

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentadas as informações sobre os materiais empregados, os detalhes da montagem experimental bem como as metodologias das abordagens experimental e numérica (CFD) utilizadas neste estudo.

3.1 Materiais

Neste trabalho foram adotados dois tipos de fluidos de trabalho: fluidos Newtonianos e fluidos não-Newtonianos. Como fluido de característica Newtoniana foram empregadas soluções de glicerina, com as diluições (em água destilada) ajustadas conforme a viscosidade desejada em cada determinação experimental.

Para fluidos de comportamento não-Newtoniano, trabalhou-se com suspensões poliméricas de goma xantana. A variação de concentração do polímero em água destilada forneceu um amplo espectro de viscosidades (comportamentos reológicos) necessários ao escopo deste estudo.

3.1.1 Determinação das propriedades físicas

A viscosidade dinâmica das soluções de glicerina e a reologia das suspensões poliméricas foram quantificadas a partir de dados obtidos de um viscosímetro digital do tipo cone-prato, da marca Brookfield® (modelo RDV-III), acoplado a um banho termostatizado Tecnal® previamente calibrado, conforme detalhes na Figura 3.1. Para atestar a confiabilidade das medidas de viscosidade feitas pelo reômetro, dois fluidos padrão (Brookfield *viscosity standard fluid*) foram empregados: o fluido 1000 (1.010 mPa a 20 °C) lote 091395 e o fluido 500 (492 mPa.s a 20 °C) lote 100695. A aferição do equipamento foi conduzida quinzenalmente, pela comparação entre as leituras de viscosidade dinâmica obtidas do viscosímetro e as propriedades do fluido padrão. Consideraram-se os dados obtidos como válidos quando a aferição prévia ficou abaixo da faixa de desvio aceitável pelo fabricante (inferior a 5 %). Quando a comparação entre os resultados se mostrou maior ou igual à faixa de desvio, o procedimento de re-calibração (*hit-point*) foi conduzido (detalhe no Apêndice A).

Para a determinação da densidade dos fluidos de trabalho a técnica de picnometria foi empregada.



Figura 3.1: Foto do conjunto banho termostatizado – reômetro.

3.1.2 Preparo das soluções poliméricas

O procedimento empregado tanto para o preparo de pequenos volumes de suspensões (testes preliminares) quanto para quantidades maiores (fluido de trabalho para determinações experimentais) foi padronizado a partir de ensaios preliminares. Durante estes testes preliminares foi possível identificar diversos detalhes que foram relevantes para a melhoria da metodologia de preparo das suspensões empregadas nos ensaios experimentais, como por exemplo: o pré-aquecimento da água destilada, o tempo de dispersão e o uso de agente fungicida.

Inicialmente, preparou-se um conjunto de soluções poliméricas de goma xantana com o intuito de estipular uma faixa de viscosidade (reologia) que poderia ser obtida com a variação da concentração de polímero em água destilada. Os testes preliminares foram realizados adotando como volume de prova de 500 ml em balão volumétrico. A escolha de se empregar a base volumétrica foi feita pensando na operacionalidade no preparo de volumes maiores (acima de 85 litros) das suspensões para os ensaios experimentais.

Uma vez mensurado o volume de água destilada, a quantidade do polímero, com base na concentração desejada, era pesada em balança analítica de precisão (Scientech SA210).

Com a realização de diversas tentativas de dispersão do polímero em água, observou-se que a água destilada a uma temperatura acima da ambiente ($\cong 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) contribuía de forma significativa na dispersão do polímero. Desta forma, incorporou-se o pré-aquecimento da água ao procedimento experimental. Nos ensaios, foi utilizado a partir de então um aquecedor elétrico (detalhes na Figura 3.2) de 2000 watts de potência.



Figura 3.2: Foto do aquecedor elétrico.

Para promover a dispersão e homogeneização da solução foi empregado um béquer de 2000 ml e um agitador magnético (Fisatom 753a). O tempo de agitação não foi pré-determinado. Como critério aguardava-se a completa dissolução do polímero. Durante os ensaios, constatou-se que o tempo poderia variar de 45 a 150 minutos conforme a concentração de polímero. As soluções mais concentradas necessitavam de um maior tempo de preparo. Outro fator relevante foi a limitação do sistema de agitação magnética usado até então; as suspensões com concentração acima de 0,75 % não apresentaram consistência homogênea.

Constatou-se também que a forma de adição do polímero estava associada tanto ao tempo necessário para dispersão quanto à qualidade da suspensão. A adição feita de uma única vez gerava “grumos”, que necessitavam de um elevado período de tempo para dissolução. Muitas vezes, a solução final não apresentava uma consistência homogênea, isto é, ao promover seu escoamento percebia-se a presença de pequenos “flocos gelatinosos”, cuja presença era indesejável, conforme detalhes na Figura 3.3. Portanto, como procedimento empregou-se a rotina de se adicionar o polímero em pequenas alíquotas, aguardando sempre a sua dispersão.

Quando as soluções preparadas permaneceram estocadas por mais de oito dias, mesmo em boas condições de armazenamento (recipiente fechado longe de fontes de calor), percebeu-se a formação de pequenas bolhas que se acumulam na superfície, formando uma espécie de espuma. Estas bolhas, que aumentavam com o tempo de armazenamento, eram o resultado de atividade microbiológica que degradavam a solução polimérica, causando alterações na cor (levemente amarelada) e redução na viscosidade. Como o intuito de limitar o

desenvolvimento de microorganismos, empregou-se o procedimento recomendado por fabricantes de CMC (carboximetilcelulose); a adição de solução de formol. Não havendo correlações ou recomendações específicas para goma xantana, adotou-se o critério de que a quantidade de solução de formol em mililitros seria numericamente igual ao peso de polímero (em gramas) a ser adicionado para uma dada concentração.



Figura 3.3: Efeito do modo de adição de polímero na qualidade da suspensão.

Para o preparo das suspensões empregadas nos ensaios experimentais, estimou-se que o volume mínimo necessário seria de 65 litros. Contudo para garantir uma margem de segurança em caso de vazamentos ou pequenas perdas, para cada concentração foram preparados 92 litros de solução de goma xantana. Este volume foi preparado em duas bateladas de 46 litros.

No interior de um recipiente plástico (com capacidade de 80 litros), adicionava-se 46 litros de água destilada empregando balões volumétricos de 2000 ml. Na sequência, procedia-se o pré-aquecimento da água utilizando a resistência elétrica descrita anteriormente, até atingir temperaturas próximas a 40 °C. Quando então a massa de polímero previamente quantificada em balança analítica de precisão (Scientech SA210), era adicionada paulatinamente e homogeneizada com auxílio de um *mixer* de uso doméstico (Mallory Robot 250). As Figuras 3.4 e 3.5 apresentam alguns detalhes da execução do procedimento descrito.

A utilização do *mixer* apresentou outra função além da homogeneização da suspensão, este equipamento se mostrou bastante eficiente no corte e na desagregação dos flocos eventualmente formados durante a dispersão.



Figura 3.4: Preparo de uma batelada de 46 litros de solução polimérica.



Figura 3.5: Detalhes do mixer.

Uma vez preparadas as duas bateladas de suspensões, estas eram homogeneizadas no tanque da unidade experimental por uma hora (detalhes na Figura 3.6). O tanque, com capacidade de 180 litros, possuía um sistema mecânico de agitação com um motor elétrico de 1 CV (acoplado a um inversor de frequência da marca WEG), um impelidor de aço inox de pás inclinadas contando ainda com quatro chicanas laterais para evitar a formação de vórtices durante a operação de agitação.



Figura 3.6: Detalhes do tanque de homogeneização.

Uma vez concluído o processo de homogeneização, aguardava-se o tempo necessário para a suspensão atingir uma temperatura próxima à ambiente, quando então se adicionava a solução de formol. O volume adicionado dependia da quantidade de polímero, sendo o volume em mililitros igual à massa em gramas do polímero. A suspensão permanecia por mais quinze minutos sob agitação para uma boa incorporação e mistura da solução de formaldeído.

3.2 Unidade experimental

Tanto o dimensionamento e montagem da nova unidade piloto, quanto a realização dos testes experimentais, foram implementados nas dependências dos laboratórios da Unidade Avançada de Pesquisa da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

3.2.1 Montagem principal e seus acessórios

O foco principal deste estudo, a região anular, é formada por dois corpos cilíndricos: um externo construído em acrílico cristal extrusado (67 mm de diâmetro) e outro interno montado a partir de um tubo de aço inox (32 mm de diâmetro); ambos com 1500 mm de comprimento, conforme mostra a Figura 3.7. A relação entre diâmetros ' k ' foi estabelecida para fornecer um valor próximo a 0,50; valor este frequentemente encontrado em trabalhos da literatura. Os pontos para medição de pressão foram distribuídos ao longo do comprimento do

tubo de acrílico. Os terminais do tipo *plug-flow* foram distribuídos com distâncias regulares, de 25 cm entre terminais.



Figura 3.7: Fotografia da unidade experimental.

Destacam-se os dois anéis de fixação do sistema à mesa de aço. Estes anéis foram construídos em tecnil e foram posicionados próximos às regiões de entrada e de descarga para fixarem a unidade à estrutura, e também atuar como sistema antivibração.

Outro detalhe é a presença de um manômetro digital de segurança (Gulpress 1000) que foi instalado na parte superior do tubo de acrílico para evitar que a pressão interna de escoamento superasse $3,0 \text{ kgf/cm}^2$, o que poderia vir a comprometer a integridade estrutural do casco de acrílico. Um outro detalhe a respeito do tubo externo é referente às suas extremidades; às quais foram soldados quimicamente dois flanges de acrílico com doze pontos de fixação para parafusos de $\frac{1}{4}$ de polegada. A Figura 3.8 apresenta detalhes da montagem, juntamente com o flange (tecnil) que atua como elemento de sustentação do eixo interno e também como difusor de escoamento.

A posição do cilindro interno em relação ao externo, um dos objetos deste estudo, foi projetada com base na construção de flanges em tecnil. Cada par de flanges, uma vez fixado ao tubo de acrílico, permitia o posicionamento do eixo interno para fornecer os arranjos concêntrico e excêntrico ($e=0,75$), conforme detalhes na Figura 3.9.



Figura 3.8: Detalhes da montagem do flange.



Figura 3.9: Detalhes dos flanges para o arranjo excêntrico.

No flange de entrada, foi adaptado um sistema de contenção para evitar vazamento do fluido de trabalho, contudo sem impedir o movimento de acionamento da rotação do cilindro interno. Este sistema consiste da associação de um acoplamento de bronzina grafitada e de retentor de fibra de carbono. Com o intuito de reduzir o atrito, um lubrificante (a base de graxa grafitada da marca ABOR) era adicionado antes de cada corrida experimental.

A alimentação da região anular de entrada entre os tubos foi configurada em uma disposição axial. Este layout foi definido com base em simulações preliminares, comentadas com mais detalhes no Capítulo 4. O mesmo flange que sustenta o arranjo entre os tubos interno e externo permite a divisão do fluxo principal em dez posições ao redor da seção anular (detalhes na Figura 3.10). Para a implementação deste dispositivo, um divisor de fluxo foi montado em aço inox com distribuidores em mangueiras de silicone de parede grossa. De

forma análoga à alimentação, o sistema de descarga segue o mesmo princípio, mas com um detalhe a mais: um terminal para acoplar um ponto de monitoramento de temperatura do fluido foi montado ao corpo metálico. Um termômetro padrão, modelo Labortherm-N 19.89, com bocal confeccionado em PVC completam o sistema de descarga da unidade experimental conforme a Figura 3.11.



Figura 3.10: Distribuidor de fluxo.

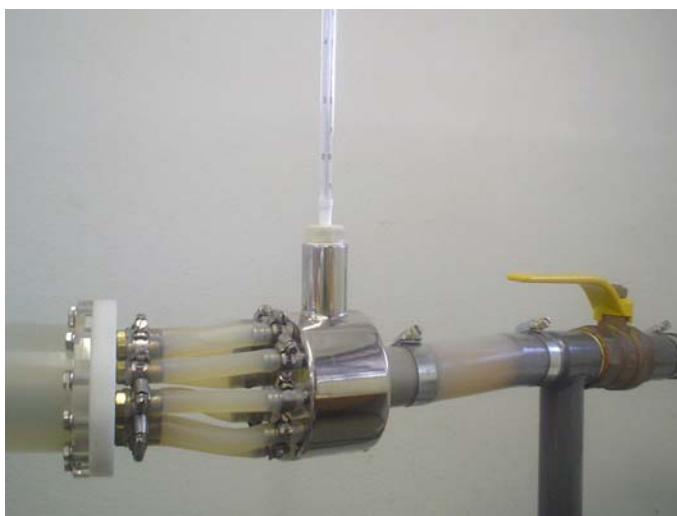


Figura 3.11: Concentrador de fluxo com terminal para termômetro.

Para a rotação do cilindro interno, um motor WEG de quatro pólos com 1,0 CV de potência foi utilizado. A rotação, adotada neste trabalho no sentido horário, era controlada por um inversor de frequência da marca WEG modelo CFW08, conforme mostrado ainda na Figura 3.10.

Para a aferição e quantificação da rotação do eixo interno, empregou-se um estroboscópio digital da marca FRATA. A Figura 3.12 apresenta o equipamento com seus acessórios. A velocidade do *flash* (lampejo da lâmpada) tem o ajuste facilitado por meio de dois potenciômetros separados (pré-ajuste e ajuste fino), permitindo analisar movimentos periódicos de alta e baixa rotação (frequência de 5 a 300 Hz).



Figura 3.12: Estroboscópio digital FRATA.

A base do motor de acionamento do eixo interno, apesar de fixa permite ajuste para os dois arranjos entre os tubos. Isso se deve ao sistema de acoplamento entre os eixos do motor e do tubo interno que foi montado sobre cabeças móveis (cruzetas), conforme detalhes na Figura 3.13.



Figura 3.13: Detalhes do acoplamento entre eixos.

Para o deslocamento do fluido, uma bomba helicoidal, marca Helifer HX-30, de deslocamento positivo foi montada sob um arranjo de válvulas, conforme visto na

Figura 3.14. Desta forma, pode-se avaliar o efeito a vazão de alimentação sob uma ampla faixa operacional (0,2 a 2,2 m³/h). A vazão de escoamento pode ser quantificada empregando-se um medidor magnético de vazão da marca CONAUT modelo 1FC03, previamente aferido (detalhes na Figura 3.15).



Figura 3.14: Arranjo da bomba helicoidal e seus acessórios.



Figura 3.15: Válvulas e medidor magnético de vazão

Para as determinações experimentais da queda de pressão, um manômetro diferencial digital da Druck modelo DPI 75r foi empregado. Assim as leituras de queda de pressão puderam ser registradas a cada 0,25 m ao longo do tubo externo. A Figura 3.16 apresenta a

montagem do sistema de monitoramento da perda de carga. A este sistema acoplaram-se duas válvulas do tipo agulha, antes dos pontos de tomada de pressão no equipamento, com o intuito de remover pequenas bolhas de ar eventualmente presentes na linha do canal de medida, conforme detalhes na Figura 3.17.

Para o arranjo excêntrico, as determinações de queda de pressão foram realizadas na seção de maior espaço anular. As distâncias dos terminais para as leituras de pressão nos dois arranjos, situaram-se a 0,44 e 1,32 m do flange de entrada. Estas distâncias foram escolhidas para permitir a condição de escoamento plenamente estabelecido e evitar a região de saída.



Figura 3.16: Sistema de queda de pressão.

O sistema de medição de pressão contava com o auxílio de um recipiente plástico que possui funções específicas: a sustentação do sensor na mesma altura que os pontos de tomada de pressão, e servir como reservatório caso ocorra a necessidade de esgotamento ou uma circulação de fluido pelo canal de medida em razão da presença de bolhas.



Figura 3.17: Detalhes do transdutor de pressão e válvulas para eliminação de bolhas.

3.2.2 Metodologia para os ensaios experimentais

O procedimento a seguir relata as rotinas empregadas para as determinações experimentais, cujo objetivo é avaliar o efeito das principais variáveis envolvidas no escoamento anular através do monitoramento da queda de pressão.

Antes do *set-up* experimental, avaliam-se as temperaturas ambiente e da suspensão polimérica a ser empregada nos ensaios. A temperatura é um parâmetro importante em função de sua influência sobre a reologia. Neste sentido, buscou-se estabelecer uma temperatura de referência (24 °C) para a realização dos ensaios; garantindo condições experimentais para os testes de reprodutibilidade e permitir uma base para os testes comparativos.

Como etapa inicial, a reologia da suspensão é avaliada empregando o viscosímetro de Brookfield®. Na sequência, adiciona-se a suspensão ao tanque de homogeneização com o uso de baldes e béqueres. Acoplando-se o impelidor ao sistema (detalhes na Figura 3.6), mantém-se a suspensão sob agitação moderada por quinze a trinta minutos para dispersar as bolhas eventualmente geradas.

Antes do acionamento da bomba helicoidal, verifica-se o posicionamento das válvulas, checam-se as abraçadeiras das mangueiras de silicone e o acoplamento do termômetro. As mangueiras de retorno são posicionadas para evitar que se dobrem, empregando conjuntos de molas de aço.

Sequencialmente ligam-se o medidor magnético de vazão e o inversor do motor do sistema de acionamento do eixo interno, deixando-o em *stand-by*. Em seguida, liga-se o sistema de bombeamento. Durante os dois primeiros minutos, avalia-se a ocorrência de vazamentos e checa-se a pressão de segurança do casco de acrílico. Uma vez cumprida a avaliação inicial, testa-se o escoamento nas condições máximas de vazão e rotação da unidade.

Novamente verifica-se o posicionamento da mangueira de retorno, com atenção para que sua extremidade esteja abaixo do nível de fluido no interior do tanque; visando a minimização da geração de bolhas.

Mantém-se o sistema ligado para a circulação do fluido pela unidade para que bolhas de ar retidas possam ser excluídas. Neste momento uma atenção especial é dada ao sistema de aquisição de dados de pressão. Liga-se o medidor e abrem-se os registros (detalhe na Figura 3.18) por cinco a dez minutos para que o fluido escoe pela linha do transdutor de pressão, eliminando dessa forma as pequenas bolhas de ar aprisionadas.

Durante o processo de pré-teste e de ajustes, acompanha-se a temperatura, que geralmente oscila dentro de uma pequena faixa de 1 a 2 °C.

Terminando o processo de verificação da unidade, inicia-se a corrida experimental ajustando-se a vazão pela combinação das válvulas de alimentação e *by-pass*. Para cada movimento no comando das válvulas, aguarda-se cerca de um minuto para a estabilização e leitura do fluxo no medidor magnético (ver detalhes na Figura 3.16).

Uma vez acertada a vazão, procede-se com a programação da rotação do eixo interno, utilizando o inversor de frequência. Com o uso do estroboscópio digital afere-se a rotação.

Depois de definida a condição de escoamento, checka-se novamente a temperatura de escoamento e acompanha-se por alguns minutos a flutuação da queda de pressão do indicador digital do transdutor de pressão. Nesse momento flutuações randômicas (altos desvios) apontam para problemas como a presença de bolhas de ar no escoamento. Como medida corretiva aumenta-se à máxima vazão ($\approx 2,4 \text{ m}^3/\text{h}$) para o interior do anular e novamente abrem-se os registros do sistema de leitura de pressão. Por cinco minutos mantém-se o procedimento para então voltar à condição programada.

Estando o sistema na condição desejada de vazão e rotação do eixo interno, faz-se a coleta dos dados do gradiente de pressão. Estes são amostrados entre intervalos de 15 segundos e anotados numa planilha. Ao final da aquisição afere-se a temperatura de escoamento. Caso esta apresente variação superior a 2°C ao valor do início do ensaio, descartam-se os dados experimentais coletados.

Outro fator de qualificação dos dados experimentais é a relação entre o desvio padrão e a sua média; os casos onde esta relação for superior a 7 % resultam na invalidação dos mesmos. Nestes casos, repetem-se as condições testadas em uma nova corrida experimental.

3.3 Unidade virtual

3.3.1 Infraestrutura computacional

Os recursos computacionais disponíveis para a realização das simulações numéricas foram dois computadores com as seguintes configurações:

- Processador Intel Pentium 4 de 3,2 GHz, com 1024 Mb de memória RAM.
- Processador Intel Pentium 4 de 3,0 GHz, com 512 Mb de memória RAM.

3.3.2 Montagem da malha computacional

Antes da implementação das simulações numéricas, deve-se proceder com o pré-processamento. Nesta etapa, definem-se as fronteiras do sistema, suas subdivisões, os tipos de interface e as faces de contorno. Para esta montagem da unidade virtual empregou-se o *software* comercial Gambit[®], versão 2.0.4.

Inicialmente foi definido o plano de dimensões para a montagem da malha. Optou-se pelo plano tridimensional em função de fatores como: a maior similaridade com a unidade experimental, a possibilidade do estudo da evolução do escoamento (comprimento de entrada) e ainda como um diferencial dos trabalhos encontrados na literatura que abordam em sua maioria o plano bidimensional.

Outra definição preliminar foi o tipo de configuração de malha a ser empregada. Embora malhas não estruturadas necessitem de menor esforço de montagem, estas requerem maiores esforços computacionais durante a simulação numérica. Visando obter situações mais otimizadas de simulação, optou-se pela configuração de malhas estruturadas.

Uma vez definidas as estratégias, partiu-se para a montagem da malha com a definição das fronteiras da unidade virtual, que seguem as reais dimensões da unidade experimental (Seção 3.2.1), conforme detalhes na Figura 3.18.

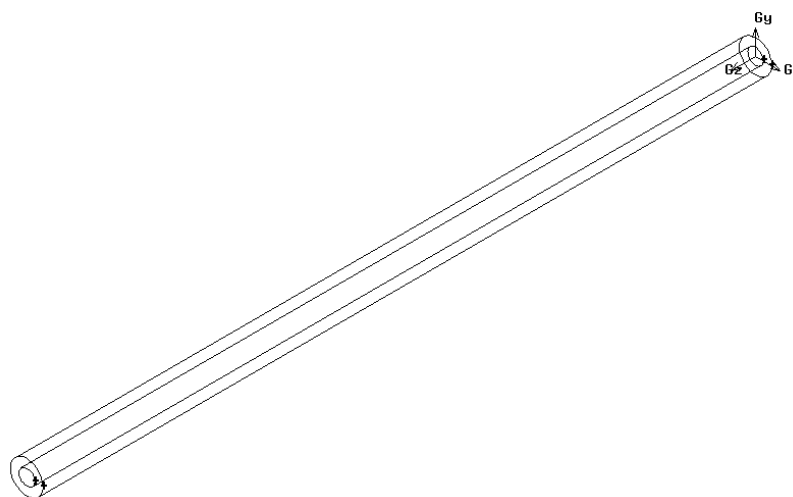


Figura 3.18: Definição das fronteiras da unidade virtual.

Para o caso excêntrico foi necessário ter o deslocamento de posição pré-calculado, pois a definição do layout entre os tubos (detalhes ampliados na Figura 3.19) tinha que ser fornecida nos primeiros comandos da montagem da geometria.

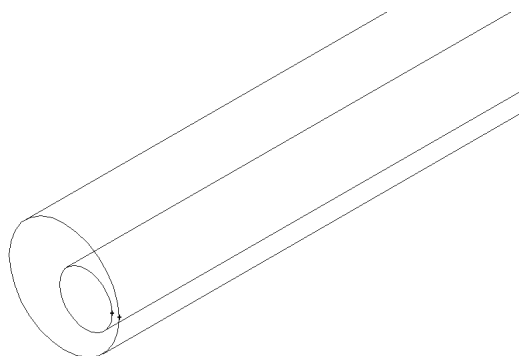


Figura 3.19: Definição do posicionamento entre tubos para $e=0,75$.

Com o intuito de melhorar a estabilidade da simulação numérica do escoamento, duas subdivisões de 100 mm foram criadas no corpo principal a partir das extremidades, para atuarem como regiões de refinamentos de malha. Estas atuam como regiões de entrada e de saída de fluxo. A Figura 3.20 apresenta em ampliação uma subdivisão quando aplicado para o arranjo excêntrico.

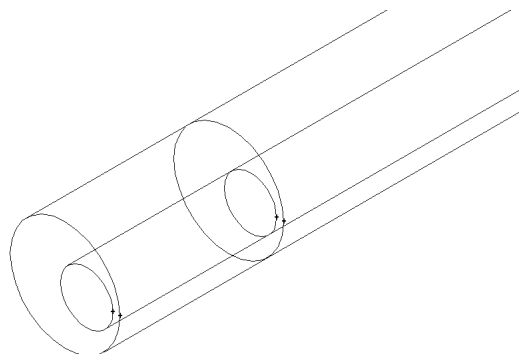


Figura 3.20: Subdivisão do corpo principal para a situação excêntrica.

Na sequência, visando uma melhor condição de ortogonalidade; divide-se a seção anular em quatro quadrantes para início da subdivisão em células. Esta estratégia foi adotada em função da ausência de simetria no caso do arranjo excêntrico; e também aplicada ao arranjo concêntrico com o intuito de manter o mesmo procedimento para ambos os casos. Uma vez definidos os quatro quadrantes, procede-se com a divisão empregando a estratégia de divisão por intervalos ao invés da divisão por dimensão fixa. Embora as duas estratégias sejam bastante similares, quando aplicadas ao caso excêntrico, a divisão por intervalos mostra maior capacidade para dividir com o mesmo número de malhas, seções de dimensões distintas. As Figuras 3.21 e 3.22 apresentam a divisão da seção circular em 60 intervalos com 15 subdivisões internas no espaço anular, fornecendo com esta configuração 900 células por face.

