

Referências Bibliográficas

- [1] AJIENKA, J.A.; IKOKU, C.. Criteria for the desing of waxy crude oil pipelines:maximum pump (horsepower) pressure requeriment. SPE, 13:87–94, 1994.
- [2] ALBOUDWAREJ, H.;HUO, Z.. Flow-assurance aspects of subsea systems desing for production of waxy crude oils. SPE, (103242):1–10, 2006.
- [3] AZEVEDO ALZUGIR, L.. Notas de aula metodos experimentais. Technical report, PUC-Rio, 2009.
- [4] BARNES, H. A.. A review of the slip (wall depletion) of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometer its cause, character, and cure. J. Non-Newtonian fluid Mech., 56:221–251, 1995.
- [5] BARNES, H. A.. A Handbook of elementary rheology. Institute of Non-Newtonian fuid mechanics University of Wales, 2000.
- [6] BIPM, I.. Guia para a Expressão da incerteza de Medição. Inmetro, 3 edition, Maio 2003. inmetro.
- [7] BIRD, K.. Surface and Colloid Chemistry?principles and applica-tions. 2009.
- [8] BIRD, R. B.; ARMSTRONG, R. C. ; HASSAGER, O.. Dynamics of polymeric liquids, volumen vol.1. John Wiley & Sons, 1987.
- [9] CARNIANI, C.; MERLINI, M.. Basic desing of waxy oil tranportation though improved lab testing. SPE, (36836):209–214, 1996.
- [10] CHAKRABARTI, S.. Handbook of offshore engineering, volumen vol. 1. Elsevier, 2005.
- [11] CHANG, C.; BOGER, D.. The yielding of waxy crude oils. Ind. Eng. Chem. Res., 37:1551–1559, 1998.

- [12] CHANG, C.; BOGER, D. N. Q.. Influence of thermal history on the struture of statically cooled waxy crude oil. SPE, 5:148–156, 2000.
- [13] CHANG, C.; BOGER, D. N. Q.. Influence of thermal history on the waxy structure of statically cooled waxy crude oil. SPE, 5:148–156, 2000.
- [14] CHANG, C.; NGUYEN, Q. R. H.. Isothermal start-up of pipeline transporting waxy crude oil. J. Non-Newtonian Fluid Mech., 87:127–154, 1999.
- [15] DAVIDSON, M.R.; NGUYEN, Q. R. H.. A model for restar of a pipeline with compressible gelled waxy crude oil. J. Non-Newtonian Fluid Mech., 123:269–280, 2004.
- [16] DE SOUZA MENDES, P.. Dimensioneless non-newtonian fluid mechanics. J. Non-Newtonian Fluid Mech., 147:109–116, 2007.
- [17] DE SOUZA MENDES, P.. Reología e escoamento transiente de óleos parafínicos gelificados e emulsões. Technical Report 6, PUC-RIO, 2008.
- [18] DE SOUZA MENDES, P.. Modeling the tixotropic behavior of estructured fluids. J.Non-Newtonian Fluid Mech., 164(6):66–75, 2009.
- [19] EKWERIBE, C.; CIVAN, F. L. S.. Interim report on pressure effect on waxy-crude pipeline-restart conditions investigated by a model system. SPE, (115672):61–74, 2009.
- [20] FORD, P.E.; ELLS, J.. Frequent pigging helps move waxy crude below its pour point. Oil Gas Journal, 10:183–189, 1965.
- [21] FOX, R. W.. Introdução à mecânica dos fluidos. LTC editora, 2006.
- [22] FROISHTETER, G.B.; VINOGRADOV, G.. The laminar flow of plastic disperse systems in circular tubes. Rheol. Acta, 19:239–250, 1980.
- [23] KELESSIDIS, V.C.; MAGLIONES, R. T. C. A. Y.. Optimal determination if rheological parameters for hershel-bulkley drilling fluids and impact on pressure drop, velocity profiles and penetration rates during drilling. SPE, 53:203–224, 2006.
- [24] LEE, H.S.; THOMASON, W. F. S.. Waxy oil gel breaking mechanisms: adhesive versus cohesive failure. Energy & Fuels, 22:480–487, 2008.
- [25] LEFFLER, W. PATTOROZZI, R.. Deepwater-Petroleum Exploration a Production-A new technical Guide. Tulsa, 2003.

