modelagem computacional dos escoamentos em dutos e em placas planas em regime turbulento.

Foram realizadas simulações com diferentes velocidades tanto para escoamento em dutos como para placas planas.

Começando em aproximadamente 5.0m/s e diminuindo até 1.0m/s foi possível determinar numericamente o fator de atrito, C_f em função do número de Reynolds.

Com os resultados foi possível validar os modelos matemáticos usados comparando os resultados numéricos obtidos com a equação de Colebrook-White (equação 5) ou graficamente com o diagrama do Moody, para dutos lisos e com a equação 16 para placas planas lisas.

Como Fluido de trabalho, foi usada a água a 20 °C, e suas propriedades foram assumidas como constantes.

Em todas as simulações foi usado o modelo de turbulência KECHEN (Chen-Kim two equation K-e model), que de acordo com o manual do programa, é recomendado para o caso deste trabalho.

As malhas foram cuidadosamente calculadas para cada velocidade de escoamento levando em consideração os efeitos das paredes e as formações dos vórtices. Para tanto, o parâmetro adimensional Y^+ foi mantido em 100, como mostrado abaixo na equação 20.

$$100 = Y^+ = \frac{\delta \cdot U^*}{\nu} \rightarrow \delta = \frac{100 \cdot \nu}{\sqrt{\frac{C_f \cdot U_\infty^2}{2}}} \quad (20)$$

Onde δ é a distância do centro do primeiro volume até a parede, como ilustrado na figura 6.

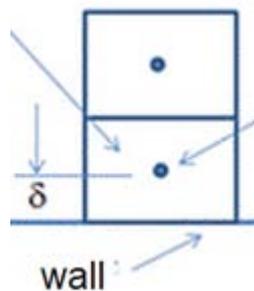


Figura 6 Malha Unitária

Foram usadas iterações o bastante para que os valores simulados praticamente parassem de variar, e fosse atingido um nível de resíduo baixo.

Assim como no experimento de Ali & Fatlawie (2011), foram simulados o caso com superfície lisa (sem ranhuras) e o caso com a adição de ranhuras.

5.1 Dutos

Para a simulação do escoamento em um duto de seção transversal constante, será assumido um escoamento longe da região de entrada, portanto, já plenamente desenvolvido, então não sendo necessário o calculo na região de entrada.

Adotou-se como domínio simulado uma seção transversal ao escoamento englobando apenas uma seção transversal (“SLAB”), que contém apenas uma

ranhura, tornando os cálculos mais eficientes, como demonstrado a seguir, segundo S.V. Patankar, C. H. Liu & Sparrow, E. M (1977).

$$\text{Massa} \rightarrow \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} = 0 \quad (21)$$

$$\text{Momento Z} \rightarrow \frac{\delta(\rho uw)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho vw)}{\delta y} = -\frac{dP}{dz} + \mu \left(\frac{\delta^2 w}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 w}{\delta y^2} \right) \quad (22)$$

$$\text{Momento X} \rightarrow \frac{\delta(\rho uu)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho vu)}{\delta y} = -\frac{dP}{dx} + \mu \left(\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} \right) \quad (23)$$

$$\text{Momento Y} \rightarrow \frac{\delta(\rho vu)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho vv)}{\delta y} = -\frac{dP}{dy} + \mu \left(\frac{\delta^2 v}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta y^2} \right) \quad (24)$$

Como o fluxo é completamente desenvolvido, a equação de conservação de massa não possui dw/dz , e se reduz para:

