3 Metodologia Experimental

Como já foi mencionado na introdução desse trabalho, deseja-se modelar o problema físico de escoamento em um poço com hipóteses simplificadoras e investigar as características cinemáticas e geométricas dos padrões estabelecidos nos regimes de escoamento.

No presente capítulo será explorada a metodologia empregada para a solução do problema através das técnicas experimentais de velocimetria por imagem de partículas e anemometria por efeito Doppler. Uma descrição detalhada da montagem experimental e de sua instrumentação será apresentada, assim como o procedimento experimental para obtenção das principais variáveis do problema. Pretende-se também justificar a escolha dos fluidos não newtonianos utilizados com base na reologia dos fluidos de perfuração.

Uma discussão sobre a análise das incertezas envolvidas nos procedimentos de medição das propriedades dos fluidos, do sistema de aquisição de dados e das grandezas dimensionais do problema estudado será explorada, bem como a propagação dessas incertezas na obtenção do número de Reynolds crítico, uma vez que é uma das variáveis respostas mais importantes do presente trabalho.

3.1. Montagem experimental

Como pode ser verificado na revisão da literatura desse trabalho, diversos pesquisadores construíram experimentos para estudar os padrões de escoamento em um espaço anular. Várias foram as motivações para construção dos experimentos mencionados ocasionando a necessidade de características singulares a cada montagem experimental. O presente trabalho também tem suas motivações específicas que levaram a um projeto e montagem com dimensões não usuais.

A Figura 14 ilustra de forma esquemática a bancada experimental utilizada com os principais equipamentos e instrumentos de medição.

Essa bancada, constituída de um espaço anular formado por dois cilindros concêntricos e preenchida com um determinado fluido, possibilitou a produção de um escoamento através da rotação do cilindro interno. Dependendo do número de Reynolds ajustado, o escoamento apresentava-se no regime de Couette ou de Taylor-Couette. A identificação desses padrões de escoamento, a medição dos perfis de velocidade e a caracterização geométrica dos vórtices de Taylor foram as principais informações a serem obtidas experimentalmente.

O espaço anular mencionado no parágrafo anterior foi constituído por um cilindro externo de acrílico cristal com 230 ± 1 mm de diâmetro externo, com 5 m de espessura de parede e 2500 mm de comprimento. As extremidades axiais desse tubo foram faceadas para possibilitar o encaixe das tampas que possibilitaram a montagem do cilindro interno. No interior desse tubo e concentricamente ao mesmo foi montado um cilindro de alumínio com diâmetro externo de 125,0 \pm 0,1mm. Outros detalhes da montagem desse cilindro serão apresentados na Seção 3.1.1.

Em cada extremidade do tubo de acrílico foi montada uma tampa de acrílico para permitir a visualização lateral. Em cada tampa, foi montado um mancal de alumínio para fixação do rolamento e sistema de vedação. Os detalhes das tampas e do mancal serão apresentados na Seção 3.1.2.

A obstrução parcial do anular foi promovida pela presença da placa horizontal entre os dois cilindros. A placa foi constituída de acrílico visando a obtenção de imagens para medição de velocidade em qualquer plano do espaço anular. Uma descrição dos aspectos construtivos da placa está apresentada na seção 3.1.3.

Após a montagem experimental ter sido concluída, diversos testes de desempenho foram realizados com a experiência para que o mínimo de vibração fosse produzido durante o funcionamento. O experimento foi assentado sobre uma estrutura metálica construída com tubos retangulares (metalon) de aço SAE1020 com bitola de 50 x 30 mm e 2 mm de parede. Dois apoios na forma de engaste foram propiciados nas extremidades e dois apoios livres foram instalados intermediariamente, propiciando assim uma menor deformação do tubo e garantindo uma maior concentricidade axial. Nos pés da estrutura foram colocados amortecedores tipo vibra-stop micro II para nivelar a estrutura e reduzir a vibração proveniente do meio externo.



Figura 14 - Desenho esquemático da montagem experimental.

3.1.1. Montagem do cilindro interno

O cilindro interno de alumínio montado concentricamente ao cilindro externo foi usinado com diâmetro externo de 125,0 \pm 0,1mm. O acabamento superficial desse cilindro foi feito com lixa d'água número 350 para garantir uma baixa rugosidade superficial. Esse cilindro foi construído a partir da montagem de três tubos de duro-alumínio com aproximadamente 840 mm. Cada tubo recebeu um tratamento de anodização marítima cinza³ com aproximadamente 15µm de cobertura.

Nas extremidades axiais de cada cilindro, a parte interna da parede foi usinada para a entrada de uma camisa que possibilitou a união entre cilindros. Dois rasgos foram produzidos nas extremidades de cada camisa possibilitando a fixação de um anel de vedação para impedir a entrada de líquido no tubo. Uma representação esquemática da camisa entre dois tubos é ilustrada na Figura 15.



(b)

Figura 15 – Representação esquemática da montagem do cilindro interno. (a) Montagem geral; (b) montagem da camisa com dois anéis de vedação entre dois cilindros.

³ A anodização cinza promove maior reflexão de luz proveniente das técnicas de velocimetria a laser. Após alguns testes em laboratório, percebeu-se que a anodização preta seria melhor para o cilindro interno, embora não tenha sido refeita a anodização.

Após a união dos três cilindros, uma ponta de eixo foi montada em cada extremidade da montagem, conforme pode ser verificado também na Figura 15. Essa ponta de eixo encaixou na parte interna usinada do cilindro de alumínio, conforme descrito anteriormente. Essa ponta de eixo apresentava um rasgo para fixação de um anel de vedação para impedir a entrada de líquido nas extremidades do eixo. A montagem final das três partes com as duas pontas de eixo foi travada com um tirante de aço inoxidável com rosca de 3/8".

As fotos apresentadas na Figura 16 foram tiradas para mostrar a qualidade da montagem realizada no cilindro.



(a)



(b)

Figura 16 – Montagem final. (a) Entre tubos; (b) Entre a ponta de eixo e cilindro de alumínio.

3.1.2. Tampas laterais e mancais

Conforme mencionado anteriormente, em cada extremidade do cilindro de acrílico foi montada uma tampa lateral e um mancal. A tampa lateral de acrílico apresentava uma espessura de 25 mm e um rasgo para montagem do anel de vedação que impedia o vazamento de fluido para o meio externo. O mancal montado na tampa lateral foi construído em duralumínio. Esse mancal foi usinado de tal forma a acomodar um rolamento de esferas SKF blindado para um eixo de 25,0 mm. Nesse mancal, um selo mecânico foi montado para impedir vazamento pelo rolamento. A Figura 17 ilustra a montagem do mancal na tampa lateral de acrílico e a presença do rolamento.



Figura 17 – Vista da montagem do mancal na tampa lateral de acrílico.