- [26] PERKINS, T.K.; TURNER, J.. Starting behavior of gathering lines and pipelines filled with gelled prudhoe bay oil. SPE, 50(5):301–308, 1970.
- [27] PETROBRAS. <http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/perfil/atividades/exploração-petróleo-gas.>, 2010.
- [28] PRISCILLA, V. R.. Deslocamento de líquidos em célula hele-shaw considerando efeitos não newtonianos. Tese, PUC-Rio, 2010.
- [29] RAMSDEN, M.. Two-finger selection theory in the saffman-taylor problem. SPE, (8071):283–290, 1978.
- [30] RONNINGSEN, H. P.. Rheological behaviour of gelled, waxy crude nort sea crude oils. Journal of Petroleum Science and Engineering, 7:177–213, 1992.
- [31] SPINELLI, G.. Notas de aula "sistemas de produção offshore". Technical report, PUC-RIO, 2009.
- [32] THUC, H.V.; BICH, T. S. L. H. V.. The problem in transportation of high waxy crude oils through submarine pipelines at jv vietsovpetro oil fields, offshore vietnam. Technical report, JV Vietsovpetro, 2003.
- [33] TRALLERO, J., S. C. B. J.. A study of oil-water flow patterns in horinzontal pipes. Society of Petroleum engineers, 36609, 1996.
- [34] TRIGGIA, A. CORREIA, C.. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Interciência, 2004.
- [35] UHDE, A.; KOPP, G.. Pipeline problems resulting from the handling of waxy crudes. J. Ins. Pet., 554(63-73):785–788, 1971.
- [36] VINAY, G.; WACHS, A.. start-up of gelled waxy crude oil pipeline: anew analytical relation to predict the restart pressure. SPE, (122443):1–6, 2009.
- [37] WARDHAUGH, L.T.; BOGER, D.. Measurement of the unique flow propieties of waxy crude oils. Chem. Eng. Res. Des., 65:74–82, 1987.
- [38] WARDHAUGH, L.T.; BOGER, D.. Flow characteristics of waxy crude oils: application to pipeline desing. AIChE Journal, 37(6):871–884, 1991.

- [39] WARDHAUGH, L.T.; BOGER, D.. The measurement and description of the yielding behavior of wax crude. J. Rheology, 35(6):1121–1156, 1991.

A

Anexo A

A.1

Primeira bancada experimental

Inicialmente, a bancada experimental (Fig.A.1) foi projetada para trabalhar com as mesmas peças da bancada utilizada finalmente no desenvolvimento final do trabalho. A entrada de ar comprimido, a válvula ITV, os três reservatórios de acrílico, o transdutor de pressão, a Balança, o LabView, o banho de controle de temperatura, a seção de teste e as válvulas CV1 e CV2. A principal mudança entre as bancadas encontra-se na seção de teste. Na primeira bancada, a seção era composta por uma serpentina de aço inoxidável dentro do banho de controle de temperatura (fig. A.2a) e a medição de variação de pressão ao longo do tubo ficava na entrada e saída do banho (fig. A.2b).



Figura A.1: Foto da planta experimental

A.2

Validações das serpentinas

Foram testadas (validação com Hagen-Poiseuille e deslizamento) duas serpentinas de aço inoxidável nessa bancada. A primeira delas tinha um



A.2(a):



A.2(b):

Figura A.2: localização da serpentina no banho e toma de pressão

diâmetro de 6mm e 4,87m de comprimento. Nesta foi realizada a primeira validação com fluido newtoniano (óleo Lubrax) e a equação de Hagen-Poiseuille, mas os resultados não foram bons. O gráfico A.3 mostra baixa concordância entre as curvas geradas pelos dados experimentais e teóricos que atinge um erro máximo de 50%.

