



## SIMULAÇÃO DNS DE FLUIDO NÃO-NEWTONIANO EM CANAL RUGOSO

Mauricio de Oliveira Tourinho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Daniel Onofre de Almeida Cruz

Rio de Janeiro  
Outubro de 2019

# SIMULAÇÃO DNS DE FLUIDO NÃO-NEWTONIANO EM CANAL RUGOSO

Mauricio de Oliveira Tourinho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Examinada por:

---

Prof. Daniel Onofre de Almeida Cruz, D.Sc.

---

Prof. Hamidreza Anbarlooei, Ph.D.

---

Prof. Atila Pantaleão da Silva Freire, Ph.D.

---

Prof. Fábio Ramos, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

OUTUBRO DE 2019

Tourinho, Mauricio de Oliveira

Simulação DNS de Fluido Não-Newtoniano em Canal Rugoso/Mauricio de Oliveira Tourinho. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

X, 40 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Daniel Onofre de Almeida Cruz

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Mecânica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 37 – 39.

1. Fluido não-newtoniano. 2. DNS. 3. Escoamento turbulento. 4. canal rugoso. I. Cruz, Daniel Onofre de Almeida. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos que fizeram parte desse meu mestrado e direta ou indiretamente me ajudaram a chegar ao final. A minha família pelo suporte e apoio e em especial a minha noiva por me ajudar nos momentos difíceis para que no fim conseguisse concluir o mestrado. Gostaria de agradecer também ao meu orientador Daniel Onofre, pelo tempo e atenção e ao Hamidreza Anbarlooei por toda a ajuda e disponibilidade para dividir seus conhecimentos e me ajudar nessa trajetória.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## SIMULAÇÃO DNS DE FLUIDO NÃO-NEWTONIANO EM CANAL RUGOSO

Mauricio de Oliveira Tourinho

Outubro/2019

Orientador: Daniel Onofre de Almeida Cruz

Programa: Engenharia Mecânica

O comportamento de um fluido turbulento Não-Newtoniano em um canal rugoso é algo ainda pouco conhecido, porém muito importante de ser compreendido – visto que a maioria dos fluidos existentes são classificados como não-newtoniano. Neste trabalho, este fluido foi simulado em DNS (Simulação Numérica Direta, sigla em inglês) para power law para um  $Re_\tau = 395$ , sendo a rugosidade, de tipo "k", determinada por paralelepípedos espaçados igualmente ao longo do eixo "X". Foram simulados três fluidos com índices (n) 1, 0.75 e 0.5, um newtoniano e dois não-newtonianos (pseudoplásticos), os mesmos foram comparados aos obtidos nos artigos de ASHARAFIAN e MANHART (2004), MOSER e MANSOUR (1999) e ANBARLOOEI e FREIRE (2015), seguindo pré-determinada cronologia para que os resultados encontrados fossem apropriadamente validados, devido a não ter sido encontrado nenhuma publicação sobre tema. Os resultados apresentam coerência com os artigos usados para a comparação validando a simulação.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## DNS SIMULATION OF A NON-NEWTONIAN FLUID ON A ROUGH CHANNEL

Mauricio de Oliveira Tourinho

October/2019

Advisor: Daniel Onofre de Almeida Cruz

Department: Mechanical Engineering

The behavior of a turbulent non-newtonian fluid flow in a rough channel is something with a lot unknown yet but it is very important to be known — because most of the fluids are non-newtonian. On this paper, this behavior was simulated in DNS (Direct Numerical Simulation) for power law at a  $Re_\tau = 395$ , a roughness of type "k" stated by parallelepipeds equally spaced on "X". It was simulated for three fluids with indices ( $n$ ) 1, 0.75 and 0.5, a newtonian and two non-newtonian (pseudoplastic), respectively. It were compared to the results from ASHARAFIAN e MANHART (2004), MOSER e MANSOUR (1999) e ANBARLOOEI e FREIRE (2015) following a pre-stated chronology so the results found on the simulation would be properly validated, this precaution was done because it was not found any publication on this matter. After it was done the results apparently are in consistency with the articles, showing that the results seems correct.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>x</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	2
1.2 Organização do texto . . . . .	2
<b>2 Embasamento Teórico</b>	<b>4</b>
2.1 Características de Escoamento . . . . .	4
2.2 Análise Computacional de um Escoamento . . . . .	5
2.3 Fluido Não-Newtoniano . . . . .	7
2.4 Equações Governantes . . . . .	8
<b>3 Simulação</b>	<b>10</b>
3.1 Domínio, malha e condições de contorno . . . . .	10
3.2 Validação e Simulação . . . . .	13
<b>4 Pós-Processamento</b>	<b>19</b>
4.1 Cálculo da Flutuação da Turbulência . . . . .	19
4.2 Resultados . . . . .	20
<b>5 Conclusão</b>	<b>36</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>37</b>
<b>A Definições</b>	<b>40</b>

# Lista de Figuras

2.1	Taxa de Cisalhamento x Tensão de Cisalhamento. . . . .	7
3.1	Parte inferior do canal rugoso esquemático . . . . .	11
3.2	Malha próximo a rugosidade . . . . .	13
3.3	Velocidade ao longo do tempo (linhas pontilhadas em preto são os limites com a variação de 1% e as linhas pontilhadas azuis com variação de 0,5%. . . . .	15
3.4	Velocidade do escoamento do canal rugoso de fluidos newtoniano e não newtonianos . . . . .	17
3.5	Escoamento eixos XZ próximo a rugosidade ( $Y^+ = 15$ ). . . . .	17
3.6	Estruturas de turbilhões próximo a rugosidade no escoamento newtoniano ( $n=1$ ). . . . .	18
4.1	O gráfico mostra as velocidades ao longo do tempo e a média da velocidade. . . . .	20
4.2	Log Law - Escoamento de fluido newtoniano em canal liso, comparativo entre MOSER e MANSOUR (1999) (MKM 395) e ANBARLOOEI e FREIRE (2015) (Finer Grid) . . . . .	21
4.3	Flutuações Turbulentas e Reynold Stress - Escoamento em canal liso de um fluido newtoniano, comparativo entre MOSER e MANSOUR (1999) (MKM 395) e ANBARLOOEI e FREIRE (2015) (Finer Grid) . . . . .	22
4.4	Energia Cinética - escoamento de canal liso do fluido newtoniano, comparativo entre MOSER e MANSOUR (1999) (MKM 395) e ANBARLOOEI e FREIRE (2015) (Finer Grid) . . . . .	23
4.5	Log Law - Escoamento de fluido não-newtoniano em canal liso (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015) e um fluido newtoniano (MOSER e MANSOUR, 1999) (MKM 395) . . . . .	24
4.6	Flutuações Turbulentas e Reynold Stress - Escoamento em canal liso de fluido não-newtoniano (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015) ( $n=0.5$ - vermelho e $n=0.75$ - azul) e de um fluido newtoniano (MOSER e MANSOUR, 1999) (preto) . . . . .	25



4.7	Energia Cinética - escoamento de canal liso de fluido não-newtoniano (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015) e de um fluido newtoniano (MO-SER e MANSOUR, 1999) (MKM 395). . . . .	26
4.8	Log Law - Escoamento de um fluido newtoniano em canal rugoso (ASHARAFIAN e MANHART (2004) vermelho e simulados nesse trabalho em azul) e liso (preto) . . . . .	27
4.9	Flutuações Turbulentas e Reynold Stress - Escoamento em canal ru-goso (ASHARAFIAN e MANHART (2004) vermelho e simulados nesse trabalho em azul) e liso (preto) de um fluido newtoniano nor-malizado por $u_{\tau}^2$ . . . . .	28
4.10	Energia Cinética - Escoamento de canal rugoso (ASHARAFIAN e MANHART (2004) vermelho e simulados nesse trabalho em azul) e liso (preto) de fluido newtoniano normalizado por $u_{\tau}^2$ . . . . .	29
4.11	Log Law - Escoamento fluido não-newtoniano em canal rugoso e liso (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015) (n=0.75) e equação apresentada por RAMOS (2018) . . . . .	30
4.12	Flutuações Turbulentas e Reynold Stress - Escoamento em canal rugoso e liso (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015) de um fluido não-newtoniano com $n = 0,75$ normalizado por $u_{\tau}^2$ . . . . .	31
4.13	Log Law - Escoamento de fluido não-newtoniano em canal rugoso e liso (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015) (n=0.5)e equação apresentada por RAMOS (2018) . . . . .	32
4.14	Flutuações Turbulentas e Reynold Stress - Escoamento em canal rugoso e liso (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015) de um fluido não-newtoniano normalizado por $u_{\tau}^2$ . . . . .	33
4.15	Energia cinética - Escoamento de fluido não-newtoniano em canal rugoso e liso (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015) normalizado por $u_{\tau}^2$	34
4.16	Log Law - Comparação equação de Dodge e Metzner e da equação de RAMOS (2018) adicionando $\Delta U^+$ no resultado encontrado dos escoamentos de $n = 0.75$ liso (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015) e rugoso . . . . .	35

# Lista de Tabelas

3.1	Domínios referente a cada simulação . . . . .	11
3.2	Malha referente a cada simulação . . . . .	13

# Capítulo 1

## Introdução

O escoamento de fluidos turbulentos e as rugosidades estão presentes em todos os lugares e nas mais diversas aplicações. Cada material possui uma rugosidade específica e a maioria dos escoamentos encontrados na natureza e na indústria são do tipo turbulento. Isso gera a necessidade de entender a descrição do comportamento desses escoamentos para um melhor aproveitamentos de suas características. Estudos são feitos através de experimentos e Simulações Numéricas que se complementam, a Simulação Numérica Direta (DNS, sigla em inglês) é um tipo de simulação que melhor representa a realidade, podendo analisar turbilhões próximos as paredes e seus efeitos.

As fundações para o estudo de DNS se iniciaram em 1972 com simulações simples e com resoluções que hoje são consideradas inadequadas (MOIN e MAHESH, 1998), especialmente pela tecnologia deficitária disponível àquela época. Em 1987, o artigo KIM e MOSER (1987), foi pioneiro e propulsor para o estudo turbulento em Simulação Numérica Direta, simulando um escoamento turbulento em canal liso de fluido newtoniano com um  $Re_\tau = 180$ . A partir deste marco, surgiram vários estudos que evoluíram com o aumento da capacidade computacional e com as necessidades de se conhecer melhor o comportamento dos fluídos. A evolução tem sido constante desde então. É possível verificar que o número de Reynolds vem aumentando a cada estudo e que a análise do comportamento do fluido próximo a parede também vem evoluindo como visto em GAVRILAKIS (1992), EGGELS e NIEUWSTADT (1994), WAGNER (2001), e KHOURY (2013).

Com o aumento do uso de Simulação Numérica Direta, cresceu também o número de estudos de validação dos resultados obtidos. No artigo EGGELS e NIEUWSTADT (1994), e outros aqui citados, apresenta-se uma comparação entre uma simulação DNS e um estudo experimental e demonstrando que os resultados são coerentes entre si. Tais correlações levam a acreditar que as análises mais profundas do estudo DNS também podem ser consideradas corretas mesmo que não possam ser validadas em experimentos - devido a falta de mecanismo para executar

estes testes - como no caso de estudos próximos a parede.

Observa-se um gradativo aprofundamento no estudo do escoamento turbulento em canal rugoso de fluido newtoniano com o passar do tempo. Alguns artigos como IKEDA e DURBIN (2007), LEONARDI e ANTONIA (2003), LEE e KROGSTAD (2011), BURATTINI e ANTONIA (2008), e LEONARDI e CASTRO (2010) trouxeram novos estudos mostrando a diferença do escoamento em canal liso e rugoso e o comportamento do fluido próximo a rugosidade, o qual não é possível ser analisado em experimentos devido ao tamanho dos turbilhões e a capacidade dos equipamentos que existem atualmente.

O fluido newtoniano tem sido objeto preferencial dos estudos, como visto até aqui, porém o fluido mais comum na natureza e indústria é o fluido não-newtoniano. Essa aparente contradição se explica pela complexidade de controle e pelo alto custo computacional imposto em simulações deste tipo de fluido. E não é só na Simulação Numérica Direta que os fluidos não-newtonianos padecem de observação. Até mesmo nos estudos experimentais são encontrados menos publicações. Um dos artigos encontrados sobre o tema possui uma análise em DNS do escoamento de fluido não-newtoniano em canais lisos, ANBARLOOEI e FREIRE (2015). Ele traz uma análise de fluidos tipo lei de potência com índices ( $n = 0.5, 0.69, 0.75, 0.9, 1, 1.2$ ), onde foi observado que o fluido não-newtoniano possui algumas características diferentes do newtoniano, tais como: as flutuações turbulentas no eixo X aumentam comparado ao fluido newtoniano, enquanto que as flutuações turbulentas em Y e Z diminuem. Isso nos mostra que o fluido não-newtoniano possui muitas particularidades a serem estudadas e entendidas, para assim, melhorarmos a sua aplicação na engenharia. Além disso não foi encontrado qualquer estudo deste tipo em canal rugoso, o que mostra o quanto o assunto ainda é um campo a ser desbravado.

