PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Matheus Tavares Costa

Analise da influência dos parâmetros e geometria em escoamento de fluido não-newtoniano em restrição.

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Mônica Feijó Naccache, DSc

Rio de Janeiro

Junho de 2024

Agradecimentos

Agradeço a minha mãe, Beatriz Tavares, pelo apoio e confiança em toda minha jornada até este presente momento.

Agradeço, também, à toda minha família, pelo apoio ao longo de toda minha formação, como profissional e ser humano.

Agradeço a minha orientadora, Mônica Naccache, pelo apoio e confiança no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos inúmeros amigos da bateria e da SIEng, pelos bons momentos que proporcionaram ao longo da graduação. Amigos que levarei para toda minha vida.

Resumo

Analise da influência dos parâmetros em escoamento de fluido não-newtoniano em restrição.

Este estudo tem como objetivo analisar as influências dos parâmetros do modelo de fluido não newtoniano Herschel Bulkley em uma restrição entre placas paralelas. Utilizou-se o Gmsh para a criação de malhas, o OpenFOAM para a solução numérica dos casos analisados e o ParaView para pós processamento. Foram escolhidos três números de Reynolds que resultassem em escoamentos laminares para serem feitas mudanças de parâmetros do fluido e mudanças na geometria para se entender a influência deles no escoamento. Dado que esse tipo de escoamento tem aplicação em várias indústrias, entender bem a influência dos parâmetros nele pode auxiliar na otimização de processos. O parâmetro que resultou no maior aumento na queda de pressão adimensional foi o índice de potência do fluido, que representa o desvio do comportamento Newtoniano.

Palavras chaves: OpenFOAM, Herschel Bulkley, Análise de escoamento, Gmsh.

Abstract

Analysis of the influence of parameters on non-Newtonian fluid flow in a restriction.

This study aims to analyze the influence of the parameters of the Herschel Bulkley non-Newtonian fluid model on a constraint between parallel plates. Gmsh was used to create the meshes, OpenFOAM for the numerical solution of the cases analyzed and ParaView for post-processing. Three Reynolds numbers resulting in laminar flows were chosen to make changes to the fluid parameters and changes to the geometry in order to understand their influence on the flow. Given that this type of flow has applications in various industries, understanding the influence of the parameters on it can help optimize processes. The parameter that resulted in the greatest increase in the dimensionless pressure drop was the fluid's power index, which represents the deviation from Newtonian behavior.

Key words: OpenFOAM, Herschel Bulkley, Flow Analysis, Gmsh.

SUMÁRIO

Lista de figuras

Lista de tabelas

1 Introdução

O escoamento de fluidos com comportamento não newtoniano é bastante observado na indústria do petróleo nos fluidos de perfuração, na indústria de alimentos, farmacêutica e na medicina, como o sangue sendo transportado em uma veia. Entender melhor o comportamento desses tipos de fluidos pode contribuir para a melhoria da eficiência de vários processos.

Neste trabalho serão abordadas simulações numéricas de escoamento de fluidos não newtonianos feitas no software OpenFOAM com a utilização dos modelos já implementados no sistema, tentando observar a influência de certos parâmetros do escoamento, do fluido e da geometria no escoamento em uma restrição planar.

1.1. Revisão de Literatura

Estudando o escoamento de um fluido viscoplástico através de uma expansão-contração assimétrica DE SOUZA MENDES (2007) pode observar que a geometria e parâmetros do fluido tinham grande importância no resultado do escoamento. MITSOULIS (2004) no estudo sobre escoamentos de fluidos viscoplásticos em expansão pode observar criação de vórtex, assim mostrando também como a diferença nos parâmetros iniciais e geometria interferem no resultado final do escoamento. ROUSTAEI A. e FRIGAARD I. A. (2013) ao analisar um canal com paredes onduladas realizaram mais de 500 casos para poder conseguir observar minunciosamente a influência dos fatores geométricos, observando sempre como as mudanças altera a velocidade e pressão ao longo do canal. Estes trabalhos mostram a importância de um estudo paramétrico para a determinação e otimização de processos. O comportamento não Newtoniano dificulta este estudo, no sentido de que as equações envolvidas se tornam mais não lineares e o número de parâmetros é maior.

1.2. Objetivos e Motivação

Tendo em vista a importância das aplicações de fluidos não newtonianos, o presente trabalho tem como objetivo analisar a influência dos parâmetros reológicos do modelo de Herschel-Bulkley, que modela o comportamento pseudoplástico de um fluido não Newtoniano, da geometria e do escoamento em uma restrição planar, observando o campo de velocidade para cada caso analisado e queda de pressão.

2 Fundamentação teórica

Para a solução numérica desses casos será utilizado fluidodinâmica computacional.

2.1. Fluidodinâmica Computacional

A Fluidodinâmica Computacional ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*), é a área do conhecimento que trata da simulação numérica de escoamentos de fluidos, transferência de calor e fenômenos relacionados, como reações químicas, combustão, aeroacústica etc. O CFD teve origem a partir da combinação de duas disciplinas: mecânica dos fluidos e cálculo numérico. As equações que regem o escoamento de fluidos têm origem na mecânica dos fluidos e podem ser resolvidas por meio de diferentes métodos numéricos. (KESSLER, 2016)

Para que seja possível se resolver escoamentos a partir do CFD é necessário antes gerar uma malha computacional, transformando assim um domínio contínuo em discreto como observado na Figura 1.

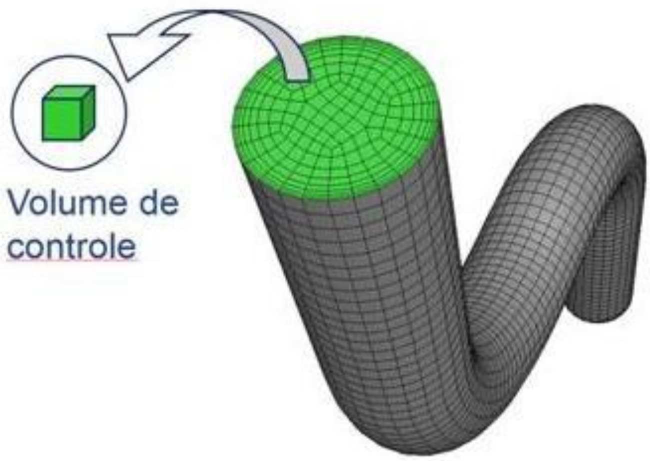

Figura 1 - Domínio discreto (KESSLER, 2016).

3 Metodologia numérica

O escoamento foi resolvido usando o programa OpenFOAM.

3.1. OpenFOAM

O OpenFOAM é um *software* de código aberto CFD desenvolvido pela OpenCFD desde 2004. Ele tem uma grande base de utilizadores na maioria das áreas da engenharia e da ciência, tanto de organizações comerciais como acadêmicas. O OpenFOAM tem uma ampla gama de ferramentas para resolver desde fluxos de fluidos complexos envolvendo reações químicas, turbulência e transferência de calor, à acústica, mecânica dos sólidos e eletromagnética.

Para a solução de escoamentos laminares, o OpenFOAM tem o solver icoFoam.

3.1.1. icoFoam

Para resolver o escoamento da contração, temos como base o solver icoFOAM. O icoFoam resolve as equações incompressíveis e laminares de Navier-Stokes usando o algoritmo PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operators)*. O código é inerentemente transitório, exigindo uma condição inicial e condições de contorno.

O algoritmo PISO resolve a equação de continuidade para fluido incompressível, dada por:

$$\nabla \cdot u = 0 \tag{1}$$

e de momento:

$$\frac{\delta}{\delta t}(\boldsymbol{u}) + \nabla \cdot (\boldsymbol{uu}) - \nabla \cdot (v\nabla \boldsymbol{u}) = -\nabla \mathbf{p} \tag{2}$$

Onde:

$\boldsymbol{p}$=pressão dividida pela densidade

$\boldsymbol{u}$= vetor velocidade

$\boldsymbol{v}$ = viscosidade cinemático

As condições de contorno utilizadas na solução foram:

- Impermeabilidade e não deslizamento nas paredes (implica no vetor velocidade nulo)

- Na entrada, foi considerada a condição de velocidade uniforme e constante
- Na saída, foi considerada a condição de pressão igual a 2.
- Na linha de simetria foi considerado d/dy=0.

3.1.2. nonNewtonianIcoFoam

O fluido escoando escolhido é não Newtoniano. Dessa forma utilizamos o nonNewtonianIcoFoam, que é um *transient solver* para escoamento laminar incompressível de fluidos não newtonianos. A sua única diferença em relação ao icoFoam é o tipo de fluido que ele consegue resolver.

3.1.3. Modelo de Herschel-Bulkley

O fluido escolhido tem um comportamento conhecido como viscoplástico. Estes fluidos tem como principais características a existência de uma tensão limite de escoamento, abaixo da qual o fluido se comporta como um sólido e não escoa. Acima da tensão limite, o fluido tem um comportamento pseudoplástico, i.e., sua viscosidade cai com o aumento da taxa de cisalhamento. Exemplos de fluidos com este comportamento são os fluidos de perfuração na industria de petróleo, mostarda e ketchup na indústria de alimentos, géis, muito usados em farmacêutica. A equação de Herschel-Bulkley modela de forma bastante precisa este tipo de comportamento. A equação é dada por:

$$\boldsymbol{\nu} = \begin{cases} \infty & \boldsymbol{\tau} \leq \boldsymbol{\tau_0} \\ \dfrac{\boldsymbol{\tau_0}}{\dot{\boldsymbol{\gamma}}} + \boldsymbol{k}\dot{\boldsymbol{\gamma}}^{\boldsymbol{n-1}} & \boldsymbol{\tau} > \boldsymbol{\tau_0} \end{cases} \tag{3}$$

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação

τ_0 = tensão limite de escoamento

ν = viscosidade

k = índice de consistência

n = índice de potência

Numericamente, não é possível definir uma viscosidade infinita. Dessa forma, são necessários modelos que substituam esta condição por outra numericamente possível. Estes são conhecidos como modelos de regularização. O modelo utilizado no OpenFOAM considera que para baixas taxas de

deformação, abaixo de um valor crítico, o material é modelado como um fluido muito viscoso com viscosidade $\boldsymbol{\nu_0}$. Em geral, a literatura sugere que esta alta viscosidade seja da ordem de 500 a 1000 vezes maior do que uma viscosidade característica do fluido no escoamento de interesse.
O OpenFOAM utiliza o seguinte modelo de viscosidade.

$$\nu = \min\left(\nu_0, \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k\dot{\gamma}^{n-1}\right) \tag{4}$$

Onde:

$$\dot{\gamma} = \frac{u}{D} \tag{5}$$

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação

τ_0 = tensão limite de escoamento

ν = viscosidade

k = índice de consistência

n = índice de comportamento

3.2. Geometria e malha

A geometria do escoamento escolhida para a restrição é composta a partir de duas placas paralelas onde a distância máxima entre placas D = 5 cm, a distância da placa até o eixo central d = 2,5 cm, a área inicial de entrada para o desenvolvimento do fluido e a área após a contração tem comprimento de 5*D, 25 cm, e o comprimento do início da restrição até o final da expansão é de 8*D, 40 cm, sendo assim, juntado as três partes totalizando 90 cm.

Foram então feitas três geometrias no Gmsh apenas da parte superior, considerando a condição de simetria, onde o solver irá espelhar a parte de baixo assim nos permitindo utilizar uma malha mais refinada com um custo computacional similar. Essas três geometrias diferem entre si apenas na área da restrição a distância mínima entre placas, sendo elas D_{min} =0,75*D, D_{min} =0,5*D e $\mathrm{D_{min}}$=0,25*D.

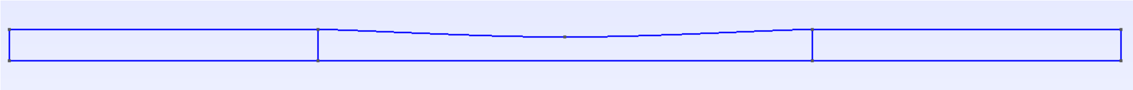

Figura 2 - Geometria D_{min}=0,75*D

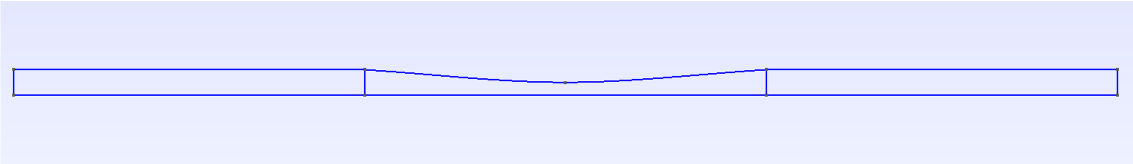

Figura 3 - Geometria D_{min}=0,5*D

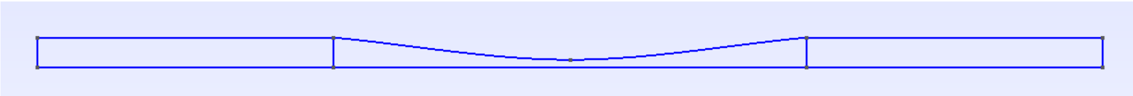

Figura 4 - Geometria D_{min}=0,25*D

Então foram feitas três malhas com elementos retangulares para uma das geometrias para que fossem feitos testes de malha com escoamentos de mesmas condições iniciais para que fosse escolhido então qual delas teria um custo computacional compatível com o trabalho esperado. Essas malhas tinham como referência para o refinamento o número de nós em y, sendo assim as malhas para o teste tinham 20, 30 e 40 nós no eixo y, e para o refinamento no em x tinha um refinamento de 5 vezes nas áreas de desenvolvimentos e 8 vezes na restrição sendo assim um total de 360, 540 e 720 nós no eixo x.