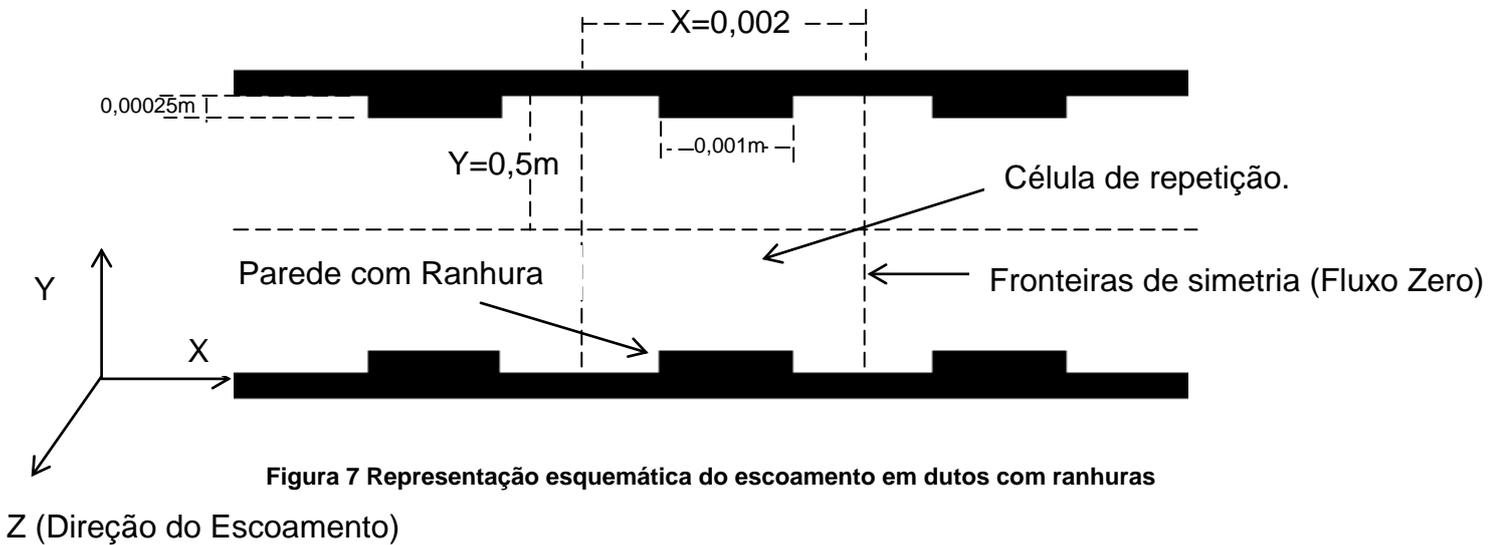
$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} = 0 \quad (25)$$

As equações de momento relativas à “u” e “v” representam o escoamento secundário (Nota-se que as equações são independentes de “z”).

O fluxo secundário é resolvido com um gradiente de pressão transversal, portanto os cálculos são realizados apenas para uma seção transversal (“SLAB”), tornando os cálculos mais rápidos e simples.

Também com o objetivo de otimizar a simulação, foi explorada a condição de simetria do PHOENICS, ou seja, a simulação foi construída de forma a mostrar apenas uma célula com uma ranhura com espaçamentos iguais na direção X. Tal configuração é interpretada pelo PHOENICS de forma a espelhar, em todas as direções, os limites externos da configuração montada.

A representação esquemática do escoamento em dutos, esta mostrada na figura 7.



Para simular as paredes do duto, foram usada para todos os casos a configuração a seguir: Direção X, de 0,002m, que foi escolhida de forma a conter uma largura e definir um espaçamento de igual largura até a próxima ranhura. A direção Y foi definida como 0,5m, que representa um duto de altura 1,0m. A direção Z foi definida como 0,1m, que será o tamanho de uma única célula e direção de escoamento.

Foram criadas ranhuras semelhantes às estudadas por Ali & Fatlawie (2001) que apresentaram maiores reduções percentuais, ou seja: $X=0,001m$, $Y=0,00025m$, $Z=0,1m$ (até o final da placa).

5.2 Escoamento Externo em Placa Plana

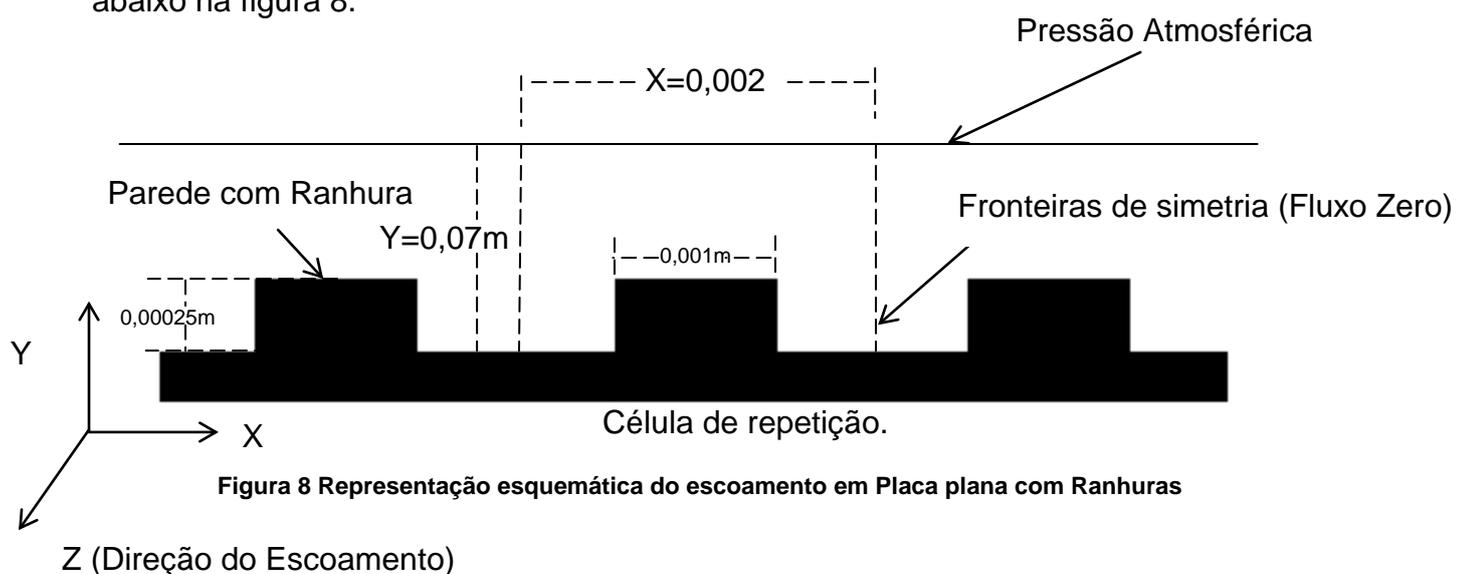
No escoamento em placa plana, foram simuladas placas longas o bastante para que o escoamento se tornasse turbulento.

