

9.0 (mr)
13/12/00

ALEX ROBERTO TRIGUEIRO DE SOUSA

MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM QUEIMADOR CICLÔNICO

Trabalho de Formatura Apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para a
Obtenção da Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Professor Doutor Clemente Greco

São Paulo

2000

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600005986

Aos meus pais Gilson e Yara e a meus irmãos
Geyse, Gisele e Alan, que sempre acreditaram
em mim, apoiando me em todos os momentos.

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Doutor Clemente Greco pelos ensinamentos e pelo incentivo.

Aos meus amigos de turma Rodrigo Machado Ferronato e Ronaldo Uliana de Oliveira pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ASPECTO GERAL DE UM QUEIMADOR CICLÔNICO	5
FIGURA 2: ESCOAMENTO DOS GASES NO INTERIOR DE UMA CÂMARA CICLÔNICA	6
FIGURA 3: MALHA DA CÂMARA CICLÔNICA.....	11
FIGURA 4: PERFIL DA CÂMARA CICLÔNICA PROGRAMADO NO PHOENICS.....	12
FIGURA 5: CONCENTRAÇÃO DE COMBUSTÍVEL NA CÂMARA CICLÔNICA.....	13
FIGURA 6: CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO NA CÂMARA CICLÔNICA	14
FIGURA 7: CONCENTRAÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO NA CÂMARA CICLÔNICA	15
FIGURA 8: LINHAS DE CORRENTE DO ESCOAMENTO DOS GASES.....	16
FIGURA 9: TEMPERATURA DOS GASES NA CÂMARA CICLÔNICA.....	17
FIGURA 10: TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL NA CÂMARA CICLÔNICA	18

Resumo

Coque de petróleo tem sido largamente utilizado em processos de grande porte que se utilizam da queima de combustíveis, como por exemplo em cimenteiras. O atrativo para a sua utilização na indústria é o seu baixo preço no mercado, relativo aos outros combustíveis.

Com o objetivo de se estudar as condições de queima de coque de petróleo em pequenas taxas, voltada para o consumo da pequena e da média indústria, foi realizado uma modelagem matemática de uma Câmara Ciclônica, queimador eficiente de combustíveis sólidos triturados como carvão.

O modelo bi-dimensional foi desenvolvido no software de volumes finitos Phoenics, e a análise dos resultados obtidos através dessa modelagem viria a verificar ou não a viabilidade da construção de um protótipo para estudos mais detalhados posteriormente.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	2
2. REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1. A CÂMARA CICLÔNICA.....	4
2.2. CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES.....	5
4. VALORES ADMITIDOS	8
4.1. DADOS SOBRE O COQUE	8
4.2. DADOS SOBRE A COMBUSTÃO	9
5. VALORES CALCULADOS	10
6. MODELAGEM MATEMÁTICA NO PHOENICS.....	11
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	13
8. CONCLUSÕES.....	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	21
ANEXO	
APÊNDICE	



1. Introdução

A necessidade de se reduzir os custos de processos de combustão surgiu como motivação para se modelar a queima de coque de petróleo triturado numa Câmara Ciclônica.

O coque de petróleo tem um preço menor por unidade de energia do que os demais combustíveis utilizados normalmente na indústria. A tabela 1 mostra os preços em dólar por milhão de BTU liberado na queima de diferentes combustíveis.

Tabela 1: Preço em dólar por milhão de BTU de diferentes combustíveis

Combustível	US\$/10 ⁶ *Btu
Coque de Petróleo	0.74
Óleo 7A	1.38
Gás Natural	2.00
Óleo 1A	2.20
Carvão Mineral (Tubarão - SC)	2.84

Fonte: Ministério de Minas e Energia – Abril de 2000.

Nota: Valores calculados tendo como base o Poder Calorífico Inferior (PCI) dos combustíveis.



Como a Câmara Ciclônica consegue queimar coque triturado não é necessário que esse combustível seja pulverizado, diminuindo-se assim os custos no seu processo de moagem.

A queima do combustível nessa câmara será modelada matematicamente com o auxílio do software Phoenics, poderosa ferramenta de volumes finitos na modelagem de problemas envolvendo a Termodinâmica e a Mecânica dos Fluidos.



2. Revisão da Literatura

2.1. A Câmara Ciclônica

O queimador ciclônico é o resultado do contínuo esforço do aperfeiçoamento dos métodos de queima de combustível, para melhorar o desenho funcional e as características de performance de caldeiras principalmente, e minimizar os problemas de poluição do ar. Sua concepção originou-se do desafio aos problemas na queima do carvão pulverizado; formação de escória nas superfícies de troca de calor das caldeiras, emissões de cinzas, erosão induzida pelo transporte pneumático do carvão, e elevados custos de manutenção quando o carvão manejado contém consideráveis taxas de cinzas e sulfuretos.