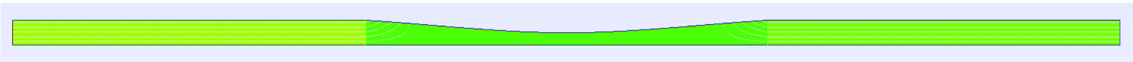

Figura 5 - Malha

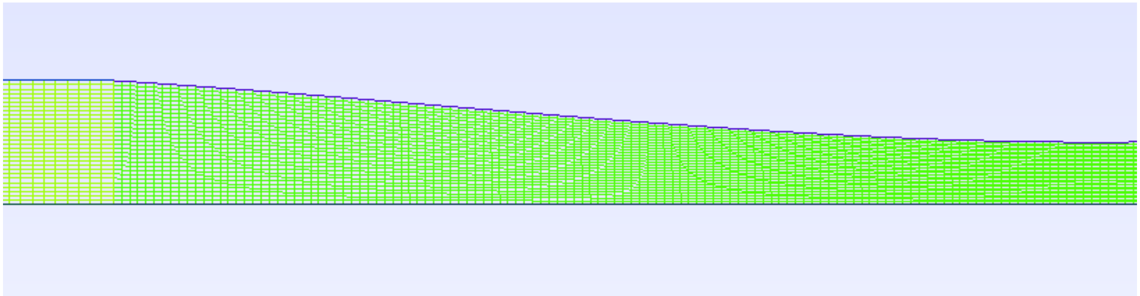

Figura 6 - Zoom no incio da restrição

Para os casos que não convergirem, iremos tentar partir de uma solução mais estável, adotando então como condições iniciais um caso já resolvido para então mudar os parâmetros para o do caso desejado.

4 Metodologia

4.1. Teste de malha

Para se escolher a malha a ser utilizada são feitas simulações com as mesmas condições iniciais e parâmetros do fluido e do escoamento, mudando apenas o refinamento visando obter os melhores resultados com o menor custo computacional.

Para o caso da geometria onde a distância entre placas mínima é equivalente a 50% da distância entre as placas na entrada foi escolhido um número de Reynolds igual a 100, definindo então escolhendo os parâmetros do fluido e a velocidade do escoamento.

Tabela 1 - Parâmetros do fluido e condições iniciais

Parâmetro	Valor
ν_0	1 [m^2/s]
τ_0	5e-3 [m^2/s^2]
k	1e-3 [m^2/s]
n	0,5
Um	0,97 [m/s]
Pressão na saída	2 [m^2/s^2]

Foi resolvido o escoamento no regime transiente até a obtenção do regime permanente.

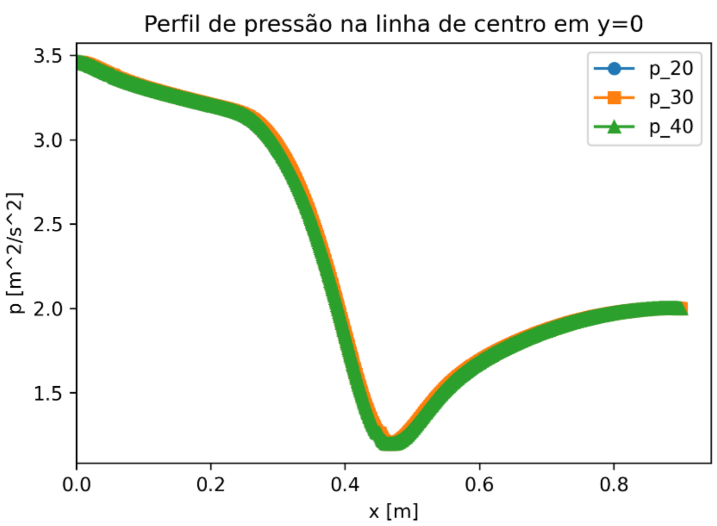

Figura 7- Queda de pressão no teste de malha

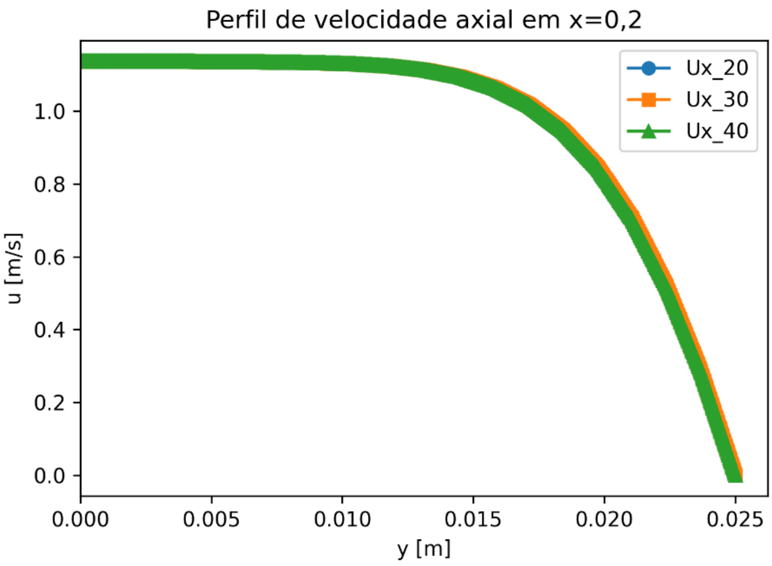

Figura 8 - Velocidade axial antes da restrição no teste de malha

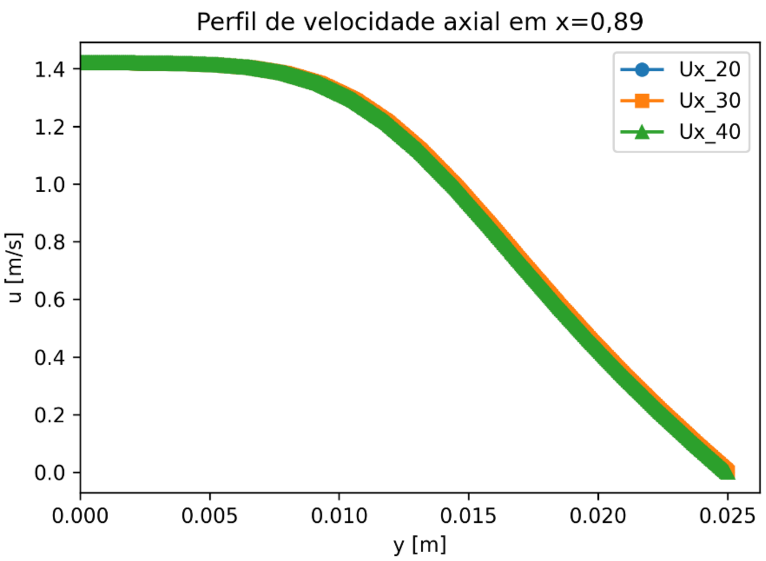

Figura 9 - Velocidade axial depois da restrição no teste da malha

Como podemos observar nas figuras 7, 8 e 9 todos os três casos quase que se sobrepõem, foi escolhida então a malha intermediaria com 30 nós em y e 540 nós em x, dado que tinha um custo operacional razoável.

4.2. Número de Reynolds

O número de Reynolds é adimensional utilizado na mecânica dos fluidos e fenômenos de transporte para caracterizar o movimento de um fluido. A importância deste número está no falto dele nos informar sobre o regime de escoamento, este podendo ser laminar ou turbulento.

$$\boldsymbol{Re} = \frac{\boldsymbol{Du}}{\boldsymbol{\nu}} \tag{6}$$

Onde:

$\boldsymbol{Re}$ = Reynolds

$\boldsymbol{D}$ = distância entre placas

$\boldsymbol{u}$ = velocidade do fluido

$\boldsymbol{\nu}$ = viscosidade cinemática

5 Resultados

Neste capítulo vamos apresentar os resultados obtidos, visando uma análise paramétrica do escoamento do fluido viscoplástico na restrição planar. Serão avaliados os efeitos dos parâmetros: número de Reynolds, tensão limite de escoamento, indíce de consistência, geometria na queda de pressão e no campo de velocidades.

Para o caso de referência teremos os seguintes parâmetros do fluido especificados na tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros do fluido para caso de referência

Parâmetro	Valor
ν_0	1 [m^2/s]
τ_0	5e-3 [m^2/s^2]
k	1e-3 [m2/s]
n	0,5

Utilizamos três números de Reynolds, de acordo com a tabela abaixo onde são apresentadas as velocidades usadas na entrada.

Tabela 3 - Velocidades para casos

Caso	Reynolds	u [m/s]
Referência	20	0,40
Referência	100	0,97
Referência	200	1,44
k=10e-3	20	1,00
k=10e-3	100	2,84
k=10e-3	200	4,46
n=0,75	20	0,46
n=0,75	100	1,28
n=0,75	200	2,07
n=0,25	20	0,37
n=0,25	100	0,84
n=0,25	200	1,20
$\boldsymbol{\tau_0}$=1e-3	20	0,26
$\boldsymbol{\tau_0}$=1e-3	100	0,69
$\boldsymbol{\tau_0}$=1e-3	200	1,06
$\boldsymbol{\tau_0}$=10e-3	20	0,52
$\boldsymbol{\tau_0}$=10e-3	100	1,23
$\boldsymbol{\tau_0}$=10e-3	200	1,79

5.1. Queda de pressão adimensional

Para analisar o efeito dos parâmetros no escoamento, será comparado a queda de pressão adimensional, calculada a partir da pressão no início da restrição, x=0,25 m, ao final da expansão, x=0,65 m, e definida por:

$$\Delta \mathbf{p}^{\alpha} = \frac{\Delta \mathbf{p}}{\frac{1}{2}\bar{u}^2} \quad (7)$$

A seguir serão mostrados os resultados de queda de pressão, campos de velocidades e pressão para os diferentes casos analisados.

5.2. Distância mínima entre placas de 75% da distância máxima.

5.2.1. Reynolds=20

5.2.1.1. Caso de referência

Parâmetro	Valor
ν_0	1 [m^2/s]
τ_0	5e-3 [m^2/s^2]
k	1e-3 [m2/s]
n	0,5

As figuras 10 e 11 mostram os campos de velocidade e pressão para Re=20, k = 1e-3 [m2/s], n = 0,5, τ_0 = 5e-3 [m^2/s^2] e ν_0 = 1 [m^2/s]. Observa-se que perto da parede as velocidades são mais baixas e na restrição obtêm-se valores mais elevados. Ao mesmo tempo, observa-se a queda de pressão ao longo do canal. Na figura 12 podemos observar que as curvas de velocidade antes da contração e no final se sobrepõe assim confirmando que o desenvolvimento do escoamento. Observa-se também o escoamento na forma de plug, característico dos materiais viscoplásticos. Significa que próximo a parede ocorre deformação do fluido pois a tensão ultrapassa a tensão limite. Na região do plug, o fluido escoa quase em bloco, como um fluido Newtoniano muito viscoso.

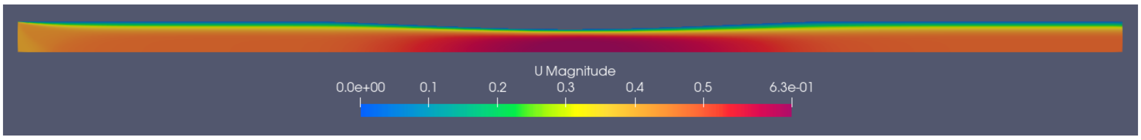

Figura 10 - Campo de velocidade Rey = 20 caso referência

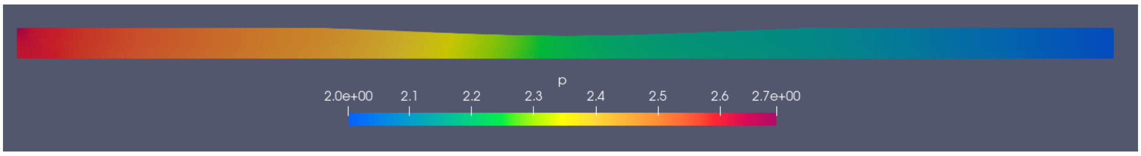

Figura 11 - Campo de pressão Rey = 20 caso referência

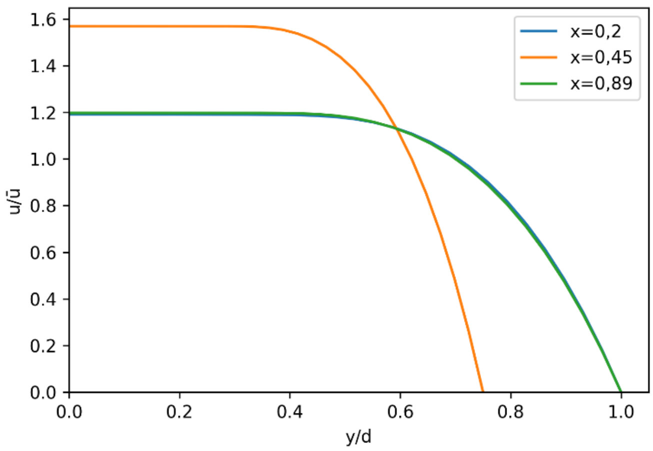

Figura 12 - Velocidade axial Rey = 20 caso referência

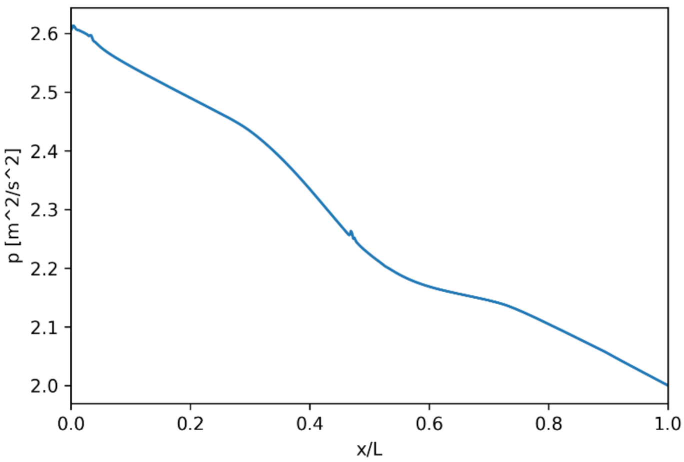

Figura 13 - Queda de pressão Rey = 20 caso referência

Nos outros casos observou-se o mesmo comportamento qualitativo para os campos de velocidade e pressão.