## 1.1 Motivação

A ausência de referências em escoamento de fluidos não-newtonianos em canais com rugosidade é uma oportunidade de explorar um campo ainda intocado e ser um marco para este tipo de análise assim como KIM e MOSER foi em 1987. Apresenta-se a oportunidade de gerar algumas teorias e trazer resultados simulados em DNS que comprovem ou não essas teorias. Esta foi a motivação encontrada e que será apresentada nesse trabalho.

## 1.2 Organização do texto

A dissertação aqui apresentada é constituída, além da introdução, por um embasamento teórico - no capítulo 2 - que apresenta um contexto geral sobre o fluido

não-newtoniano, sobre o escoamento e sobre as equações governantes utilizadas nesse trabalho. No capítulo 3, é apresentada a simulação DNS: os inputs utilizados, as validações realizadas para a garantia do escoamento desenvolvido e as primeiras observações feitas. No capítulo 4, está descrito o pós processamento: como foi feito o cálculo, os resultados obtidos, comparação dos mesmo com artigos e resultados já publicados, mostrando todo o processo de validação. Por fim, o que se extrai deste trabalho e os próximos passos a serem seguidos, na conclusão.

# Capítulo 2

## Embasamento Teórico

Neste capítulo será explicado alguns fundamentos básicos para o entendimento do trabalho realizado. Explicaremos brevemente as características de um escoamento, do fluido não-newtoniano e da análise computacional escolhida. O objetivo é contextualizar as escolhas e as análises feitas para a simulação. Também serão apresentadas as equações governantes deste estudo.

### 2.1 Características de Escoamento

O escoamento de um fluido possui algumas características que diferenciam o seu comportamento algumas delas são: se o escoamento é laminar ou turbulento, se é compressível ou incompressível, se é externo ou interno, e se o fluido é Newtoniano ou não newtoniano. Abaixo, uma descrição de algumas características que o fluido possui.

- Laminar ou Turbulento - O escoamento Turbulento é um fenômeno no qual o fluido se mistura durante o processo de forma aleatória nas três direções. O Laminar é um escoamento que ocorre por laminas, as partículas fluídas seguem em camadas lisas paralelas. (FOX e PRITCHARD, 2006).
- Compressível ou Incompressível - Se for possível desprezar a variação da massa específica de um escoamento, este é um escoamento Incompressível. Caso haja variação da massa específica no decorrer do escoamento devido a pressão, este é Compressível (FOX e PRITCHARD, 2006).
- Externo ou Interno - O escoamento envolvido por partes sólidas durante caminho percorrido é chamado de Interno. Se houver contato do fluido com o ambiente externo, o escoamento é Externo (FOX e PRITCHARD, 2006).
- Fluido Newtoniano ou Não-Newtoniano - A diferença está na proporcionalidade da taxa de deformação com a taxa de cisalhamento. No fluido Newto-

niano a taxa de deformação e de cisalhamento são diretamente proporcionais, enquanto que no fluido Não-Newtoniano elas não são (FOX e PRITCHARD, 2006).

Para fazer uma análise de escoamento é importante identificar as características que estão presentes nele. Cada uma irá se referir a uma abordagem e investigação diferente. Em um estudo computacional é ainda mais importante esta observação, pois um *input* incorreto gera um *output* totalmente indesejado invalidando todo o estudo.

Para a pesquisa aqui realizada algumas características do sistema determinadas foram de um canal rugoso fechado (interno), de um fluido não-newtoniano e incompressível e o tipo de escoamento foi o escoamento turbulento. Conhecendo as características da simulação, é necessário identificar o melhor método computacional para o estudo aqui realizado.

## 2.2 Análise Computacional de um Escoamento

Como visto na seção anterior, a análise Computacional trazida aqui é para um escoamento turbulento, objeto desta dissertação. Para esse estudo existem 3 principais modelos de simulação que podem ser utilizados, são eles: Simulação Numérica Direta (DNS), Large Eddy Simulation (LES) e Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS). Abaixo, as especificações de cada um.

- DNS - consiste da resolução da equação de Navier-Stokes em todas as escalas de turbulência, com as condições iniciais e de contorno apropriadas para o escoamento considerado (WHITE, 2006).
- LES - consiste em computar as energias de escalas maiores em quanto modela a influência das escalas menores. (MOIN e MAHESH, 1998)
- RANS - consiste em calcular de forma estatística em um ponto, momentos como velocidade média e energia cinética turbulenta (MOIN e MAHESH, 1998).

Os métodos de simulações acima são alguns tipos de simulações numéricas, que consiste na resolução de equações diferenciais, e em alguns casos equações algébricas, com a especificação de condições iniciais e de contorno determinadas (POPE, 2000). Com esse conceito foi desenvolvido alguns modelos, como os apresentados acima, para que facilitasse o estudo do escoamento de fluidos.

A escolha do modelo deve se basear no que irá ser estudado e o custo computacional necessário para que se chegue ao resultado. Neste trabalho foi decidido

utilizar o DNS, pois seu cálculo é feito utilizando a equação de Navier-Stokes até a escala de dissipação viscosa (KURIEN e TAYLOR, 2005) sem aproximações - o que permite estudar e analisar perturbações, velocidades, entre outras variáveis do escoamento. Esse conjunto de resultados não pode ser extraído nas simulações LES e RANS e alguns parâmetros sequer podem ser obtidos através de medição experimental (SILVA FREIRE *et al.*, 2006).

Após a escolha da simulação em DNS é necessário identificar o métodos de simulação que será utilizado. Existem alguns métodos, como os de volumes finitos e método espectral. Cada método tem suas vantagens e desvantagens e suas devidas aplicações. Abaixo, os detalhes de cada um deles:

- Volumes finitos - esse método possui uma maior flexibilidade geométrica e um menor custo computacional (CAPUANO *et al.*, 2018).
- Método espectral - é um método que utiliza Fourier com espaço de tempo pequenos para Navier-Stokes (POPE, 2000). Possui uma melhor resolução, porém um alto custo computacional e pouca flexibilidade geométrica.
- Método do elemento espectral - é um método que combina elementos finitos e o espectral. Utilizando da flexibilidade geométrica do elementos finitos e da alta resolução do espectral (CAPUANO *et al.*, 2018).

O método espectral apesar de ter uma melhor resolução, não se adequaria a este trabalho devido a pouca flexibilidade geométrica; já que trabalharemos com rugosidade, o método não conseguiria realizar nenhum calculo próximo a parede inviabilizando a utilização deste para o estudo realizado. No método do elemento espectral a malha é dividida em conjuntos que não se sobrepõem umas com as outras e os cálculos são realizados em cada conjunto separadamente. Para o trabalho aqui apresentando a rugosidade precisaria ter o tamanho desse conjunto de malhas; como a rugosidade é menor do que o conjunto de malhas este método torna-se inadequado devido não ser possível realizar os cálculos no conjunto onde existir a rugosidade. Por se adequar melhor a necessidade da simulação, foi escolhido o método de volume finito, que consiste em calcular a integral no tempo em segunda ordem pelo método de Crank-Nicolson (CAPUANO *et al.*, 2018), garantindo assim a melhor resolução para a simulação realizada.

Além de determinar o método é importante identificar dentro do Volumes Finitos qual a metodologia de conversão será utilizada. Para este trabalho foi utilizado a metodologia SIMPLE. O SIMPLE consiste no calculo das componentes a partir de uma pressão determinada, e através do calculo de momento é calculada as componentes da velocidade e ajustada até a convergência. O método consiste em corrigir o input inicial de Pressão para que as componentes da velocidade convirjam com



o tempo (VERSTEEG, 2007), como na simulação aqui apresentada o gradiente de pressão é constante a correção é realizada para que a perda de pressão ao longo do canal seja corrigido.

Definido todo o modelo de simulação a ser usado, vamos nos aprofundar agora no fluido a ser estudado, o não-newtoniano.

## 2.3 Fluido Não-Newtoniano

Fluidos não-newtonianos são fluidos facilmente encontrados no dia-a-dia: pasta de dente, sangue, clara de ovo, amido de milho (quando misturado a água), chocolate - entre outros. Comparando um desses fluidos, como por exemplo pasta de dente, com um fluido newtoniano, como a água, se nota diferenças visuais em seus comportamentos de escoamento. Enquanto a água escoo facilmente a pasta de dente necessita de uma força aplicada para que deixe um estado "sólido" para o estado líquido.

A diferença de comportamento citada se dá principalmente devido a viscosidade, que no fluido newtoniano é constante, e no não-newtoniano não pode ser definida. Devido a esse comportamento da viscosidade a relação entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento dos fluidos são diferentes no fluido newtoniano essa relação é linear e nos não-newtonianos, além de não ser linear, ainda pode ser dependente do tempo (NGUYEN e NGUYEN, 2012), como visto na figura 3.1.

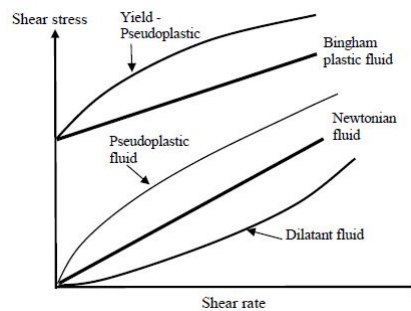


Figura 2.1: Taxa de Cisalhamento x Tensão de Cisalhamento.

Fonte: NGUYEN e NGUYEN (2012)

O fluido não-newtoniano puramente viscoso é subdividido em vários tipos, alguns desses tipos são os pseudoplástico, dilatante e viscoplástico. O tipo pseudoplástico é caracterizado por uma viscosidade aparente que diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. O tipo dilatante é parecido com o pseudoplástico, mas sua viscosidade aparente aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento.

O fluido viscoplástico possui uma tensão de escoamento que determina seu comportamento, caso a tensão aplicada seja menor que a tensão de escoamento o fluido

se deforma elasticamente ou flui como um corpo rígido, porém se a tensão aplicada for maior que a tensão de escoamento o fluido pode escoar linearmente ou não, se comportando assim apenas após atingir a tensão de cisalhamento inicial (NGUYEN e NGUYEN, 2012).

Para descrever a relação entre a tensão e taxa de cisalhamento do fluido não-newtoniano existem vários modelos de simulação, como power-law, Bingham e Herschel-Bulkley. A escolha de qual deles utilizar varia de acordo com o tipo de fluido desejado e suas características. Neste trabalho, analisaremos os fluidos não-newtonianos pseudoplásticos e utilizaremos o modelo de power-law .

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2.1)$$

Onde,  $K$  é um coeficiente de consistência do fluido e  $n$  é o índice do comportamento do fluido, sendo esse índice indicativo do tipo de fluido,  $n < 1$  - o fluido é pseudoplástico,  $n = 1$  - o fluido é newtoniano, e  $n > 1$  - o fluido é dilatante.

O power-law é uma modelagem mais simples dentre as comentadas anteriormente, porém satisfaz a simulação realizada neste trabalho, além de ter um custo computacional menor, o que viabiliza o estudo.

Para se encontrar a viscosidade aparente de um fluido através do power-law basta calcular a equação 2.2

$$\mu = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.2)$$

Substituindo na equação 2.1.

$$\tau = (K\dot{\gamma}^{n-1})\dot{\gamma} \quad (2.3)$$

$\dot{\gamma}$  é um tensor, porém quando determina a viscosidade ( $\mu$ ) ele é normalizado.

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2S : S} \quad (2.4)$$

Onde  $S$  é

$$S = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.5)$$

## 2.4 Equações Governantes

Essa simulação consiste no cálculo da Velocidade ( $u, v, w$ ) e da Pressão  $p$  em todos os pontos do sistema. Foram utilizadas as equações de Navier-Stokes, continuidade e power-law (como visto anteriormente), para que possamos verificar o comportamento do escoamento analisado.

A equação da continuidade, ou conservação da massa, é o somatório da taxa líquida de fluxo de massa para fora da superfície de controle com a taxa de variação de massa dentro do volume de controle. Esse somatório é igual a zero, já que a massa se conserva dentro do volume de controle (FOX e PRITCHARD, 2006).

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.6)$$

Como o fluido é incompressível no estudo  $\rho$  é constante, logo a equação pode ser reduzido à:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.7)$$

A outra equação utilizada, de Navier-Stokes ou conservação do momento, ela está relacionada a segunda lei de Newton (WHITE, 2006).

$$F = ma$$

Transformando a equação para um sistema de partículas fluidas (WHITE, 2006).

$$\rho \frac{DV}{Dt} = f_{corpo} + f_{superficie}$$

Não há  $f_{corpo}$  geradas no escoamento em questão, logo, podemos assumir que  $f_{corpo}$  é igual a zero. Isso ocorre devido a  $f_{corpo}$  ser uma força conservativa que neste caso seria a força gravitacional atuante no fluido. Na análise aqui feita não há mudança de altura no escoamento do fluido e nem a altura do canal influenciará no escoamento. Substituindo  $f_{superficie}$  e fazendo as devidas análises, obteremos:

$$\begin{aligned} \rho \frac{DV}{Dt} &= -\nabla P + \nabla \tau \\ \frac{\partial u}{\partial t} u \cdot \nabla u &= -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \nabla \tau \end{aligned} \quad (2.8)$$

Onde,  $\tau$  é a tensão de cisalhamento e para se calcular a mesma utilizaremos a equação 2.3 de power-law na sua forma tensorial, para os fluidos simulados neste trabalho.