Segue abaixo uma explicação sucinta sobre o Queimador Ciclônico, para que o leitor tome os primeiros contatos com a câmara de combustão em estudo.

2.2. Características Importantes

O queimador ciclônico original é uma câmara de combustão cilíndrica resfriada a água ou a ar, na qual o carvão ou outro combustível sólido triturado, com grãos de até um-quarto de polegada, é queimado eficientemente e completamente, liberando elevadas taxas de calor com um mínimo de excesso de ar e uma máxima recuperação de cinzas na forma de escória.

O combustível moído é introduzido (ver figura 1) com uma parte de ar de combustão (ar primário ou ar de transporte) ao queimador. Cerca de 10% a 20% do ar de combustão entra tangencialmente à câmara, proporcionando um movimento tangencial nas partículas de carvão. O ar secundário com uma velocidade de aproximadamente 90 m/s é admitido (ver figura 1) na mesma direção tangencial, promovendo uma ação tangencial ou centrífuga das partículas de carvão.

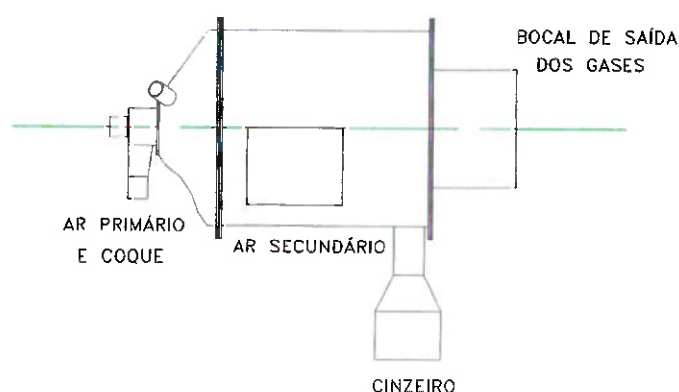
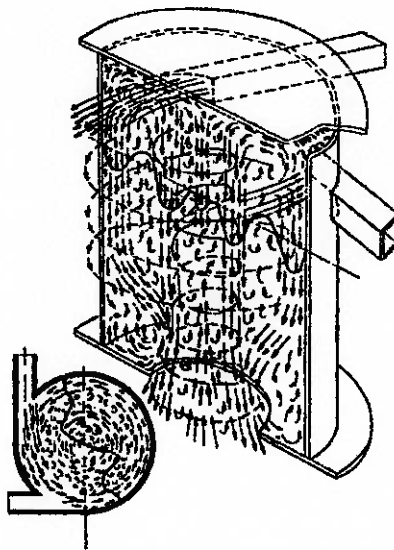


Figura 1: Aspecto Geral de um Queimador Ciclônico

O campo de velocidades gerado é caracterizado pela preponderância da componente tangencial sobre as componentes axial e radial, e pela formação de várias zonas de recirculação. Na figura 2 pode-se observar o escoamento dos gases no interior de uma Câmara Ciclônica.



Baluev e Trovankin 1967

Figura 2: Escoamento dos Gases no Interior de uma Câmara Ciclônica

O combustível queimado libera altas taxas de calor de 5,0 a 8,0 Gcal/m³h e a temperatura dos gases excedem a 1650 °C. Estas temperaturas são suficientemente altas para fundir as cinzas, produzindo uma escória líquida a qual recobre as paredes do ciclone. As partículas de carvão que entram (exceto as mais finas que são queimadas em suspensão) são lançadas às paredes pela força centrífuga, presas na escória, e arrastadas pela alta velocidade tangencial do ar secundário. Dessa forma o ar requerido para a



queima do carvão é rapidamente fornecido e os produtos de combustão são rapidamente removidos.

Mesmo sendo elevada a liberação de calor por m^3 no queimador ciclônico, o total de calor realmente absorvido pela câmara é relativamente baixo. Isso é devido à pequena superfície do ciclone e das propriedades da escória que o recobrem. Essas taxas de absorção são da ordem de 360 a 900 Mcal/ m^3h . Essa combinação de altas taxas de calor liberadas e baixas taxas de calor absorvidas assegura as altas temperaturas necessárias à combustão completa e proporciona a desejada camada de escória líquida na superfície interna do queimador. Os excessos de escória fundida são drenados continuamente através da câmara e descarregados pelo orifício de saída para um cinzeiro (ver figura 1).



4. Valores Admitidos

A capacidade do Queimador Ciclônico admitida será de 5,0 Gcal/m³h.