5.2.1.2. k=10e-3

Na figura 14 observamos uma maior queda de pressão no caso com um maior índice de consistência, em relação aos demais casos, pelo seu nível de viscosidade ser maior.

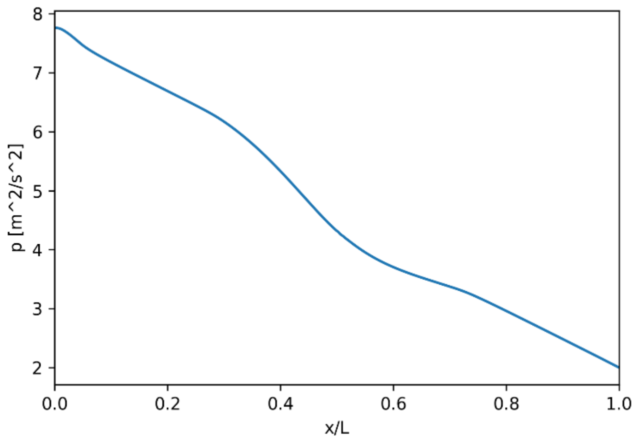

Figura 14 - Queda de pressão Rey = 20 caso k = 10e-3

5.2.1.3. Demais casos

Na figura 15 podemos observar que as curvas de velocidade do caso n = 0,75 são menos achatadas longe das paredes, assim se assimilando mais aos fluidos Newtonianos que temos quando o n se aproxima de 1.

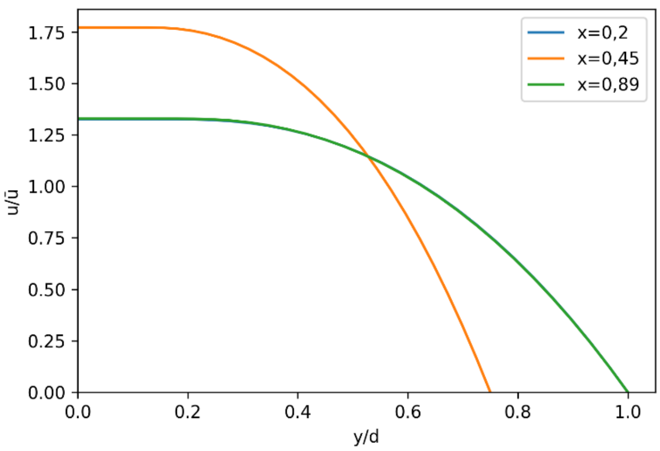

Figura 15 - Velocidade axial n = 0,75

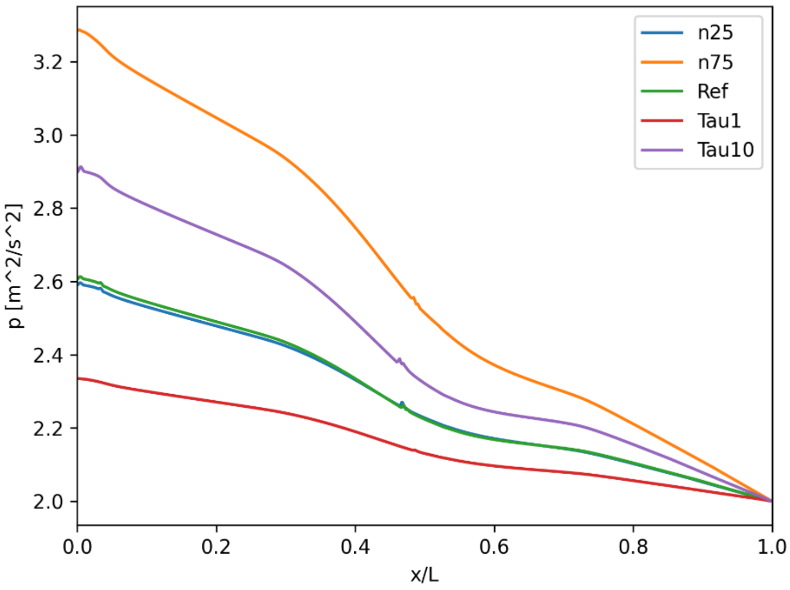

Figura 16 - Queda de pressão

Na figura 16 temos as curvas de queda de preção de todos os casos com Reynolds igual a 20 com exceção do caso de índice de consistência, elas tem um comportamento parecido, mas suas magnitudes são afetadas dada a influência de cada parâmetro na queda de pressão.

5.2.2. Reynolds=100

5.2.2.1. Caso de referência

Na figura 19 podemos observar que as curvas de velocidade antes da contração e no final passam a não se sobrepor mais, assim mostrando que para esse número de Reynolds seria necessária uma área maior para o desenvolvimento do escoamento. Além disso, observa-se que as tensões mais elevadas reduziram o tamanho do plug de velocidade. E na figura 20 podemos observar uma queda de pressão mais acentuada na restrição.

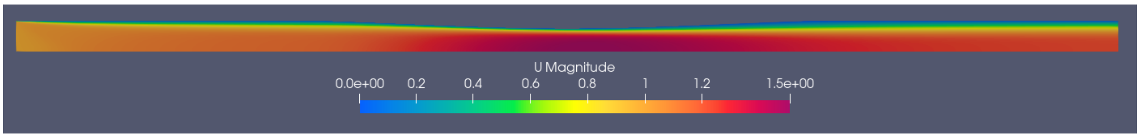

Figura 17 - Campo de velocidade Rey = 100 caso referência

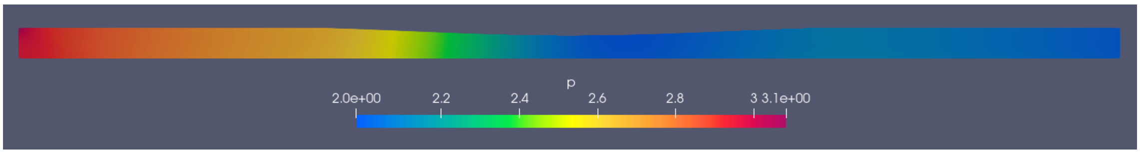

Figura 18 - Campo de pressão Rey = 100 caso referência

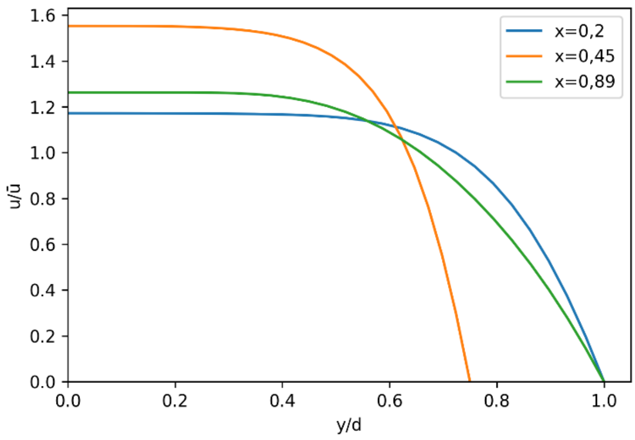

Figura 19 - Velocidade axial Rey = 100 caso referência

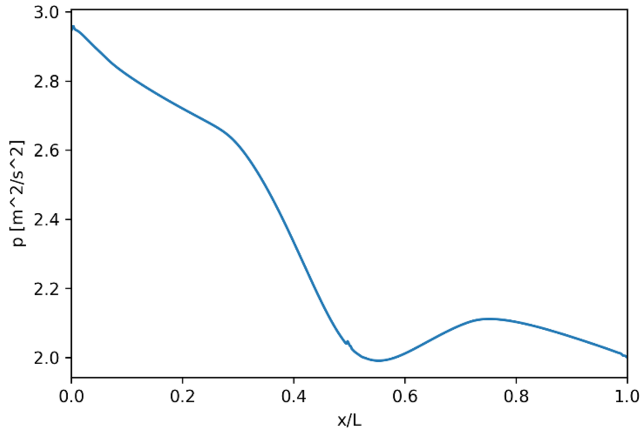

Figura 20 - Queda de pressão Rey = 100 caso referência

5.2.2.2. k=10e-3

Na figura 21 vemos mais uma vez uma maior queda de pressão no caso com um maior índice de consistência, em relação aos demais casos, pelo seu nível de viscosidade ser maior. Esse comportamento irá seguir pelos próximos casos com esse parâmetro nas diversas geometrias.

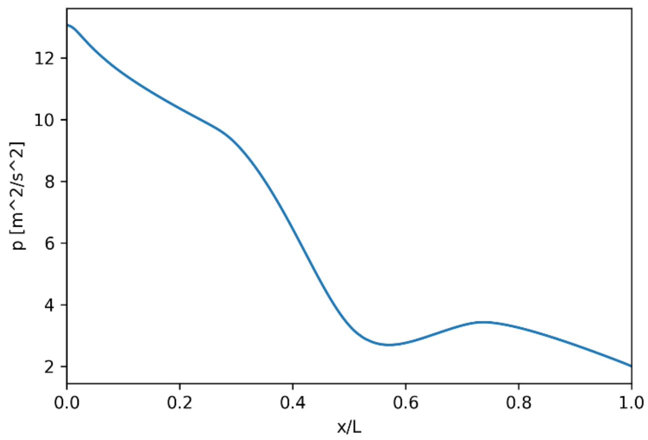

Figura 21 - Queda de pressão Rey = 100 caso k=10e-3

5.2.2.3. Demais casos

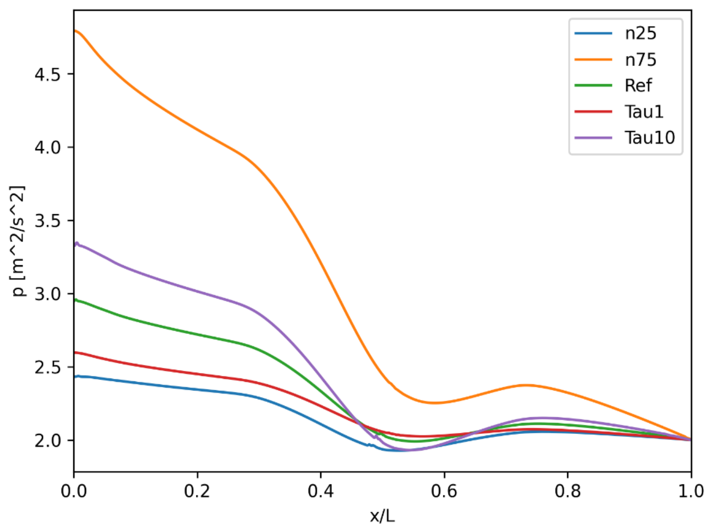

Figura 22 - Queda de pressão

5.2.3. Reynolds=200

5.2.3.1. Caso de referência

Seguindo os comportamentos já analisados anteriormente, na figura 25 temos uma diferença maior ainda entre as curvas de velocidade antes da contração e no final da geometria. O tamanho do plug é ainda um pouco menor, devido ao aumento das tensões. Observa-se também uma maior queda de pressão na restrição para estes casos.