# Capítulo 3

## Simulação

Após determinar os métodos computacionais utilizados, foi necessário determinar o software que melhor se adequaria a simulação, apresentando resultados coerentes e com a melhor resolução possível. Foi utilizado o OpenFoam, que utiliza o método de volume finitos de segunda ordem. O OpenFoam é um software aberto, o que possibilita que ajustes sejam feitos de acordo com cada simulação. Isso facilita a adequação do software às especificidades da análise aqui proposta.

Para começarmos com as simulações é necessário determinar o Domínio, a malha e as condições de contorno do sistema.

### 3.1 Domínio, malha e condições de contorno

Para que a simulação ocorra são necessários inputs - como o domínio do sistema analisado, a malha do sistema e as condições de contorno.

O domínio para a simulação é de  $6,256h \times 2h \times \pi h$  (nas direções X, Y e Z, respectivamente), esse domínio é próximo ao utilizado em ASHARAFIAN e MANHART (2004). Foram utilizados  $h$  igual a 1 para o fluido newtoniano e 0,0525 para os fluidos não-newtoniano. Essa alteração das dimensões foi feita levando em consideração o tempo de processamento obtido no fluido newtoniano, considerado muito longo. Assim, para otimizar o processamento da simulação do fluido não-newtoniano, reduziu-se as proporções (mantendo o sistema igual apenas com uma redução das dimensões), assim seria garantido que os resultados poderiam ser comparados entre si.

Para a definição das rugosidades, dentre vários padrões que podem ser determinado, foi estudado dois padrões específicos e escolhido o que melhor se encaixava no estudo os padrões analisados foram: A rugosidade grão de areia, ou tipo "k", e a rugosidade tipo "d". A tipo "k" é caracterizada por turbilhões com a mesma escala da rugosidade, formados atrás da mesma. A do tipo "d", possui o espaço entre os

elementos da mesma ordem da rugosidade. Seus turbilhões são estáveis entre os elementos rugosos (IKEDA e DURBIN, 2007).

Baseando-se nos artigos MOSER e MANSOUR (1999) e ASHARAFIAN e MANHART (2004) optou-se por utilizar a rugosidade tipo "k" neste estudo. O sistema construído possui 23 rugosidades, em formato de paralelepípedo, espaçadas uniformemente no eixo x. Cada um desses paralelepípedos possui dimensões de  $0,037h \times 0,034h \times \pi h$  (nas direções X, Y e Z). O espaçamento deles corresponde a 8 vezes a altura da rugosidade ( $0,034h$ ).

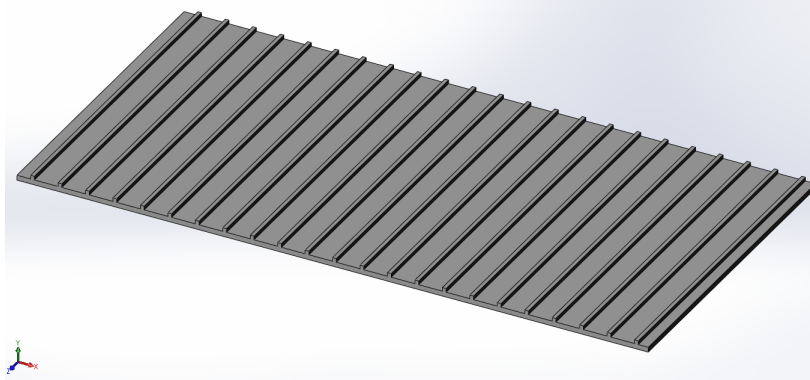


Figura 3.1: Parte inferior do canal rugoso esquemático  
Fonte: Autoria própria

	$L_x \cdot h$	$L_y \cdot h$	$L_z \cdot h$	$h$
Moin (1999)	$2\pi h$	$2 h$	$\pi h$	1
Ashrafian (2004)	$6,528 h$	$2 h$	$\pi h$	1
Anbarlooei (2018)	$2\pi h$	$2 h$	$\pi h$	1
Simulação Newtoniano	$6,256 h$	$2 h$	$\pi h$	1
Simulação Não-Newtoniano	$6,256 h$	$2 h$	$\pi h$	0,0525

Tabela 3.1: Domínios referente a cada simulação  
Fonte: Autoria própria

Com o domínio definido, é necessário a divisão do mesmo em pequenas partes para que Navier-Stokes seja calculado em todas as suas escalas. Porém para se realizar essa divisão é importante introduzir as Teoria de Kolmogorov e de Cascata de Energia, que são importantes para que seja possível atingir todas as escalas de turbilhões no DNS e que irão determinar o tamanho da malha.

A teoria da cascata de energia é que a energia cinética entra na turbulência em grandes escalas e vai se dissipando em escalas menores, até chegar a menor escala onde é dissipada pela ação da viscosidade POPE (2000). Ainda através de POPE (2000) Kolmogorov adicionou escalas menores a turbulência e as quantificou.

Com isso, foi possível Kolmogorov pode determinar a escala dissipativa e identificar o tamanho mínimo de um turbilhão, onde após se alcançar tal dimensão o mesmo é dissipado pelos efeitos viscosos.

Explicado por SILVA FREIRE *et al.* (2006) “o conceito de escalas de dissipação viscosa de Kolmogorov, toma-se um turbilhão de tamanhos característico  $r$  com uma velocidade característica  $v_r$  originária em um fluido de viscosidade  $\nu$ ”. Logo, Reynolds local é,

$$Re_r = \frac{v_r r}{\nu} \quad (3.1)$$

Admitindo-se que  $r$  está numa zona do espectro, na qual, a teoria de Kolmogorov diz que  $v_r = (r)^{1/3}$ . Substituindo na equação de Reynolds local,  $Re_r = (r^4)^{1/3}/\nu$ . Considerando que para a escala  $r$  os efeitos viscosos são pequenos, sabemos que  $Re_r > 1$ . Caso  $r$  diminua  $Re_r$  também diminuirá, e se  $r < l_d$ , onde  $l_d$  é a escala dissipativa de Kolmogorov,

$$l_d = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.2)$$

logo,  $Re_r$  será menor que 1, tornando-se assim os efeitos viscosos dominantes sobre os de inércia (SILVA FREIRE *et al.*, 2006). Onde,  $\nu$  é a viscosidade do fluido e  $\epsilon$  é a dissipação viscosa.

Turbilhões que são menores que  $l_d$  são dissipados pelos efeitos viscosos e não se desenvolvem.

As malhas do sistema foram feita de acordo com a escala dissipativa de Kolmogorov e a teoria da Cascata de Energia, que indica a redução do tamanho do turbilhão até dissipação do mesmo pelos efeitos viscosos.

Sabendo disso, a malha gerada para o canal rugoso possui um tamanho padrão nos eixos X e Z - que correspondem a escala de Kolmogorov. No eixo Y, essa escala é mantida até que se atinga o correspondente a 3 vezes a altura da rugosidade. A partir deste ponto, o tamanho da malha começa aumentar gradativamente em direção centro do canal, como mostrado na figura 3.2.

	Nx	Ny	Nz
Moin (1999)	256	193	192
Ashrafian (2004)	256	160	160
Anbarlooei (2018)	256	192	192
Simulação Newtoniano	296	192	192
Simulação Não-Newtoniano	296	192	192

Tabela 3.2: Malha referente a cada simulação  
Fonte: A autoria própria

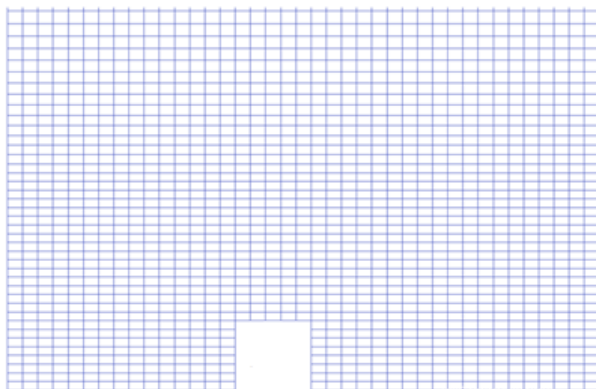


Figura 3.2: Malha próximo a rugosidade  
Fonte: A autoria própria

Com os inputs de domínio do sistema e a malha definidos, chega-se ao último aspecto necessário: as condições de contorno. Na simulação realizada foi determinado um gradiente de pressão constante, que varia de acordo com o fluido simulado, e que garante um  $Re_\tau$  de 395 para todas as simulações, tornando possível o comparativo entre os fluidos. Determinou-se ainda que a velocidade do fluido na parede seja igual a zero.

Após todas as premissas determinadas foi possível iniciar a simulação.

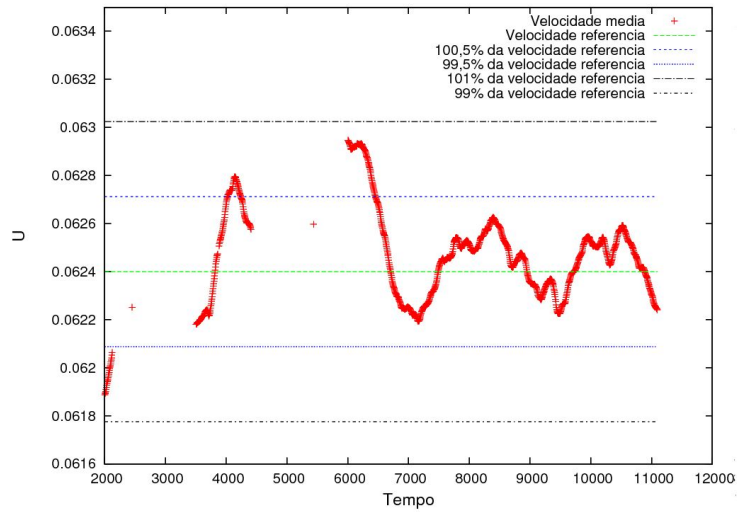
## 3.2 Validação e Simulação

Para garantir todos os resultados apresentados foi necessário garantir que o escoamento está completamente desenvolvido. O artigo de ASHARAFIAN e MANHART (2004) foi muito importante, pois com ele foi possível comparar o resultado obtido na simulação do Fluido Newtoniano em Canal Rugoso e identificado que os resultados não estavam corretos. Após inúmeras análises e correções nos códigos de cálculo da velocidade (será apresentado na seção 4.1) foi identificado que a simulação não havia se desenvolvido completamente.

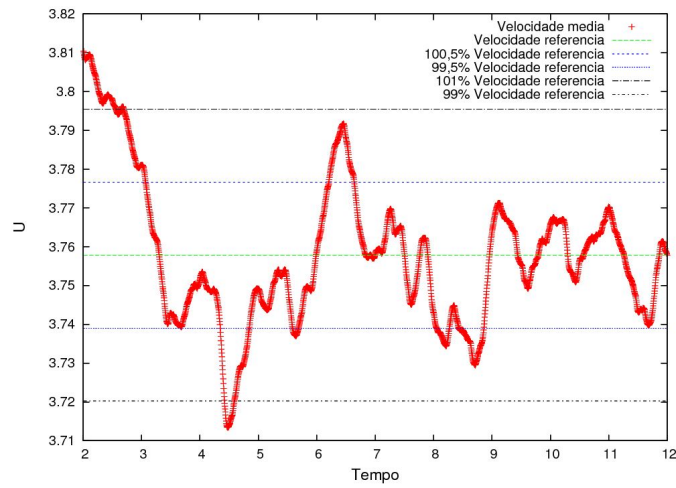
A partir desse momento foi realizado um monitoramento da velocidade do escoamento.

mento ao longo do tempo foi determinado que a variação não poderia ser maior que 1% por um período de tempo determinado, o que demonstraria uma instabilidade, ou que o comportamento do fluido se repetisse com o tempo. Foi estimado um tempo necessário para que se tivesse mais de 100 ciclos no domínio (se o experimento fosse realizado seria uma distância necessária para garantir o desenvolvimento), com isso seria possível analisar os comportamentos ao longo do tempo e então definir se o escoamento estava desenvolvido ou não.

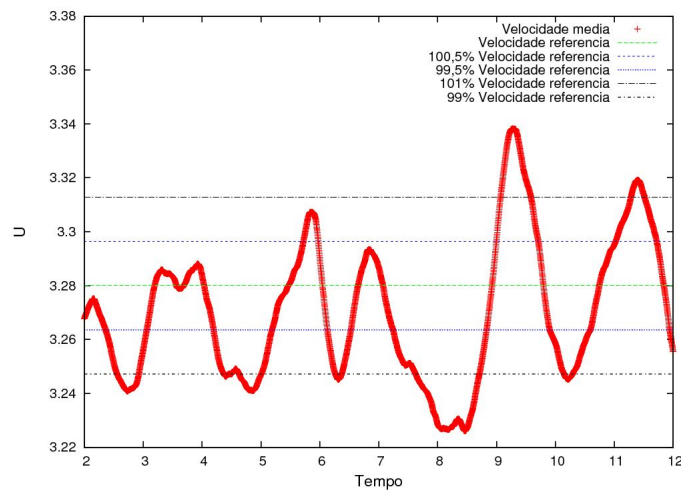




(a)  $n = 1$



(b)  $n = 0.75$



(c)  $n = 0.5$

Figura 3.3: Velocidade ao longo do tempo (linhas pontilhadas em preto são os limites com a variação de 1% e as linhas pontilhadas azuis com variação de 0,5%).

