

Bibliografia

- [1] Azevedo, L.F.A. e Teixeira, A.M. **A Critical Review of the Modeling of Wax Deposition Mechanisms**. *Petroleum Science and Technology*, 21(3 e 4):393–408, 2003.
- [2] Banki, R. e Firoozabadi, A. **Modeling of Wax Deposition in Pipelines from Irreversible Thermodynamics**. SPE77571, 2002.
- [3] Bendlksen, K.H., Maines D. Moe R. e Nuland S. **The dynamic Two-Fluid Model Olga: Theory and Application**. *SPE Production Engineering*, p. 171–180, May.
- [4] Bott, T.R. **Aspects of Crystallization Fouling**. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 14:356–360, 1997.
- [5] Brown, T.S., Niesen V.G. e Erickson D.D. **Measurement and Prediction of the Kinetics of Paraffin Deposition**. SPE 26548, 1993.
- [6] Burger, E.D., Perkins T.K. e Striegler J.H. **Studies of Wax Deposition in the Trans Alaska Pipeline**. *Journal of Petroleum Technology*, p. 1075–1086, 1981.
- [7] Butler, R.M., e MacLeod D.M. **Solid-Liquid Equilibria in Wax Crystallization**. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, p. 53–63, 1961.
- [8] Coutinho, J.A.P., Knudsen K. Andersen S.I. e Stenby E.H. **A Local Composition Model for Paraffinic Solid Solutions**. *Chemical Engineering Science*, 51:3273–3282, 1996.
- [9] Coutinho, J.A.P., Dauphin C. e Daridon J.L. **Measurements and Modelling of Wax Formation in Diesel Fuels**. *Fuel*, 79:607–616, 2000.
- [10] Coutinho, J.A.P., Pauly P. e Daridon J.L. **A Thermodynamic model to Predict Wax Formation in Petroleum Fluids**. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 18:411–422, 2001.

- [11] Coutinho, J.A.P. e Daridon, J.L. **Low-Pressure Modeling of Wax Formation in Crude Oils**. *Energy and Fuel*, 15:1454–1460, 2001.
- [12] Coutinho, J.A.P., Edmonds B. Moorwood T. Szczepanski R. e Zhang X. **Reliable Wax Predictions of Flow Assurance**. SPE78324, 2002.
- [13] Creek, J.L., Lund H.J. Brill J.P. e Volk M. **Wax Deposition in Single Phase Flow**. *Fluid Phase Equilibria*, 158-160:801–811, 1999.
- [14] Daridon, J.L., Pauly J. Coutinho J.A.P. e Montel F. **Solid-Liquid-Vapor Phase Boundary of a North Sea Waxy Crude: Measurement and Modeling**. *Energy and Fuel*, 15:730–735, 2001.
- [15] Erickson, D.D., Niesen V.G. e Brown T.S. **Thermodynamic Measurement and Prediction of Paraffin Precipitation in Crude Oil**. SPE 26604, p. 601–607, 1993.
- [16] Fusi, L. **On the Stationary Flow of a Waxy Crude Oil with Deposition Mechanisms**. *Nonlinear Analysis*, 53:507–526, 2003.
- [17] García, M.C. **Paraffin Deposition in Oil Production**. SPE 64992.
- [18] Hamouda, A.A., e Ravnøy J.M. **Prediction of Wax Deposition in Pipelines and Field Experience on the Influence of Wax on Drag-Reducer Performance**. OTC 7060, 1992.
- [19] Hamouda, A.A. e Viken, B.K. **Wax Deposition Mechanism Under High-Pressure and in Presence of Light Hydrocarbons**. SPE25189, p. 385–396, 1993.
- [20] Hammami, A., e Raines M.A. **Paraffin Deposition from Crude Oils: Comparison of Laboratory Results to Field Data**. SPE 38776, 1997.
- [21] Hampton, R.E., Mammoli A.A. Graham A.L. Tetlow N. e Altobelli S.A. **Migration of Particles Undergoing Pressure-Driven Flow in a Circular Conduit**. *Journal of Rheology*, 41:621–640, 1997.
- [22] Hansen, J.H., Fredenslund Aa. Pedersen K.S. e Ronningsen H.P. **A Thermodynamic Model for Predicting wax Formation in Crude Oils**. *AIChE Journal*, 34:1937–1942, 1988.
- [23] Haq, M.A. **Deposition of Paraffin Wax from its Solution with Hydrocarbons**. USMS 10541, 1978.

