



Simulação do Escoamento em Microcanais Rugosos

Rafael Barros Takara

Projeto Final de Curso

Orientadores

Prof. Paulo Laranjeira da Cunha Lage, D.Sc.
Prof. Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc.

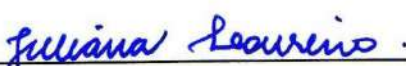
Julho de 2011

SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO EM MICROCANAIS RUGOSOS

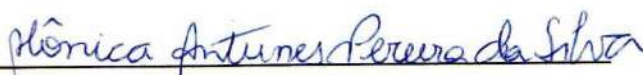
Rafael Barros Takara

Projeto Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química,
como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro
Químico.

Aprovado por:



Juliana Braga Rodrigues Loureiro, D.Sc



Mônica Antunes Pereira da Silva, D. Sc.



Rodrigo Bernardo Medeiros, Eng.

Orientado por:



Prof. Paulo Laranjeira da Cunha Lage, D.Sc.



Prof. Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Julho de 2011

Takara, Rafael Barros.

Simulação do Escoamento em Microcanais Rugosos / Rafael Barros Takara. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2011.

ix, 41p.; il.

(Projeto) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2011.

Orientadores: Prof. Paulo Laranjeira da Cunha Lage e Prof. Luiz Fernando Lopes Rodrigues da Silva.

1. OpenFOAM. 2. Microcanais. 3. Escoamentos Laminares. 4. Projeto. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Prof. Paulo Laranjeira da Cunha Lage e Prof. Luiz Fernando Lopes Rodrigues da Silva. I. Simulação do Escoamento em Microcanais Rugosos

Agradecimentos:

AOS PROFESSORES PAULO LARANJEIRA DA CUNHA LAGE E LUIZ FERNANDO LOPES RODRIGUES DA SILVA

-Pela orientação e o aprendizado necessário para a elaboração e a execução deste trabalho.

AO LABORATÓRIO DE TERMOFLUIDODINÂMICA (LTFD)

-Por fornecer as instalações e os recursos necessários para execução do trabalho além do auxílio prestado.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química / UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico

SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO EM MICROCANAIS RUGOSOS

Rafael Barros Takara

Julho, 2011

Orientadores: Prof. Paulo Laranjeira da Cunha Lage
Prof. Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva

A crescente demanda por energia, as limitações de espaço para os equipamentos industriais, a economia de energia e materiais e a facilidade para manuseio, tem levado a um aumento da demanda por dispositivos leves e miniaturizados na indústria.

Nos trocadores de calor, por exemplo, tem havido demanda por taxas de trocas maiores e diminuição no tamanho destes. O tema de microcanais, portanto, tem entrado em relevância pois quanto menores o tamanho de canal maior será a taxa de troca e menor será o tamanho da unidade.

Avanços atuais das técnicas em micromáquinas e microminiaturização tem possibilitado a fabricação de microcanais. Os microcanais poderão futuramente fazer parte de projetos de trocadores de calor mais eficientes, e desta forma, tem atraído um grande número de pesquisas. Diversos estudos tem sido feitos tentando validar as equações clássicas de escoamento e de transferência de calor pois as correlações clássicas usadas em escoamentos em escala macroscópica ainda não estão bem estabelecidas para os microcanais. Quando os microcanais estiverem apropriadamente pesquisados, dispositivos contendo microcanais poderão ser eficientemente utilizados em diversos setores industriais como o energético, automotivo, aeroespacial, eletrônico, etc.

Este trabalho tem como objetivo estudar o escoamento característico dos microcanais rugosos (laminares e incompressíveis), como os que aparecem em sistemas de selagem aplicados em cilindros de freio de motores, por meio de simulações numéricas e pelas equações de escoamentos viscosos em escala macroscópica. Foi usada uma metodologia adaptada, que inclui efeitos de rugosidade, para fazer o cálculo do escoamento e perda de carga. O microcanal rugoso foi construído com a mesma resistência ao escoamento de um microcanal liso equivalente por meio de um algoritmo desenvolvido para gerar as rugosidades de forma aleatória. Com os resultados das simulações nestes microcanais rugosos pôde-se verificar a distribuição aleatória das rugosidades assim como comparar resultados do escoamento teóricos com os simulados.

ÍNDICE

Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 - Objetivo.....	3
1.2 - CFD e OpenFOAM.....	5
1.3 - Organização do texto.....	5
Capítulo 2 - Revisão da Literatura.....	6
Capítulo 3 – Metodologia.....	17
3.1 - Algoritmo para geração de rugosidades aleatórias.....	18
3.2 - Modelos Matemáticos e Condições de Simulação.....	22
3.3 - Procedimento de Cálculo.....	24
Capítulo 4 - Resultados e discussões.....	27
4.1- Convergência de Malhas.....	28
4.2- Esquemas de Interpolação.....	31
4.3- Análise do Escoamento.....	32
Capítulo 5 - Conclusões.....	37
Referências Bibliográficas.....	39

Índice de Figuras

Figura 1. Um sistema de selagem aplicado em cilindros de freio. O selo (em roxo) encaixado no suporte (em cinza).....	1
Figura 2. Geometria de modelo de microcanal anular.....	2
Figura 3. Coordenadas do triangulo formado nas coordenadas cartesianas.....	21
Figura 4. Geometria do microcanal de 180picos/mm superpostos em uma superficie.....	23
Figura 5. Geometria obtida pelo algoritmo.....	27
Figura 6. Malha gerada.....	28
Figura 7. Convergência do perfil de velocidade para $\Delta P=10$ bar.....	30
Figura 8. Convergência no perfil de pressão ao longo do canal para $\Delta P=10$ bar.....	30
Figura 9. Perfil de velocidade para $\Delta P=10$ bar.....	31
Figura 10. Perfil de velocidade ao longo da coordenada y para $\Delta P=10$ bar.....	33
Figura 11. Perfil de velocidade na coordenada y para $\Delta P=1$ bar.....	33
Figura 12. Perfil de velocidade na coordenada y para $\Delta P=0,1$ bar.....	34
Figura 13. Perfil de pressão ao longo da coordenada x para $\Delta P=10$ bar.....	34
Figura 14. Perfil de pressão ao longo da coordenada x para $\Delta P=1$ bar.....	35
Figura 15. Perfil de pressão na coordenada x para $\Delta P=0,1$ bar.....	35

Índice de Tabelas

Tabela 1. Parâmetros do terceiro modelo de microcanal.....	17
Tabela 2. Parâmetros da geometria de microcanal.....	27
Tabela 3. Resultados de refinamento de malhas.....	28
Tabela 4. Resultados do teste para esquemas de interpolação.....	32
Tabela 5. Número de volumes nas realizações.....	32
Tabela 6. Valores de K e Po.....	36
Tabela 7. Comparação entre resultados teóricos e simulados para K e Po para diferentes quedas de pressão.....	36

Nomenclatura

Letras latinas

A – área transversal média

A_w – área de contato com fluido

d_h - diâmetro hidráulico do canal rugoso

d_h^o – diâmetro hidráulico do canal liso

f – fator de atrito

H – altura do canal

h_m - altura média de pico

h_{max} – altura máxima de pico

h_{min} - altura mínima de pico

K – coeficiente de resistência ao escoamento

K_{cfd} – coeficiente de resistência ao escoamento obtido por simulação CFD

$K_{teórico}$ – coeficiente de resistência ao escoamento calculado a partir de modelos teóricos de canais rugosos.

K_{liso} – coeficiente de resistência ao escoamento em canais lisos.

L – comprimento do canal

P - Pressão

P_w - Perímetro molhado

Q – vazão volumétrica

V – velocidade média

V_f - volume ocupado pelo fluido

V_t volume ocupado pelos triângulos

W – espessura do canal

Letras gregas

δ - coeficiente geométrico do fator de atrito

ΔP – queda de pressão no canal

ε – rugosidade relativa

μ – viscosidade do fluido

ξ – fator de correção de comprimento

ρ_{picos} – densidade de picos

ρ – massa específica

Grupos adimensionais

Re – número de Reynolds = $\frac{\rho V d_h}{\mu}$

Po- número de Poiseuille = $f \cdot Re$

Capítulo 1

Introdução

Com o objetivo de projetar adequadamente dispositivos envolvendo sistemas microscópicos, é necessário estabelecer o comportamento das leis físicas presentes em microgeometrias. Sabe-se que estas podem diferir do observado em sistemas macroscópicos. Entre estes fenômenos microscópicos pode-se citar os efeitos de superfície e de rugosidade. No escoamento em sistemas macroscópicos, pode-se considerar que os efeitos de atrito por rugosidades superficiais são desprezíveis em escoamentos laminares, mas em escala microscópica a rugosidade irá desempenhar papel importante e não pode ser desprezada em uma análise de escoamentos em microcanais [1].

Escoamentos em microcanais ocorrem em sistemas de selagem dentro de cilindros de motores (mostrados na Figura 1), que separam uma câmara pressurizada de uma câmara onde o líquido de frenagem está à pressão atmosférica.

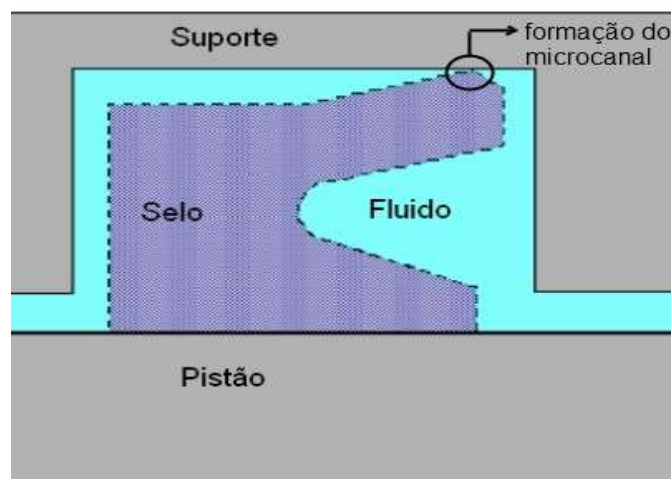


Figura 1. Um sistema de selagem aplicado em cilindros de freio. O selo (em roxo) encaixado no suporte (em cinza) (Valdés *et al.* [2]).