Fonte: autoria própria

Como visto na figura 3.3 os fluidos com índices 1 e 0.75 aparentam estar com o escoamento desenvolvido, devido terem se mantido dentro do limite determinado por um período de tempo até o fim dos 100 ciclos, enquanto que o índice 0.5 aparenta não está desenvolvido ainda, para garantir que o sistema está desenvolvido é necessário continuar com a simulação por mais tempo e verificar o comportamento da velocidade, se ela se comporta da mesma maneira ou se estabiliza como as dos outros índices aqui apresentados podemos garantir que o escoamento está desenvolvido para este fluido.

O fluido 0.5 pode não ter se desenvolvido, devido ao curto período de tempo analisado para o mesmo. Como o fluido utilizado para determinar esses parâmetros foi o Newtoniano e como já foi visto anteriormente o comportamento dos dois fluidos são muito diferentes principalmente com a taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento, o fluido Não Newtoniano necessita de mais tempo para se desenvolver, pois a tensão de cisalhamento no pseudoplástico é maior do que no Newtoniano para a mesma taxa de cisalhamento.

Outra validação que deve ser feita com todos os fluidos é a checagem de independência da malha. Para isso é necessário reduzir o tamanho da malha em 2 vezes ou mais, e fazer a validação da velocidade novamente. Assim, é possível garantir que o resultado obtido está correto. Essa análise não foi realizada devido ao tempo necessário para esta simulação. Na simulação normal foram gastos 6 meses de simulação para garantir os resultados aqui apresentados, já para essa checagem de independência estima-se que seriam gastos, ao menos, o dobro deste tempo.

Após validar que o escoamento está desenvolvido, com o monitoramento da velocidade ao longo do tempo, pode-se visualizar o comportamento do fluido no canal rugoso. Na figura 3.4 nota-se o escoamento dos 3 fluidos aqui simulados para canais rugosos. Percebe-se que o canal rugoso apresenta uma variação na velocidade ao longo do escoamento próximo a parede (a cor azul é mais próximo da velocidade zero e o vermelho mais escuro representa a máxima velocidade do escoamento, cada escoamento possui uma escala de velocidade diferente). A rugosidade faz com que a velocidade do escoamento diminua próximo a parede, e a velocidade do canal aparenta aumentar com a diminuição do índice ( $n$ ). Como pode ser visto nas análises de resultados, com a suspeita que o canal de índice 0.5 ainda não está totalmente desenvolvido, o escoamento não apresenta uma velocidade maior do que o índice 0.75.

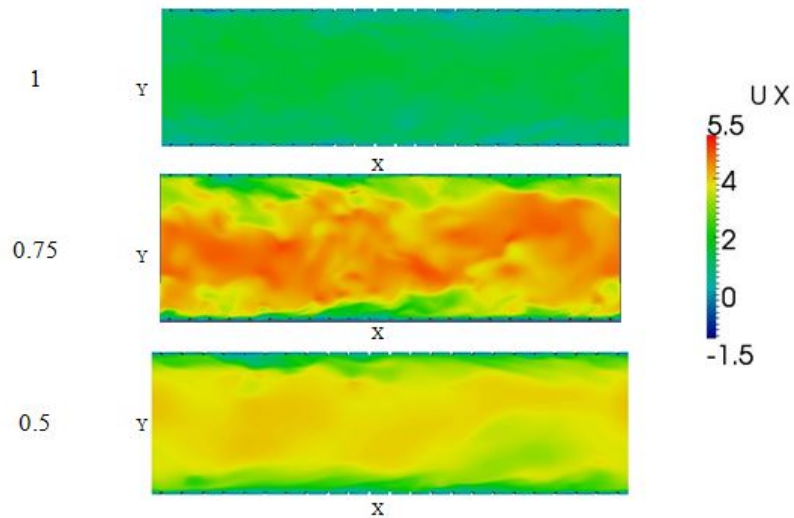


Figura 3.4: Velocidade do escoamento do canal rugoso de fluidos newtoniano e não newtonianos

Fonte: autoria própria

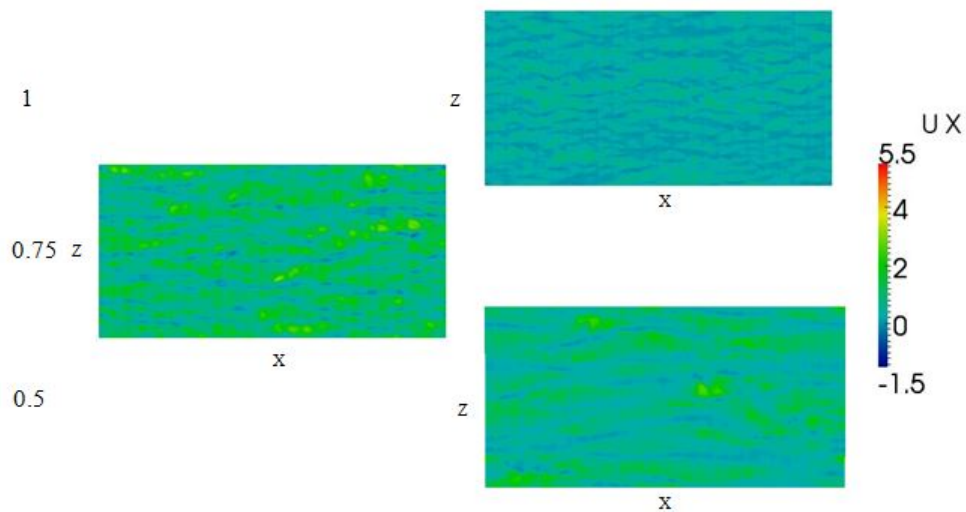


Figura 3.5: Escoamento eixos XZ próximo a rugosidade ( $Y^+ = 15$ ).

Fonte: autoria própria

Ao realizar um corte próximo a rugosidade é possível perceber as flutuações da velocidade geradas pela rugosidade na direção streamwise. As partes azul escuro correspondem aos locais onde a velocidade é próximo a zero ou há turbilhões. Se compararmos as figura 3.6 de índice 1 e a figura 3.5 para o mesmo fluido é possível perceber que a rugosidade interrompe as estruturas geradas. Essas estruturas, na figura 3.6, são de vórtices e mostram o comportamento do mesmo próximo a rugosidade.

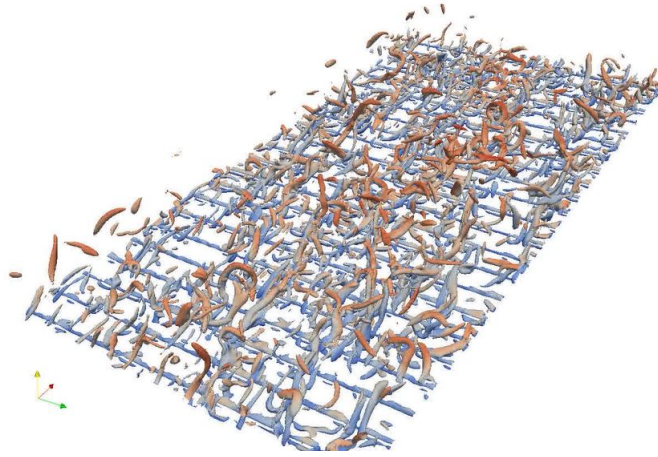


Figura 3.6: Estruturas de turbilhões próximo a rugosidade no escoamento newtoniano ( $n=1$ ).

Fonte: autoria própria

Com as simulações finalizadas inicia-se a análise de pós-processamento, onde valida-se os resultados obtidos com alguns resultados já publicados. Nas análises feitas até aqui, percebe-se que as simulações dos fluidos de índices 1 e 0.75 estão desenvolvidas, enquanto que para o fluido de índice 0.5, ainda há a necessidade de verificar o comportamento por mais tempo de simulação.

Quanto aos resultados obtidos nas simulações, até este ponto, não houve manuseio desses dados. Eles serão o tema no capítulo a seguir.

# Capítulo 4

## Pós-Processamento

O pós-processamento é o momento onde calcula-se a velocidade média e as flutuações turbulentas do sistema, sendo possível comparar os resultados obtidos com as simulações e estudos já publicados.

### 4.1 Cálculo da Flutuação da Turbulência

Como pode ser notado na equação 2.8 é calculada a velocidade,  $u$ , em todas as suas componentes e a pressão,  $p$ . Porém na turbulência é importante se ter a média da velocidade, ( $\bar{u}$ , e pressão,  $\bar{p}$ ), além de suas flutuações ( $u'$  e  $p'$ ).

Para se descobrir esses valores, importante para a análise turbulenta, foi desenvolvido um código, o qual, pega todos os valores em cada componente de  $u$  e  $p$  e calcula as suas médias e posteriormente suas flutuações.

A média é calculada por  $u(t)$  em todos os pontos do escoamento ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ). Sendo assim, a média no tempo é calculada abaixo (WHITE, 2006):

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u dt \quad (4.1)$$

Sendo,  $T$  um intervalo de tempo maior que a qualquer período significativo da flutuação. Deste modo pode se obter a flutuação  $u'$  com o resquício da diferença entre a velocidade média e a calculada na simulação (WHITE, 2006).

$$\overline{u'^2} = (u - \bar{u})^2 \quad (4.2)$$

Entretanto, ao se tirar a média da flutuação,  $\overline{u'}$ , ela é igual a 0, tornando a análise impossível, para ser possível analisar a magnitude da flutuação é calculado a média da flutuação ao quadrado WHITE (2006).

$$\overline{u'^2} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u'^2 dt \quad (4.3)$$

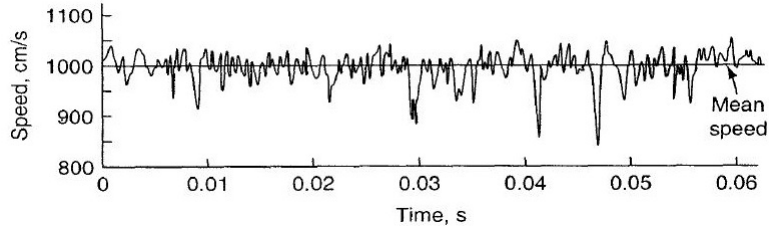


Figura 4.1: O gráfico mostra as velocidades ao longo do tempo e a média da velocidade.

Fonte: WHITE (2006)

Após a separação das flutuações e da velocidade média se chega ao próximo passo de geração dos resultados e análises dos mesmos.

## 4.2 Resultados

Como visto anteriormente, não foram encontrados artigos de fluidos não-newtonianos em canais rugosos, para que os resultados aqui encontrados fossem comparados e validados. Sendo assim, foi necessário que se seguisse uma série de validações com resultados já validados, que se iniciam do escoamento de fluidos newtonianos em canal liso até o fluido não-newtoniano em canal rugoso. Assim, será possível garantir que os resultados dos fluidos não-newtoniano encontrados estão corretos.

No artigo do ANBARLOOEI e FREIRE (2015) foram feitas simulações semelhantes as realizadas nesse trabalho, só que para canais lisos. Comparando o resultado de Anbarlooei com o de MOSER e MANSOUR (1999) para canais lisos e fluido newtoniano, podemos verificar que os resultados estão iguais para  $Re_\tau$  de 395, também é possível verificar que a lei logarítmica valida o resultado encontrado para essa simulação. Os parâmetros utilizados na simulação de Anbarlooei são os mesmos utilizados nesse trabalho, diferenciando apenas o tipo de canal. Esse é um dos motivos as validações dos resultados começarem pelos resultados apontados no artigo.