4.1. Dados sobre o coque

Na tabela 2 tem-se a composição do coque de petróleo em base úmida.

Tabela 2: Composição do Combustível (base úmida)

Elemento	Porcentagem Mássica (%)
C	86,30
H	3,77
O	1,72
N	1,51
S	5,38
Cinzas	0,32
Umidade	1,00

Fonte: software de combustão CGComb.

Poder Calorífico Superior: 8.472 kcal/kg;

Poder Calorífico Inferior: 8.267 kcal/kg;

Densidade do coque: 500 kg/m³.



4.2. Dados sobre a combustão

Densidade do ar a 25°C e 1 atm: 1.184 kg/m³;

Massa de oxidante estequiométrica: 11.47 kg/kg de combustível;

Excesso de ar: 10%;

Massa de oxidante com excesso de 10%: 12.62 kg/kg de combustível;

Fluxo mássico de combustível: 150 kg/h;

Velocidade do ar primário na tubulação de transporte de coque: 30 m/s;

Velocidade do ar secundário na entrada do queimador: acima de 90 m/s.

Maiores informações relativas a combustão, como a equação da reação, encontram-se em anexo. Dados esses retirados do software de combustão CGComb.



5. Valores Calculados

Fluxo mássico total do ar de combustão: 1.893 kg/h;

Fluxo volumétrico total do ar de combustão: 1.599 m³/h;

Fluxo volumétrico estequiométrico total do ar de combustão: 1.720 m³/h;

Fluxo volumétrico estequiométrico total do ar de combustão: 1.453 m³/h;

O fluxo volumétrico do ar primário será 10% do fluxo volumétrico estequiométrico total: 145 m³/h;

Portanto, o fluxo volumétrico do ar secundário será: 1454 m³/h.

Na tabela 3 segue um resumo dos fluxos de oxidante do processo, considerando um excesso de ar de combustão de 10%:

Tabela 3: Fluxos dos ares de combustão

Ar	Fluxo Mássico (kg/h)	Fluxo Volumétrico (m ³ /h)
Ar Primário	172	145
Ar Secundário	1721	1454

6. Modelagem Matemática no Phoenics

Na modelagem do Queimador Ciclônico foi desenvolvida a malha 2D (ver figura 3) na qual se determinou os volumes que dividem a Câmara em: regiões de malha mais finas, onde ocorrem mais intensamente as reações devidas à combustão, e em regiões de malha mais grossa, onde as reações não ocorrem tão intensamente.

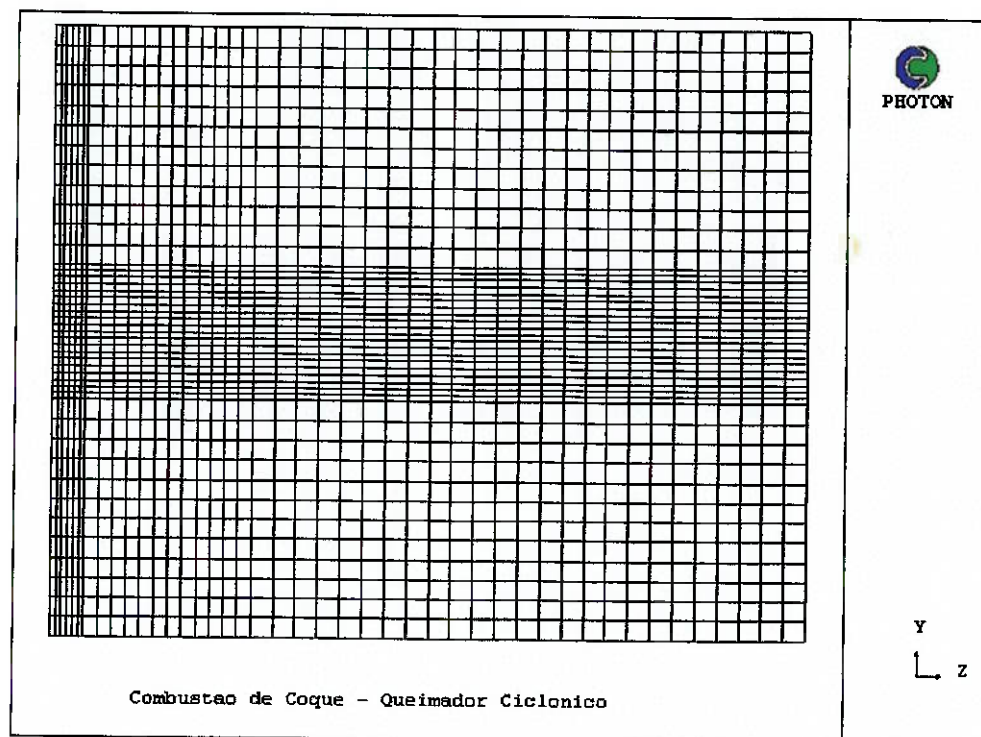


Figura 3: Malha da Câmara Ciclônica

Deve-se observar que quanto mais refinada for a malha, ou seja, quanto maior for o número de volumes que discretizam a Câmara, mais refinado