A selagem nos cilindros ocorre pelo encaixe entre uma superfície metálica considerada lisa e de uma superfície de borracha rugosa, as suas superfícies tentam se adaptar uma a outra, havendo, então, o aparecimento de microcanais onde o fluido pode escoar. É importante fazer uma análise do escoamento nestes microdomínios para estimar possíveis vazamentos da região pressurizada do sistema. Com a formação destes canais de dimensões muito reduzidas, os efeitos de rugosidade nas superfícies devem ser considerados durante o escoamento. O escoamento dentro dos microcanais é considerado completamente desenvolvido pois o comprimento equivalente é muito pequeno comparado com o sistema avaliado, portanto, não haverá mudanças significativas no perfil de velocidade.

Geralmente os canais que aparecem entre o selo e o suporte são anulares. Ao realizar o estudo é conveniente usar um pequeno setor dele equivalente a um canal entre duas superfícies. A Figura 2 mostra a geometria de um modelo de microcanal anular de raio interno igual a 11,11mm e com comprimento L representando o microcanal formado por duas superfícies, o escoamento ocorre na direção do eixo de simetria. O escoamento total resultante do canal anular pode ser extrapolado partindo do resultado de um setor formado por superfícies paralelas ao se multiplicar por um fator 2π .

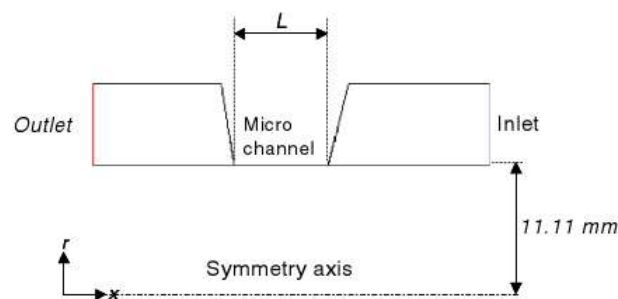


Figura 2. Geometria de modelo de microcanal anular . (Valdés *et al.*[9])

O uso das equações clássicas de escoamento macroscópico para o cálculo de

escoamentos em microcanais pode levar a erros. Deve-se levar em conta os efeitos de rugosidade, que as equações clássicas não incluem, para uma boa predição do escoamento. A ferramenta de fluidodinâmica computacional (CFD) pode ajudar a prever o escoamento mesmo em escala microscópica e os parâmetros deste, como o coeficiente de resistência e o número de Poiseuille podem, assim, serem calculados mais acuradamente. Existe uma metodologia simples para o cálculo do escoamento em microcanais que inclui a influência das rugosidades e faz uso de simulações numéricas e das equações de escoamentos viscosos clássicas [2].

1.1. CFD e OpenFOAM

Fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) é o termo dado ao grupo de técnicas matemáticas, numéricas e computacionais usadas para obter, visualizar e interpretar soluções computacionais para as equações de conservação de grandezas físicas de interesse em um dado escoamento. Assim, pode-se resumir o CFD como o conjunto de técnicas de simulação computacional usadas para prever os fenômenos físicos ou físico-químicos que ocorrem em escoamentos [3].

Os códigos de CFD são estruturados em torno de algoritmos numéricos para resolução de problemas de escoamentos de fluido. Os pacotes CFD incluem interfaces de modo que o usuário possa entrar com os parâmetros do problema e examinar os resultados. Todos os códigos são compostos de três partes: pré processamento, *solver* e pós-processamento.

- Pré processamento- O pré processamento consiste na modelagem física (seleção dos fenômenos físicos e químicos, definição das propriedades do fluido e especificação das condições de contorno) de um problema de escoamento com a estruturação destas informações de forma que o *solver* possa usá-las.

- *Solver*- É a parte do pacote de CFD que implementa as técnicas numéricas de solução e seus parâmetros para resolver os problemas físicos de modo adequado.

- Pós Processamento- São as ferramentas usadas para visualização dos campos vetoriais e escalares, entre elas incluem: visualização de malhas e geometria, gráficos de vetores e contorno e visualização de linhas de fluxo e trajetória da partícula.

O OpenFOAM é uma biblioteca de código livre escrita na linguagem C++ usada para criação de *solvers*. Os *solvers* são usados para resolver problemas específicos em que a manipulação e operação de campos vetoriais é necessária, assim o OpenFOAM tem excelente aplicabilidade na mecânica do contínuo. O *software* OpenFOAM é distribuído com diversos *solvers* pré-compilados específicos para dadas situações de CFD. Porém, como o *software* é distribuído com o seu código-fonte, o usuário tem a liberdade de criar seus próprios *solvers* ou modificá-los. Além dos *solvers* aplicáveis à problemas CFD, o OpenFOAM fornece ferramentas e utilitários para realizar as tarefas de pré e pós-processamento, que vão desde a manipulação de dados à visualização dos resultados, incluindo a construção e o processamento de malhas [3]. Sendo o OpenFOAM um *software* de distribuição gratuita e já possui meios confiáveis de resolução de problemas mais gerais envolvendo escoamentos de fluidos, ele surgiu, então, como uma opção interessante e viável para a realização do trabalho.

Outras razões para escolha do OpenFOAM para realização deste trabalho são:

- Existe um *solver* pronto para escoamentos em baixas velocidades e incompressíveis (características dos microcanais).

- Facilidade para modificação de parâmetros e condições de simulação.

- Facilidade de obtenção e visualização dos resultados.

- Generalidade da malha a ser usada (estruturada ou não-estruturada), com a

possibilidade de importar malhas de outros programas (gratuitos e comerciais).

- Ferramentas de exportação dos resultados para visualização em outros programas gráficos.

1.2. Objetivo

O trabalho tem como objetivo investigar por simulações numéricas os efeitos da rugosidade superficial de microcanais anulares em escoamentos em regime estacionário, laminares e completamente desenvolvidos, como os que aparecem no espaço entre o selo e o suporte.

O método de Valdés *et al.* [2] foi empregado para calcular a perda de carga no escoamento com pequenos desvios e obter importantes parâmetros do escoamento em microcanais rugosos como o coeficiente de resistência ao escoamento e número de Poiseuille.

1.3. Organização do Texto

O trabalho está organizado como colocado na sequência:

O capítulo 1 apresenta uma introdução e objetivos do trabalho desenvolvido. O capítulo 2 mostra uma revisão da literatura sobre escoamentos em microcanais em regime laminar e descrição mais detalhada dos trabalhos de Valdés *et al.* [2,4]. O capítulo 3 descreve a metodologia usada, explica os modelos matemáticos e os procedimentos de cálculo deste trabalho. O capítulo 4 apresenta e analisa os resultados das simulações. O capítulo 5 faz as considerações finais assim como sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

O interesse sobre o efeito da rugosidade em escoamentos laminares e na transferência de calor em microcanais tem crescido nos últimos anos [5]. Alguns estudos foram feitos em cima do mecanismo de escoamento em microcanais rugosos e do efeito da forma das protuberâncias na queda da pressão e da transferência de calor. Esta revisão aborda a metodologia para a análise dos efeitos de rugosidade para escoamentos laminares em microcanais.

Trabalhos anteriores [2,6,7,8] demonstraram um comportamento consistente entre experimentos, simulação e teoria para os escoamentos laminares de microcanais. Resultados experimentais apresentados por Kohl *et al.* [7] mostraram que o fator de atrito de microcanais, com diâmetro hidráulico entre 25 e 100 μm e números de Reynolds, Re , entre 5 e 2068, pode ser acuradamente determinado pela teoria clássica de escoamentos viscosos. Quando comparados, os valores de fator de atrito experimentais e teóricos não mostraram desvios significativos.

Os experimentos de Xu *et al.* [8] para escoamento de líquido em canais com diâmetro na faixa de 30-344 μm e com números de Reynolds entre 20 e 4000, mostraram que o escoamento tinha o comportamento previsto pela equação de Navier-Stokes. Judy *et al.* [6] fizeram medidas de queda de pressão para Re entre 8 e 2300 em microtubos de 15-150 μm de diâmetro e não foram encontrados desvios significativos da teoria clássica de

escoamentos viscosos. O trabalho feito por Toh *et al.* [9] consistiu em fazer simulações numéricas em microcanais mostrando que os fatores de atrito obtidos das simulações foram consistentes com os valores teóricos.

Croce *et al.* [5] realizaram um trabalho para investigar os efeitos de rugosidade sobre a performance da transferência de calor e na queda de pressão em microcanais bidimensionais usando simulações CFD, avaliando relações entre os números de Poiseuille, Reynolds e Nusselt. A rugosidade foi simulada ao gerar aleatoriamente obstáculos com formatos diferentes (triângulos, semicírculos e retângulos) nas superfícies dos canais. A análise se restringiu a escoamentos estacionários, laminares e completamente desenvolvidos, com uma temperatura fixa nas paredes. Os autores buscaram verificar se é possível uma relação entre rugosidade, quedas de pressão, transferência de calor e sua sensibilidade relacionada aos efeitos geométricos.

