

# PROGRAMAS NUMÉRICOS

## APÊNDICE A1

### Camada limite dinâmica

C VARIÁVEIS

C X--- FUNÇÃO F

C DX--- FUNÇÃO F':

C DDX-- FUNÇÃO F''

C DDX(0)-- INCLINAÇÃO f'(0)

C CX--- CONCENTRAÇÃO ADIMENSIONAL DO SOLUTO OU TETA

C DCX-- FUNÇÃO TETA'

C DCX(0)-- INCLINAÇÃO TETA'(0)

C Sc--- NÚMERO DE SCHMIDT

C DELTA-- INCREMENTO

C TOLE-- CRITÉRIO PARA AS CONDIÇÕES (7.85C)

C ERRO-- CRITÉRIO DE PARADA DO NEWTON-RAPSON

C L--- NÚMERO DE ITERAÇÕES ADMITIDAS

C N--- NÚMERO TOTAL DE ETAS

C ETA-- VARIÁVEL DE SIMILARIDADE: EQ.(7.71)

\$ DEBUG

```

DIMENSION X(750), DX(750), DDX(750), XK(750), YK(750),
* ZK(750), ETA(750), U(750)
OPEN(7,FILE='DIN.DAT',STATUS='NEW')
L=10
N=500
TOLE=.5E-7
ERRO=.5E-6
DELTA=.02
X(0)=0.
DDX(0)=.2
DX(0)=0.
    
```

```

ETA(0)=0.
C   RUNGE-KUTTA: ALGORITMO (7.88)
DO 60 K=1,L
90  DO 10 J=1,N
    XK(1)=DETA*DX(J-1)
    YK(1)=DETA*DDX(J-1)
    ZK(1)=DETA*F(X(J-1),DDX(J-1))
    DO 20 I=2,4
    IF(I.EQ.4)GOTO 30
    XK(I)=DETA*(DX(J-1)+YK(I-1)/2.)
    YK(I)=DETA*(DDX(J-1)+ZK(I-1)/2.)
    ZK(I)=DETA*F((X(J-1)+XK(I-1)/2.),(DDX(J-1)+ZK(I-1)/2.))
    GOTO 20
30  XK(I)=DETA*(DX(J-1)+YK(I-1))
    YK(I)=DETA*(DDX(J-1)+ZK(I-1))
20  ZK(I)=DETA*F((X(J-1)+XK(I-1)),(DDX(J-1)+ZK(I-1)))
    ETA(J)=ETA (J-1)+DETA
    X(J)=X(J-1)+(XK(1)+2.*XK(2)+2.*XK(3)+XK(4))/6.
    DX(J)=DX(J-1)+(YK(1)+2.*YK(2)+2.*YK(3)+YK(4))/6.
10  DDX(J)=DDX(J-1)+(ZK(1)+2.*ZK(2)+2.*ZK(3)+ZK(4))/6.
    U(K)=DX(N)
    IF(K.GT.1)GOTO 120
    R=DDX(0)
    DDX(0)=R+.005
    GOTO 60
C   NEWTON-RAPHSON:      EQ.(7.86)
120 P=DDX(0)
    S=(P-R)/(U(K)-U(K-1))
    DDX(0)=P+S*(1.-U(K))
    R=P
    DESVIO=ABS(1.-U(K))
    IF(ABS(1.-U(K)).LE.ERRO)GOTO 80
    IF(K.EQ.L)GOTO 100
60  CONTINUE
C   IMPRESSÃO DOS RESULTADOS
100 WRITE(*,81)K
81  FORMAT(/,'O NEWTON-RAPHSON NÃO CONVERGE
    * EM',1X,I2,1X,'ITERAÇÕES')
    GOTO 40
80  WRITE(*,82)K
    WRITE(7,82)K
82  FORMAT(/2X,'O NEWTON-RAPHSON CONVERGIU
    * EM',1X,I2,1X,'ITERAÇÕES'/)
130 WRITE(*,350)
    WRITE(7,350)
350 FORMAT(/5X,'DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDDE'// ,5X,'ETA', 7X,'DX',/)
    DO 500 M=0,N
    WRITE(*,240)ETA(M),DX(M)
    WRITE(7,240)ETA(M),DX(M)
240 FORMAT(3X,F7.4,2X,E10.4)
500 CONTINUE