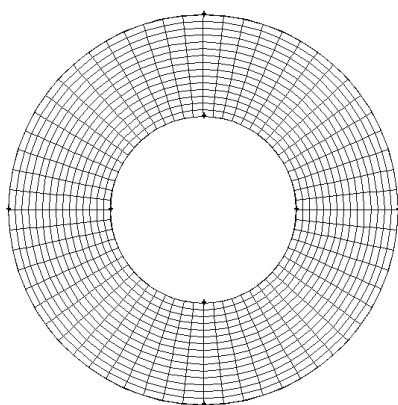


Figura 3.21: Malha da seção anular dividida em quatro quadrantes para $e=0,0$.

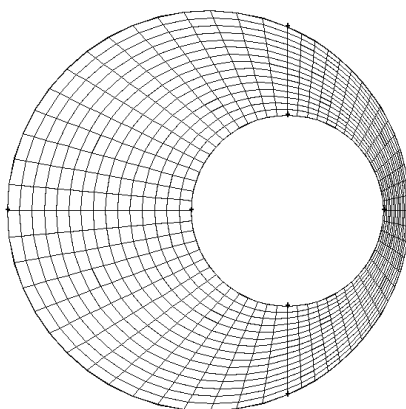


Figura 3.22: Malha da seção anular dividida em quatro quadrantes para $e=0,75$.

Com base na estrutura de divisão criada para a seção anular estende-se a divisão para as periferias dos tubos externo e interno. Para manter um fator de proporcionalidade, as divisões do tubo externo devem ser as mesmas para o tubo interno. Neste ponto, procede-se com o refinamento das regiões apresentadas na Figura 3.20 (agora com o caso concêntrico). Empregando a ferramenta de “camada limite”, pode-se criar uma seção de dimensões axiais crescentes. A Figura 3.23 apresenta a “camada limite” criada com 18 intervalos para atingir a dimensão máxima de 0,02 metros.

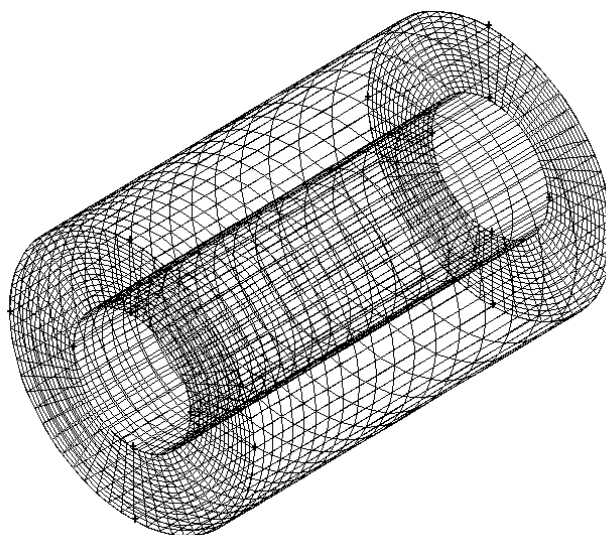


Figura 3.23: Refinamento de malha empregando a ferramenta de camada limite para $e=0,0$.

Na sequência fez-se a divisão do restante da periferia empregando intervalos fixos de 0,02 metros. A Figura 3.24 apresenta o resultado da malha das faces dos tubos externo e interno.

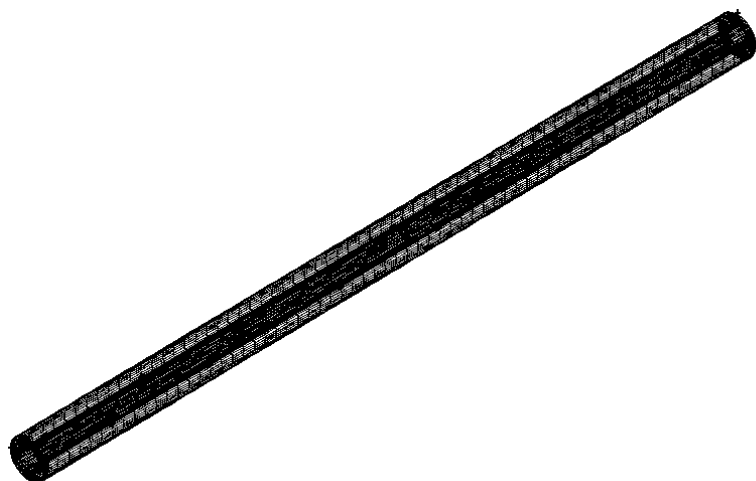


Figura 3.24: Malha dos tubos externo e interno.

Uma vez concluída as divisões das malhas das “faces” do sistema, procede-se com o fechamento da malha em um volume empregando células hexaédricas, com a estratégia de mapeamento, perfazendo um total de 92700 células, tanto para o caso concêntrico quanto para o caso excêntrico. Encerrando a etapa de pré-processamento, definem-se as “faces de contorno”, isto é, quais faces correspondem à entrada, saída, paredes e interior.

3.3.3 Metodologia para as simulações numéricas

O procedimento para a simulação numérica foi implementado com as configurações dos computadores descritos anteriormente e empregando um *software* comercial de CFD, o Fluent[®] versão 6.2.16.

Como ponto de partida, carrega-se o pré-processamento descrito anteriormente, iniciando com a configuração de modelos. Neste estudo foram definidas as seguintes condições: regime estacionário tridimensional, laminar e com estratégia de resolução segregada.

Na sequência definem-se as propriedades físicas do fluido, como sua densidade e viscosidade ou parâmetros do modelo reológico de Herschel-Bulkley para os casos não-Newtonianos.

Em outra etapa subsequente, as condições de contorno são computadas, com por exemplo: a velocidade de entrada, a pressão na saída, a posição do centro do eixo de rotação e a definição da condição de movimento de rotação do tubo interno.

Na matéria referente aos esquemas de interpolação da pressão, adotou-se a rotina PRESTO!. Enquanto para o acoplamento entre velocidade e pressão o algoritmo SIMPLEC

foi empregado. Como estratégia de discretização da equação do movimento empregou-se a rotina QUICK pela sua performance em malhas hexaédricas.

Em seguida, definem-se os critérios de convergência para os resíduos da equação da continuidade e as componentes da equação do movimento. Neste estudo, com base em parâmetros da literatura (FLUENT, 2005), adotou-se o valor de 0,0001 para todos os parâmetros.

Finalmente, a inicialização da simulação foi definida a partir da face de entrada do anular, selecionando a condição de velocidade de entrada como ponto de partida. Uma vez concluído este procedimento, acompanha-se a evolução da simulação pelo gráfico de resíduos até sua convergência.

Uma particularidade para as situações de elevadas rotações, é o processo de simulação implementado em etapas. Nesta estratégia inicia-se a simulação numérica a partir da condição de escoamento sem rotação do eixo interno, obtido os resultados pela convergência da simulação (análise dos resíduos), prossegue-se aumentando a rotação paulatinamente. Desta forma o resultado obtido é aplicado como condição inicial para o próximo incremento de rotação. Assim pode-se otimizar o processo de simulação com menor esforço computacional e com a consequente redução do tempo de simulação.

3.4 Planejamento de experimentos

A etapa de planejamento de experimentos não houve a tentativa de se representar, em escala reduzida (*scale-down*), o fenômeno de escoamento anular como é proposto por alguns autores na literatura (como por exemplo FARIA, 1995). O objetivo foi criar situações para gerar significativos gradientes de pressão pela ação de variações na rotação do eixo interno (0 a 600 RPM), na vazão de escoamento (0,2 a 2,2 m³/h), ou na viscosidade/reologia do fluido (200 a 3600 mPa.s).

Embora seja uma variável de destaque nas operações reais de perfuração (controle fluidos de formação), a pressão de bombeamento neste estudo foi estabelecida pouco acima da ambiente. Isto devido ao fato de que as fronteiras do sistema são rígidas e não há contra-fluxo de outros fluidos. Outra justificativa foi em função da escolha do material do tubo externo (acrílico cristal); motivado pelo interesse na visualização do escoamento, mas restringindo o uso de pressões mais elevadas (acima de 2,0 kg/cm²).

Os extremos do planejamento foram definidos balizados pelas capacidades máximas dos equipamentos de bombeamento e de rotação do eixo interno, isto é, 2,5 m³/h e 600 RPM.

A definição da geometria, para este estudo, apresentou um deslocamento máximo do tubo interno em relação ao externo correspondente a uma excentricidade de 0,75.

Embora o motor de acionamento do eixo interno provesse rotações maiores, a vibração causada no sistema foi um critério para limitação do nível de rotação.

Para os fluidos de trabalho foram preparadas cinco concentrações com base em resultados obtidos em testes preliminares. Na escolha destas concentrações, buscaram-se situações em que a reologia das suspensões fornecessem elevados gradientes de viscosidade. Portanto para o planejamento, a faixa de concentração de goma xantana foi estipulada de 0,25 a 0,55 %.

Dado a ampla faixa de possíveis situações experimentais pela combinação entre as variáveis investigadas, buscou-se a otimização dos ensaios experimentais implementando um planejamento de experimentos do tipo composto central. Seguindo a estratégia descrita anteriormente (Seção 2.7), montou-se um planejamento com 17 condições experimentais, sendo destas três ensaios para avaliação da reprodutibilidade no ponto central. As variáveis independentes investigadas foram: a vazão de escoamento, a rotação do eixo interno e a concentração polimérica. Para a codificação dos níveis de cada variável, empregou-se a Equação (3.1). Para a escolha do nível extremo de cada variável ‘a’, adotou-se a condição de ortogonalidade no planejamento, sendo assim o valor encontrado foi de $a=1,673$. Os níveis nominais e codificados, para cada variável são apresentados na Tabela 3.1.

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{Q(m^3/h) - 1,2 m^3/h}{0,6 m^3/h} \\ X_2 &= \frac{W(RPM) - 300 RPM}{180 RPM} \\ X_3 &= \frac{C_p(\%) - 0,4 \%}{0,09 \%} \end{aligned} \quad (3.1)$$

A posição relativa do eixo interno em relação ao tubo externo também foi objeto de estudo. Aplicou-se o planejamento proposto para duas configurações experimentais, uma com arranjo concêntrico ($e=0,00$) e outra para a configuração excêntrica ($e=0,75$), tendo como resposta a ser avaliada a queda de pressão.

Com a proposta da faixa e dos níveis das variáveis, pôde-se estimar algumas informações sobre as condições de escoamento a serem investigadas, como por exemplo: a velocidade anular média ‘ U ’, a relação entre as velocidades tangencial e axial ‘ E ’, a taxa de deformação ‘ $\dot{\gamma}$ ’, e ainda os adimensionais: número de Reynolds generalizado ‘ Re_G ’ e o número de Taylor ‘ Ta ’.

Pôde-se então verificar que devido à relação entre as velocidades tangencial e axial, em alguns casos, há uma predominância do escoamento de Couette ($E=24,65$), podendo prevalecer o perfil tangencial de escoamento. Em outros, há a predominância do outro extremo, a condição do escoamento de Poiseuille ($E=0,0$), prevalecendo o perfil axial de escoamento. Contudo, na maioria dos casos, há a contribuição dos dois tipos de escoamento.

Outro ponto observado é o baixo valor de taxa de deformação para as condições de escoamento propostas. Ressalta-se ainda, em função desta informação, os baixos valores obtidos para o número de Reynolds generalizado ($2,35 < Re_G < 45,44$), caracterizando o regime de escoamento laminar.

Em relação ao adimensional de Taylor, com valor máximo em torno de 11000, pode-se apontar a inexistência de turbulência, na qual poderiam estar presentes a deformação toroidal de escoamento e os vórtices de Taylor (CHHABRA, 1999).

Tabela 3.1: Valores nominais e codificados para as variáveis do planejamento e propriedades do escoamento.

	Vazão (m ³ /h)		Rotação (RPM)		Concentração (%)		U (m/s)	E (-)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	Re_G (-)	Ta (-)
1	-1	0,6	-1	120	-1	0,31	0,061	3,29	6,0	6,08	109
2	-1	0,6	1	480	1	0,49	0,061	13,14	23,1	6,72	2136
3	1	1,8	-1	120	1	0,49	0,184	1,10	7,8	8,61	24
4	1	1,8	1	480	-1	0,31	0,184	4,38	23,6	45,44	10838
5 (C)	0	1,2	0	300	0	0,40	0,122	4,11	14,8	14,71	998
6	-1	0,6	-1	120	1	0,49	0,061	3,29	6,0	2,35	16
7	-1	0,6	1	480	-1	0,31	0,061	13,14	23,1	14,92	10512
8	1	1,8	-1	120	-1	0,31	0,184	1,10	7,8	21,62	153
9	1	1,8	1	480	1	0,49	0,184	4,38	23,6	20,54	2214
10 (C)	0	1,2	0	300	0	0,40	0,122	4,11	14,8	14,71	998
11	-a	0,2	0	300	0	0,40	0,020	24,65	14,4	2,40	957
12	+a	2,2	0	300	0	0,40	0,225	2,24	15,7	28,26	1096
13	0	1,2	-a	0	0	0,40	0,122	0,00	3,5	5,02	0
14	0	1,2	+a	600	0	0,40	0,122	8,22	29,0	24,44	11023
15	0	1,2	0	300	-a	0,25	0,122	4,11	14,8	26,12	3149
16	0	1,2	0	300	+a	0,55	0,122	4,11	14,8	8,61	342
17 (C)	0	1,2	0	300	0	0,40	0,122	4,11	14,8	14,71	998

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, encontram-se os resultados obtidos tanto nas determinações experimentais quanto nas simulações numéricas, reportando ainda discussões sobre o efeito do comprimento de entrada para a condição de escoamento plenamente estabelecido, os principais efeitos das variáveis investigadas sobre a queda de pressão e ainda a influência da rotação do eixo interno na transição de regime de escoamento.

4.1 Propriedades físicas dos fluidos Newtonianos e não-Newtonianos

4.1.1 Densidade e viscosidade das soluções de glicerina hidratada

As soluções de glicerina empregadas como fluido de trabalho com características Newtonianas e tiveram suas viscosidades quantificadas em um viscosímetro do tipo cone-prato. Este reômetro foi acoplado a um banho termostatizado previamente calibrado, visando assegurar uma melhor precisão na reconstituição da temperatura do dia de trabalho experimental.

As densidades das soluções de glicerina foram determinadas pela técnica picnométrica. Encontram-se resumidamente na Tabela 4.1, os valores das propriedades físicas para as soluções de glicerina.

Tabela 4.1: Viscosidade e densidade das soluções de glicerina.

	Temperatura (°C)	Viscosidade (mPa.s)	Densidade (kg/m ³)
Solução 1	21,8	112,7	1197
Solução 1	23,0	102,5	1197
Solução 1	25,3	78,2	1197
Solução 2	24,1	63,9	1181
Solução 2	26,0	55,6	1181

4.1.2 Densidade e reogramas das suspensões de goma xantana

Para a quantificação das propriedades reológicas, a temperatura de referência foi ajustada em 24 °C, em função desta ser a temperatura média (23 a 25 °C) registrada durante as determinações experimentais. A Figura 4.1 apresenta os reogramas das suspensões de goma xantana empregadas nos ensaios experimentais.

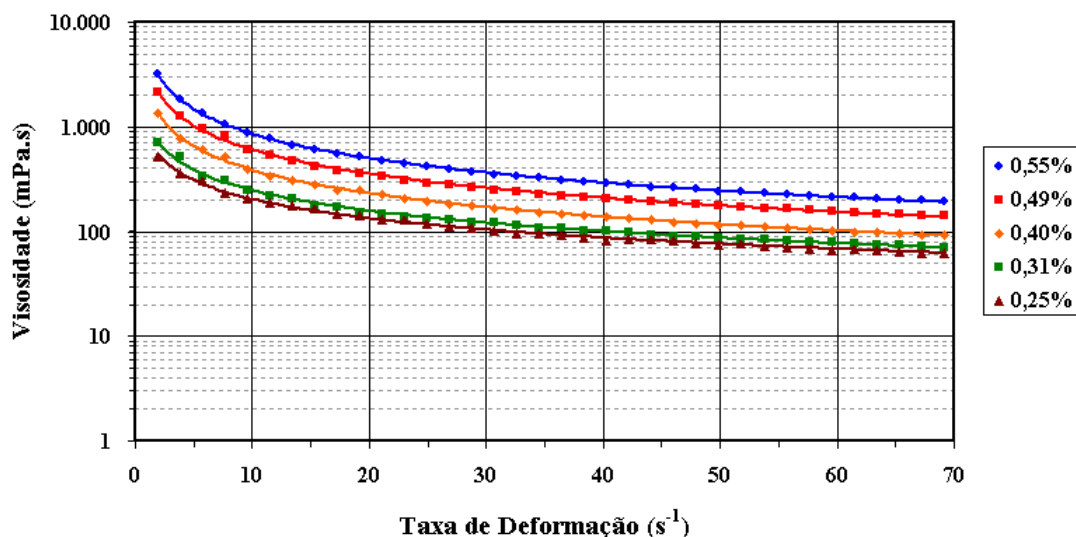


Figura 4.1: Reogramas das suspensões de goma xantana.

A densidade para as suspensões poliméricas, a partir de ensaios preliminares, pode ser considerada como o mesmo valor da densidade da água (999 kg/m^3). As concentrações de polímero foram baixas (menores que 0,55 %) o suficiente para não promover variação significativa no valor da densidade da água.

4.1.3 Efeito da temperatura

Durante os testes preliminares, a temperatura mostrou relevância em função de seu efeito sobre as propriedades reológicas dos fluidos de trabalho. Para as soluções de glicerina, pequenas variações de temperatura (1 a 2 °C) promoviam desvios de até 6,9 % no valor médio da viscosidade dinâmica.

Para as suspensões de goma xantana, constatou-se uma influência mais branda; para variações em uma faixa de 20 a 32 °C, observou-se um desvio médio na viscosidade efetiva de 9,5 % para suspensões diluídas e de 7,3 % para as suspensões mais concentradas.

Estes desvios justificam o monitoramento da temperatura durante a realização dos ensaios, sendo esta empregada como critério de validação de um resultado experimental.

4.1.4 Efeito da faixa de taxa de deformação

Na literatura, é frequente encontrar a representação reológica de fluidos não-Newtonianos em amplas faixas de taxa de deformação, como por exemplo: NOURI *et al.* (1993) com faixas de 140 a 12000 s^{-1} e ESCUDIER *et al.* (2002) com faixas de 0,5 a 1000 s^{-1} , entre outros autores.

Analisando o planejamento de experimentos proposto no Capítulo 3, os valores das taxas de deformação estimados em função de suas variáveis e na proposta de LOCKET (1992), segundo a Equação (2.39), mostraram modestos valores para a taxa de deformação quando aplicadas às condições propostas. Em termos médios de taxa de deformação encontrou-se um valor de $15,0 \text{ s}^{-1}$; sendo a condição máxima de taxa de deformação foi de $30,0 \text{ s}^{-1}$.

Esta diferença entre as ordens de grandeza de taxas de deformação pode embutir um considerável desvio ao se estimar os parâmetros de um modelo reológico (empírico) visando à aplicação em simulações numéricas.

A Figura 4.2 apresenta os dados de um reograma para uma mesma suspensão de goma xantana, 0,55 % de concentração, conduzida em duas faixas de taxa de deformação.

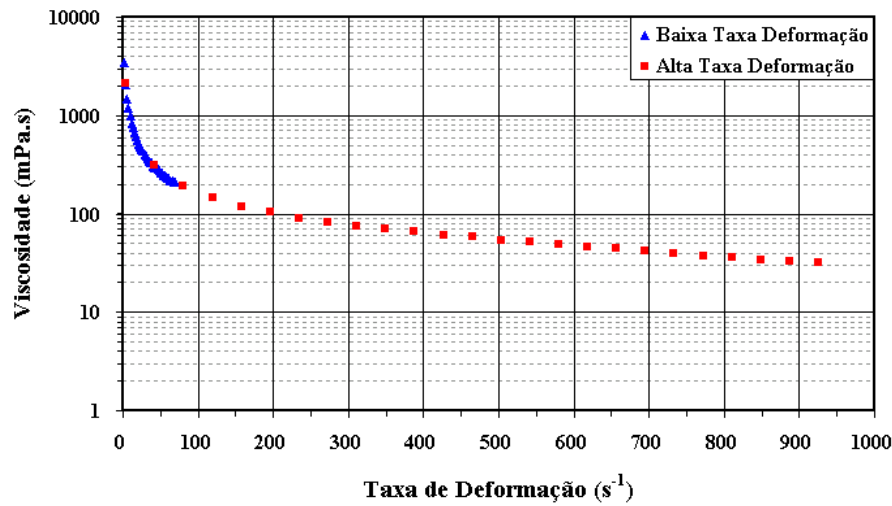


Figura 4.2: Dados reológicos da suspensão de goma xantana a 0,55 %.

Visualmente, constata-se uma continuidade entre as faixas de pontos obtidos tanto em baixas quanto em altas taxas de deformação. Embora os valores de ajuste das regressões encontrados para os dois casos sejam satisfatórios ($r^2 > 0,99$), os valores dos parâmetros do modelo *power-law* (escolha preliminar) apresentam diferenças significativas, conforme mostram as Equações (4.1) e (4.2).

Para a faixa de taxa de deformação $1,9$ a $69,1 \text{ s}^{-1}$ com ajuste (r^2) de $0,999$.

$$\mu_E = 5801,3(\dot{\gamma})^{(1-0,2099)} \quad (4.1)$$

Para a faixa de taxa de deformação $3,8$ a $925,4 \text{ s}^{-1}$ com ajuste (r^2) de $0,998$.

$$\mu_E = 5493,5(\dot{\gamma})^{(1-0,2516)} \quad (4.2)$$

Empregando-se a Equação (4.2) na predição de valores de viscosidade na faixa de taxa de deformação 1,9 a 69,1 s⁻¹, constatam-se desvios de até 12,3 % quando comparados com os resultados medidos na região de baixa taxa de deformação, sendo que o desvio médio calculado foi da ordem de 9,1 %. Observa-se que este efeito é proporcional ao caráter pseudoplástico; e para este estudo, mais pronunciado quanto maior for a concentração da suspensão de goma xantana.

Esta possível fonte de erro pode ser uma das justificativas para os desvios entre resultados obtidos experimentalmente em unidades piloto e aqueles oriundos de simulação numérica (McCANN *et al.*; 1995 e RAVI e HEMPHILL ; 2005).

No desenvolvimento deste trabalho, as propriedades reológicas das suspensões de goma xantana foram então quantificadas na faixa de aplicação do planejamento de experimentos para taxas de deformação entre 1,9 e 69,1 s⁻¹.

4.1.5 Escolha do modelo reológico

Na tentativa de reproduzir os comportamentos reológicos quantificados pelo viscosímetro, pode-se ajustar os dados com os principais modelos para fluidos não-Newtonianos, como por exemplo: *power-law* (Equação 2.5), Cross (Equação 2.7) e Herschel-Bulkley (Equação 2.14).

Uma vez testados, estes três modelos ajustaram bem os dados reológicos, mostrando coeficientes de correlação quadrática ' r^2 ' superiores a 0,98. Analisando o gráfico de resíduos como critério de seleção, verificou-se que nenhum dos modelos apresentou uma distribuição aleatória. Nesta situação, a escolha natural seria então o modelo de *power-law*, em função de sua simplicidade e ampla aplicação. Contudo, duas suspensões, as de maior concentração (0,49 % e 0,55 %), apresentaram valores de tensão inicial. Mesmo estas apresentando modestos valores quando comparado às tensões residuais de fluidos de perfuração, decidiu-se por não negligenciar seus valores. Neste sentido, a escolha do modelo reológico a ser adotado recaiu sobre a proposta de Herschel-Bulkley.

Empregando o ajuste pela equação da viscosidade a quatro parâmetros, Equação (2.14), todas as curvas reológicas (em toda faixa de concentração) mostraram coeficientes de correlação superiores a 99 %. A Tabela 4.2 apresenta os valores dos parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley obtidos por regressão não-linear (*Statistica* versão 6) a partir dos dados reológicos levantados pelo viscosímetro Brookfield® na faixa de taxa de deformação de 1,9 a 69,1 s⁻¹ e na temperatura de referência de 25 °C.

Tabela 4.2: Parâmetros reológicos do modelo de Herschel-Bulkley.

Parâmetros do modelo	Concentração em peso de goma xantana (%)				
	0,25	0,31	0,40	0,49	0,55
m	1,5889	1,6853	2,8227	7,7121	10,1939
n	0,2765	0,2699	0,2127	0,1305	0,1310
τ_0	0,6184	1,1394	2,3538	3,8422	5,7000
μ_0	0,6970	0,9787	1,6386	2,6271	3,4834

4.1.6 Efeito do tempo na qualidade das suspensões

Durante a montagem da metodologia de preparo das suspensões poliméricas, constatou-se a alta capacidade higroscópica da goma xantana, apontando a necessidade de alguns cuidados no seu armazenamento. Além deste aspecto observou-se a ação de microorganismos que atuam na decomposição das suspensões. Como ação paliativa, a adição de solução de formol se mostrou eficiente até um prazo de aproximadamente 22 dias, sendo que após este período, constatou-se o escurecimento da suspensão e o aparecimento de manchas e bolores com apreciável modificação no comportamento reológico. A Figura 4.3 apresenta o início da decomposição de uma suspensão de goma xantana a 0,55 % (com formol) após 22 dias de armazenamento.