também serão os resultados obtidos pelo Phoenix. Contudo, o tempo de processamento iria aumentar proporcionalmente ao aumento da discretização do volume de controle, além de dificultar a convergência do sistema de equações diferenciais que regem o processo.

O perfil do Queimador Ciclônico programado no Phoenix pode ser observado no gráfico de velocidade (figura 4), que foi obtido a partir das primeiras iterações executadas no programa de queima, não sendo, portanto, suficiente para análise do escoamento dos gases no interior da Câmara.

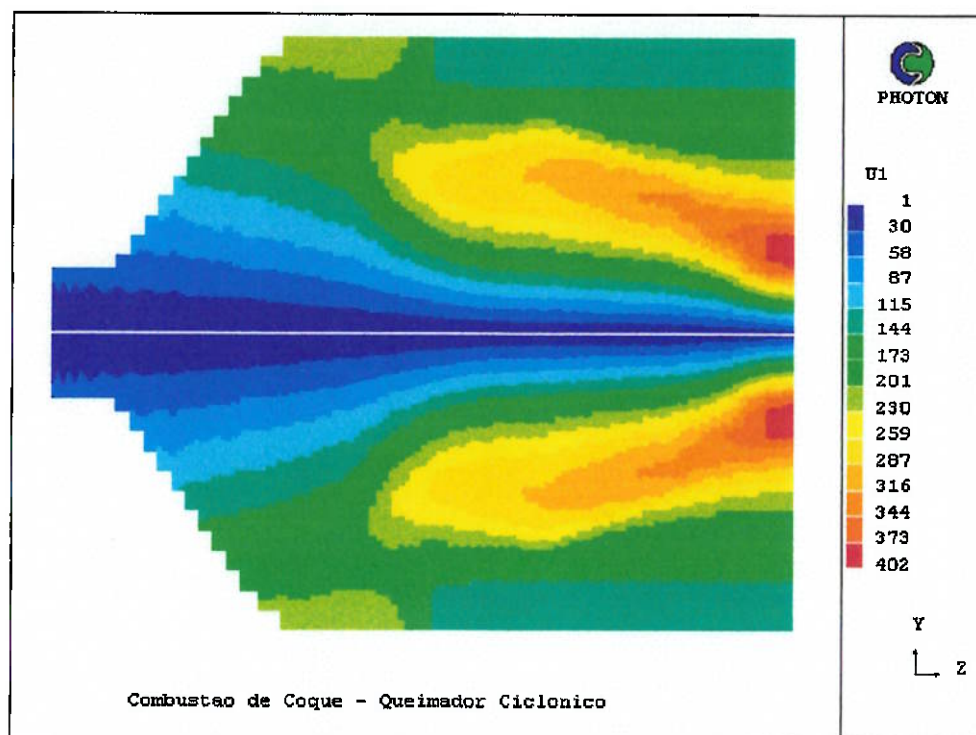


Figura 4: Perfil da Câmara Ciclônica programado no Phoenix

7. Resultados e Discussões

Os resultados das iterações executadas no programa desenvolvido e seus respectivos comentários se encontram a seguir:

A figura 5 mostra a concentração de combustível ao longo da Câmara Ciclônica.

Nesse gráfico pode-se observar que a concentração de coque diminui gradualmente do seu ponto de injeção até o bocal de saída dos gases, fato esse que evidencia a ocorrência da combustão.