```

```
WRITE(*,250)DDX(0),DDX(N)
WRITE(7,250)DDX(0),DDX(N)
250  FORMAT(/,5X,'SOLUÇÃO D O PROBLEMA',/,5X,'F'''(0)='',F7.5,/,
* 5X,'DERIVADA SEGUNDA DE F PARA ETA INFINITO='',E10.4)
40  STOP
    END
C   EQUAÇÃO DE BLASIUS: EQ.(7.84)
    FUNCTION F(A,B)
    RETURN
    END
```

## APÊNDICE A2

### Convecção mássica forçada

```

C      VARIÁVEIS

C      X--- FUNÇÃO F
C      X(0)-- PARÂMETRO DE INJEÇÃO OU SUCÇÃO: fp
C      DX--- FUNÇÃO F' ou U/U $\infty$ 
C      DDX-- FUNÇÃO F''
C      DDX(0)- INCLINAÇÃO F''(0)
C      CX--- CONCENTRAÇÃO ADIMENSIONAL ou TETA
C      DCX-- FUNÇÃO TETA'
C      DCX(0)- INCLINAÇÃO TETA'(0)
C      Sc--- NÚMERO DE SCHMIDT
C      DETA-- INCREMENTO
C      TOLE-- CRITÉRIO PARA AS CONDIÇÕES (7.65c) e (8.43)
C      ERRO-- CRITÉRIO DE PARADA DO NEWTON-RAPSON
C      L--- NÚMERO DE ITERAÇÕES ADMITIDAS
C      N--- NÚMERO TOTAL DE ETAS
C      ETA-- VARIÁVEL DE SIMILARIDADE      EQ.(7.71)

C
      DIMENSION X(750),DX(750),DDX(750),XK(750),YK(750),
1  ZK(700),ETA(750),CX(750),DCX(750),VK(750),WK(750),C(750),U(750)
      OPEN(7,FILE='CF.DAT',STATUS='NEW')
      WRITE(*,*)'FORNEÇA Sc, FP'
      READ(*,*)Sc, FP'
      X(0)=FP
      DDX(0)=.27
      DCX(0)=.27
      D E T A=.02
      N=500
      TOLE=.5e-7
      L=10
      ERRO=.5e-6
      DX(0)=0.
      ETA(0)=0.
      CX(0)=0.
      SR=DCX(0)-.5E-2
      RR=DDX(0)-.5E-2

C
C      RUNGE-KUTTA: ALGORITMOS (7.88) e (8.55)
C
      DO 60 K=1,L
      DO 10 J=1,N
      XK(1)=DETA*DX(J-1)
      YK(1)=DETA*DDX(J-1)
      ZK(1)=DETA*F(X(J-1),DDX(J-1))
      WK(1)=DETA*DCX(J-1)
      VK(1)=-DETA*Sc*X(J-1)*DCX(J-1)/2.