Figura 4.3: Início da decomposição da suspensão de goma xantana a 0,55 %.

4.2 Testes preliminares de simulação numérica

Os resultados obtidos nesta parte do estudo serviram tanto para avaliações qualitativas que influenciaram na decisão do *layout* da montagem da unidade experimental, quanto quantitativas no que diz respeito à verificação da técnica de fluidodinâmica computacional frente a alguns resultados disponíveis na literatura.

4.2.1 Tipo da alimentação do fluido

Uma das contribuições da fluidodinâmica computacional foi a determinação, mesmo qualitativa, da forma de distribuição do fluxo ao longo do anular. Embora alguns trabalhos da literatura apresentem o esquema das unidades experimentais, a maioria não fornece maiores detalhes. Foram consideradas três configurações: tangencial, ortogonal e axial (clássica).

Estes arranjos foram concebidos buscando a melhor combinação para a montagem experimental entre a distribuição de fluxo e sustentação do cilindro interno.

Para o caso da alimentação tangencial, como já esperado, os resultados mostraram a influência deste tipo de alimentação nos perfis de velocidade tangencial do escoamento do fluido; aspecto indesejável por concorrer com a influência da rotação do cilindro interno sobre o escoamento.

A configuração de alimentação ortogonal, conforme detalhes da Figura 4.4, também apresentou alteração nos perfis de velocidade tangencial do escoamento, em menor escala quando comparada à alimentação tangencial, contudo seus efeitos não poderiam ser negligenciados. Um outro fator de exclusão deste arranjo de distribuição foi a presença de regiões de recirculação de fluido logo na entrada do anular; gerando perturbação no início do escoamento e dificuldades de convergência das simulações numéricas.

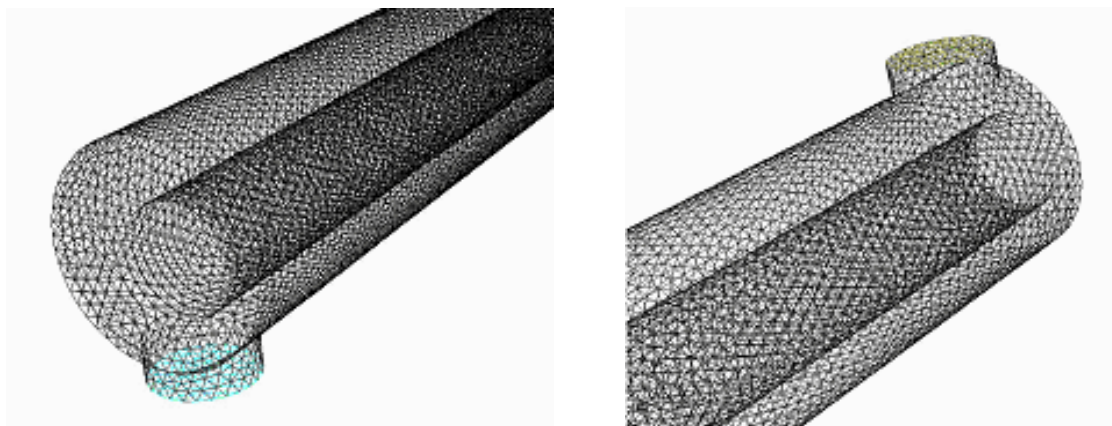


Figura 4.4: Arranjo de alimentação ortogonal do anular.

A distribuição axial mostrou ser a que menos influenciava o perfil de velocidade tangencial. Os resultados de pressão e velocidade para os três arranjos não foram planejados em função de que estes serviram apenas como base para a proposta de montagem da unidade piloto.

4.2.2 Comparação dos resultados da literatura

Com o intuito de verificar a estratégia numérica adotada neste estudo, um conjunto de simulações foi realizado com base no trabalho de ESCUDIER *et al.* (2002), no qual os autores realizaram determinações experimentais dos perfis de velocidade axial e tangencial, empregando a anemometria a laser (Laser - Doppler). Embora as informações sobre os perfis de velocidade sejam bastante detalhadas, pouco se comenta em relação às perdas de carga influenciadas por suas principais variáveis. A Tabela 4.3 apresenta duas condições estudadas experimentalmente por ESCUDIER *et al.* (2002) e que foram reproduzidas neste trabalho pelas simulações numéricas.

Tabela 4.3: Condições de simulação para verificação.

Excentricidade	U (m/s)	w (rad/s)	Viscosidade
0,00	0,203	5,24	Fluido 1
0,80	0,268	5,35	Fluido 2

4.2.2.1 Geometria anular e a malha computacional

A malha computacional foi montada reproduzindo as dimensões da unidade experimental de ESCUDIER *et al.* (2002), representado pelo arranjo de dois tubos (raios de 100 mm externo e 50 mm interno, ambos com 6,0 m de comprimento). A geometria anular, formada pelo espaço entre os dois tubos, foi configurada em dois arranjos, um com tubos concêntricos e outro com o deslocamento do tubo interno fornecendo um arranjo excêntrico ($e=0,80$).

A malha foi montada seguindo a metodologia descrita no Capítulo 3. Para a situação concêntrica, a malha possui um total de 57000 células, enquanto que para o caso excêntrico a malha possui 68400 células. O fato deste último ter um maior número de células deve-se ao maior refinamento na região de menor espaço anular. As malhas foram montadas a partir do código comercial Gambit[®] versão 2.0.4, empregando apenas células hexaédricas, conferindo ao conjunto a condição de malha estruturada.

4.2.2.2 Modelagem do escoamento

De forma análoga, o equacionamento e a modelagem do fenômeno seguiu os mesmos princípios descritos no Capítulo 3 para fluidos de comportamento não-Newtoniano. Uma particularidade, apresentada pelos autores, é em relação ao modelo de representação reológica, que seguiu uma equação com base no modelo modificado de Cross; segundo a Equação (4.3).

$$\mu_E = \frac{\mu_0}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^{1-n}} \quad (4.3)$$

Sendo que os valores dos parâmetros reológicos empregados nas simulações, foram estimados a partir dos resultados de ESCUDIER *et al.* (2002) e encontram-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Parâmetros reológicos do modelo de Cross.

Parâmetros de Cross	Fluido 1	Fluido 2
μ_0	0,1775	0,1834
λ	2,5684	0,4737
n	0,5485	0,4852

Foram ainda admitidas as seguintes hipóteses simplificadoras: o escoamento isotérmico, laminar, permanente e incompressível e de um fluido com a viscosidade efetiva ‘ μ_E ’ dependente apenas da segunda variante do tensor taxa de deformação.

4.2.2.3 Parâmetros adimensionais

Para facilitar a comparação com os casos reproduzidos, algumas informações são reportadas com base em parâmetros adimensionais, como: velocidade axial, velocidade tangencial e espaço anular.

Velocidade adimensional axial ‘ U_a ’: razão entre a velocidade axial local e a velocidade de entrada ‘ $v_{entrada}$ ’.

$$U_a = \frac{v_z}{v_{entrada}} \quad (4.4)$$

Velocidade adimensional tangencial ‘ V_a ’: relação entre a velocidade tangencial local pelo produto da velocidade angular ‘ w ’ e o raio do eixo interno ‘ R_{int} ’.

$$Va = \frac{v_{\phi}}{wR_{\text{int}}} \quad (4.5)$$

Espaço anular adimensional ' G_a ' indicando o posicionamento radial em relação ao espaço anular ' G '.

$$Ga = \frac{\text{distância radial do tubo externo ao eixo interno}}{\text{espaço anular}} \quad (4.6)$$

4.2.2.4 Parâmetros da simulação numérica

Para calcular as componentes da velocidade, as equações governantes foram integradas em cada célula da malha computacional sobre o domínio e então discretizadas seguindo a abordagem dos volumes finitos. Então estas foram linearizadas para serem resolvidas numericamente. Os cálculos foram realizados usando o esquema de discretização da pressão seguindo a rotina PRESTO, sendo que para o acoplamento de pressão-velocidade foi empregado neste trabalho o algoritmo SIMPLEC e para a interpolação da quantidade do movimento a rotina QUICK, pela sua melhor adaptação às malhas hexaédricas. O código comercial empregado para a simulação da estratégia descrita foi o Fluent[®] versão 6.2.16.

Como referência o eixo de coordenadas, foi fixado na origem do tubo interno tanto para o arranjo concêntrico quanto para o excêntrico.

4.2.2.5 Resultados preliminares

Os resultados obtidos nas simulações mostraram boa concordância com aqueles reportados na literatura. No caso do arranjo excêntrico com menor espaço anular, observou-se a região de estagnação de escoamento axial apresentada por MARTINS *et al.* (1999). Os perfis de velocidade simulados ajustaram satisfatoriamente com aqueles obtidos por ESCUDIER *et al.* (2002).

Determinação dos contornos e perfis de velocidade

Com as configurações entre os dois tubos, avaliou-se o escoamento laminar helicoidal de fluidos não-Newtonianos nas situações descritas anteriormente (Tabela 4.3). As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam resultados típicos de velocidade adimensional axial do escoamento plenamente estabelecido através de anular concêntrico e excêntrico, respectivamente.

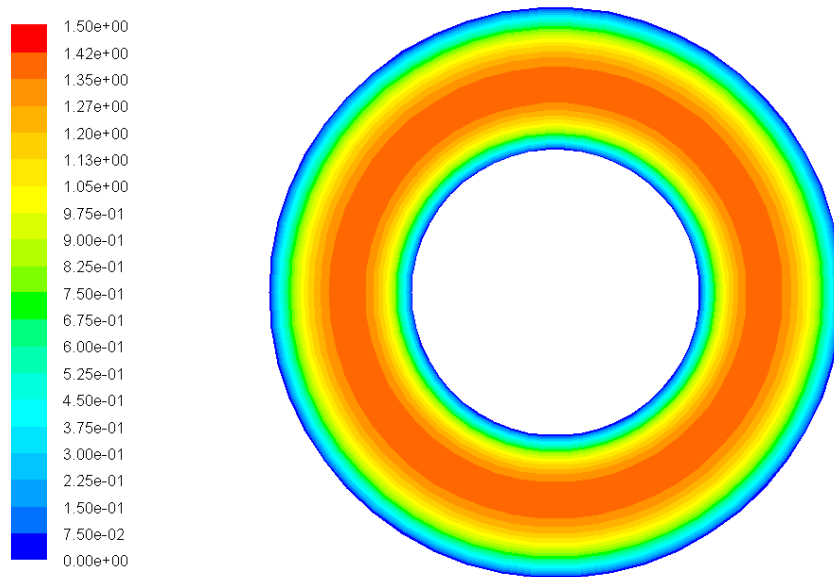


Figura 4.5: Velocidade axial adimensional na seção concêntrica.

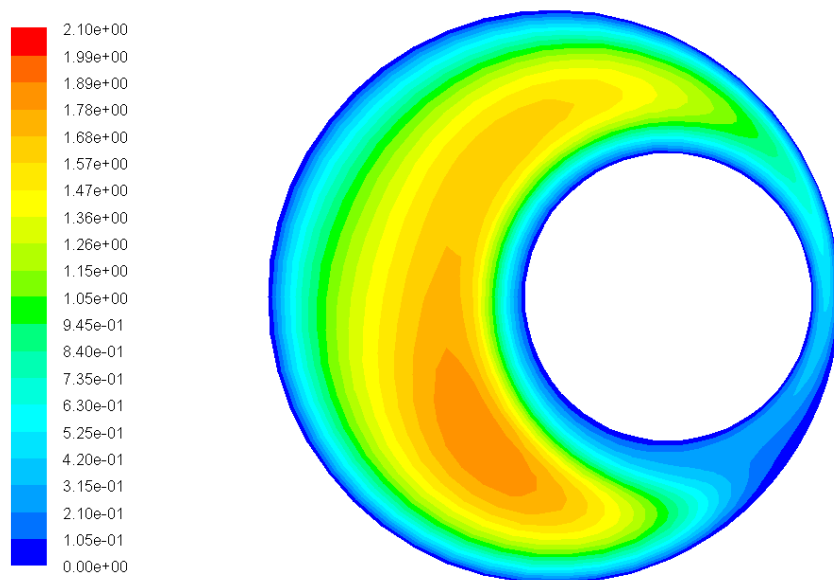


Figura 4.6: Velocidade axial adimensional na seção excêntrica.

Contudo os resultados são usualmente apresentados em de gráficos cartesianos, nos quais o eixo das abscissas do sistema é utilizado como referência. As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam os resultados para o caso concêntrico e excêntrico. Os perfis adimensionais axial ' U_a ' e tangencial ' V_a ' estão plotados em função do espaço anular adimensional ' G_a '. Cabe ressaltar que para o caso concêntrico, em função de seu plano de simetria, o espaço anular entre os tubos é o mesmo para qualquer posição; contudo para o caso excêntrico tem-se nas figuras a representação de dois espaços anulares, definidos como: '(G)maior' e '(G)menor'.

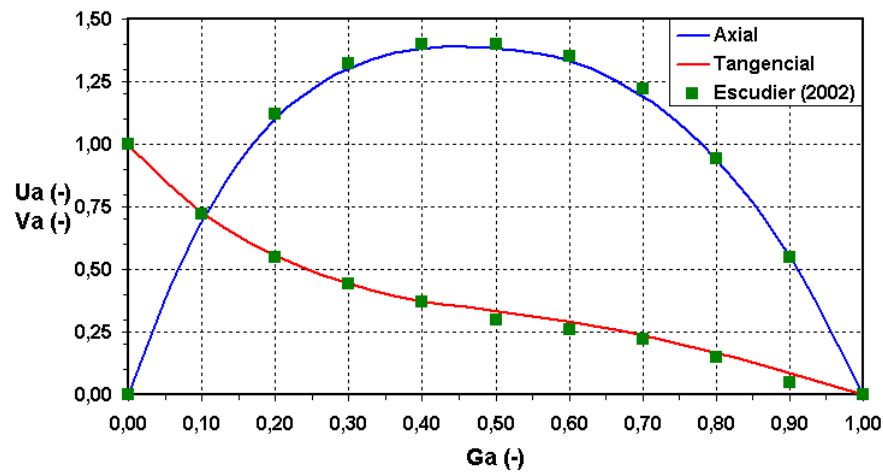


Figura 4.7: Perfis adimensionais de velocidade axial e tangencial para $e=0,00$.

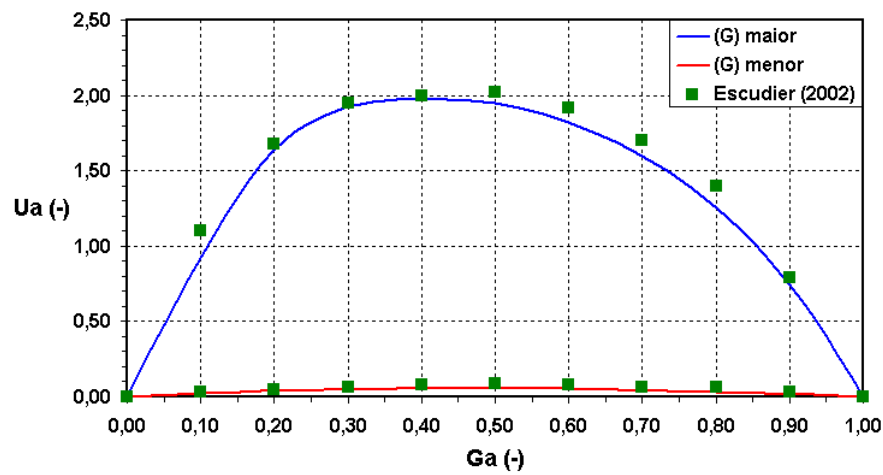


Figura 4.8: Perfis adimensionais de velocidade axial para $e=0,80$.

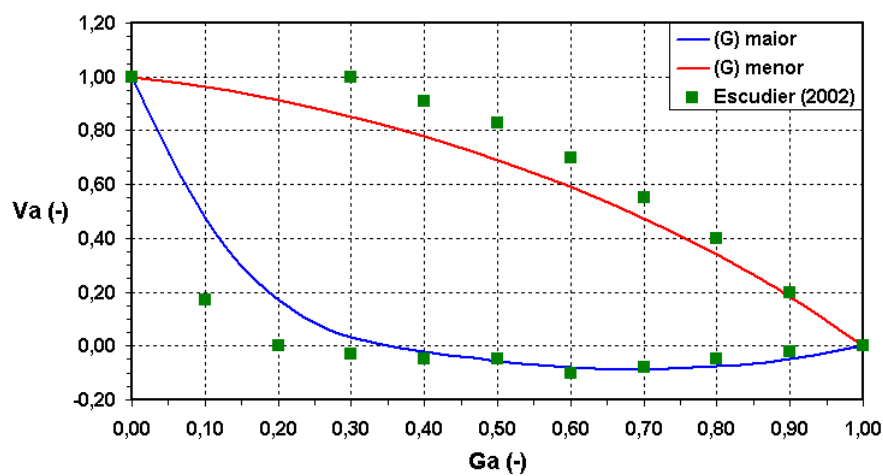


Figura 4.9: Perfis adimensionais de velocidade tangencial para $e=0,80$.

A boa concordância entre os resultados simulados e aqueles obtidos por Escudier, fundamentou os elementos empregados nas simulações, principalmente a estratégia de montagem da malha e os algoritmos empregados na estratégia de simulação segregada; ressaltando a rotina para acoplamento entre velocidade e pressão.

4.2.3 Avaliação das principais variáveis sobre a queda de pressão

Com o intuito de explorar qualitativamente os efeitos da vazão, da rotação do cilindro interno e da reologia sobre a queda de pressão, outras 34 condições foram simuladas numericamente. Este estudo foi referenciado na proposta de ESCUDIER *et al.* (2002) visando apenas um melhor entendimento do escoamento anular sobre a influência de suas principais variáveis. A Tabela 4.5 resume as condições empregadas nas simulações.

Tabela 4.5: Condições empregadas nas simulações numéricas.

e (-)	<i>U</i> (m/s)	<i>w</i> (rad/s)	Viscosidade	Re _G (-)
0,00	0,203	0,0; 2,56 e 5,24	Fluidos 1 e 2	219 a 1577
	0,406			
	0,609			
0,80	0,203	0,0; 2,56 e 5,24	Fluidos 1 e 2	
	0,406			
	0,609			

Para os casos de escoamento em arranjo excêntrico, com o Fluido 2 e com velocidade de alimentação de 0,203 m/s; tiveram os resultados com rotação do eixo interno desconsiderados. Durante a simulação, estes casos apresentaram instabilidade numérica identificada pela análise dos resíduos, principalmente para a componente da equação da continuidade.

Embora apenas duas condições num universo de 34 apresentaram problemas de convergência, estas foram indício suficiente para a verificação da estratégia numérica de todo o conjunto de dados. Não se constatou nenhum ponto de divergência entre os dois casos problemáticos com as demais situações testadas. Efetivamente, a estratégia foi a mesma para todos os casos, modificando apenas as condições de contorno (U , w e parâmetros reológicos). Neste sentido não se ateve a estas particularidades nesse momento, decidindo-se aguardar os resultados experimentais para se obter mais elementos para compor uma discussão mais abrangente sobre o fenômeno.

O estudo, via simulação numérica, do escoamento anular foi realizado sobre as determinações de queda de pressão obtidas ao longo do eixo axial. Com uma análise prévia das equações de conservação, já se esperava que a vazão (velocidade anular axial) fosse uma das variáveis com maior impacto sobre a queda de pressão e este efeito se confirmou para todas as condições testadas. Juntamente com o efeito da vazão, estão representados o efeito da rotação do eixo interno nas Figuras 4.10 ($e=0,0$) e 4.11 ($e=0,8$), ambos para Fluido 1; e de forma análoga para o Fluido 2, nas Figuras 4.12 ($e=0,0$) e 4.13 ($e=0,8$).

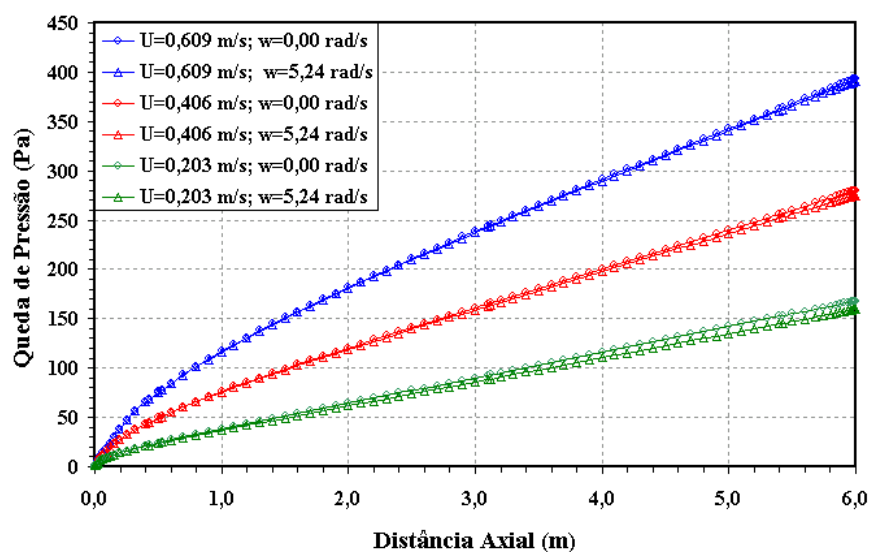


Figura 4.10: Efeito da vazão e da rotação sobre a queda de pressão para o Fluido 1 em arranjo concêntrico.

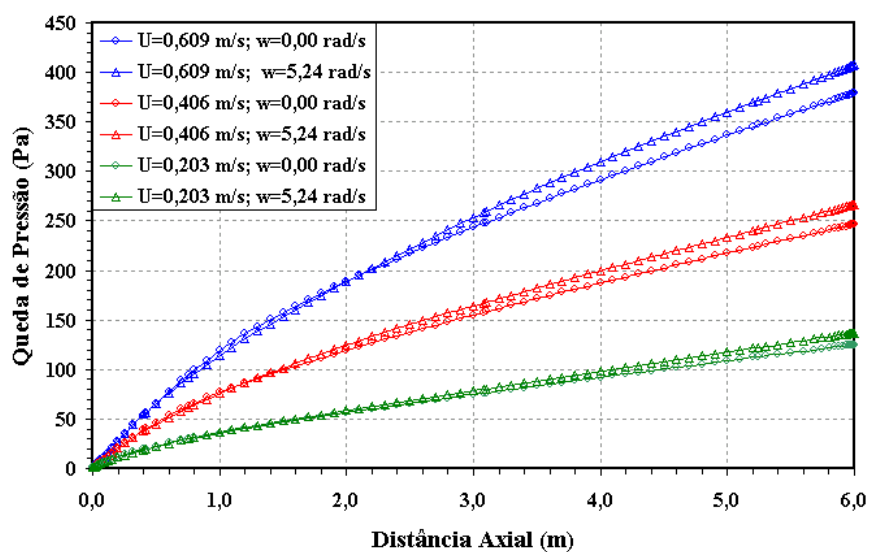


Figura 4.11: Efeito da vazão e da rotação sobre a queda de pressão para o Fluido 1 em arranjo excêntrico.

Para todos os casos simulados, o nível de rotação de 2,56 rad/s sempre se mostrou numa posição intermediária entre os casos sem rotação e com rotação de 5,24 rad/s e nos gráficos sua representação foi subtraída para facilitar a visualização dos mesmos.

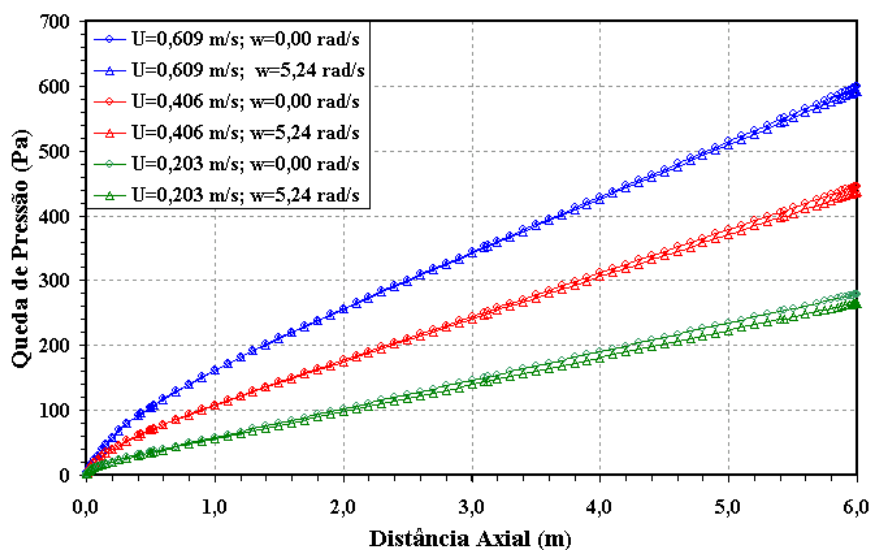


Figura 4.12: Efeito da vazão e da rotação sobre a queda de pressão para o Fluido 2 em arranjo concêntrico.

