



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

PEDRO PAULO DE ARAÚJO XAVIER

**ESTUDO TEÓRICO DA CONVECÇÃO FORÇADA LAMINAR EM MICROCANAIS
VIA MÉTODO DAS LINHAS**

**JOÃO PESSOA - PB
2018**

PEDRO PAULO DE ARAÚJO XAVIER

**ESTUDO TEÓRICO DA CONVECÇÃO FORÇADA LAMINAR EM MICROCANAIS
VIA MÉTODO DAS LINHAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica como requisito parcial
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jacques Cesar dos Santos

X3e Xavier, Pedro Paulo de Araújo

Estudo teórico da convecção forçada laminar em micro canais via método das linhas./ Pedro Paulo de Araújo Xavier. – João Pessoa, 2018.

52f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Jacques César dos Santos.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Mecânica) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Convecção 2. Micro canais 3. Método das linhas 4. Número de knudsen. I. Título

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. 621(043.2)

PEDRO PAULO DE ARAÚJO XAVIER

**ESTUDO TEÓRICO DA CONVECÇÃO FORÇADA LAMINAR EM MICROCANAIS
VIA MÉTODO DAS LINHAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica como requisito parcial
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos
Departamento de Engenharia Mecânica – UFPB
(Orientador)

Prof. Dr. Jacques Cesar dos Santos
Departamento de Engenharia Mecânica – UFPB
(Examinador)

Prof. Dr. Adriano da Silva Marques
Instituto Federal da Paraíba – IFPB
(Examinador)

Dedico este trabalho e os demais a serem escritos a Vanessa, aguardando as tardes de domingo, cafés sem pressa e pela vida que virá a existir.

AGRADECIMENTOS

“O único desenvolvimento que existe é o desenvolvimento humano”, com a frase de Josué de Castro agradeço este trabalho:

Aos meus pais e minha avó Maria do Carmo, pelo apoio incomum e incansável ao longo dos anos e etapas em minha vida, porém em especial a pessoa que me mostrou as primeiras letras, minha mãe.

Aos irmãos de sangue e posições Marcos André, Gabriel e Guilherme e todos os amigos fictícios encontrados nas páginas impressa.

Aos amigos Kleverton (o amigo maior), Jacques Cesar (pela sabedoria), J(pelo companheirismo e amizade), Leandro (pelas incontáveis conversas e cervejas) e ao amigo que me foi apresentado pelos destinos nos 45 minutos do segundo tempo Eufrásio Danda.

“Ai, senhor! – disse a sobrinha. Bem pode merecer manda-los queimar como os outros, pois não seria de se estranhar que, tendo sarado meu senhor tio da doença cavalheristica, lendo estes resolve virar pastor, e, o que seria pior, fazer-se poeta, que segundo dizem, é doença incurável e contagiosa”. Dom Quixote

RESUMO

Este trabalho tem como análise teórica da convecção de um fluido newtoniano em regime laminar, hidrodinamicamente desenvolvido, em regime permanente, no interior de um microcanal, para uma simulação próxima do fenômeno real, pelo uso do método das linhas no intuito de discretizar o problema, pode-se verificar o comportamento local de cada parte do objeto em estudo. Essas aproximações são realizadas por um número finito de interações computacionais na proposta de uma convergência junto ao fenômeno de estudo real. O resultado do problema foi possível a partir da solução de um sistema de equações diferenciais ordinárias acopladas. A análise das equações diferenciais se mostra mais aproximada a medida que o número de linhas aumenta gerando então um maior esforço computacional. Com o objetivo de obter um resultado aplicável em mais situações, foi variado o número de knudsen obtendo dados diferentes, sendo este número a razão em que no meio contínuo as equações hidrodinâmicas podem ser aplicadas. Outros dados obtidos no problema trazem a análise do perfil de velocidade e perfil de temperatura média desde a sua entrada até o total desenvolvimento térmico. A conclusão do trabalho se baseia na comparação dos resultados obtidos no método com trabalhos anteriores.

Palavras-chave: Convecção. Microcanais. Método das linhas. Número de Knudsen.

ABSTRACT

The purpose of this work is to theoretically analyze the convection of a Newtonian fluid, undergoing a fully developed laminar flow inside of a microchannel. In order to simulate a close-to-real phenomenon, the flow line method was used. It also allows to analyze the local behavior of the fluid. These approximations of the phenomena were done by a finite number of computational iterations aiming to converge to the real phenomena of study. The result was possible by finding the solution of a coupled system of differential ordinary equations. The solution gets closer to reality as the number of lines increases, thus requiring a larger computational effort. To have a result that can be applied to more scenarios, it was used various numbers of Knudsen. This extra data shows the analysis of the speed and temperature profiles, starting at the entrance point and up to the fully developed region. The conclusion of this work is based on similar results from other authors.

Keywords: Convection. Microchannel. Flow line method. Number Knudsen.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Decaimento de temperatura, $kn=0,1$ e 21 linhas	35
Figura 2 - Decaimento de temperatura, $kn=0,1$ e 51 linhas	35
Figura 3 - Numero de nusselt $kn=0,1$ e 21linhas.....	36
Figura 4 - Decaimento de temperatura, $kn=0,09$ e 21 linhas	36
Figura 5 - Decaimento de temperatura, $kn=0,09$ e 51 linhas	37
Figura 6 - Numero de nusselt , $kn=0,09$ e 21 linhas.....	37
Figura 7 - Decaimento de temperatura, $kn=0,08$ e 21 linhas	38
Figura 8 - Decaimento de temperatura, $kn=0,08$ e 51 linhas	38
Figura 9 – Numero de Nusselt, $kn=0,08$ e 21 linhas	39
Figura 10 - Decaimento de temperatura, $kn=0,07$ e 21 linhas.....	39
Figura 11 - Decaimento de temperatura, $kn=0,07$ e 51 linhas.....	40
Figura 12 – Numero de nusselt , $kn=0,07$ e 21 linhas	40
Figura 13 - Decaimento de temperatura, $kn=0,06$ e 21 linhas.....	41
Figura 14 - Decaimento de temperatura, $kn=0,06$ e 51 linhas.....	41
Figura 15 - Numero de nusselt, $kn=0,06$ e 21 linhas.....	42
Figura 16 - Decaimento de temperatura, $kn=0,05$ e 21 linhas.....	42
Figura 17 - Decaimento de temperatura, $kn=0,05$ e 51 linhas.....	43
Figura 18 - Numero de Nusselt, $kn=0,05$ e 21 linhas	43
Figura 19 - Decaimento de temperatura, $kn=0,04$ e 21 linhas.....	44
Figura 20 - Decaimento de temperatura, $kn=0,04$ e 51 linhas.....	44
Figura 21 – Numero de nusselt, $kn=0,04$ e 21 linhas	45
Figura 22 - Decaimento de temperatura, $kn=0,03$ e 21 linhas.....	45
Figura 23 - Decaimento de temperatura, $kn=0,03$ e 51 linhas.....	46
Figura 24 - Decaimento de temperatura, $kn=0,03$ e 51 linhas.....	46
Figura 25 - Decaimento de temperatura, $kn=0,02$ e 21 linhas.....	47
Figura 26 - Decaimento de temperatura, $kn=0,02$ e 51 linhas.....	47
Figura 27 – Numero de nusselt, $kn=0,02$ e 21 linhas	48
Figura 28 - Decaimento de temperatura, $kn=0,01$ e 21 linhas.....	48
Figura 29 - Decaimento de temperatura, $kn=0,01$ e 51 linhas.....	49
Figura 30 - Numero de Nusselt , $kn=0,01$ e 11 linhas.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,1.	25
Tabela 2 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,09.	26
Tabela 3 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,08.	27
Tabela 4 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,07.	28
Tabela 5 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,06.	29
Tabela 6 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,05.	30
Tabela 7 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,04.	31
Tabela 8 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,03.	32
Tabela 9 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,02.	33
Tabela 10 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,01.	34

LISTA DE SÍMBOLOS

Kn - Número de Knudsen

$Nu(z)$ - Número de Nusselt Local

$T(y,z)$ - Temperatura das placas do microcanal

$u(y)$ - Campo de velocidade dentro do canal (artigo)

$W(y)$ - Perfil adimensional de velocidade (artigo)

Y, y - Coordenadas adimensional e dimensional transversal

Z, z - Coordenadas adimensional e dimensional longitudinal

α - Coeficiente de difusividade térmica

α_t - Coeficiente de acomodação térmica

β_v - Coeficiente de deslizamento da velocidade na parede

β_t - Coeficiente de salto de temperatura

$\theta(y,z)$ - Perfil de temperatura

$w(y_i)$ - Perfil local de velocidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 ESTADO DA ARTE.....	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
3.1 ALGORITMO COMPUTACIONAL	19
3.2 ADIMENSIONALIZAÇÃO	19
3.3 MODELO DISCRETIZADO	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

As pesquisas realizadas neste estudo são referentes a convecção interna que acontece em microcanais, tendo o fluido em estudo características incompressíveis, atuando em regime laminar e no seu desenvolvimento térmico. São considerados fatores diferentes em problemas de microescala quando comparados a problemas de macroescala. Modelos de microescala o escorregamento superficial da parede do microcanal em estudo tem grande importância no comportamento do fluido assim como nos resultados coletados.

Outro fator como o salto de temperatura existente na entrada do fluido junto a parede dos microcanais estando o fluido e a placa com temperaturas distintas, existindo então uma mudança de temperatura e características do fluido. Como este problema tem características relativamente complexas de serem verificadas de forma analítica e a construção de um protótipo levaria a um custo elevado, hoje com o nosso mercado competitivo atual não cabe tal tipo de investimento antes de uma indicação teórica fundamentada então se é elaborada a partir de uma análise numérica com base em rotinas computacionais, afim de cogita características e comportamento do objeto, podendo assim viabilizar a construção do protótipo cabendo assim testes práticos e posteriormente a fabricação para consumo.

Este trabalho compara métodos distintos de solução do problema de convecção em microcanais, gerando assim resultados convergentes e aproximados entre modelos. O método que foi comparado é chamado de GITT, tem uma rotina computacional de solução diferente e fundamentação teórica também distinta.

No capítulo do algoritmo computacional é explicado como é feita a adimensionalização do problema, tornando genérico a qualquer tamanho de microcanal, também é demonstrado como são feitas as ligações entre todas as linhas do problema, existindo assim uma interação da estrutura discretizada do problema, podendo ser aplicada a hipótese do contínuo e verificado a variação de energia e momentum sobre o elemento em estudo.

No capítulo de resultados e discussões após o programa ser estabelecido e gerado os dados numéricos de nusselt e o comportamento de temperatura tanto quantitativo quanto qualitativo, são comparados aos dados do artigo de Cotta assim é acreditada a solução pelo método das linhas, então no segundo momento existe uma variação dos fatores superficial de microescala do objeto, sendo então feito um estudo de convergência dos dados obtidos. Mostrando um campo de dados de diferentes número de knudsen, comprovando assim o

quanto as características superficiais modificam a transferência de calor e a variação de temperatura do microcanal.

Na convecção em macroescala, grandezas como velocidade, temperatura, transferência de calor, podem ser quantificadas e avaliadas de acordo com número de Prandtl, Reynolds, Nusselt. Em casos de microescala estes mesmos fatores não podem descrever o problema de forma clara e não avaliam de forma correta as características do fluido em análise.

Assim, características diferentes devem ser avaliadas e mensuradas no estudo de tais elementos. Fatores superficiais se mostram importantes na solução do problema, sendo esses em macroescala desconsiderados pois sua região de atuação é insignificante quando comparado ao tamanho do elemento em estudo, porém em microescala fatores superficiais como número de Knudsen, fator de acomodação térmico, fator de dissipação térmica tem efeitos significativos na transferência de calor e comportamento do fluido.

O número de Knudsen A medida que os fatores mudam a transferência de calor e perfil de temperatura variam de forma significativa, modificando assim intensificando troca de calor. Na região de entrada do fluido nas placas o salto de temperatura o qual acontece pela diferença de temperatura entre o fluido e a placa de temperatura superficial constante é propícia para a transferência de calor e é também fator importante na solução do problema, pois como o fluido está em desenvolvimento térmico a temperatura varia conforme o fluido percorre a placa. Como a temperatura local do fluido varia muito é tomada como referência a temperatura média, tendo assim mudanças locais de temperatura influência na temperatura média.

2 ESTADO DA ARTE

Este trabalho usou como referência a fundamentação do problema de convecção em microcanais e dados do trabalho de Mikhailov, Cotta.

A transferência de calor por convecção em regime permanente para fluxos dentro de microcanais, formados por placas paralelas é resolvida de forma analítica fazendo-se uso do método da transformada integral e a solução analítica exata do correspondente problema de autovalor, em termos de funções hipergeométricas confluentes. Um algoritmo simbólico-numérico é desenvolvido no *software* Mathematica.

A bibliografia da área de transferência de calor da última década demonstrou um vívido e crescente interesse em análise térmica de fluxos em micro canais, em abordagens analíticas e experimentais, com relação a técnicas de resfriamento de dispositivos microeletrônicos e com o desenvolvimento de sensores micro eletromecânicos e atuadores (MEMS), como apontado em várias revisões recentes.

Como a informação analítica disponível sobre transferência de calor em dutos não poderia ser diretamente estendida a fluxos dentro de microcanais nas paredes com salto de temperatura, algumas contribuições têm sido recentemente direcionadas para a análise de convecção forçada interna em microescala.

Em Barron; Wang *et al.*, (1996, p.23), a abordagem original no trabalho clássico de Graetz (1883, p.79), é usada para calcular os autovalores para o problema de Graetz, estendido a salto de temperatura. O método usado aparenta ser instável depois da quinta raiz, de forma que apenas os quatro primeiros autovalores foram considerados confiáveis. Os autores concluíram que um método aperfeiçoado com uma velocidade de cálculo superior seja de interesse futuro. O problema considerado na referência Barron; Wang *et al.*, (1996, p.23), tem, também, uma solução exata em termos da função hipergeométrica confluyente, explorada na referência Mikhailov; Cotta (1997 p.449), com o intuito de desenvolver relações no *software* Mathematica para computar os autovalores desejados com a exatidão definida pelo usuário.

Seguindo o trabalho na referência Barron; Wang *et al.*, (1996, p.23), a mesma técnica foi empregada para resolver o problema de transferência de calor por convecção em fluxo laminar em micro canais cilíndricos, com temperatura constante na fronteira Barron; Wang; Ameel; Warrington (1997), levando em conta ambas a velocidade de escoamento e o aumento da temperatura na parede do tubo. Larrode; Housiadas; Drossinos (2000), resolveu o

problema de convecção forçada para fluxos em tubos circulares em regime de salto de temperatura, com condição de fronteira em temperatura uniforme.

Os efeitos de rarefação e coeficiente de acomodação de superfície foram considerados. Eles definiram uma fronteira extrapolada fictícia, onde a velocidade do fluido não salta. Deste modo, o perfil de velocidade é convertido no mesmo usado para o fluxo contínuo. Recentemente, a contribuição analítica foi direcionada para formulações de problemas mais gerais, incluindo dissipação viscosa no fluido e geometrias de fluxo bidimensional, como canais retangulares. Para esse propósito, uma abordagem híbrida, analítica e numérica, mais flexível foi empregada nas ideias da Transformada Integral Generalizada (GITT), desta forma, evitando mais análises envolvidas em relação com o problema de autovalor inerente à expansão de autofunção proposta .

O objetivo deste paper é apresentar resultados do caderno preparado na plataforma Mathematica S. Wolfram, “The Mathematica book, 4th ed., Wolfram Media/Cambridge University Press” 1990, que fornece soluções analíticas e relações computacionais para as distribuições de velocidade e temperatura de um fluido fluindo em micro canais de placas paralelas, levando-se em conta os saltos de velocidade e temperatura na superfície.

Utiliza-se o método clássico de transformada integral e a solução analítica exata do problema de autovalor correspondente em termos de funções hipergeométricas confluentes Mikhailov; Ozisik (1984). Para facilitar o uso dos nossos resultados, o caderno com mais detalhes será disponibilizado pelo autor, quando requisitado.

Considere a transferência de calor em regime permanente, em desenvolvimento térmico, hidrodinamicamente desenvolvido, com fluxo laminar forçado no interior de um micro canal, sob as seguintes condições adicionais:

- a) O fluxo é incompressível com propriedades físicas constantes;
- b) Convecção de calor livre e dissipação de energia viscosa desprezível;
- c) Distribuição de temperatura de entrada uniforme;
- d) Temperatura das paredes do canal determinadas e uniformes.