Um rebaixo na tampa lateral pelo lado contrário à montagem do mancal foi produzido, conforme pode ser verificado na Figura 18, para entrada do cilindro interno de alumínio e impedir o aparecimento de um escoamento entre o cilindro interno e a tampa lateral. A minimização dessa folga entre o cilindro interno e a tampa lateral propiciou um escoamento com menor efeito de parede.

A foto apresentada na Figura 19 ilustra a montagem real do rolamento na tampa lateral, a presença do rolamento e do selo mecânico, além do anel de vedação que atuava na parede interna do cilindro externo.



Figura 18 – Rebaixo na tampa lateral para impedir a presença de escoamento entre a tampa lateral e o cilindro interno.



Figura 19 – Montagem real do mancal na tampa lateral.

3.1.3. Placa de obstrução

A obstrução parcial do espaço anular foi estabelecida a partir da montagem de uma placa horizontal de acrílico cristal com 2,48 m de comprimento e 4,0 mm de espessura. A placa montada foi de acrílico, visto que sua montagem na posição horizontal não impedia a visualização pela parte inferior do tubo.

Para cada nível de obstrução proposto, uma largura foi estabelecida para a placa visando à acomodação no cilindro externo. Ao longo do comprimento da placa horizontal, a borda foi chanfrada para evitar a presença de degrau e minimizar a perturbação local do escoamento. O ângulo de chanfro foi variável em função da curvatura no contato da placa com o cilindro de acrílico. Seis peças de acrílico foram coladas na parte inferior da placa espaçadas uniformemente para possibilitar a fixação de um tirante de aço inoxidável de 3/16" com 8 cm de comprimento, conforme pode ser verificado na Figura 20.



Figura 20 – Placa horizontal de acrílico. Detalhes construtivos.

Seis furos com rosca de 1/4" foram feitos no cilindro externo de acrílico nas mesmas coordenadas axiais sobre a placa horizontal em que as peças de acrílico foram coladas. Esses furos no cilindro de acrílico possibilitaram a passagem do tirante de 3/16" descrito anteriormente. Pelo lado externo do cilindro de acrílico foi montada uma porca para travar a montagem. Após o travamento, a porca e o tirante foram cobertos com silicone para evitar vazamento pela rosca. As roscas de 1/4" produzidas no cilindro de acrílico foram necessárias visto que na ausência das placas, parafusos com 1/4" foram montados com o objetivo de obstruir os furos e evitar vazamentos.

Uma espuma de alta densidade foi colocada no espaço anular obstruído, isto é, em baixo da placa de obstrução, impedindo o escoamento axial de fluido de teste pela região mencionada, como foi constatado em alguns experimentos preliminares realizados nessa montagem experimental sem a presença da espuma de alta densidade. A espuma de alta densidade era cortada de modo a formar uma meia-cana. A montagem dessa espuma em pontos localizados não impediu a visualização nem deformou a placa. Esse escoamento indesejável ocorria pelas frestas da montagem da placa de obstrução parcial e fazia os vórtices transladarem axialmente.

3.1.4. Caixa de visualização

A visualização de escoamentos no interior de tubos cilíndricos é afetada pelo efeito de lente da curvatura da geometria. Para reduzir esse efeito, uma caixa para visualização foi montada no tubo de acrílico, além de propiciar uma menor interferência do índice de refração dos diferentes materiais utilizados.

A caixa de visualização foi construída com acrílico cristal de espessura igual a 12,7 mm. As dimensões da caixa foram respectivamente: 500 mm de comprimento axial, 350 mm de altura e 350 mm de largura. Essas dimensões são justificadas pelo diâmetro do cilindro externo de acrílico ser de 230 mm. Com o comprimento especificado foi possível verificar a presença de cinco pares de vórtices ao longo do comprimento da caixa. Em dois lados da caixa foram produzidos dois furos de aproximadamente 230mm de diâmetro. O cilindro de externo de acrílico passava com ajuste com folga por esses dois furos. Em cada um dos dois furos da caixa foi produzido um chanfro para acomodar parcialmente um anel de vedação. Cada anel de vedação foi comprimido por um disco de acrílico com 330 mm de diâmetro externo e 230 mm de diâmetro interno com um chanfro similar ao produzido na caixa de acrílico. A montagem do disco de acrílico na caixa de visualização foi possível graças à fixação de seis porcas do tipo borboleta nos parafusos montados na caixa. A Figura 21 mostra um

desenho esquemático do dispositivo de fixação do disco de acrílico na caixa de visualização e a vedação possibilitada pela montagem.



Figura 21 – Representação esquemática da montagem da camisa com dois anéis de vedação entre dois cilindros. Montagem do cilindro interno.

O dispositivo montado possibilitava o giro do cilindro externo, sem alteração da posição da caixa de visualização, proporcionando a medição do campo de velocidade em qualquer plano r- θ do anular. Essas rotações do cilindro externo eram realizadas com o cilindro interno em repouso para que o escoamento não fosse perturbado. O desenho esquemático da montagem da caixa de visualização no cilindro externo com o sistema de travamento é apresentado na Figura 22(a).

Duas faces adjacentes da caixa foram montadas com vidro borosilicato de 4,0 mm. Um dispositivo, montado na estrutura do experimento e sob a caixa, ajudava no suporte do vidro de borosilicato montado na parte inferior da caixa, visto que o mesmo poderia se descolar por causa do peso da coluna de líquido contido no interior da caixa. Uma outra função desse dispositivo foi a de nivelar a caixa de visualização e impedir a flexão do tubo de acrílico dado o peso da caixa de visualização quando a mesma estava preenchida com líquido. Uma foto desse dispositivo de madeira é apresentada na Figura 22(b). O vidro borosilicato é preferido para aplicações em ótica visto sua qualidade na transmissão de luz. Por esse motivo, em uma dessas faces era incidido o feixe de laser proveniente da técnica de velocimetria. Pela outra, a visualização pela câmera , na técnica de PIV.



(b)

Figura 22 – Caixa de acrílico. (a) Representação esquemática do dispositivo de fixação da caixa de visualização no cilindro de acrílico. (b) Foto do suporte inferior da caixa.

O líquido contido na caixa de visualização dependia do fluido que estava contido dentro do anular. O fluido ideal de trabalho nos experimentos com tubos cilíndricos é a glicerina, visto que o índice de refração é muito próximo do vidro borosilicato e do acrílico cristal. Para os casos newtonianos testados, a caixa foi preenchida com glicerina P.A, embora a seção de teste tenha sido preenchida com uma solução de 95% de glicerina e 5% de água destilada.