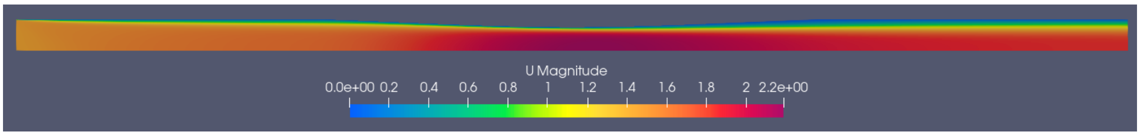

Figura 23 - Campo de velocidade Rey = 200 caso referência

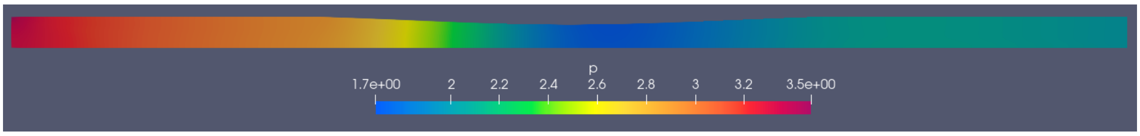

Figura 24 - Campo de pressão Rey = 200 caso referência

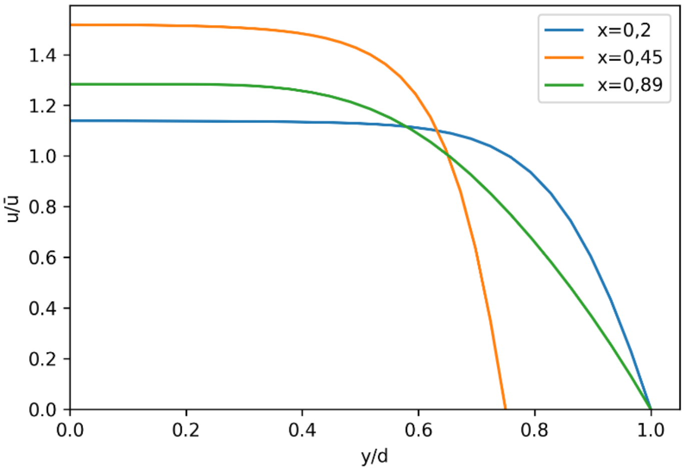

Figura 25 - Velocidade axial Rey = 200 caso referência

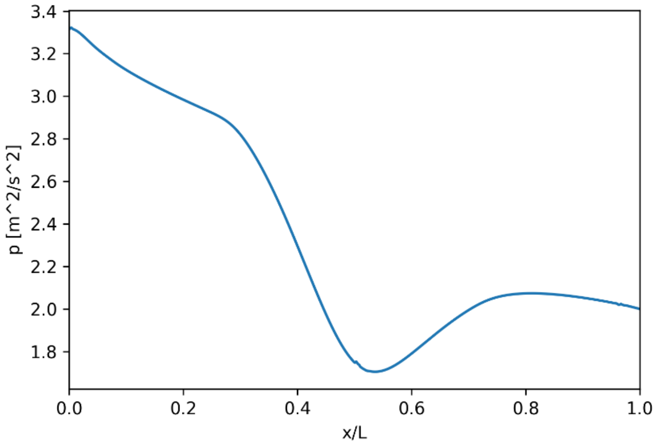

Figura 26 - Queda de pressão Rey = 200 caso referência

5.2.3.2. k=10e-3

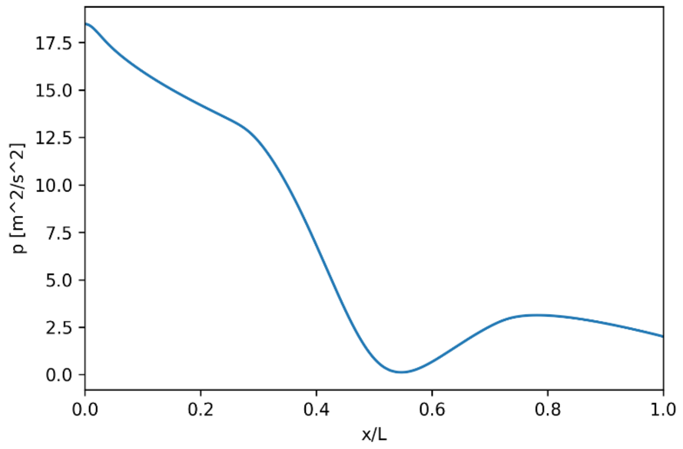

Figura 27 - Queda de pressão Rey = 200 caso k=10e-3

5.2.3.3. Demais casos

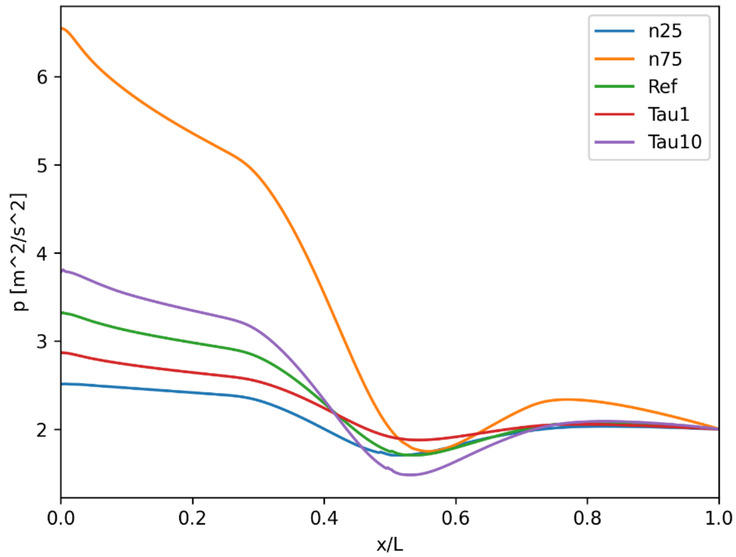

Figura 28 - Queda de pressão

5.3. Distância mínima entre placas de 50% da distância máxima.

5.3.1. Reynolds=20

5.3.1.1. Caso de referência

As figuras 29 e 30 mostram os campos de velocidade e pressão para Re=20, k = 1e-3 [m2/s], n = 0,5, τ_0 = 5e-3 [m^2/s^2] e ν_0 = 1 [m^2/s]. Observa-se que perto da parede as velocidades são mais baixas e na restrição obtêm-se valores mais elevados. Ao mesmo tempo, observa-se a queda de pressão ao longo do canal. Se comparados aos valores da geometria anterior, temos valores ligeiramente mais elevados no campo de pressão, e proporcionalmente maior em relação as velocidades.

Na figura 32 podemos observar também, que para o mesmo número de Reynolds da geometria anterior, já temos uma queda maior de pressão.

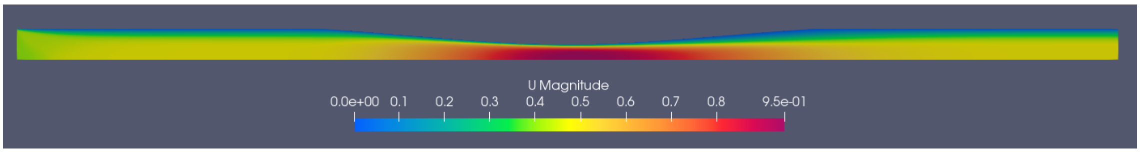

Figura 29 - Campo de velocidade Rey = 20 caso referência

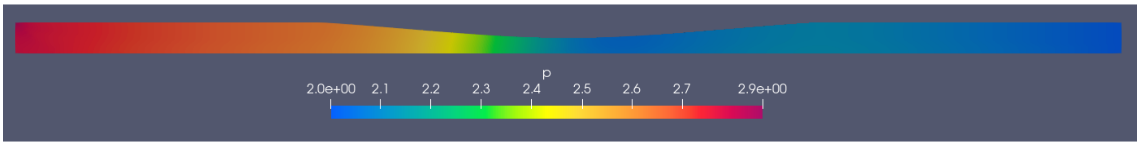

Figura 30 - Campo de pressão Rey = 20 caso referência

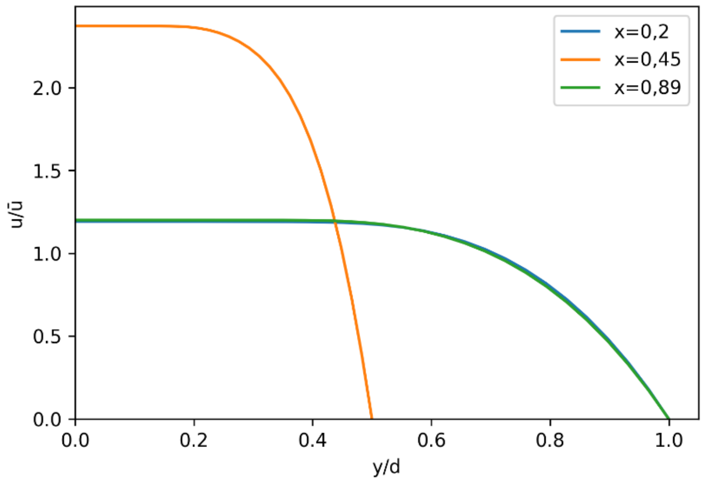

Figura 31 - Velocidade axial Rey = 20 caso referência

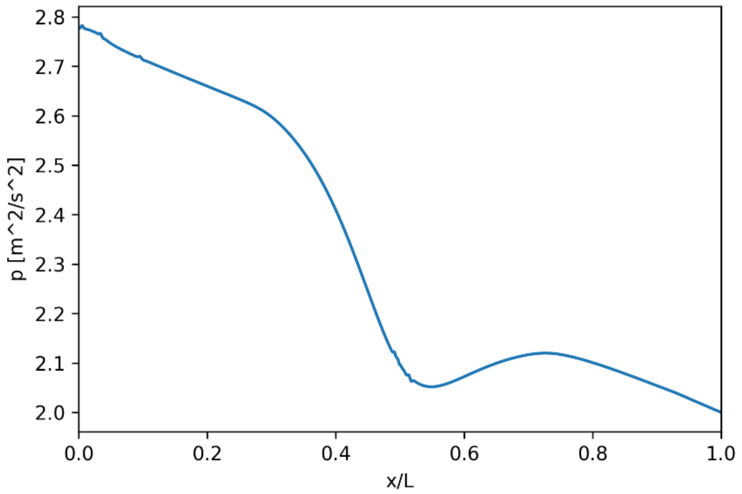

Figura 32 - Queda de pressão Rey = 20 caso referência

5.3.1.2. k=10e-3

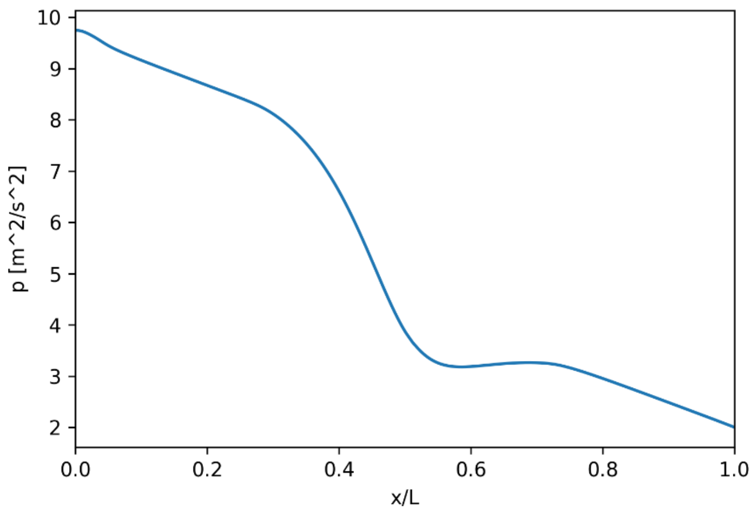

Figura 33 - Queda de pressão Rey = 20 caso k=10e-3

5.3.1.3. Demais casos

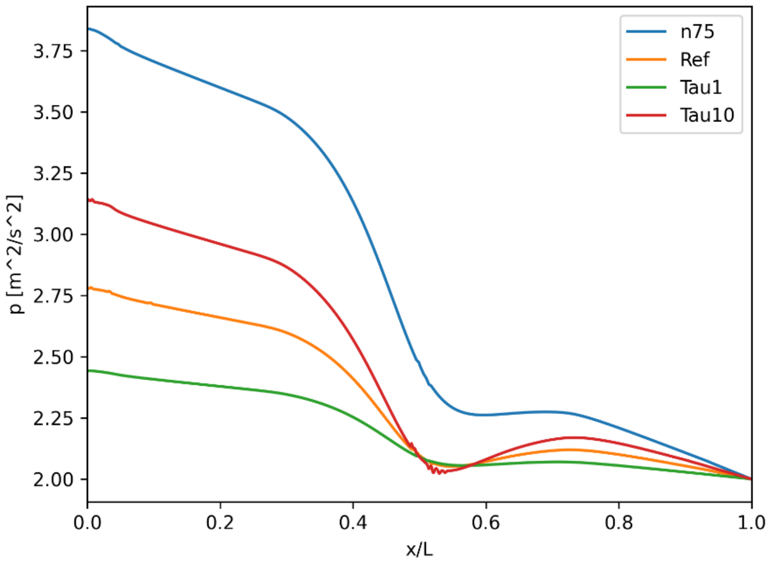

Figura 34 - Queda de pressão

5.3.2. Reynolds=100

5.3.2.1. Caso de referência

É possível observar nas figuras 35 e 37, fazendo uma comparação com os casos anteriores como na figura 17 e 19, do mesmo caso na geometria anterior, que conforme as velocidades vão aumentando passa a ser necessário uma área maior para o desenvolvimento do fluido.