A temperatura $T(y,z)$ de um fluido com perfil de velocidade $u(y)$, difusividade térmica α , fluindo através do canal na região $0 \leq z \leq \infty$, $0 \leq y \leq y_1$ é, então, descrita pelo seguinte problema Mikhailov; Ozisik (1984):

$$U(y) \frac{\partial \theta}{\partial y}(y, z) = \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2}(y, z) \tag{1}$$

As condições de contorno para $y = 0$ e na superfície $y = y_1$ são:

$$\left. \frac{\partial T(y, z)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \beta_t \lambda \left. \frac{\partial T(y, z)}{\partial y} \right|_{y=y_1} = T_s - T(y_1, z), z > 0 \quad (2-4)$$

Onde $\beta_t = ((\frac{2-\alpha_t}{\alpha_t})(\frac{2\gamma}{\gamma+1}))/Pr$, α_t é o coeficiente de acomodação térmica, λ é o principal caminho livre molecular, $\gamma = c_p/c_v$, enquanto c_p é o calor específico a pressão constante, c_v é o calor específico a volume constante, T_s é a temperatura na parede do canal e o número de Knudsen é definido como $Kn = \frac{\lambda}{2y_1}$. A distribuição de temperatura na entrada do canal é considerada uniforme:

$$T(y, 0) = T_{in}, 0 \leq y \leq y_1 \quad (5)$$

O problema definido pelas equações pode ser reescrito com a introdução das seguintes variáveis adimensionais:

$$Y = \frac{y}{y_1}; Z = \frac{\alpha z}{u_{av} y_1^2}; \theta(Y, Z) = \frac{T(y, z) - T_s}{T_{in} - T_s}; W(Y) = \frac{u(y)}{u_{av}} \quad (6)$$

Na forma adimensional do problema definida acima, os dois parâmetros $Kn\beta_t$ são substituídos por $Kn\beta_v\beta$, onde $\beta = \beta_t/\beta_v$. As equações adimensionais são, então, dadas por:

$$W(Y) \frac{\partial \theta(Y, Z)}{\partial Z} = \frac{\partial^2 \theta(Y, Z)}{\partial Y^2}, 0 \leq Y \leq 1, Z > 0 \quad (7)$$

$$\left. \frac{\partial T(y, z)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \beta_t \lambda \left. \frac{\partial T(y, z)}{\partial y} \right|_{y=y_1} = T_s - T(y_1, z), z > 0 \quad (8)$$

$$\theta(Y, 0) = 1, 0 \leq Y \leq 1 \quad (9)$$

O perfil de velocidade adimensional é dado pela equaç:

$$W(Y) = \frac{6Kn\beta_v + 3(1 - Y^2)/2}{1 + 6Kn\beta_v} \quad (10)$$

Como $\theta(Y, Z)$ é determinada pelos sistemas 6, a temperatura média $\theta_{av}(Z)$ é dada por :

$$\theta_{av}(Z) = \frac{\int_0^1 W(Y)\theta(Y, Z)dY}{\int_0^1 W(Y)dY} \quad (11)$$

O número de Nusselt $Nu(Z) = h(z)y_1/k$, onde $h(z)$ é o coeficiente de transferência de calor, pode ser encontrado pela equação [17]:

$$Nu(Z) = -\frac{1}{\theta_{av}(z)} \frac{\partial \theta(1, Z)}{\partial Y} \quad (12)$$

É bem conhecido que, para $Kn = 0$, equações do indicador 6 são referidas como o problema de Graetz-Nusselt, em honra do trabalho pioneiro de Graetz em 1885, e Nusselt em 1910.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 ALGORITMO COMPUTACIONAL

É o conjunto de sequência não ambíguas e definidas que devem ser executadas em um intervalo finito de tempo.

O método escolhido gera solução do problema com características de controle e qualidade que são o número de linhas que o algoritmo vai executar por vez. Então a medida que o número de linhas aumenta o erro tende a diminuir de forma a colocar o resultado numa faixa de convergência melhor.

Porém, a medida que o número de linhas aumenta o esforço computacional se torna maior, portanto avaliação de parâmetros e conhecimento do problema ajuda na solução. Após a elaboração do algoritmo que tem como solução a resolução de equações diferencial ordinária de forma sucessivas e tem como necessidade o conhecimento de um parâmetro, permitindo que os demais fiquem em função deste.

Assim, no problema a temperatura superficial do material é conhecida e tida como constante gerando assim no sistema um problema de valor inicial, possibilitando sua solução por técnicas matemáticas e com as interações numéricas. A discretização do sistema obedece a diferenciação finita dos elementos, assim as linhas passam a se tornar as equações a serem resolvidas.

3.2 ADIMENSIONALIZAÇÃO

Na elaboração do programa, algumas variáveis do artigo foram renomeadas porém, o seu significado físico continua o mesmo.

$$\theta = y, z = x$$

$$w(y) \frac{\partial \theta}{\partial z}(y, z) = \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2}(y, z) \tag{13}$$

$$0 < y < 1 \tag{14}$$

$$z > 0 \tag{15}$$

Equação 13 trata da condição do problema.

Equação 14 trata da condição de contorno do modelo a ser estudado.

Equação 15 mostra a região de entrada do fluido.

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (16)$$

Equação 16 propõe que a variação de temperatura só acontece no eixo z ou seja a medida que o fluido passa pelo microcanal.

$$(k_n \beta_v \beta) \left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_{y=1} = \frac{-1}{2} \theta(y, z), \quad \theta(y, z) = 1, \quad 0 \leq y \leq 1 \quad (17)$$

Equação 17 tratam da condição de contorno do problema e como existe simetria no escoamento só existe necessidade de resolver o problema na metade do microcanal, pois o outro lado tem o mesmo comportamento do lado considerado.

$$w(y) = \frac{6k_n \beta_v + 3(1 - y^2)/2}{1 + 6k_n \beta_v} \quad (18)$$

Equação 18 descreve o perfil de velocidade do fluido no escoamento.

$$\theta_{\Delta v}(z) = \frac{\int_0^1 w(y) \theta(y, z) \partial y}{\int_0^1 w(y) \partial y} \quad (19)$$

$$NU(z) = \frac{-1}{\theta_{\Delta v}(z)} \frac{\partial \theta(1, z)}{\partial y} \quad (20)$$

Equação 19 descreve a variação de temperatura ao longo do escoamento do fluido e assim a troca térmica é descrita diferença de temperatura que é dada por consequência na equação 20 pelo número de nusselt, avaliando a quantidade de calor trocada ao longo do caminho até a equalização de temperatura

3.3 MODELO DISCRETIZADO

Vai ser gerado agora o modelo para os 3 tipos de áreas do experimento, parede do microcanal, região adjacente a parede e o meio do microcanal. Podendo assim fazer a discretização de todas as partes do problema.

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{w(y)} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \quad (21)$$

Para $i=1$ ($y=0$), temos:

$$\Delta y = \frac{1}{(m-1)} \quad (22)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{w(0)} \frac{2(\theta_2 - \theta_1)}{\Delta y^2} \quad (23)$$

A linha $i=1$ é o centro do microcanal, assim o problema vai usar como dito anteriormente a simetria da superfície.

$$w(0) = \frac{6k_n\beta_v + \frac{3}{2}}{1 + 6k_n\beta_v} \quad (24)$$

$$\frac{1}{w(0)} = \frac{1 + 6k_n\beta_v}{6k_n\beta_v + \frac{3}{2}} \quad (25)$$

Para, $2 \leq i \leq m-2$ que é a área que compreendida entre o meio do microcanal e superfície.

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\theta_{i+1} - 2\theta_i + \theta_{i-1}}{\Delta y^2} \frac{1}{w(y_i)} \quad (26)$$

$$w(y_i) = \frac{6k_n\beta_v + 3(1 - ((i-1)\Delta y)^2/2)}{1 + 6k_n\beta_v} \quad (27)$$

Equação 27 mostra o perfil de velocidade para os elementos que estão acima da parede.

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial y}(y, z) \right|_{y=1} + \frac{\theta(1, z)}{2(k_n\beta_v\beta)} = 0 \quad (28)$$

Para o parede do microcanal temos $i=m$

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} + \frac{\theta}{2(k_n\beta_v\beta)} = 0 \leftrightarrow \frac{\theta_m - \theta_{m-1}}{\Delta y} + \frac{\theta_m}{2(k_n\beta_v\beta)} = 0 \quad (29)$$

$$\theta_m = \frac{\theta_{m-1}}{\left(1 + \frac{\Delta y}{2(k_n\beta_v\beta)}\right)} \quad (30)$$

Equação 30 descreve a temperatura na parede do canal, fazendo uso de derivada atrasada e como é conhecido a temperatura superficial é possível o programa resolver esta equação e distribuir o resultado aos demais pontos da discretização.

Para $i=m-1$:

$$\frac{\partial \theta_{m-1}}{\partial z} = \frac{\theta_m - 2\theta_{m-1} + \theta_{m-2}}{\Delta y^2} \frac{1}{w(y_{m-1})} \quad (33)$$

Calculando a temperatura média na parede do canal.

$$\theta_{\Delta v}(z) = \frac{\int_0^1 w(y)\theta(y,z)\partial y}{\int_0^1 w(y)\partial y} = \left(\frac{w_1\theta_1 + w_m\theta_m}{2} + \sum_{i=2}^{i=m-1} w_i\theta_i \right) \Delta y \quad (34)$$

Nusselt na parede do canal.

$$\text{Nu} = \frac{-1}{\theta_{\Delta v}} \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=1} \quad (35)$$

$$\theta_m = \frac{\theta_{m-1}}{\left(1 + \frac{\Delta y}{2(k_n\beta_v\beta)} \right)} \quad (36)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O método de análise do problema consiste na observação preliminar do fenômeno físico e logo após a mudança de parâmetro de ordem micro escalar.

O objetivo é, de forma mais rápida, levar a análise do modelo experimental a resultados práticos, pois os efeitos de superfície citados acima são obtidos pela razão entre o comprimento livre médio das moléculas em uma dada escala de comprimento. Como o modelo de estudo é teórico e possível e mudança do número de knudsen no intuito de avaliar em uma gama maior de situações as mudanças de comportamento do fluido ao percorrer o canal tornando dados mais abrangentes podendo ser usados em experimentos práticos.

Cada tabela gerada representa em seus dados quantitativamente a variação de comportamento do fluido ao longo da trajetória, mostrando que a medida que o fator superficial diminuía a convergência tendia ser mais rápida entretanto o número de nusselt mostrava uma elevação quando comparados aos dados obtidos em artigo, indicando existir uma maior transferência de calor a medida que o valor de knudsen diminuía.

Foi usado o método de linhas, Schiesser (1991), segundo Wouer et al (2005) na tentativa de convergência com resultados já existentes na literatura. Este método de semi-discretização deixa a temperatura constante e as demais variáveis discretizadas. Sendo aplicado neste trabalho o modelamento principalmente nas derivadas centrais e nas equações de difícil resolução se identifica um resultado de modelamento abrupto.

A convergência dos dados neste estudo passou a ser validada a partir da terceira casa decimal com os resultados. Os dados experimentais de knudsen foram obtidos de 0,01 a 0,1 com incremento de 0,01. A temperatura local na região de entrada tem uma elevação significativa, porém quando comparada com a variação de temperatura média se torna pequena, pois a maior mudança de velocidade do fluido próxima é em uma região da parede é pequena para variar a temperatura média do fluido porém tem influência na troca de calor com as paredes externas da placa.

Todas as interações geradas no programa são acompanhadas de gráficos de decaimento de temperatura, porém a medida que se aumenta o número de linhas do gráfico, a visualização das cores se torna menor, perdendo a nitidez do decaimento. Dessa forma, serão exibido os gráficos de 21 linhas e 51 linhas de todos os fatores superficiais simulados.

As interações realizadas mostram que a mudança de características nas paredes do microcanal fazem com que a curva de decaimento de temperatura mude a sua característica geométrica, mostrando o escoamento com knudsen abaixo de 0,1 tem uma região de inflexão

maior na entrada do fluido nas paredes do canal este comportamento é condizente com os dados apresentados nas tabelas, pois a troca térmica do fluido se torna maior e assim o decaimento de temperatura é mais rápido. Ficando assim representado que a medida que o número de Knudsen diminui e região de desenvolvimento térmico passa a ser menor e o fluido fica com temperatura equalizada com as paredes do fluido de forma mais rápida.

O número de Nusselt tem significado importante também no estudo do problema, sendo representado de forma gráfica e atua diretamente no funcionamento do microcanal pois ele define a troca térmica do fluido a medida que o fluido o percorre o objeto. Como a temperatura tem um decaimento rápido na entrada do fluido na proporção que o Knudsen decai o número de Nusselt também se comporta de forma distinta a medida que o número de Knudsen varia.

O comportamento do número de Nusselt com o Knudsen igual a 0,1 é obtido graficamente por uma reta sem pontos de inflexão e tem formato suave, porém a medida que o Knudsen varia o formato da reta também é modificado, gerando uma série de inflexões. Neste trabalho será apresentado de forma gráfica o número de Nusselt com 21 linhas.

Tabela 1 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,1.

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001	Cotta ¹
0,005	3,2275	3,1265	3,1038	3,0948	3,0922	3,0902	3,0887	3,0873
0,01	2,7636	2,7166	2,7079	2,7049	2,7042	2,7036	2,7032	2,7029
0,015	2,5174	2,4885	2,4840	2,4827	2,4824	2,4822	2,4821	2,482
0,02	2,3549	2,3347	2,3319	2,3313	2,3312	2,3311	2,3311	2,3311
0,025	2,2363	2,2210	2,2191	2,2188	2,2188	2,2188	2,2188	2,2188
0,03	2,1445	2,1323	2,1309	2,1307	2,1308	2,1308	2,1308	2,1309
0,035	2,0706	2,0605	2,0595	2,0594	2,0594	2,0595	2,0595	2,0595
0,04	2,0095	2,0009	2,0001	2,0000	2,0001	2,0001	2,0002	2,0002
0,045	1,9580	1,9504	1,9498	1,9498	1,9498	1,9499	1,9499	1,95
0,05	1,9138	1,9071	1,9065	1,9066	1,9066	1,9067	1,9067	1,9067
0,055	1,8755	1,8694	1,8689	1,8689	1,8690	1,8690	1,8691	1,8691
0,06	1,8418	1,8363	1,8359	1,8359	1,8359	1,8360	1,8360	1,836
0,065	1,8121	1,8070	1,8066	1,8066	1,8067	1,8067	1,8068	1,8068
0,07	1,7857	1,7809	1,7805	1,7806	1,7806	1,7806	1,7807	1,7807
0,075	1,7620	1,7575	1,7572	1,7572	1,7572	1,7573	1,7573	1,7573
0,08	1,7407	1,7365	1,7361	1,7361	1,7362	1,7362	1,7362	1,7326
0,085	1,7215	1,7175	1,7171	1,7171	1,7171	1,7172	1,7172	1,7172
0,09	1,7040	1,6845	1,6999	1,6999	1,6999	1,6999	1,6999	1,6999
0,095	1,6882	1,6702	1,6842	1,6842	1,6842	1,6842	1,6842	1,6842
0,1	1,6737	1,6402	1,6699	1,6698	1,6699	1,6699	1,6699	1,6699

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	0,9793	0,9813	0,9818	0,9821	0,9822	0,9822	0,9823
0,01	0,9653	0,9672	0,9678	0,8402	0,9682	0,9682	0,8404
0,015	0,9529	0,9548	0,9554	0,9556	0,9557	0,9558	0,9559
0,02	0,9415	0,9434	0,9440	0,9442	0,9443	0,9444	0,9444
0,025	0,9309	0,9328	0,9333	0,9336	0,9337	0,9337	0,9338
0,03	0,9209	0,9227	0,9232	0,9235	0,9236	0,9236	0,9237
0,035	0,9113	0,9131	0,9136	0,9139	0,9139	0,9140	0,9141
0,04	0,9021	0,9039	0,9044	0,9046	0,9047	0,9048	0,9048
0,045	0,8933	0,8950	0,8955	0,8958	0,8958	0,8959	0,8959
0,05	0,8848	0,8864	0,8869	0,8872	0,8872	0,8873	0,8873
0,055	0,8765	0,8781	0,8786	0,8788	0,8789	0,8790	0,8790
0,06	0,8684	0,8700	0,8705	0,8707	0,8708	0,8709	0,8709
0,065	0,8605	0,8621	0,8626	0,8628	0,8629	0,8630	0,8630
0,07	0,8529	0,8544	0,8549	0,8551	0,8552	0,8553	0,8553
0,075	0,8454	0,8469	0,8474	0,8476	0,8477	0,8477	0,8478
0,08	0,8380	0,8396	0,8400	0,8402	0,8403	0,8404	0,8404
0,085	0,8309	0,8323	0,8328	0,8330	0,8331	0,8331	0,8332
0,09	0,8238	0,8253	0,8257	0,8259	0,8260	0,8261	0,8261
0,095	0,8169	0,8183	0,8188	0,8190	0,8190	0,8191	0,8191
0,1	0,8100	0,8115	0,8119	0,8121	0,8122	0,8123	0,8123

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

¹ R. M. Cotta , Mixed symbolic-numerical computation of convective heat transfer with slip flow in microchannels, tabela (2).

Tabela 2 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,09.