- [24] Hayduk, W. e Minhas, B.S. **Correlations for Prediction of Molecular Diffusivities in Liquids**. Canadian Journal of Chemistry Engineering, 60(0):295.
- [25] Hennessy, A.J., Neville A. e Roberts K.J. **An Examination of Additive-Mediated Wax Nucleation in Oil Pipeline Environments**. Journal of Petroleum Technology SPE 12204, 198/199:830–837, 1999.
- [26] Hernandez, O.C., Hensley H. Sarica C. Brill J.P. Volk M. e Delle-case E. **Improvements in Single-Phase Paraffin Deposition Modeling**. SPE84502, 2003.
- [27] Ho, B.P. e Leal, L.G. **Inertial migration of Rigid Spheres in Two-dimensional Unidirectional Flows**. Journal of Fluid Mechanics, 65:365–400, 1974.
- [28] Hoffman, G.D. **Numerical Methods for Engineers and Scientists**. Mc Graw-Hill, New York, 1992.
- [29] Hsu, J.J.C., Samaritana M.M. e Brubaker J.P. **Wax Deposition of Waxy Live Crudes under Turbulent Conditions**. SPE28480, p. 179–192, 1994.
- [30] Hsu, J.J.C., e Brubaker J.P. **Wax Deposition Measurement and Scale-Up Modeling for Waxy Live Crudes under Turbulent Flow Conditions**. SPE 29976, 1995.
- [31] Hsu, J.J.C., Lian S.J. Liu M. Bi H.X. e Guo C.Z. **Validation of Wax Deposition Model by a Field Test**. SPE 48867, 1998.
- [32] Hunt Jr, E.B. **Laboratory Study of Paraffin Deposition**. Journal of Petroleum Technology SPE 279, p. 1259–1269, 1962.
- [33] Kok, M.V., Létoffé J.M. Claudt P. Martin D. Garcin M.; Volle, J.L. **Comparison of Wax Appearance Temperatures of Crude Oils by Differential Scanning Calorimetry, Thermomicroscopy and Viscometry**. Fuel, 75:787–790, 1996.
- [34] Kok, M.V., e Saracoglu O. **Mathematical Modelling of Wax Deposition in Crude Oil Pipeline Systems**. SPE 64514, 2000.

- [35] Labes-Carrier, C., Ronningsen H.P. Kolnes J. e Leporcher E. **Wax Deposition in North Sea Gas Condensate and oil Systems: Comparison between Operational Experience and Model Prediction.** SPE77573.
- [36] Leontaritis, K.J. e Leontaritis, J.D. **Cloud Point and Wax Measurement Techniques.** SPE80267, 2003.
- [37] Lindeloff, N. e Krejbjerg, K. **A Compositional Model Simulating Wax Deposition in Pipeline Systems.** Energy and Fuels, 16(4):887–891, 2002.
- [38] Machado, A.L.C. **Estudo da Influência de Copolímeros de Etileno-Acetato de Vinila (EVA) sobre as Propriedades de Escoamento do Petróleo e na Inibição da Deposição de Parafinas.** PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- [39] Majeed, A., Bringedal B. e Overa S. **Model Calculates Wax Deposition for N. Sea Oils.** Oil and Gas Journal, p. 63–69, 1990.
- [40] Mansoori, G.A. **Asphaltene, Resin, and Wax Deposition from Petroleum Fluids: Mechanisms and Modeling.** The Arabian Journal for Science and Engineering, 21:707–723, 1996.
- [41] Matzain, A., Zhang H.Q. Volk M. Redus C. Brill J. Apte M.S. e Creek J.L. **Multiphase Flow Wax Deposition Modeling.**
- [42] McClafin, G.C., e Whitfill D.L. **Control of Paraffin Deposition in Production Operations.** Journal of Petroleum Technology SPE 12204, November:1965–1972, 1984.
- [43] Misra, S., Baruah S. e Singh K. **Prediction of Paraffin Problems in Crude Oil Production and Transportation-A review.** SPE 28181, 1995.
- [44] Nazar, A.R.S., Dabir B. Vaziri H. e Islam M.R. **Experimental and Mathematical Modeling of Wax Deposition and Propagation in Pipes Transporting Crude Oil.** SPE 67328, 2001.
- [45] Özisik, M.N. **Heat Conduction.** Wiley Interscience, 1993.
- [46] Pan, H., Firoozabadi A. e Fotland P. **Pressure and Composition Effect on Wax Precipitation: Experimental Data and Model Results.** SPE36740, p. 579–592, 1997.

- [47] Patton, C.C., e Casad B.M. **Paraffin Deposition from Refined Wax-Solvent Systems**. Society of Petroleum Engineering Journal, p. 17–24, 1970.
- [48] Pedersen, K.S., Skovborg P. e Ronningsen H.P. **Wax Precipitation from North Sea Crude Oils. 4.Thermodynamic Modeling**. Energy and Fuels, 5:924–932, 1991.
- [49] Pedersen, K.S. **Prediction of Cloud Point Temperatures and Amount of Wax Precipitation**. SPE Production and Facilities 27627, p. 46–49, 1995.
- [50] Perry, R.H., Green D.W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. Mc Graw-Hill, New York, 50th edition edition, 1992.
- [51] Pletcher, R.H., Anderson D.A. Tannehill J.C. **Computacional Fluid Mechanics and Heat Transfer**. Mc Graw-Hill, New York, 1984.
- [52] Ribeiro, F.S., Souza Mendes P.R. e Braga S.L. **Obstruction of Pipelines due to Paraffin Deposition during the Flow of Crude Oils**. Int. Journal of Heat Mass Transfer, 40:4319–4328, 1997.
- [53] Ronningsen, H.P., Bjorndal B. Hansen A.B. e Pedersen W.B. **Wax Precipitation from North Sea Crude Oils. 1.Crystallization and Dissolution Temperatures, and Newtonian and Non-Newtonian Flow Properties**. Energy and Fuels, 5:895–908, 1991.
- [54] Rygg, O., rydahl A.K. e Ronningsen H.P. **Wax Deposition in Offshore Pipeline Systems**. Multiphase Technology.
- [55] Segre, G., e Silberberg A. **Behaviour of Macroscopic Rigid Spheres in Poiseuille Flow. Part 1. Determination of Local Concentration dy Statistical Analysis of Particle Passages through Crossed Light Beams**. Journal of Fluid Mechanics, 14:115–136, 1962.
- [56] Singh, P., Fogler H.S. e Nagarajan N. **Prediction of the Wax Content of the Incipient Wax-Oil Gel in a Pipeline: An Application of the Controlled-Stress Rheometer**. Journal of Rheology, 43:1437–1459, 1999.
- [57] Singh, P., Venkatesan R. Fogler H.S. e Nagarajan N. **Formation and Aging of Incipient Thin Film Wax-Oil Gels**. AIChE Journal, 46, 2000.