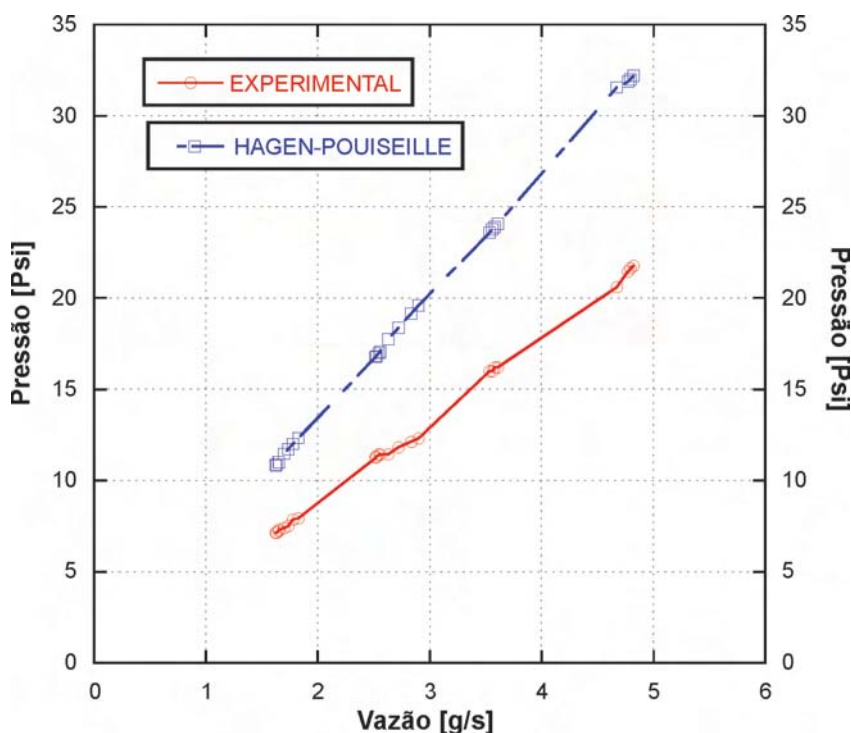


Figura A.3: Validação através da equação Hagen-Poiseuille

O erro elevado foi associado ao fato de não ter um diâmetro constante no tubo da serpentina, devido à fabricação não controlada desta. Esta variação ocasiona um erro elevado, já que o raio encontra-se elevado à quarta potência na equação de Hagen-Poiseuille.

Assim, foi projetada e fabricada, de forma controlada, uma nova serpentina em aço inoxidável, com diâmetro interno de 3,54mm e 9,685m de

comprimento (Fig. A.4).

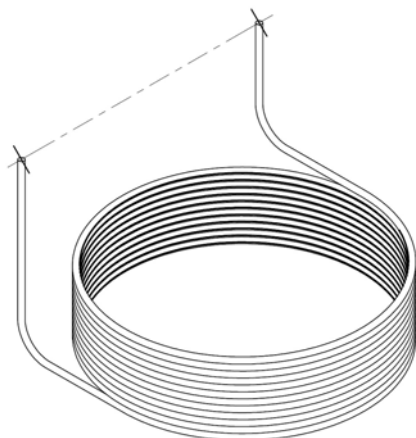


Figura A.4: Serpentina em aço inoxidável

Com a serpentina pronta, foi realizada a validação com fluido newtoniano (óleo Lubrax). Os resultados dos testes mostraram que a curva vermelha da fig.A.5, que representa os dados experimentais, tem um comportamento muito similar aos dados teóricos. O erro máximo nesta validação foi 2%, considerado um bom resultado para continuar com a validação de deslizamento.