Z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	3,3789	3,2816	3,2616	3,2541	3,2520	3,2505	3,2494
0,01	2,8716	2,8273	2,8202	2,8181	2,8176	2,8172	2,8171
0,015	2,6051	2,5782	2,5746	2,5739	2,5737	2,5737	2,5737
0,02	2,4305	2,4117	2,4096	2,4093	2,4093	2,4094	2,4094
0,025	2,3037	2,2895	2,2881	2,2880	2,2881	2,2882	2,2883
0,03	2,2060	2,1946	2,1937	2,1937	2,1938	2,1939	2,1939
0,035	2,1276	2,1182	2,1175	2,1176	2,1176	2,1177	2,1178
0,04	2,0630	2,0550	2,0544	2,0545	2,0546	2,0547	2,0548
0,045	2,0087	2,0017	2,0012	2,0013	2,0014	2,0015	2,0015
0,05	1,9622	1,9560	1,9556	1,9557	1,9557	1,9558	1,9559
0,055	1,9220	1,9163	1,9159	1,9160	1,9161	1,9162	1,9162
0,06	1,8867	1,8816	1,8812	1,8813	1,8814	1,8814	1,8815
0,065	1,8557	1,8509	1,8506	1,8506	1,8507	1,8508	1,8508
0,07	1,8280	1,8236	1,8233	1,8233	1,8234	1,8234	1,8235
0,075	1,8034	1,7992	1,7989	1,7989	1,7990	1,7990	1,7991
0,08	1,7812	1,7772	1,7769	1,7770	1,7770	1,7771	1,7771
0,085	1,7612	1,7574	1,7571	1,7572	1,7572	1,7572	1,7573
0,09	1,7431	1,7395	1,7392	1,7392	1,7393	1,7393	1,7393
0,095	1,7267	1,7232	1,7229	1,7229	1,7230	1,7230	1,7230
0,1	1,7117	1,7084	1,7081	1,7081	1,7081	1,7081	1,7082

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	0,9782	0,9801	0,9807	0,9809	0,9810	0,9811	0,9811
0,01	0,9636	0,9655	0,9660	0,9663	0,9664	0,9664	0,9665
0,015	0,9508	0,9526	0,9531	0,9534	0,9535	0,9535	0,9536
0,02	0,9391	0,9409	0,9414	0,9416	0,9417	0,9418	0,9418
0,025	0,9282	0,9299	0,9304	0,9306	0,9307	0,9308	0,9308
0,03	0,9179	0,9196	0,9200	0,9203	0,9203	0,9204	0,9205
0,035	0,9081	0,9097	0,9102	0,9104	0,9105	0,9105	0,9106
0,04	0,8987	0,9003	0,9008	0,9010	0,9010	0,9011	0,9011
0,045	0,8897	0,8912	0,8917	0,8919	0,8920	0,8920	0,8921
0,05	0,8809	0,8824	0,8829	0,8831	0,8832	0,8832	0,8833
0,055	0,8725	0,8740	0,8744	0,8746	0,8747	0,8747	0,8748
0,06	0,8643	0,8657	0,8661	0,8663	0,8664	0,8665	0,8665
0,065	0,8563	0,8577	0,8581	0,8583	0,8584	0,8584	0,8585
0,07	0,8484	0,8498	0,8503	0,8505	0,8505	0,8506	0,8506
0,075	0,8408	0,8422	0,8426	0,8428	0,8429	0,8429	0,8429
0,08	0,8333	0,8347	0,8351	0,8353	0,8354	0,8354	0,8354
0,085	0,8260	0,8274	0,8278	0,8279	0,8280	0,8281	0,8281
0,09	0,8188	0,8202	0,8206	0,8207	0,8208	0,8209	0,8209
0,095	0,8118	0,8131	0,8135	0,8137	0,8137	0,8138	0,8138
0,1	0,8049	0,8061	0,8065	0,8067	0,8068	0,8068	0,8069

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 3 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,08.

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	3,5392	3,4460	3,4289	3,4232	3,4218	3,4207	3,4201
0,01	2,9832	2,9417	2,9361	2,9348	2,9346	2,9345	2,9345
0,015	2,6947	2,6697	2,6670	2,6667	2,6668	2,6669	2,6670
0,02	2,5072	2,4897	2,4882	2,4882	2,4883	2,4885	2,4886
0,025	2,3718	2,3586	2,3576	2,3578	2,3579	2,3580	2,3582
0,03	2,2679	2,2574	2,2567	2,2569	2,2570	2,2571	2,2573
0,035	2,1850	2,1762	2,1757	2,1759	2,1760	2,1762	2,1763
0,04	2,1169	2,1093	2,1089	2,1091	2,1092	2,1093	2,1094
0,045	2,0597	2,0531	2,0527	2,0529	2,0530	2,0531	2,0532
0,05	2,0109	2,0050	2,0047	2,0049	2,0050	2,0050	2,0051
0,055	1,9687	1,9634	1,9631	1,9633	1,9633	1,9634	1,9635
0,06	1,9319	1,9270	1,9268	1,9269	1,9270	1,9270	1,9271
0,065	1,8995	1,8949	1,8947	1,8948	1,8949	1,8949	1,8950
0,07	1,8707	1,8665	1,8662	1,8663	1,8664	1,8664	1,8665
0,075	1,8450	1,8410	1,8408	1,8409	1,8409	1,8410	1,8410
0,08	1,8220	1,8182	1,8180	1,8181	1,8181	1,8182	1,8182
0,085	1,8013	1,7977	1,7974	1,7975	1,7975	1,7976	1,7976
0,09	1,7825	1,7791	1,7789	1,7789	1,7789	1,7790	1,7790
0,095	1,7655	1,7622	1,7620	1,7620	1,7621	1,7621	1,7621
0,1	1,7501	1,7469	1,7467	1,7467	1,7467	1,7468	1,7468

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	0,9771	0,9789	0,9794	0,9796	0,9797	0,9798	0,9798
0,01	0,9619	0,9636	0,9641	0,9643	0,9644	0,9645	0,9645
0,015	0,9486	0,9503	0,9507	0,9510	0,9511	0,9511	0,9512
0,02	0,9366	0,9381	0,9386	0,9388	0,9389	0,9390	0,9390
0,025	0,9253	0,9269	0,9273	0,9275	0,9276	0,9277	0,9277
0,03	0,9148	0,9163	0,9167	0,9169	0,9170	0,9170	0,9171
0,035	0,9047	0,9062	0,9066	0,9068	0,9069	0,9069	0,9070
0,04	0,8951	0,8965	0,8970	0,8972	0,8972	0,8973	0,8973
0,045	0,8859	0,8873	0,8877	0,8879	0,8879	0,8880	0,8880
0,05	0,8770	0,8783	0,8787	0,8789	0,8790	0,8790	0,8791
0,055	0,8684	0,8697	0,8701	0,8702	0,8703	0,8703	0,8704
0,06	0,8600	0,8613	0,8616	0,8618	0,8619	0,8619	0,8620
0,065	0,8518	0,8531	0,8534	0,8536	0,8537	0,8537	0,8538
0,07	0,8439	0,8451	0,8455	0,8456	0,8457	0,8457	0,8458
0,075	0,8361	0,8373	0,8377	0,8378	0,8379	0,8379	0,8380
0,08	0,8285	0,8297	0,8300	0,8302	0,8303	0,8303	0,8303
0,085	0,8211	0,8222	0,8226	0,8227	0,8228	0,8228	0,8229
0,09	0,8138	0,8149	0,8153	0,8154	0,8155	0,8155	0,8155
0,095	0,8066	0,8077	0,8081	0,8082	0,8083	0,8083	0,8084
0,1	0,7996	0,8007	0,8010	0,8012	0,8012	0,8013	0,8013

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 4 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,07.

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	3,7071	3,6183	3,6045	3,6006	3,5997	3,5992	3,5990
0,01	3,0972	3,0584	3,0541	3,0536	3,0537	3,0538	3,0540
0,015	2,7851	2,7617	2,7599	2,7600	2,7601	2,7603	2,7605
0,02	2,5840	2,5677	2,5667	2,5669	2,5671	2,5673	2,5675
0,025	2,4398	2,4274	2,4268	2,4271	2,4273	2,4274	2,4276
0,03	2,3297	2,3198	2,3194	2,3196	2,3198	2,3200	2,3201
0,035	2,2422	2,2339	2,2336	2,2338	2,2340	2,2341	2,2342
0,04	2,1705	2,1634	2,1631	2,1633	2,1635	2,1636	2,1637
0,045	2,1105	2,1042	2,1040	2,1042	2,1043	2,1044	2,1045
0,05	2,0594	2,0538	2,0536	2,0538	2,0539	2,0540	2,0541
0,055	2,0154	2,0103	2,0101	2,0103	2,0103	2,0104	2,0105
0,06	1,9770	1,9723	1,9721	1,9723	1,9724	1,9724	1,9725
0,065	1,9433	1,9389	1,9387	1,9389	1,9389	1,9390	1,9391
0,07	1,9134	1,9093	1,9092	1,9093	1,9093	1,9094	1,9094
0,075	1,8868	1,8830	1,8828	1,8828	1,8829	1,8830	1,8830
0,08	1,8629	1,8593	1,8591	1,8592	1,8592	1,8593	1,8593
0,085	1,8415	1,8381	1,8379	1,8379	1,8380	1,8380	1,8380
0,09	1,8222	1,8189	1,8187	1,8187	1,8187	1,8188	1,8188
0,095	1,8047	1,8015	1,8013	1,8013	1,8014	1,8014	1,8014
0,1	1,7888	1,7857	1,7855	1,7855	1,7856	1,7856	1,7856

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	0,9758	0,9775	0,9780	0,9782	0,9783	0,9783	0,9784
0,01	0,9600	0,9616	0,9620	0,9622	0,9623	0,9623	0,9624
0,015	0,9463	0,9478	0,9482	0,9484	0,9485	0,9485	0,9486
0,02	0,9339	0,9353	0,9357	0,9359	0,9359	0,9360	0,9360
0,025	0,9224	0,9237	0,9241	0,9243	0,9243	0,9244	0,9244
0,03	0,9115	0,9128	0,9132	0,9134	0,9134	0,9135	0,9135
0,035	0,9013	0,9025	0,9029	0,9031	0,9031	0,9032	0,9032
0,04	0,8915	0,8927	0,8930	0,8932	0,8932	0,8933	0,8933
0,045	0,8820	0,8832	0,8836	0,8837	0,8838	0,8838	0,8838
0,05	0,8729	0,8741	0,8744	0,8746	0,8746	0,8747	0,8747
0,055	0,8641	0,8653	0,8656	0,8657	0,8658	0,8658	0,8659
0,06	0,8556	0,8567	0,8570	0,8572	0,8572	0,8573	0,8573
0,065	0,8473	0,8484	0,8487	0,8488	0,8489	0,8489	0,8489
0,07	0,8392	0,8403	0,8406	0,8407	0,8408	0,8408	0,8408
0,075	0,8313	0,8323	0,8326	0,8328	0,8328	0,8329	0,8329
0,08	0,8236	0,8246	0,8249	0,8250	0,8251	0,8251	0,8251
0,085	0,8160	0,8170	0,8173	0,8174	0,8175	0,8175	0,8175
0,09	0,8086	0,8096	0,8099	0,8100	0,8100	0,8101	0,8101
0,095	0,8013	0,8023	0,8026	0,8027	0,8027	0,8028	0,8028
0,1	0,7942	0,7951	0,7954	0,7955	0,7956	0,7956	0,7956

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 5 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,06.

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	3,8803	3,7959	3,7851	3,7830	3,7828	3,7828	3,7829
0,01	3,2115	3,1750	3,1720	3,1721	3,1724	3,1727	3,1729
0,015	2,8748	2,8528	2,8515	2,8519	2,8521	2,8524	2,8527
0,02	2,6599	2,6445	2,6438	2,6442	2,6444	2,6447	2,6448
0,025	2,5068	2,4951	2,4946	2,4950	2,4952	2,4954	2,4956
0,03	0,2391	2,3811	2,3808	2,3811	2,3813	2,3815	2,3816
0,035	2,2985	2,2906	2,2903	2,2906	2,2908	2,2909	2,2910
0,04	2,2234	2,2165	2,2163	2,2165	2,2167	2,2168	2,2169
0,045	2,1606	2,1546	2,1544	2,1546	2,1547	2,1548	2,1549
0,05	2,1074	2,1020	2,1018	2,1020	2,1021	2,1022	2,1022
0,055	2,0616	2,0567	2,0565	2,0566	2,0567	2,0568	2,0569
0,06	2,0217	2,0172	2,0170	2,0172	2,0172	2,0173	2,0174
0,065	1,9868	1,9826	1,9824	1,9825	1,9826	1,9826	1,9827
0,07	1,9558	1,9519	1,9517	1,9518	1,9519	1,9519	1,9520
0,075	1,9283	1,9247	1,9245	1,9245	1,9246	1,9246	1,9247
0,08	1,9037	1,9003	1,9001	1,9001	1,9002	1,9002	1,9003
0,085	1,8817	1,8784	1,8782	1,8782	1,8782	1,8783	1,8783
0,09	1,8618	1,8586	1,8584	1,8585	1,8585	1,8585	1,8585
0,095	1,8438	1,8408	1,8406	1,8406	1,8406	1,8406	1,8407
0,1	1,8275	1,8246	1,8244	1,8244	1,8244	1,8244	1,8245

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	0,9745	0,9760	0,9764	0,9766	0,9767	0,9767	0,9767
0,01	0,9580	0,9594	0,9598	0,9599	0,9601	0,9601	0,9601
0,015	0,9439	0,9451	0,9455	0,9457	0,9458	0,9458	0,9458
0,02	0,9439	0,9323	0,9326	0,9328	0,9329	0,9329	0,3292
0,025	0,9193	0,9204	0,9207	0,9209	0,9210	0,9210	0,9210
0,03	0,9082	0,9093	0,9096	0,9098	0,9098	0,9098	0,9099
0,035	0,8977	0,8988	0,8991	0,8992	0,8993	0,8993	0,8993
0,04	0,8877	0,8887	0,8890	0,8891	0,8892	0,8892	0,8892
0,045	0,8781	0,8791	0,8793	0,8795	0,8795	0,8795	0,8796
0,05	0,8688	0,8698	0,8700	0,8702	0,8702	0,8702	0,8703
0,055	0,8598	0,8608	0,8610	0,8612	0,8612	0,8612	0,8613
0,06	0,8512	0,8521	0,8523	0,8524	0,8525	0,8525	0,8525
0,065	0,8427	0,8436	0,8438	0,8440	0,8440	0,8440	0,8441
0,07	0,8345	0,8353	0,8356	0,8357	0,8358	0,8358	0,8358
0,075	0,8264	0,8273	0,8275	0,8276	0,8277	0,8277	0,8277
0,08	0,8186	0,8194	0,8197	0,8198	0,8198	0,8198	0,8199
0,085	0,8109	0,8117	0,8120	0,8121	0,8198	0,8121	0,8122
0,09	0,8034	0,8042	0,8044	0,8045	0,8046	0,8046	0,8046
0,095	0,7960	0,7968	0,7970	0,7971	0,7972	0,7972	0,7972
0,1	0,7887	0,7895	0,7897	0,7898	0,7899	0,7899	0,7899

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 6 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,05.

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	4,0546	3,9739	3,9659	3,9653	3,9656	3,9660	3,9664
0,01	3,3234	3,2887	3,2865	3,2870	3,2874	3,2878	3,2881
0,015	2,9618	2,9407	2,9398	2,9403	2,9406	2,9409	2,9412
0,02	2,7333	2,7185	2,7180	2,7184	2,7186	2,7189	2,7191
0,025	2,5717	2,5604	2,5600	2,5604	2,5606	2,5607	2,5609
0,03	2,4496	2,4404	2,4401	2,4404	2,4406	2,4408	2,4409
0,035	2,3533	2,3455	2,3453	2,2682	2,3457	2,3458	2,3459
0,04	2,2749	2,2682	2,2680	2,2037	2,2683	2,2684	2,2685
0,045	2,2096	2,2037	2,2035	2,1490	2,2038	2,2039	2,2040
0,05	2,1543	2,1491	2,1489	2,1020	2,1491	2,1492	2,1492
0,055	2,1069	2,1021	2,1019	2,0612	2,1021	2,1022	2,1022
0,06	2,0657	2,0613	2,0611	2,0254	2,0613	2,0613	2,0614
0,065	2,0296	2,0255	2,0253	1,9938	2,0255	2,0255	2,0256
0,07	1,9977	1,9939	1,9937	1,9657	1,9938	1,9939	1,9939
0,075	1,9694	1,9659	1,9657	1,9406	1,9658	1,9658	1,9658
0,08	1,9441	1,9408	1,9406	1,9182	1,9407	1,9407	1,9407
0,085	1,9215	1,9183	1,9181	1,8979	1,9182	1,9182	1,9182
0,09	1,9011	1,8981	1,8979	1,8796	1,8979	1,8980	1,8980
0,095	1,8827	1,8798	1,8796	1,8631	1,8797	1,8797	1,8797
0,1	1,8661	1,8633	1,8631	1,9657	1,8631	1,8632	1,8632

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	0,9730	0,9743	0,9747	0,9748	0,9749	0,9749	0,9749
0,01	0,9559	0,9571	0,9574	0,9575	0,9576	0,9576	0,9576
0,015	0,9559	0,9424	0,9427	0,9428	0,9429	0,9429	0,9429
0,02	0,9282	0,9292	0,9295	0,9296	0,9296	0,9297	0,9297
0,025	0,9161	0,9171	0,9173	0,9174	0,9175	0,9175	0,9175
0,03	0,9048	0,9057	0,9059	0,9061	0,9061	0,9061	0,9061
0,035	0,9410	0,8949	0,8952	0,8953	0,8953	0,8953	0,8954
0,04	0,8839	0,8847	0,8849	0,8850	0,8851	0,8851	0,8851
0,045	0,8741	0,8847	0,8751	0,8752	0,8752	0,8752	0,8753
0,05	0,8647	0,8654	0,8656	0,8657	0,8658	0,8658	0,8658
0,055	0,8555	0,8563	0,8565	0,8566	0,8566	0,8566	0,8566
0,06	0,8467	0,8474	0,8476	0,8477	0,8477	0,8478	0,8478
0,065	0,8381	0,8388	0,8390	0,8391	0,8391	0,8391	0,8392
0,07	0,8297	0,8304	0,8306	0,8307	0,8307	0,8308	0,8308
0,075	0,8216	0,8222	0,8224	0,8225	0,8226	0,8226	0,8226
0,08	0,8136	0,8143	0,8144	0,8145	0,8146	0,8146	0,8146
0,085	0,8058	0,8064	0,8066	0,8067	0,8067	0,8068	0,8068
0,09	0,7982	0,7988	0,7990	0,7991	0,7991	0,7991	0,7991
0,095	0,7907	0,7913	0,7915	0,7915	0,7916	0,7916	0,7916
0,1	0,7833	0,7839	0,7841	0,7842	0,7842	0,7842	0,7842

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 7 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,04.