Aplicando uma queda de pressão nos canais rugosos, os autores observaram que aumento de rugosidade nos canais leva ao aumento de fator de atrito e também do número de Poiseuille. Foi observado valor constante para o número de Poiseuille em relação ao número de Reynolds para rugosidades relativas moderadas (em torno de 2,65%), mas para valores mais altos (em torno de 5,3%) o número de Poiseuille aumentava com o número de Reynolds, o que foi justificado pelo aparecimento de vórtices entre os obstáculos.

Também foi observado que o valor do número de Poiseuille dependia da forma da rugosidade assumida, sendo este efeito maior para a forma retangular. Picos triangulares geraram variação menos abrupta no fluxo, gerando menor incremento na queda de pressão.

Ao investigar os efeitos do formato de rugosidade Croce *et al.* [5] observaram diferenças significativas no número de Poiseuille entre distribuições de obstáculos gerados aleatoriamente e gerados uniformemente para um determinado valor de rugosidade

(2,65%), com valores maiores para a distribuição aleatória. O número de Nusselt ficou quase constante para as duas distribuições. Foram observadas maiores reduções no fator de atrito e no número de Nusselt para rugosidades construídas com picos triangulares quando comparadas com o emprego de rugosidades retangulares.

Zhang *et al.* [4] fizeram um estudo para estimar a influência de diferentes elementos de rugosidade no escoamento laminar e na transferência de calor em microcanais. Eles desenvolveram um método de análise térmica e hidrodinâmica em superfícies com rugosidades com formatos triangular, semicircular e retangular. Os efeitos do número de Reynolds, da altura do obstáculo e espaçamento entre as rugosidades sobre os números de Poiseuille e Nusselt puderam ser investigados.

As seguintes conclusões foram obtidas:

- Os efeitos causados nos números de Poiseuille e Nusselt pelo aumento do número de Reynolds (entre 750 e 1500) em escoamentos com elementos triangulares foram similares aos escoamentos com rugosidades na forma de semicírculo (aumento linear na relação), estes efeitos foram maiores que os retangulares. O aumento linear foi justificado pelo aparecimento de vórtices entre os obstáculos com o aumento do número de Reynolds.
- Os autores observaram que para maiores alturas de protuberâncias, o escoamento sobre superfícies com obstáculos semicirculares e triangulares levaram a uma maior recirculação e separação do escoamento, contribuindo para o aumento dos números de Nusselt e Poiseuille.
- As rugosidades retangulares tiveram menor efeito nos números de Poiseuille e Nusselt devido a menor recirculação do fluido para este formato de rugosidade.
- O aumento do espaçamento entre os obstáculos teve maior efeito nos números de

Poiseuille e Reynolds para canais com obstáculos semicirculares seguido dos com rugosidades triangulares e retangulares. Para canais semicirculares, espaçamentos menores irão beneficiar a transferência de calor, mas com maior perda de carga.

Em resumo, os efeitos no escoamento em rugosidades triangulares são quase os mesmos que elementos semicirculares, mas ambos são mais fortes que os retangulares.

O trabalho de Khadem *et al.* [1] abordou o escoamento em microcanais em condições de escorregamento nas superfícies para gases rarefeitos incompressíveis. O autor analisou os efeitos de rugosidade para o escoamento, observando os números de Poiseuille e Nusselt. Foi necessário o uso de condições de contorno para o escorregamento usando modelos pré-existentes de primeira e segunda ordem para resolver as equações de conservação de *momentum*, continuidade e energia. Foram construídos modelos de canais rugosos com obstáculos triangulares iguais em intervalos regulares e gerados aleatoriamente também. Um código CFD baseado em volumes finitos contendo o algoritmo SIMPLE foi usado para resolver as equações de conservação e condições de contorno.

Os autores compararam os números de Poiseuille e Nusselt teóricos com os obtidos por simulação e observaram a diminuição dos mesmos com o aumento do número de Knudsen. Analisando uma pequena porção do microcanal, analisou-se o fluxo de calor para diferentes rugosidades e verificou-se a redução do fluxo de calor ao longo do comprimento do canal com aumento da rugosidade relativa.

Os efeitos da distribuição da rugosidade, isto é da densidade de picos, em escoamentos também foram estudados. As densidades usadas foram de 100 e 500 picos/mm. Foi observado o aumento do número de Poiseuille com a densidade de picos por efeito de obstrução. Ocorreu um grande aumento no número de Poiseuille para o

modelo de densidade de picos igual a 500 picos/mm e alta rugosidade relativa (3,75 e 5%), o que pôde ser justificado pela maior recirculação entre os obstáculos.

Khadem *et al.* [1] compararam os resultados do número de Poiseuille entre os casos simulados com rugosidades geradas aleatoriamente, uniformemente e com separação regular, ambos com a mesma densidade de picos mas para 5 diferentes valores de rugosidade. Khadem *et al.* [1] observaram grandes oscilações no gradiente de pressão para rugosidades aleatórias nos valores mais altos ($>2,75\%$), que causaram perturbações no escoamento e nenhuma oscilação nas simulações com modelos gerados uniformemente. Os autores também observaram valores diferentes e maiores nos modelos aleatórios para número de Poiseuille e Nusselt para as duas formas de obtenção de rugosidades devido a efeitos de recirculação. Entretanto, o efeito da rugosidade relativa foi mais forte que a forma de modelagem da rugosidade [1].

Em resumo, Khadem *et al.* [1] estabeleceram que:

- Os elementos de rugosidade restringiram o escoamento de gás e causaram um aumento da queda de pressão e, portanto, no número de Poiseuille devido ao efeito de obstrução.
- A existência de recirculação entre os elementos de rugosidade afetou fortemente as características do escoamento e da transferência de calor, tendo sido observado um aumento do número de Poiseuille e uma diminuição no número de Nusselt com aumento de recirculação.
- O modelo usado na geração das rugosidades levou a padrões distintos de escoamento, exceto em rugosidades relativas baixas ($<2,75\%$)

O trabalho realizado por Valdés *et al.* [2] consistiu em analisar a influência do escoamento laminar em canais anulares curtos e estreitos, como os que aparecem em

sistemas de selagem, através de simulações numéricas usando o *software* FLUENT. Alguns métodos foram propostos para se calcular analiticamente o escoamento baseado nas equações clássicas de escoamento macroscópico objetivando o estudo da influência da rugosidade.

Ao se resolver as equações de conservação para o escoamento laminar, uma solução exata do perfil de velocidade pode ser obtida. Para este tipo de escoamento, chamado de Hagen-Poiseuille, o fator de atrito f é dado por:

$$f = 64/Re \quad (1)$$

Assim em um escoamento completamente desenvolvidos existe a relação $f \cdot Re = Po$ onde Po é o número de Poiseuille, que é uma constante dependente apenas da geometria. Valdés *et al.* [2] e outros autores [5,7,4] calcularam o produto $f \cdot Re$ a partir de simulações e compararam ao valor teórico. Em canais anulares um coeficiente geométrico δ deve aparecer no numerador da Eq. (1). Este coeficiente tem valor igual a 1,5 para os canais anulares usados no trabalho de Valdés *et al.*[2]. Portanto, o produto de fator de atrito, f , pelo nº de Reynolds, Re , gerou um nº de Poiseuille com o valor constante de 96 para canais anulares.

O coeficiente de resistência de um escoamento K , foi obtido a partir da seguinte relação linear entre queda de pressão, ΔP , e vazão volumétrica, Q , observada para um escoamento laminar:

$$\Delta P = K \cdot Q \quad (2)$$

que também pode ser calculado da teoria macroscópica de escoamento [2], sendo dependente apenas da geometria e da viscosidade através da seguinte equação:

$$K = \frac{48 \cdot \mu \cdot L}{A \cdot d_h^2} \quad (3)$$

onde μ é a viscosidade, L é o comprimento do canal, A é a área transversal e d_h é o

diâmetro hidráulico.

Valdés *et al.* [2] inicialmente fizeram uma análise comparativa dos resultados de simulação em microcanais rugosos com os resultados da teoria macroscópica a fim de estabelecer algum limite para a queda de pressão e a velocidade média. Nesta análise, geometrias de canais de diferentes diâmetros hidráulicos (20 e 100 μm) e comprimento de canal fixo (0,1mm) foram construídos e o escoamento foi simulado variando a queda de pressão. As simulações foram feitas para escoamento laminar em regime estacionário e completamente desenvolvido. O fluido usado foi incompressível e Newtoniano. Os canais rugosos foram construídos com a superposição de obstáculos triangulares com medidas geradas aleatoriamente em uma superfície plana. Os autores fizeram comparações entre número de Poiseuille teórico e o obtido por CFD, com bons resultados pois as diferenças nos números de Poiseuille foram menores que 1,5% para quedas de pressão de até 50 bar. Também foi verificado que, para $Re > 50$, a queda de pressão sofre uma mudança associada ao desenvolvimento do escoamento e a outras perdas secundárias relativas à entrada e saída de fluido no canal que devem ser levadas em conta durante o cálculo dos modelos analíticos se necessário. Assim foi demonstrado o bom acordo entre a teoria viscosa clássica e as simulações numéricas para casos com queda de pressão de até 50 bar, diâmetro hidráulico entre 20 e 100 μm e valores baixos de Reynolds ($Re < 50$).

Em seguida, Valdés *et al.* [2] obtiveram seis geometrias de canais com obstáculos triangulares gerados aleatoriamente. As seis diferentes geometrias foram gerados com valores característicos de altura máxima (entre 1,5 e 4 μm) e altura média dos picos (entre 0,120 e 1,42 μm), diâmetro hidráulico (entre 10 e 20 μm), rugosidade relativa (entre 0,6 e 7,10 %) e densidade de pico (entre 60 e 180 picos/mm). Os raios interno (11,11mm) e externo (11,20mm) do canal anular e o seu comprimento (0,1mm) foram mantidos

constantes.