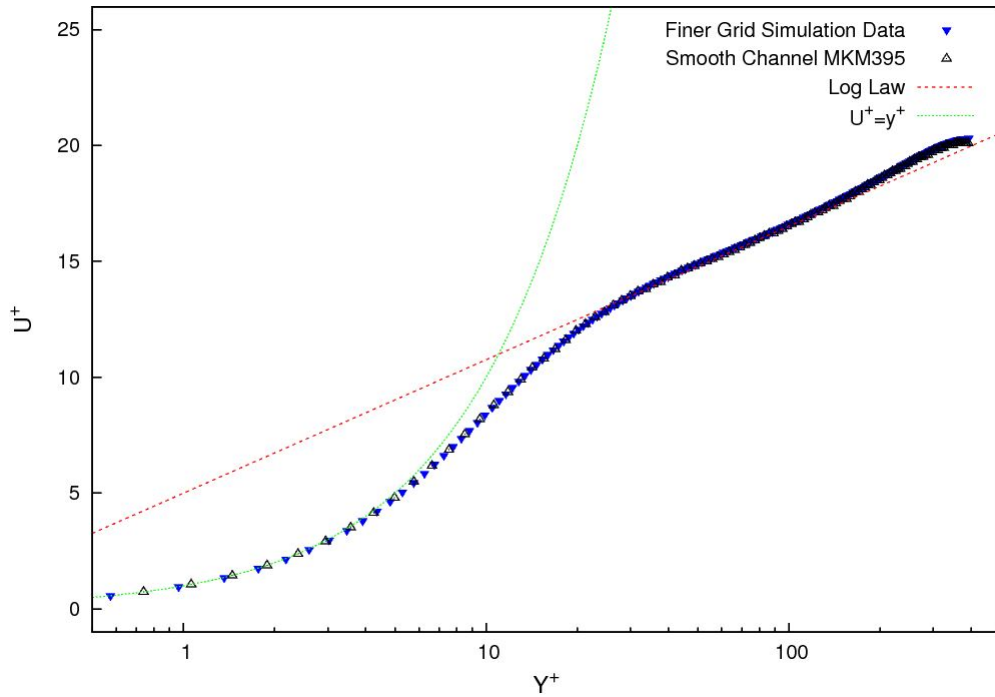
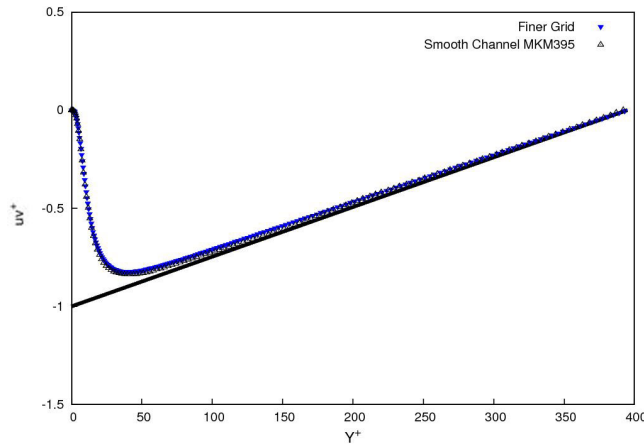


Figura 4.2: Log Law - Escoamento de fluido newtoniano em canal liso, comparativo entre MOSER e MANSOUR (1999) (MKM 395) e ANBARLOOEI e FREIRE (2015) (Finer Grid)

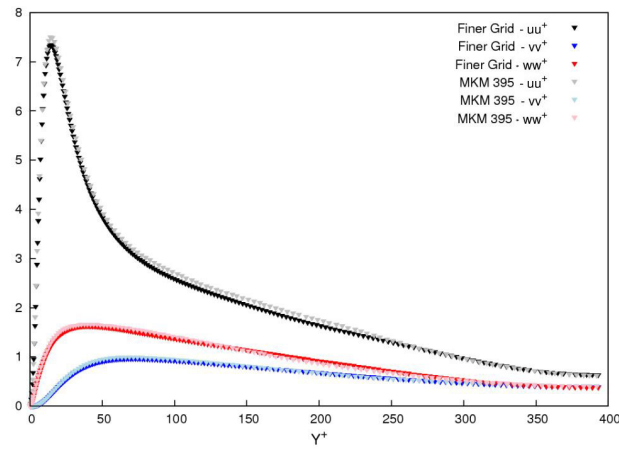
Fonte: autoria própria

Essa primeira comparação serve para validar que a simulação de ANBARLOOEI e FREIRE (2015) está correta e que podemos seguir fazendo outras análises, como: as flutuações turbulentas e a energia cinética do escoamento. Todas essas comparações com um artigo já validado como o de MOSER e MANSOUR (1999) serve não apenas para validar a simulação, mas também o cálculo pós-processamento realizado.

Nas figuras 4.3 podemos verificar que, como na velocidade média, os resultados estão coerentes para as flutuações.



(a) Reynold stress



(b) Flutuações turbulentas

Figura 4.3: Flutuações Turbulentas e Reynold Stress - Escoamento em canal liso de um fluido newtoniano, comparativo entre MOSER e MANSOUR (1999) (MKM 395) e ANBARLOOEI e FREIRE (2015) (Finer Grid)

Fonte: autoria própria

É possível identificar uma pequena diferença no resultado obtido por MOSER e MANSOUR (1999) comparado com o de ANBARLOOEI e FREIRE (2015), isso se deve ao uso de uma malha mais refinada. Contudo, a diferença é pouca e ainda é possível garantir que o resultado está correto. Essa diferença nas flutuações faz com que ao calcular a energia cinética da simulação de ANBARLOOEI e FREIRE (2015) também apresente essa pequena diferença na comparação.



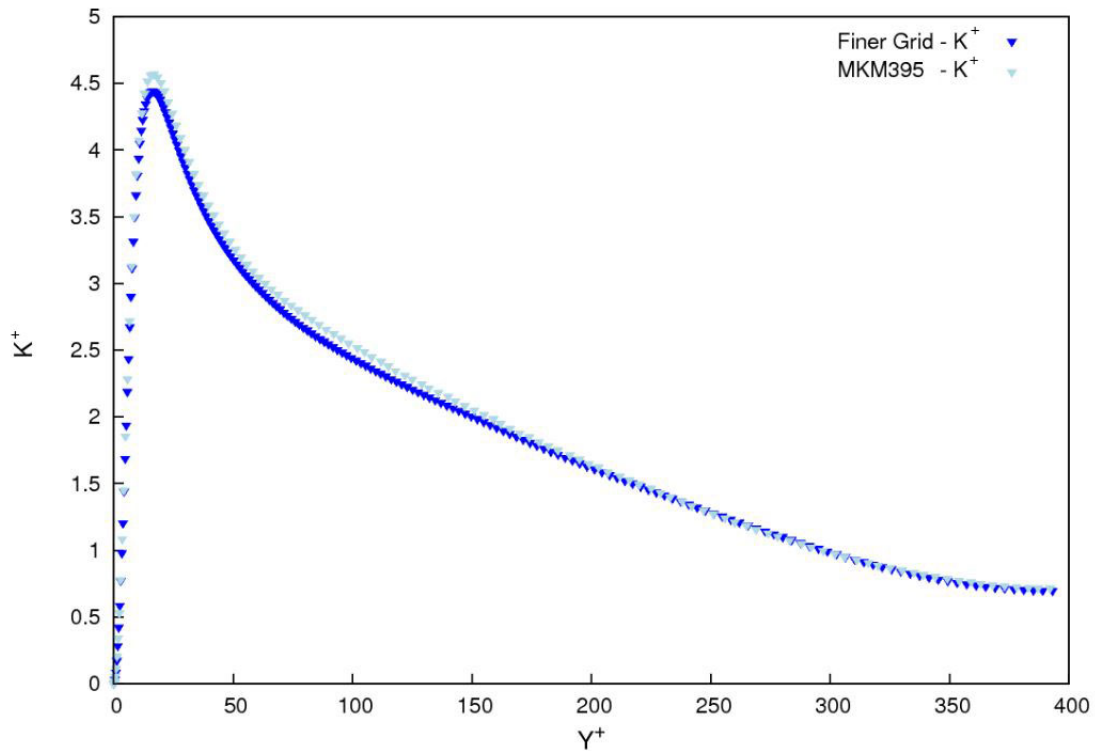


Figura 4.4: Energia Cinética - escoamento de canal liso do fluido newtoniano, comparativo entre MOSER e MANSOUR (1999) (MKM 395) e ANBARLOOEI e FREIRE (2015) (Finer Grid)

Fonte: autoria própria

Após validar que a simulação e o pós-processamento realizado por ANBARLOOEI e FREIRE (2015) estão corretos, a próxima etapa será verificar o comportamento de fluidos não-newtonianos (pseudoplásticos com índices de 0.75 e 0.5) com relação ao newtoniano de MOSER e MANSOUR (1999).

Na figura 4.5 é possível verificar que a velocidade média difere na angulação da lei logarítmica, apresentando uma maior inclinação comparado ao newtoniano quanto menor for o índice do fluido. Essa variação na velocidade mostra que a velocidade nos fluidos pseudoplásticos são maiores que o newtoniano.

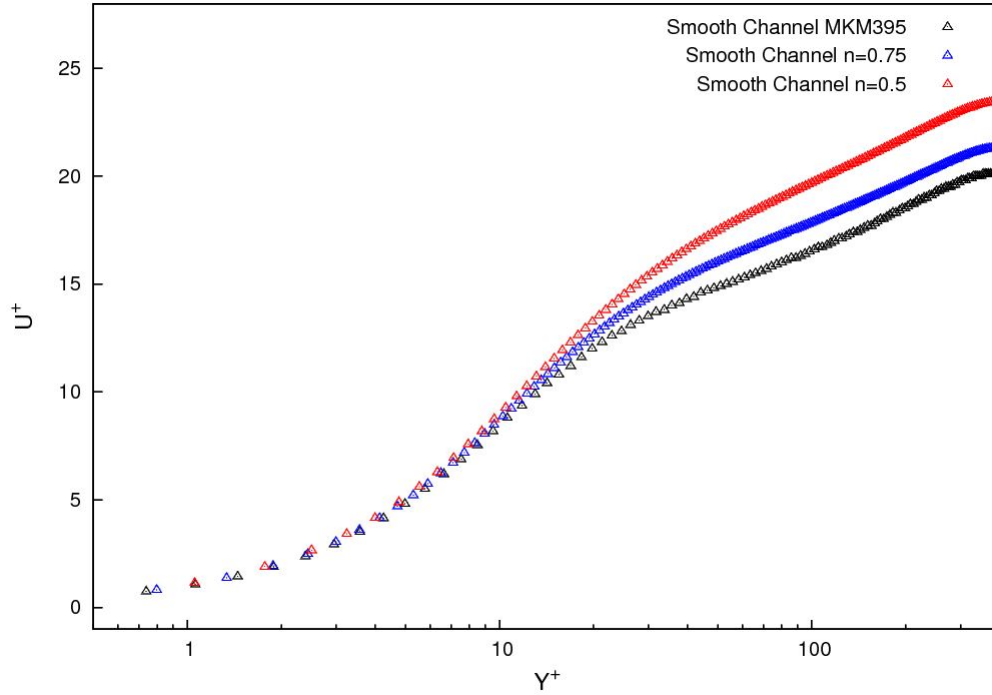


Figura 4.5: Log Law - Escoamento de fluido não-newtoniano em canal liso (ANBAR-LOOEI e FREIRE, 2015) e um fluido newtoniano (MOSER e MANSOUR, 1999) (MKM 395)

Fonte: autoria própria

Podemos identificar que o comportamento do aumento da velocidade média é também visto na flutuação turbulenta da mesma direção e no Reynolds stress, porém o oposto é identificado nas flutuações  $vv$  e  $ww$ , onde, a flutuação diminui com relação ao fluido newtoniano. Quanto menor o índice do fluido menor é a flutuação em  $vv$  e  $ww$ .

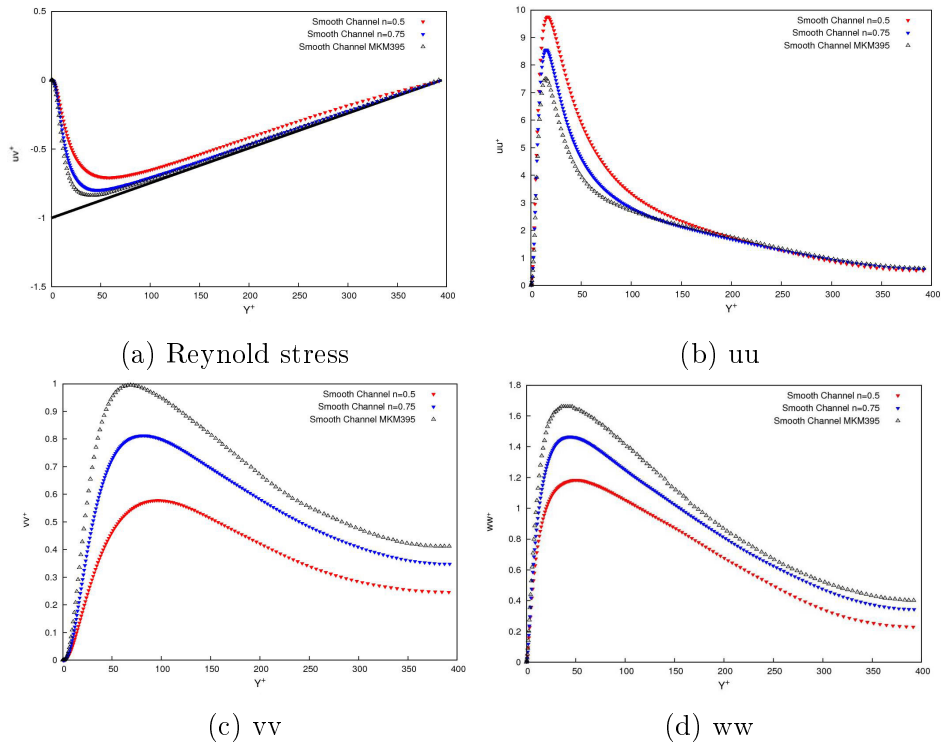


Figura 4.6: Flutuações Turbulentas e Reynold Stress - Escoamento em canal liso de fluido não-newtoniano (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015) ( $n=0.5$  - vermelho e  $n=0.75$  - azul) e de um fluido newtoniano (MOSER e MANSOUR, 1999) (preto)

Fonte: autoria própria

Ao verificar a energia cinética dos escoamentos identifica-se um aumento na mesma para os fluidos não-newtonianos, isso devido a diferença da flutuação  $uu$  ser muito maior do que as outras próximo a parede, enquanto que ao se afastar da parede a energia cinética diminui em relação ao newtoniano.