No caso de controle, foi considerada uma placa plana lisa, com escoamento na direção Z, e com configuração a seguir: direção X=0,002m, direção Y=0,07m (de forma a conter toda a camada limite), direção Z=2,0m, como ilustrado na figura 8.

Para simular a placa plana com ranhura, foi adicionada a placa lisa uma ranhura com dimensões conforme as usadas por Ali & Fatlawie (2011); X=0,001m, Y=0,00025m e Z= 2,0m.

Devido à condição de simetria do PHOENICS, pode-se interpretar a placa plana como infinita em todas as direções, com infinitas ranhuras paralelas e para que não ocorra o espelhamento na face oposta a parede, foi definida uma pressão atmosférica na fronteira superior.

A representação esquemática do escoamento em placa plana está mostrada abaixo na figura 8.



6 Resultados

6.1 Teste de Validade

Nesta seção serão mostrados os resultados para os casos de paredes lisas, ou seja, sem ranhuras (casos que apresentam vasta teoria e testes experimentais). Portanto, as simulações serão comparadas com as curvas e equações já conhecidas anteriormente, e assim validando as simulações.

6.1.1 Teste de Validade para Dutos

Realizando as simulações para dutos e variando-se a diferença de pressão Dp/Dz , foi possível obter pelo software valores de velocidade média que variam de 1m/s a 5m/s. Então, como mostrado pela equação 16, é possível obter o coeficiente de atrito C_f .

Para os mesmos números de Reynolds, ou seja, mesmas velocidades, e usando a equação de Colebrook-White (equação 5), foi possível obter o fator de atrito de Darcy, posteriormente convertido para o fator de atrito de Fanning.

Os resultados foram tabelados e plotados em um gráfico, como visto na tabela 3 e figura 9, respectivamente.

Parâmetros		Método Numérico	Colebrook-White para Dutos Lisos (Equação 5)	Erro Percentual
W1 Médio (m/s)	Re	Cf	Cf	
5,1	1,01E+07	1,93E-03	2,02E-03	5%
4,5	8,99E+06	1,96E-03	2,06E-03	5%
3,9	7,70E+06	2,01E-03	2,10E-03	5%
3,1	6,18E+06	2,07E-03	2,17E-03	5%
2,1	4,24E+06	2,20E-03	2,30E-03	4%
1,5	2,91E+06	2,34E-03	2,44E-03	4%
1,0	1,99E+06	2,51E-03	2,60E-03	3%

Tabela 3 - Tabela de validação de Resultados (Dutos)