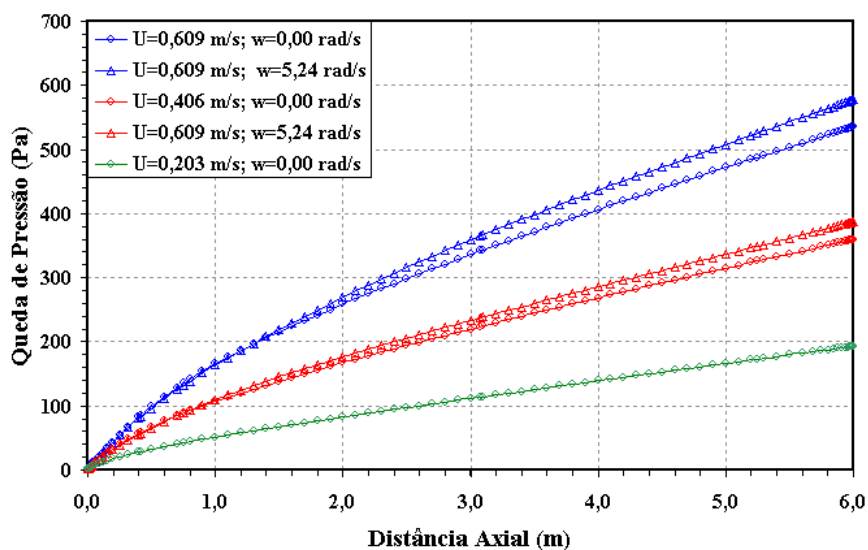


Figura 4.13: Efeito da vazão e da rotação sobre a queda de pressão para o Fluido 2 em arranjo excêntrico.

Analisando as Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13, observa-se uma inversão de tendência com o aumento da queda de pressão pelo efeito do incremento na rotação do eixo interno para o arranjo excêntrico. Este fato aponta para a necessidade de uma discussão mais aprofundada

com base em informações do campo de escoamento, com por exemplo, o comprimento de entrada.

A simulação numérica em três dimensões permitiu observar o efeito do comprimento de entrada ‘CE’ sobre o escoamento anular. Sendo esta, a distância necessária para que o fluido alcance a situação de escoamento totalmente estabelecido. A partir dos resultados de simulação, observou-se que o comprimento de entrada se mostrou mais pronunciado no caso excêntrico sendo mais sensível à ação da viscosidade do fluido (quanto menor sua consistência maior o ‘CE’) e da vazão (quanto maior a velocidade na seção anular, maior o ‘CE’). O conhecimento deste efeito revela um importante parâmetro para a estimativa do tamanho (comprimento) de unidades piloto/experimentais em função dos regimes de escoamento a serem investigados.

A Figura 4.14 apresenta um resultado numérico típico da evolução do perfil de velocidade axial na posição central do anular para o caso concêntrico. O caso representado corresponde ao Fluido 1 com uma velocidade média no anular de 0,406 m/s na ausência de rotação.

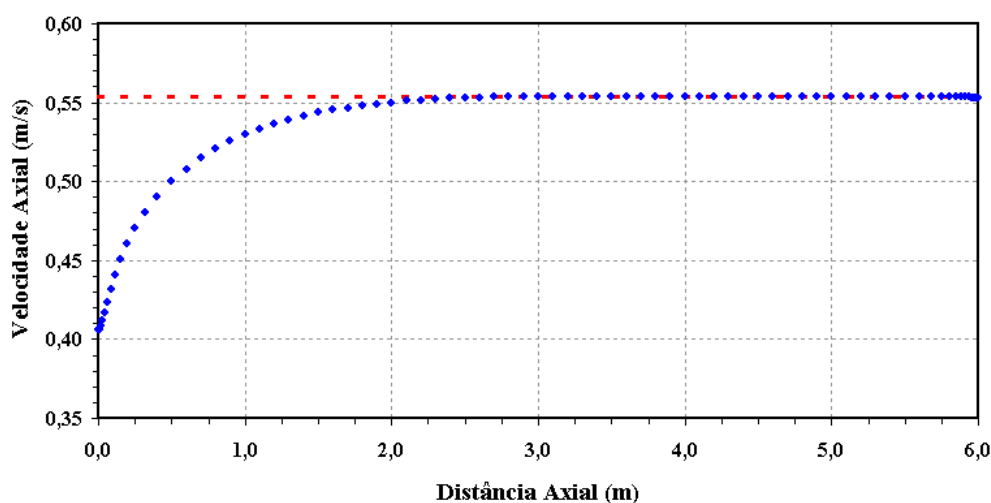


Figura 4.14: Comprimento de entrada para o escoamento do Fluido 1, nas condições de arranjo concêntrico, $U=0,406$ m/s e ausência de rotação.

Um aspecto relevante, mostra o efeito combinado da excentricidade e rotação do eixo interno em vazões maiores, exercendo uma forte alteração no comportamento da condição de escoamento plenamente estabelecido. A Figura 4.15 mostra a simulação numérica em duas condições de escoamento para o Fluido 1 com velocidade de alimentação de 0,609 m/s para dois casos: o arranjo concêntrico sem rotação e a configuração excêntrica ($e=0,8$) com rotação de 5,24 rad/s.

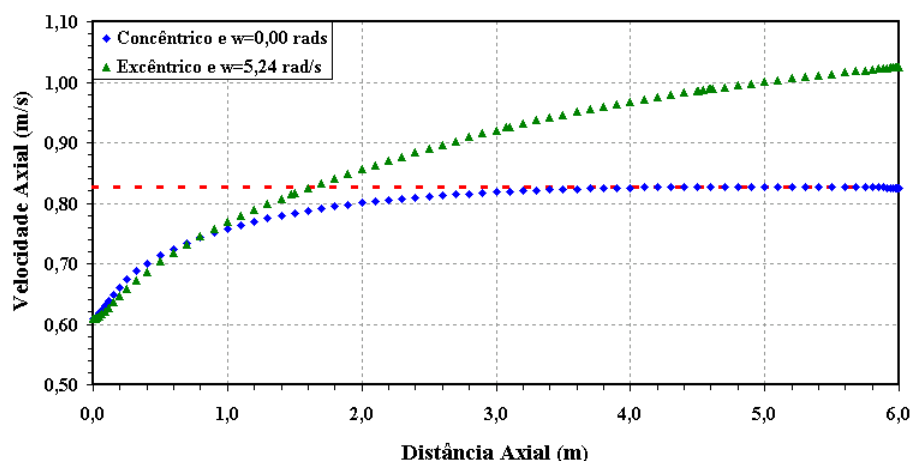


Figura 4.15: Comprimento de entrada em função da rotação e excentricidade.

Esta situação de escoamento atípica foi constatada apenas para os casos com altos fluxos no anular. Embora os resultados tenham caráter qualitativo nesta etapa do trabalho, esta constatação revela um aspecto importante a ser observado na obtenção dos dados experimentais. Este tipo de alteração no comprimento de entrada pode invalidar a condição experimental testada e se caso desconsiderada, conduzir a resultados sobreestimados sem concordância com o fenômeno físico.

Mesmo assim, pode-se avaliar para os casos concêntricos, o efeito da rotação sobre a redução da perda de carga: quanto menor for a vazão de fluido mais pronunciada será este efeito; e à medida em que se aumenta a vazão, a intensidade do efeito sobre a queda de pressão tende a diminuir até quase ser desprezível. Fatos estes concordantes com algumas informações reportadas na literatura, onde autores como McCANN *et al.* (1995) constatarem este efeito para o escoamento laminar concêntrico, observando o efeito inverso para o regime turbulento, isto é, o incremento de rotação do eixo interno acarreta um aumento da perda de carga.

Para as simulações dos casos excêntricos há algumas peculiaridades que merecem destaque. Enquanto o escoamento não está totalmente estabelecido constata-se duas situações: o incremento da rotação reduz a queda de pressão no início do escoamento. Na sequência, à medida que o fluido avança o inverso ocorre, um incremento da rotação do eixo interno provoca um aumento da perda de carga; passando a ser mais pronunciado quando maior for a vazão (o contrário do observado para os casos concêntricos).

O efeito da excentricidade mostrou em todos os casos uma redução na perda de carga quando comparadas àquelas obtidas nas mesmas condições do escoamento concêntrico. Já a viscosidade do líquido mostrou que pode ter relevância da mesma magnitude que a vazão

sobre a queda de pressão. Estes casos simulados numericamente mostraram que para o fluido mais viscoso (Fluido 2), as perdas de carga foram superiores quando comparadas àquelas obtidas com o Fluido 1 nas mesmas condições de escoamento.

4.3 Ensaios preliminares: ajustes na unidade experimental

Na etapa de ensaios preliminares, após uma primeira avaliação do escoamento anular pelo uso de técnicas de CFD, ferramentas estas que contribuíram com informações relevantes para a montagem da unidade piloto; realizou-se um conjunto de testes visando atestar experimentalmente o comportamento do fluxo anular. Os testes foram desenvolvidos com fluidos Newtonianos (soluções de glicerina) e serviram não só para o desenvolvimento de uma metodologia experimental segura, mas também para apontar os ajustes necessários no aparato experimental.

A expectativa de trabalhar com fluido Newtoniano nesta etapa justifica-se pela estabilidade da viscosidade dinâmica independente da taxa de deformação aplicada ao escoamento. Neste sentido, buscou-se avaliar as condições de reprodutibilidade. Contudo, muito dos resultados sobre as perdas hidrodinâmicas não foram planejados. A execução dos experimentos usualmente não apresentava uma tendência definida e revelavam consideráveis desvios, mesmo em situações de teste de reprodutibilidade. Estas informações, como os testes com a solução 2 de glicerina hidratada, serviram apenas como um caráter qualitativo para o desenvolvimento do sentimento físico do fenômeno.

Visando contornar estas dificuldades experimentais, alguns ajustes na montagem experimental foram realizados, como por exemplo: ajuste da mangueira de retorno, válvulas de esgotamento da linha de medição e monitoramento da temperatura de escoamento.

Como a unidade foi concebida para operação em circuito fechado, a posição do retorno de fluido ao tanque revelou ser um fator de instabilidade. A posição do retorno acima do nível de fluido no tanque, permitia que o fluxo gerasse um elevado número de bolhas. Estas ao serem bombeadas junto com a solução aquosa de glicerina causavam alterações nas propriedades físicas. Percebia-se a mudança nas condições de escoamento pelo aumento na flutuação de pressão para condições operacionais constantes (vazão e rotação). Alterando o suporte e aumentando o comprimento da mangueira de retorno, foi possível reduzir drasticamente a geração de bolhas no sistema.

Outro aspecto associado ao circuito fechado, foi o gradual aumento da temperatura de escoamento com o uso prolongado do sistema de bombeamento. O atrito causado pelo deslocamento positivo do fluido nas partes internas da unidade piloto resulta em um

incremento de sua temperatura. Testes experimentais com duração maior que quarenta minutos chegaram a causar variações de até 6 °C. Em situações operacionais constantes, à medida que a temperatura do fluido circulante aumentava, a queda de pressão no anular decrescia. Neste sentido, o tempo de ensaio experimental foi estipulado entre 15 e 20 minutos e foi incorporado à unidade um bocal para um termômetro, visando a medição em tempo real da temperatura de escoamento. Como critério de validação de um teste experimental, a variação de temperatura não poderia ser superior a 2 °C.

Uma vez ajustada a unidade piloto alguns ensaios foram conduzidos com a solução de glicerina (solução 1). Resultados dos testes para avaliar a influência da vazão e da rotação do eixo interno para o caso concêntrico podem ser observados na Figura 4.16. Estes resultados mostram a pouca influência da rotação na queda de pressão. Os valores médios mostram redução na ordem 5,1 % para um incremento de 593 RPM.

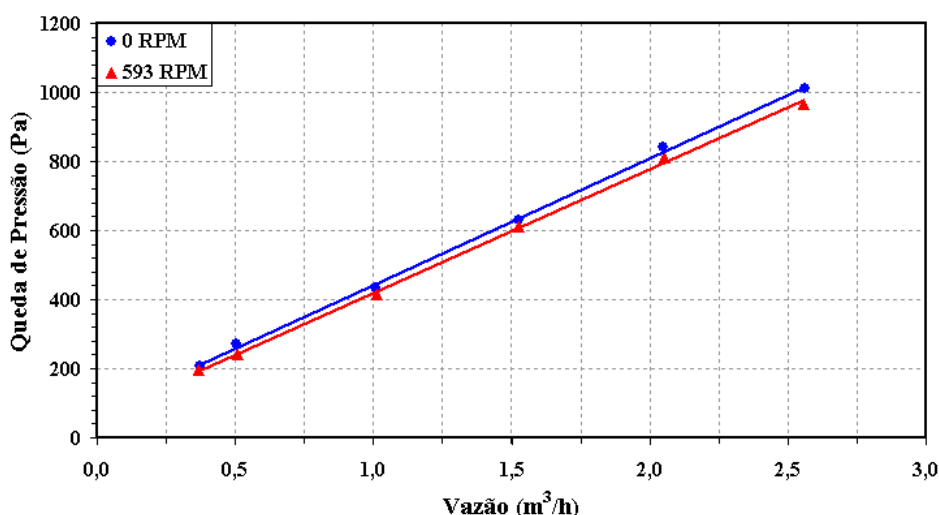


Figura 4.16: Perda de carga em função da vazão e rotação para solução de glicerina ($e=0,0$).

Algumas simulações numéricas foram implementadas para o caso concêntrico sem influência do movimento do eixo interno e revelaram um desvio médio, entre os dados experimentais e simulados, de 14,4 % para a faixa de vazão estudada (0,37 a 2,56 m³/h). Já os testes de reprodutibilidade implementados mostraram desvios inferiores a 5,0 %, comprovando a operacionalidade de unidade experimental.

4.4 Resultados experimentais

As determinações experimentais seguiram o planejamento proposto no Capítulo 3. Os ensaios foram realizados em sua maioria na parte da manhã, buscando temperaturas amenas

(inferiores a 23 °C). Neste sentido, uma vez ajustada a unidade com os devidos preparativos iniciais, a condição do fluido de trabalho estaria próximo a 25 °C. Valores acima desta referência inviabilizavam a condição de leituras e a corrida era abortada até a restauração da mesma. Foi seguido o procedimento descrito anteriormente para a aquisição dos dados de queda de pressão, a Tabela 4.6 apresenta as respostas em função das condições operacionais (nominais e codificadas) dos planejamentos, tanto para o caso concêntrico ($e=0,00$) quanto para o caso excêntrico ($e=0,75$).

Tabela 4.6: Efeitos das variáveis investigadas na resposta da queda de pressão.

	Vazão (m ³ /h)		Rotação (RPM)		Concentração (%)		ΔP (Pa)	
							$e=0,00$	$e=0,75$
1	-1	0,6	-1	120	-1	0,31	318,87	247,80
2	-1	0,6	1	480	1	0,49	550,13	465,67
3	1	1,8	-1	120	1	0,49	1026,93	746,33
4	1	1,8	1	480	-1	0,31	400,13	351,00
5	0	1,2	0	300	0	0,40	511,13	406,13
6	-1	0,6	-1	120	1	0,49	892,00	588,67
7	-1	0,6	1	480	-1	0,31	268,53	223,40
8	1	1,8	-1	120	-1	0,31	499,67	379,60
9	1	1,8	1	480	1	0,49	867,53	688,53
10	0	1,2	0	300	0	0,40	521,90	421,93
11	-a	0,2	0	300	0	0,40	250,20	215,07
12	+a	2,2	0	300	0	0,40	623,73	506,13
13	0	1,2	-a	0	0	0,40	617,33	436,53
14	0	1,2	+a	600	0	0,40	468,60	388,80
15	0	1,2	0	300	-a	0,25	351,00	247,27
16	0	1,2	0	300	+a	0,55	1170,60	857,80
17	0	1,2	0	300	0	0,40	501,90	415,60

4.4.1 Efeito da concentração

Os efeitos da concentração polimérica de goma xantana, associando indiretamente o comportamento reológico de um fluido não-Newtoniano (Figura 4.1), mostram forte influência na queda de pressão do escoamento anular. Tomando como exemplo a comparação entre as corridas 15 e 16, representando os extremos do planejamento, verifica-se um aumento de 224 % ($e=0,00$) e de 247 % ($e=0,75$) na queda de pressão para um incremento de 0,25 % para 0,55 % na concentração da goma xantana, permanecendo inalteradas (nos níveis centrais) as demais condições de vazão e rotação.

4.4.2 Efeito da vazão

Seguindo um raciocínio análogo, constata-se pela comparação entre os pontos extremos do planejamento, o marcante efeito da vazão de escoamento na queda de pressão. A comparação entre as corridas 11 e 12 revela que um incremento na vazão de 0,2 para 2,2 m³/h repercutiu na elevação da perda de carga em 149 %, para o caso concêntrico, e em 135 %, para o caso excêntrico; com as demais condições operacionais mantidas nos níveis centrais.

4.4.3 Efeito da rotação do eixo interno

A análise das corridas 13 e 14 mostra um efeito inverso ao já constatado anteriormente. O aumento no nível de rotação do eixo interno promove uma redução nas perdas hidrodinâmicas do escoamento anular. Os valores desta redução foram de 24 %, para o caso concêntrico, e de 11 % para o caso excêntrico; para um incremento de rotação de 0 a 600 RPM, considerando ainda constantes as demais variáveis. Esta variável foi a que apresentou uma menor sensibilidade em relação à queda de pressão. Uma análise mais aprofundada da mesma será realizada posteriormente na interpretação das superfícies de resposta.

4.4.4 Efeito da excentricidade

A quantificação do efeito da posição relativa do eixo interno em relação ao tubo externo não foi realizada pela comparação entre valores do planejamento de experimentos, mas entre os dois planejamentos como um todo. Nos casos testados destes planejamentos, a excentricidade causou um efeito redutor na queda de pressão no anular. A comparação entre os 34 ensaios analisados para os casos concêntricos ($e=0,00$) e excêntricos ($e=0,75$) mostrou uma redução média de 21,4 %.

4.4.5 Análise da superfície de resposta

A abordagem estatística para o tratamento dos dados dos planejamentos de experimentos permite uma visão mais abrangente, quantificando não só os efeitos isolados de cada variável, mas também suas interações.

4.4.5.1 Planejamento de experimentos para o caso concêntrico

Pela regressão múltipla, pôde-se estimar os parâmetros das variáveis codificadas: X_1 (vazão), X_2 (rotação) e X_3 (concentração); e os valores de t de Student obtidos da análise de variância da regressão para cada parâmetro. Com os valores de t de Student foram realizados testes de hipóteses, sendo que as variáveis cujos parâmetros relacionados possuem nível de

significância superior a 5 % são consideradas não relevantes e eliminadas da equação empírica. A significância do modelo foi avaliada utilizando o quadrado do coeficiente de correlação múltipla e confirmada pela realização de um teste de hipótese com a distribuição ‘F’, bem como pela análise de resíduos. A Tabela 4.7 apresenta os parâmetros significativos e os níveis de significância de cada variável codificada ajustados com um coeficiente quadrático de correlação de 0,981.

Tabela 4.7: Parâmetros da regressão múltipla para o arranjo concêntrico.

Variável	Parâmetro	D. padrão	Significância
Constante	529,58	19,92	1,31E-10
X_1	102,19	12,46	9,48E-06
X_2	-66,18	12,46	3,43E-04
X_3	236,83	12,46	3,54E-09
X_2X_3	-43,93	16,25	2,22E-02
X_1X_1	-27,04	13,18	6,74E-02
X_3X_3	88,61	13,18	5,23E-05

Com a eliminação dos parâmetros não significativos e suas respectivas variáveis, foi então encontrada a equação preditiva para a queda de pressão. A Equação (4.7) permite avaliar os efeitos de cada variável na resposta estudada, determinando assim a intensidade dessa influência.

$$\Delta P = 529,5794 + 102,1895X_1 - 66,1773X_2 + 236,8274X_3 - 43,9250X_2X_3 - 27,0424X_1^2 + 88,6123X_3^2 \quad (4.7)$$

Pela análise dos parâmetros, pôde-se observar que a concentração (X_3) apresentou maior significância, seguida da vazão (X_1) e da rotação do eixo interno (X_2). Destaca-se ainda o sinal dos parâmetros; quando positivos apontam o caráter de proporcionalidade, isto é, incrementos na variável resultam no aumento na resposta (queda de pressão). Logicamente, o sinal negativo para o parâmetro está associado ao comportamento inversamente proporcional.

As Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 reportam a interpretação visual dos resultados de superfície de resposta do planejamento concêntrico, apresentando efeitos não só de suas variáveis mas também suas interações.

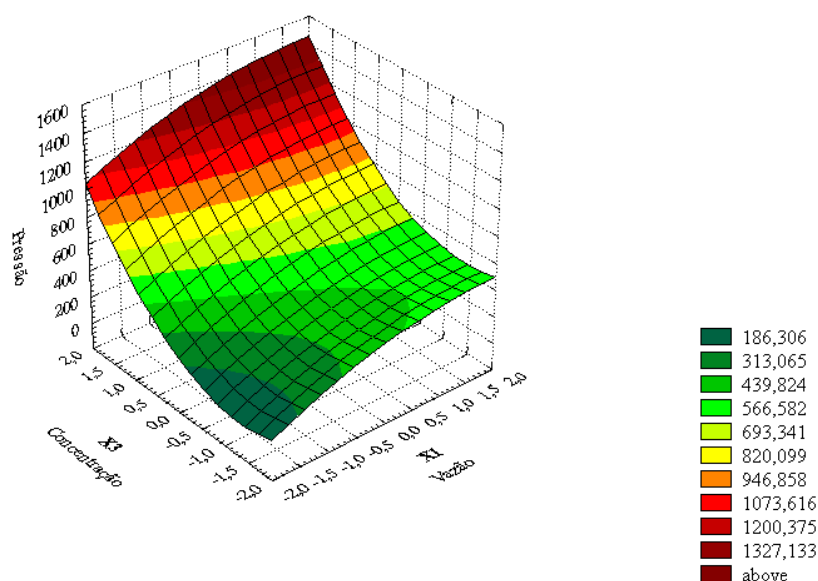


Figura 4.17: Superfície de resposta para vazão e concentração para $e=0,00$ em $X_2=0,00$.

Pode-se observar a marcante influência da concentração em todos os níveis de vazão, mostrando um comportamento contínuo para toda a superfície de resposta. Outro ponto de destaque é a elevada sensibilidade da queda de pressão para incrementos na vazão de escoamento.

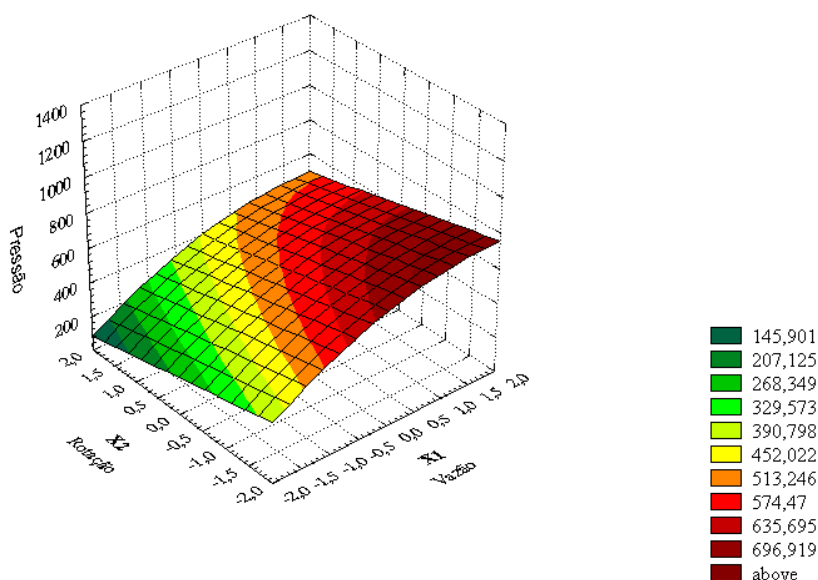


Figura 4.18: Superfície de resposta para vazão e rotação para $e=0,00$ em $X_3=0,00$.

De forma análoga constata-se os efeitos da rotação para todos os níveis de vazão, na qual seu incremento acarreta uma redução na resposta da queda de pressão ao longo da contínua superfície de resposta.

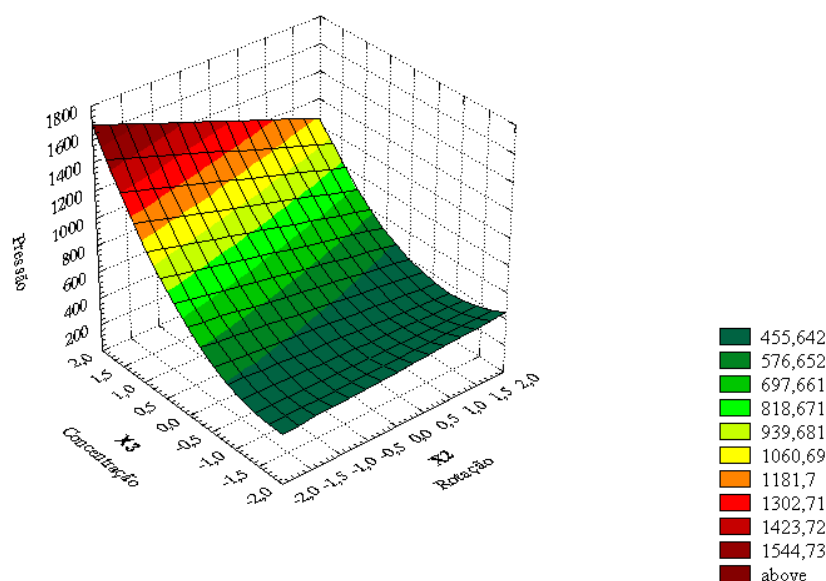


Figura 4.19: Superfície de resposta para rotação e concentração para $e=0,00$ em $X_1=0,00$.