```

```

DO 20 I=2,4
IF(I.EQ.4)GOTO 30
XK(I)=DETA*(DX(J-1)+YK(I-1)/2.)
YK(I)=DETA*(DDX(J-1)+ZK(I-1)/2.)
ZK(I)=DETA*F((X(J-1)+XK(I-1)/2.), (DDX(J-1)+ZK(I-1)/2.))
WK(I)=DETA*(DCX(J-1)+VK(I-1)/2.)
VK(I)=-DETA*Sc*((X(J-1)+XK(I-1)/2.)*(DCX(J-1)+VK(I-1)/2.))/2.
GOTO 20
30  XK(I)=DETA*(DX(J-1)+YK(I-1))
    YK(I)=DETA*(DDX(J-1)+ZK(I-1))
    ZK(I)=DETA*F((X(J-1)+XK(I-1)), (DDX(J-1)+ZK(I-1)))
    WK(I)=DETA*(DCX(J-1)+VK(I-1))
20  VK(I)=-DETA*Sc*((X(J-1)+XK(I-1))*(DCX(J-1)+VK(I-1)))/2.
    ETA(J)=ETA (J-1)+DETA
    X(J)=X(J-1)+(XK(1)+2.*XK(2)+2.*XK(3)+XK(4))/6.
    DX(J)=DX(J-1)+(YK(1)+2.*YK(2)+2.*YK(3)+YK(4))/6.
    DDX(J)=DDX(J-1)+(ZK(1)+2.*ZK(2)+2.*ZK(3)+ZK(4))/6.
    CX(J)=CX(J-1)+(WK(1)+2.*(WK(2)+WK(3))+WK(4))/6.
10  DCX(J)=DCX(J-1)+(VK(1)+2.*(VK(2)+VK(3))+VK(4))/6.
    U(K)=DX(N)
    C(K)=CX(N)
C
C  NEWTON-RAPSON:      EQ.(7.86)
C
    RP=DDX(0)
    IF(KC.GE.1)GOTO 822
    DDX(0)=RP+(RP-RR)*(1-U(K))/(U(K)-U(K-1))
    RR=RP
C
C  NEWTON-RAPSON:      EQ.(8.53)
822 PC=DCX(0)
    DCX(0)=PC+(PC-SR)*(1-C(K))/(C(K)-C(K-1))
    SR=PC
    IF(ABS(1-U(K)).LE.ERRO)GOTO 81
    GOTO 60
81  IF(ABS(1-C(K)).LE.ERRO)GOTO 80
60  KC=KC+1
C  IMPRESSÃO DOS RESULTADOS
80  WRITE(*,82)K
    WRITE(7,82)K
82  FORMAT(/O NEWTON-RAPHSON CONVERGIU
*EM',1X,14,1X,'ITERAÇÕES',//5X,'ETA',7X,'DX',10X,'CX'/)
    DO 500 M=0,N
    WRITE(*,240)ETA(M),DX(M),CX(M)
    WRITE(7,240)ETA(M),DX(M),CX(M)
240 FORMAT(3X,F6.3,3(2X,E10.5))
500 CONTINUE
    WRITE(*,250)X(0),DDX(0),DCX(0),Sc
    WRITE(7,250)X(0),DDX(0),DCX(0),Sc
250  FORMAT(/,5X,'SOLUÇÃO DO PROBLEMA',//,
*5X,'FP=',F10.6,1X,'F''(0)=' ,1X,F6.5,1X,'TETA(0)=' ,F9.5/,5X,'Sc=',F6.2)

```

```
4 0    STOP
      END
C
C      EQUAÇÃO DE BLASIUS: EQ.(7.84)
C
      FUNCTION F(A,B)
      F=-A*B/2.
      RETURN
      END
```