Os fluidos não newtonianos testados no espaço anular foram submetidos para análise do índice de refração através de um refratômetro da Zeiss no Laboratório de Físico-química da PUC-RIO. Constatou-se que o valor do índice de refração da solução de carbopol e água destilada, a 25ºC, foi igual ao obtido para a água destilada à mesma temperatura. Isso se deve ao fato de que as concentrações de carbopol utilizadas nas soluções foram baixas o suficiente para não alterar a característica do índice de refração (menores que 0,15% em peso), embora tenha havido um aumento na turbidez da água. Dessa forma, utilizou-se uma solução de glicerina e água destilada nas mesmas concentrações utilizadas na produção do fluido não newtoniano.

3.1.5. Enchimento da seção de teste

A necessidade de enchimento da seção de testes com fluidos não newtonianos obrigou a instalação de uma bomba de parafuso modelo HD-20 da Geremia/Weatherford com capacidade de transporte de até 500 litros por hora. Esse tipo de bomba se faz necessário para transporte de fluidos não newtonianos visto que as moléculas poliméricas não são degradadas pela ação do rotor da bomba, o que é muito comum acontecer em bombas centrífugas.

A vazão da bomba de parafuso foi controlada através de um inversor de freqüência WEG CFW08 para evitar a formação de bolhas e impedir a cavitação da mesma em alguns casos extremos em que as faixas de viscosidade do fluido não newtoniano eram elevadas.

O fluido utilizado era confinado inicialmente em bombonas herméticas, impedindo assim que o fluido armazenado absorvesse água por meio da glicerina contida na solução, o que mudaria a viscosidade devido à contaminação. Apenas durante o enchimento as bombonas permaneciam abertas.

O enchimento da seção de teste foi possível com a abertura das válvulas de esfera de 3/4" (M) e a de gaveta de 1/2" (O) em conjunto com o fechamento

das válvulas (K), (L) e (J). A válvula de esfera (N) foi mantida aberta para que o ar fosse expulso do interior do anular durante o enchimento. As válvulas referenciadas se encontram na Figura 14.

Para homogeneizar a mistura de fluido e suspender as micro-esferas de vidro ocas usadas nas técnicas de velocimetria a laser, o circuito fechado de circulação de fluido foi utilizado. O circuito foi disponibilizado através da abertura da válvula de gaveta de 1/2" (O), em conjunto com a abertura das válvulas de esfera (J) e (K) e o fechamento das válvulas (L) e (M).

3.1.6. Transmissão de potência para o cilindro interno

O sistema de transmissão de potência foi concebido por um motor elétrico AC trifásico que possibilita o controle de rotação através da freqüência, um par de polias sincronizadoras e uma correia dentada opitbelt-ZR050/510L⁴ de 12,7 mm de largura e passo 3/8". A polia montada no eixo do motor continha 12 dentes, enquanto a segunda, montada na ponta do eixo do cilindro interno, apresentava 84 dentes. A relação de transmissão estabelecida nessa montagem foi de 7:1.

Inicialmente um motor trifásico WEG 0,25CV com quatro pólos foi usado. Essa configuração de motor apresenta rotação nominal em torno de 1720 RPM. Mesmo com a utilização do inversor de freqüência YASKAWA-VSminiV7 2,2kW possibilitando uma rampa de rotação até a rotação nominal em 6000s, a aceleração angular adimensional, *a**, do cilindro interno ficou acima do valor crítico estabelecido por Park et al. (1981). A aceleração adimensional é um parâmetro importante para identificação da transição. Esse parâmetro foi definido na eq. (3) do Capítulo 1 e será melhor explicada no capítulo seguinte.

Para melhorar a variável de aceleração angular adimensional, o motor elétrico AC de quatro pólos foi substituído por um motor elétrico de oito pólos. Essa substituição possibilitou uma aceleração angular adimensional do cilindro interno ao nível aceitável proposto por Park et al. (1981), visto que a rotação nominal desse novo motor é de 850 RPM. Para suportar o aquecimento natural do motor em regime de funcionamento em baixas rotações, um motor com 0,50 CV foi escolhido, uma vez que o motor antigo, que era menos potente, apresentava aquecimento acentuado ao trabalhar em regime de baixas rotações por tempo acima de cinco minutos. Um desenho ilustrando a montagem da polia

em uma das extremidades do cilindro é apresentado na Figura 23. No referido desenho é possível visualizar o apoio e o mancal montado na tampa lateral.



Figura 23 – Sistema de transmissão montado na ponta do eixo em uma das extremidades do cilindro.

3.1.7. Medidor de freqüência angular

Um dispositivo para medição de freqüência angular foi projetado para registrar a história de rotação do cilindro interno. O dispositivo foi construído no laboratório visando uma exatidão maior no valor da rotação que os tacômetros comercialmente disponíveis, além da facilidade de adaptação na experiência e do baixo custo. O dispositivo era constituído de três partes: i) encoder; ii) circuito eletrônico; e iii) placa de aquisição de dados e software de processamento de sinal.

O "encoder" foi construído a partir de um disco de aço de 2,0 mm de espessura, com 60 rasgos produzidos por uma fresa tipo serra de corte com 1,5mm de largura. Os rasgos apresentavam um passo de 6 graus conseguidos

⁴ Correia dentada vendida pela empresa Schneider, localizada em São Paulo/SP.

através do divisor da fresadora. Esse processo de fabricação possibilitou a confecção dos rasgos com boa exatidão. Uma foto do "encoder" construído é apresentada na Figura 24.

O circuito eletrônico foi montado sobre uma placa de circuito e alimentado com uma fonte DC de 9 Volts. O principal componente foi uma chave óptica que serviu como emissor e receptor de sinal infravermelho.

O sinal de tensão produzido pelo circuito eletrônico foi limitado entre 0 e 5 Volts. Devido à configuração dos rasgos, a onda produzida pelo medidor de freqüência angular foi na forma de onda quadrada. A aquisição do sinal de tensão foi realizada por uma placa dedicada de 16 bits da National Instruments, modelo PC-MIO-16XE.

O tratamento dos dados de tensão foi feito por uma rotina programada em LabView. Essa rotina possibilitou a identificação dos pulsos e a conversão em freqüência. Além da medição de freqüência, essa rotina controlava um sinal de saída de "trigger" de tensão 5 Volts TTL para acionamento do sincronizador do sistema de velocimetria por imagem de partículas (PIV).



Figura 24 – Foto do encoder e da chave óptica montada na ponta do eixo do cilindro interno.

3 Metodologia

O tempo para o programa LabView executar a rotina de checagem e contagem de pulso das ondas quadradas foi sempre, pelo menos, uma ordem de grandeza menor que o intervalo de tempo entre dois pulsos do "encoder".

O Diagrama esquemático da rotina em LabView encontra-se no Apêndice B e o circuito do medidor de freqüência encontra-se no Apêndice C.

3.2.