Analisando a superfície de resposta para os efeitos da rotação e concentração, percebe-se que a concentração polimérica exerce um papel dominante sobre os efeitos na queda de pressão. Observa-se também na Figura 4.19, o efeito de interação entre as variáveis rotação e concentração, definida na Equação (4.7) pelo parâmetro relacionado a X_2X_3 . Esta interação fica evidenciada ao analisar o efeito da rotação em níveis elevados e reduzidos de concentração. Para os maiores níveis de concentração, um incremento na rotação diminui a queda de pressão, enquanto para concentrações mais baixas, observa-se, mesmo em menor escala, um comportamento inverso.

Análise Canônica

Com a equação ajustada para o caso concêntrico, foi realizada uma análise canônica da superfície ajustada, conforme detalhado anteriormente (Seção 2.8). As raízes características obtidas da matriz resultante da Equação (4.7) foram as seguintes: $\lambda_1 = -25,93$; $\lambda_2 = 12,44$; $\lambda_3 = 99,14$. Com base nestas raízes, pôde-se compor a expressão canônica, conforme a Equação (4.8). Observa-se neste resultado, que apenas duas raízes características foram positivas, não caracterizando portanto, a existência de um ponto de mínimo para a queda de pressão. Entretanto, a partir desse resultado é possível explorar regiões que otimizem (minimizem) a resposta.

$$\Delta P = 416,93 - 25,93w_1^2 + 12,44w_2^2 + 99,14w_3^3 \quad (4.8)$$

A constante 416,93 foi obtida a partir do cálculo da resposta no ponto estacionário ' $\underline{x}_0$ ', que seria a nova origem do eixo de coordenadas na transformação canônica. Para encontrar as condições ótimas (mínimas) para a resposta, a partir da Equação (4.8), deve-se fazer com que as variáveis canônicas w_2 e w_3 sejam nulas. Na sequência, são atribuídos valores para w_1 e calculados a resposta e os respectivos valores de X_1 , X_2 e X_3 , por meio da matriz M , Equação (2.106). Seguindo este procedimento até encontrar valores de w_1 que minimizem a resposta e que esteja dentro da região experimental. Foi elaborada uma rotina em *Maple* versão 7, para este procedimento, sendo que as condições ótimas obtidas foram: 0,2 m³/h; 289 RPM e 0,29 %, correspondendo a uma queda de pressão de 126,13 Pa.

Observa-se que este resultado está coerente com a análise das superfícies de resposta, ou seja, baixos valores de queda de pressão para as duas variáveis (concentração e rotação).

4.4.5.2 Planejamento de experimentos para o caso excêntrico

De forma análoga, apresentam-se os resultados obtidos por regressão múltipla para o planejamento do arranjo excêntrico. Os dados mostram não só a mesma tendência que o planejamento concêntrico como fornecem um coeficiente de correlação quadrática de 0,991. A Tabela 4.8 apresenta os valores dos parâmetros para as variáveis codificadas, os desvios padrão e os respectivos níveis de significância.

Tabela 4.8: Parâmetros da regressão múltipla para o planejamento do arranjo excêntrico.

Variável	Parâmetro	D. padrão	Significância
Constante	417,41	9,90	1,19E-11
X_1	82,87	6,20	3,04E-07
X_2	-23,06	6,20	4,75E-03
X_3	169,78	6,20	5,56E-10
X_1X_3	15,14	8,08	9,36E-02
X_2X_3	-15,98	8,08	7,94E-02
X_1X_1	-16,25	6,55	3,50E-02
X_3X_3	52,30	6,55	2,26E-05

Com a eliminação dos parâmetros não significativos e suas respectivas variáveis, foi então encontrada a equação preditiva para a queda de pressão. A Equação (4.9) permite avaliar os efeitos de cada variável codificada na resposta estudada, determinando assim a intensidade dessa influência.

$$\Delta P = 417,4062 + 82,8663X_1 - 23,0642X_2 + 169,7807X_3 + 15,1417X_1X_3 - 15,9450X_2X_3 - 16,2483X_1^2 + 52,2993X_3^2 \quad (4.9)$$

As Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 reportam os resultados da superfície de resposta do planejamento do arranjo excêntrico, apresentando efeitos das variáveis. Ressaltando a concordância não só de tendências entre os planejamentos concêntrico e excêntrico, mas também em relação à ordem de grandeza e os sinais dos parâmetros estimados.

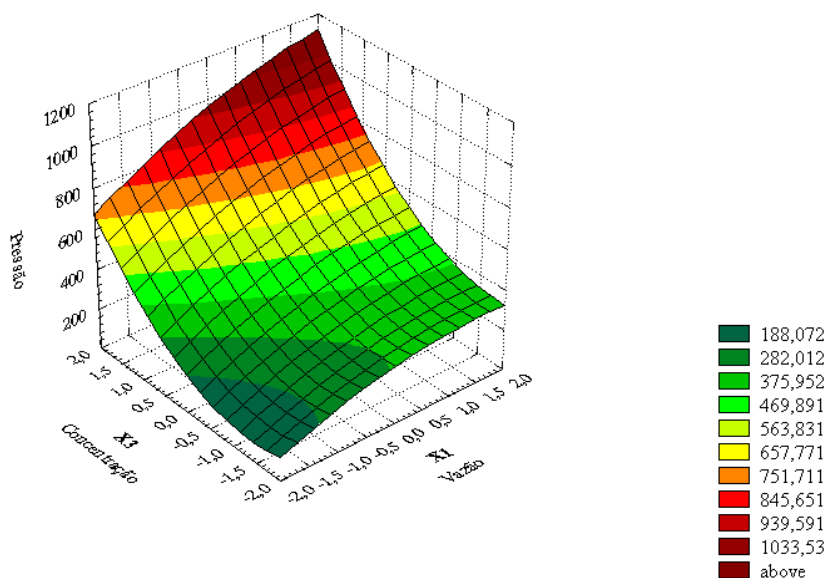


Figura 4.20: Superfície de resposta para vazão e concentração para $e=0,75$ em $X_2=0,00$.

De forma análoga ao planejamento concêntrico, pode-se destacar a influência da concentração em todos os níveis de vazão, mostrando na superfície de resposta um comportamento marcante para concentrações mais elevadas.

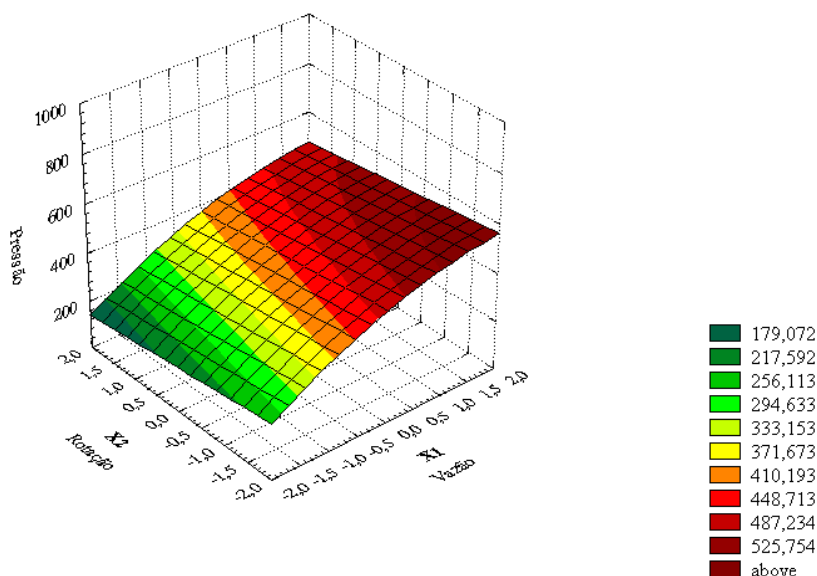


Figura 4.21: Superfície de resposta para vazão e rotação para $e=0,75$ $X_3=0,00$.

Seguindo esta linha de raciocínio, verifica-se o efeito da rotação para a maioria dos níveis de vazão, onde seu incremento acarreta uma redução na resposta da queda de pressão ao longo da superfície de resposta.

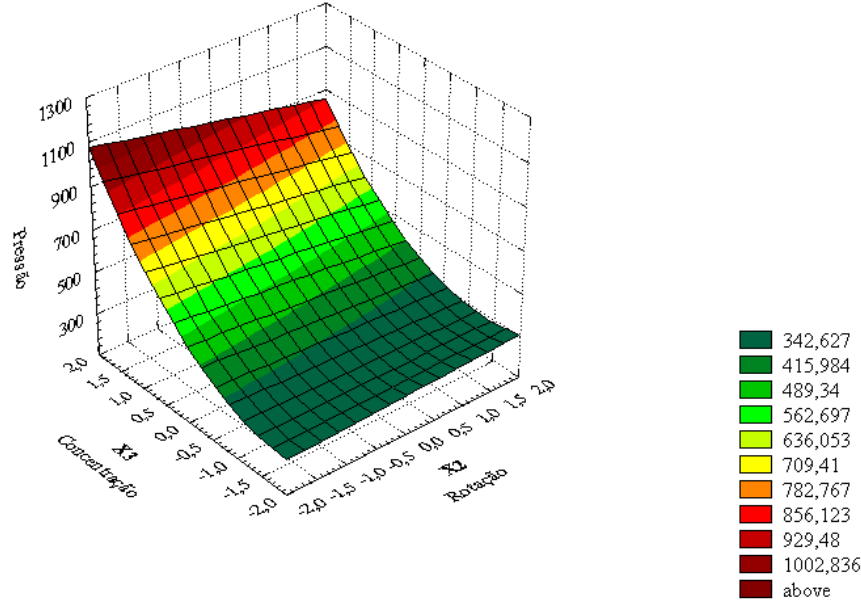


Figura 4.22: Superfície de resposta para rotação e concentração para $e=0,75$ $X_1=0,00$.

Similarmente ao caso concêntrico, constata-se que em altas concentrações de polímero o incremento da rotação do eixo interno traduz na redução da queda de pressão; ao passo que em baixas concentrações há a tendência que o aumento da rotação do eixo não reflete na redução na perda de carga. Deve-se este efeito na superfície de resposta às inter-relações entre as variáveis X_2 e X_3 , conforme apresentado na Equação (4.9).

Análise Canônica

Analogamente à análise canônica para o caso concêntrico, determinaram-se as raízes características obtidas da matriz resultante da Equação (4.9) sendo estas: $\lambda_1 = -17,21$; $\lambda_2 = 3,31$; $\lambda_3 = 55,18$; e com base nestas raízes, pode-se compor a equação canônica, conforme a Equação (4.10). Observa-se neste resultado, que similarmente ao arranjo concêntrico apenas duas raízes características foram positivas, confirmando a não existência de um ponto de mínimo para a queda de pressão. Entretanto, a partir desse resultado é possível explorar regiões que minimizem a resposta.

$$\Delta P = 302,44 - 17,21w_1^2 + 3,31w_2^2 + 55,18w_3^3 \quad (4.10)$$

A constante 302,44 foi obtida a partir do cálculo da resposta no ponto estacionário ' x_0 ', que seria a nova origem do eixo de coordenadas na transformação canônica.

Para encontrar as condições ótimas (mínimas) para a resposta, a partir da Equação (4.10), empregou-se a mesma estratégia apresentada anteriormente. As condições mínimas encontradas dentro da faixa do planejamento de experimentos foram: 0,2 m³/h; 62 RPM e 0,25 %, correspondendo a uma queda de pressão de 134,4 Pa.

Observa-se que este resultado está coerente com a análise das superfícies de resposta, ou seja, baixos valores de queda de pressão para as duas variáveis (concentração polimérica e rotação).

4.5 Simulação numérica das condições experimentais

A avaliação via simulação numérica das condições testadas nos planejamentos de experimentos permitiu reforçar a verificação dos modelos matemáticos adotados e das rotinas empregadas na estratégia de simulação segregada, principalmente para os algoritmos de acoplamento pressão-velocidade e as rotinas de discretização.

Com a verificação da resposta em termos da queda de pressão, pretende-se estender a análise para os elementos do campo de escoamento no anular (*flowfield*), como o comprimento de entrada, os perfis axiais de queda de pressão e as informações sobre os contornos e perfis de velocidade (axial e tangencial).

4.5.1 Avaliação do comprimento de entrada

Durante a etapa de simulações numéricas preliminares (descrita anteriormente na Seção 4.3), pôde-se constatar a importância do comprimento de entrada para o estudo do desenvolvimento do escoamento laminar. Da literatura, autores como CHEBBI (2002), já apontavam para as diferenças desta variável entre fluidos Newtonianos e não-Newtonianos.

Pode-se constatar, com auxílio da técnica de CFD, que as determinações experimentais de queda de pressão estão dentro da região de escoamento plenamente estabelecido. A Figura 4.23 apresenta um resultado típico, para a condição de escoamento 2,2 m³/h com rotação de 300 RPM e concentração polimérica de 0,40 % (ensaio número 12 dos planejamentos), tanto para o caso concêntrico quanto para o excêntrico. Esta condição foi escolhida por ser a de maior valor de comprimento de entrada dentre as condições testadas.

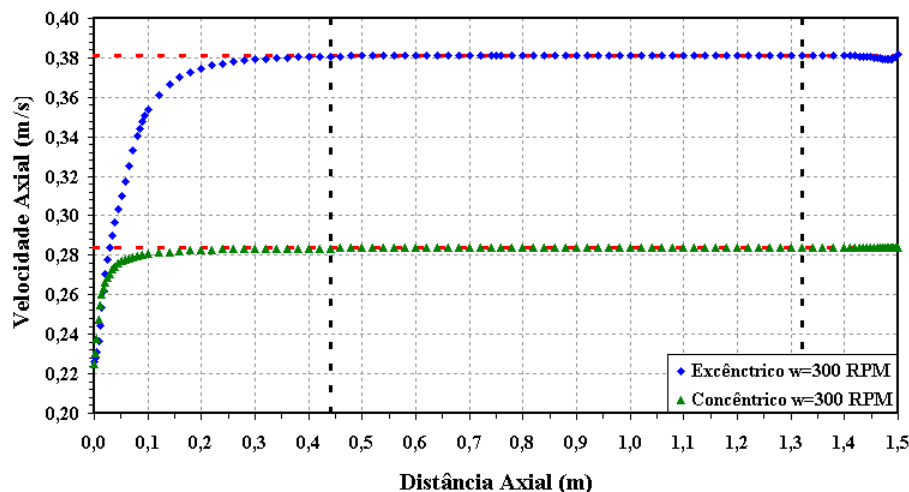


Figura 4.23: Comprimento de entrada para o ensaio número 12 dos planejamentos.

Pode-se destacar a influência da excentricidade na ordem de grandeza do perfil de velocidade axial e também na evolução da condição de escoamento plenamente estabelecido. Observa-se a que entre os pontos representados pelas linhas verticais pontilhadas, a 0,44 m e 1,32 m de comprimento, a velocidade permanece inalterada. Estas posições correspondem à posição dos pontos de leitura de pressão na unidade piloto para as determinações experimentais.

Os resultados de comprimento de entrada das condições simuladas seguindo os planejamentos concêntrico e excêntrico estão apresentados no Apêndice B.

4.5.2 O perfil axial de queda de pressão

Os dados do perfil de queda de pressão foram os pontos de comparação com os testes experimentais. Pela simulação numérica, pode-se determinar os valores de pressão estática junto à parede do tubo externo ao longo de sua extensão. Os valores de queda de pressão foram obtidos tomando como valor referencial a pressão estática na entrada no anular. As condições em que ocorreram o aumento na perda de carga, avaliadas experimentalmente, foram também observadas nas simulações numéricas; destacando os efeitos da concentração polimérica e da vazão de escoamento. A Figura 4.24 representa os ensaios 15, 16 e 17 ressaltando os efeitos da concentração de goma xantana, quando mantidas constantes a vazão em $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$ e a rotação em 300 RPM para o caso concêntrico.

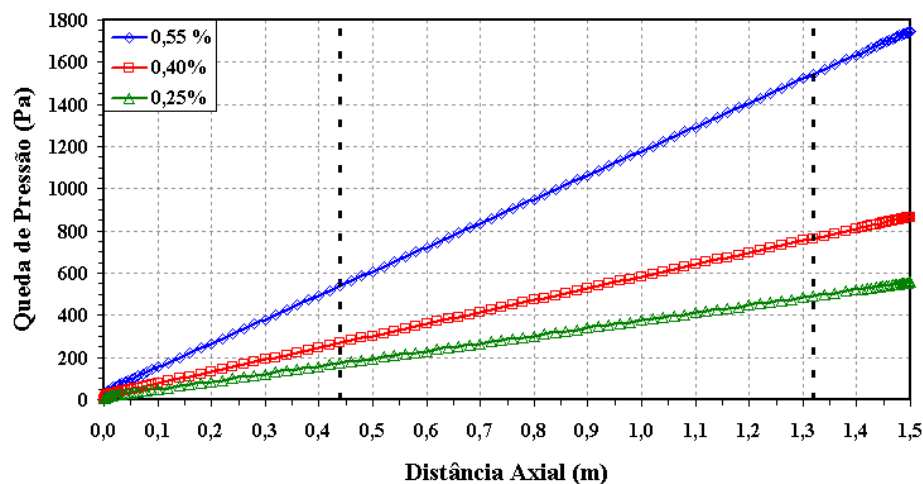


Figura 4.24: Efeitos da concentração polimérica nos ensaios 15, 16 e 17, para $e=0,00$.

Destacam-se os pontos representados pelas linhas verticais pontilhadas, a 0,44 m e 1,32 m de comprimento, com sendo as duas posições onde foram determinadas as quedas de pressão simuladas visando a comparação com os dados obtidos experimentalmente.

De forma análoga os ensaios 11, 12 e 17 apresentados na Figura 4.25, tem-se a influência da vazão sobre as perdas hidrodinâmicas quando inalteradas a concentração polimérica (em 0,40 %) e a rotação (em 300 RPM), também para o caso concêntrico.

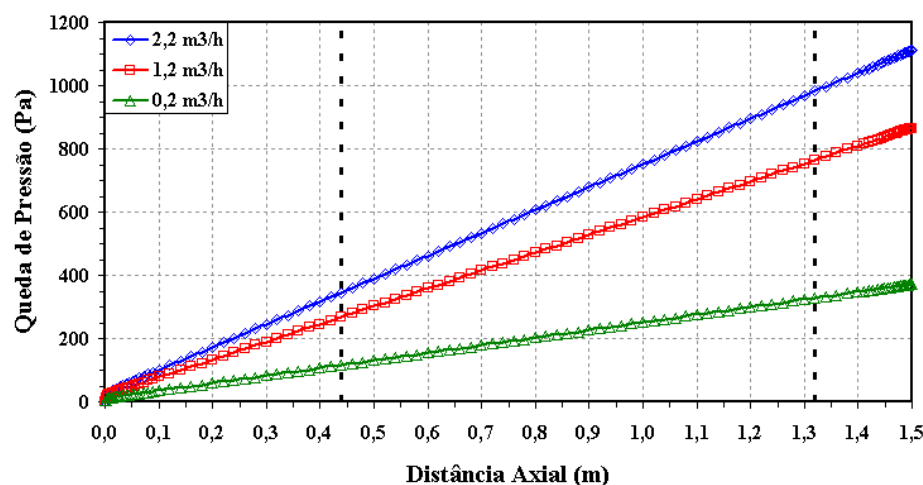


Figura 4.25: Efeitos da vazão nos ensaios 11, 12 e 17, para $e=0,00$.

Os efeitos da rotação, preditos pela simulação numérica foram concordantes com as tendências das determinações experimentais. A Figura 4.26 apresenta um resultado típico da redução na queda de pressão influenciada pela rotação do eixo interno, conforme os ensaios 10, 13 e 14 do planejamento para o caso concêntrico; mantendo-se constantes a vazão em $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$ e a concentração polimérica em 0,40 %.

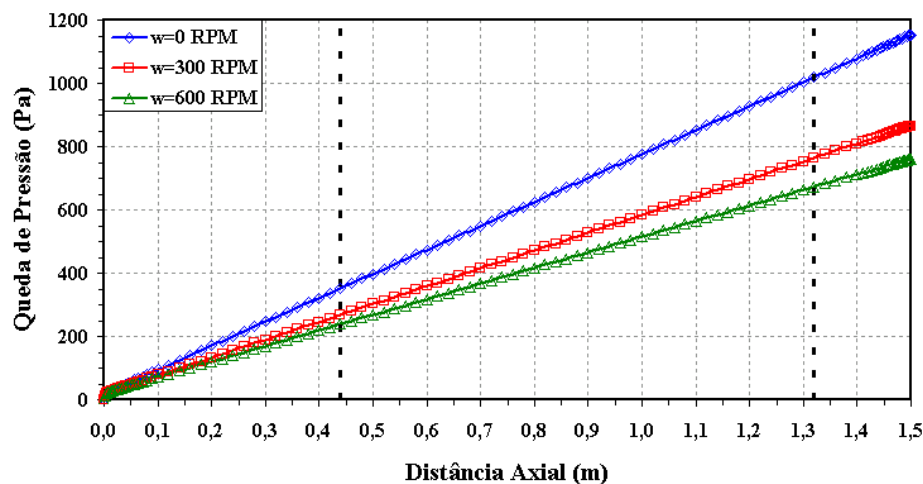


Figura 4.26: Perfil de queda de pressão para os testes 10, 13 e 14 para $e=0,00$.

Destaca-se que os resultados para o planejamento do arranjo excêntrico apresentaram a mesma tendência, e os perfis de queda de pressão para as condições testadas estão disponibilizados no Apêndice B.

Em termos quantitativos, os resultados obtidos da simulação numérica também mostraram concordância com os dados experimentais nos dois planejamentos, apontando desvios médios de 3,3 % para os casos concêntricos e de 3,2 % para os casos excêntricos. A Figura 4.27 resume a variação entre os valores de queda de pressão experimentais e simulados numericamente.

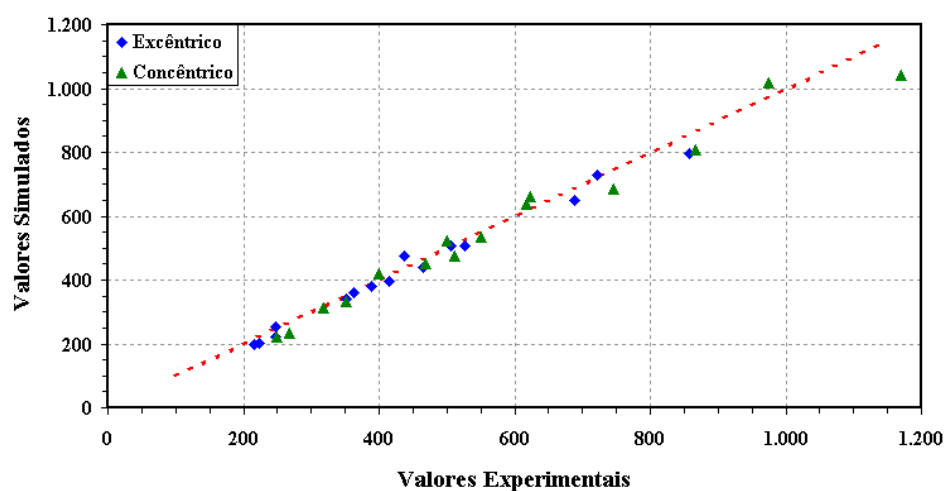


Figura 4.27: Comparação da queda de pressão para valores experimentais e simulados.

Pode-se observar uma leve tendência dos valores simulados serem predominantemente menores que os valores experimentais. Mesmo assim, prevalece a boa concordância dos resultados provenientes das duas técnicas utilizadas.

4.5.3 Contornos e perfis de velocidade

Uma vez constatada a aplicabilidade da estratégia de CFD pela concordância entre os dados de queda de pressão simulados e experimentais, criam-se as condições para estender a análise do comportamento do campo de escoamento através do anular avaliando os efeitos das componentes da velocidade.

4.5.3.1 Contornos de velocidade axial

Este tipo de informação representa a componente da velocidade em uma dada seção ao longo do eixo axial do tubo. Para este estudo adotou-se a seção a 1,32 m da origem. Esta escolha baseou-se no fato de ser uma das regiões de determinações experimentais e estar na condição de escoamento plenamente estabelecido e ainda recebendo pouca influência da região de descarga.

Para a quantificação dos valores na seção, empregou-se a mesma estrutura da malha descrita anteriormente.

O efeito da concentração polimérica é pouco percebido nesta parte do estudo, contudo os contornos de velocidade axial são influenciados pela vazão de escoamento e da rotação do eixo interno. As Figuras 4.28 e 4.29 apresentam um resultado típico do efeito da vazão de escoamento; nestes seguem os ensaios 11 ($0,2 \text{ m}^3/\text{h}$) e 12 ($2,2 \text{ m}^3/\text{h}$) do planejamento para o caso concêntrico; mantidas em 0,40 % e 300 RPM. Embora já citados anteriormente, estas condições agora comprovam o efeito da vazão de escoamento sobre uma das componentes da velocidade.