## APÊNDICE A3

### Convecção mássica natural

```

C
C      VARIÁVEIS

C
C      X--- FUNÇÃO F
C      X(0)-- PARÂMETRO DE INJEÇÃO OU DE SUCCÃO
C      DX--- FUNÇÃO F': EQ.(9.67)
C      DDX-- FUNÇÃO F''
C      DDX(0)- INCLINAÇÃO F''(0)
C      CX--- CONCENTRAÇÃO ADIMENSIONAL DO SOLUTO OU TETA
C      DCX-- FUNÇÃO TETA'
C      DCX(0)- INCLINAÇÃO TETA'(0)
C      Sc--- NÚMERO DE SCHMIDT
C      DETA-- INCREMENTO: vide o comentário da EQ.(9.92)
C      TOLE-- CRITÉRIO PARA AS CONDIÇÕES (9.78B)
C      ERRO-- CRITÉRIO DE PARADA DO NEWTON-RAPSON
C      L--- NÚMERO DE ITERAÇÕES ADMITIDAS
C      N--- NÚMERO TOTAL DE ETAS
C      ETA-- VARIÁVEL DE SIMILARIDADE: EQ.(9.62)

      DIMENSION X(900),DX(900),DDX(900),XK(900),YK(900),
1      ZK(900),ETA(900),CX(900),DCX(900),VK(900),WK(900),
1      DSF(900),DPF(900),TETO(900),TETI(900)
      OPEN(7,FILE='NA.DAT',STATUS='NEW')
      WRITE(*,*)'FORNEÇA Sc, FP'
      READ(*,*)Sc, FP
      WRITE(*,*)Sc, FP
      X(0)=FP
      DELTA=1E-3
      DCX(0)=-.3
      DDX(0)=-.3
      DETA=0.05
      TOLE=1E-3
      ERRO=1E-3
      L=50
      N=20
73      KT=0.
61      MK=M
      DO 60 M=1,L
      DX(0)=0.
      ETA(0)=0.
      CX(0)=1.
C      RUNGE-KUTTA: ALGORITMO (9.96)
90      DO 10 J=1,N
      XK(1)=DETA*DX(J-1)
      YK(1)=DETA*DDX(J-1)
      VK(1)=DETA*F(X(J-1),DCX(J-1))

```

```

WK(1)=DETA*DCX(J-1)
ZK(1)=DETA*((3*X(J-1)*DDX(J-1)/4-.5*DX(J-1)*DX(J-1))/Sc+    CX(J-1))
DO 20 I=2,4
IF(I.EQ.4)GOTO 30
XK(I)=DETA*(DX(J-1)+YK(I-1)/2.)
YK(I)=DETA*(DDX(J-1)+ZK(I-1)/2)
VK(I)=DETA*F((X(J-1)+XK(I-1)/2.), (DCX(J-1)+VK(I-1)/2.))
WK(I)=DETA*(DCX(J-1)+VK(I-1)/2.)
ZK1=X(J-1)+XK(I-1)/2
ZK2=DDX(J-1)+ZK(I-1)/2
ZK3=DX(J-1)+YK(I-1)/2
ZK(I)=DETA*((3*ZK1*ZK2/4-.5*ZK3*ZK3)/Sc+CX(J-1)+WK(I-1)/2)
GOTO 20
30  XK(I)=DETA*(DX(J-1)+YK(I-1))
    YK(I)=DETA*(DDX(J-1)+ZK(I-1))
    VK(I)=DETA*F((X(J-1)+XK(I-1)), (DCX(J-1)+VK(I-1)))
    WK(I)=DETA*(DCX(J-1)+VK(I-1))
    ZK4=X(J-1)+XK(I-1)
    ZK5=DDX(J-1)+ZK(I-1)
    ZK6=DX(J-1)+YK(I-1)
20  ZK(I)=DETA*((3*ZK4*ZK5/4-.5*ZK6*ZK6)/Sc+(CX(J-1)+WK(I-1)))
    ETA(J)=ETA(J-1)+DETA
    X(J)=X(J-1)+(XK(1)+2.*XK(2)+2.*XK(3)+XK(4))/6.
    DX(J)=DX(J-1)+(YK(1)+2.*YK(2)+2.*YK(3)+YK(4))/6.
    DDX(J)=DDX(J-1)+(ZK(1)+2.*ZK(2)+2.*ZK(3)+ZK(4))/6.
    CX(J)=CX(J-1)+(WK(1)+2.*(WK(2)+WK(3))+WK(4))/6.
10  DCX(J)=DCX(J-1)+(VK(1)+2.*(VK(2)+VK(3))+VK(4))/6.
C   NEWTON-RAPHSON:    EQS.(9.91)
C
    DPF(M)=DX(N)
    TETI(M)=CX(N)
    DSF(M)=DDX(0)
    TETO(M)=DCX(0)
    IF(M.EQ.1)GOTO 70
    IF(M.EQ.2)GOTO 700
    IF(M.EQ.3)GOTO 701
    IF(ABS(TETO(M)-TETO(M-2)).LE.ERRO)GOTO 77
    A=(DPF(M)-DPF(M-2))/(TETO(M)-TETO(M-2))
    B=(TETI(M)-TETI(M-2))/(TETO(M)-TETO(M-2))
77  IF(ABS(DSF(M-1)-DSF(M-2)).GT.ERRO)GOTO 800
    C=(DPF(M-1)-DPF(M-2))/(DSF(M-1)-DSF(M-2))
    D=(TETI(M-1)-TETI(M-2))/(DSF(M-1)-DSF(M-2))
    VA=TETO(M-2)*A+DSF(M-2)*C-DPF(M-2)
    VB=TETO(M-2)*B+DSF(M-2)*D-TETI(M-2)
    DCX(0)=(VA*D-VB*C)/(A*D-B*C)
    DDX(0)=(VB*A-VA*B)/(A*D-B*C)
    DES3=DCX(0)-TETO(M-1)
    DES4=DDX(0)-DSF(M)
    IF((.5*SQRT(DES3*DES3+DES4*DES4)).LE.ERRO)GOTO 800
    IF(M.EQ.L)GOTO 100
    GOTO 60