- [58] Sofyan, Y., Ghajar A.J. e Gasen A.M. **A Systematic Method to Predict Cloud Point Temperature and Solid Precipitation.** *Petroleum Science and Technology*, 21:409–424, 2003.
- [59] Solomons, T.W.G. **Organic Chemistry.** John Wiley and Sons, 3rd edition, 1992.
- [60] Souza Mendes, P.R. e Braga, S.L. **Obstruction of Pipelines During the Flow of Crude Oils.** *Journal of Fluids Engineering*, 118:722–728, 1996.
- [61] Svendsen, J.A. **Mathematical Modeling of Wax Deposition in Oil Pipeline Systems.** *AIChE Journal*, 39:1377–1388, 1993.
- [62] Tetlow, N., Graham A.L. Ingber M.S. Rubia S.R. e Mondy L.A. *Journal of Rheology*, 42:307, 1998.
- [63] Venkatesan, R., Singh P. e Fogler H.S. **Delineating the Pour Point and Gelation Temperature of Crude Oils.** *SPE Journal*, p. 349–352, 2002.
- [64] Won, K.W. **Thermodynamics for Solid Solution-Liquid-Vapor Equilibria: Wax Phase Formation from Heavy Hydrocarbon Mixtures.** *Fluid Phase Equilibria*, 30:265–279, 1986.
- [65] Weispfennig, K. **Advancements in Paraffin Testing Methodology.** SPE 64997.
- [66] Weingarten, J.S., e Euchner J.A. **Methods for Predicting Wax Precipitation and Deposition.** SPE 15654, 1986.
- [67] Weispfennig, K. e Jennings, D.W. **Paraffin deposition modeling using Benchtop deposition tests.** *AIChE Proceedings of the 3rd International Conference on petroleum phase behaviour and fouling*, p. 96–102, 2002.
- [68] Wilke, C.R., e Chang P. **Correlation of Diffusion Coefficients in Dilute Solutions.** *AIChE Journal*, 1(2):264–270, 1955.
- [69] Won, K.W. **Thermodynamic Calculation of Cloud Point Temperatures and Wax Phase Compositions of Refined Hydrocarbon Mixtures.** *Fluid Phase Equilibria*, 53:6377–396, 1989.

A

Apêndice

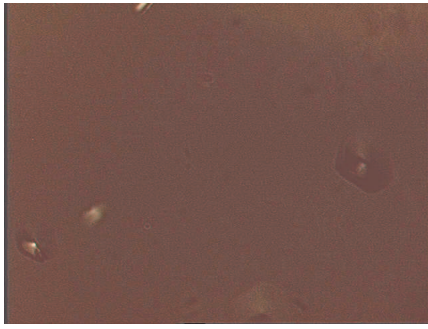
A.1

Caracterização das Parafinas

A.1.1

Determinação da Temperatura Inicial de Aparecimento de Cristais (TIAC)

A temperatura inicial de aparecimento de cristais (TIAC) de soluções de parafina foi determinada por microscopia. Para tal, utilizou-se um microscópio da marca Zeiss Axioskop com uma lente LD Achroplan 20x/0.40 e um sistema de aquecimento Linkam. O código computacional utilizado para aquisição das imagens foi o Axiovision 3.0. A amostra foi resfriada a partir da temperatura de 70⁰C até a temperatura de 40⁰C, a uma taxa de 5⁰C/minuto. Depois a amostra foi resfriada da temperatura de 40⁰C até a temperatura de 26⁰C, a uma taxa de 0,5⁰C/minuto. Para a viscosimetria, utilizou-se um reômetro Physica UDS 200 Paar Physica Universal Dynamic Spectrometer. A mistura foi aquecida até 40⁰C e resfriada até 10⁰C por meio de uma placa Peltier a uma taxa de 1⁰C/minuto. A Figura A.1 mostra as imagens obtidas durante o aparecimento dos cristais de parafina.



(a) $T=27,3^{\circ}\text{C}$



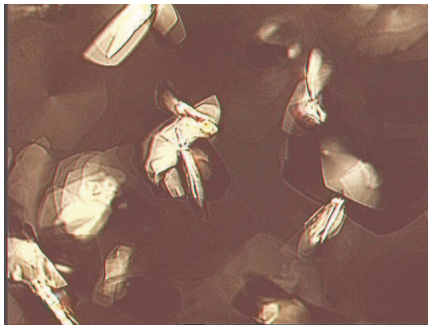
(b) $T=27,2^{\circ}\text{C}$



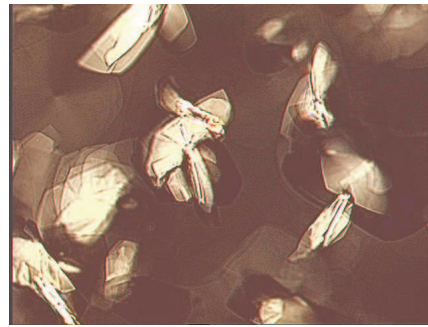
(e) $T=27,1^{\circ}\text{C}$



(f) $T=27,0^{\circ}\text{C}$



(g) $T=26,9^{\circ}\text{C}$



(h) $T=26,5^{\circ}\text{C}$



(i) $T=26,0^{\circ}\text{C}$

Figura A.1: Determinação da TIAC Utilizando Microscopia Ótica. Parafina P130 + n-Parafina.