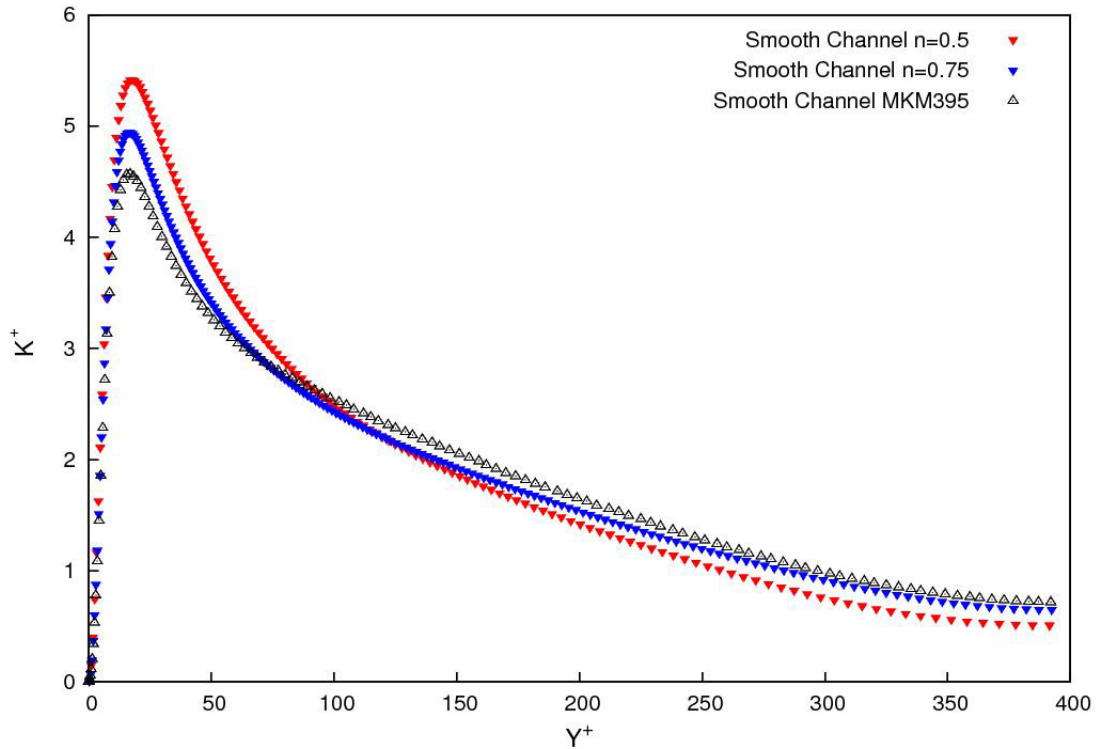


Figura 4.7: Energia Cinética - escoamento de canal liso de fluido não-newtoniano (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015) e de um fluido newtoniano (MOSER e MANSOUR, 1999) (MKM 395).

Fonte: autoria própria

Com a comparação entre ANBARLOOEI e FREIRE (2015) e MOSER e MANSOUR (1999) verifica-se o comportamento do escoamento dos fluidos newtoniano e não-newtoniano, podendo a partir desse entendimento seguir a análise junto aos mesmos fluidos em canais rugosos. Para essa análise será utilizado, além de MOSER e MANSOUR (1999), também o estudo de ASHARAFIAN e MANHART (2004) para fluidos newtonianos em canais rugosos.

Como feito anteriormente com no canal liso e fluido newtoniano, inicialmente será validado o resultado obtido neste trabalho com o obtido por ASHARAFIAN e MANHART (2004). Como pode ser visto na figura 4.8 o resultado apresentado pelo artigo de ASHARAFIAN e MANHART 2004 e o encontrado neste trabalho é o mesmo, onde o  $\Delta U^+$  é igual a 7 em relação ao escoamento do canal liso, resultado abaixo do encontrado através da equação 4.5 de aproximadamente 8,3. Esse resultado sugere que o escoamento não seja completamente rugoso.

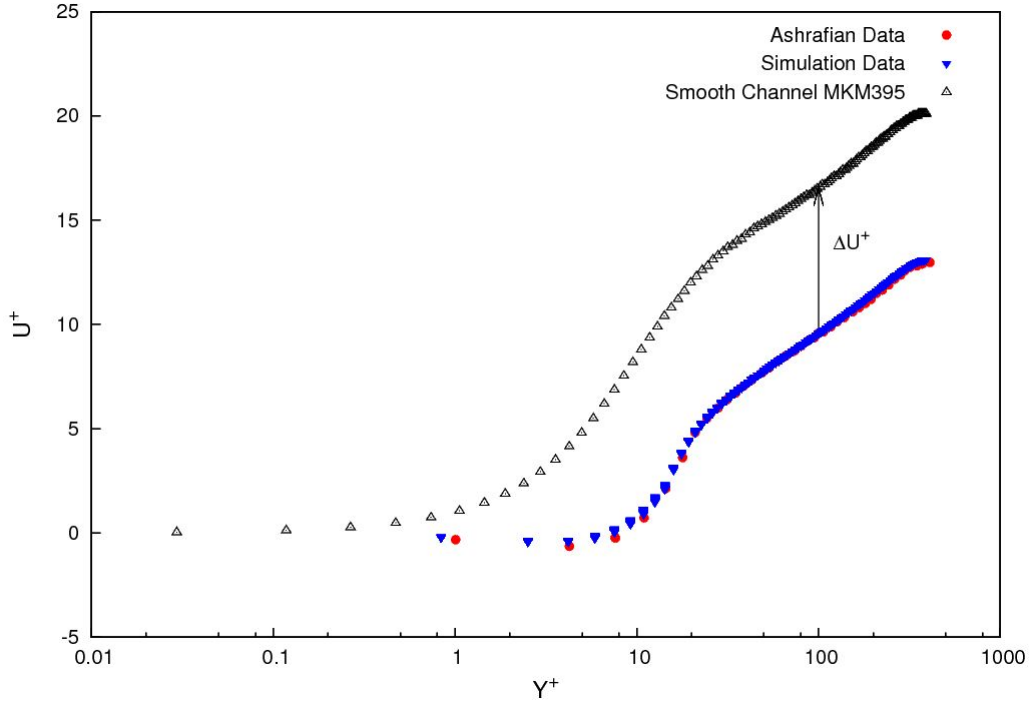


Figura 4.8: Log Law - Escoamento de um fluido newtoniano em canal rugoso (ASHARAFIAN e MANHART (2004) vermelho e simulados nesse trabalho em azul) e liso (preto)

Fonte: autoria própria

A lei logarítmica é calculada através da equação:

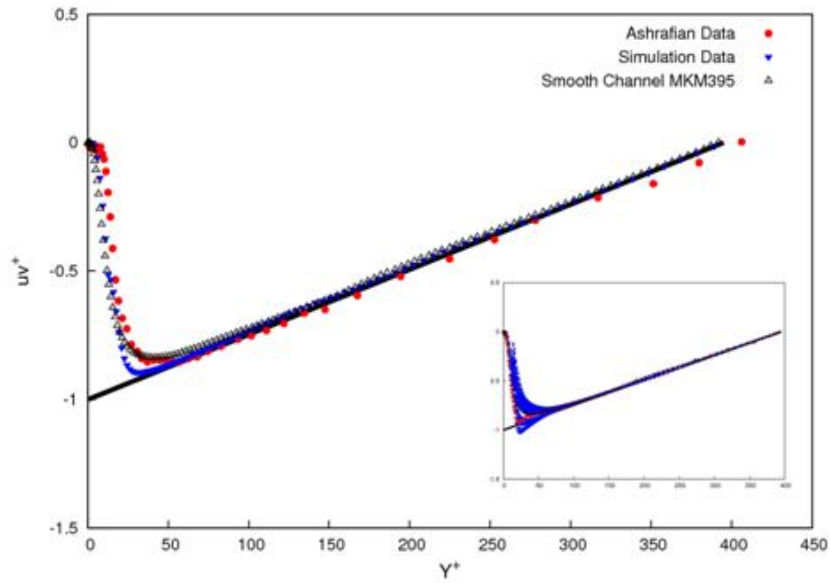
$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B - \Delta U^+ \quad (4.4)$$

Sendo,  $\kappa$  a constante de Von Kármán, B é uma constante empírica e  $\Delta U^+$  é a função da rugosidade e calcula a capacidade da superfície em absorver o momento (ASHARAFIAN e MANHART, 2004).  $\Delta U^+$  pode ser calculado:

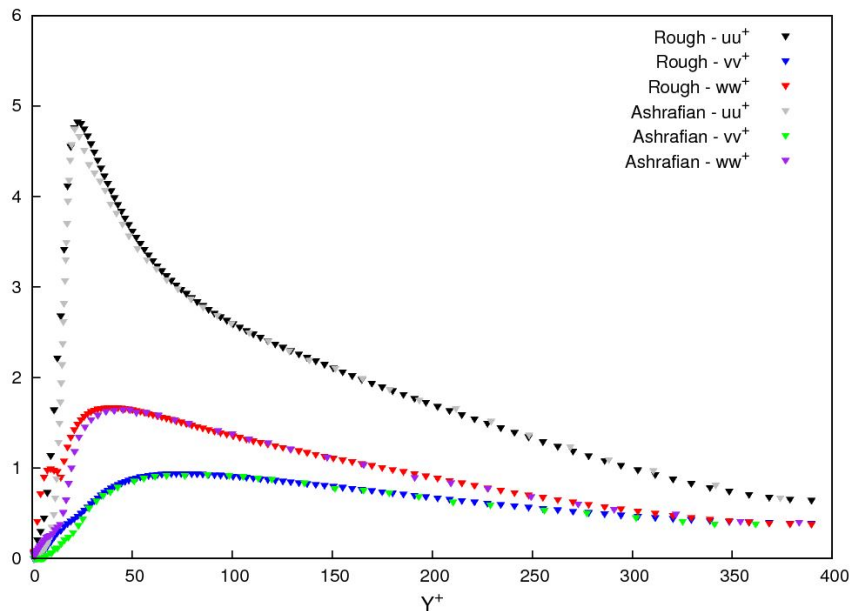
$$\Delta U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(k^+) + C \quad (4.5)$$

Nesta equação a constante C se refere a experimentos em canais rugosos e é considerada neste caso como 1,9 (ASHARAFIAN e MANHART, 2004).

O Reynold stress e as flutuações turbulentas próximo a rugosidade aparentam estar diferente do resultado obtido em ASHARAFIAN e MANHART (2004), contudo a flutuação varia muito dependendo da localização onde a mesma é analisada - se é na rugosidade ou em algum ponto entre as rugosidades. Essa variação pode ser vista na figura do Reynold stress no canto inferior direito. Contudo, os resultado apresentados estão de acordo com os encontrados pelo ASHARAFIAN e MANHART 2004.



(a) Reynold stress



(b) Flutuações turbulentas

Figura 4.9: Flutuações Turbulentas e Reynold Stress - Escoamento em canal rugoso (ASHARAFIAN e MANHART (2004) vermelho e simulados nesse trabalho em azul) e liso (preto) de um fluido newtoniano normalizado por  $u_\tau^2$

Fonte: autoria própria

O mesmo ocorre para a energia cinética, que a depender da localização que seja obtido os dados, existe uma variação no resultado. Na figura 4.10, podemos ver que o resultado apresentado nos dois estão iguais, validando assim a simulação e o pós-processamento que foi realizado neste trabalho.

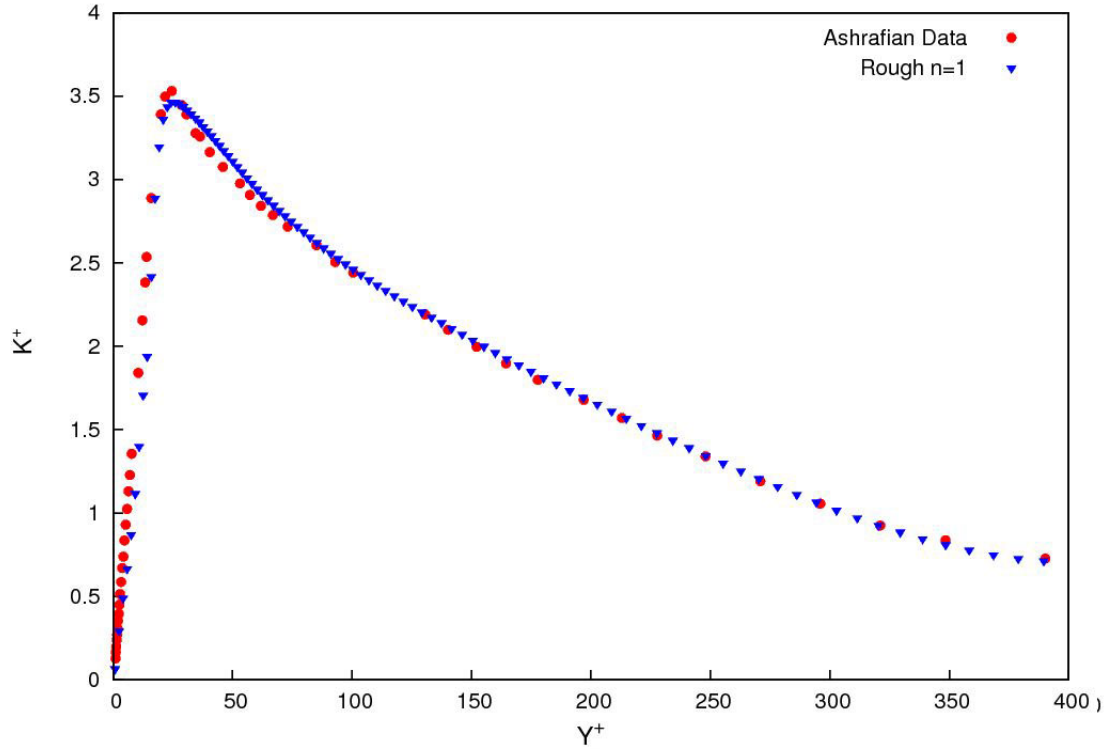


Figura 4.10: Energia Cinética - Escoamento de canal rugoso (ASHARAFIAN e MANHART (2004) vermelho e simulados nesse trabalho em azul) e liso (preto) de fluido newtoniano normalizado por  $u_\tau^2$ .