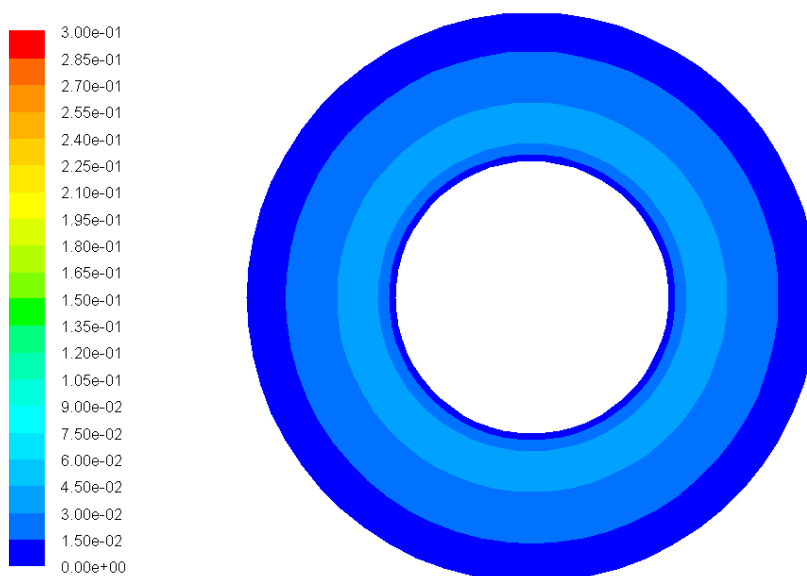


Figura 4.28: Contornos da velocidade axial para a condição 11 do planejamento concêntrico.

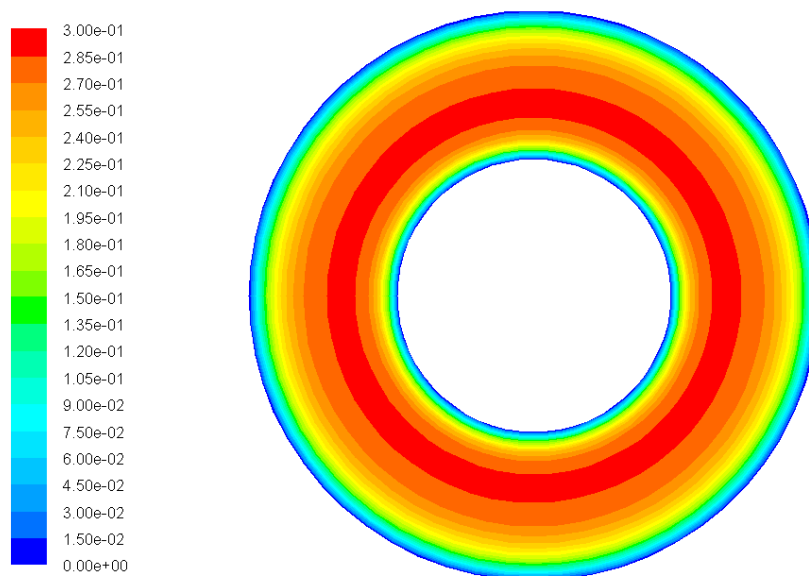


Figura 4.29: Contornos da velocidade axial para a condição 12 do planejamento concêntrico.

Nestas condições, percebe-se a tendência e a intensidade da esperada influência da vazão sobre a distribuição da velocidade axial pelo anular.

Outra condição experimental comentada anteriormente, os ensaios 13 (0 RPM) e 14 (600 RPM), apresentam os efeitos da rotação sobre os contornos de velocidade axial; quando a concentração permanece em 0,40 % e a vazão em 1,2 m³/h para o caso concêntrico, conforme as Figuras 4.30 e 4.31.

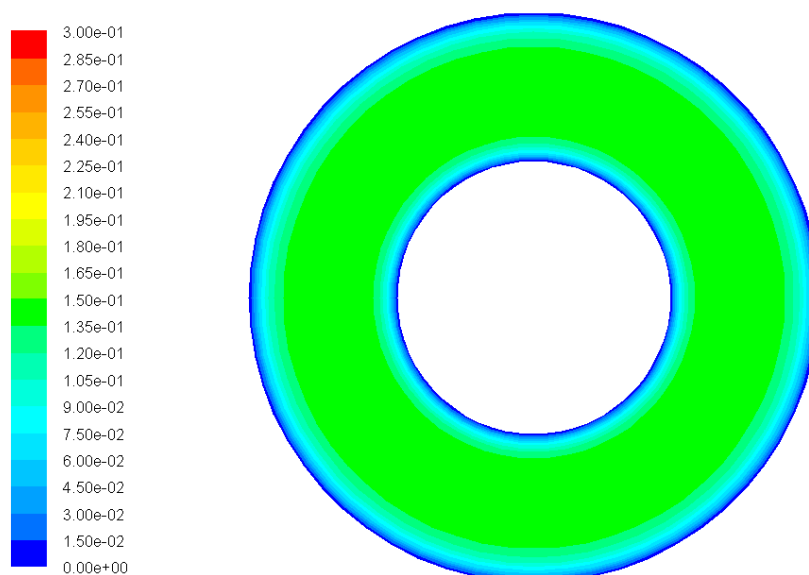


Figura 4.30: Contornos da velocidade axial para a condição 13 do planejamento concêntrico.

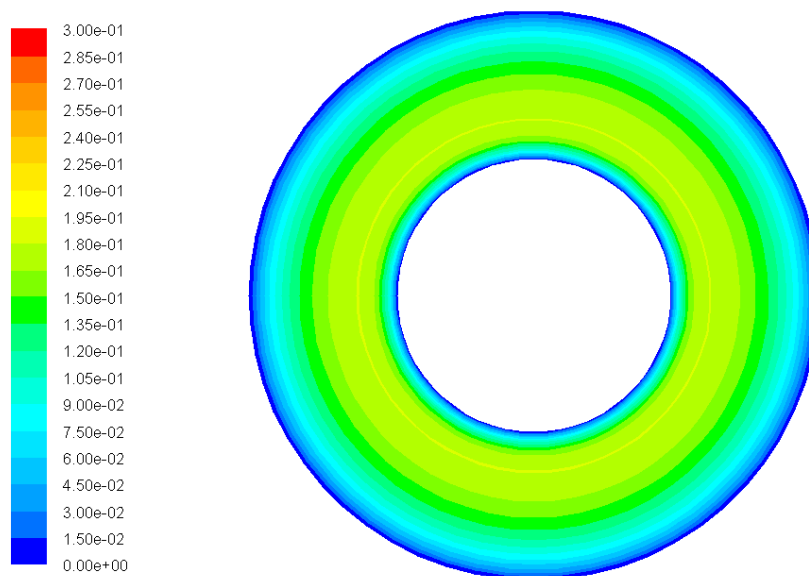


Figura 4.31: Contornos da velocidade axial para a condição 14 do planejamento concêntrico.

Analisando as Figuras 4.30 e 4.31, observa-se a alteração dos perfis, com um aparente deslocamento da velocidade máxima axial em direção ao eixo interno e uma redução da intensidade de escoamento na região mais próxima ao tubo externo.

As maiores alterações em termos dos contornos da velocidade axial foram identificadas pela alteração da posição do eixo interno. A variação da excentricidade não só influenciou na mudança do campo de escoamento mas também na sua intensidade. A Figura 4.32 apresenta a mesma condição do ensaio 14 (0,40 %; 1,2 m³/h e 600 RPM), citada anteriormente, só que agora considerando o caso excêntrico.

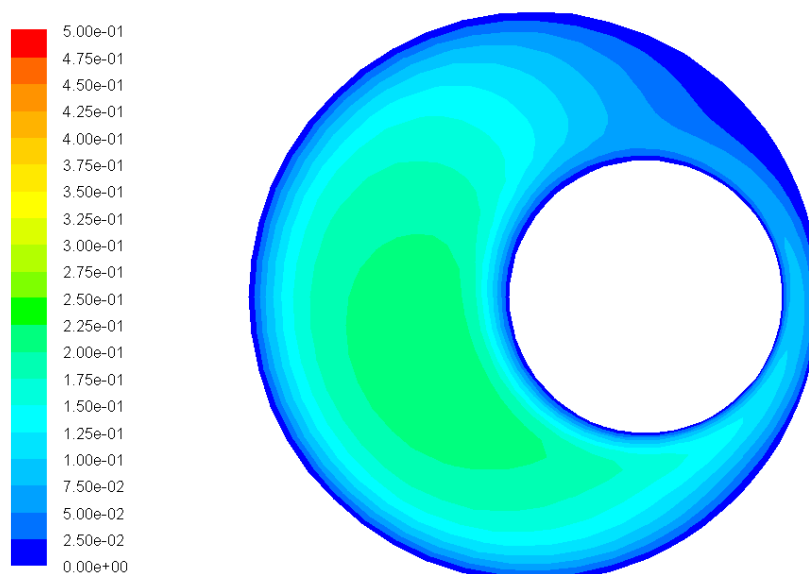


Figura 4.32: Contornos da velocidade axial para a condição 14 do planejamento do arranjo excêntrico.

4.5.3.2 Perfis de velocidade axial e tangencial

Uma outra forma de análise dos perfis das componentes da velocidade no campo de escoamento em anulares é a representação cartesiana. Citada por alguns autores este tipo de apresentação permite a comparação simultânea da grandeza entre as componentes axial e tangencial. Embora fisicamente também se tenha uma velocidade radial, esta mostrou valores inferiores quando comparadas à ordem de grandeza das outras duas componentes. Neste sentido apresentam-se nesta etapa do estudo apenas os perfis de velocidade axial e tangencial.

Como as simulações foram conduzidas em ambiente tridimensional, adotou-se a mesma referência aplicada aos contornos de velocidade axial, a seção à 1,32 m da origem. Nesta posição, ainda elegeu-se o eixo das abscissas, na dimensão do diâmetro do tubo externo (distância radial) para planificar os resultados.

Visando seguir uma lógica de comparação de resultados tentando salientar os efeitos das principais variáveis, propõe-se a escolha das condições já citadas anteriormente; sendo que os demais resultados encontram-se no Apêndice B.

Inicialmente, pode-se destacar os efeitos da vazão de escoamento sobre os perfis de velocidade. Os ensaios 11 ($0,2 \text{ m}^3/\text{h}$) e 12 ($2,2 \text{ m}^3/\text{h}$) do planejamento para o caso concêntrico, constantes em 0,40 % e 300 RPM, podem ser visualizados nas Figuras 4.33 e 4.34 respectivamente.

Cabe ressaltar a presença da resultante entre as componentes da velocidade; denominada doravante de velocidade de magnitude. Este tipo de perfil auxilia na elucidação das contribuições de cada componente revelando a eventual predominância no escoamento pelo anular.

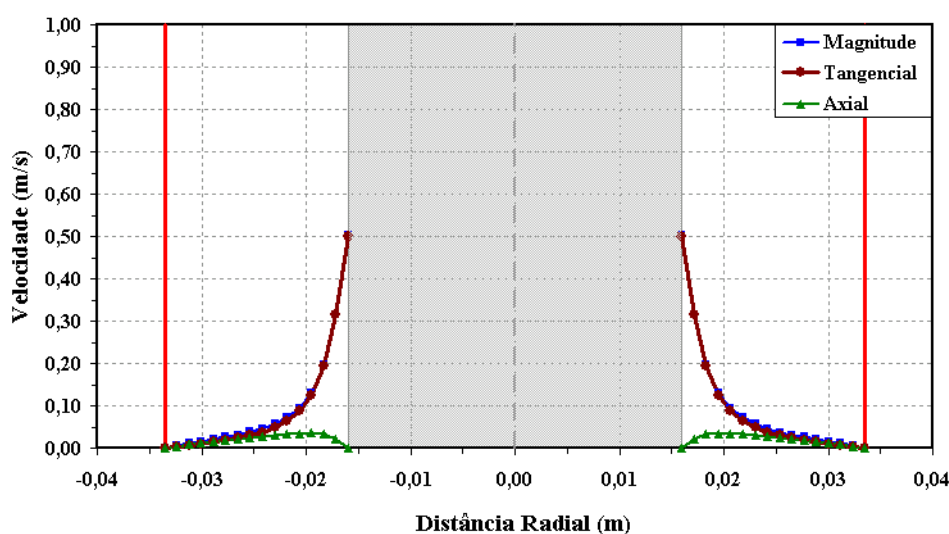


Figura 4.33: Perfis de velocidade para a condição 11 do planejamento concêntrico.

Como referencial de orientação, as linhas vermelhas verticais indicam os limites da parede do tubo externo enquanto que a região em cinza ao centro representa a presença do eixo interno.

Cabe apontar para a presença de simetria entre os dois planos do anular, mostrando coerência física nas simulações implementadas. Outro ponto de destaque na Figura 4.33 é a predominância do escoamento tangencial em relação ao axial; tanto que o perfil de magnitude encontra-se sobreposto ao perfil de velocidade tangencial.

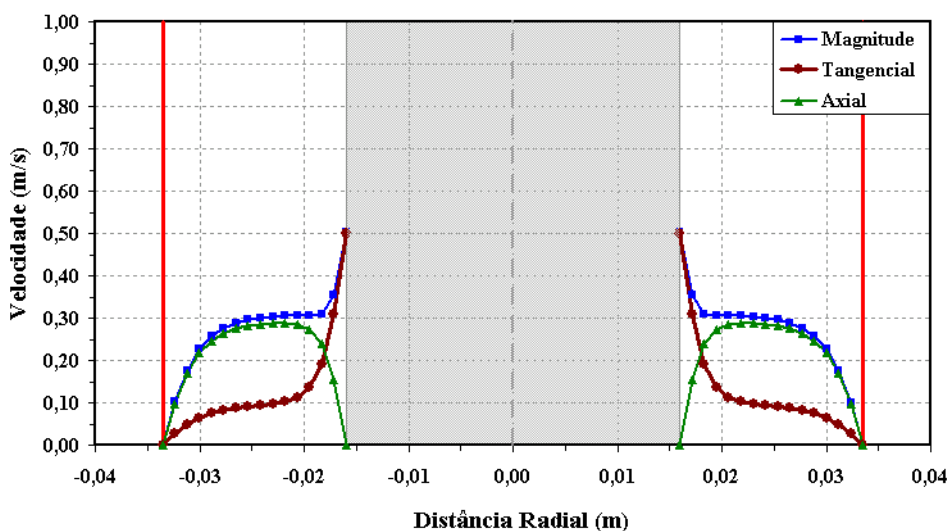


Figura 4.34: Perfis de velocidade para a condição 12 do planejamento concêntrico.

Diferentemente da condição do ensaio 11, a condição 12 além de uma superior ordem de grandeza dos valores de velocidade, ainda apresenta um fluxo pelo anular predominantemente axial. Contudo pode-se ressaltar a contribuição do escoamento tangencial, principalmente na região mais próxima ao eixo interno.

Outro aspecto relevante é a perda da configuração parabólica para o perfil axial de escoamento laminar em função da rotação do eixo interno. As Figuras 4.33 e 4.34 ainda revelam uma tendência do deslocamento do perfil em direção ao eixo interno, reforçando as constatações feitas na análise dos contornos de velocidade axial, descritos anteriormente (Seção 4.5.3.1).

Em relação à influência do movimento de rotação, as Figuras 4.35 e 4.36 apresentam os ensaios 13 (0 RPM) e 14 (600 RPM) do planejamento concêntrico; reiterando que as condições de concentração em 0,40 % e de vazão em 1,2 m³/h, permanecem inalteradas.

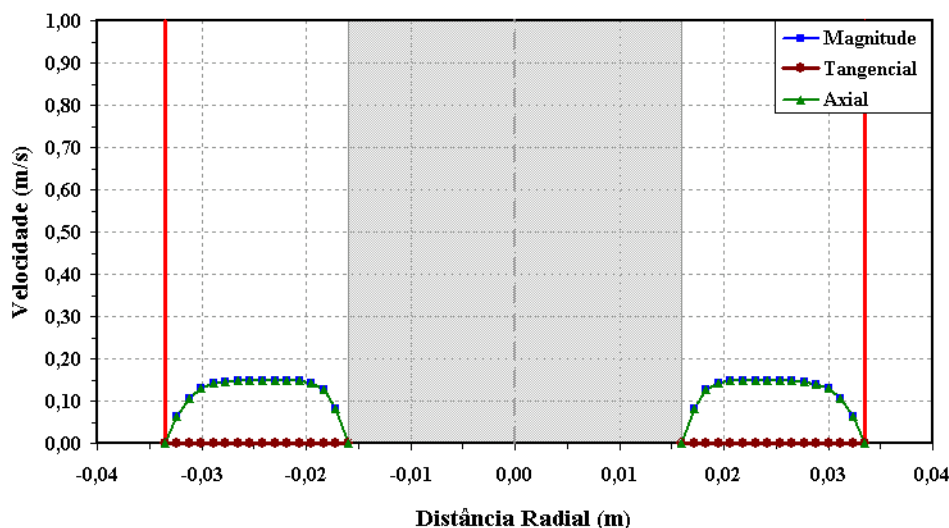


Figura 4.35: Perfis de velocidade para a condição 13 do planejamento concêntrico.

Nesta situação observa-se que a falta do perfil tangencial em função da ausência de rotação do eixo interno, predominando assim o fluxo axial no anular (sobreposição dos perfis de velocidade axial e magnitude). Um aspecto que chama a atenção é o formato do perfil de velocidade axial. Considerando o escoamento laminar sem influência da rotação, observa-se o formato parabólico parcialmente “achatado”. Este tipo perfil concorda com a clássica distribuição de velocidade axial para o escoamento de fluidos pseudoplásticos e viscoplásticos; apontando para coerência física dos resultados numéricos e as informações disponíveis na literatura (CHHABRA, 1999).

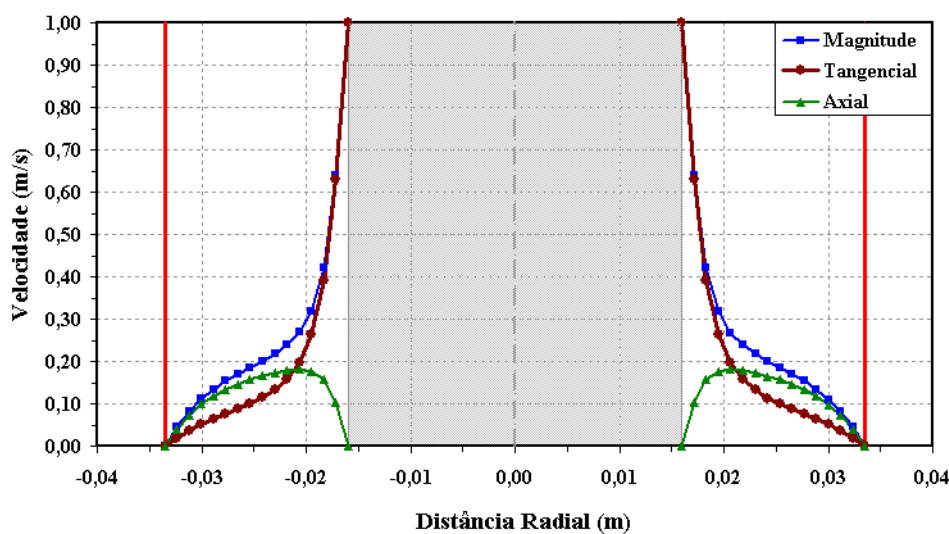


Figura 4.36: Perfis de velocidade para a condição 14 do planejamento concêntrico.

Os resultados da Figura 4.36 mostram os efeitos conjugados de alta vazão e rotação pelo anular; neste há tanto a contribuição axial quanto a tangencial, sem haver uma predominância no escoamento.

Alterando a configuração entre os dois tubos percebe-se uma significativa alteração do perfil de escoamento. A Figura 4.37 destaca o ensaio 14 ($1,2 \text{ m}^3/\text{h}$, 0,40 %, 600 RPM) agora para o caso excêntrico.

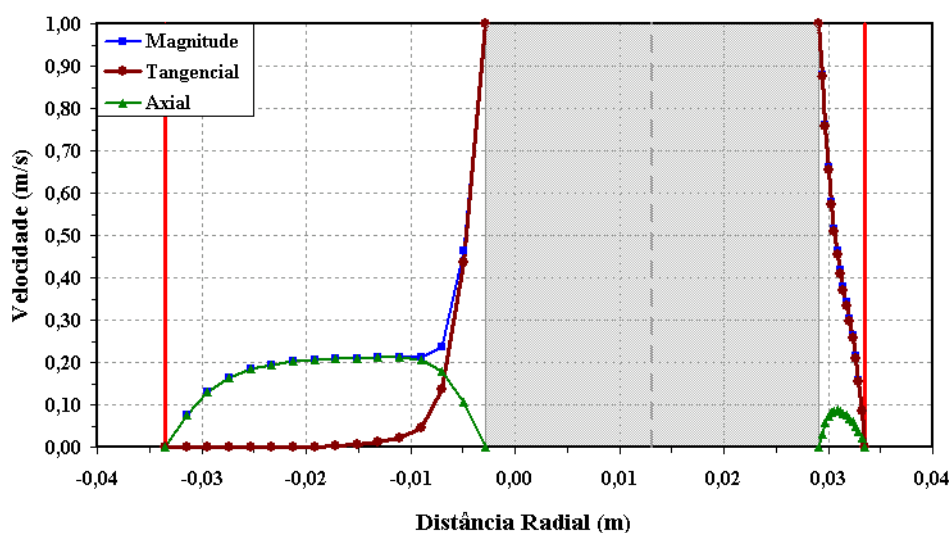


Figura 4.37: Perfis de velocidade para a condição 14 do planejamento do arranjo excêntrico.

Para este caso além da diferença entre as ordens de grandeza dos perfis de velocidade axial, observa-se sua distribuição no anular. Na região de maior espaço anular há um escoamento predominantemente axial enquanto que na região de menor espaço anular o fluxo é majoritariamente tangencial. Ainda sobre os efeitos da velocidade tangencial, ressalta-se o efeito apenas nas regiões mais próximas ao eixo interno; observando-se que para o maior espaço anular sua contribuição é quase nula na faixa central dessa região até a parede do tubo externo.

4.5.4 Algumas particularidades das simulações numéricas

Nas simulações numéricas das condições experimentais não foram identificadas as situações encontradas durante as simulações preliminares. A divergência dos valores de resíduos não foi constatada. Contudo duas condições apresentaram flutuação nos valores dos resíduos muito próximos ao critério de convergência adotado; a condição do ensaio 4 (0,31 %; $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$ e 480 RPM) para os casos concêntrico e excêntrico. A Figura 4.38 representa a

condição descrita em relação aos resíduos da equação da continuidade e das componentes da velocidade da equação do movimento.

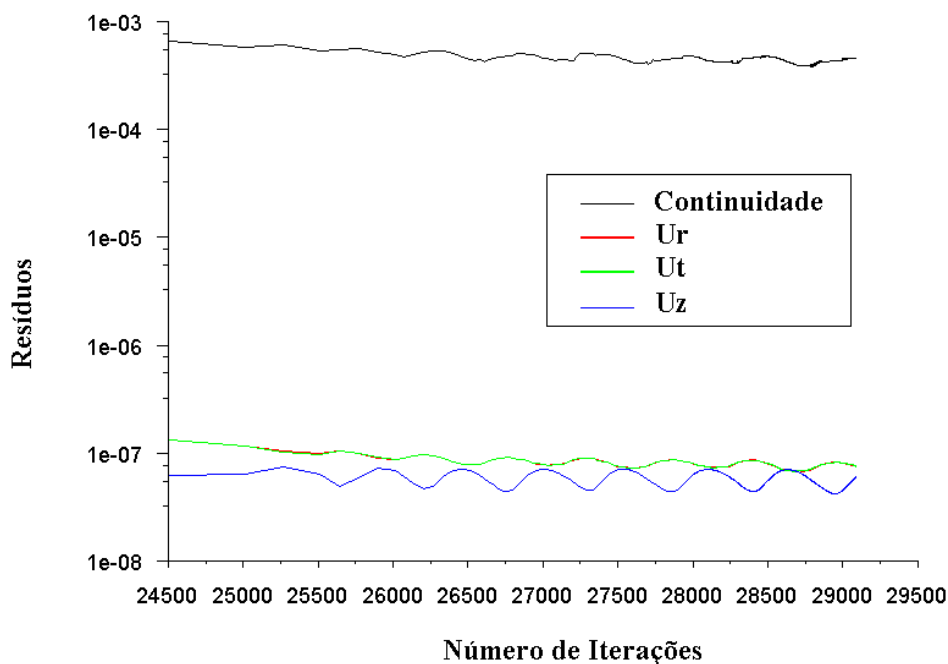


Figura 4.38: Exemplo da flutuação dos resíduos na solução numérica.

Uma vez checadas as simulações numéricas para as condições 0,31 %, 0,6 m³/h e 120 RPM (ensaios 1; para $e=0,00$; $e=0,75$), não foi constatada nenhuma particularidade, apontando para uma investigação da relação entre a consistência do fluido e da rotação do eixo interno. Outro fator que reforça esta linha de raciocínio foram as simulações em condições similares, como no ensaio 6 (0,49 %; 0,6 m³/h e 480 RPM) que não apresentaram alterações nas curvas de convergência.

A condição do ensaio 14 (0,40 %; 1,2 m³/h e 600 RPM) também não apresentou nenhuma particularidade que recebesse destaque. O fato de estar num nível de rotação acima não traduz necessariamente em um fator de instabilidade numérica.

Uma outra condição testada, o ensaio 15 (0,25 %; 1,2 m³/h e 300 RPM) aponta que baixa consistência do fluido também não é fator preponderante, trazendo à luz da discussão o efeito também da vazão de escoamento.

Desta forma, a avaliação entre os casos testados aponta que em determinada combinação de vazão, rotação e reologia, tem-se uma condição de escoamento pelo anular que não estaria de acordo com as hipóteses simplificadoras, já que a estratégia numérica foi avaliada nas outras condições. O critério de escoamento laminar passou a ser um ponto de reavaliação.