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	4,2232	4,1452	4,1391	4,1395	4,1400	4,1407	4,1413
0,01	3,4292	3,3956	3,3938	3,3944	3,3948	3,3952	3,3956
0,015	3,0438	3,0234	3,0224	3,0229	3,0232	3,0235	3,0237
0,02	2,8027	2,7883	2,7877	2,7880	2,7882	2,7884	2,7886
0,025	2,6333	2,6222	2,6217	2,6220	2,6222	2,6223	2,6225
0,03	2,5058	2,4968	2,4965	2,4967	2,4968	2,4969	2,4970
0,035	2,4056	2,3981	2,3978	2,3979	2,3980	2,3981	2,3982
0,04	2,3243	2,3178	2,3175	2,3177	2,3177	2,3178	2,3179
0,045	2,2568	2,2511	2,2508	2,2509	2,2510	2,2511	2,2511
0,05	2,1997	2,1946	2,1944	2,1945	2,1945	2,1946	2,1946
0,055	2,1508	2,1462	2,1460	2,1460	2,1461	2,1461	2,1462
0,06	2,1084	2,1042	2,1040	2,1040	2,1041	2,1041	2,1042
0,065	2,0714	2,0675	2,0672	2,0673	2,0673	2,0674	2,0674
0,07	2,0387	2,0350	2,0348	2,0349	2,0349	2,0349	2,0350
0,075	2,0097	2,0063	2,0061	2,0061	2,0061	2,0062	2,0062
0,08	1,9839	1,9807	1,9805	1,9805	1,9805	1,9805	1,9806
0,085	1,9608	1,9577	1,9575	1,9575	1,9575	1,9576	1,9576
0,09	1,9400	1,9371	1,9369	1,9369	1,9369	1,9369	1,9370
0,095	1,9212	1,9185	1,9183	1,9183	1,9183	1,9183	1,9184
0,1	1,9043	1,9017	1,9015	1,9015	1,9015	1,9015	1,9015

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	0,9715	0,9725	0,9728	0,9729	0,9730	0,9730	0,9730
0,01	0,9538	0,9547	0,9549	0,9550	0,9551	0,9551	0,9551
0,015	0,9388	0,9396	0,9398	0,9399	0,9399	0,9400	0,9400
0,02	0,9254	0,9261	0,9263	0,9264	0,9264	0,9264	0,9265
0,025	0,9130	0,9137	0,9139	0,9140	0,9140	0,9140	0,9140
0,03	0,9014	0,9021	0,9023	0,9024	0,9024	0,9024	0,9024
0,035	0,8905	0,8911	0,8913	0,8914	0,8914	0,8914	0,8915
0,04	0,8801	0,8807	0,8809	0,8810	0,8810	0,8810	0,8810
0,045	0,8702	0,8707	0,8709	0,8710	0,8710	0,8710	0,8710
0,05	0,8606	0,8611	0,8613	0,8613	0,8614	0,8614	0,8614
0,055	0,8513	0,8518	0,8520	0,8520	0,8521	0,8521	0,8521
0,06	0,8423	0,8428	0,8430	0,8430	0,8431	0,8431	0,8431
0,065	0,8336	0,8341	0,8342	0,8343	0,8343	0,8343	0,8343
0,07	0,8251	0,8256	0,8257	0,8258	0,8258	0,8258	0,8258
0,075	0,8168	0,8173	0,8174	0,8175	0,8175	0,8175	0,8175
0,08	0,8087	0,8092	0,8093	0,8094	0,8094	0,8094	0,8094
0,085	0,8008	0,8013	0,8014	0,8014	0,8015	0,8015	0,8015
0,09	0,7931	0,7935	0,7936	0,7937	0,7937	0,7937	0,7937
0,095	0,7855	0,7859	0,7860	0,7861	0,7861	0,7861	0,7861
0,1	0,7780	0,7784	0,7785	0,7786	0,7786	0,7786	0,7786

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 8 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,03.

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	4,3767	4,3003	4,2950	4,2956	4,2962	4,2968	4,2973
0,01	3,5247	3,4919	3,4900	3,4904	3,4908	3,4911	3,4913
0,015	3,1184	3,0984	3,0973	3,0976	3,0978	3,0980	3,0982
0,02	2,8664	2,8523	2,8515	2,8517	2,8519	2,8520	2,8521
0,025	2,6903	2,6794	2,6789	2,6790	2,6791	2,6792	2,6793
0,03	2,5583	2,5496	2,5491	2,5492	2,5493	2,5493	2,5494
0,035	2,4548	2,4475	2,4471	2,4472	2,4473	2,4473	2,4474
0,04	2,3711	2,3648	2,3644	2,3645	2,3646	2,3646	2,3647
0,045	2,3017	2,2962	2,2959	2,2959	2,2959	2,2960	2,2960
0,05	2,2431	2,2382	2,2379	2,2380	2,2380	2,2380	2,2381
0,055	2,1930	2,1886	2,1883	2,1884	2,1884	2,1884	2,1885
0,06	2,1497	2,1456	2,1454	2,1454	2,1454	2,1455	2,1455
0,065	2,1118	2,1081	2,1078	2,1079	2,1079	2,1079	2,1079
0,07	2,0785	2,0750	2,0748	2,0748	2,0748	2,0748	2,0749
0,075	2,0489	2,0457	2,0455	2,0455	2,0455	2,0455	2,0456
0,08	2,0227	2,0197	2,0194	2,0194	2,0194	2,0195	2,0195
0,085	1,9992	1,9963	1,9961	1,9961	1,9961	1,9961	1,9962
0,09	1,9781	1,9754	1,9752	1,9752	1,9752	1,9752	1,9752
0,095	1,9591	1,9566	1,9564	1,9564	1,9564	1,9564	1,9564
0,1	1,9420	1,9396	1,9394	1,9394	1,9394	1,9394	1,9394

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	0,9699	0,9707	0,9709	0,9710	0,9710	0,9710	0,9710
0,01	0,9517	0,9523	0,9525	0,9525	0,9526	0,9526	0,9526
0,015	0,9363	0,9368	0,9370	0,9371	0,9371	0,9371	0,9371
0,02	0,9226	0,9231	0,9232	0,9233	0,9233	0,9233	0,9233
0,025	0,9100	0,9104	0,9105	0,9106	0,9106	0,9106	0,9106
0,03	0,8982	0,8986	0,8987	0,8988	0,8988	0,8988	0,8988
0,035	0,8871	0,8875	0,8876	0,8876	0,8877	0,8877	0,8877
0,04	0,8765	0,8875	0,8770	0,8770	0,8770	0,8771	0,8771
0,045	0,8664	0,8667	0,8668	0,8669	0,8669	0,8669	0,8669
0,05	0,8566	0,8570	0,8571	0,8571	0,8571	0,8571	0,8571
0,055	0,8472	0,8475	0,8476	0,8477	0,8477	0,8477	0,8477
0,06	0,8381	0,8384	0,8385	0,8386	0,8386	0,8386	0,8386
0,065	0,8292	0,8296	0,8296	0,8297	0,8297	0,8297	0,8297
0,07	0,8206	0,8209	0,8210	0,8211	0,8211	0,8211	0,8211
0,075	0,8122	0,8125	0,8126	0,8126	0,8127	0,8127	0,8127
0,08	0,8040	0,8043	0,8044	0,8044	0,8044	0,8044	0,8045
0,085	0,7960	0,7963	0,7964	0,7964	0,7964	0,7964	0,7964
0,09	0,7881	0,7884	0,7885	0,7885	0,7885	0,7885	0,7886
0,095	0,7804	0,7807	0,7808	0,7808	0,7808	0,7808	0,7808
0,1	0,7729	0,7731	0,7732	0,7732	0,7733	0,7733	0,7733

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 9 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,02.

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	4,5038	4,4291	4,4238	4,4238	4,4242	4,4246	4,4249
0,01	3,6057	3,5741	3,5719	3,5720	3,5722	3,5723	3,5725
0,015	3,1832	3,1642	3,1629	3,1629	3,1630	3,1631	3,1632
0,02	2,9230	2,9096	2,9086	2,9087	2,9087	2,9088	2,9088
0,025	2,7417	2,7315	2,7308	2,7308	2,7308	2,7309	2,7309
0,03	2,6063	2,5981	2,5975	2,5975	2,5975	2,5976	2,5976
0,035	2,5003	2,4935	2,4930	2,4930	2,4930	2,4930	2,4931
0,04	2,4147	2,4089	2,4084	2,4084	2,4084	2,4085	2,4085
0,045	2,3439	2,3388	2,3384	2,3384	2,3384	2,3384	2,3384
0,05	2,2842	2,2796	2,2793	2,2793	2,2793	2,2793	2,2793
0,055	2,2331	2,2291	2,2288	2,2288	2,2288	2,2288	2,2288
0,06	2,1890	2,1854	2,1851	2,1851	2,1851	2,1851	2,1851
0,065	2,1506	2,1472	2,1469	2,1469	2,1469	2,1469	2,1470
0,07	2,1167	2,1136	2,1134	2,1134	2,1134	2,1134	2,1134
0,075	2,0868	2,0840	2,0837	2,0837	2,0837	2,0837	2,0837
0,08	2,0602	2,0575	2,0837	2,0573	2,0573	2,0573	2,0573
0,085	2,0365	2,0340	2,0338	2,0337	2,0337	2,0337	2,0337
0,09	2,0152	2,0128	2,0126	2,0126	2,0126	2,0126	2,0126
0,095	1,9961	1,9938	1,9936	1,9936	1,9936	1,9936	1,9936
0,1	1,9788	1,9767	1,9765	1,9765	1,9765	1,9765	1,9765

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	0,9684	0,9689	0,9690	0,9690	0,9691	0,9691	0,9691
0,01	0,9497	0,9500	0,9501	0,9502	0,9502	0,9502	0,9502
0,015	0,9340	0,9343	0,9344	0,9344	0,9344	0,9344	0,9344
0,02	0,9200	0,9203	0,9203	0,9204	0,9204	0,9204	0,9204
0,025	0,9072	0,9074	0,9075	0,9075	0,9075	0,9075	0,9075
0,03	0,8952	0,8954	0,8955	0,8955	0,8955	0,8955	0,8955
0,035	0,8839	0,8841	0,8842	0,8842	0,8842	0,8842	0,8842
0,04	0,8732	0,8734	0,8734	0,8734	0,8734	0,8734	0,8734
0,045	0,8629	0,8631	0,8631	0,8631	0,8631	0,8631	0,8631
0,05	0,8530	0,8532	0,8532	0,8532	0,8532	0,8532	0,8532
0,055	0,8434	0,8436	0,8436	0,8437	0,8437	0,8437	0,8437
0,06	0,8342	0,8343	0,8344	0,8344	0,8344	0,8344	0,8344
0,065	0,8252	0,8254	0,8254	0,8254	0,8254	0,8254	0,8254
0,07	0,8165	0,8166	0,8167	0,8167	0,8167	0,8167	0,8167
0,075	0,8080	0,8081	0,8081	0,8082	0,8082	0,8082	0,8082
0,08	0,7996	0,7998	0,7998	0,7998	0,7998	0,7998	0,7998
0,085	0,7915	0,7916	0,7917	0,7917	0,7917	0,7917	0,7917
0,09	0,7835	0,7837	0,7837	0,7837	0,7837	0,7837	0,7837
0,095	0,7757	0,7759	0,7759	0,7759	0,7759	0,7759	0,7759
0,1	0,7681	0,7682	0,7682	0,7683	0,7683	0,7683	0,7683

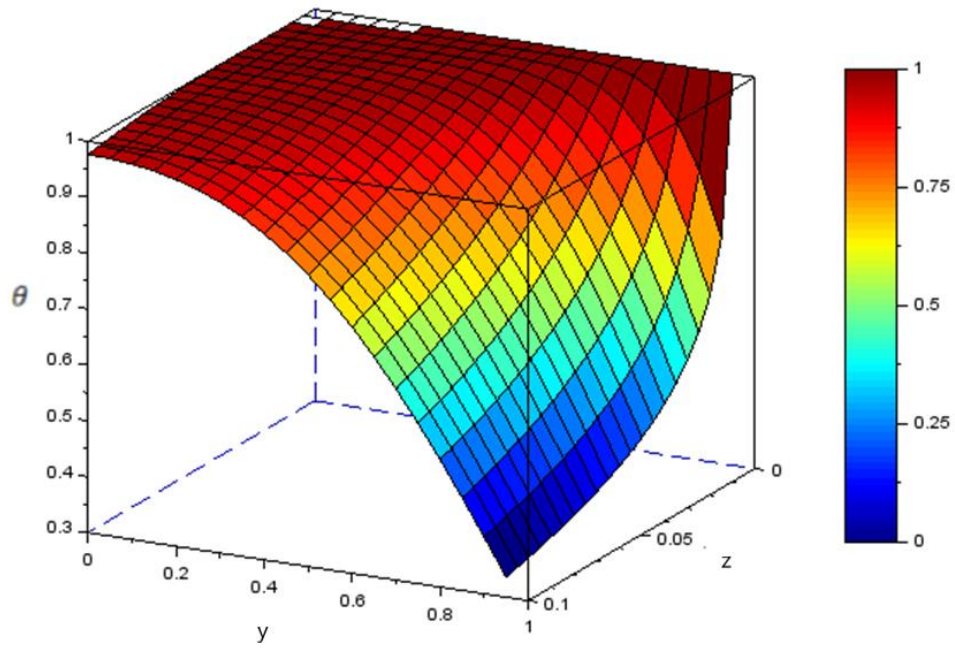
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 10 - Convergência do número de Nusselt e de temperatura média ao longo da trajetória do fluido no microcanal com Knudsen=0,01.

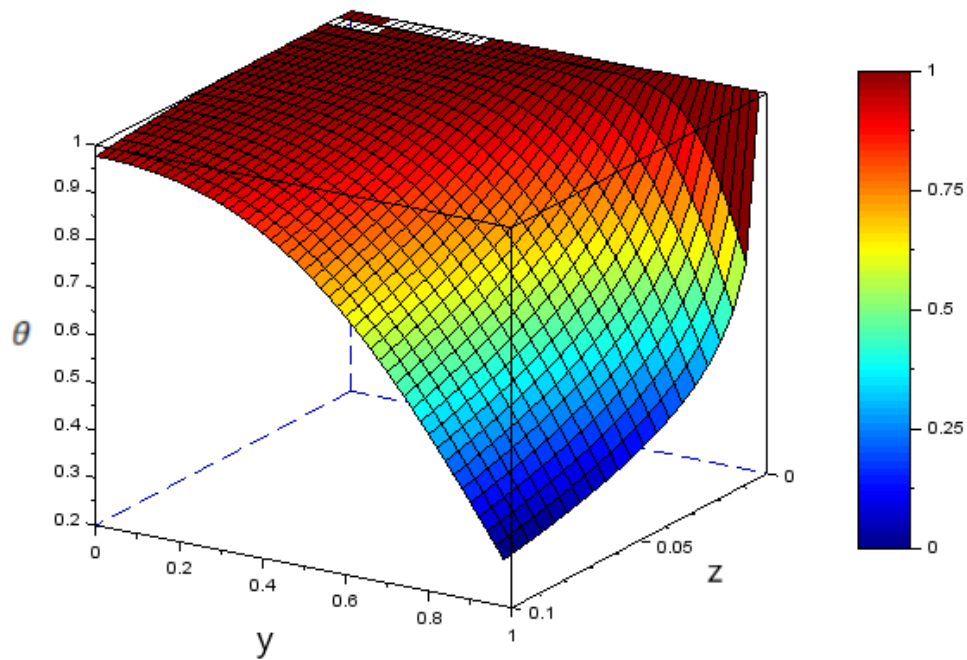
z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	4,5945	4,5257	4,5205	4,5199	4,5199	4,5200	4,5201
0,01	3,6694	3,6410	3,6389	3,6386	3,6386	3,6387	3,6387
0,015	3,2373	3,2203	3,2190	3,2188	3,2188	3,2189	3,2189
0,02	2,9717	2,9599	2,9590	2,9589	2,9589	2,9589	2,9589
0,025	2,7871	2,7782	2,7775	2,7774	2,7774	2,7774	2,7774
0,03	2,6494	2,6423	2,6417	2,6416	2,6416	2,6416	2,6417
0,035	2,5417	2,5358	2,5354	2,5353	2,5353	2,5353	2,5353
0,04	2,4549	2,4498	2,4494	2,4494	2,4494	2,4494	2,4494
0,045	2,3830	2,3787	2,3783	2,3783	2,3783	2,3783	2,3783
0,05	2,3225	2,3187	2,3184	2,3184	2,3184	2,3184	2,3184
0,055	2,2709	2,2675	2,2672	2,2672	2,2672	2,2672	2,2672
0,06	2,2263	2,2232	2,2230	2,2229	2,2229	2,2229	2,2229
0,065	2,1874	2,1846	2,1844	2,1844	2,1844	2,1844	2,1844
0,07	2,1533	2,1507	2,1505	2,1505	2,1505	2,1505	2,1505
0,075	2,1231	2,1207	2,1206	2,1205	2,1205	2,1205	2,1205
0,08	2,0963	2,0941	2,0939	2,0939	2,0939	2,0939	2,0939
0,085	2,0724	2,0704	2,0702	2,0702	2,0702	2,0702	2,0702
0,09	2,0510	2,0491	2,0490	2,0490	2,0489	2,0490	2,0490
0,095	2,0318	2,0301	2,0299	2,0299	2,0299	2,0299	2,0299
0,1	2,0146	2,0129	2,0128	2,0127	2,0127	2,0127	2,0127

z	m=21	m=51	m=101	m=201	m=301	m=501	m=1001
0,005	0,9984	0,9674	0,9674	0,9674	0,9674	0,9674	0,9674
0,01	0,9672	0,9482	0,9482	0,9482	0,9482	0,9482	0,9482
0,015	0,9481	0,9322	0,9322	0,9322	0,9322	0,9322	0,9322
0,02	0,9321	0,9179	0,9179	0,9179	0,9179	0,9179	0,9179
0,025	0,9179	0,9049	0,9049	0,9049	0,9049	0,9049	0,9049
0,03	0,9048	0,8927	0,8927	0,8927	0,8927	0,8927	0,8927
0,035	0,8927	0,8812	0,8812	0,8813	0,8813	0,8813	0,8813
0,04	0,8812	0,8703	0,8703	0,8703	0,8704	0,8704	0,8704
0,045	0,8703	0,8599	0,8599	0,8599	0,8599	0,8599	0,8599
0,05	0,8599	0,8499	0,8499	0,8499	0,8499	0,8499	0,8499
0,055	0,8498	0,8402	0,8402	0,8402	0,8308	0,8402	0,8402
0,06	0,8402	0,8308	0,8308	0,8308	0,8217	0,8308	0,8308
0,065	0,8308	0,8217	0,8217	0,8217	0,8129	0,8217	0,8217
0,07	0,8217	0,8128	0,8129	0,8129	0,8042	0,8129	0,8129
0,075	0,8128	0,8042	0,8042	0,8042	0,7958	0,8042	0,8042
0,08	0,8042	0,7958	0,7958	0,7958	0,7876	0,7958	0,7958
0,085	0,7958	0,7875	0,7876	0,7876	0,7795	0,7876	0,7876
0,09	0,7875	0,7795	0,7795	0,7795	0,7716	0,7795	0,7795
0,095	0,7795	0,7716	0,7716	0,7716	0,7638	0,7716	0,7716
0,1	0,7638	0,7638	0,7638	0,7638	0,7638	0,7638	0,7638