Medição de velocidade: Velocimetria por imagens de partículas

A técnica de velocimetria por imagem de partículas ("Particle Image Velocimetry" – PIV) é uma técnica de medição de campo de velocidade não intrusiva, possibilitando medições instantâneas numa seção de um escoamento (Raffel et al., 1998). A montagem do sistema de velocimetria consiste em um conjunto de equipamentos que trabalham de forma acoplada, conforme será descrito brevemente a seguir.

No fluido que está escoando é colocada uma certa quantidade de micro partículas que têm a capacidade de servir como traçadores. Essas partículas, por premissa básica, devem seguir o escoamento para que o campo medido através da técnica experimental seja similar ao campo de escoamento do fluido (Dring, 1982). As partículas utilizadas na técnica de PIV podem ser sólidas para escoamento de líquidos ou aerossóis a base de óleo vegetal para escoamento de gases.

Ao mesmo tempo em que as partículas menores são desejadas por seguirem o escoamento mais fielmente, o espalhamento de luz é melhor nas partículas maiores. Para líquidos, uma escolha de diâmetro otimizada, está na ordem de 10µm, conforme a seleção feita nesse trabalho.

As partículas traçadoras são iluminadas⁵ em um plano do escoamento pelo menos duas vezes dentro de um curto espaço de tempo. A luz espalhada pelas micro-partículas é registrada por um sistema de aquisição de imagens em um quadro ou em uma seqüência de quadros, sincronizados por um sincronizador digital. O deslocamento das partículas entre os pulsos de luz é determinado pela evolução das imagens gravadas pelo sistema de PIV. A grande quantidade de dados coletados no processamento das imagens requer um algoritmo eficiente

⁵ A fonte de iluminação mais comum é o laser pulsado devido à potência concentrada, embora a iluminação possa ser realizada por lâmpadas halogênicas.

de pós-processamento. A Figura 25 ilustra a montagem experimental com o laser do sistema de PIV em funcionamento.



Figura 25- Foto da bancada experimental com o laser do sistema de PIV em funcionamento.

3.2.1. Partículas traçadoras

Para o presente trabalho as partículas utilizadas foram esferas ocas de vidro com cobertura metalizada modelo SH400S20 do tipo CONDUCT-O-FIL[®] produzida pela Potters Industries Inc⁶. Essas partículas têm diâmetro médio de 13 µm, sendo que 10% das partículas têm diâmetro de até 6 µm e 90% tem diâmetro até 33µm. A densidade média das esferas é de 1,6. Um produto semelhante a esse SH400S20 é ilustrado na Figura 26 obtida por um microscópio eletrônico de varredura, em que pode-se perceber o formato esférico das partículas e a variação do diâmetro.

⁶ Material importado pela empresa R&D International Importação e Exportação Ltda - São Paulo/Brasil.



Figura 26 - Foto ilustrativa de uma solução coloidal com esferas do tipo CONDUCT-O-FIL® obtida por microscópio eletrônico de varredura.

3.2.2. PIV: detalhes operacionais

Para o presente trabalho, dois lasers Nd:YAG, ajustados para o segundo harmônico, foram utilizados como fonte de iluminação. Os lasers podem pulsar numa freqüência máxima de 15Hz, defasados de um intervalo de tempo Δt . O pulso de luz coerente emitido por cada laser tem comprimento de onda igual a 532nm. Esses feixes de luz passam por um conjunto de lentes, uma lente cilíndrica e uma esférica, produzindo dessa forma um plano de luz não colimado com espessura mínima na distância focal da lente esférica.

As partículas traçadoras utilizadas são iluminadas em um plano por dois feixes de luz seguidos dentro de um curto intervalo de tempo. A luz espalhada por essas partículas iluminadas passa através de um conjunto de lentes de alta qualidade montado a uma câmera digital PIVCAM 10-30 da TSI, chegando até o CCD da mesma. O par de imagens é armazenado na memória RAM de um computador⁷ dedicado. Após o registro da seqüência de quadros, os arquivos eram gravados fisicamente no disco rígido. O sincronismo dos lasers com a câmera CCD foi possível por causa de um sincronizador digital TSI modelo 610032.

Após os pares de imagens serem arquivados em meio digital, o processamento das imagens era realizado. O processamento consistiu em dividir a primeira imagem em pequenas janelas de interrogação com 64×64 pixels⁸ e descobrir onde as partículas dessa janela encontravam-se na segunda imagem.

⁷ O computador utilizado apresentava 2,0 Gbytes de memória Ram, possibilitando o registro de

uma seqüência de aproximadamente 930 pares de imagens.

⁸ Um pixel corresponde ao menor elemento de uma imagem.

A segunda imagem era varrida por uma área da mesma dimensão da primeira imagem e a identificação da nova posição era obtida através de correlação cruzada.

Um par de imagens tipicamente obtido pela técnica de PIV com alta densidade de partículas, é ilustrado na Figura 27. Na figura, a linha clara horizontal que aparece na parte superior delimita a parede externa do cilindro interno, enquanto que a linha horizontal na parte inferior delimita a parte interna do cilindro externo de acrílico.





Figura 27 - Imagem com alta densidade de partículas. (a) imagem nº 1, t: 0,0s; (b) imagem nº 2, t: 400,0ms.

A calibração do sistema de aquisição de imagens foi realizada para obter o vetor deslocamento dessas partículas no plano iluminado com dimensões do mundo real, visto que o deslocamento obtido na correlação cruzada é dado em pixels. A calibração consistiu na medição do número de pixels entre duas fitas coladas no cilindro de alumínio, espaçadas 40,0 mm uma da outra. Dessa forma, pode-se obter a dimensão em milímetros de um pixel.

O vetor velocidade de cada janela de interrogação foi obtido a partir do vetor deslocamento e do intervalo de tempo entre as duas imagens registradas pela câmera. O ajuste do intervalo de tempo entre os registros das imagens foi feito pelo software Insight 4.0 que controlava o sistema de PIV. Essa metodologia era a mesma empregada para obtenção do vetor velocidade para as outras janelas de interrogação, formando assim o campo de velocidade no plano.

A Figura 28 ilustra o resultado do processamento de imagem realizado sobre o par de imagens da Figura 27 utilizando uma janela de interrogação com 64×64 pixels, com geração de malha pelo método de Nyquist. Nenhum filtro foi aplicado na imagem para aumentar a exatidão do processamento.



Figura 28 - Campo de velocidade para o par de imagens da Figura 3.6. Área de interrogação com 64×64 pixels, usando a geração de malha pelo método de Nyquist.