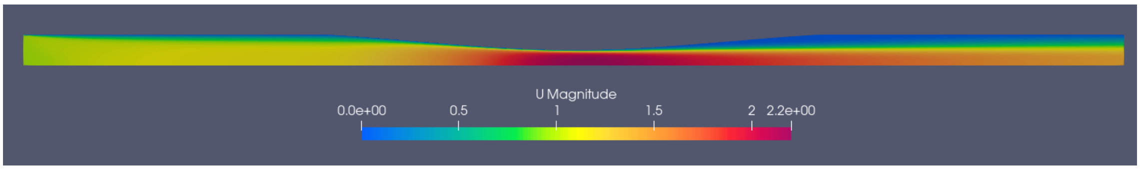

Figura 35 - Campo de velocidade Rey = 100 caso referência

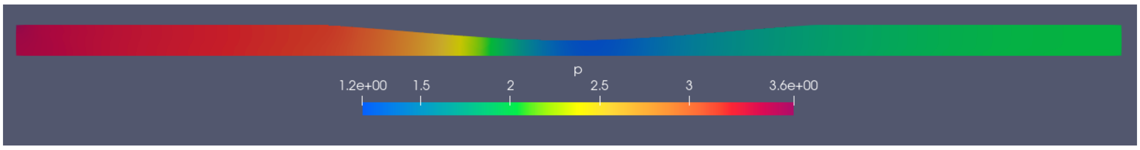

Figura 36 - Campo de pressão Rey = 100 caso referência

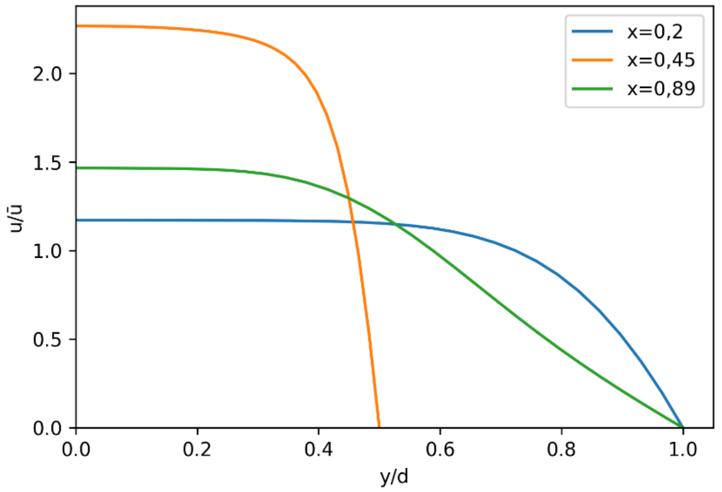

Figura 37 - Velocidade axial Rey = 100 caso referência

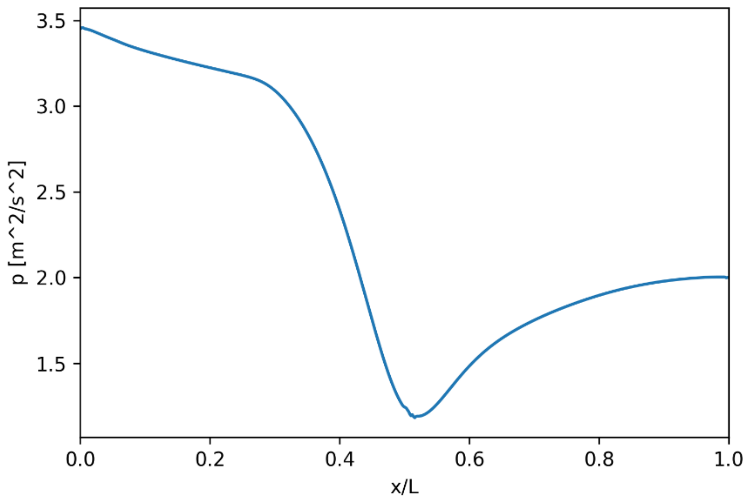

Figura 38 - Queda de pressão Rey = 100 caso referência

5.3.2.2. k=10e-3

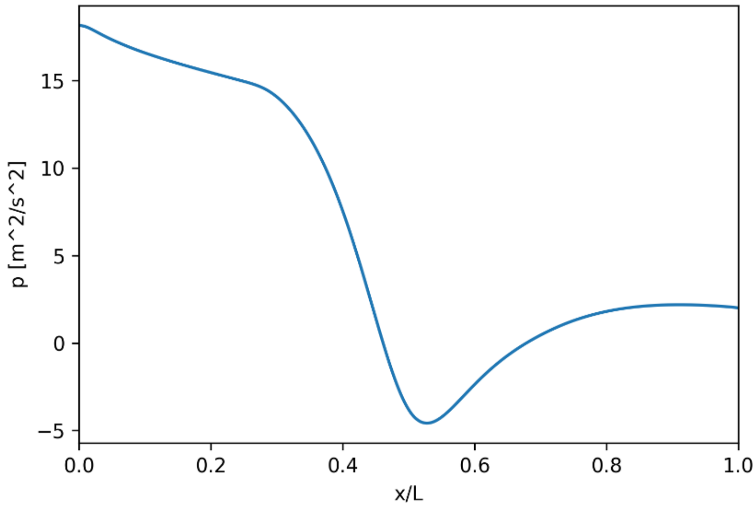

Figura 39 - Queda de pressão Rey = 100 caso k=10e-3

5.3.2.3. Demais casos

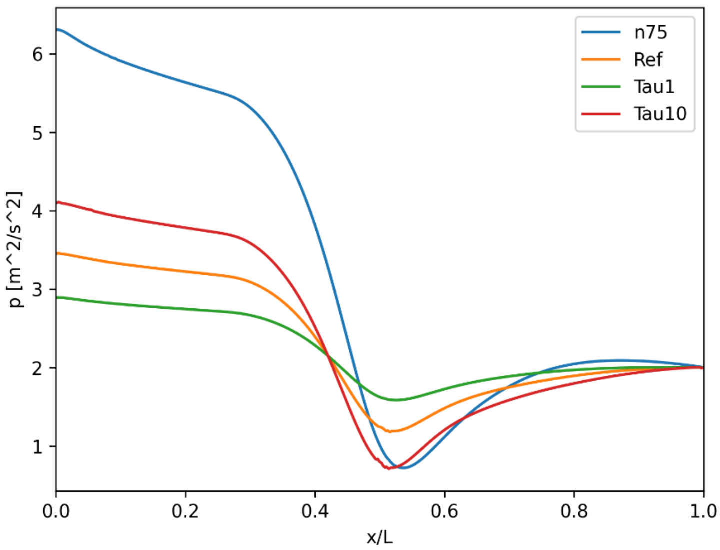

Figura 40 - Queda de pressão

5.3.3. Reynolds=200

5.3.3.1. Caso de referência

É possível observar nas figuras 41 e 43, que conforme as velocidades vão aumentando passa a ser necessário uma área maior para o desenvolvimento do fluido tanto na entrada quanto na saida.

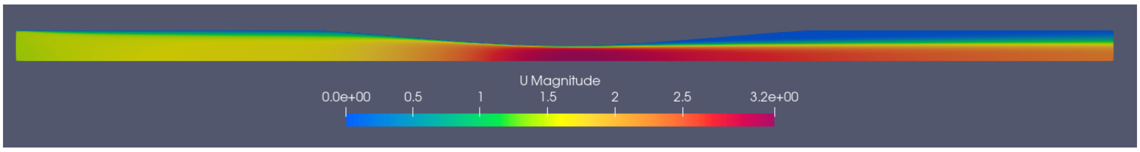

Figura 41 - Campo de velocidade Rey = 200 caso referência

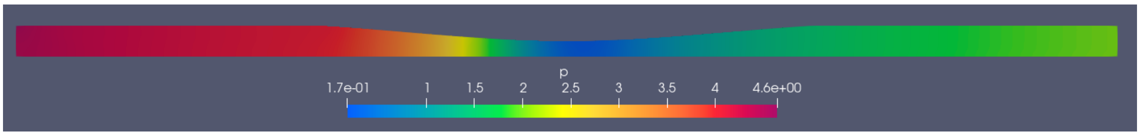

Figura 42 - Campo de pressão Rey = 200 caso referência

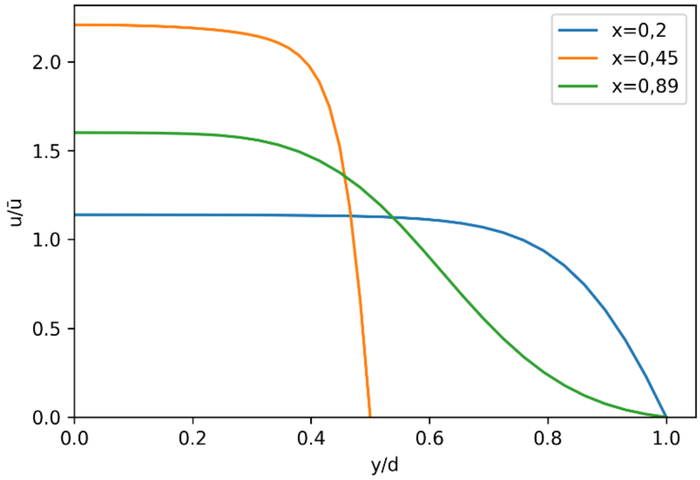

Figura 43 - Velocidade axial Rey = 200 caso referência

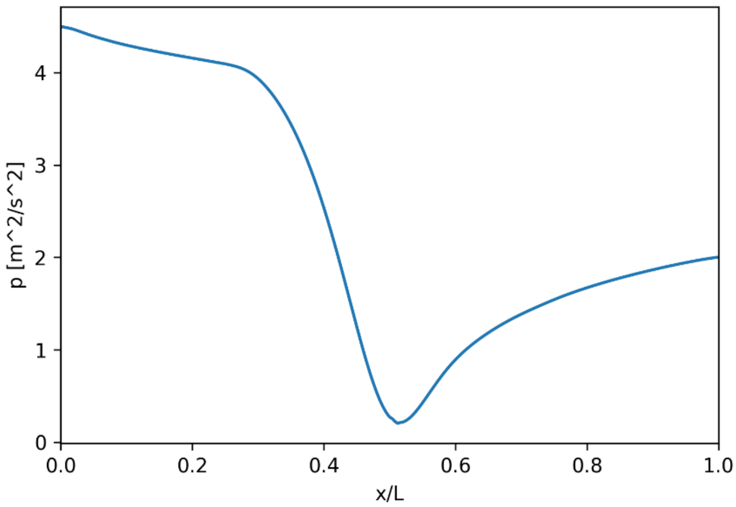

Figura 44 - Queda de pressão Rey = 200 caso referência

5.3.3.2. k=10e-3

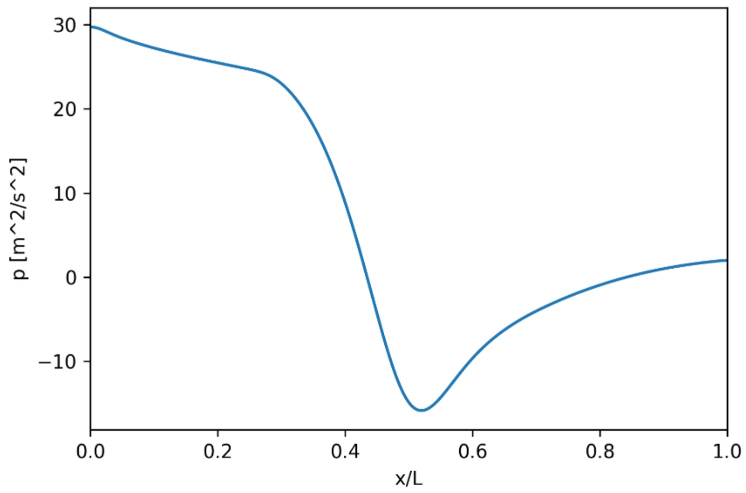

Figura 45 - Queda de pressão Rey = 200 caso k=10e-3

5.3.3.3. Demais casos

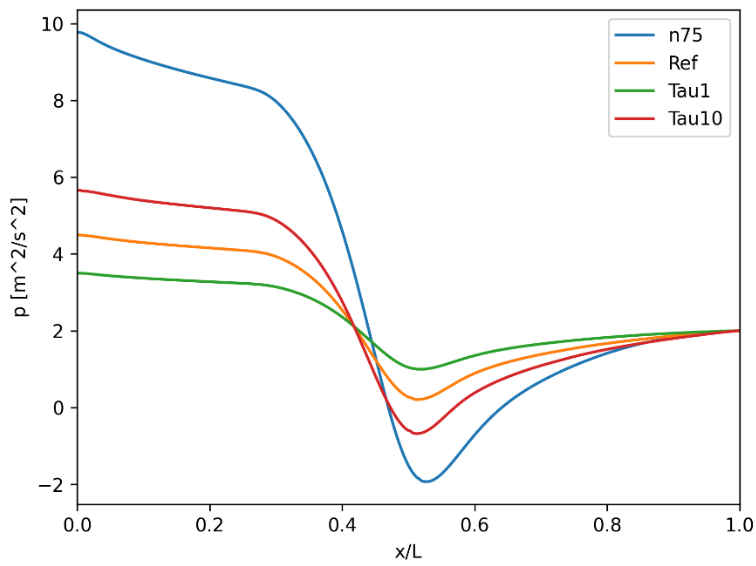

Figura 46 - Queda de pressão

5.4. Distância mínima entre placas de 25% da distância máxima.

5.4.1. Reynolds=20

5.4.1.1. Caso de referência

As figuras 47, 48, 49 e 50 mostram, como já observado na comparação das geometrias anteriores, temos uma queda de pressão maior e velocidades relativas maiores devido a diminuição da distância entre as placas.