A.1.2

Determinação da Massa Específica da Mistura Óleo-Parafina como uma Função da Temperatura

A determinação da massa específica da mistura óleo-parafina foi realizada utilizando-se um densímetro da marca Anto Paar DMA 4500 utilizando como padrões ar e água. Para a mistura parafina P130+n-parafina as medições foram realizadas na faixa de temperatura de 6^oC até 50^oC. Para a mistura óleo spindle+parafina comercial as medições foram realizadas na faixa de temperatura de 20^oC até 60^oC. As Figuras A.2 e A.3 mostram as curvas obtidas da massa específica em função da temperatura para a mistura parafina P130+n-parafina e óleo spindle+parafina, respectivamente.

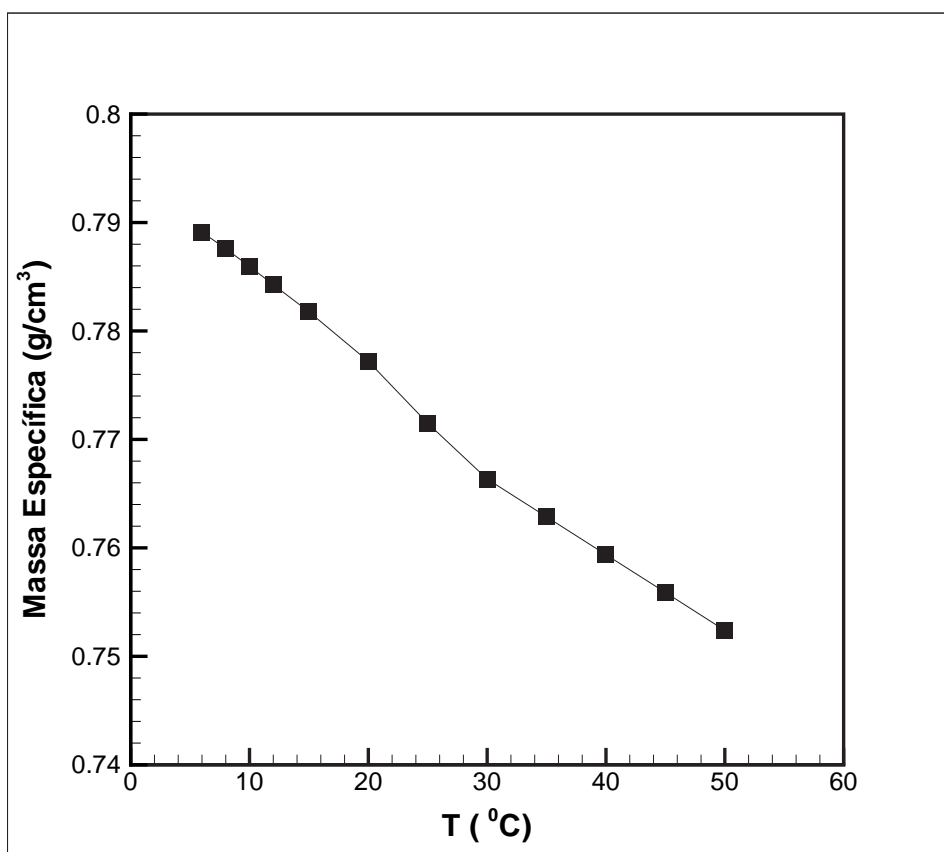


Figura A.2: Massa Específica em Função da Temperatura para mistura Parafina P130 + n-Parafina.

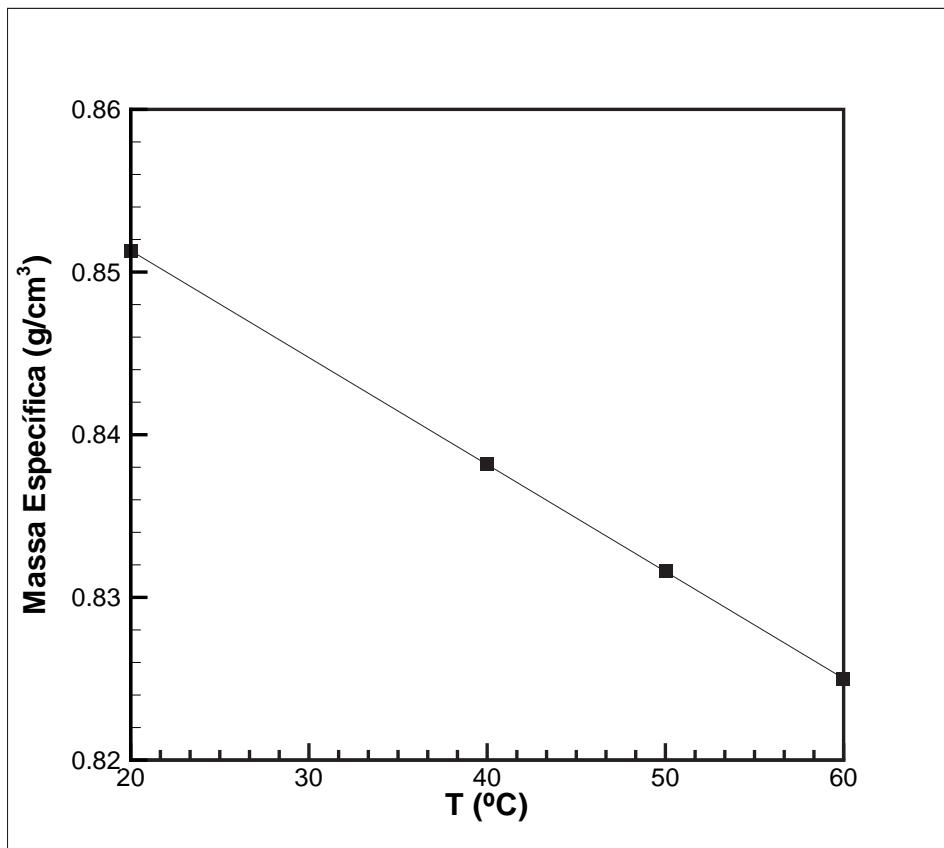


Figura A.3: Massa Específica em Função da Temperatura para mistura Óleo Spindle+parafina.