Fonte: autoria própria

Como visto acima, foi possível validar a simulação realizada e os cálculos de pós-processamento. Com isso, será apresentado os resultados encontrados para os fluidos não-newtonianos pseudoplásticos com índices ( $n$ ) de 0.75 e 0.5. Além de apresentar os resultados, também será analisado a equação de power law apresentada no artigo RAMOS (2018).

$$U^+ = C y^{+\frac{1}{4n+3}} \quad (4.6)$$

Onde,  $C$  é uma constante e  $n$  é o índice do fluido, para os fluído de índice ( $n$ ) igual a 0,75 e 0,5  $C$  é igual a 8.3 e 8, respectivamente.

Retornando aos resultados obtidos nas simulações, podemos verificar que comparando o fluido não-newtoniano de índice 0.75 liso e rugoso, foi obtido um  $\Delta U^+$  de 7.7. Na figura 4.11, além do comparativo do liso e rugoso do fluido é analisada a equação 4.6.

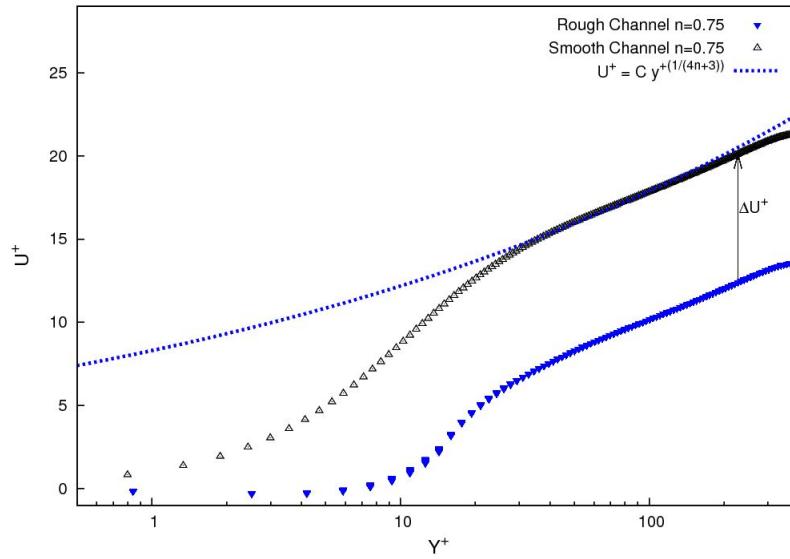


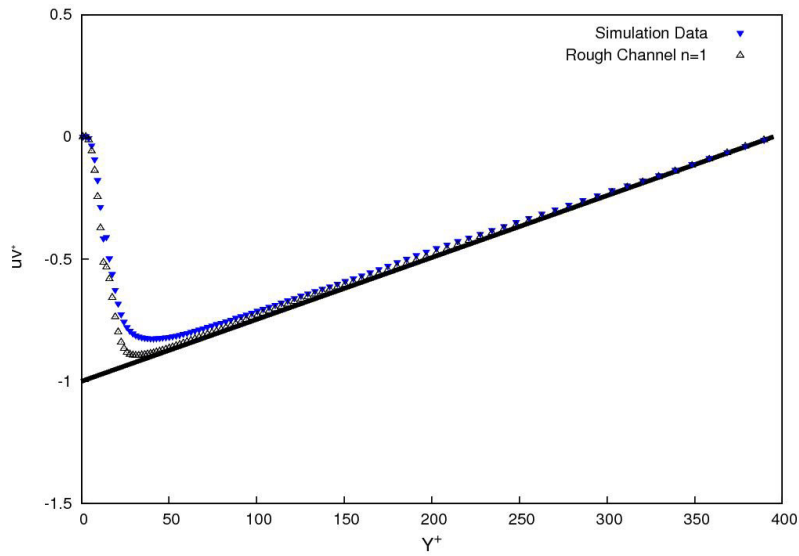
Figura 4.11: Log Law - escoamento fluido não-newtoniano em canal rugoso e liso (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015) ( $n=0.75$ ) e equação apresentada por RAMOS (2018)

Fonte: autoria própria

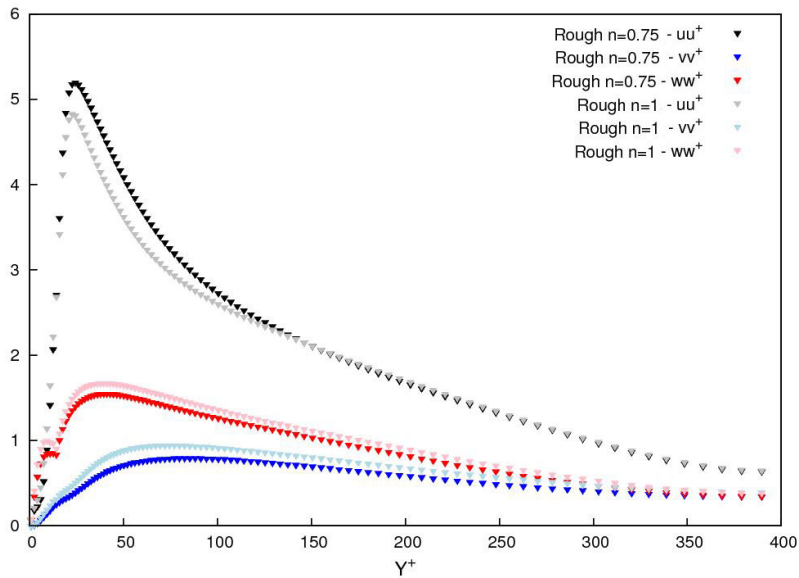
Para a equação 4.6, foi subtraído  $\Delta U^+$  testando se assim seria validada a equação também para a rugosidade e foi visto que a equação se encaixa no resultado encontrado para escoamento em canal rugoso também, como pode ser visto na figura 4.16.

Analisando as flutuações turbulentas e o Reynold Stress podemos verificar que o comportamento do canal rugoso é similar ao canal liso para os mesmos fluidos. Onde  $u_v$  e  $u_u$  possuem uma intensidade maior no fluido não-newtoniano comparando com o newtoniano.





(a) Reynold stress



(b) Flutuações turbulentas

Figura 4.12: Flutuações Turbulentas e Reynold Stress - Escoamento em canal rugoso e liso (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015) de um fluido não-newtoniano com  $n = 0,75$  normalizado por  $u_{\tau}^2$

Fonte: autoria própria

O mesmo ocorre para o fluido não-newtoniano com índice 0.5, o resultado apresenta as mesmas características dos resultados obtidos para o canal liso. Para esse fluido o  $\Delta U^+$  encontrado entre o canal liso e o rugoso é de 8. Podemos verificar com esses resultados que seguem a mesma linha dos anteriores nas figuras 4.13 e 4.14.

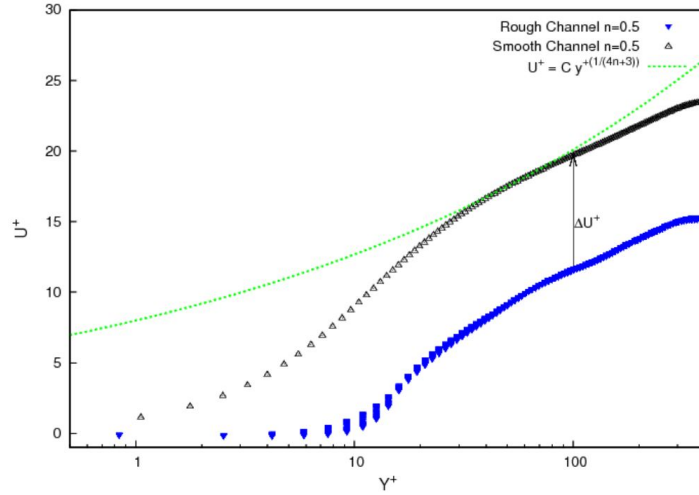


Figura 4.13: Log Law - Escoamento de fluido não-newtoniano em canal rugoso e liso (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015) ( $n=0.5$ ) e equação apresentada por RAMOS (2018)

Fonte: autoria própria

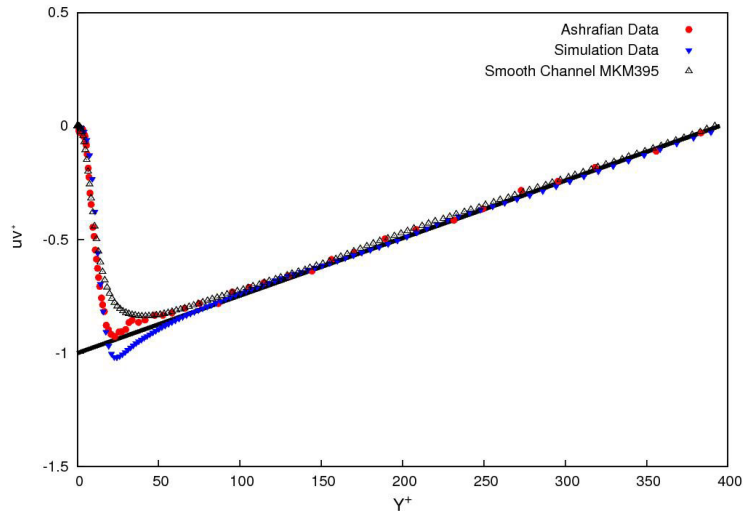
A última verificação que foi feita em todas as análises foi a de energia cinética, e com o mesmo padrão das outras chega-se a um resultado coerente com os visto anteriormente - quanto menor o índice do fluido, maior a intensidade da energia cinética comparado ao fluido newtoniano. Podemos ver isso na figura 4.15.

Após a realização das verificações realizadas para conseguir validar os resultados obtido, foi comparado o resultado obtido para o fluido não-newtoniano de índice 0.75, com a equação de Dodge e Metzner (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015).

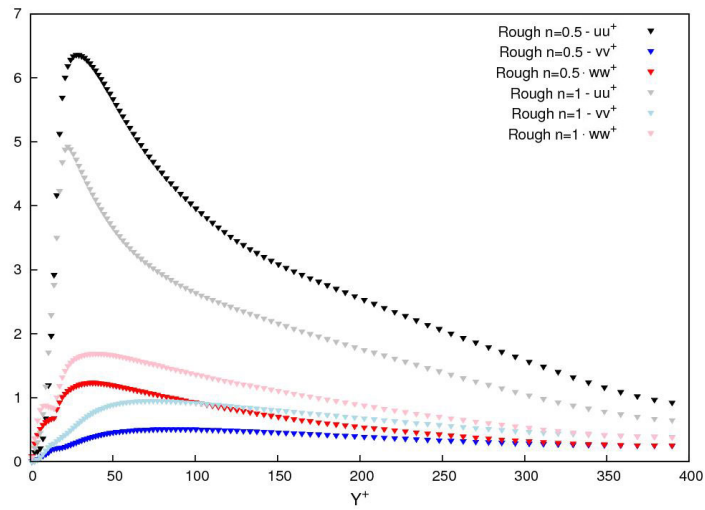
$$\frac{u}{u_\tau} = A \log(y^+) + B$$

Substituindo A e B pelo que foi proposto por Dodge e Metzner em 1959 e corrigido por Skelland em 1967 (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015), obteremos a equação.

$$\frac{u}{u_\tau} = \frac{5.66}{n^{0.75}} \log(y^+) - \frac{0.4}{n^{1.2}} + \frac{2.458}{n^{0.75}} \left[ 1.960 + 1.255n - 1.628n \log\left(3 + \frac{1}{n}\right) \right] \quad (4.7)$$



(a) Reynold stress



(b) Flutuações turbulentas

Figura 4.14: Flutuações Turbulentas e Reynold Stress - Escoamento em canal rugoso e liso (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015) de um fluido não-newtoniano normalizado por  $u_\tau^2$