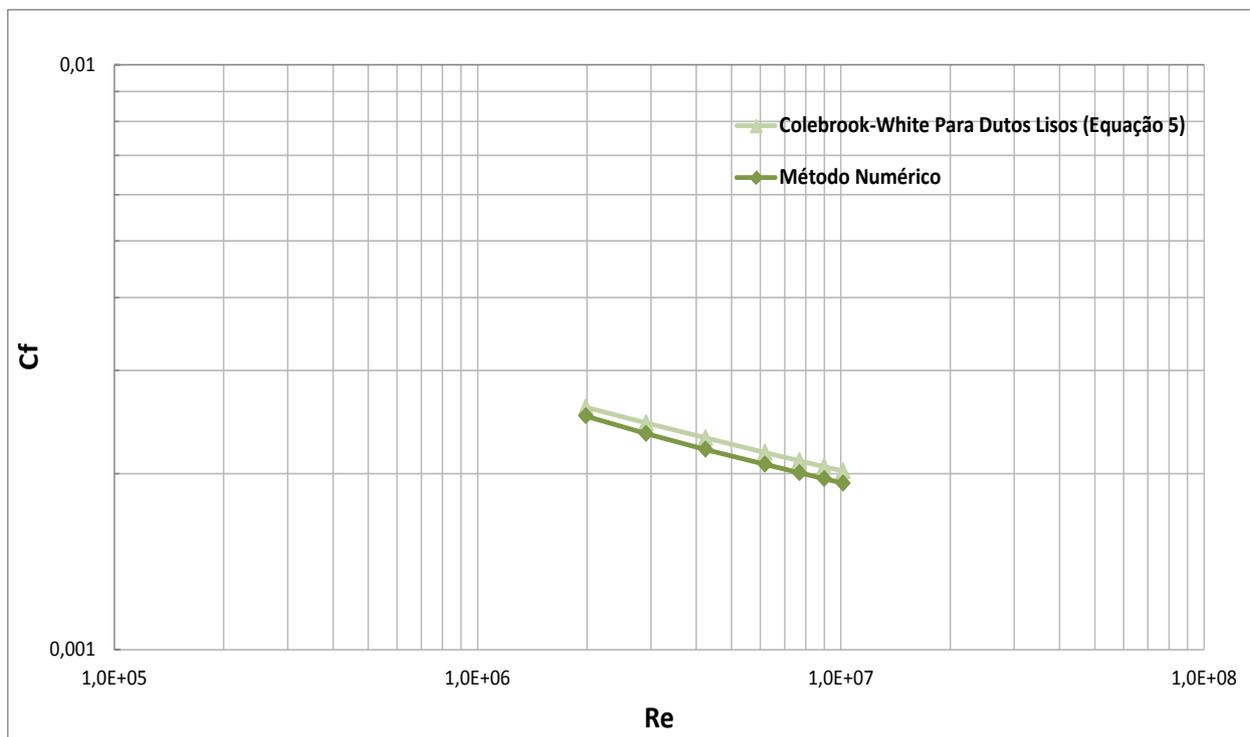


Figura 9 Sobreposição de Curvas (Método Numérico e Equação 5)

Observando os resultados obtidos pelas simulações computacionais, pode-se observar que os resultados de C_f diferem em até 5% da equação ajustada por Colebrook-White (Equação 5), validando as simulações.

6.1.2 Teste de Validade para Escoamento Externo Em Placa Plana

Para placas planas, foram feitas simulações de 1.0 m/s a 5.0 m/s, e pelo software foi possível obter a variável chamada pelo programa de “STRESS”, que representa a tensão de cisalhamento dividida pela massa específica (τ_w/ρ). Portanto, a partir dela é simples obter o coeficiente de atrito de Fanning, como mostrado na equação 26.

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{\rho U_\infty^2}{2}} = \frac{2 \cdot STRESS}{U_\infty^2} \quad (26)$$

Para os mesmos números de Reynolds, ou seja, mesmas velocidades, e usando desta vez a equação 16, foi possível obter valores de fator de atrito de Fanning matematicamente, a serem comparados com os encontrados valores pelas simulações computacionais.

Os resultados foram tabelados e plotados em um gráfico, como visto na tabela 4 e figura 10, respectivamente.

Parâmetros		Método Numérico	Equação 16	Erro Percentual
W1 Médio (m/s)	Re	Cf	Cf	
5,0	9,94E+06	2,35E-03	2,36E-03	0%
4,5	8,95E+06	2,39E-03	2,41E-03	1%
4,0	7,95E+06	2,43E-03	2,47E-03	1%
3,5	6,96E+06	2,49E-03	2,53E-03	2%
3,0	5,96E+06	2,55E-03	2,61E-03	3%
2,5	4,97E+06	2,63E-03	2,71E-03	3%
2,0	3,98E+06	2,73E-03	2,83E-03	4%
1,5	2,98E+06	2,87E-03	3,00E-03	4%
1,0	1,99E+06	3,10E-03	3,26E-03	5%

Tabela 4 - Tabela de validação de Resultados (Placa Plana)