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

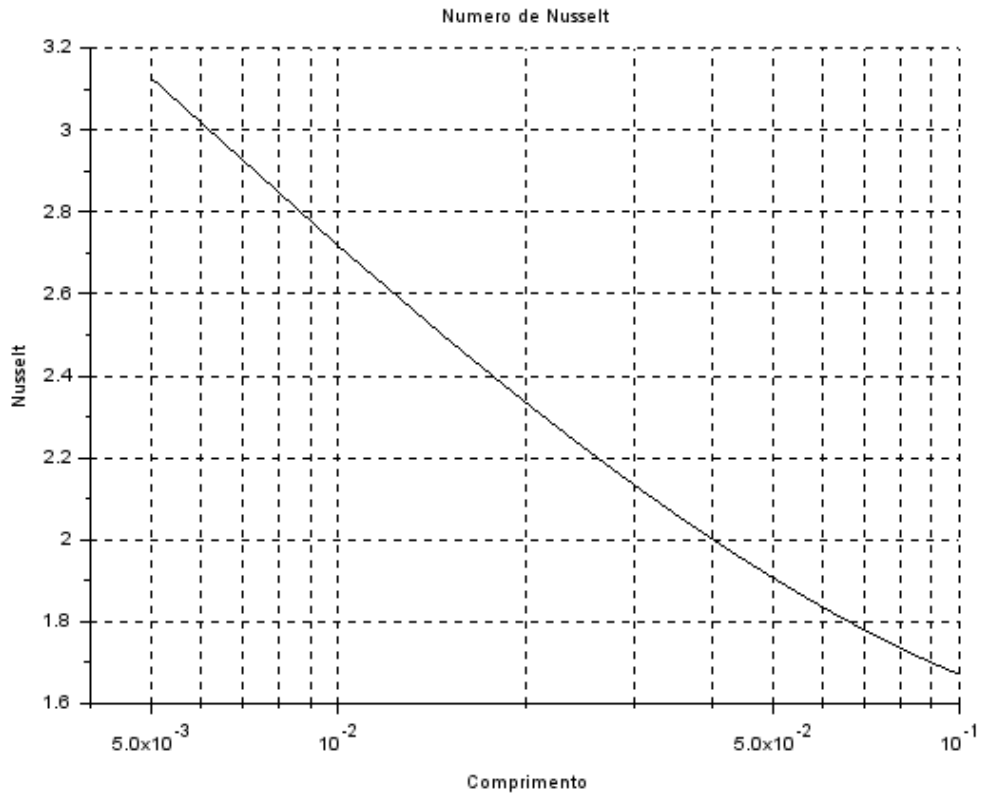
Figura 1 - Decaimento de temperatura, $kn=0,1$ e 21 linhas

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 2 - Decaimento de temperatura, $kn=0,1$ e 51 linhas

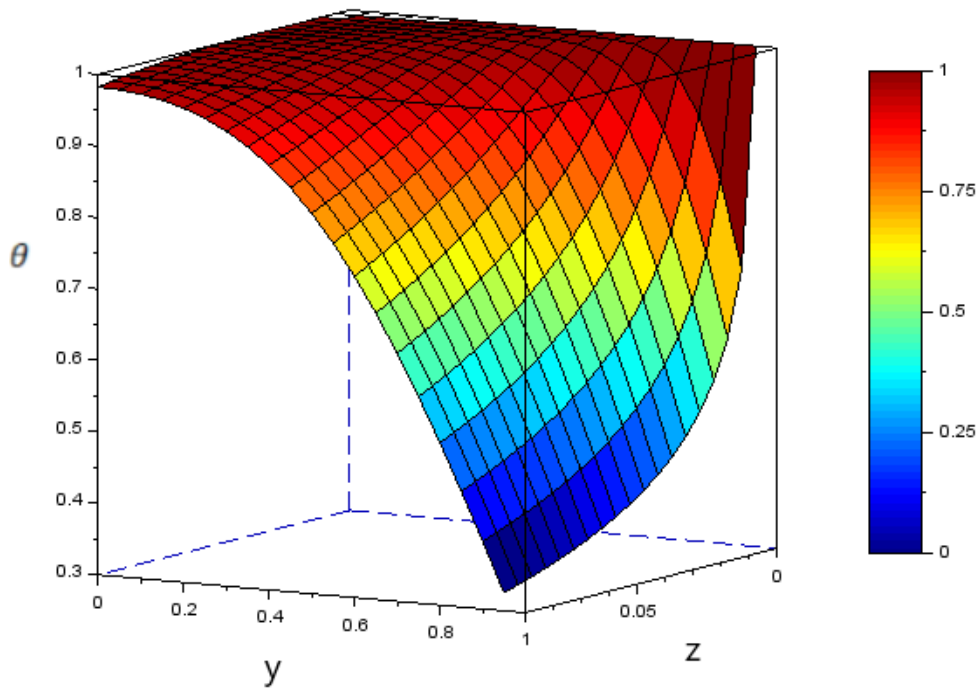
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 3 - Numero de nusselt $kn=0,1$ e 21linhas



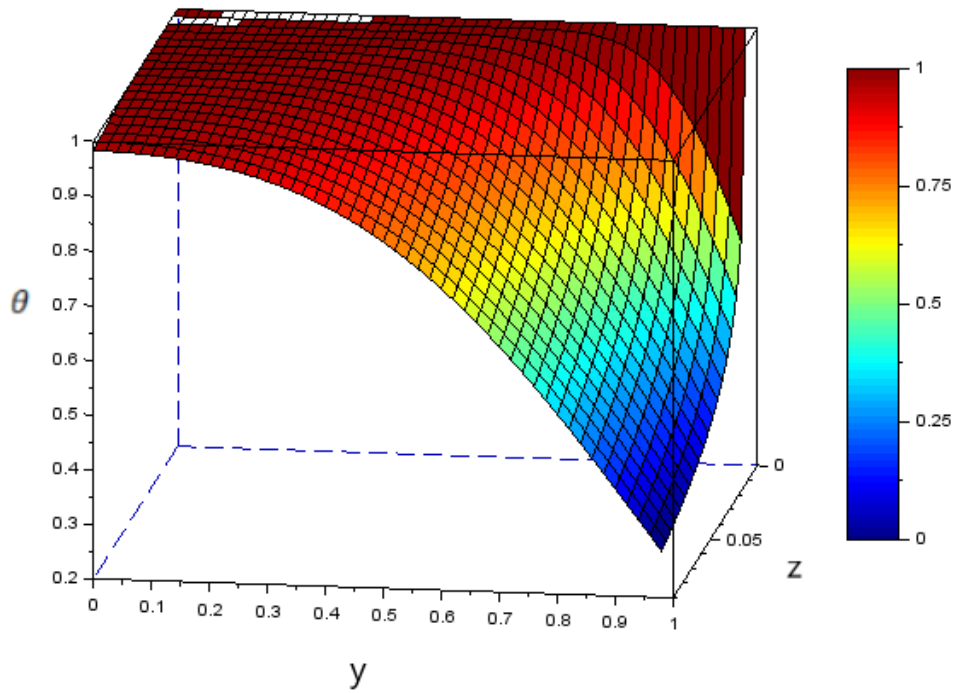
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 4 - Decaimento de temperatura, $kn=0,09$ e 21 linhas



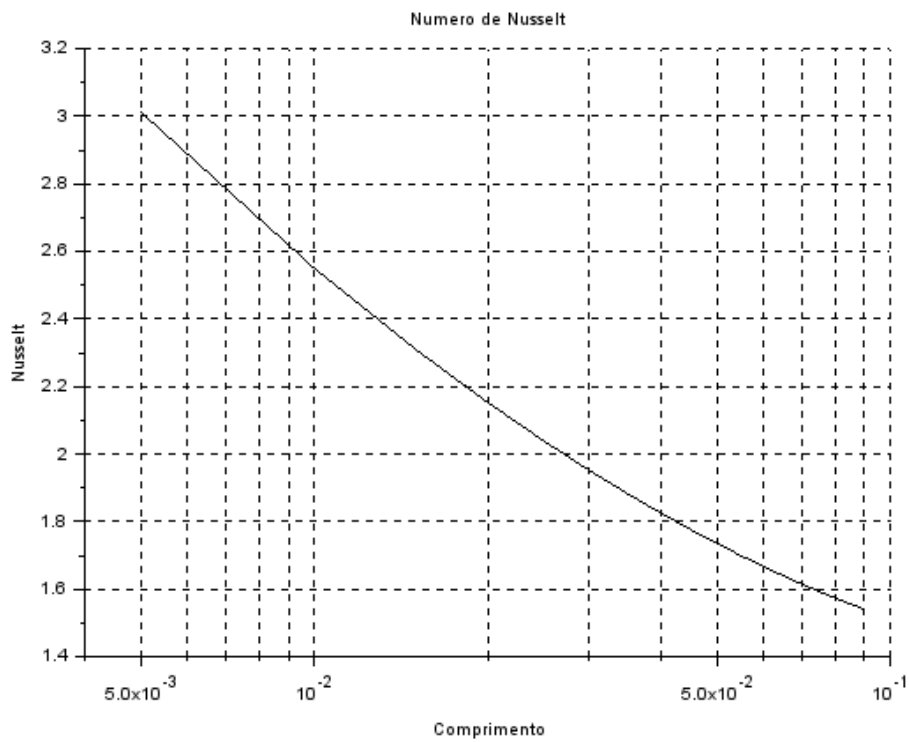
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 5 - Decaimento de temperatura, $kn=0,09$ e 51 linhas

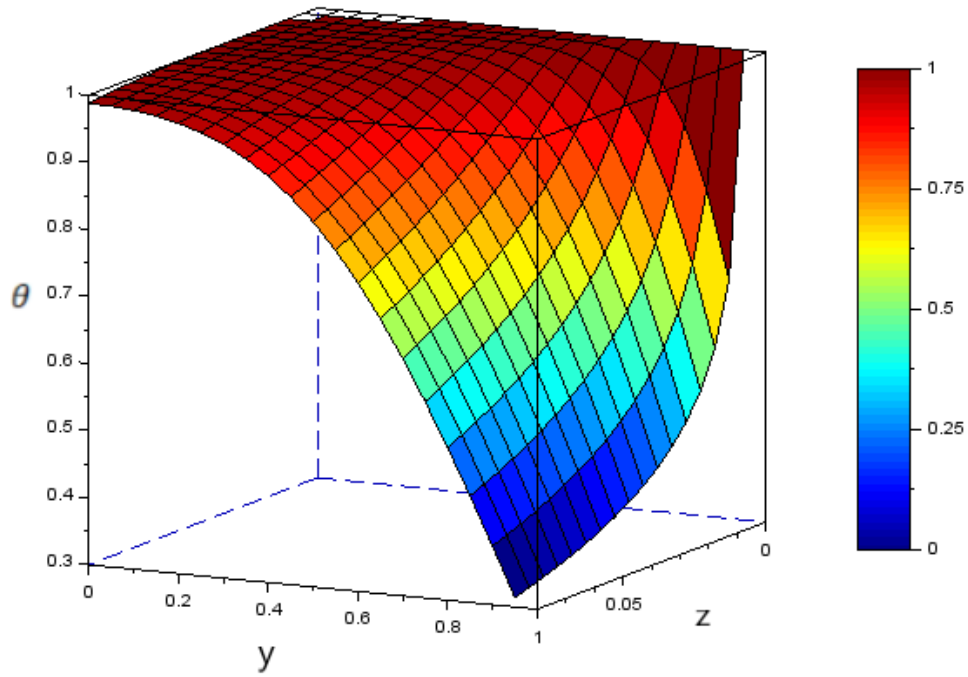


Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

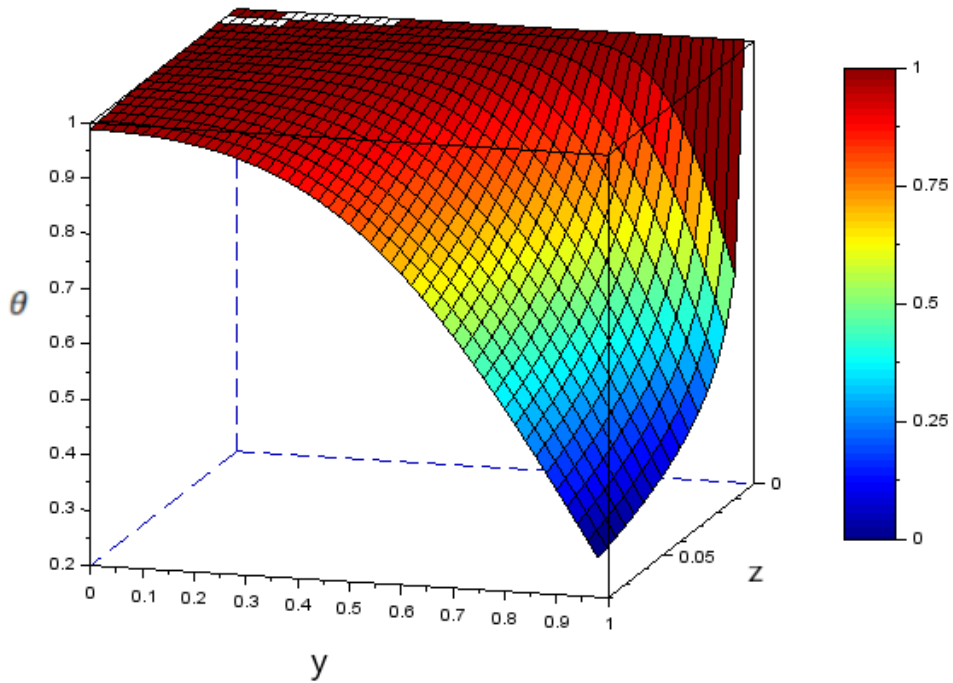
Figura 6 - Numero de nusselt , $kn=0,09$ e 21 linhas



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

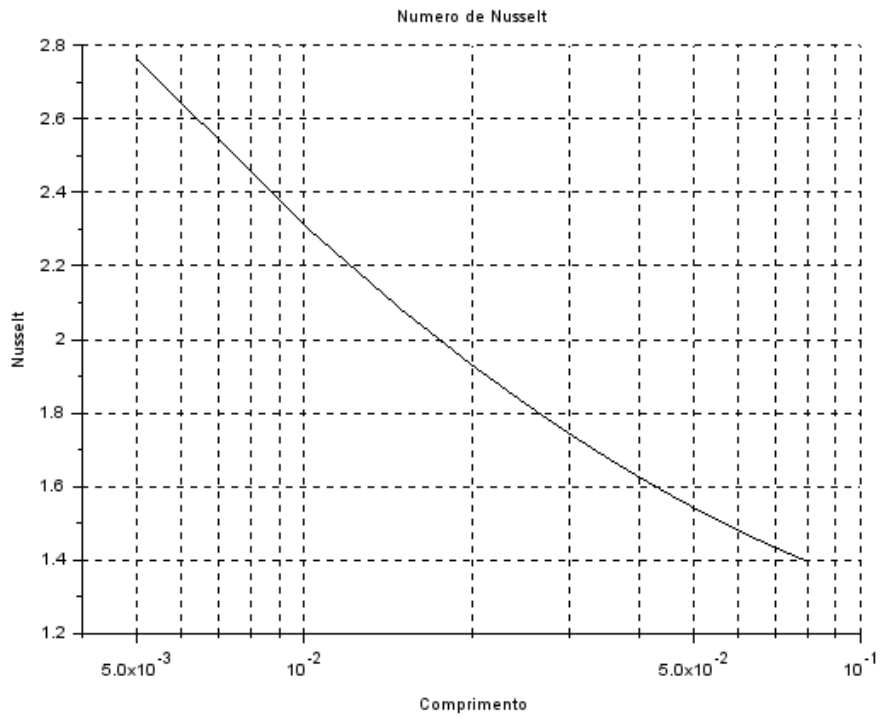
Figura 7 - Decaimento de temperatura, $kn=0,08$ e 21 linhas