```



```

70   DDX(0)=DSF(1)+DELTA
      DCX(0)=TETO(1)
      GOTO 60
700  DDX(0)=DSF(1)
      DCX(0)=TETO(1)+DELTA
      GOTO 60
701  A1=(DPF(M)-DPF(M-1))/DELTA
      B1=(TETI(M)-TETI(M-2))/DELTA
      C1=(DPF(M-1)-DPF(M-2))/DELTA
      D1=(TETI(M-1)-TETI(M-2))/DELTA
      VA1=TETO(M-2)*A1+DSF(M-2)*C1-DPF(M-2)
      VB1=TETO(M-2)*B1+DSF(M-2)*D1-TETI(M-2)
      DCX(0)=(VA1*D1-VB1*C1)/(A1*D1-B1*C1)
      DDX(0)=(VB1*A1-VA1*B1)/(A1*D1-B1*C1)
60   CONTINUE
C    IMPRESSÃO DOS RESULTADOS
100  WRITE(*,81)M
81   FORMAT(/,3X,'O NEWTON-RAPHSON NÃO CONVERGE EM',I2,'ITERACOES')
      GOTO 40
800  IF((.5*SQRT(CX(N)*CX(N)+DX(N)*DX(N))).LE.TOLE)GOTO 64
      JJ=JJ+1
      IF(JJ.EQ.15)GOTO 64
      DELTA=DELTA-.05
      N=1.25*N
      IF(N.GT.90)N=90
      GOTO 61
64   WRITE(*,82)MK
      WRITE(7,82)MK
82   FORMAT(/,3X,'O NEWTON-RAPHSON CONVERGIU EM',I1X,I5,I1X,'ITERACOES/')
      DO 600 KK=0,N
      QETA=ETA(KK)
600  IF(CX(KK).LE.0.)GOTO 900
900  WRITE(*,250)Sc,QETA,DCX(0),DDX(0)
      WRITE(7,250)Sc,QETA,DCX(0),DDX(0)
250  FORMAT(/,5X,'SOLUÇÃO DO PROBLEMA',//,
* 5X,'Sc=',F7.2/,5X,'ETAoo=',I1X,F7.2/,5X,'TETA'(0)='F7.4/,5X,'F''(0)='F8.5/,
* 5X,'DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE E CONCENTRAÇÃO'//,5X,
* 'ETA',7X,'DX',9X,'CX',/)
      DO 500 K=0,KK
      WRITE(*,240)ETA(K),-DX(K),CX(K)
      WRITE(7,240)ETA(K),-DX(K),CX(K)
240  FORMAT(3X,F7.3,2(2X,E10.4))
500  CONTINUE
40   STOP
      END
C    DISTRIBUIÇÃO DE CONCENTRAÇÃO
      FUNCTION F(AA,BB)
      F=3*AA*BB/4
      RETURN
      END