Foram feitas as simulações CFD nas seis geometrias para seis valores de queda de pressão (entre 0,1 e 10 bar), obtendo-se seus respectivos valores do número de Poiseuille. As simulações foram feitas com baixos valores do número de Reynolds ($Re < 50$) e queda de pressão ($\Delta P < 10$ bar), onde as perdas secundárias podem ser desprezadas.

Os autores fizeram um estudo de convergência em malha, obtendo valores convergentes para a vazão mássica. A malha teve de ser refinada na região de entrada onde ocorre maior gradiente de velocidade.

Através dos resultados obtidos para valores do número de Poiseuille, algumas tendências puderam ser observadas:

- Aumento do fator de atrito e do número de Poiseuille com aumento da rugosidade, já que as rugosidades superficiais reduzem a área transversal média, aumentam a área de contato com o fluido e provocam a diminuição do diâmetro hidráulico.
- Aumento do desvio percentual entre os números de Poiseuille teórico e simulado com aumento da rugosidade relativa do canal.
- A densidade de picos também teve uma certa influência pois ao se observar os valores de Poiseuille de duas geometria com rugosidades relativas próximas, os valores do número de Poiseuille eram diferentes.

Valdés *et al.* [2] propuseram e testaram quatro novos métodos para calcular a perda de carga para escoamentos em microcanais. Os coeficientes de resistência K , foram modificados usando alguns parâmetros geométricos para que os efeitos da influência da densidade dos picos pudessem ser melhor avaliados.

Os novos métodos consistiram em modificar parâmetros como diâmetro

hidráulico, d_h , área transversal média, A , e volume ocupado pelo fluido, V_f , que modificaram o número de Poiseuille e refazer os cálculos usando a teoria clássica. Nesta etapa Valdés *et al.* [2] compararam o coeficiente de resistência teórico, K , pela eq. (3), com o coeficiente K simulado pela Eq. (2), e buscando diminuir o desvio percentual entre eles usaram cada um dos novos métodos de cálculo do escoamento.

O quarto método de Valdés *et al.* [2] foi o que apresentou menores desvios ao se comparar os resultados do coeficiente de resistência, K . O método consistiu em calcular o valor de K de um canal liso com o mesmo diâmetro hidráulico, d_h , e área transversal média, A , do canal rugoso, usando as seguintes definições de diâmetro hidráulico e área transversal :

$$d_h = \frac{4V_f}{A_w} \quad (4)$$

$$A = \frac{V_f}{L} \quad (5)$$

onde V_f é o volume ocupado pelo fluido, A_w é a área molhada e L é o comprimento do canal.

Os erros percentuais entre os coeficientes de resistência teórico e simulados ficaram abaixo de 6% para todos os seis modelos de rugosidade propostos. Portanto, o método pôde ser considerado como uma boa aproximação para o cálculo de escoamento em microcanais rugosos.

O trabalho de Valdés *et al.* [2] foi estendido para avaliar melhor os efeitos da rugosidade e diminuir os erros durante a comparação dos coeficiente de resistência teórico e simulado pois o método original foi testado apenas para rugosidades relativas menores que 7% e densidades lineares de picos inferiores a 180 picos/mm, que é equivalente à densidade superficial de 32400 picos/mm² [4]. Foram feitas novas simulações em microcanais tridimensionais com maiores rugosidades relativas, usando seus resultados para tentar incluir os efeitos de alta rugosidade no método de cálculo da perda de carga no

escoamento.

O trabalho foi iniciado por uma etapa de validação da metodologia anterior para canais tridimensionais. Foram construídos canais tridimensionais com rugosidades simuladas pela geração aleatória de obstáculos de formato piramidal em uma superfície do canal e, então, calcularam-se os valores do coeficiente de resistência teórico e simulado por CFD. Os erros relativos entre eles ficaram abaixo de 1%, ficando demonstrada a validade inicial da metodologia de cálculo da perda de carga para valores de rugosidade relativa menores que 7% e densidade de picos menores que 32400 picos/mm².

Após esta verificação, Valdés *et al.* [4] geraram cinco modelos de canal com rugosidades de forma piramidal com diferentes alturas média de pico (entre 0,31 e 0,96 µm) e com diferentes densidades de picos (entre 16700 e 120000 picos/mm²). O comprimento e a espessura do canal foram mantidas constantes e a altura foi variada de acordo com o valor da rugosidade relativa (entre 1 e 20%). As simulações de escoamento foram feitas fixando diferentes valores de queda de pressão do canal (1,2,5,10 e 50 bar).

Valdés *et al.* [4] calcularam os coeficientes de resistência $K_{\text{teórico}}$, através da Eq.(3) e simulado, dado pela Eq. (2), e compararam os resultados. Foram observados baixos desvios nos valores do coeficiente de resistência K (menores que 10%) para rugosidades relativas baixas (<5%) e baixas densidades de picos (<16700 picos/mm²) mas maiores desvios com o aumento da rugosidade relativa e densidade de picos acima do limite inicialmente analisado.

Concluiu-se que o método original de cálculo do escoamento teria que ser estendido para modelos contendo altos valores de densidade de picos e rugosidade relativa. O comprimento de canal, L, teve de ser corrigido pois, na verdade, o fluido atravessa uma distância maior que o comprimento do canal.

Foi proposto, então, usar um fator de correção, ξ , multiplicado ao comprimento, L , ao se fazer o cálculo do coeficiente de resistência, K , para diminuir em relação aos valores simulados. Baseados em observações de dados obtidos de testes comparativos, Valdés *et al.* [4] propuseram uma função, ξ , dependente da rugosidade relativa e densidade de picos:

$$\frac{\xi}{\rho_{picos}} = a \cdot \epsilon + \frac{1}{\rho_{picos}} - c \cdot \epsilon \cdot \rho_{picos} \quad (6)$$

onde ρ_{picos} é a densidade de picos, ϵ é a rugosidade relativa, $a= 4.6E-5$ e $c= 2.8E-10$ são constantes resultadas do ajuste da função a partir das observações dos resultados de CFD.

Assim, o coeficiente de resistência K , corrigido no comprimento, passou a ser calculado por:

$$K = \frac{48 \cdot \mu \cdot L \cdot \xi}{A \cdot d_h^2} \quad (7)$$

Para verificar a validade da nova equação para K , foram construídos 5 novos modelos com valores de rugosidades relativa próximos aos usados anteriormente, entre 1 e 20%. Houve bons resultados ao se comparar resultados para fator de correção ξ calculados pela Eq. (6) e os obtidos das simulações CFD pela Eq.(7). Os desvios ficaram sempre abaixo de 8%. Os coeficientes de resistência teórico com o fator, ξ , e o obtido por CFD puderam ser comparados e apresentaram erros na faixa de 10%. Os maiores erros ocorreram em três casos correspondentes a altas rugosidades (por volta de 20%) e altas densidade de picos (>33000 picos/mm²).

Assim mostrou-se que o fator de correção proposto é adequado para canais com densidade de picos de 500 a 120000 picos/mm² e rugosidade relativa de até 15%. Para canais com baixa rugosidade relativa ($<7\%$), o método anterior sem fator de correção ξ pode ser usado para o cálculo do escoamento.

Capítulo 3

Metodologia

A metodologia para analisar o escoamento em microcanais foi similar a utilizada por Valdés *et al.* [2], com os casos sendo todos feitos em 2 dimensões. Primeiro foi construída uma geometria com 6 parâmetros de microcanal: rugosidade relativa, ε , altura máxima de pico, h_{\max} , densidade de pico, ρ_{picos} , comprimento de canal, L, raio interno e externo referentes ao canal anular.

Os parâmetros foram baseados em uma geometria usada por Valdés *et al.* [2] cujos valores estão mostrados na Tabela 1.

O diâmetro hidráulico de canal liso, dh^o , neste caso foi definido como:

$$dh^o = \frac{4 \cdot A_w}{P_w} \quad (8)$$

onde A_w é a área molhada pelo fluido e P_w é o perímetro molhado.

A altura média, hm , foi definida como:

$$hm = \varepsilon \cdot dh^o \quad (9)$$

Tabela 1. Parâmetros do terceiro modelo de microcanal. (Valdés *et al.*[2]).

h_{\max} (μm)	hm (μm)	dh^o (μm)	ε (%)	ρ_{picos} (nº de picos/mm)	Raio interno (mm)	Raio externo (mm)	L (mm)
1,5	0,401	20	2,0	180	11,11	11,12	0,1

Os obstáculos de forma triangular do microcanal foram gerados de forma aleatória (mostrado no algoritmo abaixo), para simular as rugosidades em uma parede. A altura de cada pico foi obtida por uma distribuição aleatória gaussiana, o posicionamento e a largura

da base por uma distribuição aleatória uniforme.

Foram obtidas 3 diferentes realizações para uma distribuição e em uma realização foram feitos 3 etapas de refinamentos de malha para estudo de convergência.

A distribuição aleatória foi verificada ao se obter três diferentes realizações aleatórias dos picos e, então, calculados os resultados de escoamento ao variar a queda de pressão em três valores (0,1; 1 e 10 bar). Foram calculados os desvios padrão e o erro entre os coeficientes de resistência, K , das três realizações. Este erro foi calculado a partir do desvio padrão das amostras e do intervalo de confiança da média amostral da distribuição t (*Student*), $t_{\alpha/2, n-1}$, definido na Eq. (10). [11]:

$$erro = t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

onde α é a probabilidade de se obter uma amostra aleatória da população cujo intervalo de confiança não contém a média da população, n é o número de amostras e S é o desvio padrão amostral.