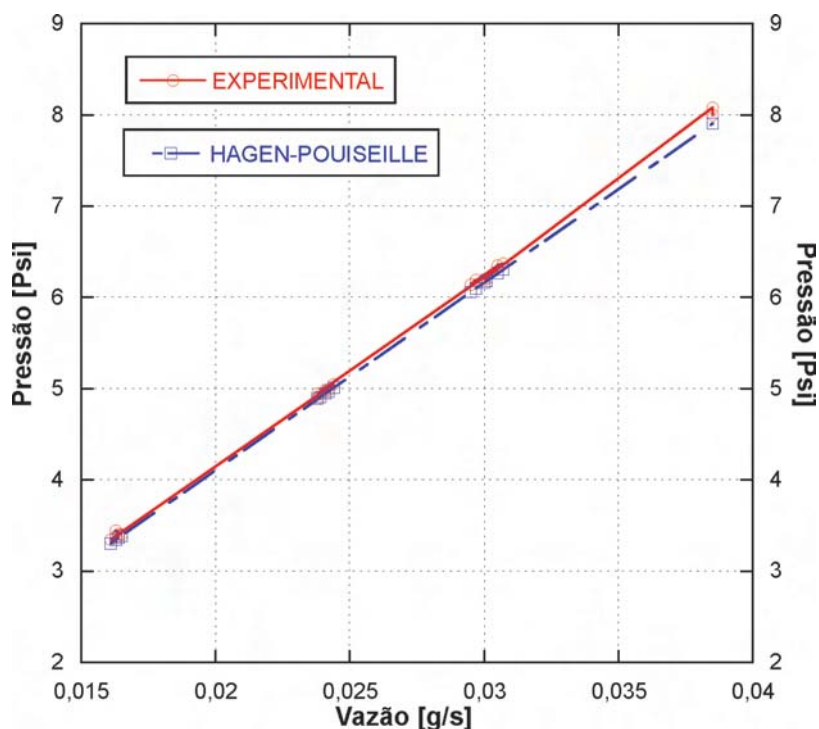


Figura A.5: Validação equação Hagen-Poiseuille

Em sequência, foram feitos os testes de verificação de deslizamento no tubo da serpentina. O fluido utilizado foi carbopol 0,1% de concentração. Os resultados dos testes podem ser observados na fig.A.6, onde para um mesmo

dado de pressão adimensional (τ^*) a velocidade do fluido (u^*) é maior nos resultados experimentais do que obtidos os com a equação de pressão de Hershell-Bulkey (2-22). O erro calculado entre as curvas experimental e teórica alcançaram um valor máximo de 78%.

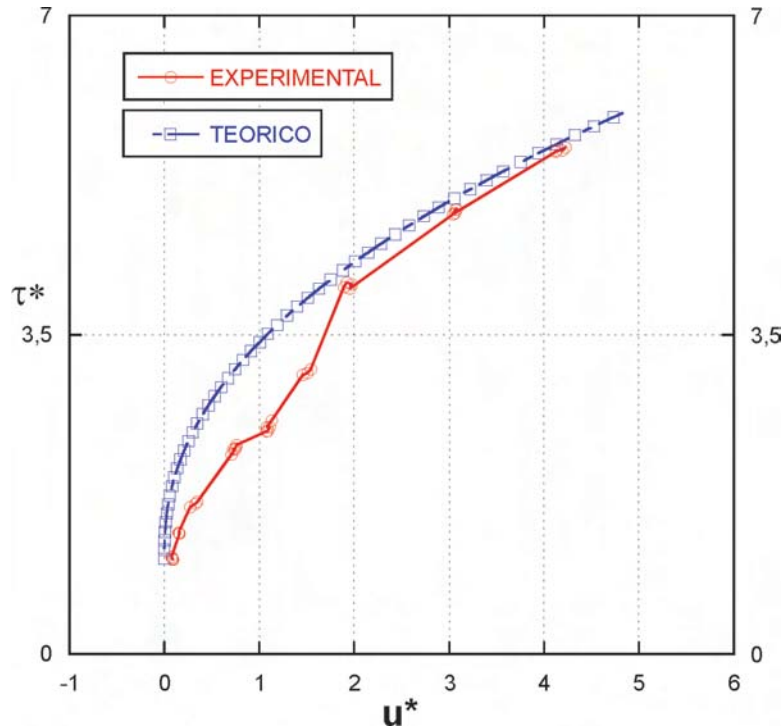


Figura A.6: Validação deslizamento

Com os resultados anteriores pode-se concluir que os efeitos de deslizamento controlam o escoamento do carbopol no tubo da serpentina o que tem que ser evitado. Isso ocorre em função do tubo ser liso.

A fim de eliminar o deslizamento no escoamento, foram testados vários métodos para conseguir aumentar a rugosidade do tubo da serpentina. Com a rugosidade do tubo comercial de $0,7785\mu m$, definiu-se que $300\mu m$ era a rugosidade necessária para eliminar os efeitos de deslizamento.

B

Anexo B

B.1

Aumento da rugosidade do tubo

A fim de aumentar a rugosidade da parede interna do tubo da serpentina, foram feitos testes com vários métodos que são apresentados a seguir.