A.1.3

Variação da Viscosidade com a Temperatura e Curva de Solubilidade da Mistura Parafina P130+n-Parafina

Para a determinação da curva de solubilidade da mistura óleo-parafina foram preparadas sete amostras de óleo com parafina contendo 9ml de n-parafina utilizada como solvente e, respectivamente, 0,10g; 0,15g; 0,25g; 0,375g; 0,50g; 0,75g e 1,0 g de parafina P130.

A curva de solubilidade é construída a partir da temperatura em que cada solução inicia a precipitação de cristais. Para a obtenção da curva, cada amostra foi colocada em um reômetro Physica UDS 200 Paar Physica Universal Dynamic Spectrometer. As amostras eram aquecidas até 40°C e resfriada até 10°C por meio de uma placa Peltier a uma taxa de 1°C/minuto. A temperatura onde os cristais começam a sair de solução é detectada por um súbito aumento da viscosidade.

A Figura A.4 mostra a variação da viscosidade com a temperatura obtida para cada uma das amostras testadas. na figura pode-se notar o ponto de aumento da viscosidade de cada amostra indicando o início da formação de cristais.

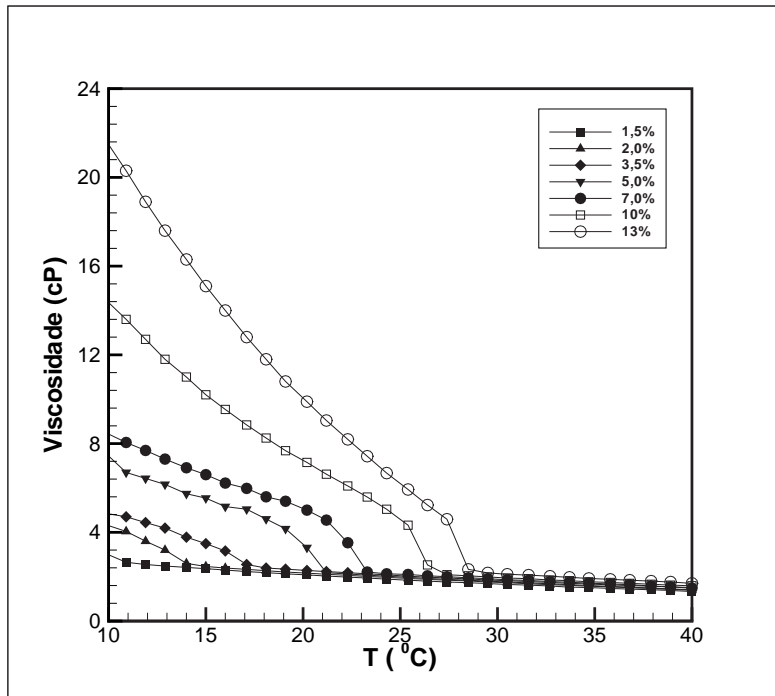


Figura A.4: Variação da viscosidade com a temperatura.

A partir dos dados da Figura A.4, a curva de solubilidade pode ser levantada. A Figura A.5 mostram a temperatura na abscissa em função da concentração de saturação da solução dada em gramas de soluto por grama de solução, w_w .

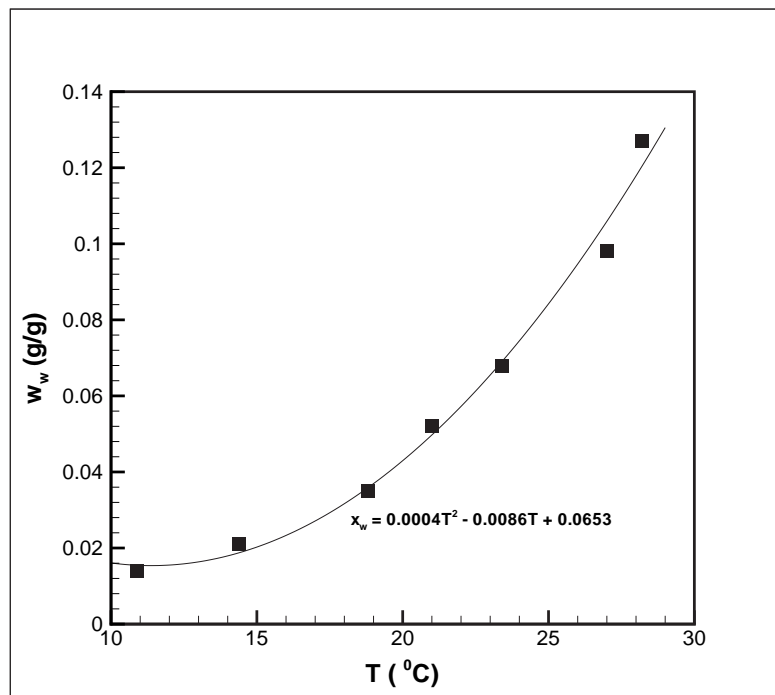


Figura A.5: Curva de Solubilidade da Parafina P130.