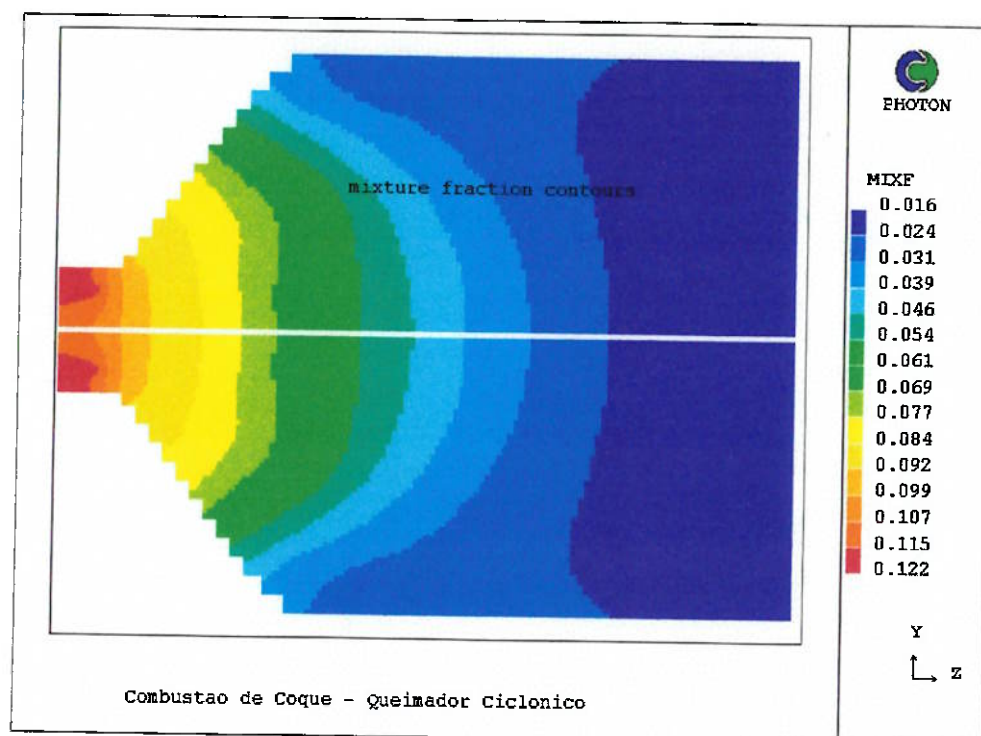


Figura 5: Concentração de combustível na Câmara Ciclônica

Na figura 6 tem-se a distribuição de oxigênio ao longo da Câmara Ciclônica.

Pode-se verificar que a concentração de oxigênio é menor próximo a injeção do coque, porque localmente a relação combustível – oxidante é subestequiométrica. Já ao longo do Queimador Ciclônico, onde está posicionada a entrada de ar secundário, a disponibilidade de oxigênio aumenta, aumentando a sua concentração nessa região.

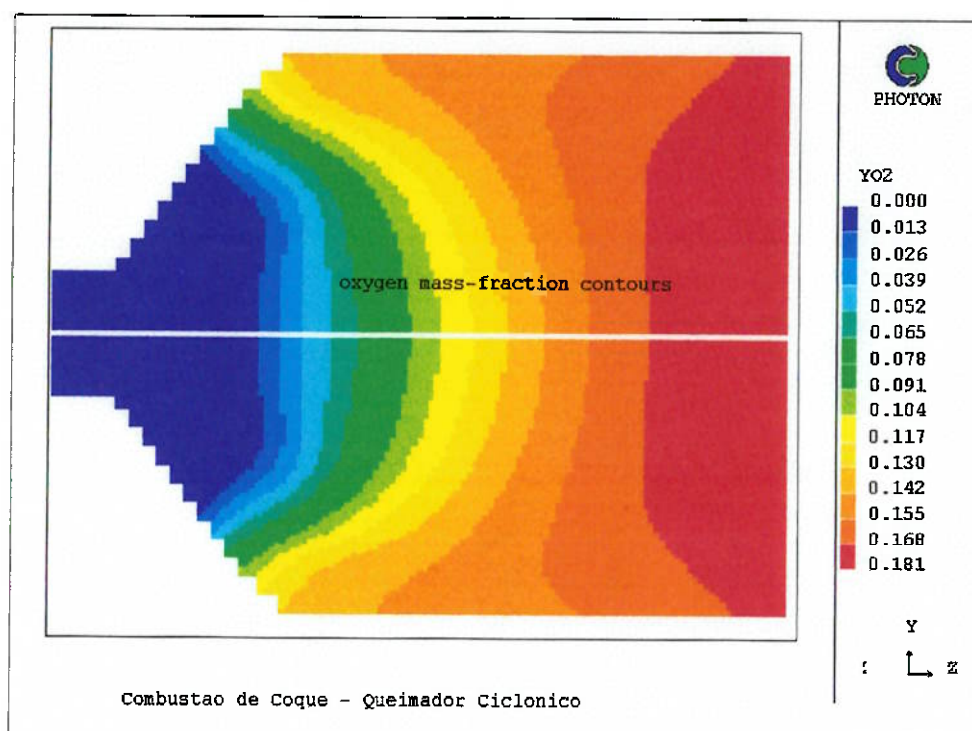


Figura 6: Concentração de oxigênio na Câmara Ciclônica

A figura 7 mostra a distribuição de dióxido de carbono ao longo da Câmara Ciclônica.