Com o valor de erro calculado pôde-se estabelecer os limites do intervalo de confiança em relação à média amostral das realizações.

Foi possível também comparar os resultados simulados com valores de K e número de Poiseuille calculados da correlação teórica de Valdés *et al.* [2].

3.1. Algoritmo para geração de rugosidades aleatória

A rugosidade nos microcanais foi simulada por Valdés *et al.* [2] pela geração aleatória de picos triangulares na superfície inferior de um canal liso com altura e comprimento fixas. O algoritmo apresentado constrói uma geometria de microcanal rugoso gerando pontos nas coordenadas cartesianas formando triângulos isósceles sem haver sobreposição entre eles. Tendo como base os 6 parâmetros citados anteriormente e

considerando as definições de diâmetro hidráulico (Eq. 4) e de área transversal (Eq. 5), foi possível gerar canais com obstáculos triangulares aleatórios. Em particular, este trabalho procurou gerar uma geometria com 6 parâmetros próximos ao terceiro modelo produzido por Valdés *et al.* [2].

Os passos do algoritmo desenvolvido estão listados abaixo:

1. Definir as seguintes variáveis de entrada: altura de canal (H), comprimento do canal (L), densidade de picos (ρ_{picos}), altura máxima (h_{max}) e mínima (h_{min}) do pico, rugosidade relativa (ϵ). A espessura do canal (W) deve ser considerada igual a um.
2. Calcular o espaçamento médio, l , entre rugosidades e o número de picos a serem construídos, n , com as equações abaixo:

$$l = \frac{1}{\rho_{picos}} \quad (11)$$

$$e \quad n = \frac{L}{l} \quad (12)$$

3. Definir um ponto, x_a , com coordenadas cartesianas $(x,y) = (0,0)$ para começar a construção das protuberâncias no início do canal.
4. Deve-se calcular inicialmente o primeiro triângulo considerando o canal sem protuberâncias. Então o volume ocupado pelos triângulos, V_t , será igual a zero, área molhada, A_w , igual ao comprimento multiplicado pela sua espessura e o

diâmetro hidráulico, d_h , deve ser calculado pela Eq.(4). A altura média de pico, h_m , será então obtida da Eq.(9).

5. Foi utilizada uma rotina previamente implementada em linguagem C [12] para a obtenção de números randômicos que seguem uma distribuição Gaussiana. A rotina gera dois números aleatórios uniformes entre 0 e 1 para, em seguida, fazer a transformação de Box-Muller [12] e obter um número a de uma distribuição Gaussiana. O número a é usado para se determinar a altura h de pico (coordenada y do pico) com a altura média h_m calculada pela Eq.(9) e com desvio padrão, D , obtido pela seguinte equação:

$$D = \frac{h_{max} - h_{min}}{3.0} \quad (13)$$

O desvio foi calculado desta maneira para que se obtenha uma variação pequena quando se calcular as alturas dos picos.

A altura, h , é obtida:

$$h = a \cdot D + h_m \quad (14)$$

6. Um segundo número aleatório, b , é obtido de uma distribuição uniforme. Este número é utilizado para obter o valor do comprimento da base do triângulo, w , através da altura, h .

$$w = b \cdot h \quad (15)$$

7. Um terceiro número aleatório é obtido de uma distribuição uniforme, d , para se calcular a coordenada x da posição central do pico através da fórmula:

$$x = d \cdot (l - 2 \cdot w) + (xa + w) \quad (16)$$

A figura 3 mostra, então, as 3 coordenadas do triângulo da superfície inferior do canal: $(x-w, 0)$; (x, h) ; $(x+w, 0)$.

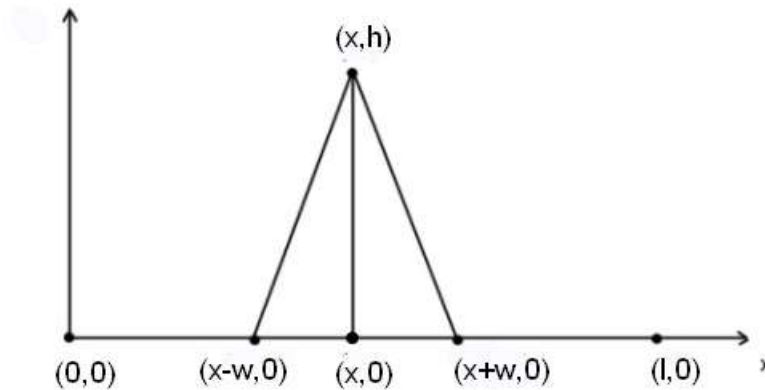


Figura 3. Coordenadas do triângulo formado nas coordenadas cartesianas.

8. Para se gerar os próximos triângulos deve-se definir um novo valor de xa . Somando-se 1 ao valor anterior ($xa = xa + 1$). Calcula-se o volume ocupado pelo fluido, V_f , e área molhada, A_w , até este passo. O volume ocupado pelo(s) triângulo(s) já construído(s) será, então:

$$V_t = \frac{2 \cdot w \cdot h}{2 \cdot W} \quad (17)$$

Portanto, o volume ocupado pelo fluido, V_f , será:

$$V_f = L \cdot H \cdot W - V_t \quad (18)$$

A área molhada, A_w , deve ser calculada pela fórmula:

$$A_w = (L + 2 \cdot m - 2 \cdot w) \cdot W \quad (19)$$

onde w é a base do triângulo e m , é o lado do triângulo molhado pelo fluido. O valor de m deve ser obtido a partir da altura h , e da base w , do triângulo pela equação abaixo:

$$m = \sqrt{\left(h^2 + \frac{w^2}{4}\right)} \quad (20)$$

9. Com os valores de A_w e V_f obtidos no passo anterior, deve-se obter novos valores de d_h pela Eq. (4) e h_m pela Eq. (9).

10. Retornar aos passos 5, 6 e 7 e obter as coordenadas do novo triângulo para o próximo intervalo x_a .

11. Ao se fixar o valor de n como número de picos, tem-se o valor desejado de picos para dada densidade de picos. Por último, deve-se calcular os valores de d_h , V_f e A_w finais do canal.

Ao final, obtém-se os pontos em coordenadas cartesianas do canal rugoso e a geometria formada pôde ser usada para a geração de malha. Com a geometria do canal obtida e as malhas geradas (descritas no próximo capítulo), pode-se iniciar a etapa de simulação.

3.2. Modelos Matemáticos e Condições de Simulação

As equações que governam o escoamento junto com as condições de contorno foram resolvidas numericamente com a técnica de volumes finitos e o algoritmo de acoplamento pressão-velocidade SIMPLE [13] (contido no *solver SimpleFoam* previamente implementado no OpenFOAM, usado para as realizar as simulações). Assumindo regime laminar, estacionário, escoamento completamente desenvolvido, incompressível e fluido Newtoniano, as equações de conservação para escoamentos viscosos em coordenadas cartesianas se apresentam da seguinte forma [10]:

- Equação de quantidade de movimento:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (21)$$

$$\rho v \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (22)$$

- Equação da continuidade:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (23)$$

onde u, v são os componentes da velocidade nos eixos x e y , respectivamente, ρ é a densidade do fluido, μ é a viscosidade dinâmica do fluido e P é a pressão.

As simulações foram feitas nos microcanais como o da Figura 4 que mostra o modelo da geometria construída com duas superfícies planas (superior e inferior) e as faces esquerda (*IN*) e direita (*OUT*) representando a entrada e a saída do escoamento.



Figura 4. Geometria do microcanal de 180 picos/mm superpostos em uma superfície (Valdés *et al.*[2]).

As seguintes condições foram impostas nas simulações:

Condições de contorno:

- Pressão fixa na face *IN* com até três valores (0,1; 1 e 10 bar) e na face *OUT*, com valor igual a 0 bar em todas simulações.

- Velocidade nula nas superfícies superior e inferior;

- Gradiente de velocidade nulo nas faces *IN* e *OUT*

- Gradiente de pressão nulo nas superfícies superior e inferior

Propriedades físicas do fluido:

- densidade do fluido ρ igual a 1057 kg/m³
- Viscosidade μ igual a 0,0134 kg/(m.s)

Como as malhas geradas foram não estruturadas, foi necessário usar o fator de correção de não-ortogonalidade de fluxo nas faces dos volumes de controle durante as simulações. As simulações foram finalizadas até se atingir uma tolerância relativa para os resíduos de velocidade e pressão de 10^{-5} .

3.3. Procedimento de cálculo

A velocidade média, V , principal resultado para este procedimento, foi obtida a partir do perfil de velocidade ao final da simulação na metade do canal e, então, feita uma integração numérica pela regra trapezoidal dos pontos interpolados. O resultado da integração foi dividido pela área transversal para obter a velocidade média, a qual foi usada para calcular o coeficiente de resistência K e número de Poiseuille simulados. Os valores de diâmetro hidráulico, d_h , e volume ocupado pelo fluido, V_f , e área molhada, A_w , foram obtidos do algoritmo descritos na seção 3.1.

Em canais anulares ou entre superfícies paralelas, a queda de pressão é calculada como:

$$\Delta P = K \cdot Q \quad (24)$$

e a vazão volumétrica como:

$$Q = A \cdot V \quad (25)$$

Partindo do valor de velocidade média, V , o coeficiente de resistência de simulação K_{efd} foi obtido pela relação:

$$K_{cf\acute{a}} = \frac{\Delta P}{A \cdot V} \quad (26)$$

Para o cálculo do coeficiente de resistência teórico, $K_{teórico}$, foi usada a seguinte relação vinda da teoria de escoamentos macroscópicos [2]:

$$K_{teórico} = \frac{32 \cdot \delta \cdot \mu \cdot L}{A \cdot d_h^2} \quad (27)$$

onde δ é o coeficiente geométrico do fator de atrito que, nesse caso por se tratar de um setor de canal anular, será igual a 1,5, L é o comprimento de canal; A é a área transversal média e d_h é o diâmetro hidráulico.