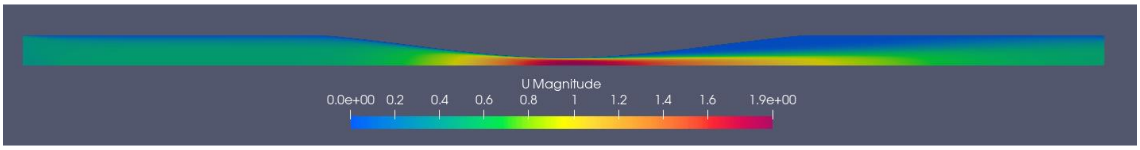

Figura 47 - Campo de velocidade Rey = 20 caso referência

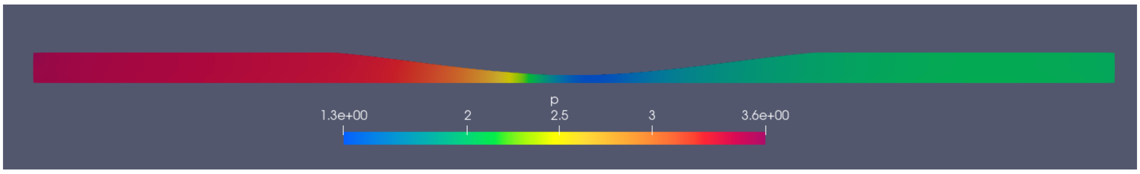

Figura 48 - Campo de pressão Rey = 20 caso referência

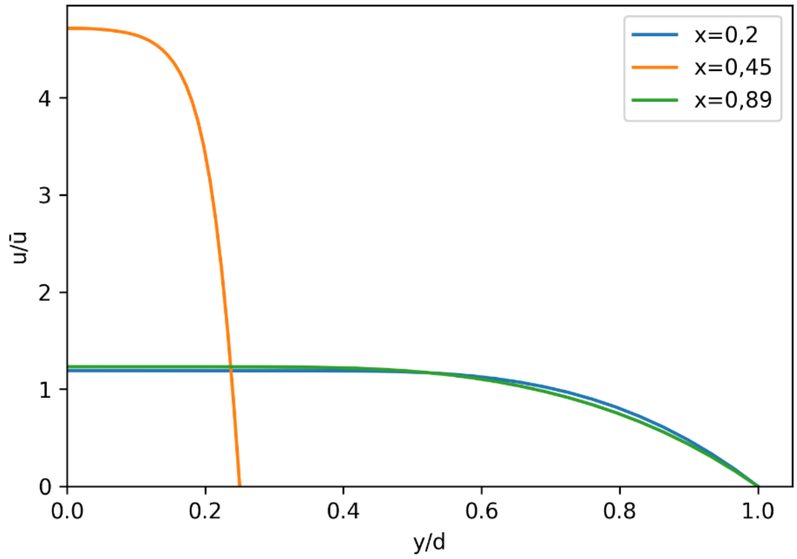

Figura 49 - Velocidade axial Rey = 20 caso referência

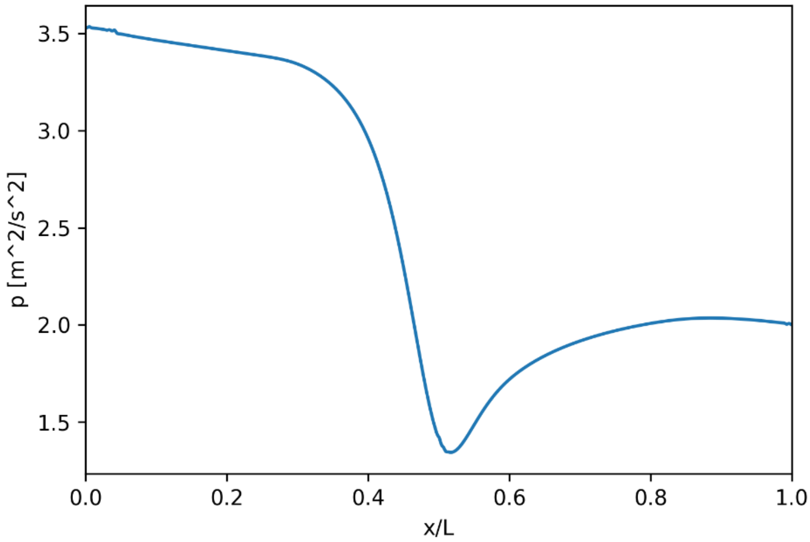

Figura 50 - Queda de pressão Rey = 20 caso referência

5.4.1.2. k=10e-3

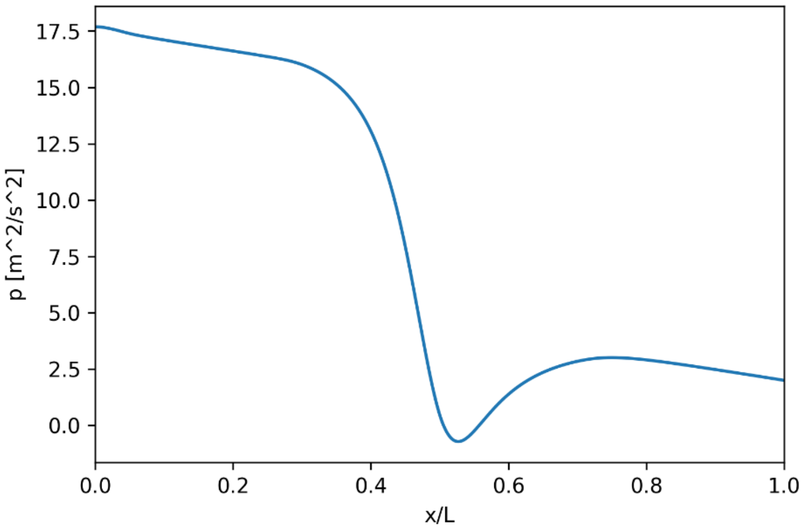

Figura 51 - Queda de pressão Rey = 20 caso k=10e-3

5.4.1.3. Demais casos

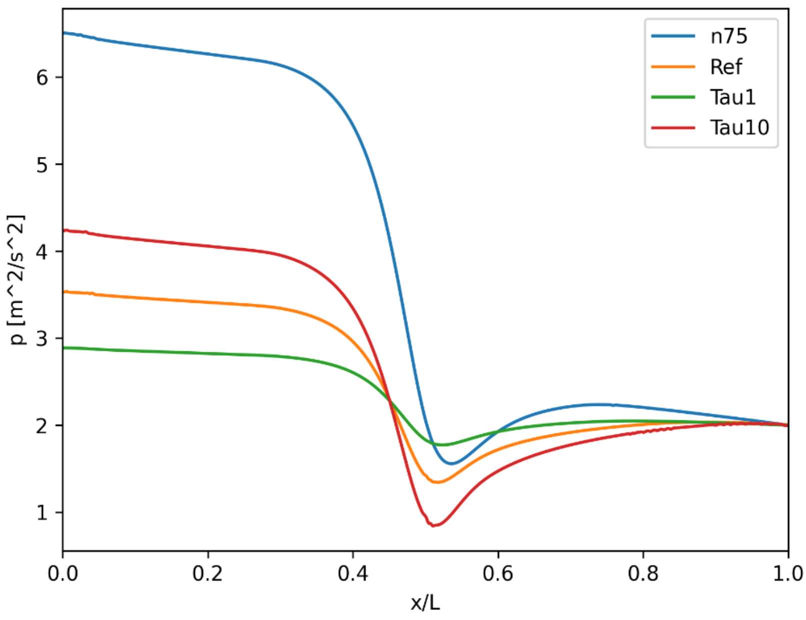

Figura 52 - Queda de pressão

5.4.2. Reynolds=100

Para os próximos casos desta geometria não conseguimos a solução numérica de todos eles pois não chegaram a convergir.