B.1.1

Areia colada

O primeiro método estudado consistia em cola areia peneirada com malha 800 e cola tipo Loctite. Os resultados obtidos são apresentados na figura B.1. Não obteve uma superfície rugosa constante, além disso, só foi possível colar areia até 50mm dentro do tubo. Tentou-se várias formas para realizar este procedimento mas não se obteve bons resultados.

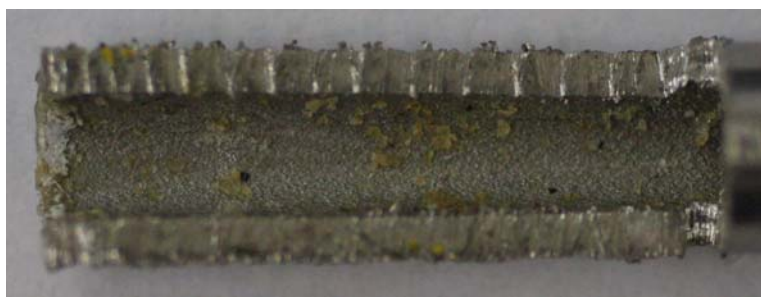


Figura B.1: Areia colada

B.1.2

Ataque Químico

Foi estudado um método de aplicação de um ataque químico na parede interna do tubo. O ácido utilizado foi oxálico em várias concentrações (tabela B.1). A peça de aço foi submergida dentro da solução de ácido durante períodos de tempo variáveis. Foram medidas as rugosidades da peça de inoxidável antes e depois do tratamento obtendo um aumento máximo na rugosidade de $0,09\mu m$. Incremento que não era suficiente a fim de atingir o objetivo de rugosidade.

Concentração [%]	Duração [h]	Rugosidade obtida [μm]
*NORMAL	*****	0,7727
10	24	0,7967
10	76	0,8057
10	96	0,8635
30	24	0,8009
30	24	0,7817
50	36	0,7983
70	36	0,8031

Tabela B.1: Rugosidade obtida com ácido oxálico

B.1.3**Jateamento abrasivo**

Foi investigado e testado o método de jateamento abrasivo, onde foi jateado um tubo de aço inox de 3,54mm de diâmetro e 1m de comprimento, com granalha fina por 1 hora. O resultado foi de um aumento na rugosidade da parede interna do tubo de 0,237 μm , que é um aumento muito menor do que o esperado.

B.1.4**Tubo em acrílico**

Não foi possível achar uma empresa que fabricasse o tubo em acrílico nas dimensões requeridas para o projeto. A rugosidade das peças fabricadas neste material é muito menor que 300 μm .

B.1.5**Eletro-erosão**

Foi testado a eletro-erosão mas só foi possível realizar este processo até 50mm da entrada do tubo.

B.1.6**Tubo em resina**

Uma vez testados os métodos anteriores, foi considerado fabricar o tubo com resina poliéster. A resina poliéster é um éster complexo formado quando um álcool bifuncional reage com um ácido dibásico ou anídrido originando a resina. A resina é misturada com um acelerador, neste caso Cobalto e com Peróxido de Benzoilo. Em estado natural a resina é um líquido viscoso, é facilmente moldada através de um padrão feito de um material que suporte a reação exotérmica no processo de secagem. O procedimento utilizado para a obtenção do tubo foi descrito no capítulo 3.

O processo para a obtenção do tubo em resina começou com um tubo de 20cm de comprimento. O primeiro problema que surgiu foi que a barra roscada ficou colada à resina. Para evitar isto, foram dadas voltas à barra durante o período de secagem, mas no diâmetro interno apresentava rachaduras. Assim, utilizou-se uma folha de papel PVC mas não era possível descolar a barra. Finalmente, a barra roscada foi coberta com uma fita de vedação o que permitiu retirá-la da resina seca.

Outro problema apresentado na fabricação do tubo foi a definição da concentração ótima de catalizador. Esta concentração tem que mudar com a temperatura onde a resina é fundida, o que mostra a tabela B.2. As primeiras amostras foram feitas com 1,5% de catalizador, mas a resina ficava com a parede interna rachada. Além de não conseguir obter repetibilidade na fabricação de amostras pelas mudanças da temperatura ambiente. Por tanto, depois de numerosos testes a concentração ótima foi determinada em 0,9% pois não era muito afetada pelas mudanças da temperatura.