Para a equação do $K_{teórico}$, correspondente a um canal liso com o mesmo diâmetro hidráulico e mesma área transversal de um canal rugoso, foram consideradas as definições de diâmetro hidráulico (Eq. 4) e de área transversal (Eq. 5) usadas pelo quarto método de cálculo de Valdés *et al.*[2].

Substituindo a Eq. (4) para o diâmetro hidráulico, d_h , e Eq. (5) para a área transversal média A na Eq. (27), podemos obter a seguinte relação final usada para o cálculo do coeficiente teórico:

$$K_{teórico} = \frac{3 \cdot \mu \cdot A_w^2 \cdot L^2}{V_f^3} \quad (28)$$

O volume ocupado pelo fluido, V_f , e a superfície molhada, A_w , foram obtidos inicialmente da geometria rugosa construída.

Para o cálculo do número de Poiseuille simulado, foi usada a equação de Darcy-Weisbach para a queda de pressão:

$$\Delta P = \frac{f \cdot \rho \cdot L \cdot V^2}{2 \cdot d_h} \quad (29)$$

e número de Reynolds foi definido como :

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot d_h}{\mu} \quad (30)$$

O diâmetro hidráulico, d_h , teve a mesma definição da eq. (4).

Isolando o fator de atrito, f , da Eq. (29) e multiplicando pela Eq. (30) chega-se a seguinte forma do número de Poiseuille, Po , de um microcanal, usado para os cálculos dos valores simulados:

$$Po = \frac{2 \Delta P d_h^2}{L \cdot V \cdot \mu} \quad (31)$$

Para obter o valor teórico do número de Poiseuille, usou-se o valor do fator de atrito, f , dado pela Eq.(1) com o numerador multiplicado pelo fator geométrico, δ , e pelo número de Reynolds, Re [2]. Assim o número de Poiseuille teórico $Po_{teórico}$ ficou com valor constante:

$$Po_{teórico} = 96 \quad (32)$$

Com as equações acima pôde-se determinar valores teóricos e simulados para o coeficiente de resistência, K , e o número de Poiseuille.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

O canal obtido do algoritmo de geração de rugosidade e usado em todos os testes teve os parâmetros com os seguintes valores:

Tabela 2. Parâmetros da geometria de microcanal.

$\varepsilon(\%)$	$h_m(m)$
2	3.78E-7
$\rho_{\text{picos}}(\text{picos/mm})$	A (m)
180	1,00E-05
L(m)	$V_f(m^2)$
1,00E-04	9,80E-10
$d_h(m)$	$A_w(m)$
1,90E-005	2,06E-004

A Figura 5 mostra a geometria formada pelo algoritmo.

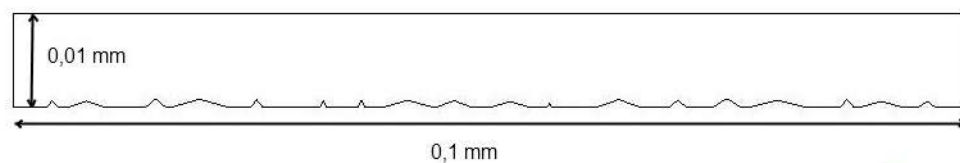


Figura 5. Geometria obtida pelo algoritmo.

Nesta geometria, os valores de rugosidade relativa, ε , e de densidade de picos, ρ_{picos} , e comprimento de canal, L, foram mantidos iguais ao modelo de Valdés *et al.* [2]. O

diâmetro hidráulico, d_h , e altura média de pico, h_m , ficaram com valores próximos ao modelo numa tentativa de aproximar a um modelo de microcanal já testado, neste caso, o terceiro modelo de Valdés *et al.*[2]. Os valores de área transversal média, A , volume ocupado pelo fluido, V_f , e área molhada, A_w , obtidos foram usados nos cálculos do coeficiente de resistência, K , e do número de Poiseuille, Po .

4.1. Convergência da malha

As malhas geradas no *software* ICEM foram não estruturadas para os volumes se adaptarem melhor ao formato triangular dos obstáculos, como mostra a Figura 6. Nas proximidades das paredes do canal foi feito um refinamento de aproximadamente dez vezes em relação aos elementos da metade do canal. Foram formadas camadas de prisma na superfície superior e inferior para capturar os efeitos da camada limite e as perturbações sentidas nas paredes rugosa e lisa podendo assim avaliar melhor a perda de carga.

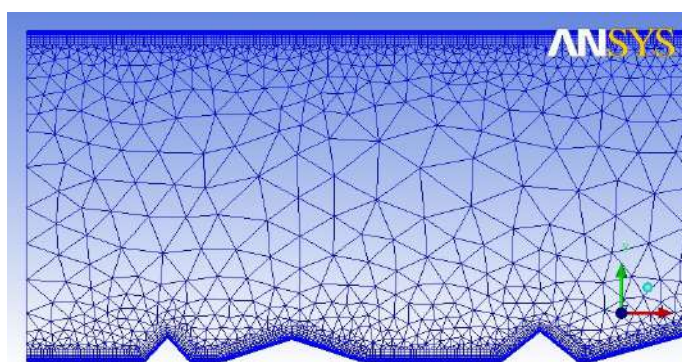


Figura 6. Malha gerada.

Tabela 3. Resultados de refinamento de malhas

Malha	Volumes	Tamanho máximo elemento(m)	K(Pa.s/m ²)
M1	35337	geração automática	1,83E+10
M2	36566	1,00E-006	1,83E+10
M3	42577	5,00E-007	1,81E+10
M4	75740	2,50E-007	1,83E+10

Tabela 3. Resultados de refinamento de malhas.

Durante a etapa de verificação de convergência de uma realização foram geradas 4 malhas, partindo de uma malha inicial M1 e fazendo refinamentos consecutivos com a diminuição do elemento máximo da malha M2 (mostradas na Tabela 3). A malha M1 foi gerada com tamanho máximo de volume definido automaticamente pelo programa, então, para fazer o refinamento foi necessário gerar a malha M2 com tamanho máximo definido, que neste caso foi igual a 10^{-6} m, para iniciar o refinamento consecutivo reduzindo o tamanho máximo de volume. As simulações nas malhas foram feitas nas condições de contorno e propriedades do fluido descritas no capítulo 3. Para esta análise foi mantida uma queda de pressão, ΔP , igual a 10 bar nas quatro malhas. Os resultados calculados para K ficaram bem próximos, com diferenças inferiores a cerca de 1%.

Na Figura 7, são mostrados os perfis de velocidade ao longo da coordenada y, na metade do comprimento do canal. A Figura 8 mostra a queda de pressão ao longo do canal. Estas duas figuras mostram resultados correspondentes às simulações de escoamento com uma queda de pressão no canal igual a 10 bar. Pode-se verificar a convergência em malha dos resultados.

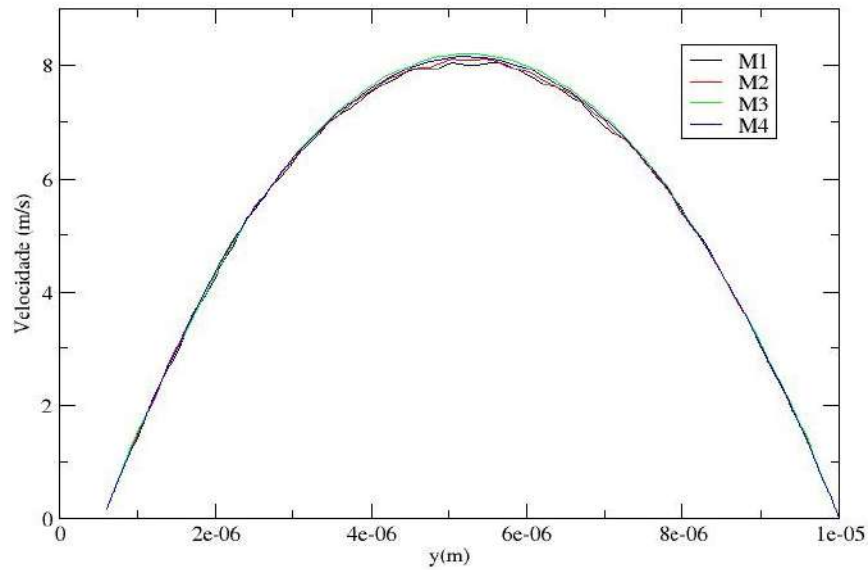


Figura 7. Convergência do perfil de velocidade para $\Delta P=10$ bar.

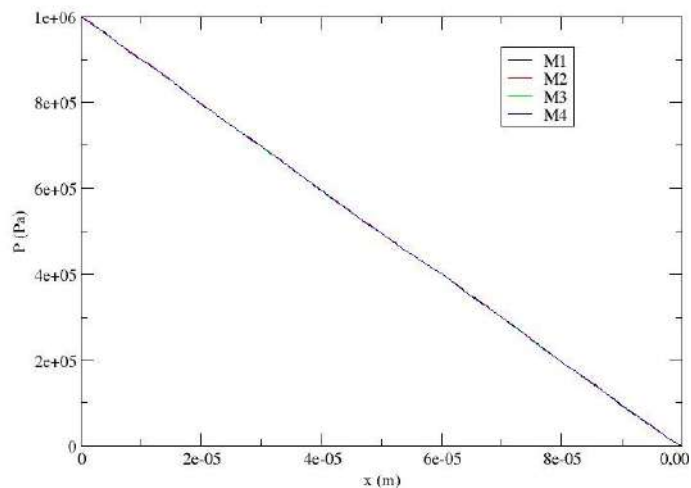


Figura 8. Convergência do perfil de pressão ao longo do canal para $\Delta P=10$ bar.