O gráfico de concentração de CO_2 deve ser analisado conjuntamente aos gráficos de concentração de combustível e de O_2 :

As regiões onde se tem maior taxa de dióxido de carbono a concentração de oxigênio é menor, pelo fato de ser consumido um (O_2) para a formação do outro (CO_2).

Deve-se observar também, que a concentração de CO_2 é menor na região onde a concentração de coque é maior, ou seja, na sua injeção.

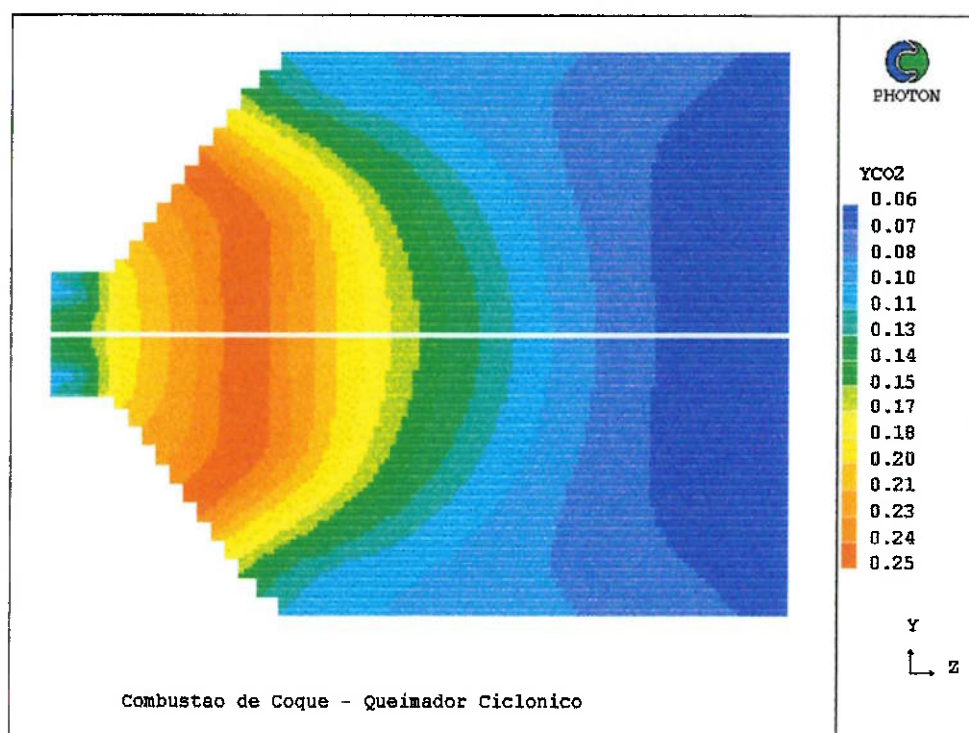


Figura 7: Concentração de dióxido de carbono na Câmara Ciclônica

Na figura 8 encontram-se as linhas de corrente do escoamento dos gases: produtos da combustão e o próprio oxidante.

Nesse gráfico é possível se observar recirculações na região cônica da Câmara Ciclônica, imediatamente a jusante da injeção do combustível e do ar primário. A formação dessas recirculações é essencial para a queima completa do coque de petróleo.