Temperatura [°C]	Catalizador[%]	Tempo de secagem[<i>min</i>]
18	1,5	40
25	1,25	27
30	1	16

Tabela B.2: Rugosidade obtida com ácido oxálico

Maiores comprimentos foram testados a fim de conseguir um tubo com o menor número de juntas possíveis. Assim, foram testados comprimentos de 30cm, 40cm, 50cm e 1m. No teste feito com 1m de comprimento, não foi possível tirar a barra roscada da resina. Além disso, o molde ficou curvo devido à reação exotérmica forte, ocasionada pela quantidade de resina depositada no molde.

Com 50cm, conseguiu-se tirar a barra do molde, mas pela força feita pela barra a resina ficou rachada (fig.B.2), porque seções de barra ficavam sem fita de vedação. A seguir, o comprimento de 40cm foi testado, neste caso, não apresentou muitas mudanças em relação com o anterior.

As rachaduras na resina apresentadas nos comprimentos anteriores não foram apresentadas com 30cm de tubo, mas a rosca interna ainda não ficava bem definida, apresentando pequenas rachaduras.

Finalmente, retornou-se para o comprimento inicial de 20cm. No entanto, a barra ainda fazia muita força no momento da descolagem o que afetava o diâmetro interno do tubo. Para eliminar isto, foi passada cera natural na face da barra já coberta pela fita de vedação, o que acarretou que a resina ficasse com bolhas devido a que durante o processo de esquentamento da resina a cera derretia-se e as bolhas pela viscosidade da resina não conseguem sair.



Figura B.2: Resina rachada



Figura B.3: Seção de tubo de resina

A fim de eliminar as bolhas na resina, a barra coberta de fita foi submergida em óleo de cozinha e foi retirado o excesso de óleo foi eliminado com um pano. Isto permitiu fabricar amostras de 20cm de comprimento com um diâmetro interno bem definido, sem rachaduras nem bolhas (fig.B.3).

Outras opções consideradas foram a fundição em materiais metálicos, fabricação com ranhurado interno do tubo metálico e a fabricação especial do tubo em aço inoxidável com a rugosidade requerida. Foram contactadas empresas nacionais, da Colômbia e da Argentina dedicadas à fabricação destes tipos de tubos, mas estas expressaram a impossibilidade da fabricação devido à restrições técnicas, de procedimentos e de equipes. Foi feito contacto com empresas da Alemanha e da China, mas pelo curto tempo disponível não se avançou nesta pesquisa.

C

Anexo C

C.1

Bancada desenhada

Ao mesmo tempo do que foi construída o tubo de resina, foi desenhado e fabricada outra seção de testes. Nesta versão, o tubo foi projetado para ser formado por duas meias-canais de 2mm de raio usinadas em dois perfil quadrados de latão (fig.??). Foi selecionado o latão pela sua alta capacidade de transferência de calor, o que vai permitir ter um bom controle da temperatura do escoamento, sendo colocado em um trocador de calor.

Na face interna das meias canas, foram usinadas ranhuras equidistantes e ortogonais ao longo do comprimento do perfil como pode ser visto na figura C.1.



Figura C.1: Usinado de ranuras na face dos raios

Estas ranhuras simularão a rugosidade necessária para eliminar o deslizamento. Os dois perfis usinados, foram prensados com duas barras retangulares em aço inoxidável e foram fixadas com parafusos (fig. C.2), igualmente separados um do outro a fim de evitar vazamentos.

Além disso, na metade dos perfis foi colocado papelão hidráulico de 0,4mm de espessura para contribuir ao hermetismo do diâmetro central (fig.C.3).

A seção foi projetada para ter 2m de comprimento, mas devido à impossibilidade de usinar peças maiores do que 1m no laboratório, o tubo



Figura C.2: União dos perfis quadrados.



Figura C.3: papel hidráulico

foi fabricado em duas seções. Uma peça em aço inoxidável foi usinada para a união destas seções (ver figura fig.C.4) dos perfis quadrados.



Figura C.4: Cantoneiras para fixar as seções do tubo.

Na entrada e saída do tubo, foram usinadas duas peças em aço inoxidável

(Fig. C.5), que tem um furo central com o diâmetro do tubo e outro roscado para fixar a conexão em Tê.