Durante a simulação das malhas M1 e M2 o custo computacional foi relativamente baixo já que o tempo de simulação até atingir os critérios de convergência foram pequenos (aproximadamente meia hora) para uma simulação local. Para as malhas M3 e M4 os custos foram mais elevados com tempo de simulação aproximado de 3 horas. Ao avaliar os custos computacionais e os resultados da malha M2, esta foi considerada suficiente para

estabelecer convergência e a mesma foi usada nas análises seguintes. A similaridade dos resultados pôde ser atribuída ao fato do refinamento ter sido feito no meio do canal, local onde os efeitos de rugosidade são menos importantes no escoamento. Então, o coeficiente K sofreu pequenas mudanças com aumento do número de volumes.

4.2. Esquemas de Interpolação

Foram testados três esquemas de interpolação : *upwind*, *QUICK* e *limitedLinear*. As simulações na malha M2 foram feitas nas condições de contorno e propriedades do fluido descritas no capítulo 3. Para esta análise foi mantida uma queda de pressão, ΔP , igual a 10 bar. A figura 9 mostra os resultados dos perfis de velocidade na coordenada y retirados na metade do comprimento do canal, L , ao final das simulações.

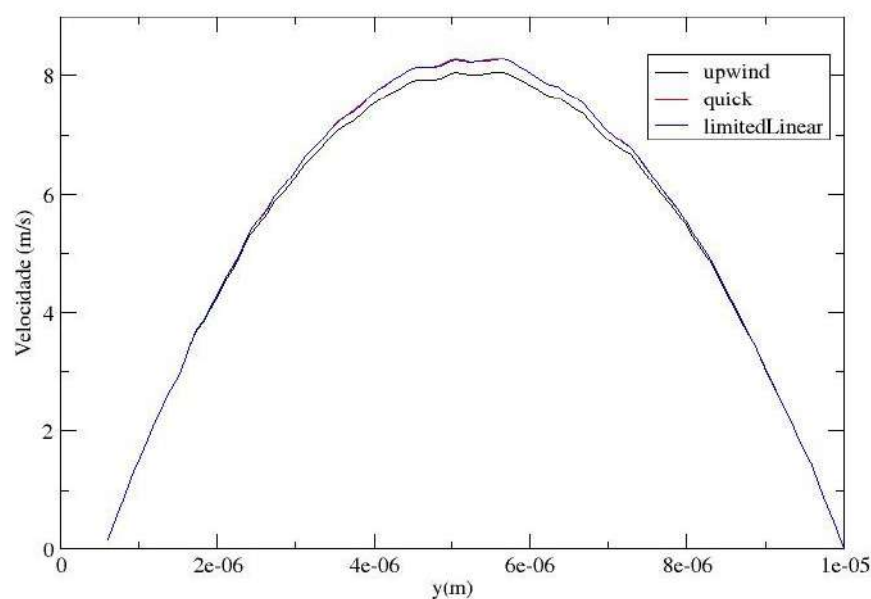


Figura 9. Perfil de velocidade para $\Delta P=10$ bar.

Todos os resultados para os três esquemas de interpolação foram semelhantes

observando seus perfis. Na Tabela 3 apresentam-se os valores calculados para o coeficiente de resistência, K , que ficaram próximos com diferenças inferiores a cerca de 1%. Foi usado o esquema *upwind* para as etapas seguintes do trabalho.

Tabela 4. Resultados do teste para esquemas de interpolação

Esquemas de Interpolação	$K(\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2)$
upwind	1,83E+010
QUICK	1,82E+010
limitedLinear1	1,82E+010

4.3. Análise de escoamento

Nesta etapa, foram geradas três realizações de um dado microcanal rugoso usando o procedimento estatístico de construção para uma análise estatística e comparação com a teoria. Os canais tiveram as mesmas características listadas da Tabela 2. Evidentemente, cada canal teve uma malha gerada. Porém, procurou-se manter os números de volumes nas mesmas próximos, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5. Número de volumes nas realizações.

Realização	nº de volumes
R1	35337
R2	34326
R3	34243

Os escoamentos nas diferentes realizações foram simulados com queda de pressão ΔP de (0,1 , 1 e 10 bar) . Mesmo para o valor máximo de 10 bar, o número de Reynolds , Re , não foi maior que 50, onde ocorreria a influência do desenvolvimento de escoamento e os efeitos de entrada e saída do fluido no canal. Neste trabalho, o valor de Re não ultrapassou 8,16.

Nas Figuras 10 a 12, temos os resultados da simulação para os perfis de velocidade ao longo da coordenada y (ou altura do canal) para as três realizações. A posição escolhida para retirar o perfil de velocidades foi na metade do comprimento do canal. Os gráficos

mostram pequena diferença de velocidade na base do canal, atingindo um valor máximo de velocidade de cerca de 8 m/s para $\Delta P= 10$ bar, 0,8m/s para $\Delta P=1$ bar e 0,08 m/s para $\Delta P=0,1$ bar.

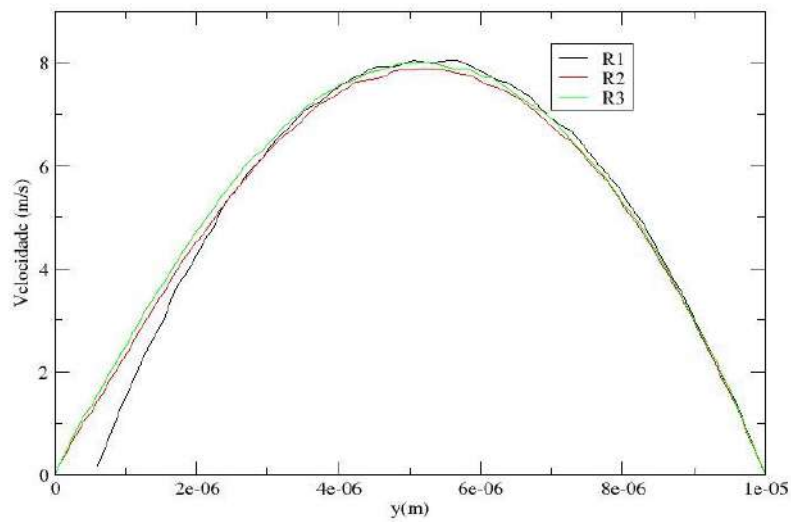


Figura 10. Perfil de velocidade ao longo da coordenada y para $\Delta P=10$ bar.

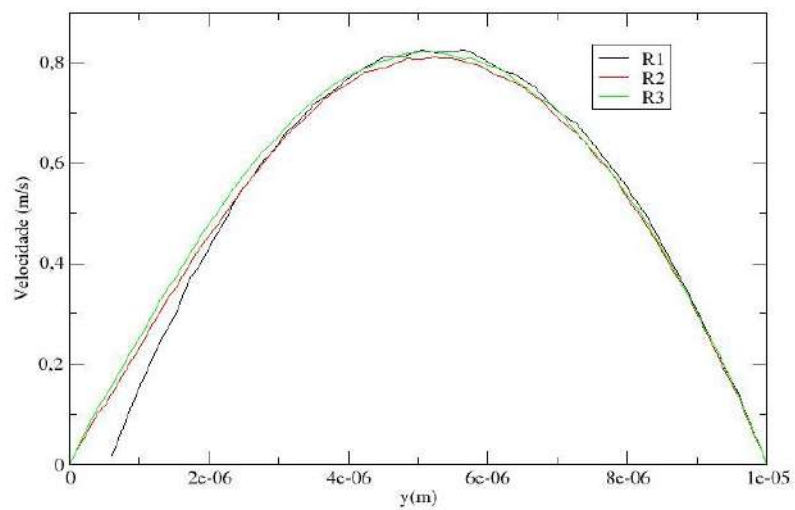


Figura 11. Perfil de velocidade na coordenada y para $\Delta P=1$ bar.

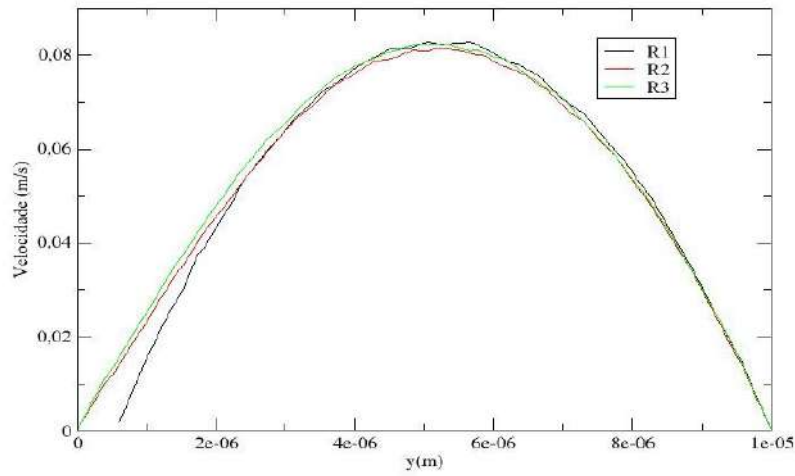


Figura 12. Perfil de velocidade na coordenada y para $\Delta P = 0,1$ bar.

Nas Figuras 13 a 15 apresentam-se os perfis de pressão ao longo da coordenada x (ou comprimento do canal). Os perfis foram retirados na metade da altura do canal. O perfil foi linear como esperado e com valores praticamente coincidentes entre as realizações.