Embora a condição do ensaio estivesse numa condição quantificada pelo número de Reynolds generalizado como escoamento laminar, a relação entre forças inerciais e forças viscosas poderiam estar recebendo uma influência externa da rotação do eixo interno suficiente para perturbar o “fluxo entre lâminas” do fluido. Esta perturbação poderia ser considerada como o início de uma precoce região de transição entre regimes. A componente tangencial em baixas concentrações poliméricas com baixas vazões faria com que estas “lâminas” começassem a se interpenetrar.

De forma qualitativa, tentou-se simular as condições do ensaio 4 em um nível maior de rotação do eixo interno (900 RPM); o que antes mostrava uma flutuação dos valores de resíduos próximos ao critério de convergência transformou-se uma situação clara de divergência. Da mesma forma testaram-se as condições dos ensaios 6 e 14, agora em alta rotação, e novamente a análise dos resíduos apontou para a condição divergente.

No código comercial adotado neste trabalho não é previsto modelo de turbulência para escoamento de fluidos não-Newtonianos. Entretanto buscando um aspecto mesmo qualitativo para esta discussão, implementou-se um conjunto de simulações para fluido Newtoniano de baixa viscosidade (solução de glicerina 2) para vazão de 1,2 m³/h e em quatro níveis de rotação de 0, 120, 300 e 600 RPM.

Os resultados obtidos em 0, 120 e 300 RPM mostram através dos resíduos uma convergência contínua, promovendo um efeito muito pequeno na redução na queda de pressão pela ação da rotação do eixo interno. Já para o caso de alta rotação (600 RPM) não foi possível avaliar os resultados em função da divergência dos resíduos.

Partiu-se então para a incorporação de um modelo de turbulência para a simulação da condição de alta rotação (600 RPM). Mesmo não estando no escopo deste estudo, buscou-se a incorporação do modelo $k-\epsilon$ para reforçar esta linha de discussão. Durante a simulação acompanhou-se a evolução dos resíduos observando pequenas instabilidades, contudo a sequência de iterações seguiu normalmente para a convergência. O fato do caso convergir com a incorporação de um modelo de turbulência não traduz necessariamente a existência de turbulência no escoamento anular, mas reforça a condição de não “laminaridade”; reiterando hipótese da presença de uma possível região de transição.

A Figura 4.39 apresenta graficamente o comportamento descrito para a queda de pressão sobre a influência da rotação do eixo interno para solução 2 de glicerina no o arranjo concêntrico. Destacando a mudança no padrão de comportamento da queda de pressão sob influência da rotação do eixo interno. Para o maior nível de rotação (600 RPM), a perda de

carga que praticamente não recebia influência da rotação passou a aumentar; diferentemente da tendência observada nas simulações das condições experimentais (Seção 4.5.2).

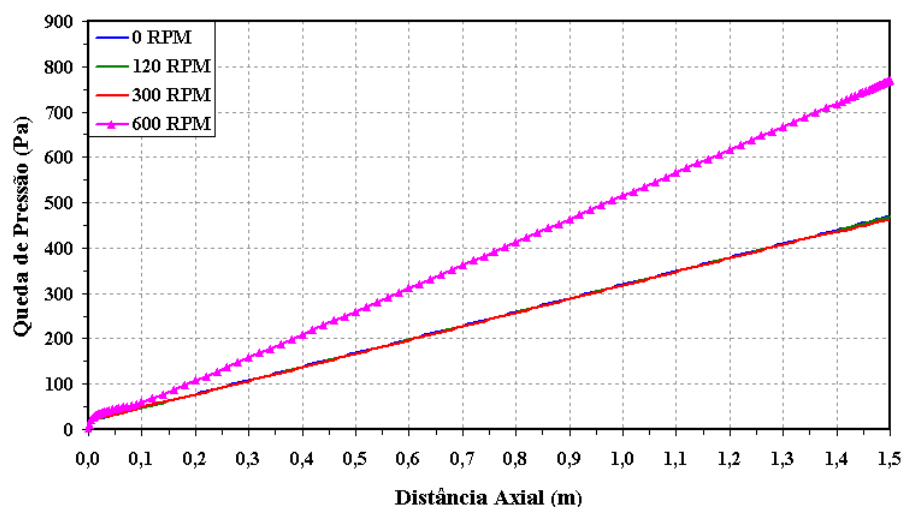


Figura 4.39: Efeito da rotação sobre a queda de pressão para solução de glicerina 2 para o arranjo concêntrico.

4.5.5 Efeito da transição de regime na queda de pressão

Observando trabalhos da literatura sobre o fator de atrito tanto para fluidos Newtonianos quanto para não-Newtonianos (exemplo das Figuras 2.10, 2.11 e 2.12), percebe-se uma similaridade de tendência para o escoamento em tubos.

Analisando fenomenologicamente os casos de fluidos não-Newtonianos, espera-se que a rotação do eixo interno aumente a deformação sobre o fluido; causando uma redução de sua viscosidade (característica pseudoplástica). Com a redução da viscosidade tem-se um aumento no valor do número de Reynolds generalizado. Projetando este efeito da curva do fator de atrito para a região laminar, espera-se como resposta uma redução no valor de queda de pressão. Análise esta que corrobora com as constatações experimentais e de simulação numérica nas condições apresentadas.

Por outro lado, espera-se que o aumento da rotação do eixo combinado com as condições de vazão e reologia do fluido, causem uma alteração da condição de escoamento laminar (aumento do número de Reynolds generalizado), podendo refletir numa elevação nos valores de queda de pressão. Este efeito juntamente com as situações apresentadas anteriormente pode facilitar a compreensão de pontos de discordância em alguns estudos reportados na literatura sobre o efeito da rotação do eixo na queda de pressão; além de ser também uma possível justificativa para algumas discordâncias entre valores simulados e experimentais relatados por alguns autores.

Neste sentido a condição de escoamento laminar passa a ser avaliada não somente através do número de Reynolds generalizado, mas também sobre as demais condições operacionais (rotação do eixo); sendo necessário maior critério para o uso da hipótese simplificadora de escoamento laminar empregada em simulações numéricas.

4.6 Resultados complementares

Nesta parte do trabalho, foram implementados simultaneamente com os planejamentos de experimentos outros testes experimentais com as respectivas simulações numéricas. Os planejamentos de experimentos propostos serviram para identificar as tendências predominantes e a ordem de grandeza da influência de cada variável. Entretanto não se verificou uma divergência significativa de comportamento nos valores da queda de pressão reportadas em alguns artigos da literatura; embora este efeito possa estar associado à específica faixa de escoamento investigada. Mesmo assim, visando reforçar a influência do movimento do eixo interno sobre o escoamento no anular foram realizados 16 ensaios: 8 para o caso concêntrico e 8 para o excêntrico; todas elas na condição de ausência de rotação, balizadas nas condições de vazão e concentração polimérica do planejamento de experimentos. A Tabela 4.9 apresenta as condições complementares testadas.

Tabela 4.9: Condições dos ensaios complementares.

Vazão (m ³ /h)	Rotação (RPM)	Concentração (%)	ΔP (Pa)	
			e=0,00	e=0,75
1,20	0	0,25	452,00	298,30
0,60	0	0,31	392,67	277,20
1,80	0	0,31	520,60	379,60
0,20	0	0,40	408,60	271,90
2,20	0	0,40	730,00	527,10
0,60	0	0,49	892,00	588,70
1,80	0	0,49	1.026,93	746,30
1,20	0	0,55	1.361,73	914,60

4.6.1 Efeito da rotação do eixo interno

A associação de todos os resultados complementares, juntamente com os dados dos planejamentos, confirmou a tendência já descrita anteriormente pelas superfícies de resposta. Isto é, o predominate efeito redutor da rotação sobre a queda de pressão em anulares concêntricos e excêntricos. A Figura 4.40 apresenta um resultado típico da influência da

rotação do eixo interno para o caso de vazão de $1,8 \text{ m}^3/\text{h}$ e concentração polimérica de 0,31 % para o caso concêntrico (ensaios 4 e 8).

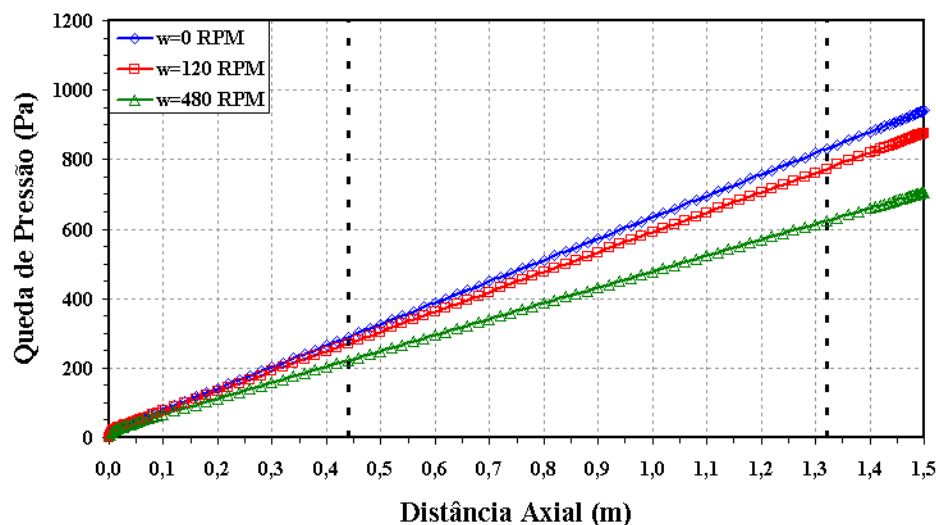


Figura 4.40: Efeito da rotação do eixo interno sobre a queda de pressão.

Da mesma forma, a comparação entre os dados complementares experimentais e simulados numericamente mostrou boa concordância; com desvios médios de 4,1 % para o caso concêntrico e de 2,7 % para o caso excêntrico. A Figura 4.41 apresenta graficamente os desvios entre os resultados obtidos para os dois procedimentos.

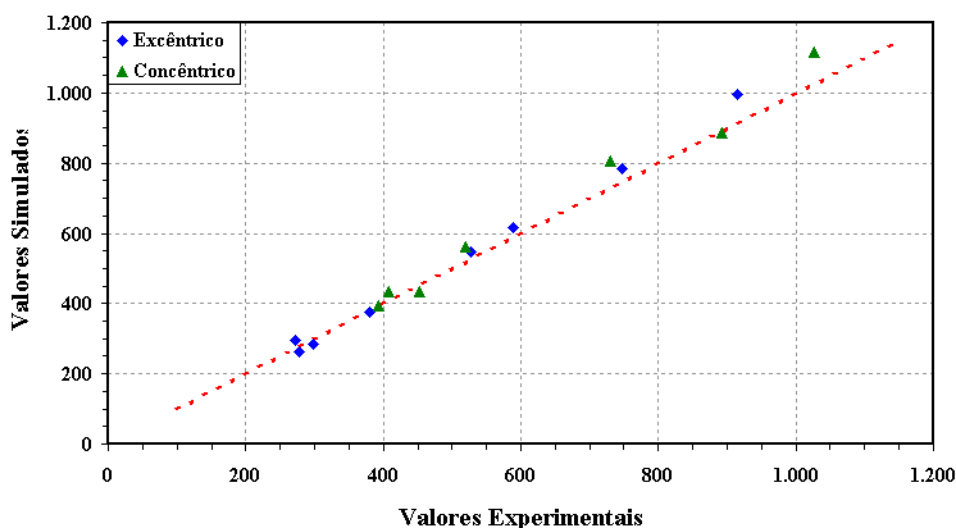


Figura 4.41: Comparação da queda de pressão para valores experimentais e simulados.

Pode-se observar uma situação ligeiramente diferente daquela encontrada na comparação entre os resultados do planejamento de experimentos. Para os testes

complementares, verificou-se uma leve tendência dos valores simulados serem predominantemente maiores que os resultados experimentais.

4.7 Abordagem da simulação numérica com modelo de fase discreta

Nesta parte do estudo, avaliou-se qualitativamente o comportamento do escoamento através do espaço anular na expectativa de confirmação do escoamento helicoidal. Empregando a modelagem de fase discreta descrita anteriormente (Seção 2.6.8) e com os resultados do campo de escoamento obtido nas simulações numéricas das condições experimentais, levantou-se a trajetória de uma “partícula de fluido” escoando ao longo do anular.

A estratégia de determinação de trajetórias empregando o modelo de fase discreta, utiliza informações empíricas sobre a predição do coeficiente de arraste de partícula em função da condição de escoamento do fluido (adimensional de Reynolds). Como há duas correlações no código comercial adotado, houve a necessidade de uma avaliação preliminar para a preleção entre os modelos de Moris e Alexander e Haider e Levenspiel.

4.7.1 Verificação da correlação de Haider e Levenspiel

Na versão 6.2.16 do código comercial Fluent[®], as correlações disponíveis para a predição do coeficiente de arraste foram desenvolvidas inicialmente para fluidos Newtonianos. Contudo, empregado o conceito de viscosidade efetiva e juntamente com os dados experimentais de velocidade terminal de queda de partículas em fluidos não-Newtonianos dos trabalhos de PEREIRA (1999) e MELO (2003), pode-se avaliar a concordância entre as determinações experimentais e a proposta de HAIDER e LEVENSPIEL (1989), representada pela Equação (4.11),.

$$C_D = \frac{24}{Re} \left[1 + e^{(2,3288 - 6,5481\varphi + 2,4486\varphi^2)} Re^{(0,0964 + 0,5565\varphi)} \right] + \frac{Re e^{(4,9050 - 13,8944\varphi + 18,4222\varphi^2 - 10,2599\varphi^3)}}{Re e^{(1,4681 + 12,2584\varphi - 20,7322\varphi^2 + 15,8855\varphi^3)}} \quad (4.11)$$

Na Equação (4.11) o parâmetro ‘ φ ’ representa o fator de forma da partícula e ‘Re’ a clássica denominação do número adimensional de Reynolds. Doravante aplicado à definição para Reynolds generalizado.

As faixas experimentais de tamanho e densidade da partícula e de reologia dos fluidos permitiram explorar a validade da expressão num amplo range de escoamento. Os 128 pontos

experimentais e os respectivos valores preditos pela Equação (4.11) mostram um desvio médio de 6,5 %; considerado satisfatório em função da alta não-linearidade de seu comportamento. A Figura 4.42 apresenta graficamente a curva de Haider e Levenspiel juntamente com os pontos experimentais de PEREIRA (1999) e MELO (2003).

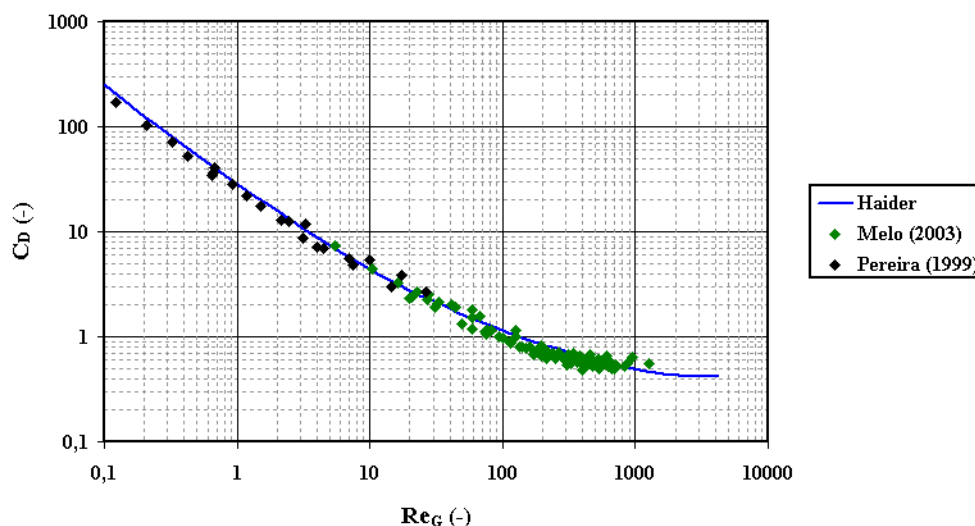


Figura 4.42: Comparação da equação de Haider e Levenspiel com dados experimentais.

Uma vez definida a equação de predição do coeficiente de arraste para aplicação na abordagem lagrangeana, pelo uso de modelagem de fase discreta, pode-se avaliar a trajetória de uma partícula de fluido (mesma densidade do fluido) escoando no espaço anular ao longo da extensão axial do tubo.

4.7.2 Escoamento anular/helicoidal concêntrico

Dentre os casos avaliados, pode-se ressaltar dois pontos de maior destaque. A independência do ponto de partida da “partícula” de fluido na região anular, em função do plano de simetria e a influência da rotação do eixo interno.

As Figuras 4.43, 4.44 e 4.45 representam resultados típicos para o caso concêntrico; estes respondem respectivamente aos ensaios 13, 17 e 14 do planejamento: 0,40 %; 1,2 m³/h para 0 RPM, 300 RPM e 600 RPM respectivamente.

A face representada em azul corresponde à entrada do anular (local de partida da “partícula” de fluido) e a face em vermelho associa a região de saída. Buscando facilitar a visualização das figuras excluiu-se a representação do tubo externo; mantendo apenas o tubo interno como referencial.

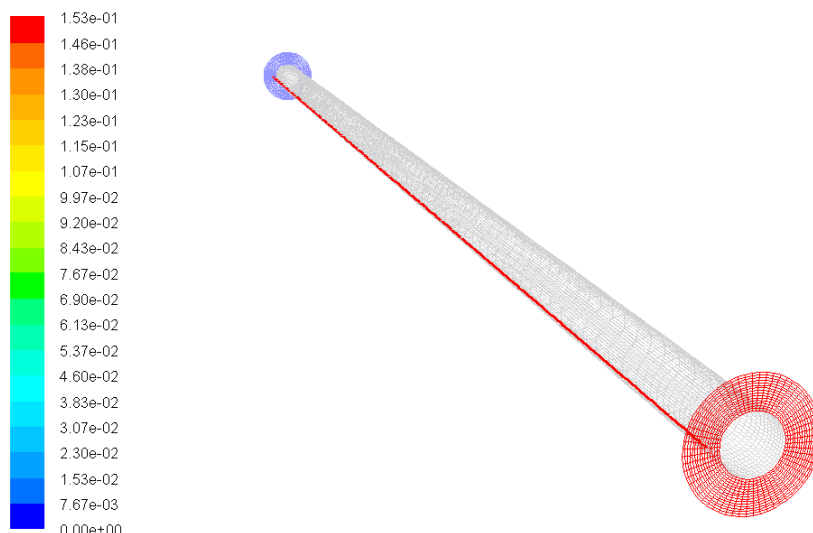


Figura 4.43: Trajetória da partícula de fluido no ensaio 13 para $e=0,00$ (0 RPM).

Pode-se ressaltar a trajetória retilínea devido à ausência de rotação do eixo interno, independente da posição de entrada no espaço anular.

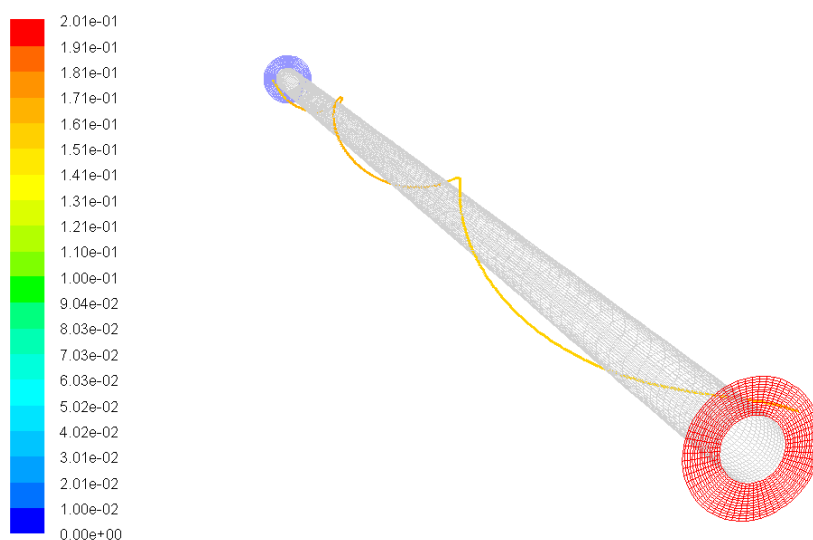


Figura 4.44: Trajetória da partícula de fluido no ensaio 17 para $e=0,00$ (300 RPM).

Nesta situação de escoamento, a rotação do eixo interno em 300 RPM promove duas voltas completas da “partícula” de fluido ao redor do eixo, caracterizando o escoamento helicoidal. Embora a trajetória possa alterar em função do ponto de partida, o comportamento caracterizado pelo número de voltas se mantém.

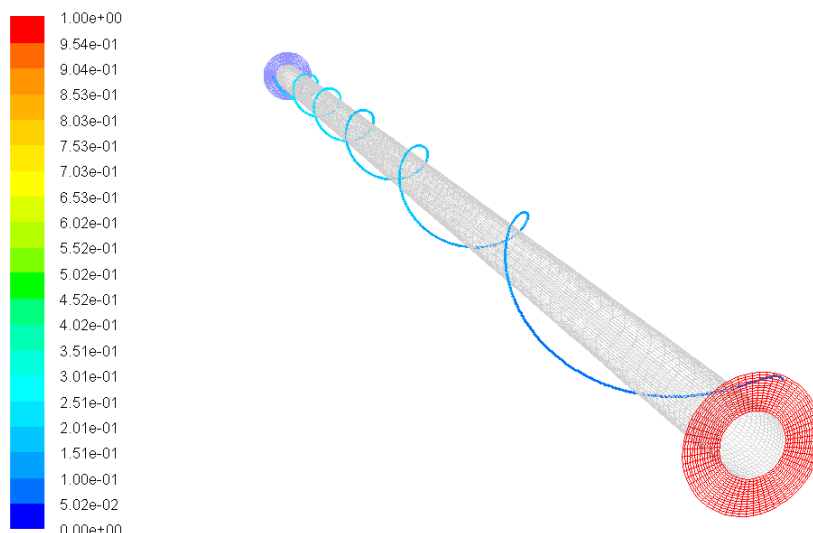


Figura 4.45: Trajetória da partícula de fluido no ensaio 14 para $e=0,00$ (600 RPM).

O incremento de rotação para 600 RPM alterou a trajetória da “partícula” de fluido fazendo aumentar o número de revoluções em torno do tubo interno.

Para as condições testadas verificam-se as trajetórias helicoidais, sendo que o número de voltas ao redor do eixo está relacionado com a rotação do eixo interno e com a vazão de escoamento. Outro ponto, de caráter qualitativo, é o deslocamento contínuo sem “recirculações”; que contribui para a verificação da ausência dos vórtices de Taylor para os casos de maior rotação. Reiterando as informações apontadas pelos valores do adimensional de Taylor ‘ Ta ’.

4.7.3 Escoamento anular/*core-flow* excêntrico

Para estes casos, a estratégia empregada foi a mesma para a condição concêntrica, buscando comparar nas mesmas condições de escoamento apresentadas na seção anterior. Destaca-se que a posição de entrada da “partícula” de fluido agora influencia a trajetória descrita em função da ausência de plano de simetria.

A falta de rotação do eixo interno permite o desenvolvimento de trajetória retilínea em qualquer parte no espaço anular, conforme mostra a Figura 4.46. Já os efeitos da rotação mostram pouco efeito no desenvolvimento de um fluxo helicoidal. As Figuras 4.47, 4.48 destacam os efeitos da rotação de 300 RPM para duas condições entrada pelo anular.

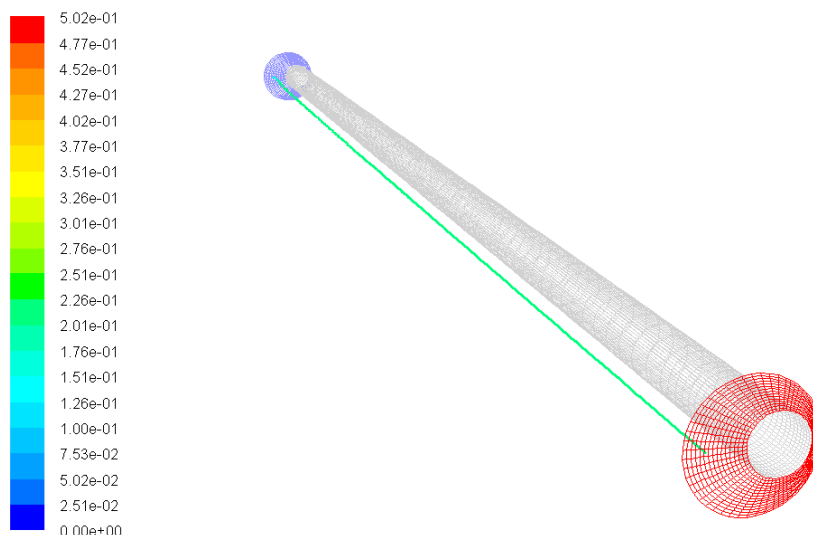


Figura 4.46: Trajetória da partícula de fluido no ensaio 13 para $e=0,75$ (0 RPM).

Constata-se de forma análoga ao arranjo concêntrico a trajetória retilínea da “partícula” de fluido desenvolvida pela ausência dos efeitos da rotação do eixo interno.