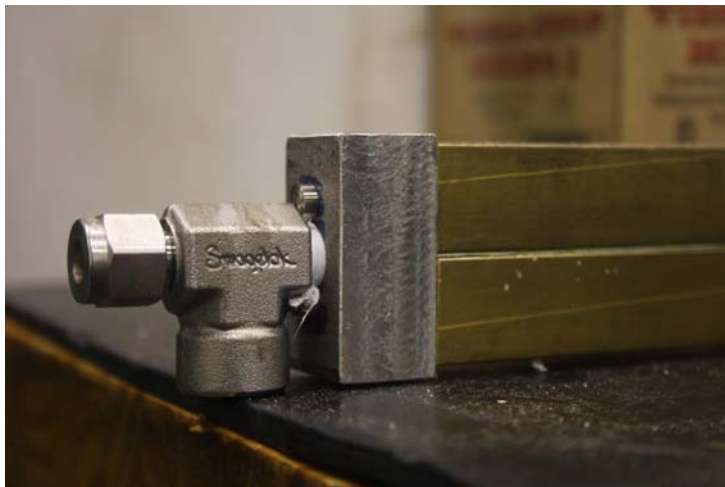


Figura C.5: Peça na entrada e saída do tubo e conexão Tê

Devido ao fato de não contar com mais tempo para a apresentação deste trabalho, não foi possível testar o funcionamento da seção fabricada, deixando suas validações para a continuação do trabalho.

D

Anexo D

D.1

Cálculo de Incertezas de Medição

O presente apêndice destina-se a apresentar a metodologia utilizada para estimativa dos níveis de incerteza associados à determinação da queda de pressão obtida com a equação de Hagen-Poiseuille através da metodologia experimental descrita no Capítulo 3. Nesta avaliação, foi adotada a metodologia comumente utilizada para o estudo de propagação de incertezas, conforme descrito por Kleine e McClinton (3).

Considerando um resultado, R , de um experimento que dependa da medição de N grandezas independentes, x_i , cada uma delas com incerteza experimental, δx_i , apresentando mesma distribuição de probabilidade, a incerteza no resultado, δR , pode ser avaliada como,

$$\delta R = \left\{ \left(\frac{\delta R}{\delta x_1} \cdot \delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\delta R}{\delta x_2} \cdot \delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta R}{\delta x_N} \cdot \delta x_N \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{D-1})$$

Onde as derivadas parciais representam a sensibilidade do resultado a cada variável medida.

D.1.1

Incerteza no Cálculo da Queda de Pressão

A queda de pressão foi calculada através da equação de Hagen-Poiseuille, a seguir:

$$\Delta p = \frac{8Q\mu L}{\pi R^4} \quad (\text{D-2})$$

onde, Q é a vazão obtida através da balança em gr/s , μ é a viscosidade do fluido em $Pa.s$, L o comprimento e R o raio do tubo em metros. Logo, de

acordo com a equação D-1, a incerteza no cálculo da queda de pressão no tubo em Pa é estimada por,

$$\delta(\Delta P) = \left\{ \left[\frac{\delta P}{\delta(Q)} \delta(Q) \right]^2 + \left[\frac{\delta P}{\delta(\mu)} \delta(\mu) \right]^2 + \left[\frac{\delta P}{\delta(L)} \delta(L) \right]^2 + \left[\frac{\delta P}{\delta(R)} \delta(R) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{D-3})$$

Considerando nula a incerteza na determinação da viscosidade do fluido, obtém-se:

$$\frac{\delta(\Delta P)}{\Delta P} = \left\{ \left[\frac{1}{2} \frac{\delta(Q)}{Q} \right]^2 + \left[\frac{1}{2} \frac{\delta(L)}{L} \right]^2 + \left[\frac{1}{2} \frac{\delta(R)}{R} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{D-4})$$

as medidas do comprimento e raio do tubo tiveram as seguintes resultados:

$$L = 2,25 \text{ m} \pm 0,005$$

$$D = 0,0044221 \text{ m} \pm 0,0003$$

Na vazão Q obtida através da balança científica é obtida através da equação a seguir, mencionada na Guia de incertezas da Inmetro (6),

$$u = \left(\frac{m}{\sqrt{12}} \right) \quad (\text{D-5})$$

sendo u, a incerteza padrão de um instrumento que tem indicação digital, m é o menor algoritmo significativo em gramas. Assim, com um valor de $m = 0,001g$, a incerteza da balança calculada foi de $0,0029g$.