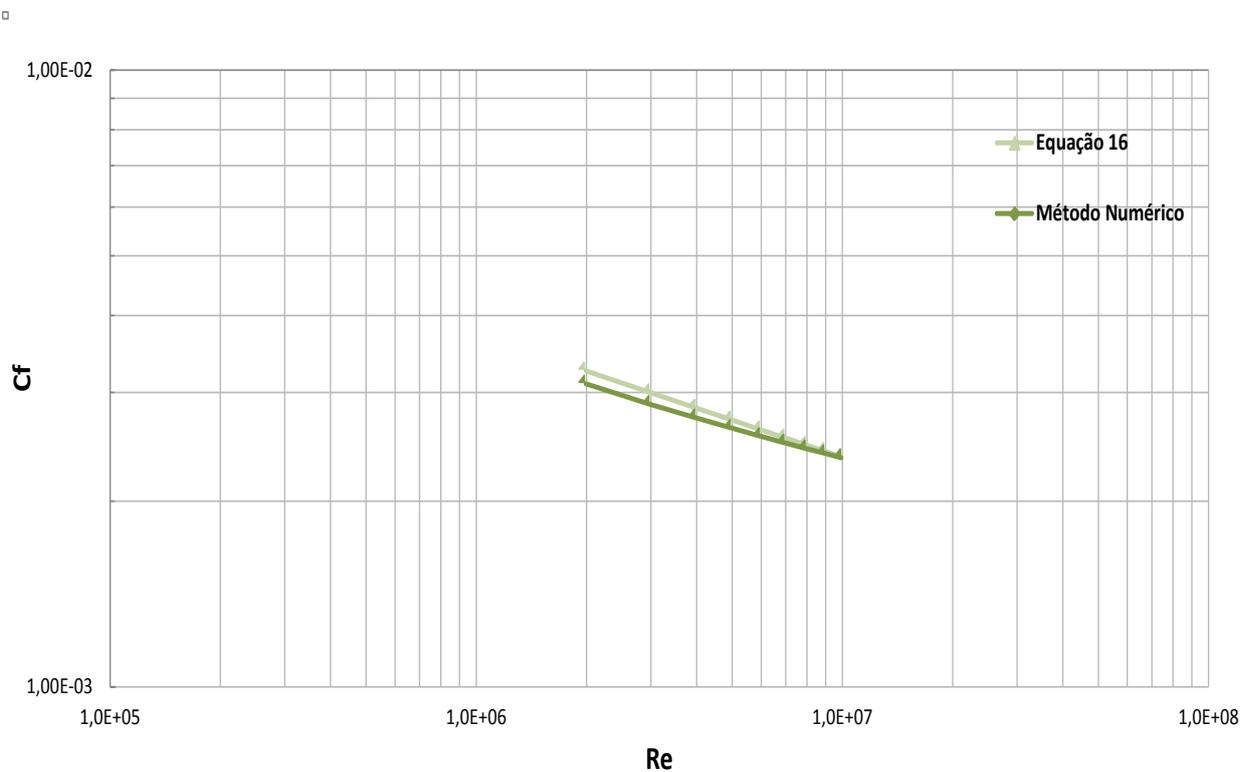


Figura 10 Sobreposição de Curvas (Numérico e Equação 16)

Os valores obtidos pelas simulações no PHOENICS mostram que os resultados de C_f para placa plana diferem em até 5% da equação 16, validando então a simulação numérica deste trabalho.

6.2 Resultados

Serão mostrados nesta seção os coeficientes de atrito após a adição de ranhuras e então comparados aos resultados dos casos sem ranhuras. Por fim, serão mostradas as reduções percentuais de redução do coeficiente de atrito através de adição de ranhuras.

6.2.1 Resultados para Dutos

A Tabela abaixo mostra os resultados obtidos para os escoamentos em dutos após a adição de ranhuras. Também são mostrados os resultados para dutos lisos para que possa ser feita uma comparação dos resultados obtidos e calcular a redução percentual, R_{cf} (Equação 19).

Parâmetros		Duto Com Nervura	Duto Liso	R_{cf}
W1 Médio (m/s)	Re	C_f	C_f	%
5,6	1,10E+07	1,30E-03	1,93E-03	33%
4,7	9,30E+06	1,37E-03	1,96E-03	30%
3,7	7,32E+06	1,48E-03	2,01E-03	26%
2,5	4,92E+06	1,63E-03	2,07E-03	21%
1,7	3,30E+06	1,82E-03	2,20E-03	17%
1,1	2,22E+06	2,01E-03	2,34E-03	14%
0,6	1,29E+06	2,38E-03	2,51E-03	5%

Tabela 5 - Coeficiente de atrito em Dutos

Os resultados para dutos com nervura, assim como os resultados para duto liso, foram plotados em um gráfico semelhante aos usados na validação de resultados, e mostrados a seguir:

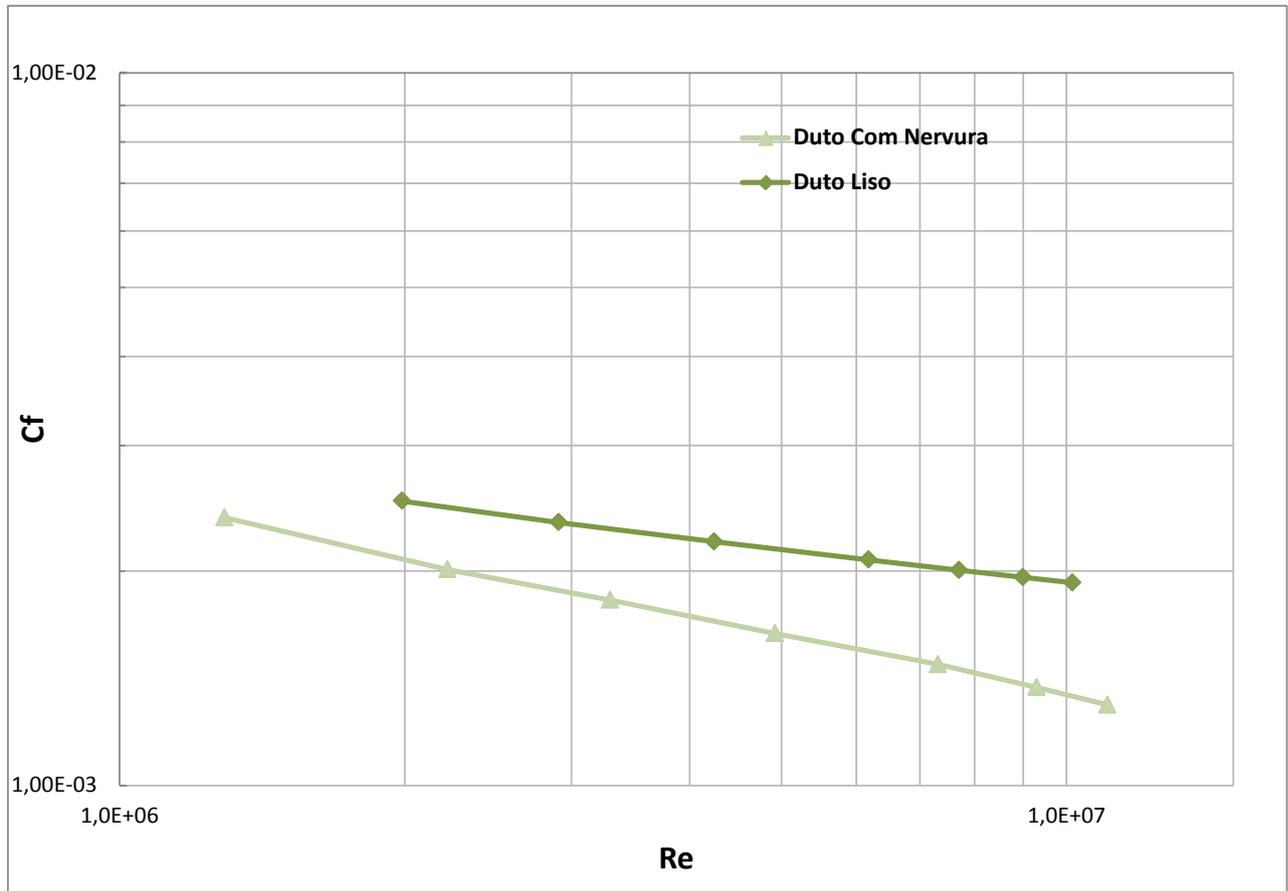


Figura 11 Gráfico Cf x Re para Dutos

6.2.1 Resultados para Escoamento Externo em Placa Plana

A Tabela abaixo mostra os resultados obtidos para os escoamentos em placas planas após a adição de ranhuras. Também são mostrados os resultados para placas planas lisas para que possa ser feita uma comparação dos resultados obtidos e calcular a redução percentual, R_{cf} (Equação 19).

Parâmetros		Placa Com Nervura	Placa Lisa	Rcf
W1 Médio (m/s)	Re	Cf	Cf	%
5,0	9,94E+06	2,25E-03	2,35E-03	4%
4,5	8,95E+06	2,28E-03	2,39E-03	5%
4,0	7,95E+06	2,30E-03	2,43E-03	6%
3,5	6,96E+06	2,33E-03	2,49E-03	6%
3,0	5,96E+06	2,36E-03	2,55E-03	8%
2,5	4,97E+06	2,38E-03	2,63E-03	10%
2,0	3,98E+06	2,41E-03	2,73E-03	12%
1,5	2,98E+06	2,45E-03	2,87E-03	15%
1,0	1,99E+06	2,51E-03	3,10E-03	19%

Tabela 6 - Coeficiente de atrito em Placas Planas

Os resultados para placa plana com nervura, assim como os resultados para placa plana lisa, foram plotados em um gráfico semelhante aos usados na validação de resultados, e mostrados a seguir:

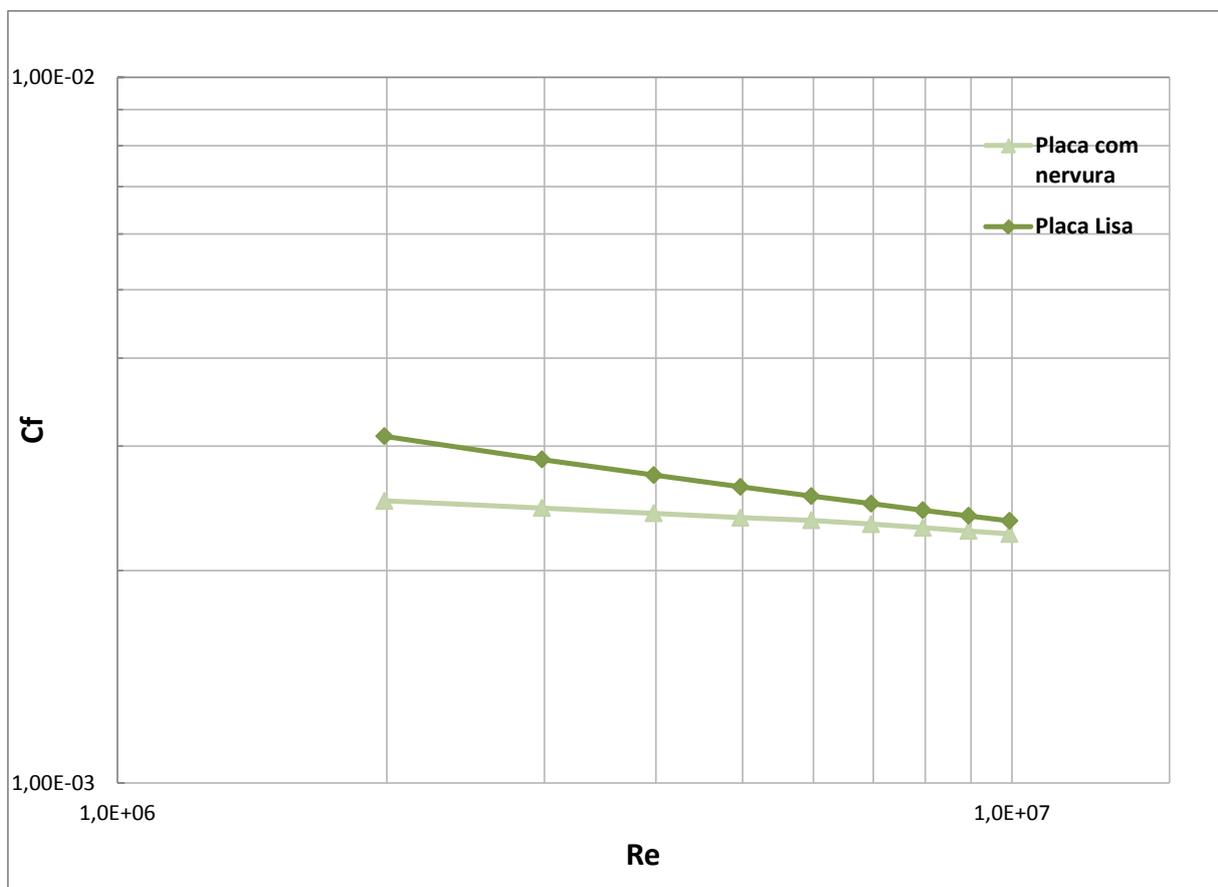


Figura 12 Gráfico Cf X Re para Placas Planas

7 Análise

Analisando os resultados ficou clara a redução no coeficiente de atrito para todos os casos investigados, como evidenciado nos gráficos das figuras 11 para dutos e 12 para escoamentos em placas planas. Nos gráficos as curvas relativas aos escoamentos após a adição das ranhuras estão abaixo das curvas relativas aos escoamentos em superfície lisa.

Na simulação aqui conduzida, a redução percentual do coeficiente de atrito máxima obtida para dutos foi de 33% como visto na tabela 5, onde para velocidades de escoamento de 5,6m/s, observa-se que o coeficiente de atrito varia de $1,93 \times 10^{-3}$ para $1,30 \times 10^{-3}$ após a adição das ranhuras, o que representa uma redução percentual de 33%.

Já para escoamentos em placas planas, observa-se uma redução percentual do coeficiente de atrito máxima de 19% como visto na tabela 6, onde para velocidades de escoamento de 1,0m/s, observa-se que o coeficiente de atrito varia de $3,10 \times 10^{-3}$ para $2,51 \times 10^{-3}$ após a adição das ranhura, o que representa uma redução percentual de 19%.