5.4.2.1. k=10e-3

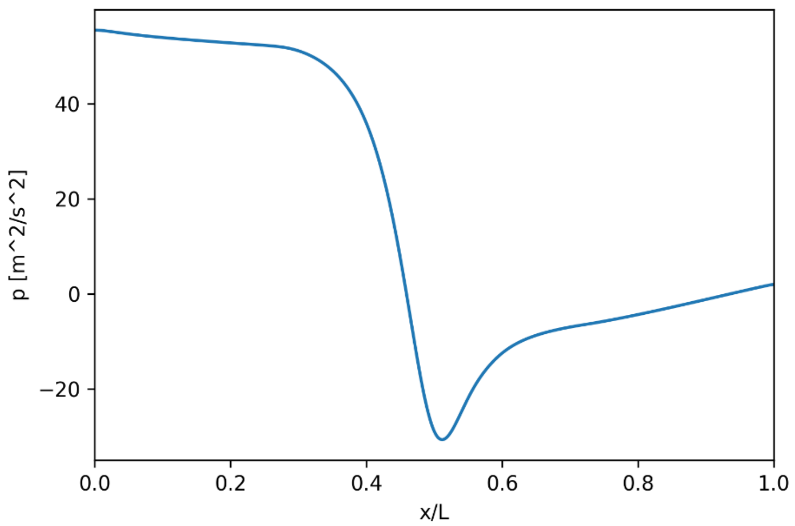

Figura 53 - Queda de pressão Rey = 100 caso k=10e-3

5.4.2.2. n=0,75

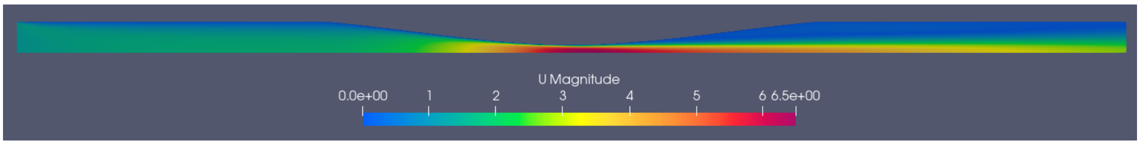

Figura 54 - Campo de velocidade Rey = 100 caso n=0,75

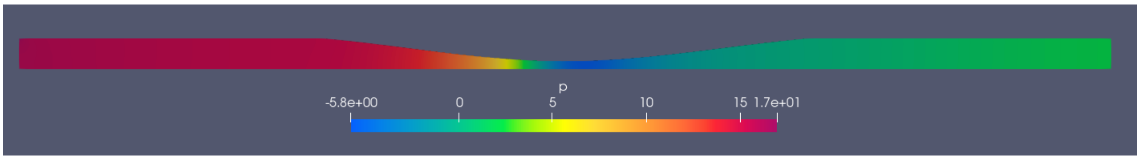

Figura 55 - Campo de pressão Rey = 100 caso n=0,75

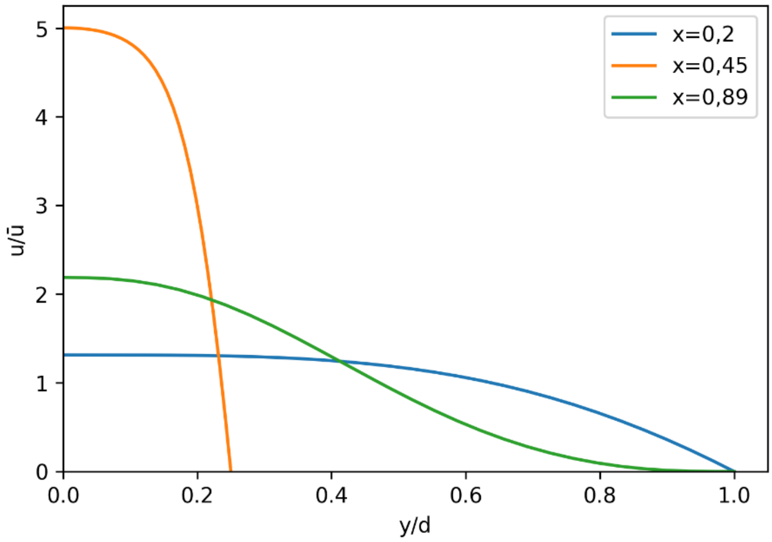

Figura 56 - Velocidade axial Rey = 100 caso n=0,75

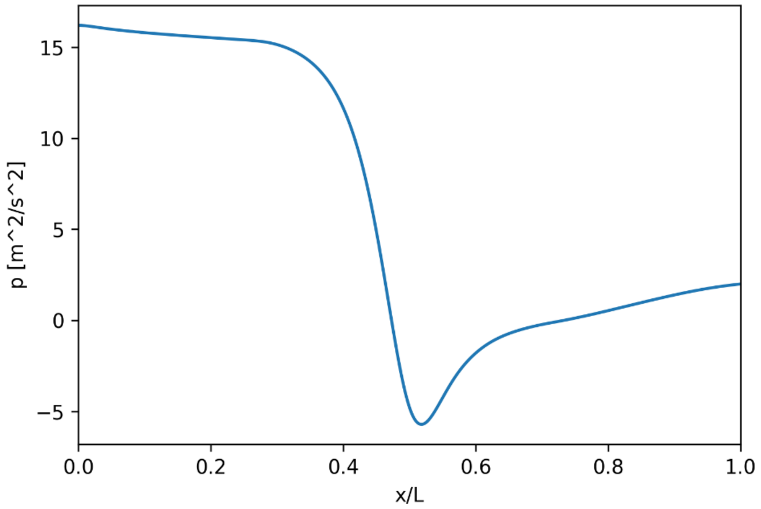

Figura 57 - Queda de pressão Rey = 100 caso n=0,75

5.4.2.3. τ_0=1e-3

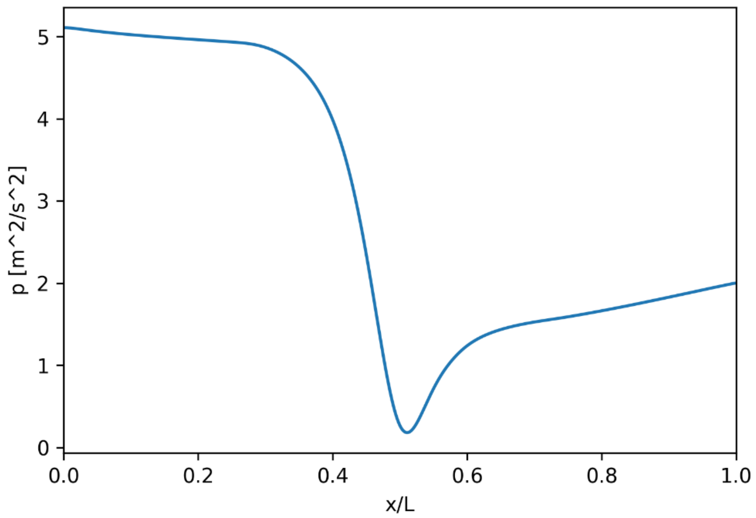

Figura 58 - Queda de pressão Rey = 100 caso τ_0=1e-3

5.4.3. Reynolds=200

5.4.3.1. n=0,75

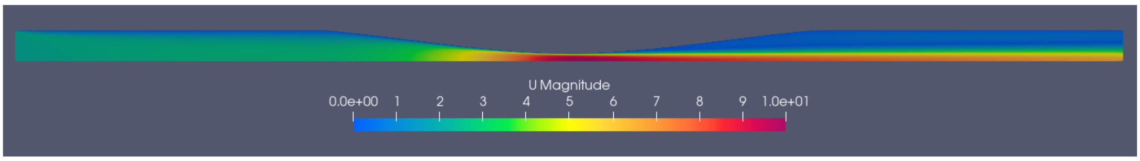

Figura 59 - Campo de Velocidade Rey = 200 caso n=0,75

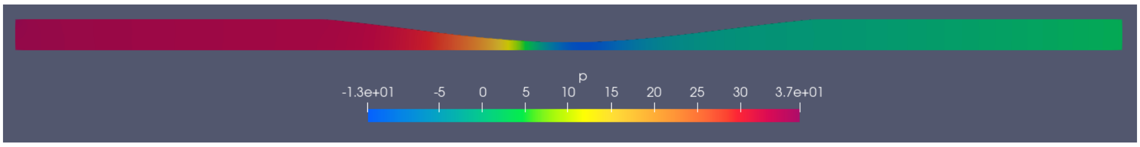

Figura 60 - Campo de pressão Rey = 200 caso n=0,75

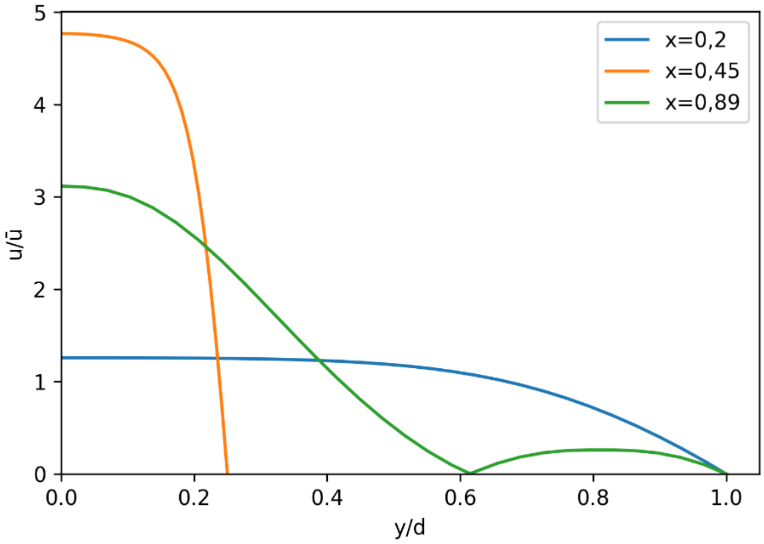

Figura 61 - Velocidade axial Rey = 200 caso n=0,75

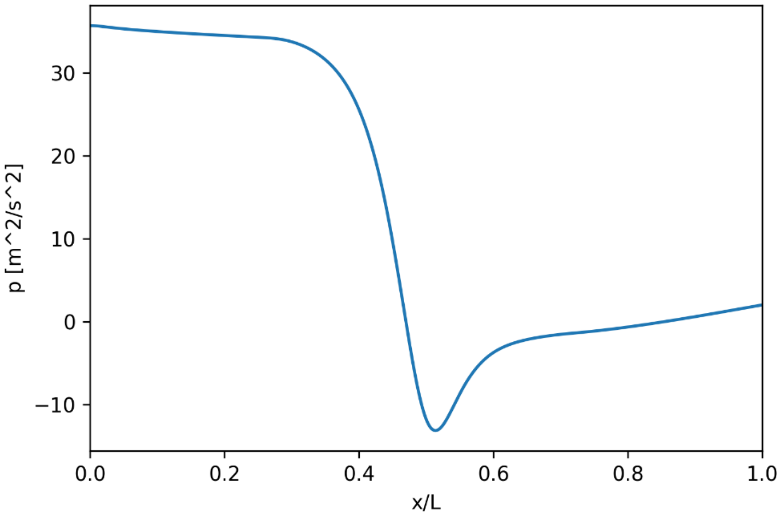

Figura 62 - Queda de pressão Rey = 200 caso n=0,75

6 Análise dos resultados

Para analisar melhor a influência de cada parâmetro no escoamento, e também a influência da geometria, foram feitos os seguintes gráficos comparando a queda de pressão adimensional na restrição, entre x=0,25 m e x=0,65 m, de cada caso com os seus respectivos fatores em função do Reynolds.

6.1. Distância mínima entre placas de 75% da distância máxima.

Na figura 63 é possível observar com o aumento do índice de consistência, k, aumentamos a queda de pressão adimensional, assim seguindo que um fluido mais viscoso tem um maior fator de atrito. Fazendo um comparativo entre todas as figuras desse capitulo podemos também perceber que dentre todos os parâmetros analisados, o que mais influenciou na queda de pressão foi o índice de potência, n, onde no seu aumento para 0,75 teve as maiores quedas, e na sua diminuição para 0,25 teve as menores quedas de pressão adimensional, este que só tivemos resultados para a geometria de 75% da distância máxima.