```

## APÊNDICE A4

### Teoria do bulbo úmido

#### C CÁLCULO DA UMIDADE ABSOLUTA DO AR

##### § DEBUG

##### C NOMENCLATURA

C	$T_w, T_f$ —	Temperatura de bulbo úmido e de bulbo seco ( $^{\circ}\text{C}$ )
C	$P$ —	Pressão total do sistema, em mmHg
C	$P_w$ —	Pressão de vapor da água em $T_w$
C	$Y_w$ —	Fração molar do vapor de água em $T_w$
C	$W_{AS}$ —	Fração mássica do vapor de água em $T_w$
C	$Y_f$ —	Fração molar do vapor de água em $T_f$
C	$W_{AF}, W_A$ —	Fração mássica do vapor de água em $T_f$
C	$Y_A$ —	Umidade absoluta do ar considerando $Le$ da mistura
C	$Y_{AM}$ —	Umidade absoluta do ar considerando $Le$ somente do ar seco
C	$CP_A$ —	Capacidade calorífica do vapor de água em $T_f$
C	$CP_B$ —	Capacidade calorífica do ar em $T_f$
C	$CPM$ —	Relação entre $CP_B/CP_A$ , eq.(10.142)
C	$CP$ —	Capacidade calorífica da mistura em $T_f$
C	$TA$ —	eq. (10.141)
C	$VAP$ —	Calor de vaporização da água em $T_w$
C	$VISVA$ —	Viscosidade dinâmica do vapor de água
C	$VISAR$ —	Viscosidade dinâmica do ar
C	$CONVA$ —	Condutividade térmica do vapor de água
C	$CONAR$ —	Condutividade térmica do ar
C	$ROVA$ —	Densidade mássica do vapor de água
C	$ROAR$ —	Densidade mássica do ar
C	$DAB$ —	Coefficiente de difusão do vapor de água no ar
C	$CDM$ —	Condutividade térmica da mistura
C	$CT1, CT2$ —	eq.(10.140)
C	$OL1, OL2$ —	Número de Lewis
C	$K$ —	Iteração

##### C

WRITE(\*,\*)'Forneça  $T_w, T_f$  (ambos em  $^{\circ}\text{C}$ ) e  $P$  (em mmHg)'

READ(\*,\*) $T_w, T_f, P$

$T1 = T_w + 273.15$

$T2 = T_f + 273.15$

$P_w = 18.3096 - 3816.44 / (T1 - 46.13)$

$Y_w = \text{EXP}(P_w) / P$

$W_{AS} = 18.015 * Y_w / (28.85 * (1 - Y_w) + 18.015 * Y_w)$

$VAP = 352.58 * (374.14 - T_w) ** (.33052)$

$CP_A = 1.8584 + 9.4e-5 * T_f + 3.73e-7 * T_f * T_f$

$CP_B = 1.00926 - 4.04033e-5 * T_f + 6.17596e-7 * T_f * T_f$

+  $-4.077323e-10 * T_f * T_f * T_f$

$VISVA = 7.76998e-6 + 7.27327e-8 * T_f - 8.1094e-10 * T_f * T_f$

+  $+7.3741e-12 * T_f * T_f * T_f - 2.83617E-14 * T_f * T_f * T_f * T_f$

+  $+3.85826E-17 * T_f * T_f * T_f * T_f * T_f$

$VISAR = 1.69111e-5 + 4.98424e-8 * T_f - 3.18702e-11 * T_f * T_f$



```
DO 20 J=1,2
PMO=PM(I)/PM(J)
ZI=Z(I)/Z(J)
C1=1./SQRT(1+PMO)
C2=SQRT(ZI)
C3=SQRT(1./PMO)
C4=SQRT(C3)
C5=Y(J)*C1*(1+C2*C4)*(1+C2*C4)/SQRT(8.)+C5
20 CONTINUE
XU=XU+Y(I)*X(I)/C5
C5=0.
10 CONTINUE
RETURN
END
```