O processamento de imagens com janelas de visualização de 64 x 64 pixels, conforme a Figura 28, possibilitou um campo de velocidade com 50 x 30

vetores distribuídos nas coordenadas axial e radial, respectivamente. A dimensão física da janela de interrogação para essa resolução é de aproximadamente 3,0 x 3,0 mm. O deslocamento das janelas de interrogação é de 32 pixels para atender o critério de Nyquist selecionado. Esse método possibilita uma superposição de 50% das janelas de interrogação. Os campos de velocidade foram obtidos a partir da média de 100 campos instantâneos.

3.2.3.

Posicionamento da câmera CCD

A câmera CCD utilizada na técnica de velocimetria por imagens de partículas foi montada sobre um conjunto de posicionadores lineares da Velmex, Inc. montados de forma a propiciar uma mesa X-Y-Z. O ajuste de posição foi manual e a resolução do colar de cada manípulo era de 0,01 mm. A utilização dessa mesa possibilitou a translação axial da câmera CCD para medição do campo de velocidade de vórtices adjacentes ao estabelecido inicialmente.

3.2.4. Sincronismo do PIV com a rotação do cilindro interno

Cada campo de velocidade obtido pela técnica de PIV foi sincronizado com a rotação do cilindro interno através da saída TTL disponível pela placa da National Instruments e pela entrada no sincronizador do PIV. Dessa forma, cada campo de velocidade foi associado a uma rotação do cilindro interno, obtida de forma indireta através dos registros de pulsos do encoder, e conseqüentemente a um número de Reynolds rotacional. O acionamento do sincronizador acontecia a cada 150 pulsos, aproximadamente duas voltas e meia do cilindro interno.

3.3.Medição de velocidade: velocimetria a laser Doppler

A técnica de velocimetria a laser Doppler (LDV) possibilitou a medição do perfil tangencial de velocidade no espaço anular livre de obstrução para qualificação da montagem experimental. Visto que o comprimento axial dos tubos era de 2,50 m e que a medição do campo de velocidade pela técnica de PIV no plano r- θ em $z^*=0$, simetria do experimento, foi impossibilitada pela espessura de líquido presente no caminho ótico da câmera montada em uma das extremidades axiais, a técnica de laser Doppler solucionou o problema.

A técnica de laser Doppler (Yeh & Cummins, 1964) consiste em uma técnica ótica, não intrusiva, de medição de velocidade a altas freqüências, podendo chegar até dezenas de kHz, sendo muito utilizada em escoamentos turbulentos. Para a medição desejada, a freqüência de aquisição de dados esteve da ordem de 2kHz.

O conjunto de equipamentos que formam o sistema de velocimetria a laser Doppler utilizado consistiu nos seguintes equipamentos:

- Laser Coherent INNOVA 70 multicolor de 5W de potência;
- Multicolor receiver 9230 TSI Color link (receptor de sinal);
- Digital burst correlator TSI IFA 755 (analisador de "bursts");
- Sonda de medição 9253-350 TSI.

O equipamento de LDV disponibiliza dois canais de medição, embora apenas um canal de medição tenha sido utilizado, pois apenas o componente de velocidade tangencial era desejada.

O posicionamento da sonda de laser Doppler foi governado pela mesma mesa X-Y-Z da Velmex, Inc., bastando a troca do suporte da câmera para o suporte da sonda de LDV. O posicionamento se deu com a exatidão estabelecida pela resolução do colar do manípulo que foi de 0,01mm.

A localização do volume de medição dentro do espaço anular foi corrigida devido ao fato de os feixes provenientes da sonda de laser Doppler atravessarem meios com diferentes índices de refração e superfícies curvas. O desenvolvimento matemático de localização do volume de medição dentro do espaço anular em função de um deslocamento da sonda de laser Doppler pelo lado de fora da experiência é apresentado no Apêndice D.

3.4. Medição de temperatura

O número de Reynolds rotacional é fortemente influenciado pelas propriedades físicas do fluido presente no espaço anular, visto que a glicerina apresenta uma substancial variação na viscosidade com o aumento da temperatura. Um termômetro de bulbo, com resolução de 0,1°C foi inserido pela válvula (U) antes do cilindro interno iniciar sua rampa de rotação e após a realização das medidas de velocidade utilizando uma das técnicas de velocimetria.

Nos casos em que o fluido testado foi o newtoniano, os experimentos realizados com o objetivo de identificar a transição de regimes, a temperatura média das medições foi utilizada para calcular a viscosidade cinemática do fluido. Para os experimentos realizados com o objetivo de medir o perfil de velocidade, apenas a temperatura terminal foi registrada. Nos casos de fluidos não newtonianos, as temperaturas inicial e terminal foram iguais, exceto em alguns casos em que a variação foi de 0,2ºC. A variação dos parâmetros reológicos para essa variação de temperatura foi admitida ser desprezível.

3.5. Fluidos

Os fluidos utilizados nesse trabalho simularam as propriedades físicas de um fluido de perfuração típico utilizado em um processo de campo. Os fluidos de perfuração apresentam propriedades físicas tais que a viscosidade varia com a taxa de deformação. As características viscoelásticas e tixotrópicas dos fluidos não foram testadas.

Para baixas taxas de deformação a viscosidade do fluido de perfuração deve ser alta o suficiente para propiciar uma menor velocidade de sedimentação dos cascalhos transportados enquanto que e em altas taxas de deformação, a viscosidade deve ser baixa o suficiente para propiciar uma baixa potência de bombeio. A densidade do fluido de perfuração deve propiciar uma pressão hidrostática, através da coluna de líquido, tal que a parede do poço apresente estabilidade estrutural. Essas propriedades físicas são projetadas para cada poço em função da formação, profundidade de perfuração, taxa de penetração, entre outras variáveis. Para o presente estudo, apenas a reologia foi considerada. Ao todo, três fluidos foram testados: um newtoniano e dois não newtonianos.

3.5.1. Fluido newtoniano

Alguns testes de viscosidade foram realizados para diversas concentrações de glicerina e água destilada a 25ºC com o propósito de conhecer o comportamento da viscosidade da glicerina com o aumento da concentração de água, conforme pode ser observado na Figura 29. Uma questão importante a ser observada na curva proposta é que a contaminação da glicerina com a água ou umidade pode afetar substancialmente a viscosidade da mesma.

3 Metodologia

O fluido newtoniano utilizado nos experimentos consistiu de uma solução de 90% de glicerina P.A. e 10% de água destilada. Essa concentração foi escolhida para diminuir a viscosidade da glicerina, facilitando assim o enchimento da seção de teste, além de diminuir a formação de bolhas. Para cada montagem realizada uma amostra foi coletada e guardada para análise posterior. Nas simulações numéricas, apenas as propriedades físicas da glicerina pura foram usadas, visto que o problema depende do número de Reynolds e seria desnecessária a mudança do valor da viscosidade. A viscosidade cinemática utilizada nos cálculos do número de Reynolds experimental para o fluido newtoniano foi obtida por um viscosímetro calibrado Cannon-Fenske 400.