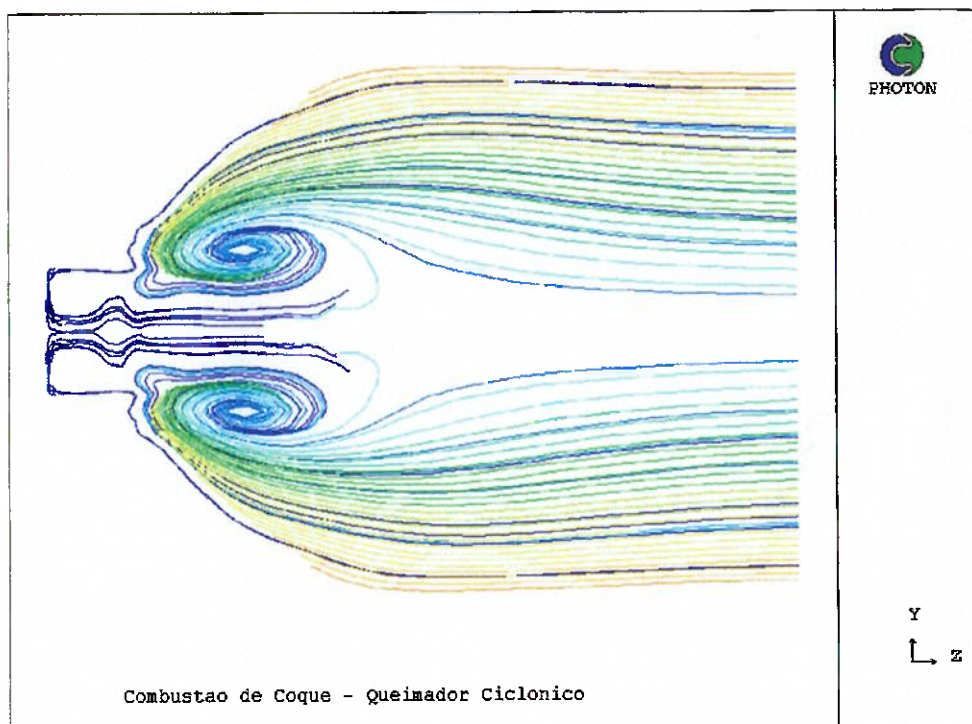


Figura 8: Linhas de corrente do escoamento dos gases

Na figura 9 tem-se as temperaturas da fase gasosa da reação de combustão.

Segundo a literatura estudada, as temperaturas típicas dos gases de saída de um Queimador Ciclônico são superiores a 1650 °C. Fato esse verificado nos resultados da modelagem no Photonics, que obteve temperatura de saída dos gases da ordem de 1700 °C, como pode ser observado no gráfico de temperaturas dos gases a seguir.

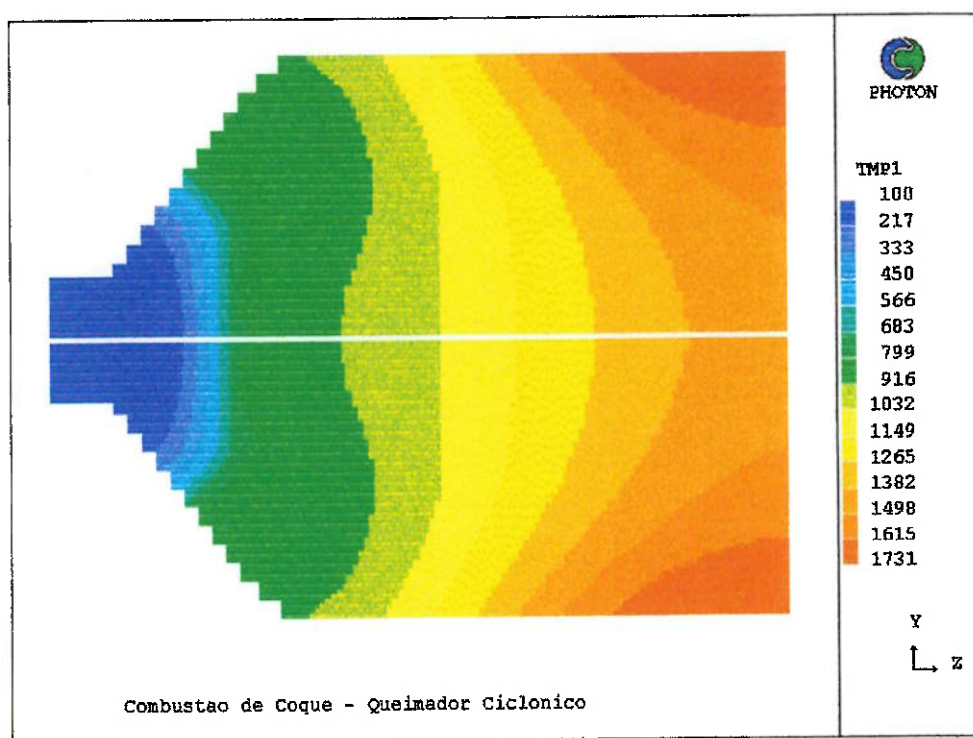


Figura 9: Temperatura dos gases na Câmara Ciclônica

A figura 10 mostra as temperaturas da fase sólida, ou seja, as temperaturas do coque de petróleo ao longo da Câmara Ciclônica.

Nesse gráfico é possível se observar que a temperatura do coque de petróleo aumenta ao longo do queimador, conforme sua combustão vai ocorrendo.