Os resultados apresentados nas simulações computacionais se aproximam dos resultados mostrados por Bhushan, B & Bixler, G. (2013) para dutos, onde é visto uma redução percentual de até 23%, como visto na tabela 1. Para placas planas os resultados se aproximam dos resultados obtidos por Ali & Fatlawie (2011), onde foram obtidas reduções de até 14%, como visto na tabela 2.

A variação dos resultados deve-se principalmente as necessidades de simplificação dos modelos utilizados no software computacional, tal como assumir em dutos dimensões infinitas em largura e profundidade e ausência de rugosidade superficial, por exemplo.

8. Conclusão

Neste trabalho pode-se verificar a partir de simulações computacionais no CFD-PHOENICS o papel da adição de ranhuras em escoamentos em regime turbulento tanto em dutos como em placas planas. Tais estruturas reduzem significativamente o coeficiente de atrito experimentado pelos escoamentos. Reduções do coeficiente de atrito podem ser traduzidas em maiores velocidades de escoamento, o que possui alta aplicabilidade comercial.

A adição das ranhuras altera as propriedades dos escoamentos em regime turbulento. Os vórtices do regime turbulento passam a se formar apenas acima das ranhuras, o que diminui significativamente o coeficiente de atrito experimentado pelo escoamento.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se que sejam estudadas outras geometrias e dimensões de ranhuras. Estudos com ranhuras em três dimensões, como ranhuras quadradas senoidais, também podem ser investigadas. O estudo em outras superfícies (superfície esférica, por exemplo) também são interessantes. Também com o objetivo de diminuir o coeficiente de atrito, pode-se adicionar substâncias hidrofóbicas na superfície, diminuindo ainda mais o coeficiente de atrito.

9. Referências Bibliográficas

- [1] Ali, I.S., Al-Fatlawie, N.H., Drag Reduction in Turbulent Flow using Different Kinds of Riblets in *International Conference on Sunrise Technologies 13th*, 2011
- [2] Bixler, Gregory D., Bhushan, Bharat, *Fluid Drag Reduction with Shark-skin Riblet Inspired Microstructures Surfaces*, *Advanced Funcional Materials* (in press); Highlighted in Materials Views
- [3] Bhushan, B. & Dean, B. 2010. *Shark-Skin surfaces fluid-drag reduction on turbulent flow: A Review*. *Phil Trans. R. Soc. A368*, 4775-4806. (doi:10.1098/rsta.2010.0201)
- [4] CHAM, disponível em: [\[http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_docs/tr324/tr324.htm\]](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_docs/tr324/tr324.htm) acessado dia 20/10/2013
- [5] CHAM, disponível em: [\[http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_docs/tr326/tr326top.htm\]](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_docs/tr326/tr326top.htm), acessado dia 20/10/2013
- [6] EIGER S. 1989. *Modelos de Escoamentos Turbulentos*. In: SILVA RCV (Ed.). *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*. Coleção da ABRH- Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 1, Cap. 2, p. 84-155.
- [7] Enyutin, G. V., Lashkiv Yu. A., Samoilova N. V., *Drag Reduction in Riblet-lined Pipes*, *Fluid Dynamics – FLUID DYN 01-1995*; 30(1):pp45-48, DOI:10.1007/BF02029926
- [8] Fox, Robert W., McDonald, Alan T., Pritchard, Philip J., 2004 *Introduction to Fluid Mechanics*, 6th Ed, LTC, Rio De Janeiro.

- [9] Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6 ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [10] Liu, K. N., Christodoulou, C., Riccius O., Joseph, D. D., *Drag Reduction in Pipes lined with riblets*, AIAA Journal, Vol. 28, No. 10 (1990), pp 1697-1697, DOI: 10.2514/3.10459
- [11] Munson, B., Young, D & Okiishi, T. 2005 *Fundamentals of fluid mechanics*, 5th ed. New York, NY: Wiley
- [12] Patankar, S.V., C.H.Liu and E.M.Sparrow, '*Fully-developed flow and heat transfer in ducts having streamwise-periodic variations of cross-sectional area*', ASME J. Heat Transfer, Vol.99, p180, (1977).
- [13] ROSMAN P.C.C. 1989. *Modelos de Circulação em Corpos d'Água Rasos*. In: SILVA RCV (Ed.). *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*. Coleção da ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 1, Cap. 3, p. 156-221.
- [14] STULL RB. 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers. Reprinted with errata-1997. 667 p.
- [15] WIKIPÉDIA. Código Aberto. Disponível em http://en.wikipedia.org/wiki/Darcy_friction_factor_formulae];, acessado dia 21/11/2013