O procedimento de medição foi executado conforme a metodologia empregada pelo Laboratório de Caracterização de Fluidos da PUC-RIO, acreditado pelo INMETRO. Foram realizados seis testes para cada temperatura, sendo a mesma controlada por um termômetro calibrado imerso no banho dedicado para viscosímetros. As temperaturas escolhidas foram de 24,5; 25,0 e 25,5°C para poder fazer um ajuste de curva e obter a função da viscosidade cinemática em termos da temperatura. Como a faixa de temperatura foi de 1,0°C, o ajuste estabelecido foi linear, embora a variação de viscosidade com a temperatura seja uma função exponencial.



Figura 29 – Viscosidade da solução de água e glicerina. Concentração expressa em percentual de peso. Temperatura de 25ºC.

79

A temperatura do fluido de trabalho durante os experimentos realizados esteve sempre por volta de 25ºC para que os valores das propriedades fossem utilizados a partir do ajuste linear dos dados de viscosidade.

Os valores de viscosidade cinemática do fluido newtoniano testado no experimento são apresentados na Tabela 1 para as diversas montagens realizadas e para cada temperatura testada. A incerteza expandida com intervalo de confiança na média de 95% também é apresentada na tabela. Os valores de χ apresentados na Tabela 1 representam a obstrução parcial do espaço anular adimensionalizada, em que *h* é a altura da obstrução e *d* é a dimensão do espaço anular.

Tabela 1	- Viscosidade	cinemática	para a	solução de	glicerina e	água destilada.
	$\gamma = 5/8 \ 1/4 \ e$	1/2	$\gamma = 3/8$		$\gamma = 3/4$	Sem placa

	χ = 5/8,1/4 e 1/2	$\chi = 3/8$	$\chi = 3/4$	Sem placa
Т	$\overline{v} \pm \delta \overline{v}$			
[ºC]	[mm²/s]	[mm²/s]	[mm²/s]	[mm ² /s]
24,5	306,8 ± 1,3	303,7 ± 1,3	317,7 ± 1,3	308,6 ± 1,3
25,0	295,2 ± 1,2	292,6 ± 1,2	305,5 ± 1,3	297,7 ± 1,3
25,5	284,7 ± 1,2	282,7 ± 1,2	294,0 ± 1,2	286,2 ± 1,2

3.5.2. Fluidos não newtonianos

A característica de queda da viscosidade com o aumento da taxa de deformação, efeito "shear-thinning", dos fluidos não newtonianos sobrepuja outras características reológicas em escoamentos em anulares (Escudier et al., 1995). Em função disso, os testes reológicos realizados focaram apenas a obtenção dos parâmetros do modelo escolhido em testes de cisalhamento. A variação de temperatura na mesma faixa de trabalho do fluido newtoniano mostrou que a variação dos parâmetros reológicos foi desprezível, podendo-se abandonar os efeitos de temperatura na reologia desses fluidos nas dadas faixas de temperatura.

Na produção dos fluidos não newtonianos, foram utilizadas duas soluções de glicerina P.A com uma solução concentrada de carbopol⁹ a 0,15%wt. Para as simulações numéricas utilizaram-se as propriedades físicas obtidas nos testes reológicos de laboratório. As soluções utilizadas apresentavam 25 e 50% de glicerina com o restante de solução de carbopol na concentração mencionada.

⁹ Carbopol 676 produzido pelo Grupo BF GoodRich nos Estados Unidos.

3 Metodologia

Algumas soluções de carbopol em água com concentração entre 0.1% e 0.15% foram testadas reologicamente e visualmente na seção de testes da montagem experimental. Observou-se que a turbidez dessas soluções para a folga do anular existente impedia a utilização da técnica de PIV. Algum fluido precisava ser misturado ao fluido não newtoniano para melhorar a qualidade de transparência sem afetar a característica reológica do fluido em questão. A solução encontrada para o problema foi adicionar glicerina ao fluido não newtoniano depois de neutralizado. Foram testadas algumas concentrações de carbopol e glicerina e observou-se que a concentração ideal esteve entre 25 e 50% de glicerina. Para essas concentrações estabelecidas, o fluido obteve um incremento de qualidade na transparência, diminuindo assim a turbidez.

A quantidade de glicerina misturada à solução de carbopol para produzir o fluido não newtoniano desejado ocasionou um aumento da temperatura da solução final durante o processo de mistura. Isso fez com que o oxigênio dissolvido na água da solução de carbopol fosse liberado gradativamente. Após o processo de mistura inicial promovido na bombona, o fluido produzido foi colocado no espaço anular da experiência e agitado durante três horas na rotação de 245 rpm. O fluido foi deixado em repouso e após 15 horas percebeuse a presença de bolhas de oxigênio com até 2 mm de diâmetro. Novamente o fluido foi agitado na seção de testes por um período igual ao primeiro. O processo se repetiu ao todo por três dias, quando não foi mais detectada a presença de bolhas. Ao longo desse processo o fluido foi caracterizado reologicamente e percebeu-se que após cessar a presença de bolhas no fluido, os testes reológicos foram estáveis.

O escoamento em um espaço anular devido puramente à rotação do cilindro interno possibilita a escolha de um modelo de viscosidade com apenas dois parâmetros reológicos, uma vez que a faixa de valores da taxa de deformação presente no escoamento do regime de vórtices de Taylor esteve sempre na região da lei de potência para os fluidos escolhidos. O modelo de Ostwald-de-Waele, ou modelo de lei de potência, foi selecionado por facilitar a análise devido à presença de apenas um parâmetro reológico, *n*, no adimensional não newtoniano no problema, $\beta = n-1$. A utilização de qualquer outro modelo com mais parâmetros aumentaria a complexidade do problema.

Os fluidos não newtonianos foram testados reologicamente em ensaio de cisalhamento utilizando a geometria de Couette. Os resultados mostraram que todas as concentrações testadas obtiveram resultados de viscosidade que foram bem ajustados pelo modelo de Ostwald (lei de potência). Pode-se observar esse

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115629/CA

comportamento na Figura 30, em que é mostrado o índice de potência para os testes reológicos realizados nos diferentes fluidos. A temperatura de controle dos testes foi ajustada a 25,0°C através de um banho térmico. Testes a temperatura de 24,5°C e 25,5°C foram realizados, conforme já mencionado anteriormente, mas nenhuma diferença perceptível foi detectada a ponto de mudar o ajuste de potência realizado para os dados obtidos pelos testes reológicos.