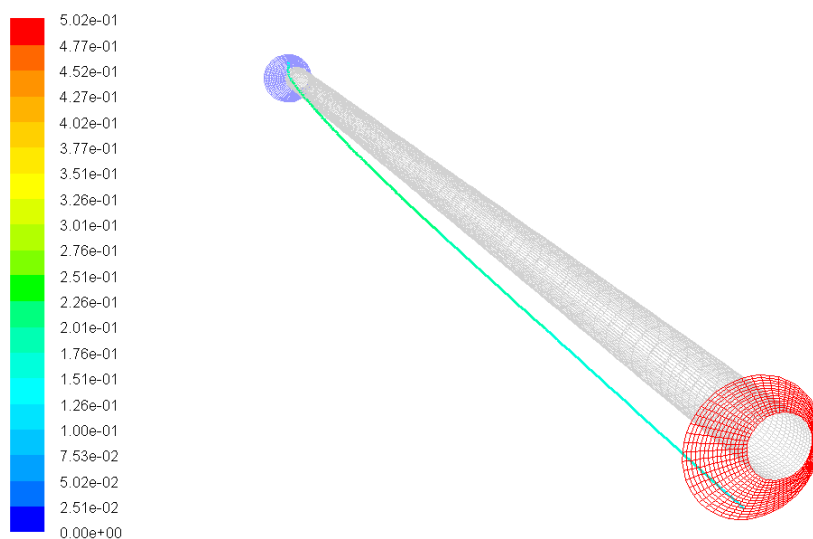


Figura 4.47: Trajetória da partícula de fluido no ensaio 17 para $e=0,75$, partindo da seção superior do anular (300 RPM).

A Figura 4.48 apresenta a trajetória da “partícula” de fluido partindo da seção superior do anular. Pode-se observar a mudança em seu curso sem contudo desenvolver revoluções ao redor do eixo interno.

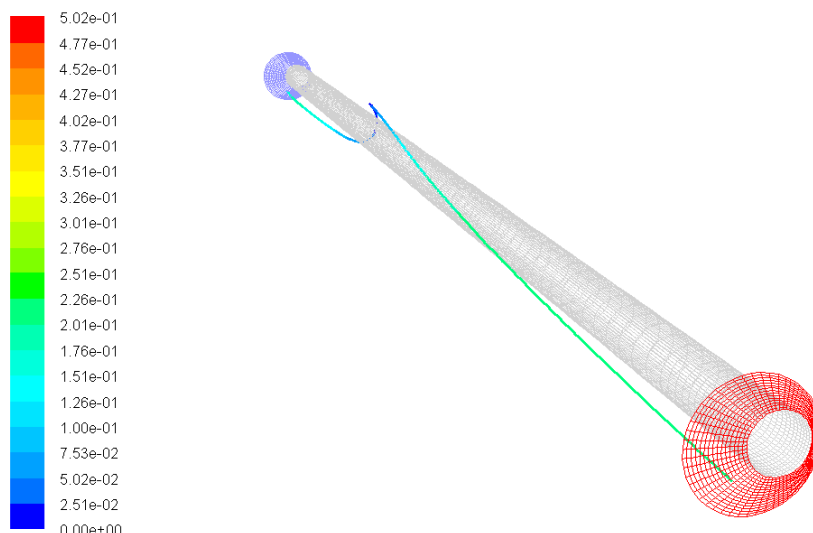


Figura 4.48: Trajetória da partícula de fluido no ensaio 17 para $e=0,75$, partindo da seção inferior do anular (300 RPM).

Observa-se agora que na condição de partida da seção inferior do anular a “partícula” de fluido é capturada pelo movimento do eixo, mas logo em seguida busca a trajetória de escoamento na maior seção anular. Pode-se constatar que não houve também a configuração clássica de escoamento helicoidal

Com um incremento na rotação do eixo interno, para 600 RPM (ensaio 14), observa-se também o comportamento de *core-flow*. As Figuras 4.49 e 4.50 destacam os efeitos da rotação para diversas condições entrada no anular.

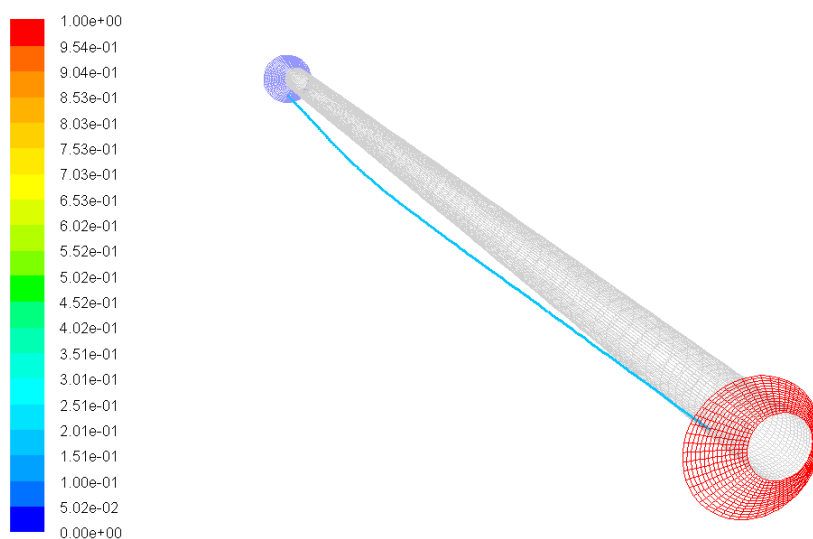


Figura 4.49: Trajetória da partícula de fluido no ensaio 14 para $e=0,75$, partindo da seção inferior do anular (600 RPM).

O efeito do aumento da rotação do eixo interno, mesmo a “partícula” de fluido partido da parte inferior do anular, não capturou sua trajetória sem configurar a disposição de fluxo helicoidal.

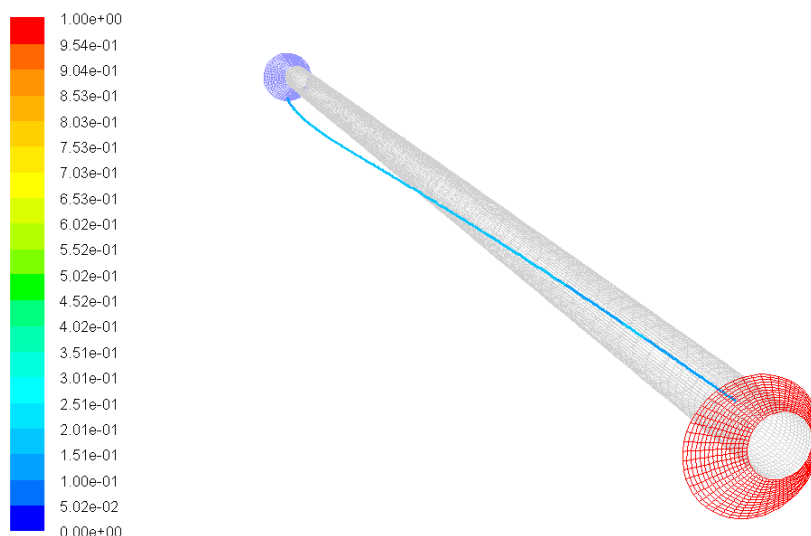


Figura 4.50: Trajetória da partícula de fluido no ensaio 14 para $e=0,75$, partindo da seção de menor espaço anular (600 RPM).

Na condição de partida na região de menor espaço anular, tem-se a predominância do escoamento tangencial, não sendo suficiente para a caracterização de uma trajetória ao redor do tubo interno. Mais uma vez o curso desenvolvido pela “partícula” de fluido caminhou para o *core-flow*.

Para este estudo destaca-se o potencial uso da estratégia de simulação por fase discreta, visando analisar o comportamento de partículas sólidas pelo anular; podendo avaliar condições de sedimentação ou carreamento em função das propriedades do sólido (densidade, tamanho e forma), das características de escoamento do fluido (reologia, vazão) bem como das condições operacionais (excentricidade e rotação do eixo interno).

Neste sentido, encera-se a discussão dos resultados apontando que a denominação de escoamento helicoidal deve ser empregada com ressalva, principalmente em condição de elevada excentricidade.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesta parte do trabalho, apresentam-se as principais conclusões obtidas considerando as investigações realizadas experimentalmente e por simulações numéricas, sobre o escoamento laminar de fluidos não-Newtonianos em regiões anulares. Ainda como contribuições deste estudo deixam-se algumas sugestões para a continuidade deste tema de pesquisa.

5.1 Principais conclusões

Levando em conta as metas traçadas nos objetivos específicos deste estudo (Seção 1.2) e à luz das principais observações realizadas, pode-se concluir:

Foi possível construir uma unidade piloto visando investigar o gradiente de pressão para fluidos não-Newtonianos sobre a influência de suas principais variáveis como: a vazão, a rotação do eixo interno, a reologia do fluido e a geometria do sistema. A concordância das simulações numéricas tanto com dados reportados na literatura quanto experimentais, trouxe segurança para a verificação da técnica de CFD no levantamento do campo do escoamento laminar em espaços anulares.

Utilizando dois planejamentos de experimentos, 34 ensaios permitiram elucidar a ordem de grandeza dos efeitos das variáveis sobre a queda de pressão. Com destaque para o efeito redutor no gradiente de pressão em função da rotação do eixo interno para os arranjos concêntrico e excêntrico.

A análise da superfície de resposta reforçou as tendências observadas e trouxe a discussão um ponto de investigação sobre o efeito da rotação do eixo interno em baixas concentrações poliméricas (baixas “viscosidades”). Embora os dados experimentais confirmem uma tendência redutora da queda de pressão sob influência da rotação do eixo, as interações entre as variáveis apontaram um modesto efeito inverso, para o caso de baixa concentração (0,25 %). Pela análise canônica foi possível identificar as condições experimentais, dentro da faixa do planejamento de experimentos, que fornecessem um ponto de mínimo (otimizado) na queda de pressão; tanto para o caso concêntrico quanto para o excêntrico.

Dentro da abordagem experimental foi possível identificar elementos que poderiam eventualmente atuar como fonte de desvios e que justificariam algumas divergências entre

resultados experimentais e simulados numericamente, reportados em diversos trabalhos da literatura; como por exemplo:

- Efeito da temperatura no escoamento;
- Efeito da faixa de aplicação da taxa de deformação;
- Efeito das propriedades físicas das suspensões poliméricas (degradabilidade).

As simulações numéricas corroboraram com os resultados experimentais tanto qualitativamente (em termos de tendências) quanto quantitativamente (com desvios médios menores que 4 %). Pela técnica de CFD, pode-se observar os efeitos relevantes do comprimento de entrada e do critério de escoamento laminar. Identificou-se que a falta da condição de escoamento plenamente estabelecido pode levar a informações superestimadas de queda de pressão, aumentando a discordância entre resultados numéricos e experimentais. Já a hipótese de que a rotação do eixo interno cria uma condição de instabilidade no escoamento, alterando a condição de escoamento laminar, favorece a compreensão das divergências de resultados encontradas na literatura.

O levantamento dos perfis de velocidades permitiu um melhor entendimento sobre as condições de escoamento em que se podem identificar fluxos preferencialmente axial, tangencial ou misto. Estas avaliações contribuíram para um melhor entendimento do campo de escoamento de fluidos não-Newtonianos, projetando sua aplicação para a operação de limpeza de poços, isto é, o carregamento de partículas em suspensão através do anular.

O uso da simulação de fase discreta permitiu visualizar o fluxo helicoidal sobre influência principalmente da rotação do eixo interno, sugerindo uma ressalva para o uso deste termo para escoamento em arranjos de elevada excentricidade; uma vez constatada nestes casos a presença de escoamento predominante do tipo *core-flow*.

De forma geral pode-se avaliar o potencial da técnica de CFD como ferramenta para prever condições experimentais. As simulações permitiram não só obter uma série de informações que muito contribuíram para a montagem da unidade piloto, mas também viabilizaram um “treinamento do sentimento físico” envolvido no fenômeno. Contudo pode-se constatar que ainda há um amplo campo para melhorias, como por exemplo:

- Escoamento não-laminar para fluidos não-Newtonianos;
- Utilização de expressões para coeficiente de arraste definidas pelo usuário;
- Melhorias de interface gráfica (resultados de pressão e velocidade em 3D).

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Neste estudo foram avaliadas duas situações de geometria. Para configuração excêntrica, em $e=0,75$, atingiu-se o limite construtivo (arranjo entre os tubos externo e interno) para esta unidade experimental. Sugere-se a continuidade da investigação (experimental e numérica) para menores valores de excentricidade, como por exemplo: $e=0,25$ e $e=0,50$. Buscando novas informações sobre a influência da geometria do sistema no escoamento anular para fluidos Newtonianos e não-Newtonianos.

Outra possível contribuição seria a ampliação da faixa de escoamento a ser investigada, como por exemplo: $50 < Re_G < 500$. Mas para que isto seja possível, suspensões poliméricas mais diluídas deverão ser empregadas (menos viscosas). Contudo sugere-se a verificação preliminar via CFD para a estimativa do comprimento de entrada e da faixa de queda de pressão; avaliando se estas ainda estariam dentro das limitações experimentais da unidade. A avaliação do efeito da rotação do eixo interno seria uma sugestão para alcançar estas novas condições de escoamento. Contudo, neste caso, há a necessidade de modificações estruturais como o acoplamento de um moto redutor ao sistema de acionamento do eixo interno.

Incorporar o efeito da inclinação ao sistema também seria uma sugestão para futuros trabalhos, mesmo que esta implique em alterações construtivas na unidade. Considera-se válida esta proposta em função do restrito número de publicações sobre esta configuração experimental, além de sua justificativa para aplicação aos casos de ‘perfuração direcionada’.

Uma sugestão no que se refere ao ambiente numérico, propõe-se o desenvolvimento de estudos de simulação buscando informações sobre o escoamento não-laminar de fluidos não-Newtonianos.

Outra possibilidade para novos estudos seria a extensão das simulações empregando o Modelo de Fase Discreta. Novos casos poderiam se implementados para prever o comportamento da trajetória de escoamento em funções das propriedades físicas do fluido, ampliando a faixa de viscosidade e incorporando a variação da densidade do fluido. Ainda dentro do contexto numérico, propõem-se a ampliação das simulações empregando a abordagem de Fase Discreta para a interação entre o *flow field* e partículas sólidas. Estas informações permitiram encontrar novos horizontes de pesquisa, como a investigação dos efeitos de escoamento para limpeza de anulares em função das propriedades tanto do sólido (forma, densidade e tamanho), quanto do escoamento (reologia, vazão, rotação do eixo interno e excentricidade).

Referências Bibliográficas

- ALI, W. A parametric study of cutting transport in vertical and horizontal well using computational fluid dynamics (CFD), Tese de Mestrado, Departament of Petroleum and Natural Gas Engineering, West Virginia University, Estados Unidos, 108 p., 2002.
- AMANULLAH, M.; YU, L. Environment friendly fluid loss additives to protect the marine environment from the detrimental effect of mud additives, Journal of Petroleum Science and Engineering, 48, p. 199 – 208, 2005.
- BANNWART, A. C. Modeling aspects of oil-water core annular flows, Journal of Petroleum Science and Engineering, 32, p. 127 – 143, 2001.
- BARNES, H. A. The yield stress – a review – everything flows?, Journal of non-Newtonian Fluid mechanics, 81, p. 133 – 178, 1999.
- BARREIRA, N. B. Introdução à modelagem em 3d para reatores *air-lift* empregando o “método dos volumes finitos” na resolução da fluidodinâmica (CFD), Tese de Doutorado, Campinas, UNICAMP, Departamento de Engenharia Química, 302 p. 2003.
- BLAND, R. Quality criteria in selecting glycols as alternatives to oil-based drilling fluids systems, SPE Health, Safety and Environmental Conference, Jakarta, Indonésia, 25 a 27 de fevereiro, 1994.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Transport Phenomena, New York, John Wiley & Sons, 780 p., 1961.
- BOX, M. J., HUNTER, W. G., HUNTER, J. S. Statistics for experimenters. An introduction to design, data analysis, and model building, John Wiley and Sons, New York, 1978. 330 p.

- CARREAU, P. J.; KEE, D. D. Review of some useful rheological equations, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 57, p. 3 – 15, 1979.
- CHEBBI, R. Laminar flow of power-law fluids in the entrance region of a pipe, Chemical Engineering Science, 57, p. 4435 – 4443, 2002.
- CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. Non-Newtonian Flow in the Process Industries, Oxford, Ed. Butterworth-Heinemann, 1999, 436 p.
- CHEN, R. Y. Flow in the entrance region at low Reynolds numbers. Journal of Fluids Engineering, 95, p. 153 – 158, 1973.
- CHILINGAR, G. V.; CAENN, R. Drilling fluids: state of art, Journal of Petroleum Science and Engineering, 14, p. 221 – 230, 1966.
- CHILINGARIAN, G. V.; VORABUTR, P. Drilling and drilling fluids, Amsterdam, 2^a edição, Editora Elsevier, 1983, 767 p.
- CHUKWU, G. A.; YANG, L. Couette flow of non-Newtonian power-law fluids in narrow eccentric annuli, Ind. Engineer Chemical Research, 34, p. 936 – 942, 1995.
- CHUKWU, G. A.; YANG, L. A simplified couette flow solution of non-Newtonian power-law fluids in eccentric annuli, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 75, p. 241 – 247, 1995.
- DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. Composition and properties of drilling and completion fluids, Houston, 5th edition, Gulf Press, 1988, 630 p.
- DESOUKY, S. E. D. M.; AWAD, M. N. A. A new laminar to turbulent transition criterion for yield-pseudoplastic fluids, Journal of Petroleum Science and Engineering, 19, p. 171 – 176, 1998.
- DODGE, D. W.; METZNER, A. B. Turbulent flow of non-Newtonian systems, AIChE Journal, 5(2), p. 189 – 204, 1959.

- DODSON, J.; SCHMIDT, V. Gulf of Mexico trouble time creates major drilling expenses, Offshore, janeiro, p. 46 – 48, 2004.
- DOUGLAS Jr., J.; RACHFORD Jr, H .H. On the numerical solution of heat conduction problems in two and three space variables, Trans. Amer. Math. Soc., 82, p. 421 – 439, 1956.
- ESCUDIER, M. P.; GOULDSON, I. W. Concentric annular flow with center body rotation of a Newtonian and a shear-thinning liquid, International Journal of Heat and Fluid Flow 16, p. 156 – 162, 1995.
- ESCUDIER, M. P.; 'PRESTI, F.; SMITH, S. Drag reduction in the turbulent pipe flow of polymers, Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics, 81, p. 197 – 213, 1999.
- ESCUDIER, M. P.; GOULDSON, I. W.; OLIVEIRA, P. J.; PINHO, F. T. Effects of inner cylinder rotation on laminar flow of a Newtonian fluid through an eccentricity annulus, International Journal of Heat and Fluid Flow 21, p. 92 – 103, 2000.
- ESCUDIER, M. P.; GOULDSON, I. W.; PEREIRA, A. S.; PINHO, F. T.; POOLE, R. J. On the reproducibility of the rheology of shear-thinning liquids, Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics, 97, p. 99 – 124, 2001.
- ESCUDIER, M. P.; OLIVEIRA, P. J.; PINHO, F. T. Fully developed laminar flow of purely viscous non-Newtonian liquids though annuli, including effects of eccentricity and inner-cylinder rotation, International Journal of Heat and Fluid Flow 23, p. 52 – 73, 2002.
- ESCUDIER, M. P.; OLIVEIRA, P. J.; PINHO, F. T.; SIMTH, S. Fully developed laminar flow of non-Newtonian liquids though annuli: comparison of numerical calculations with experiments, Experiments in Fluids 33, p. 101 – 111, 2002.
- ESCUDIER, M. P.; DALES, C.; POOLE, R. J. Asymmetry in the turbulent flow of a viscoelastic liquid through an axisymmetric sudden expansion, Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics, 125, p. 61 – 70, 2005.

- ESCUDIER, M. P.; POOLE, R. J.; PRESTI, F.; DALES, C.; NOUAR, C.; DESAUBRY, C.; GRAHAM, L.; PULLUM, L. Observations of asymmetrical flow behaviour in transitional pipe flow of yield-stress and other shear-thinning liquids. Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics, 127, p. 143 – 155, 2005.
- ESCUDIER, M. P.; MIRZAZADEH, M.; RASHIDI, F.; HASHEMABADI, S. H. Purely tangential flow of PTT-viscoelastic fluid within a concentric annulus, Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics, 129, p. 88 – 97, 2005.
- ESTES, J.; RANDALL, B.; BRIDGES, K. Bingham plastic fluids more effectively clean horizontal holes, Oil & Gas Journal, novembro, p. 89 – 93, 1996.
- FARIA, R. C. Estudo experimental do gradiente de pressão em tubulações anulares concêntricas e excêntricas com e sem rotação, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 102 p., 1995.
- FERNANDES, R. L. J.; JUTTE, B. M.; RODRIGUEZ, M. .G. Drag reduction in horizontal annular two-phase flow, International Journal of Multiphase Flow, 30, p. 1051 – 1069, 2004.
- FLUENT INC., Fluent 6.1 User's Guide, Centerra Resource Park, Fluent, Lebanon, NH 03766, 2005.
- FORSYTHE, G. E.; WASOW, W. R. Finite Difference Methods for Partial Differential Equations, Wiley, p. 15 – 84, 1960.
- FOUMENY, E. A.; DOMBROWSKI, N.; OOKAWARA, S.; RIZA, A. The influence on the entry length and pressure drop for laminar pipe flow, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 71, p. 472 – 476, 1993.
- FRANCO, J. M.; VIERA, M. J. R.; DELGADO, M. A.; SANCHEZ, M. C.; GALLEGOS, C. On the drag reduction for the two-phase horizontal pipe flow of highly viscous non-Newtonian liquid/air mixtures: case of lubricating grease, International Journal of Multiphase Flow, 32, p. 232 – 247, 2006.

- FRIEDMANN, M., GILLIS, J.; LIRON, N. Laminar flow in a pipe at low and moderate Reynolds numbers, Applied Science Research, 19, p. 426 – 438, 1968.
- FRIGAARD, I. A.; ALLOUCHE, M.; GABARD-CUOQ, C. Setting rheological targets for chemical solutions in mud removal and cement slurry design, SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Houston, Texas, 13 – 18 fevereiro, 2001.
- GROWCOCK, F. B. e FREDERICK, T. P. Operational limits of synthetic drilling fluids, SPE Drilling & Completion, september, p. 132 – 136, 1996.
- GÜCÜYENER, I. H.; MEHMETOGLU, T. Characterization of flow regime in concentric annuli and pipes for yield-pseudoplastic fluids, Journal of Petroleum Science and Engineering, 16, p. 45 – 60, 1966.
- HAIDER, A.; LEVENSPIEL, O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and non spherical particles, Powder Technology, 58, p. 63 – 70, 1989.
- HANKS, R. W. The laminar-turbulent transition for flow in pipes, concentric annuli and parallel plates, AIChE Journal, 9(1), p. 45 – 48, 1963.
- HANRATTY, T. J.; LIBERATORE, M. W.; BAIK, S.; MCHUGH, A. J. Turbulent drag reduction of polyacrylamide solutions: effect of degradation on molecular weight distribution, Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics, 123, p. 175 – 183, 2004.
- HASSAGER, O.; SZABI, P. Flow of viscoplastic fluids in eccentric annular geometries, Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics, 45, p.149 – 169, 1992.
- HEDSTROM, B. O. A. Flow of plastic material en pipes, Industrial Chemical Engineering, 44(3), p. 651 – 656, 1952.
- HEMPHILL, T. Tests determine oil-mud properties to watch in high-angle wells, Oil & Gas Journal, november, p. 64 – 70, 1990.

- HEMPHILL, T.; RAVI, K. Calculation of drillpipe rotation effects on fluids in axial flow: an engineering approach, SPE Annual Technical Conference, Dallas, Texas, 9 a 12 de outubro, 2005.
- HERSCHEL, W. H.; BULKLEY, R. Measurement of consistency as applied to rubber-benzene solutions, Proc. ASTM, 26, p. 621 – 630, 1926.
- HUGHES, T. I.; JONES, T. G. J.; HOUWENM O. H. Chemical characterization of CMC and its relationship to drilling-mud rheology and fluid loss, SPE Drilling & Completion, setembro, p. 157 – 164, 1993.
- IYOHO, A. W. Drilled cuttings transport by non-Newtonian drilling fluids through inclined, excentric anulli, Tese de Doutorado, Tulsa University, Estados Unidos, 1980.
- JAYANTI, S.; WOLF, A.; HEWITT, G. F. Flow development in vertical annular flow, Chemical Engineering Science, 56, p. 3221 – 3235, 2001.
- JONES, T. E. R.; GRAHAM, D. I. Settling and transport of spherical particles in power-law fluids at finite Reynolds number, Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics, 54, p. 465 – 488, 1994.
- JOSEPH, D. D.; GARCÍA, F.; GARCÍA, R.; PADRINHO, J. C.; MATA, C.; TRALLERO, J. L. Power law and composite power law friction factor correlations for laminar and turbulent gas – liquid flow in horizontal pipelines, International Journal of Multiphase flow, 29, p. 1605 – 1624, 2003.
- JOSEPH, D. D.; KO, T.; CHOI, H. G.; BAI, R. Finite element method simulation of turbulent wavy core-annular flows using $k-\omega$ turbulence model method, International Journal of Multiphase flow, 28, p. 1205 – 1222, 2002.
- LANGHAAR, H. L. Steady flow in the transition length of a straight tube, Journal of Applied Mechanics, 9, 55 – 58, 1942.