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 8 - Decaimento de temperatura, $kn=0,08$ e 51 linhas

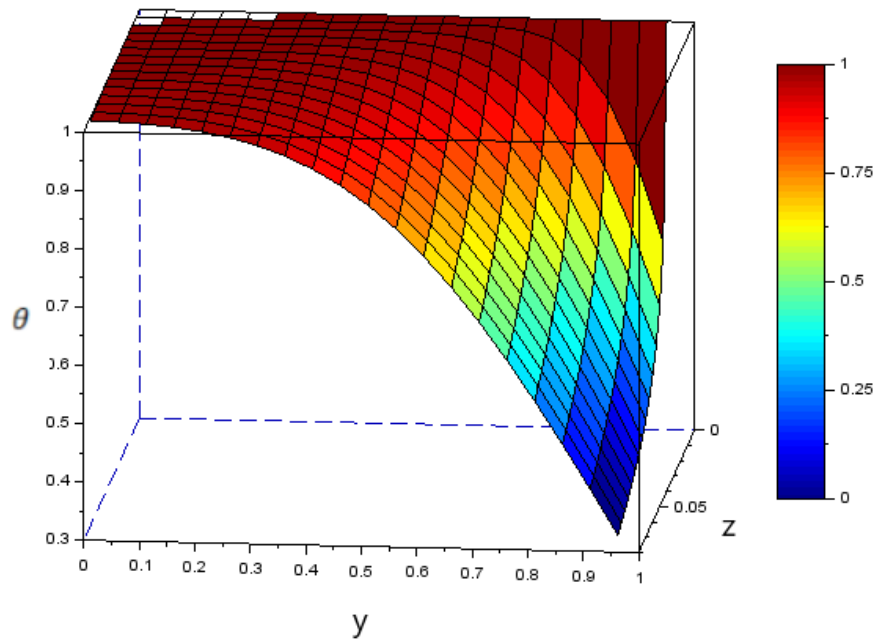
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 9 – Numero de Nusselt, $kn=0,08$ e 21 linhas



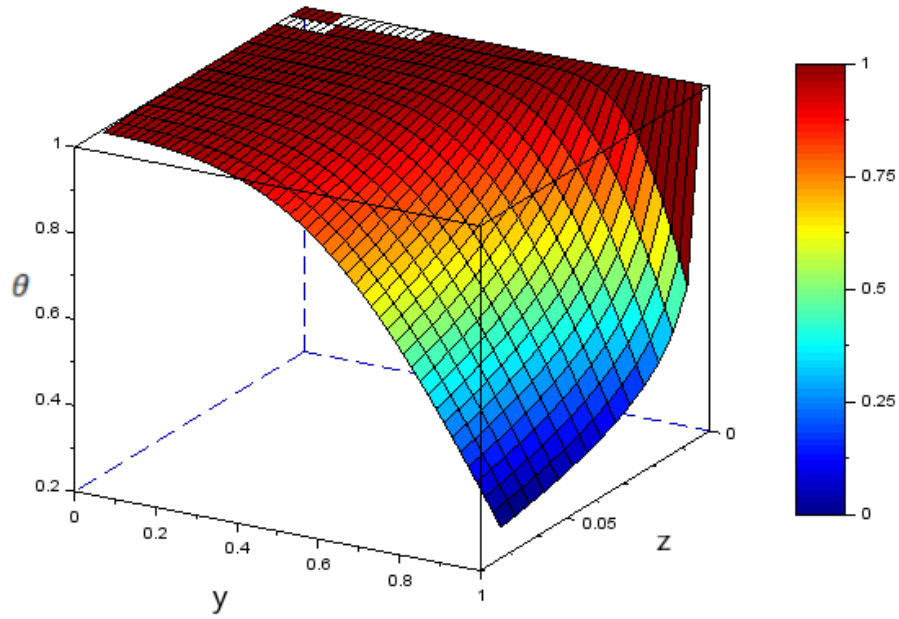
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 10 - Decaimento de temperatura, $kn=0,07$ e 21 linhas



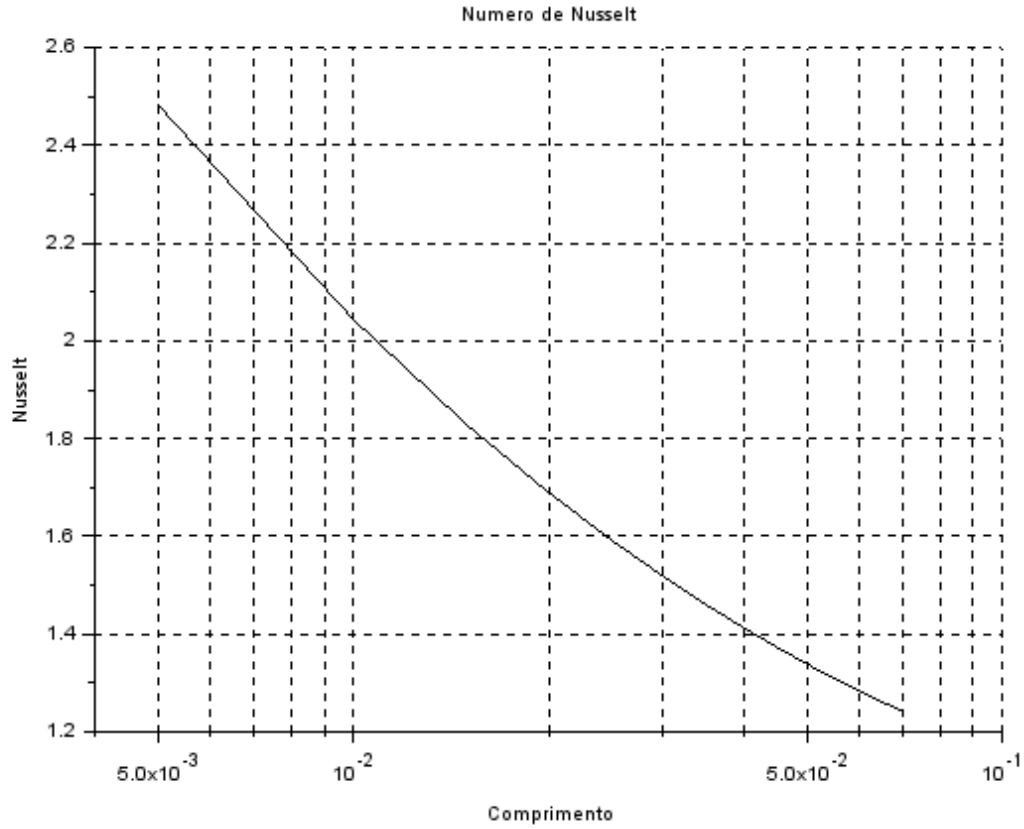
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 11 - Decaimento de temperatura, $kn=0,07$ e 51 linhas



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 12 – Numero de nusselt , $kn=0,07$ e 21 linhas



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

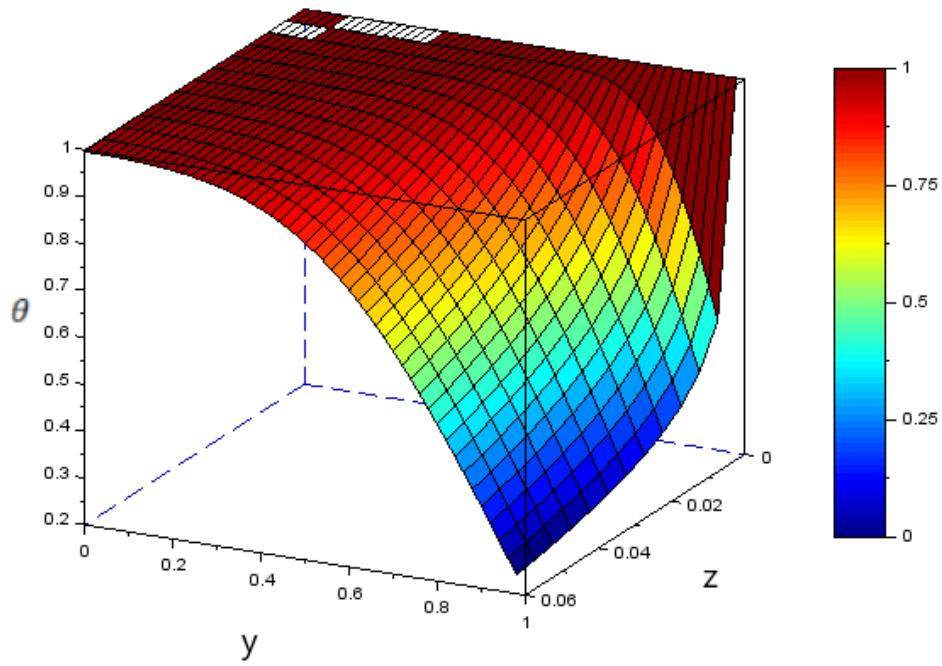
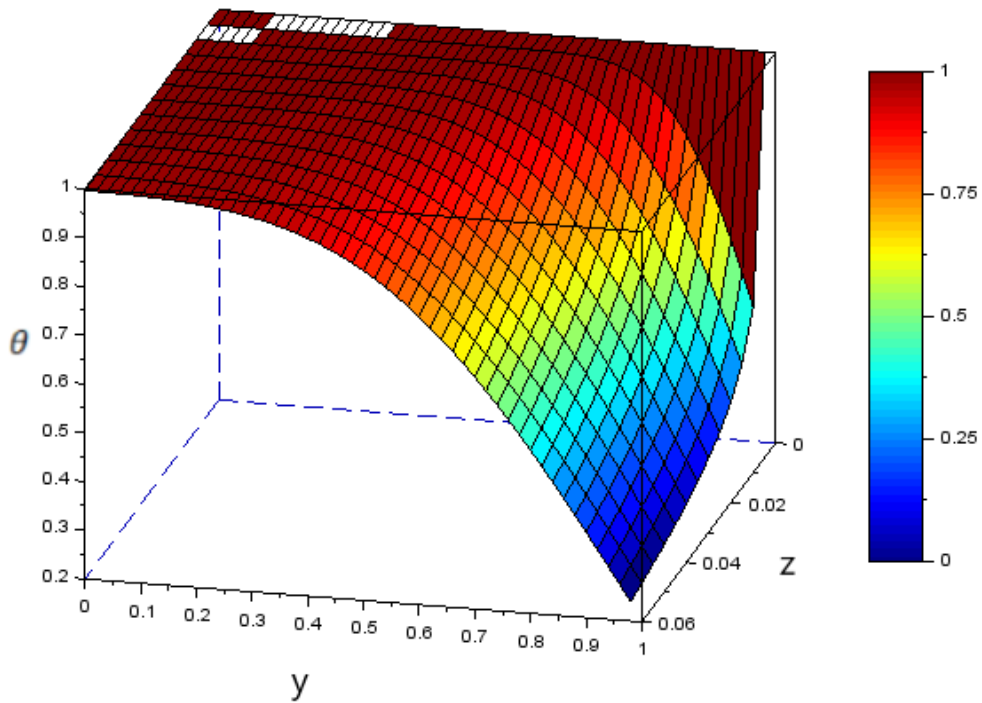
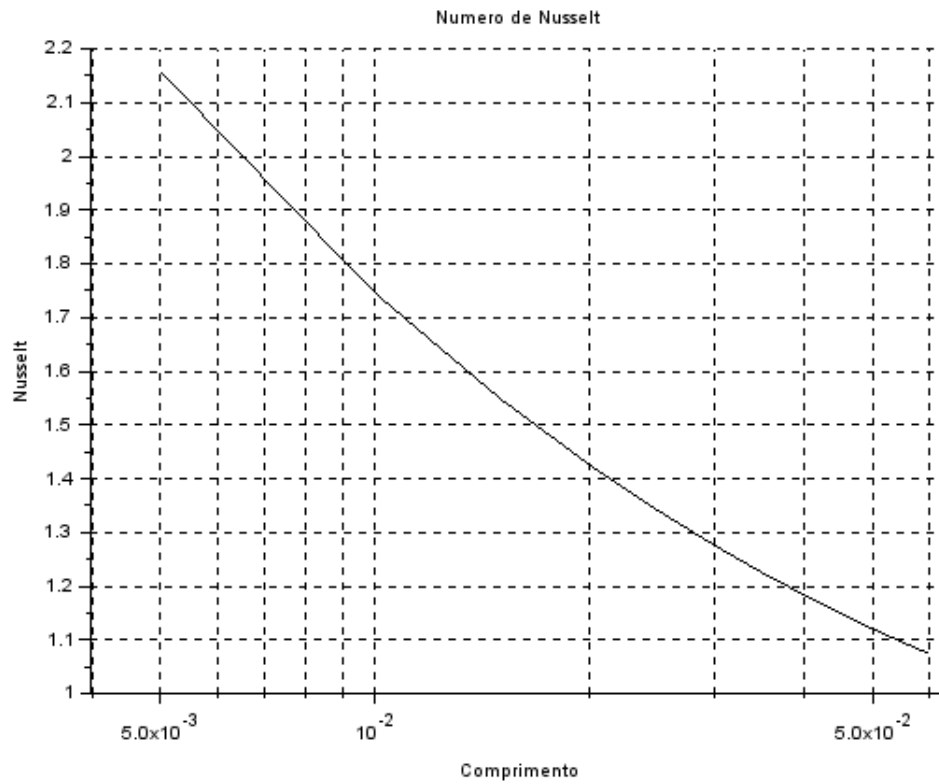
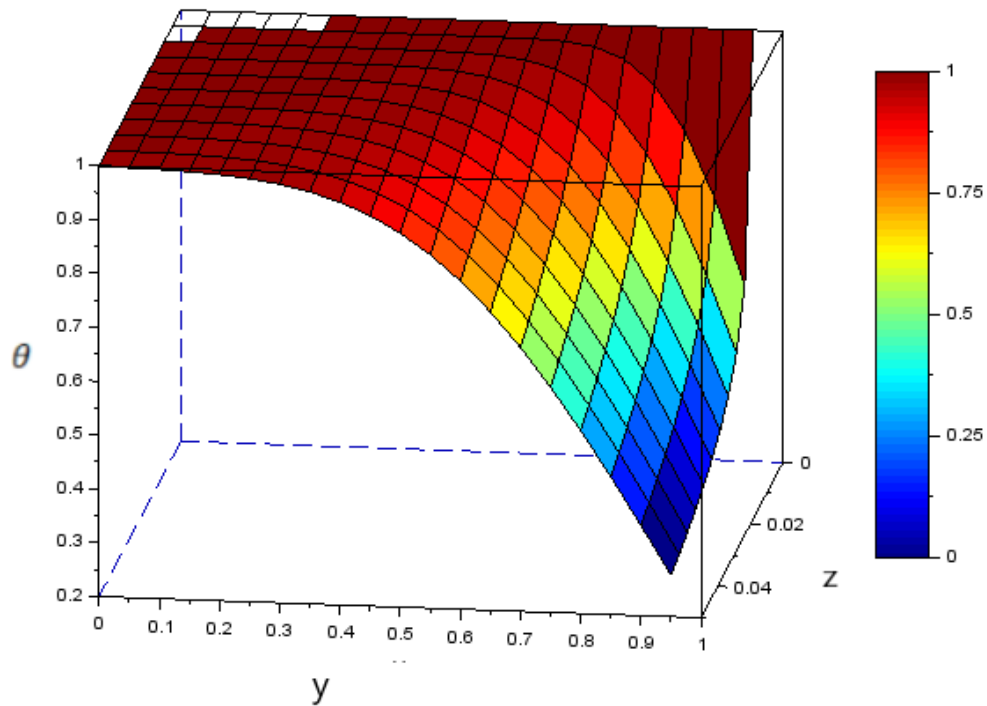
Figura 13 - Decaimento de temperatura, $kn=0,06$ e 21 linhas**Figura 14** - Decaimento de temperatura, $kn=0,06$ e 51 linhas

Figura 15 - Numero de nusselt, $kn=0,06$ e 21 linhas



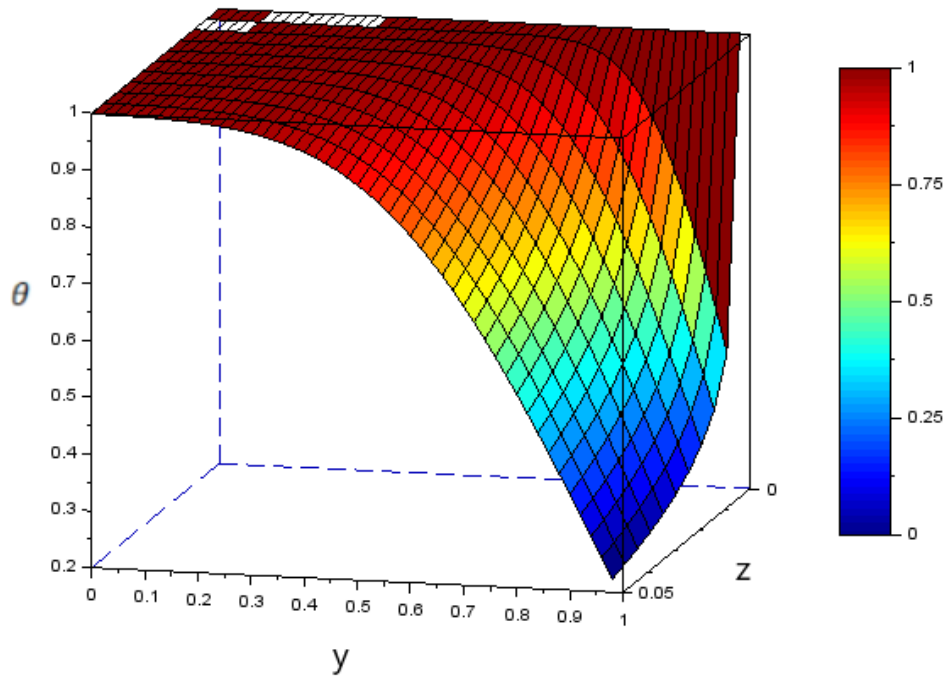
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 16 - Decaimento de temperatura, $kn=0,05$ e 21 linhas