Figura 30 - Gráfico da viscosidade em função da taxa de cisalhamento para fluidos com diferentes soluções de glicerina com solução neutralizada de carbopol 0,15%. □ 25% Glicerina e 75% Carbopol 0,15%; + 25% Glicerina e 75% Carbopol 0,15% modificado; × 50% Glicerina e 50% Carbopol 0,15%; e ○ 50% Glicerina e 50% Carbopol 0,15% modificado; Δ Exemplo de lama de perfuração utilizada pela PETROBRAS S.A.

Os resultados de viscosidade foram ajustados pelo método de mínimos quadrados, obtendo-se assim os parâmetros reológicos. Os parâmetros da equação da lei de potência são relatados na Tabela 2. As funções obtidas pelo ajuste de mínimos quadrados foram comparadas com os dados experimentais na Figura 30, em que pode-se verificar uma boa concordância entre os resultados. O menor coeficiente de correlação ao quadrado, R², obtido foi igual a 0,9968. A Tabela 2 apresenta os parâmetros reológicos obtidos para dois fluidos com diferentes concentrações e o efeito da contaminação pela umidade do ar

sobre os mesmos fluidos. Essa contaminação aconteceu devido à abertura da bombona durante a noite na troca de montagens de placa. Essa contaminação do fluido não newtoniano levou à necessidade de serem refeitos todos os testes experimentais para aquele fluido visto que os parâmetros reológicos foram alterados significativamente.

O exemplo de lama de perfuração utilizada pela PETROBRAS S.A. ilustra a ordem de grandeza da viscosidade para as diversas taxas de cisalhamento e justifica as escolhas realizadas de concentração de carbopol na preparação dos fluidos não newtonianos.

O fluido que poderia modelar o comportamento da viscosidade do fluido de perfuração apresentava 0,09% de concentração de carbopol em água destilada. Esse fluido não pode ser utilizado na seção de teste devido à sua turbidez. Os parâmetros para o modelo de potência também foram obtidos para a lama de perfuração e são apresentados na Tabela 2. Pode-se verificar que o índice de potência do fluido de perfuração apresenta aproximadamente o mesmo índice que o fluido produzido a partir da solução de glicerina (25%) e carbopol 0,15% (75%). Essa observação também pode ser constatada por comparação visual entre as curvas de viscosidade da Figura 30.

Fluido	k [Pa.s ⁿ]	n	β
Glicerina (25%) e Carbopol 0,15% (75%)	2,5161	0,3093	-0.6907
Glicerina (25%) e Carbopol 0,15% (75%)*	1,2627	0,4057	-0,5943
Glicerina (50%) e Carbopol 0,15% (50%)	0,5667	0,5780	-0,4220
Glicerina (50%) e Carbopol 0,15% (50%)*	0,2213	0,7044	-0,2956
Lama de perfuração	0,7052	0,3432	-0.6568

Tabela 2 – Parâmetros reológicos dos fluidos testados para o modelo de Ostwald.

* Fluido com característica reológica alterada devido à umidade do ar absorvida.

3.6. Procedimento experimental

Procedimentos experimentais específicos foram seguidos para obtenção do número de Reynolds crítico para o surgimento dos vórtices de Taylor e do campo de velocidade em regime permanente. Independentemente do procedimento experimental, a preparação do experimento consistiu no enchimento da seção de teste com o fluido simulador newtoniano ou não newtoniano dependendo do caso e da janela de visualização com o índice de refração mais próximo possível do fluido utilizado no simulador. Durante o enchimento da seção de teste, 1,0 g de esferas ocas de vidro com cobertura metalizada (diâmetro médio de 16 μ m e massa específica $\rho = 1,6$ kg/m³) foi inserido no anular para servir como partículas traçadoras do sistema de PIV. Após o enchimento completo da seção de teste, o cilindro interno foi colocado para girar a aproximadamente 200 rpm e a bomba helicoidal foi ligada para bombear o fluido pelo circuito de recirculação, possibilitando ao longo de dez minutos a homogeneização da concentração de partículas em todo o anular.

3.6.1. Obtenção do número de Reynolds crítico – vórtices de Taylor

Para obtenção do número de Reynolds crítico foi imposta uma rampa de rotação do cilindro interno através do motor elétrico controlado pelo inversor de freqüência até o rotor alcançar uma rotação desejada. A rotação desejada foi ajustada de acordo com o fluido que preencheu o anular e a altura de leito de cascalho utilizada. Uma placa de aquisição da National Instruments PC-MIO-16XE adquiriu o sinal proveniente do circuito do encoder e registrou ao longo do tempo a ocorrência de todos os pulsos desde o instante em que o sistema de captura de imagens foi habilitado até a rotação máxima imposta ao cilindro. Um sinal de trigger (5 volts TTL) foi emitido pela placa da NI ao sincronizador do sistema de PIV a cada 200 pulsos registrados para que um par de imagens fosse capturado e posteriormente processado. O registro dos pulsos possibilitou a obtenção da rampa de rotação realizada pelo cilindro interno e a aceleração angular do mesmo. Além disso, o registro dos pulsos sincronizado com a aquisição das imagens junto ao sistema de PIV possibilitou a obtenção do campo de velocidade do plano selecionado em uma rotação conhecida e conseqüentemente a identificação do número de Reynolds crítico.

3.6.2. Obtenção do campo de velocidade em regime permanente

Uma rampa de rotação foi imposta ao cilindro interno através do motor elétrico controlado pelo inversor de freqüência até o rotor alcançar uma rotação desejada. Após o alcance dessa rotação, o cilindro interno permaneceu nessa rotação por pelo menos dez minutos para que o regime permanente fosse assegurado. A medição do campo de velocidade no plano *r-z* foi feita nos quatro

planos principais da geometria e obedecendo à faixa do número de Reynolds entre $1,2 \cdot \text{Re}_c < \text{Re} < 1,8 \cdot \text{Re}_c$.

3.7. Análise de incertezas

A melhor estimativa do valor verdadeiro esperado para uma grandeza definida por $G = f_1(x_1, x_2, x_3, ..., x_M)$ em que M é o número de variáveis independentes envolvidas, é dada pela eq (56).

$$G = \overline{G} \pm \delta \overline{G} \tag{56}$$

em que a média da amostra de G é dada por $\overline{G} = f_1(\overline{x}_1, \overline{x}_2, \overline{x}_3, ..., \overline{x}_M)$ e a incerteza em \overline{G} é obtida a partir de $\delta \overline{G} = f_2(\delta \overline{x}_1, \delta \overline{x}_2, \delta \overline{x}_3, ..., \delta \overline{x}_M)$. O valor de $\delta \overline{G}$ reflete as contribuições das incertezas individuais de cada variável e como estas são propagadas através dos resultados.