A.1.4

Condutividade Térmica e Calor Específico

O valor de condutividade térmica para óleos parafínicos utilizado foi retirado da literatura[50], como sendo $K = 0,23W/mK$.

O calor específico deste tipo de óleo é determinado a partir da sua densidade utilizando-se a seguinte correlação [50]

$$c_p = \frac{A}{\sqrt{d_{15/4}}} + B(T(^{\circ}C) - 15) \quad (A-1)$$

no qual $d_{15/4}$ é a densidade relativa da parafina com a densidade da água avaliada a $4^{\circ}C$, T é a temperatura na qual a propriedade deve ser avaliada e A e B são constantes função do fluido. Segundo a literatura[50], os seguintes valores são recomendados para óleos parafínicos

$$A = 0,425; \quad B = 0,0009$$

O calor específico é dado em $cal/(g.^{\circ}C)$.

A.2

Curva de Calibração da Bomba de Cavidade Progressiva

A bomba de cavidade progressiva utilizada nos experimentos foi calibrada utilizando-se óleo spindle como fluido de trabalho. A calibração foi realizada utilizando-se um recipiente de volume conhecido e um cronômetro. A curva de calibração obtida é apresentada na Figura A.6

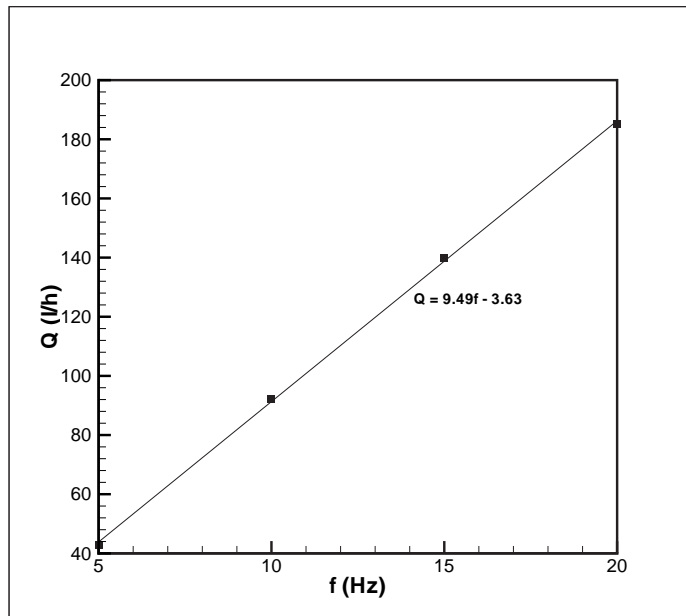


Figura A.6: Curva de Calibração da Bomba de Cavidade Progressiva.

B Apêndice

B.1 Programa

\$debug

!*****

!Program Estagnado

!Cavidade com fluido estagnado - Sem convecção natural

!Modelo de taxa de deposição - Unidimensional

!Equações adimensionalizadas - Com mudança de fase - Propriedades
constantes

!*****

implicit none

!-----

! Variáveis

!-----

real*8, dimension(401) :: w,xl,xs,E,F,G,V,u,uvelho,Tinit,Cw,Cwvelho,Cwinit

real*8 :: Le,deltaw,deltatau,wxl,wxxl,wtl,wxs,wxxs,wts,a,b,c,d,r,p,tf,&
tq,s,snovo,svelho,aux,cwintvelho,cwintnovo,uint,rho,Cw0,ksl,&
cwint,uintvelho,uintnovo,beta1,beta2,beta3,poro,cte,Ste,Tm,&
pi,lambda,lambdan,aux1,aux2,aux3,aux4,aux5,aux6,aux7,aux8,&
aux9,aux10,aux11,aux12,aux13,aux14,deltaum,um,Alfa,fun,dfun