Substituindo-se os valores numéricos:

$$\frac{\delta(\Delta P)}{\Delta P} = \left\{ \left[\frac{1}{2} \frac{0,0029}{Q} \right]^2 + \left[\frac{1}{2} \frac{0,005}{2,25} \right]^2 + \left[\frac{1}{2} \frac{0,0003}{0,004224} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{D-6})$$

$$\frac{\delta(\Delta P)}{\Delta P} = \{A + 1,23457e - 6 + 0,003502\}^{1/2} \quad (\text{D-7})$$

O valor de A muda conforme o aumento da vazão de cada teste. Finalmente, a incerteza medida encontra-se na faixa entre $3,56\%$ a $3,9\%$.

D.1.2**Incerteza no Cálculo do Deslizamento na parede do tubo**

Neste caso, as equações utilizadas na validação com fluido não newtoniano são: 2-6 e ??, apresentadas a seguir.

$$\tau_R = \frac{\Delta P D}{L} \frac{1}{4} \quad (\text{D-8})$$

$$\tau^* = \frac{\tau_R}{\tau_0} \quad (\text{D-9})$$

As incertezas do comprimento e do diâmetro foram já mostradas no item anterior. Assim a eq. D-3 é neste caso:

$$\delta(\Delta\tau_R) = \left\{ \left[\frac{\delta\tau_R}{\delta(P)} \delta(P) \right]^2 + \left[\frac{\delta\tau_R}{\delta(L)} \delta(L) \right]^2 + \left[\frac{\delta\tau_R}{\delta(R)} \delta(R) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{D-10})$$

fazendo as contas,

$$\frac{\delta(\Delta\tau_R)}{\Delta\tau_R} = \left\{ \left[\frac{1}{2} \frac{\delta(P)}{P} \right]^2 + \left[\frac{1}{2} \frac{\delta(L)}{L} \right]^2 + \left[\frac{1}{2} \frac{\delta(R)}{R} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{D-11})$$

Lembrando que o ajuste na medida da queda de pressão ao longo do tubo foi de 1psi, a incerteza é esse mesmo valor. Substituindo-se os valores numéricos:

$$\frac{\delta(\Delta\tau_R)}{\Delta\tau_R} = \left\{ \left[\frac{1}{2} \frac{1}{P} \right]^2 + \left[\frac{1}{2} \frac{0.005}{2.25} \right]^2 + \left[\frac{1}{2} \frac{0.0003}{0.004224} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{D-12})$$

$$\frac{\delta(\Delta\tau_R)}{\Delta\tau_R} = \{A + 1,23457e - 6 + 0,003502\} \quad (\text{D-13})$$

Assim, para cada valor de pressão de reinício, a tensão na parede (τ_R) tem um valor de incerteza. De igual forma, para calcular a incerteza do valor adimensional de tensão (τ^*), definiu-se o valor da incerteza da leitura do reômetro como sendo $0,1Pa$, a incerteza é calculada a seguir:

$$\frac{\delta(\Delta\tau^*)}{\Delta\tau^*} = \left\{ \left[\frac{1}{2} \frac{0,1}{2,2413} \right]^2 + \left[\frac{1}{2} \frac{\tau_{R1-I}}{\tau_{R1}} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (D-14)$$

Sendo τ_{R1-I} a incerteza do valor τ_{R1} , e o $\tau_0=2,2413$ é a tensão limite de escoamento da segunda amostra do Carbopol utilizada.

$$\frac{\delta(\Delta\tau^*)}{\Delta\tau^*} = \{0,044617 + Z\}^{1/2} \quad (D-15)$$

onde a Z representa a incerteza da tensão na parede calculada em cada leitura de pressão de reinício. Assim, para a segunda amostra de Carbopol, que tem o $\tau_0=2,2413$ Pa, a tensão adimensional possui uma incerteza de 2,23% até 2,51%. Para a segunda amostra de Carbopol com $\tau_0=3,5181$ Pa possui uma incerteza de 1,42% até 1,74%.