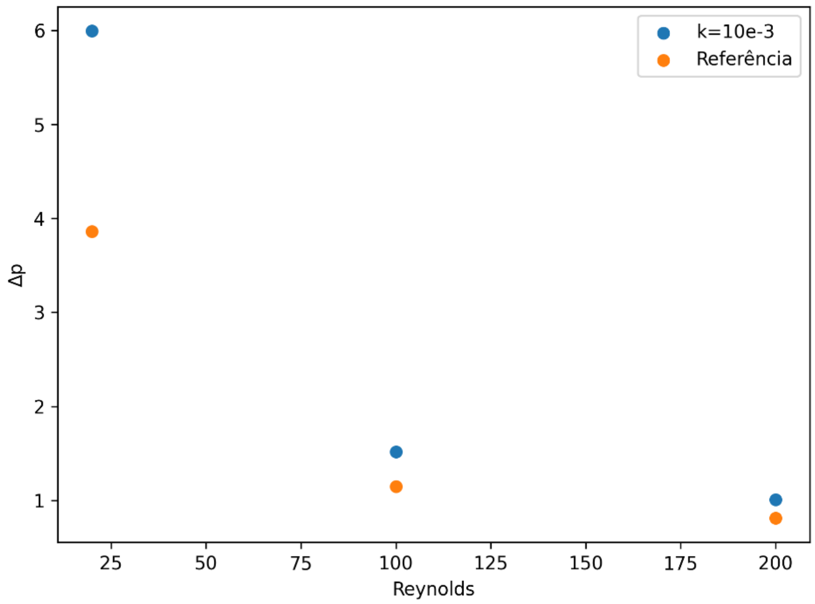

Figura 63 - Queda de pressão adimensional variando k

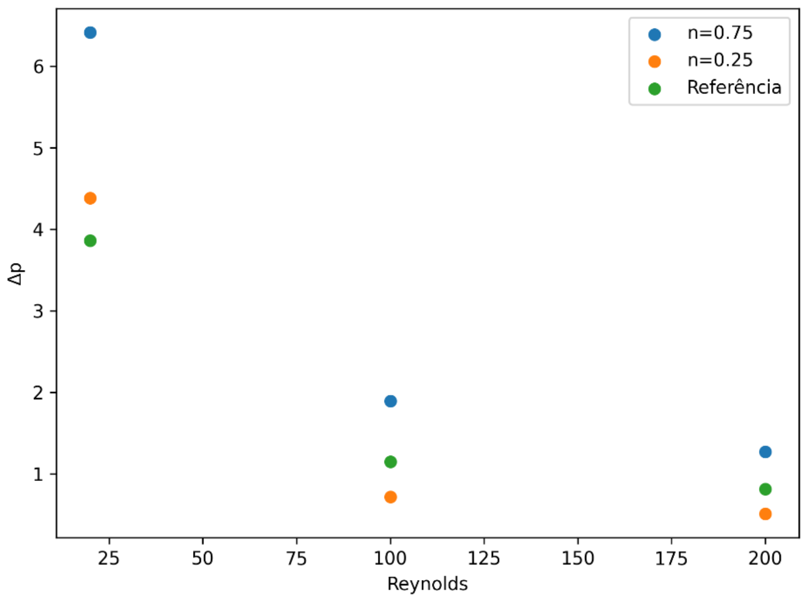

Figura 64 - Queda de pressão adimensional variando n

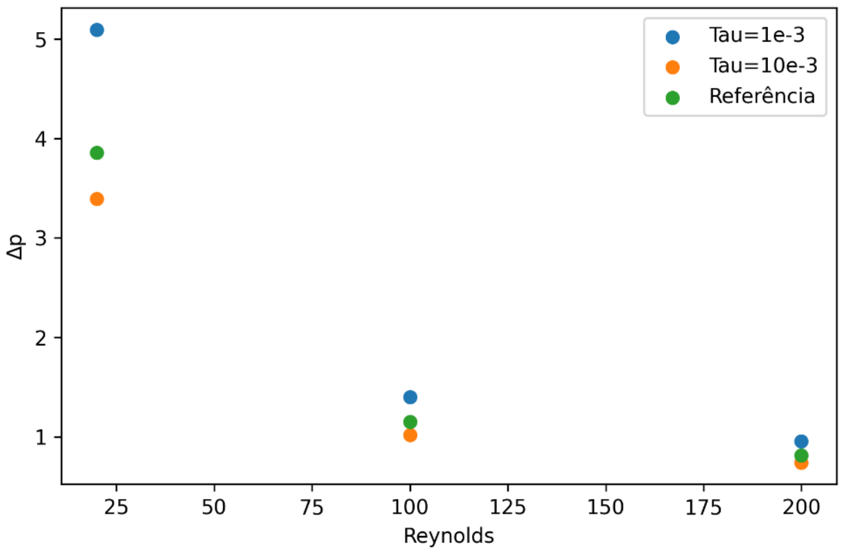

Figura 65 - Queda de pressão adimensional variando τ_0

6.2. Distância mínima entre placas de 50% da distância máxima.

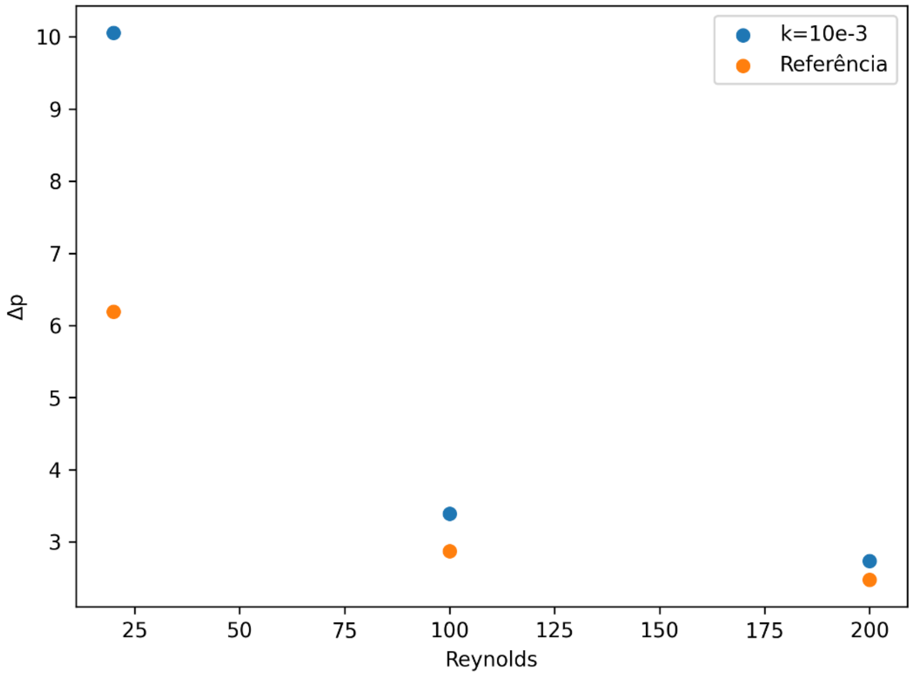

Figura 66 - Queda de pressão adimensional variando k

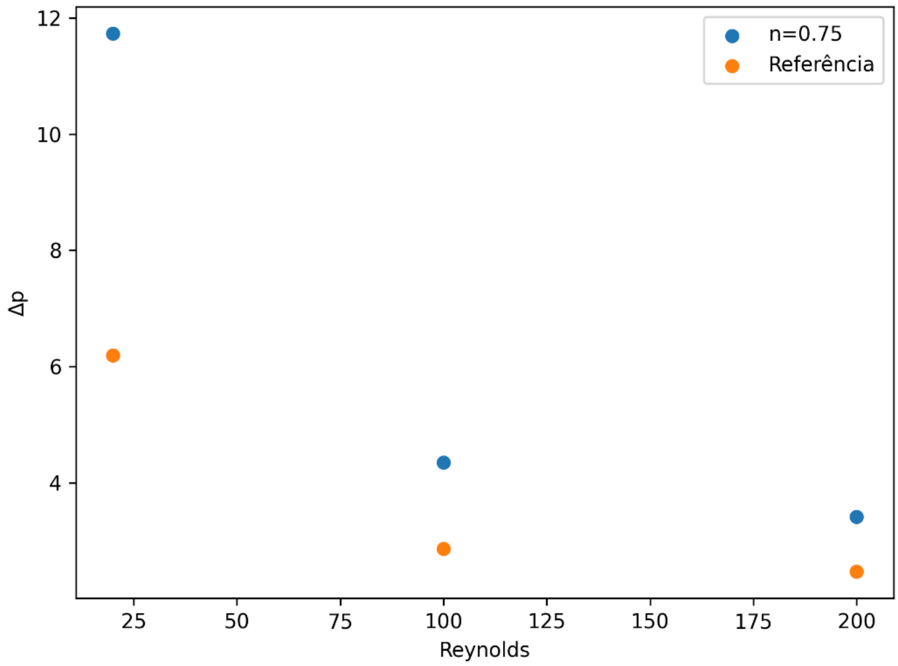

Figura 67 - Queda de pressão adimensional variando n

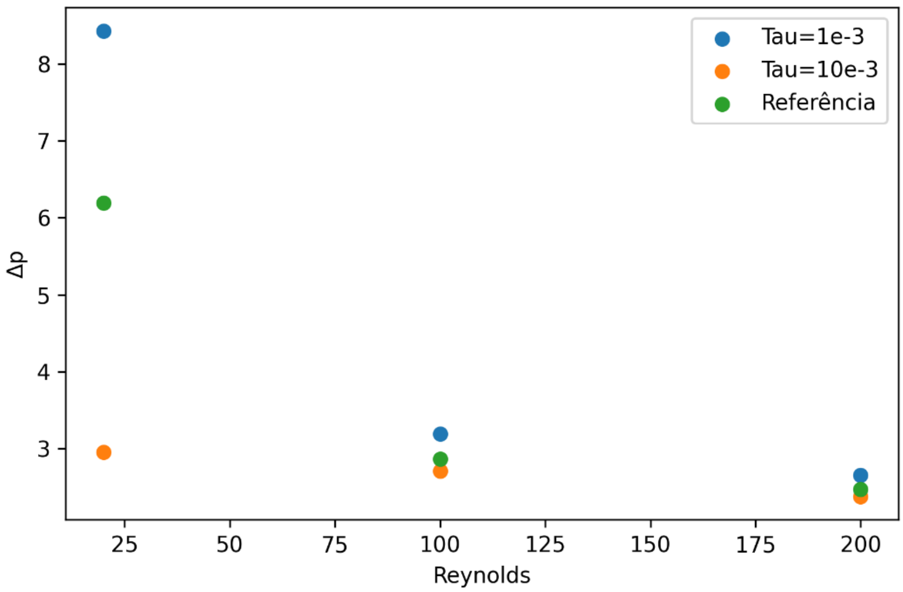

Figura 68 - Queda de pressão adimensional variando τ_0

6.3. Distância mínima entre placas de 25% da distância máxima.

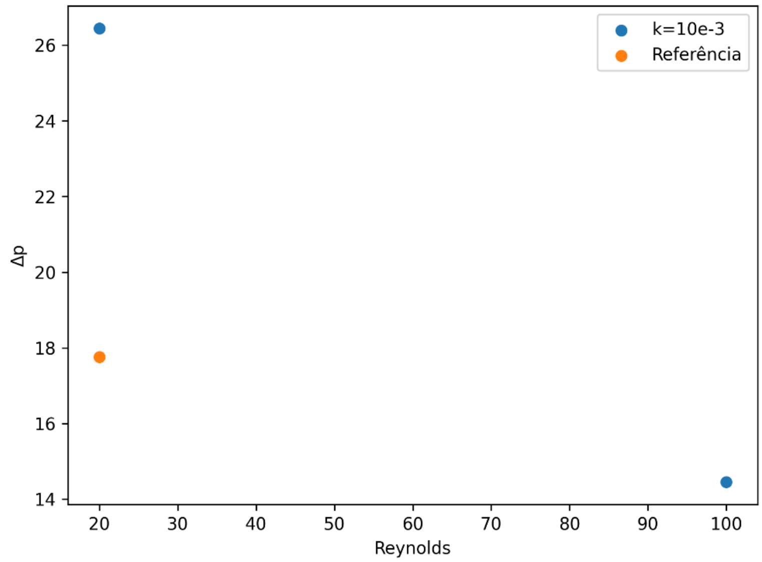

Figura 69 - Queda de pressão adimensional variando k

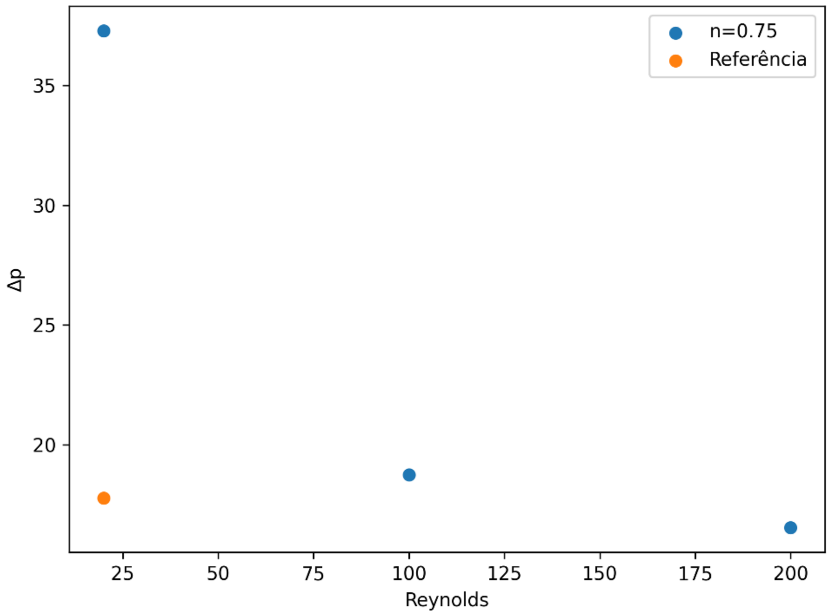

Figura 70 - Queda de pressão adimensional variando n

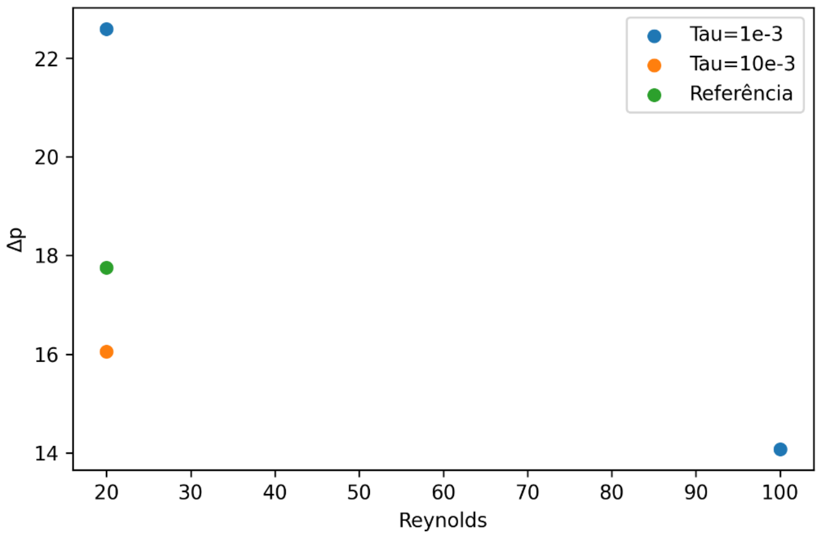

Figura 71 - Queda de pressão adimensional variando τ_0

6.4. Mantendo o parâmetro e variando a geometria

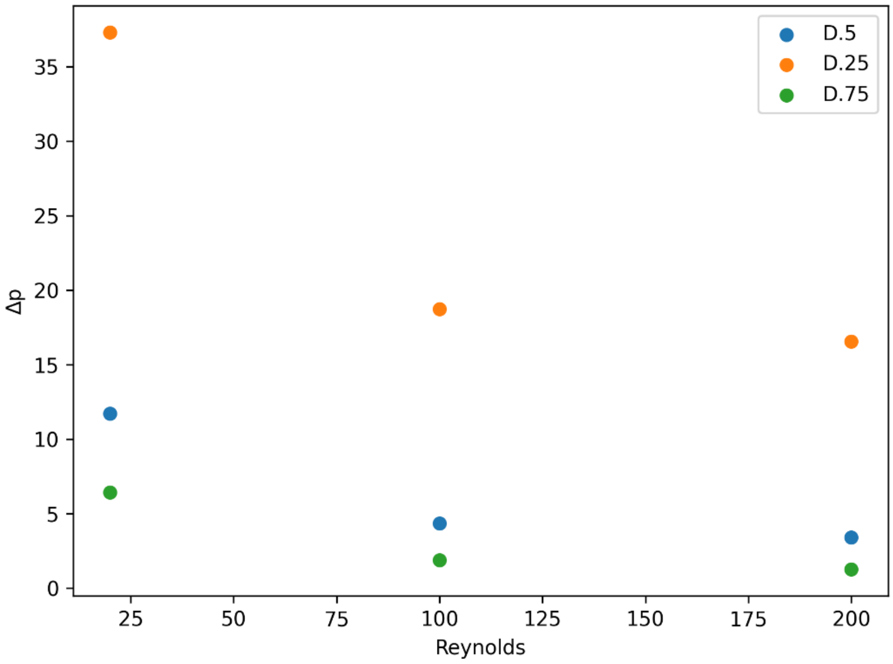

Figura 72 - Queda de pressão adimensional de n=0.75

Utilizando esses resultados foi possivel observar quais parametros ocasionaram uma maior queda de pressão adimensional, na ordem decrescente: n=0,75; k=10e-3; $\boldsymbol{\tau_0}$=1e-3 ; caso de referência; $\boldsymbol{\tau_0}$=10-3 e finalmente n=0,25.

Quando comparamos também a influencia da geometria foi possivel perceber que conforme a restriçao fica mais estreita, aumenta o queda de pressão, sendo assim o aumento de velocidade ocasionado pela restrição teve uma influencia relevante no resultado final do escoamento.

7 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo fazer uma análise paramétrica do escoamento de um fluido viscoplástico no interior de um canal com restrição. Foi investigado o efeito do número de Reynolds, da geometria e dos parâmetros do modelo de viscosidade de Herschel-Bulkley na queda de pressão ao longo do escoamento. O estudo foi feito a partir de simulações numéricas feitas no OpenFOAM utilizando o *solver* já implementado nele, nonNewtonianIcoFoam, com três geometrias diferentes geometrias, variando-se a restrição.

Através dos resultados obtidos foi possível observar, que o parâmetro que teve o maior aumento na queda de pressão adimensional foi índice de potência quando aumentado, e este mesmo parâmetro, quando diminuído também representou a menor queda de pressão. Em relação a geometria foi possível perceber que conforme a restrição fica mais estreita ela também aumenta o fator de atrito, aumentando a queda de pressão adimensional.

7.1. Trabalhos futuros

Esta última seção tem como objetivo propor possíveis melhorias e complementos ao presente trabalho. Algumas sugestões são:

Fazer a solução para mais geometrias com diferentes dimensões.

Fazer simulações com números de Reynolds mais elevados, para investigar o efeito da turbulência.

Aumentar a área de desenvolvimento no início do escoamento e também no final, dado que quando comparados perfis de velocidade axial, nem todos os casos de maior Reynolds apresentaram o mesmo perfil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AVDIS, A.; MOURADIAN, S. L. A Gmsh tutorial. **Imperial College London, Applied Modelling and Computation Group (AMCG)**, 2012.

DE SOUZA MENDES, Paulo R. et al. Flow of viscoplastic liquids through axisymmetric expansions–contractions. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 142, n. 1-3, p. 207-217, 2007.

FOX, Robert W.; McDONALD Alan T.; PRITCHARD, Philip J. Mecânica dos

fluidos. 6. ed, Rio de Janeiro: LTC, 2006.

GREENSHIELDS, Christopher J. OpenFOAM user guide Version 6. **The OpenFOAM Foundation**, 2018.

HAMEDI, Naser; BUSCH, Sandra. Non-Newtonian Models in OpenFOAM Implementation of a non-Newtonian model. 2014.

HAMMAD, Khaled J. Suddenly expanding recirculating and non-recirculating viscoplastic non-Newtonian flows. **Journal of Visualization**, v. 18, n. 4, p. 655-667, 2015.

JARAMILLO DIAZ, Julian David; CARDENAS BAÑOL, Hector Alonso. Numero de Reynolds. 2015.

KESSLER, Martin. Fluidodinâmica Computacional: O que é? ESSS. 2016. Disponível em: (https://www.esss.co/blog/fluidodinamica-computacional-o-quee/)

MITSOULIS, Evan; HUILGOL, R. R. Entry flows of Bingham plastics in expansions. Journal of non-newtonian fluid mechanics, v. 122, n. 1-3, p. 45-54, 2004.

NACCACHE, Mônica F.; BARBOSA, Rafael S. Creeping flow of viscoplastic materials through a planar expansion followed by a contraction. **Mechanics Research Communications**, v. 34, n. 5-6, p. 423-431, 2007.

ROUSTAEI, A.; FRIGAARD, I. A. The occurrence of fouling layers in the flow of a yield stress fluid along a wavy-walled channel. **Journal of Non-Newtonian fluid mechanics**, v. 198, p. 109-124, 2013.