integer :: i,m,j,n,taut,k,mc,z,mm

```
!-----
!
!                               Arquivos de Entrada
!-----
```

```
!Open(7,file="Saidainter.dat",status="unknown")
Open(8,file="inte_Le296lc4.dat",status="unknown")
Open(9,file="temp_Le296lc4.dat",status="unknown")
```

```
!-----
!
!                               Propriedades Físicas
!-----
```

```
Ks1=1.0d0
!Ks1=k1/ks
!ks=23.0d-2
!k1=23.0d-2
rho = 1.0d0
rho=rhotot/rhow
!rhow = 75937.0d-2
Le = 296.0d0
!D=4.86d-10
Alfa=1.0d0
!Alfa=alfas/alfal
!alfas=1.44d-7
!L = 21875.0d1
cte= 346.0d-2
!cte=L/((Tq-Tf)*cp)
Ste= 145.0d-3
!Ste=((Tm-Tf)*cp)/L
!cp=210709.0d-2
deltaum=-1.0d0
!deltaum=(Tm-Tq1)/(Tm-Tf1)
um=5.0d-1
!um=(Tm-Tf1)/(Tq1-Tf1)
!Tq-Tf=3.0d1
!Tq1=42.0d0
!Tf1=12.0d0
!Tm1=27.0d0
beta1 = 1.0d-3
beta2 = 1.0d-3
```

```
beta3 = 1.0d-1
```

```
poro=80.0d-2
```

```
Tf= 0.0D0
```

```
!T=12.0d0
```

```
Tq = 1.0d0 !T=42.0d0
```

```
Tm=5.0d-1
```

```
Cw0 = 1.0d-1
```

```
!Cq0 = 9.0d-1
```

```
N=401
```

```
deltaw=1.0d0/dfloat(N-1)
```

```
deltatau= 1.0D-4
```

```
taut=1.0D0
```

```
J = 1
```

```
z=1
```

```
svelho = 0.0d0
```

```
!-----  
!                               Condições Iniciais  
!-----
```

```
Tinit(1) = Tf
```

```
do i = 2,N
```

```
    Tinit(i) = Tq
```

```
end do
```



```
uvelho = Tinit

do i = 1,(N+1)/2

    Cwinit(i) = 1.0d0
end do

do i = ((N+1)/2)+1,n

    Cwinit(i) = Cw0

end do

Cwvelho = Cwinit

s = 25.0d-4

m = 1
mc = 1
mm = 1

xs = 0.0D0
xl = 0.0d0

xs(n) = 0.0D0
xl(n) = 1.0d0

i = (n+1)/2
uint = 5.0d-1
uintvelho = uint

cwint = 1.0d-1
cwintvelho = cwint
```

```
write(9,100) 100 Format('Title=calor',/, 'Variables=i,x,u,Cw')
```

```
write(8,200) 200
```

```
Format('Title=calor',/, 'Variables=j,uintnovo,snovo,cwintnovo')
```

```
do while(m.eq.1)
```

```
m = 0
```

```
j = j+1
```

```
z=z+1
```

```
!*****
```

```
!           Cálculo do Perfil de Temperatura
```

```
!*****
```

```
do while(mm.eq.1)
```

```
mm = 0
```

```
!Superfície Superior
```

```
V(n) = 1.0d0
```

```
G(n) = tq
```

```
F(n) = 0.0d0
```

```
E(n) = 0.0d0
```

```
!Líquido
```

```
Do i = N-1, (N+1)/2+1, -1
```

```
w(i)=dfloat(i-1)*deltaw
```

```
a = 0.5d0/(1-s)
```

```
b = (0.5d0-s)/(1-s)
```

```
x1(i) = (w(i)-b)/a
```

```

wt1 = 0.5d0*(xl(i)-1)*((s-svelho)/deltatau)/(1-s)**2.0d0

wx1 = 0.5d0/(1-s)

wxx1 = 0.0d0

E(i) = (wxx1/(2.0d0*deltaw))+ (wx1*wx1/(deltaw*deltaw))-&
      (wt1/(2.0d0*deltaw))

F(i) = (-wxx1/(2.0d0*deltaw))+ (wx1*wx1/(deltaw*deltaw))+&
      (wt1/(2.0d0*deltaw))

G(i) = -taut/(deltatau)*uvelho(i)

V(i) = (-2.0d0*wx1*wx1/(deltaw*deltaw))-taut/deltatau

end do

!Interface

V((n+1)/2) = 1.0d0
G((n+1)/2) = uintvelho

!Sólido

Do i = (N+1)/2-1,2,-1

  w(i)=dfloat(i-1)*deltaw

  c = 0.5d0/s

  d = 0.0d0

  xs(i) = w(i)/c

  wts = (-0.5d0*xs(i))*((s-svelho)/deltatau)/(s*s)

```

```

wxs = 0.5d0/s

wxxs = 0.0d0

E(i) = (wxxs/(2.0d0*deltaw))+(wxs*wxs/(deltaw*deltaw))-&
      (wts/(2.0d0*deltaw))

F(i) = (-wxxs/(2.0d0*deltaw))+(wxs*wxs/(deltaw*deltaw))+&
      (wts/(2.0d0*deltaw))

G(i) = -taut/(deltatau)*uvelho(i)

V(i) = (-2.0d0*wxs*wxs/(deltaw*deltaw))-taut/deltatau

end do

!Superfície Inferior

V(1) = 1.0d0
G(1) = tf

!-----
!                               Algoritmo de Thomas
!-----

do i = 2,n

    r = F(i)/V(i-1)

    V(i) = V(i)-r*E(i-1)

    G(i) = G(i)-r*G(i-1)

end do

u(n) = G(n)/V(n)

```

```
do k = 2,n
```

```
    p = n-k+1
```

```
    u(p) = (G(p)-(E(p)*u(p+1)))/V(p)
```

```
end do
```

```
!*****
!                               Cálculo do Perfil de Concentração
!*****
```

```
!do while(mc.eq.1)
```

```
!mc = 0
```

```
!Superfície Superior
```

```
i = N
```

```
    w(i)=dfloat(i-1)*deltaw
```

```
    a = 0.5d0/(1-s)
```

```
    b = (0.5d0-s)/(1-s)
```

```
    xl(i) = (w(i)-b)/a
```

```
    wtl = 0.5d0*(xl(i)-1)*((s-svelho)/deltatau)/(1-s)**2
```

```
    wxl = 0.5d0/(1-s)
```

```
    wxxl = 0.0d0
```

```
    E(i) = 0.0d0
```

$$F(i) = ((wxx1/(2.0d0*deltaw))+(wx1*wx1/(deltaw*deltaw)))-\& \\ ((Le*wt1)/(2.0d0*deltaw))+((-wxx1/(2.0d0*deltaw))+\& \\ (wx1*wx1/(deltaw*deltaw)))+(Le*wt1)/(2.0d0*deltaw))$$