Fonte: autoria própria

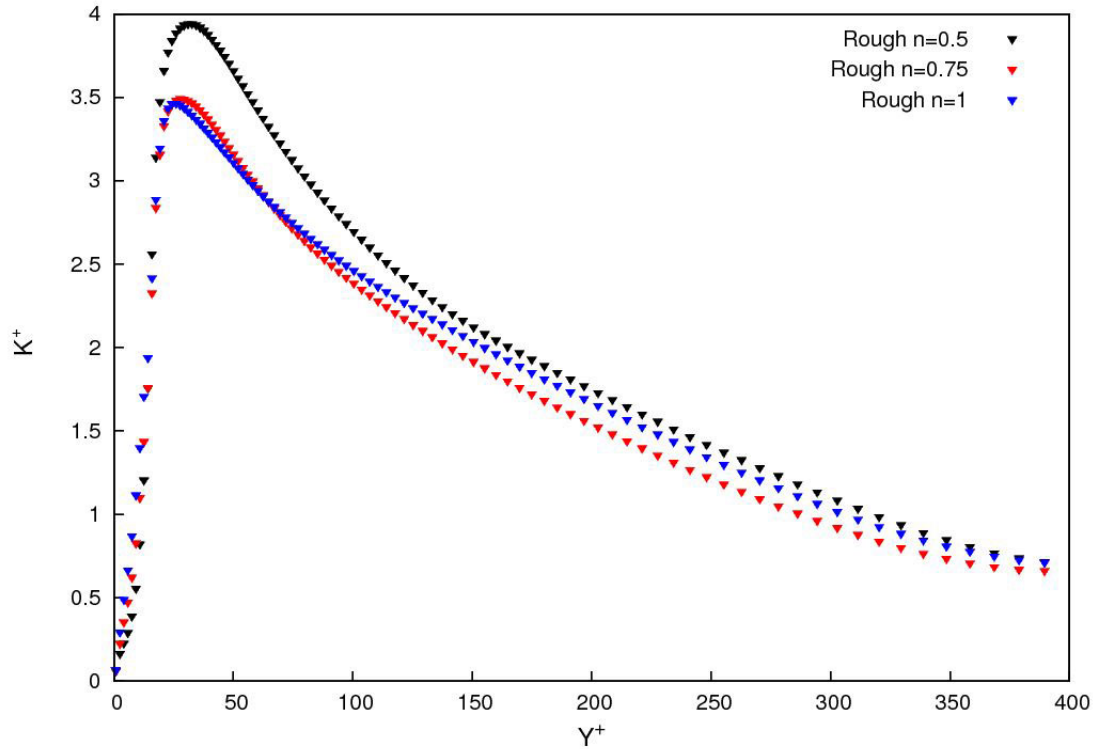


Figura 4.15: Energia cinética - Escoamento de fluido não-newtoniano em canal rugoso e liso (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015) normalizado por  $u_{\tau}^2$

Fonte: autoria própria

Ao plotar a equação comparando com os resultados obtidos, pode-se verificar que a parte A que define a angulação da reta está bem próxima do resultado simulado, contudo a parte B está muito fora do que foi encontrado na simulação - na figura 4.16 foi ajustado o valor B, para -3,7, para que se pudesse sobrepor os dois gráficos, se tivesse utilizado o real valor de B, -36,988, o gráfico ficaria muito fora do resultado encontrado e de difícil comparação.

Entrando um pouco em uma análise mais física do comportamento do escoamento, observando-se o comportamento das flutuações Newtoniano e Não-Newtoniano em todos os escoamentos podemos inferir que as flutuações  $vw$  se comportam de maneira completamente diferente da flutuação  $uu$ . Assim podendo levantar a hipótese de que isso ocorra devido ao fluido Não-Newtoniano aqui estudado ter uma tensão de cisalhamento maior que o Newtoniano no sentido do escoamento fazendo com que a flutuação nesse sentido aumente comparado ao Newtoniano. Podemos assumir que a tensão de cisalhamento, como sabemos, é maior no Não-Newtoniano pseudoplásticos que no Newtoniano, porém a influencia dele nas flutuações ocorrem de maneiras distintas devendo aumentar no sentido do escoamento ( $uu$ ) e reduzir nos outros sentidos ( $vv$  e  $ww$ ). Observando o comportamento dos escoamentos com relação a velocidade média, podemos observar que no escoamento rugoso a velocidade reduz comparado ao mesmo fluido em canal liso. Isso

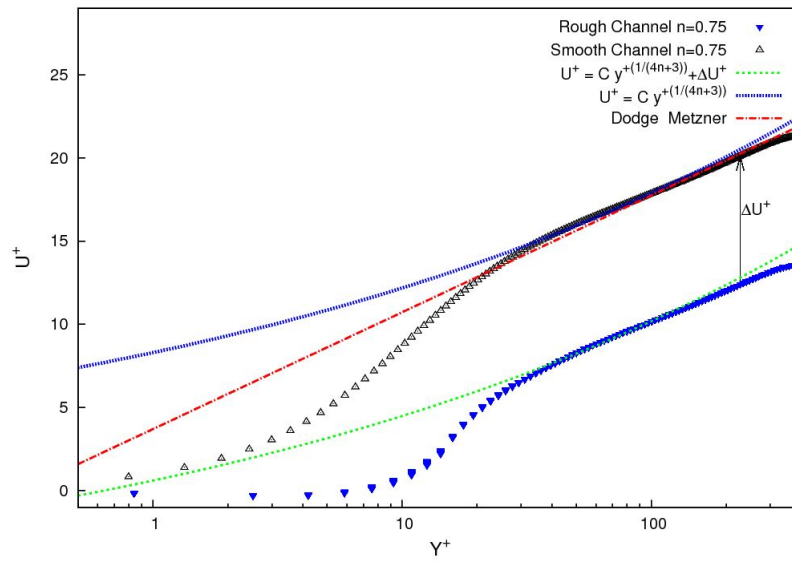


Figura 4.16: Log Law - Comparação equação de Dodge e Metzner e da equação de RAMOS (2018) adicionando  $\Delta U^+$  no resultado encontrado dos escoamentos de  $n = 0.75$  liso (ANBARLOOEI e FREIRE, 2015) e rugoso  
 Fonte: autoria própria

tende a ocorrer devido ao aumento da perda de carga gerada pela rugosidade ao longo do canal.

# Capítulo 5

## Conclusão

Neste trabalho, foi apresentado pela primeira vez, dentro do conhecimento deste autor, uma simulação de escoamento de fluido não-newtoniano em canal rugoso. Sendo este um trabalho inédito, não há outros resultados publicados que permitam comparação com os resultados aqui obtidos. Por isso foi seguido uma linha de análise, em que validou-se a simulação e o cálculo pós-processamento.

Com todas as análises realizadas, nota-se que o resultado apresentado é coerente com o esperado. O comportamento do fluido newtoniano e não-newtoniano na rugosidade é semelhante ao que foi apresentado para os mesmos fluidos no canal liso. Isso ajuda a validar o resultado obtido e é possível verificar que a rugosidade apenas aumenta a perda de carga do escoamento, como é entendido amplamente para os fluidos newtonianos.

Com esses resultados, deve-se agora analisar o comportamento com uma malha mais refinada, além de, como dito antes, rodar a simulação do fluido não-newtoniano com índice 0.5 por mais tempo e verificar o comportamento da velocidade. Após analisar os resultados com uma malha mais refinada, deve-se analisar outras rugosidades, verificar números maiores de Reynolds e simular com outros modelos para os fluidos não-newtonianos, como, Bingham e Herschel-Bulkley.

Com esse trabalho, um novo campo de estudo do escoamento turbulento com rugosidade de fluido não-newtoniano. Tubulações, canais ou qualquer outro meio de escoamento de um fluido possui rugosidade na natureza e indústria, e o fluido mais comumente encontrados são fluidos não-newtonianos. Assim sendo, ainda se tem muito a estudar no assunto, com grandes possibilidades de aplicabilidade, porém com os resultados apresentados aqui já é possível entender como esse escoamento tende a se comportar e, inicia-se a geração de novos modelos para serem aplicados na engenharia.

# Referências Bibliográficas

- ANBARLOOEI, H.; CRUZ, D. O. A., FREIRE, A. P., 2015, “Fully Turbulent Mean Velocity Profile for Purely Viscous non-Newtonian Fluids”, *In: Proceedings of the 15th European Turbulence Conference*.
- ASHARAFIAN, A.; ANDERSSON, H. I., MANHART, M., 2004, “DNS of turbulent flow in a rod-roughened channel”, *Heat and Fluid Flow*, v. 25, pp. 373–383.
- ASHRAFIAN, ALIREZA; ANDERSSON, H. I., MANHART, M., 2004, “DNS of turbulent flow in a rod-roughened channel”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 25, pp. 373–383.
- BURATTINI, P.; LEONARDI, S., ANTONIA, R. A., 2008, “Comparison between experiments and direct numerical simulations in a channel flow with roughness on one wall”, *Fluid Mech.*, v. 600, pp. 403–426.
- CAPUANO, F., PALUMBO, A., DE LUCA, L., 2018, “Comparative study of spectral-element and finite-volume solvers for direct numerical simulation of synthetic jets”, (05). doi: 10.13140/RG.2.2.33030.06722.
- CHHABRA, R., 2010, “Non-Newtonian Fluids: An Introduction”. In: *vitmandras: SERC School-cum-Symposium on Rheology of Complex Fluids*, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India.
- EGGELS, J. G. M.; UNGER, F. W. M. H. W. J. A. R. J. F. R., NIEUWSTADT, F. T. M., 1994, “Fully developed turbulent pipe flow: a comparison between direct numerical simulation and experiment”, *J. Fluid Mech.*, v. 268, pp. 175–209.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T., PRITCHARD, P. J., 2006, *Introdução a Mecânica dos Fluidos*. Sexta Edição. LTC. ISBN: 978-85-216-1468-5.
- GAVRILAKIS, S., 1992, “Numerical simulation of low-Reynolds-number turbulent flow through a straight square duct”, *J. Fluid Mech.*, v. 244, pp. 101–129.
- IKEDA, T., DURBIN, P. A., 2007, “Direct simulations of a rough-wall channel flow”, *Fluid Mech.*, v. 571, pp. 235–263.

- KIM, J. M. P., MOSER, R., 1987, “Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number”, *J. Fluid Mech.*, v. 177, pp. 133–166.
- EL KHOURY, G. K.; SCHLATTER, P.; NOORANI, A.; FISCHER, P. F.; BRETHOUWER, G. AND JOHANSSON, A. V., 2013, “Direct Numerical Simulation of Turbulent Pipe Flow at Moderately High Reynolds Numbers”. *Flow Turbulence Combust*, v. 91, pp. 475–495.
- KURIEN, S., TAYLOR, M. A., 2005, “Direct Numerical Simulations of Turbulence: Data Generation and Statistical Analysis”, *Los Alamos Science*, (nov.), pp. 142–151.
- LEE, J. H.; SUNG, H. J., KROGSTAD, P., 2011, “Direct numerical simulation of the turbulent boundary layer over a cube-roughened wall”, *Fluid Mech.*, v. 669, pp. 397–431.
- LEONARDI, S.; ORLANDI, P. S. R. J. D. L., ANTONIA, R. A., 2003, “Direct numerical simulations of turbulent channel flow with transverse square bars on one wall”, *Fluid Mech.*, v. 491, pp. 229–238.
- LEONARDI, S., CASTRO, I. P., 2010, “Channel flow over large cube roughness: a direct numerical simulation study”, *Fluid Mech.*, v. 651, pp. 519–539.
- MOIN, P., MAHESH, K., 1998, “DIRECT NUMERICAL SIMULATION: A Tool in Turbulence Research”, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, v. 30, pp. 539–578.
- MOSER, R. D.; KIM, J., MANSOUR, N. N., 1999, “Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to  $Re_\tau = 590$ ”, *Physics of Fluids*, v. 11, pp. 943–945. .
- NGUYEN, Q.-H., NGUYEN, N.-D., 2012, *Continuum Mechanics - Progress in Fundamentals and Engineering Applications*. Vietnam, InTech. ISBN: 978-953-51-0447-6.
- POPE, S. B., 2000, *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.
- RAMOS, F; CRUZ, D. O. A. A. H., 2018, “New friction factor and mean velocity profile for turbulent pipe flow at extreme Reynolds number”, *71st Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*.
- SILVA FREIRE, A. P., MENUT, P. P. M., SU, J., 2002, *Turbulência*. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas (ABCM).



VERSTEEG, H. K. AND MALALASEKERA, W., 2007, *An Introduction to Computational FLuid Dynamics*. Second Edition. Pearson Education Limited. ISBN: 978-0-13-127498-3.

WAGNER, C.; HÜTTL, T. J. AND FRIEDRICH, R., 2001, “Low-Reynolds-number effects derived from direct numerical simulations of turbulent pipe flow”. *Computers Fluids*, v. 30, pp. 581–590.

WHITE, F. M., 2006, *Viscous Fluid Flow*. Third Edition. Mc Graw Hill. ISBN: 007-124493-X.

# Apêndice A

## Definições

Newtoniano

$$Re_\tau : Re_\tau = \frac{u_\tau h}{\nu}$$

$$y^+ : y^+ = y Re_\tau$$

$$u^+ : u^+ = \frac{u}{u_\tau}$$

$$\tau_w : \tau_w = h \frac{\partial P}{\partial x}$$

$$u_\tau : u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

Não-Newtoniano

$$Re_\tau : Re_\tau = \frac{1}{u_\tau} \left( \frac{\tau_w}{k} \right)^{\frac{1}{n}} h$$

$$y^+ : y^+ = y Re_\tau$$

$$u^+ : u^+ = \frac{u}{u_\tau}$$

$$\tau_w : \tau_w = h \frac{\partial P}{\partial x}$$

$$u_\tau : u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$