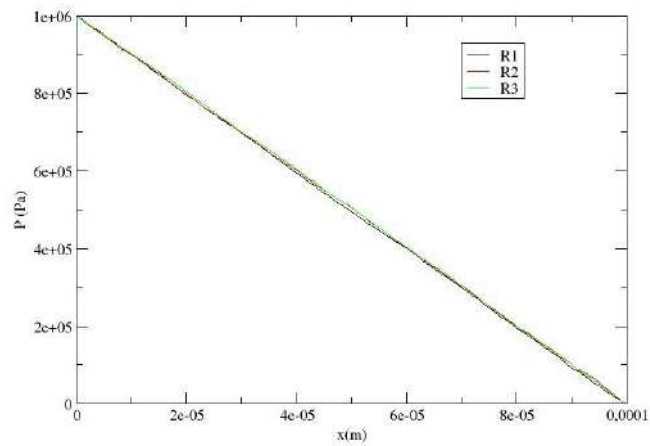


Figura 13. Perfil de pressão ao longo da coordenada x para $\Delta P = 10$ bar.

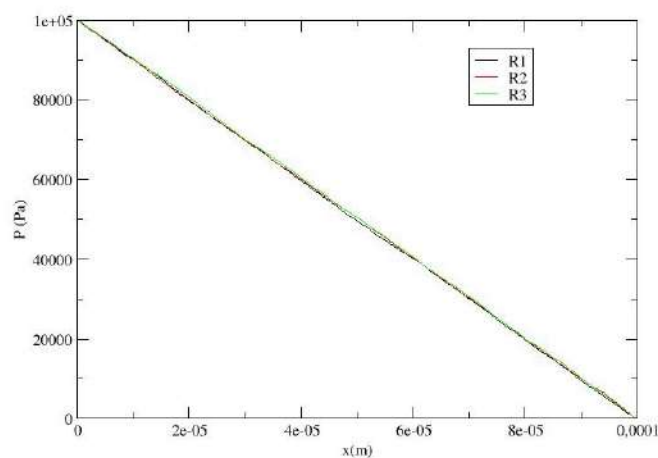


Figura 14. Perfil de pressão ao longo da coordenada x para $\Delta P=1$ bar.

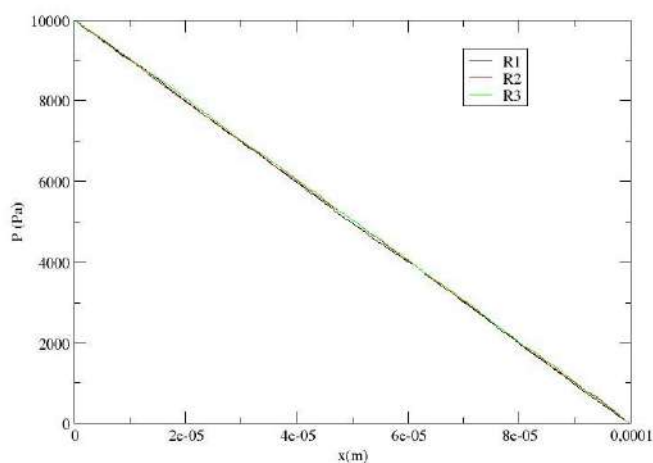


Figura 15. Perfil de pressão na coordenada x para $\Delta P=0,1$ bar.

A partir do escoamento nas diferentes realizações, pôde-se obter os valores respectivos de coeficiente de resistência K e do número de Poiseuille, Po .

Na Tabela 6 apresentam-se os resultados dos cálculos das médias do K_{cfd} e Po para cada ΔP . Foram calculados os desvios padrão e erros em cada queda de pressão fixada. Os erros ficaram todos abaixo de 6,47% em relação aos valores médios.

Tabela 6. Valores de K e Po.

	$\Delta P=10$ bar	$\Delta P=1$ bar	$\Delta P=0,1$ bar
K cfd médio (Pa.s/m²)	1,86E+010	1,86E+010	1,86E+010
Desvio Padrão	3,44E+008	4,83E+008	3,97E+008
erro	8,55E+008	1,20E+009	9,86E+008
nº Po médio	1,00E+002	9,99E+001	1,00E+002
Desvio Padrão	1,85E+000	2,51E+000	2,14E+000
erro	4,60E+000	6,24E+000	5,31E+000

A tabela 7 mostra os valores simulados e calculados por equações teóricas para K, tanto para o canal rugoso como para o liso. Os desvios percentuais entre $K_{\text{teórico}}$ e K_{cfd} puderam ser considerados baixos uma vez que estão na faixa de erro de determinação dos valores simulados. Os desvios entre K_{liso} e $K_{\text{teórico}}$ foram mais altos devido as adaptações às rugosidades empregadas para o cálculo do $K_{\text{teórico}}$. O valor calculado de K para o terceiro modelo por Valdés *et al.* [2] foi de 3,10E+11 Pa.s/m². A diferença de valores pode ser explicada pelo modo de obtenção de rugosidades empregada por Valdés *et al.* [2].

Tabela 7. Comparação entre resultados teóricos e simulados para K e Po para diferentes quedas de pressão.

	$\Delta P=10$ bar	$\Delta P=1$ bar	$\Delta P=0,1$ bar
K teórico (Pa.s/m²)	1,82E+010	1,82E+010	1,82E+010
K cfd médio (Pa.s/m²)	1,86E+010	1,86E+010	1,86E+010
Desvio K teórico-cfd(%)	2,20E+000	2,20E+000	2,20E+000
K liso (Pa.s/m²)	1,61E+010	1,61E+010	1,61E+010
Desvio K teórico-liso (%)	1,15E+001	1,15E+001	1,15E+001

Capítulo 5

Conclusões

Este trabalho avaliou o escoamento em microcanais rugosos por um método que inclui a influência de rugosidade. Foram usadas simulações numéricas e correlações baseadas na teoria de escoamentos macroscópicos. O método apresentou resultados satisfatórios para a simulação da geometria proposta ao comparar os erros padrão entre as simulações e analisar os perfis de velocidade e pressão para uma distribuição. O desvio percentual de valores teóricos e simulados foram pequenos.

Em trabalhos futuros pode-se:

- Modelar canais tridimensionais com as rugosidades em forma piramidal para uma representação mais realista da rugosidade como desenvolvido por Valdés *et al.* [4].
- Ultrapassar os limites impostos do método de cálculo (rugosidade relativa igual a 7% e densidade de picos igual 180 picos/mm) e usar o fator de correção ξ da Eq. (6) durante os cálculos.
- Incluir equações de conservação de energia nos modelos matemáticos para também avaliar performance de transferência de calor nos microcanais através do número de Nusselt.
- Modelar canais com rugosidades nas superfícies inferior e superior, ocorridos em

outras aplicações, e avaliar se o método usado apresenta desvios significativos.

- Avaliar o uso de mais dois formatos para a rugosidade (retangular e semicircular) como propostos por Croce *et al.* [5] e Zhang [10].

Referências Bibliográficas

- [1] KHADEM, M. H. ; SHAMS, M.; HOSSAINPOUR, S., Numerical simulation of roughness on flow and heat transfer in microchannels at slip flow regime, **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 38, p. 69-77, 2009.
- [2] VALDÉS, J. R.; MIANA, M. J.; PUTZ, T., Numerical Investigation of the Influence of Roughness on the Laminar Incompressible Fluid Flow through annular microchannels, **International Journal of Heat Mass Transfer**, 50, p. 1865-1878, 2007.
- [3] FONTES, C. E.; SILVA, L. F. L. R.; LAGE, P. L. C.; RODRIGUES, R. C.; **Introdução à Fluidodinâmica Computacional – Escola Piloto Virtual**. 2005. Rio de Janeiro, RJ – Brasil.
- [4] VALDÉS, J. R.; MIANA, M. J.; PUTZ, T., Introduction of a length correction factor for the calculation of laminar flow through microchannels with high surface roughness, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 51, p. 4573-4582, 2008.
- [5] CROCE, G.; D'AGARO, P., Numerical analysis of roughness effect on microtube heat transfer, **Superlattices Microstructures**. v. 35, p. 601- 616, 2004.

- [6] JUDY, J.; MAYNES, D.; WEBB, B.W., Characterization of frictional pressure drop for liquid flows through microchannels, **International Journal of Heat Mass and Transfer** , 45, p. 3477-3489, 2002.
- [7] KOHL, M. J.; ABDEL-KHALIK, S. I.; JETER, S.M.; SADOWSKI, D.L., An experimental investigation of microchannel flow with internal pressure measurements, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 48, v.8 ,p. 1518-1533, 2005.
- [8] XU, B.; OOI, K.T.; WONG, N.T.; CHOI, W.K., Experimental Investigation of flow friction for liquid flow in microchannels, **International Communications in Heat and Mass Transfer**, p. 1165-1176, 2000.
- [9] TOH, K. C.; CHEN, X.Y.; CHAI, J.C., Numerical computation of fluid flow and heat transfer in microchannels, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 45, p. 1688-1704, 2005.
- [10] ZHANG, C.; CHEN, Y.; SHI, M., Effects of roughness elements on laminar flow and heat transfer in microchannels, **Chemical Engineering And Processing**, 49, p. 1188-1192, 2010.

- [11] SCHWAAB, M.; PINTO, J. C., **Análise de Dados Experimentais I. Fundamentos de Estatística e Estimação de Parâmetros.** 1ª ed., 2007, 462 p.
- [12] VETTERLING, W. T.; PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; FLANNERY, B. P., **Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing.**, 2ª ed., Cambridge:1992. 994 p.
- [13] PATANKAR, S. V.; **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow.** Taylor & Francis Group: Nova York, 1980.