$$G(i) = -(Le*taut)/(deltatau)*Cwvelho(i)$$

$$V(i) = (-2.0d0*wx1*wx1/(deltaw*deltaw))-(Le*taut)/deltatau$$

!Líquido

Do i = N-1, (N+1)/2+1, -1

$$w(i)=dfloat(i-1)*deltaw$$

$$a = 0.5d0/(1-s)$$

$$b = (0.5d0-s)/(1-s)$$

$$xl(i) = (w(i)-b)/a$$

$$wt1 = 0.5d0*(xl(i)-1)*((s-svelho)/deltatau)/(1-s)**2$$

$$wx1 = 0.5d0/(1-s)$$

$$wxx1 = 0.0d0$$

$$E(i) = ((wxx1/(2.0d0*deltaw))+(wx1*wx1/(deltaw*deltaw)))-\& \\ ((Le*wt1)/(2.0d0*deltaw))$$

$$F(i) = ((-wxx1/(2.0d0*deltaw))+(wx1*wx1/(deltaw*deltaw)))+\& \\ ((Le*wt1)/(2.0d0*deltaw))$$

$$G(i) = -(Le*taut)/(deltatau)*Cwvelho(i)$$

$$V(i) = (-2.0d0*wx1*wx1/(deltaw*deltaw))-(Le*taut)/deltatau$$

end do

```
!Interface
```

```
i = (N+1)/2
```

```
    E(i) = 0.0d0
```

```
    F(i) = 0.0d0
```

```
    V(i) = 1.0d0
```

```
    G(i) = cwintvelho
```

```
!Sólido
```

```
Do i = (N+1)/2-1,1,-1
```

```
    E(i) = 0.0d0
```

```
    F(i) = 0.0d0
```

```
    G(i) = 1.0d0-poro
```

```
    V(i) = 1.0d0
```

```
end do
```

```
!-----
!                               Algoritmo de Thomas
!-----
```

```
do i = 2,n
```

```
    r = F(i)/V(i-1)
```

```
    V(i) = V(i)-r*E(i-1)
```

```
    G(i) = G(i)-r*G(i-1)
```

```
end do
```

```
Cw(n) = G(n)/V(n)
```

```

do k = 2,n

    p = n-k+1

    Cw(p) = (G(p)-(E(p)*Cw(p+1)))/V(p)

end do

!-----
!
!           Cálculo da Posição da Interface - massa
!-----

!Interface

i = (N+1)/2

w(i)=dfloat(i-1)*deltaw

a = 0.5d0/(1-s)

b = (0.5d0-s)/(1-s)

xl(i) = (w(i)-b)/a

wxl = 0.5d0/(1-s)

aux = ((rho/(Le*(1-poro)))*((-3.0d0*Cw(i)+4.0d0*Cw(i+1)-Cw(i+2)))/&
      (2.0d0*deltaw))*wxl)*deltatau

snovo = s + aux

!-----
!
!           Cálculo da Concentração e da Temperatura na Interface
!-----

!Interface

i = (n+1)/2

```


$$w(i) = 0.5d0$$

$$wxl = 0.5d0/(1-s)$$

$$wxs = 0.5d0/s$$

$$u(i) = (((((snovo-s)*(1-poro)*cte*deltaw)/(deltatau))+& \\ wxs*(u(i-1))+wxl*(u(i+1))))/(wxs+wxl)$$

$$i=(n+1)/2$$

$$uintnovo = u(i)$$

$$Cwintnovo= 337.0d-3*(uintnovo*uintnovo)+113.0d-4*uintnovo+158.0d-4$$

$$Cw(i)=Cwintnovo$$

```
if(dabs(uintnovo-uintvelho).gt.1.0d-5)then
```

```
  mm = 1
```

```
  uintvelho = uintvelho+beta1*(uintnovo-uintvelho)
```

```
else
```

```
  uintvelho = uintnovo
```

```
end if
```

```
if(dabs(cwintnovo-cwintvelho).gt.1.0d-5)then
```

```
  mm = 1
```

```
  cwintvelho = cwintvelho+beta2*(cwintnovo-cwintvelho)
```

```
else
```

```
  cwintvelho = cwintnovo
```

```
end if
```

```
if(dabs(snovo-s).gt.1.0d-5)then
```

```
  mm = 1
```

```
  s = s+beta3*(snovo-s)
```

```
else
```

```
        s = snovo
    endif

end do

mm = 1

do i = 1,n

    if(dabs(u(i)-uvelho(i))/uvelho(i).gt.1.0d-6)then
        m = 1
    endif

    if(dabs(Cw(i)-Cwvelho(i))/cwvelho(i).gt.1.0d-6)then
        m = 1
    endif

end do

do i = 1,n

    if(m.eq.1)then
        svelho=s
        s=snovo
        uvelho=u
        Cwvelho=Cw
    end if

end do

if(m.eq.1)cwintvelho = cwintnovo
if(m.eq.1)uintvelho = uintnovo

!-----
!
```

Saída dos Dados

```
!-----  
  
xs((n+1)/2) = snovo  
  
do i=(n+1)/2+1,n  
    xs(i) = xl(i)  
end do  
  
if(z.eq.1.0d2)then  
    write(9,101)dfloat(j-1)*deltatau,n  
    101  format('zone T="',f15.8,'" ,i=',i3,' ,f=point')  
    do i=1,n  
        write(9,*) i,xs(i)-snovo,u(i),Cw(i)  
    enddo  
z=1  
endif  
  
write(8,*) j,uintnovo,snovo,cwintnovo  
  
do i = 1,N  
    write(*,*) i,xs(i),u(i),uintnovo,snovo,Cw(i),cwintvelho  
end do  
  
!if(j.gt.10001)m=0  
  
end do  
  
stop  
  
end
```