De acordo com Figliola & Beasley (1995), a estimativa mais provável de $\delta \overline{G}$ é geralmente aceita como o valor dado pela lei de potência de segunda ordem proveniente de Kline-McClintock. Essa lei de potência pode ser derivada por uma aproximação linear da expansão da série de Taylor da função f_1 de várias variáveis. Um coeficiente de sensibilidade, ϕ_i , relata como as mudanças em x_i afetam a grandeza G e é definido pela eq. (57).

$$\phi_i = \frac{\partial G}{\partial x_i}\Big|_{x=\bar{x}} \qquad \qquad i = 1, 2, 3, ..., M$$
(57)

A partir da expansão da série de Taylor, a contribuição da incerteza em x no resultado é estimada pelo coeficiente de sensibilidade $\phi_i(\delta \tilde{x}_i)$ e a contribuição das N variáveis é estimada pela eq (58).

$$\delta \overline{G} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{M} [\phi_i(\delta \overline{x}_i)]^2}$$
(58)

Ao considerar que os efeitos das incertezas do Tipo B devido aos tratamentos estatísticos sobrepujam as incertezas do Tipo A devido às incertezas de certificados, pode-se obter a incerteza expandida, eq. (59) com uma confiabilidade de 95% do intervalo de confiança na média ao considerar o coeficiente de expansão, K, igual a dois.

$$\delta \overline{G}_E = K \delta \overline{G} \tag{59}$$

A incerteza associada à freqüência angular do cilindro interno foi estimada a partir da incerteza obtida pelos erros aleatórios da medição dos períodos das ondas quadradas e através da incerteza na detecção da transição.

A incerteza associada à viscosidade cinemática foi estimada a partir das incertezas do Tipo A e B. As incertezas do Tipo A relacionadas são: a incerteza obtida pelo certificado de calibração do cronômetro, a incerteza da aceleração da gravidade do laboratório LCF da PUC e do fabricante do viscosímetro Cannon-Fensk e a incerteza da constante de calibração do viscosímetro. A incerteza do Tipo B está relacionada unicamente aos erros aleatórios das medições de tempo através do cronômetro utilizado pela técnica de medição de viscosidade. A ordem de grandeza da incerteza da viscosidade cinemática foi de ±1,5 mm²/s.

A incerteza da temperatura, $\delta \overline{T}$, foi considerada como sendo dependente da incerteza de calibração do termômetro de bulbo utilizado no experimento. Sua estimativa foi da ordem de ±0,25°C.

A incerteza da medida do diâmetro externo do cilindro interno foi de $\pm 0,1$ mm, enquanto que a incerteza da medida do diâmetro interno do cilindro externo foi de $\pm 1,0$ mm. Essa diferença nos valores das incertezas pode ser explicada pelos diferentes processos de fabricação dos tubos.

A incerteza do valor da obstrução parcial inserida no experimento foi da ordem de ±0,5 mm, dadas as imperfeições de espessura da placa de acrílico utilizada na montagem experimental.

As medições de velocidade realizadas pela técnica de velocimetria por imagem de partículas foram inicialmente calibradas através de uma dimensão real conhecida. Os erros no reconhecimento dos pontos extremos utilizados na calibração das imagens foram de ±2 pixels. Considerando que o valor médio do pixel para os experimentos realizados foi da ordem de 50 µm e que a dimensão calibrada foi de 40 mm, a incerteza de calibração do valor do pixel foi de aproximadamente ±0,3%. Uma outra fonte de erros para a técnica de velocimetria a laser é o posicionamento errado do plano de luz, sendo de difícil quantificação. Nesse trabalho não foi considerada essa fonte de erro na estimativa da incerteza de calibração.

3.7.1. Incerteza expandida para o número de Reynolds crítico

O número de Reynolds crítico obtido experimentalmente possui uma incerteza associada que é calculada a partir das incertezas de cada uma das variáveis. A Figura 31 ilustra as incertezas de cada uma variável, conforme a eq. (15).



Figura 31 – Representação esquemática das incertezas consideradas no número de Reynolds crítico. Gráfico espinha de peixe das incertezas.

Dessa forma, pode-se resumir o cálculo das incertezas das variáveis freqüência de rotação crítica, $\delta \Omega_c$ e viscosidade cinemática, δv , como:

$$\delta \overline{\Omega}_c = \sqrt{(\delta \Omega_T)^2 + (\delta \Omega_M)^2} \tag{60}$$

$$\delta \overline{\nu} = \sqrt{(\delta \nu_{cert})^2 + (\delta \nu_M)^2}$$
(61)

em que $\delta \Omega_T$ é a incerteza da freqüência devido à transição, $\delta \Omega_M$ é a incerteza da freqüência devido ao processo de medição, δv_{cert} é a incerteza da viscosidade devido às calibrações e δv_M é a incerteza da viscosidade devido às medições. O parâmetro adimensional de Reynolds pode ser redefinido para exclusivamente o escoamento de um fluido newtoniano na transição como:

$$\operatorname{Re}_{c} = \frac{\Omega_{c} r_{i} d}{v} \tag{62}$$

em que v é a viscosidade cinemática do fluido newtoniano. Calculando-se a incerteza para o número de Reynolds e adimensionalizando por $\overline{\text{Re}}_c$, tem-se a incerteza relativa:

$$\left(\frac{\delta \overline{\operatorname{Re}}_{c}}{\overline{\operatorname{Re}}_{c}}\right)^{2} = \left(\frac{\delta \overline{\Omega}_{c}}{\overline{\Omega}_{c}}\right)^{2} + \left(\frac{\delta \overline{r}_{i}}{\overline{r}_{i}}\right)^{2} + \left(\frac{\delta \overline{d}}{\overline{d}}\right)^{2} + \left(\frac{\delta \overline{v}}{\overline{v}}\right)^{2}$$
(63)

em que $\delta \overline{\text{Re}}_c$ é a incerteza do número de Reynolds crítico, $\delta \overline{d}$ é a incerteza do espaço anular e $\delta \overline{r}_i$ é a incerteza do valor do raio externo do cilindro interno. Para o fluido não newtoniano, a viscosidade cinemática foi calculada e sua incerteza foi considerada como sendo duas vezes a incerteza da viscosidade do fluido newtoniano, que foi da ordem de 1,3 mm²/s, visto que não se tinha conhecimento das incertezas do reômetro utilizado para os testes.

A incerteza expandida do número de Reynolds crítico, com 95% de intervalo de confiança na média, pode ser calculada pela eq. (64).

$$\delta \overline{\operatorname{Re}}_{c-E} = K \left(\delta \overline{\operatorname{Re}}_{c} \right) \tag{64}$$

em que $\delta \overline{\operatorname{Re}}_{c-E}$ é a incerteza expandida e K é o coeficiente de abrangência com valor igual a dois para o intervalo de confiança na média estipulado. No capítulo seguinte serão apresentados os valores das incertezas expandidas para o número de Reynolds crítico obtidos experimentalmente para cada nível de obstrução do espaço anular.