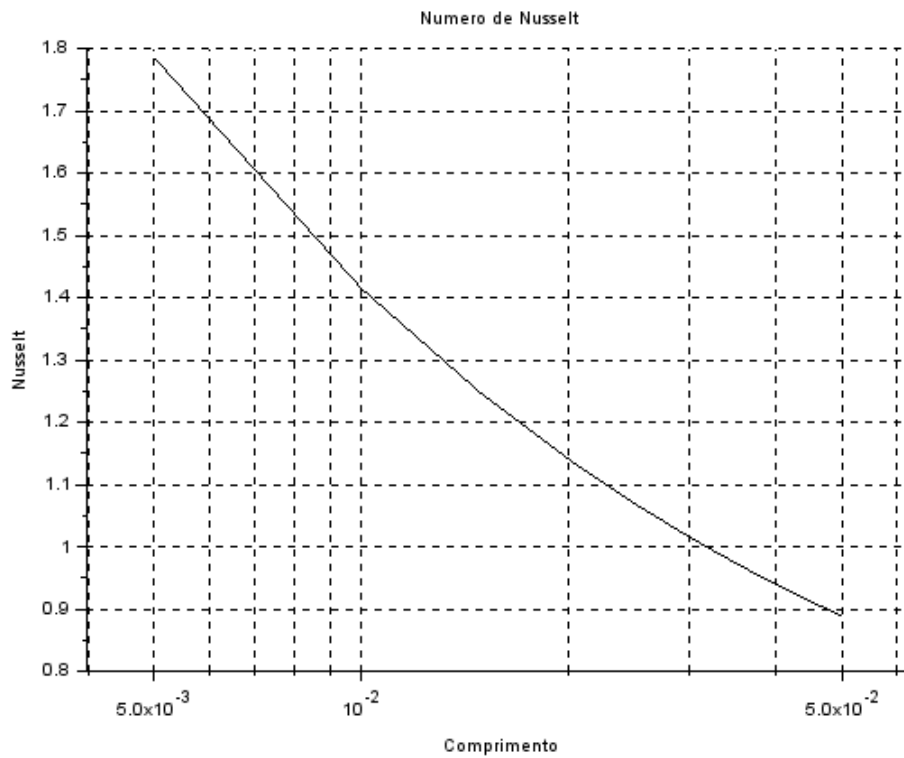
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 17 - Decaimento de temperatura, $kn=0,05$ e 51 linhas



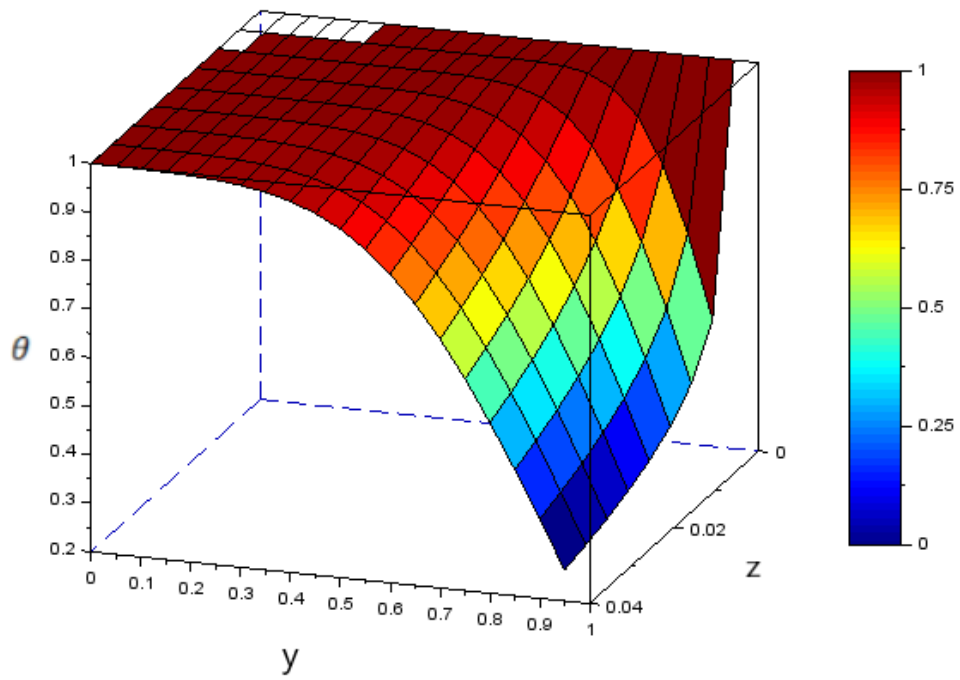
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 18 - Numero de Nusselt, $kn=0,05$ e 21 linhas



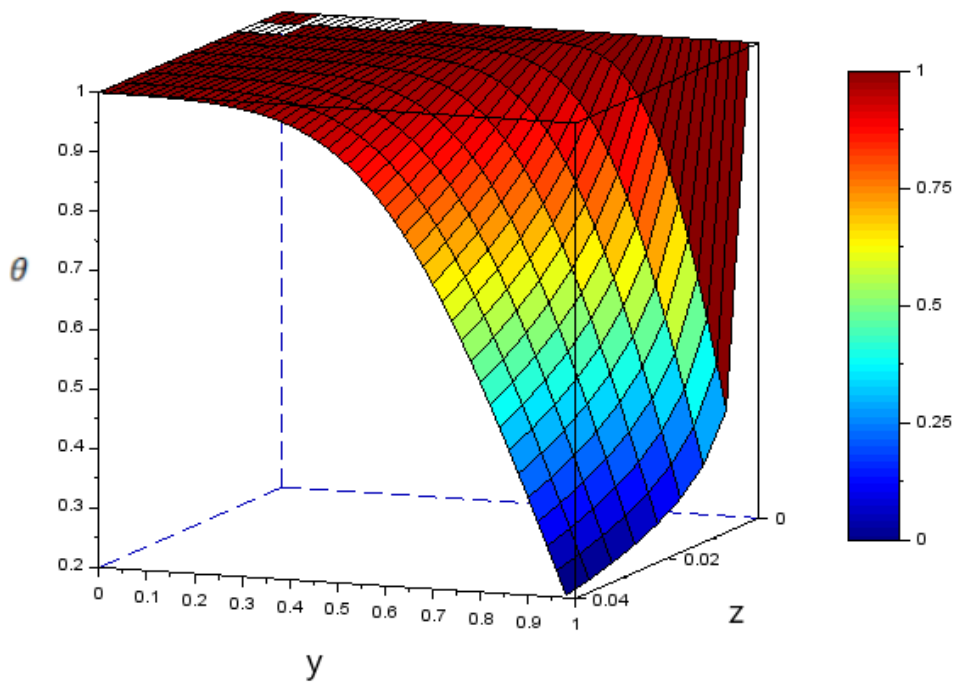
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 19 - Decaimento de temperatura, $kn=0,04$ e 21 linhas



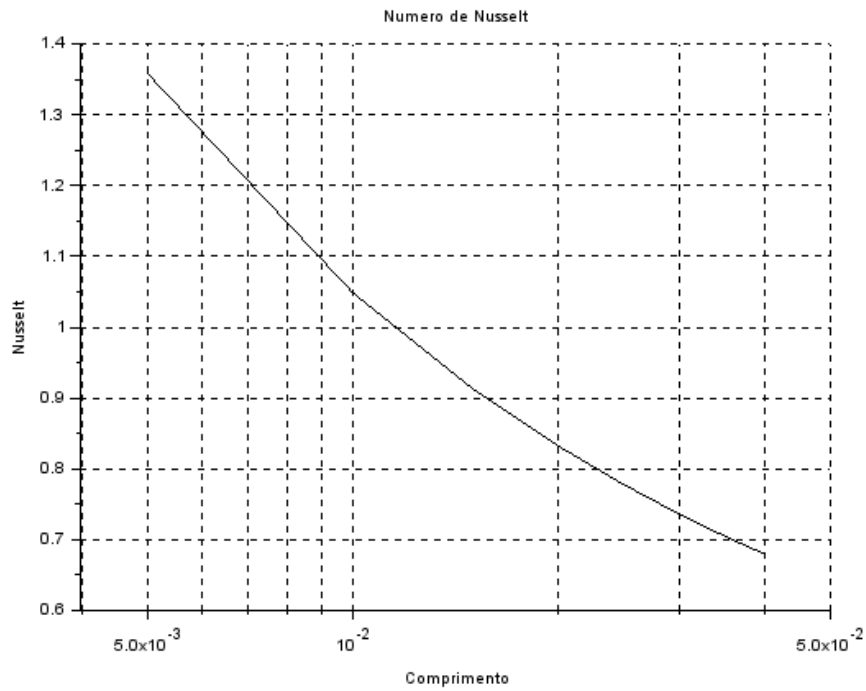
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 20 - Decaimento de temperatura, $kn=0,04$ e 51 linhas



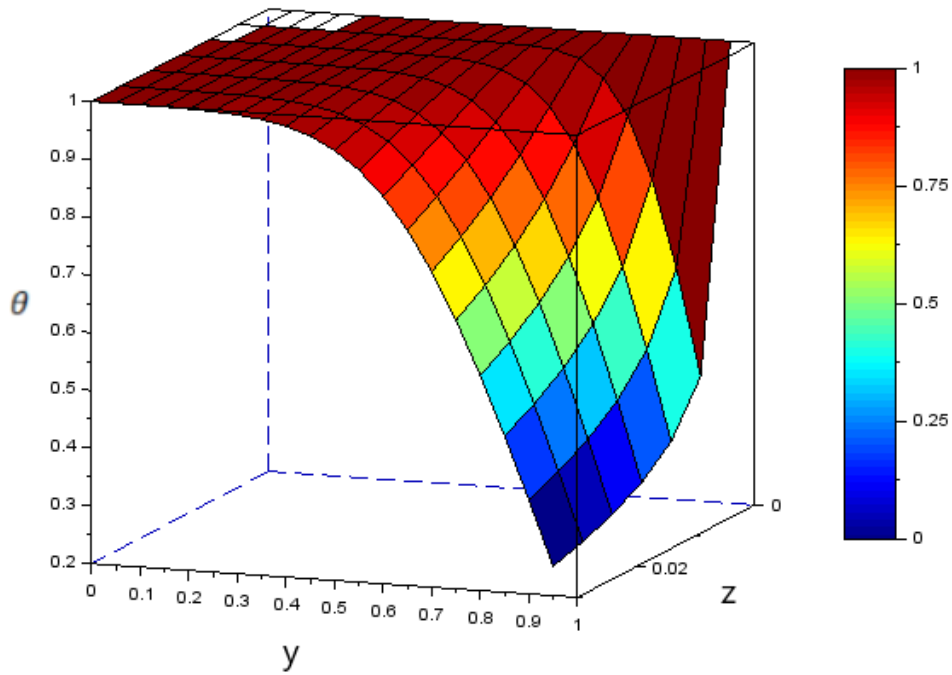
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 21 – Numero de nusselt, $kn=0,04$ e 21 linhas



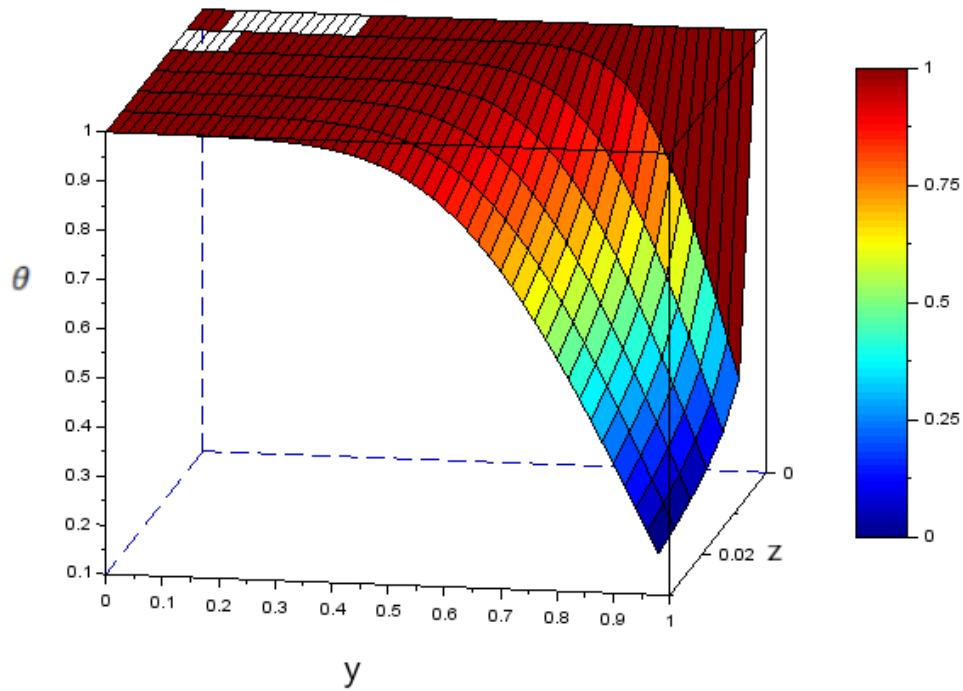
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 22 - Decaimento de temperatura, $kn=0,03$ e 21 linhas



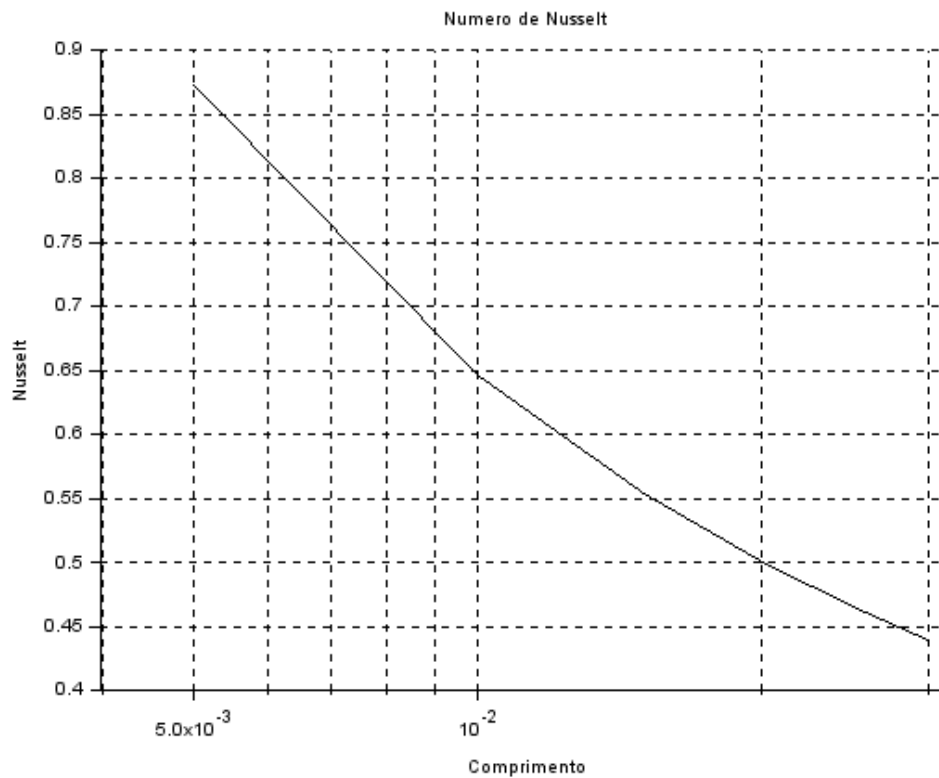
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 23 - Decaimento de temperatura, $kn=0,03$ e 51 linhas

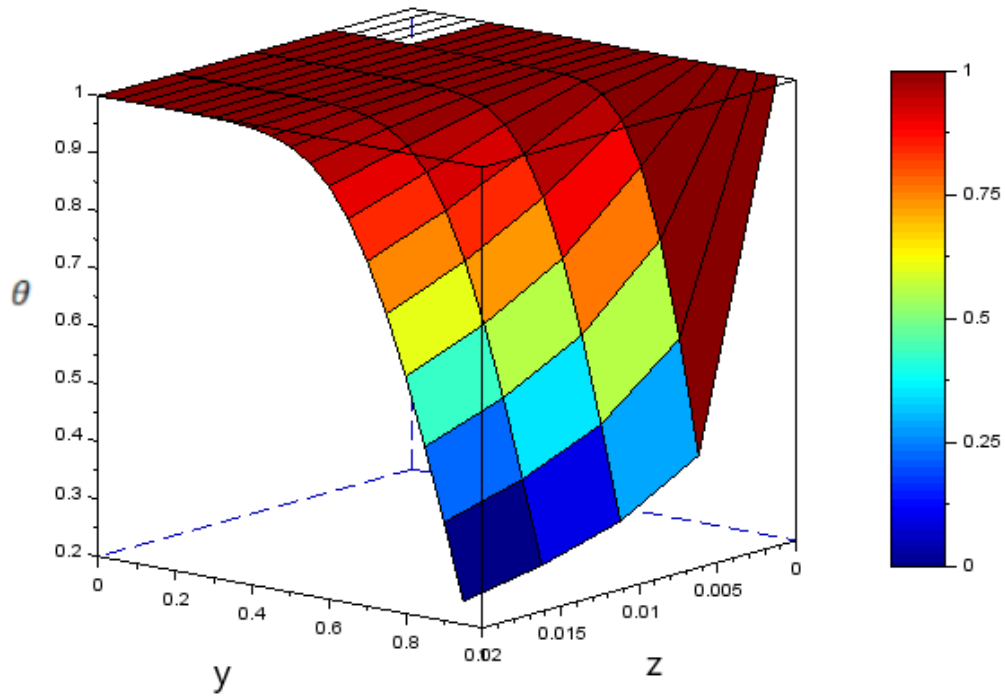


Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

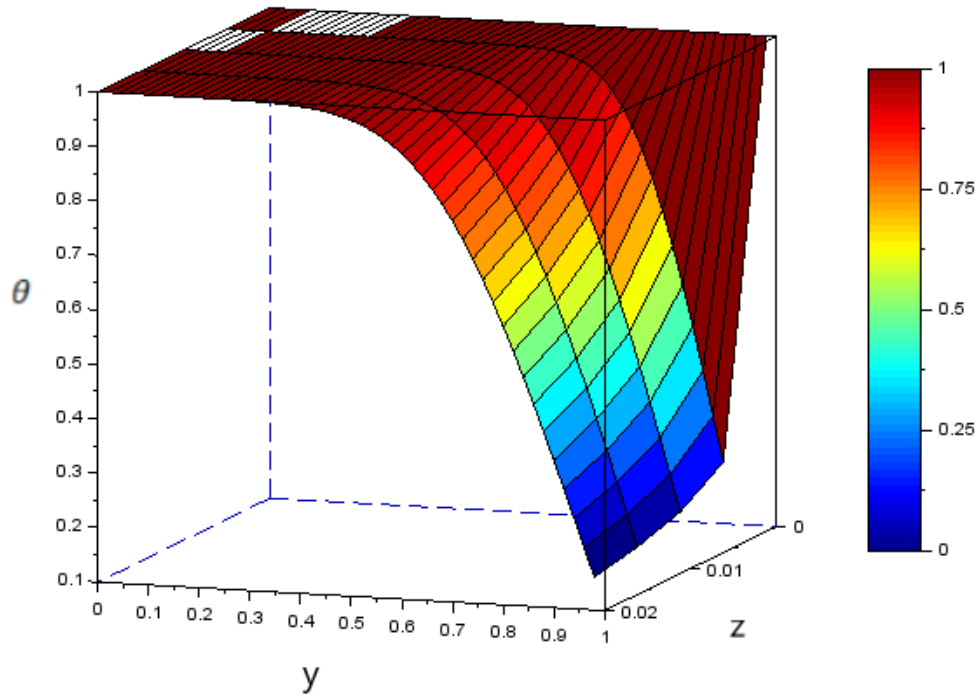
Figura 24 - Decaimento de temperatura, $kn=0,03$ e 51 linhas



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

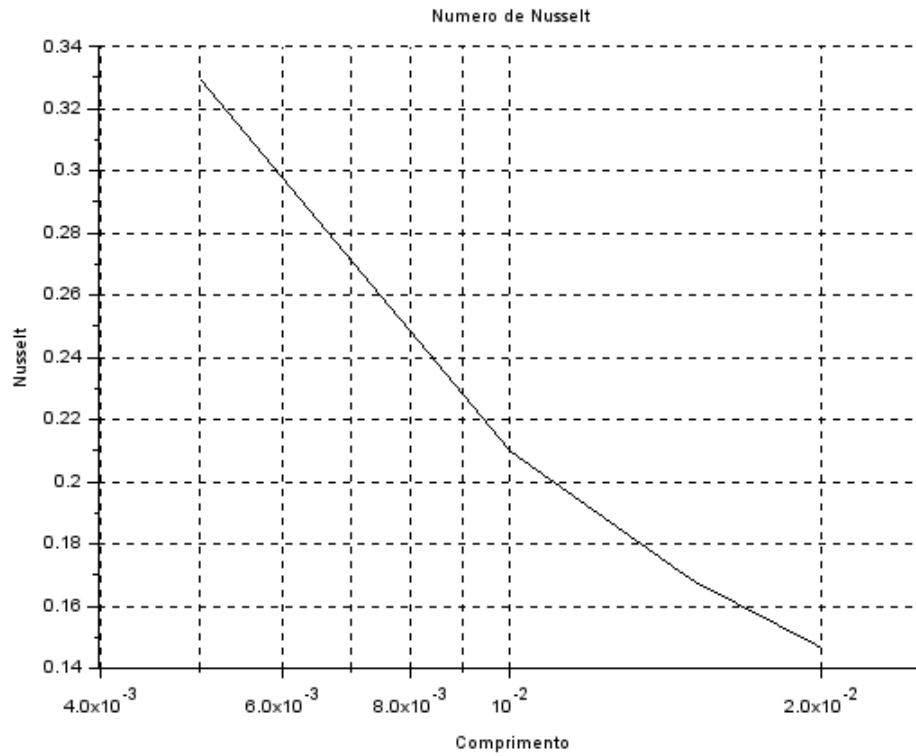
Figura 25 - Decaimento de temperatura, $kn=0,02$ e 21 linhas

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 26 - Decaimento de temperatura, $kn=0,02$ e 51 linhas

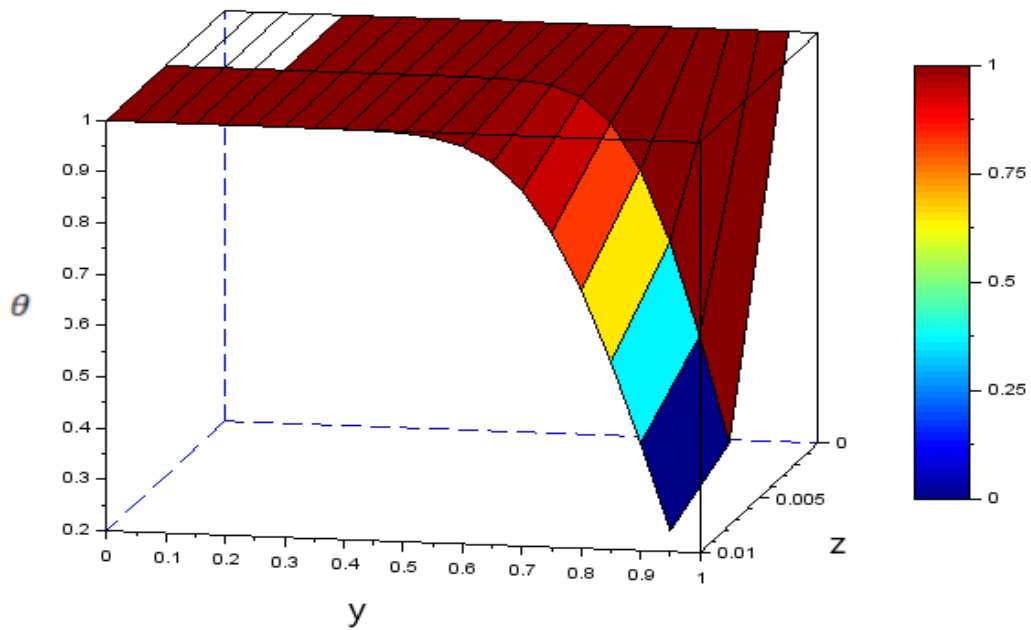
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 27 – Numero de nusselt, $kn=0,02$ e 21 linhas



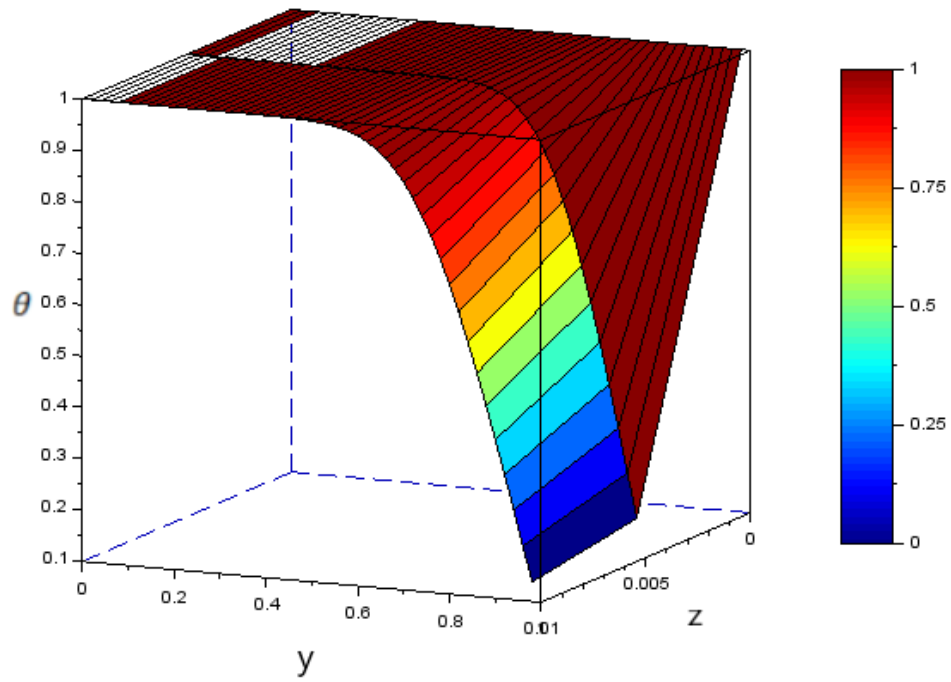
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 28 - Decaimento de temperatura, $kn=0,01$ e 21 linhas



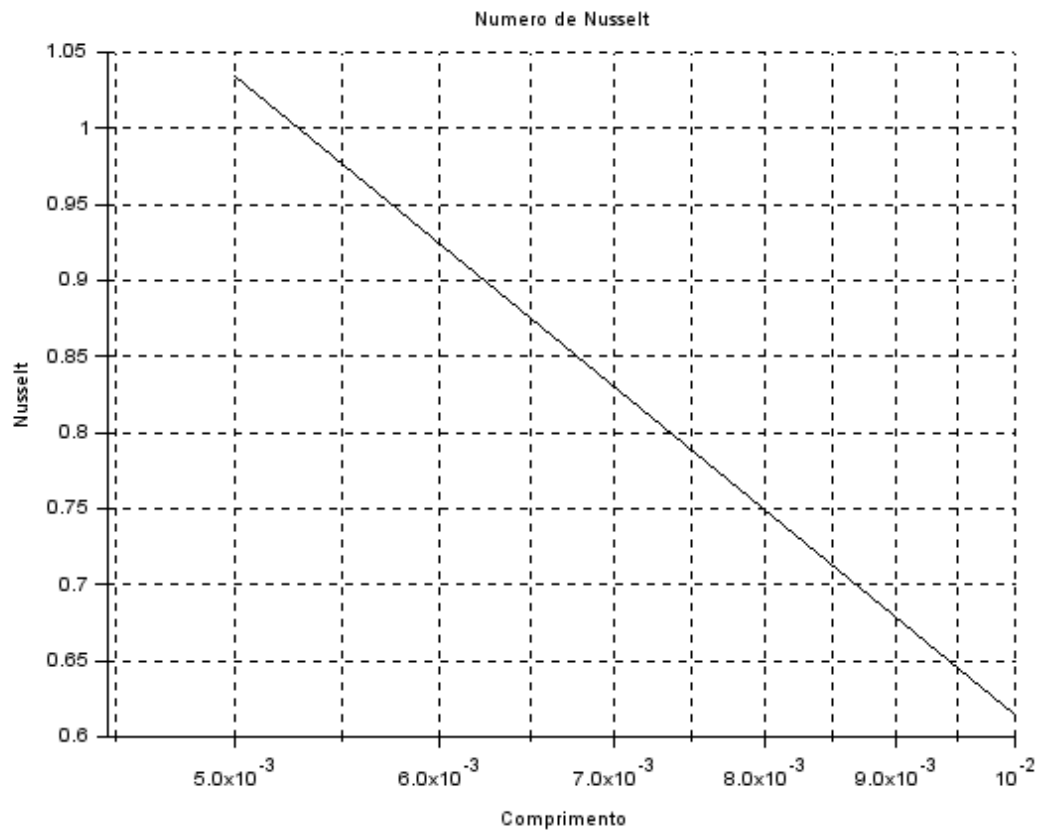
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 29 - Decaimento de temperatura, $kn=0,01$ e 51 linhas



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 30 - Numero de Nusselt , $kn=0,01$ e 11 linhas



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

CONCLUSÃO

O trabalho apresentou a solução de convecção em microcanais de placas paralelas considerando taxa de escorregamento do fluido pelas placas e salto de temperatura. Com a variação do número de knudsen a convergência com o resultado se mostrou cada vez mais concisa.

A região de entrada e temperatura média são afeta de forma significativa no problema, tanto pelo domínio do problema ter uma aproximação insatisfatória no ponto zero como no resto do escoamento até que o fluido esteja completamente desenvolvido.

Dados do problema também revelam que a taxa de transferência de calor que acontece nos microcanais é modificada de forma significativa pelo número de knudsen, nas representações gráficas também é comprovado que existe um decaimento abrupto das linhas tirando toda a suavidade de tons e de curvas que acontecem com números de knudsen próximos a 0,1 assim o número de knudsen tendendo a zero as equações necessárias para a convergência se torna menor.

Os gráficos da variação do número de nusselt também trazem a informação de comportamento do fluido além da entrada do canal, mostrando a distância que o fluido percorre trocando calor com o canal até a equalização da temperatura junto a superfície, quantificando a distância de troca de calor além da apresentada em tabelas. A medida que o número de knudsen diminuía o intervalo gráfico do número de nusselt também diminuía comprovando mais uma vez que a troca de calor a medida que o número de knudsen cai se torna maior. Outro dado gráfico importante obtido é que a medida que o decaimento acontecia trazia uma deflexão na curva do número de nusselt, fazendo com que a partir de dado ponto a inclinação da reta diminuísse e tendesse de forma mais lenta ao eixo da abscissa.

Temas para próximos trabalhos seriam a variação de geometria do objeto em pesquisa junto a variação de temperatura da superfície mudando a troca térmica conforme a trajetória do fluido pelo microcanal.

REFERÊNCIAS

- ARKILIC, E.B. BREUER, K. S. SCHIMIDT, M. A. **ASME FED.** 1994, 197 p.
- BARRON, R. F. WANG, X. WARRINGTON, R.O. AMEEL, T. **Commun. Heat Mass Transf.** 1996, 1817 p.
- BARRON, R. F. WANG, X. AMEEL, T. **Commun. Heat Mass Transf.** 1996, 563p.
- BAYAZITOGU, Y. TUNC, G. 2 ed. In: **Conf. Computational Heat and Mass Transfer, ICCHMT-2001, E- Papers.** vol. 1, Rio de Janeiro, Brasil. p. 112
- BERGMAN, T. L. BERGMAN, A. S. L. INCROPERA, F. P. **Fundamentos da Transferência de Calor e Massa**, 7 ed. 2013.
- BESKOK, A. KARNIADAKIS, G. E. TRIMMER, W. **ASME Winter Annual Meeting.** San Francisco, 1995, USA, p. 1.
- CASTELÕES, F. V. **Convecção transiente em microcanais via transformada integral.** Dissertação. UFRJ, Rio de Janeiro, 2004. 122p.
- CESAR, J. **Análise teórica para a entrada térmica de fluidos não newtonianos via método das linhas**, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.
- COTTA, R. M. **Integral Transforms in Computational Heat and Fluid Flow.** CRC Press, FL, 1993.
- GRAETZ, L. *Phys. Chem.*, 1 18, 1883 79p.
- LARRODE, F.E. HOUSIADAS, C. DROSSINOS, Y. in: **Heat Mass Transfer.** 2000, 2669 p.
- MIKHAILOV, M.D. COTTA, R. M. **Mixed symbolic-numerical computation of convective heat transfer with slip flow in microchannels.** Rio de Janeiro, 2004.
- MIKHAILOV, M.D. OZISIK, M.N. **Unified Analysis and Solutions of Heat and Mass Diffusion**, 1994.
- MIKHAILOV, M.D. COTTA, R. M. **Commun. Heat Mass Transf.** 1997, 449 p.
- MIKHAILOV, M.D. COTTA, R. M. **Heat Conduction: Lumped Analysis, Integral Transforms, Symbolic Computation**, Wiley Interscience, Chichester, UK, 1997.
- PAPAUTSKY, I. AMEEL, T.A. FRAZIER, A.B. **ASME.** In: **Mechanical Eng. Congress and Exposition**, New York, USA, 2001, p. 1.
- ROSTAMI, A.A. MUJUMDAR, A.S. SANIERI, N. **Heat Mass Transf.** (2002) 359 p.
- TUNC, G. BAYAZITOGU, Y. in: **J. Heat Mass Transfer.** 2000, 765 p.
- TUNC, G. BAYAZITOGU, Y. in: **J. Heat Mass Transfer.** 2001, 2395 p.
- SBMAC. **Solução da equação do calor com o método das linhas utilizando software Matlab.** Disponível < http://www.sbmac.org.br/eventos/cnmac/xxxiii_cnmac/pdf/523.pdf>. Acesso em jun. 2018.
- WOLFRAM, S. **The Mathematica Book**, 4 ed., Wolfram Media/Cambridge University Press, 1999.
- YU, S. AMEEL, T.A. In: **J. Heat Mass Transfer**, 2001, 4225 p.
- YU, S. AMEEL, T.A. In: **J. Heat Mass Transfer**, 2002, 346 p.