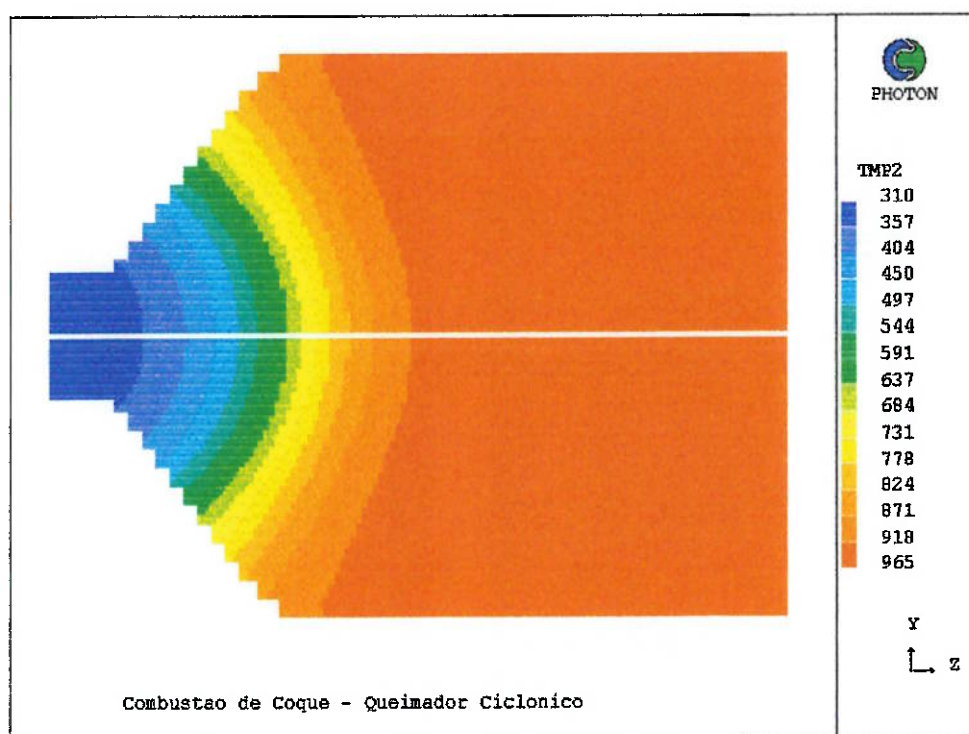


Figura 10: Temperatura do combustível na Câmara Ciclônica



8. Conclusões

O modelamento da Câmara Ciclônica com queima de coque de petróleo forneceu os resultados esperados, encontrados na literatura estudada.

Pode ser verificado no gráfico das temperaturas da fase gasosa (figura 9) que a temperatura dos gases de saída da Câmara Ciclônica são da ordem de 1700. °C e a literatura diz em temperaturas superiores a 1650 °C.

A literatura, de acordo com a figura 2, cita ainda a existência de zonas de recirculação, que propiciam a turbulência fundamental para a combustão do coque de petróleo triturado. E através do gráfico das linhas de corrente dos gases (ver figura 8), obtido como resultado da modelagem, verificou-se a ocorrência de recirculações.

Dessa forma, pode-se concluir, baseado nos resultados obtidos na modelagem matemática realizada confrontados com os dados obtidos na teoria, ser viável a construção de um protótipo para estudos mais aprofundados sobre a queima de coque de petróleo triturado.

O que deve ser observado, no entanto, é que a modelagem desenvolvida nesse projeto admitiu um modelo bidimensional, aproximação essa que pode fornecer falsos resultados diante da realidade. Sugestiona-se,



portanto, para o futuro, o aperfeiçoamento desse trabalho, desenvolvendo o em 3D.



Referências Bibliográficas

AMATO N., L **Modelo Matemático do Escoamento em Câmara Ciclônica.** São Paulo, Fevereiro de 1986, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica EPUSP.

GILG, F. X., Application Engineer, The Babcock & Wilcox Co.
The Cyclone Furnace. Power Generation – Feature Of The Month – paper, Abril, 1950 – Chicago .

KESSLER, G. W., Assistant Chief Engineer, The Babcock & Wilcox Co.
Cyclone Furnace Boilers. American Power Conference – paper – New York .

WATTS, G. A. and Sage, W. L., The Babcock & Wilcox Co.
Multifuel-Firing of Cyclone Furnaces. ASME – paper 56-SA-56, Setembro de 1956.

Flame Combustion Processes In Industry
Flame Of Solid Fuels - The Cyclone Flame



Apêndice: Listagem do Programa

Listagem do programa desenvolvido no Phoenix para modelagem da queima de coque de petróleo em uma Câmara Ciclônica:

TALK=T;RUN(1, 1)

** LOAD(14) from the PHOENICS Input Library
Special-14: Always-valid character declarations and settings

NODEF=T

Declarations

CHAR(ASK,ANS,CLS,PAUSE,UNIGRID)
CHAR(SPELL,EXPRT,EQUALVEL,SOLIDMAT,FLUIDMAT,USE_PROPS,IMMERSOL,MFM)

CHAR(GENTRA,SOLVEL,SOLTEM,GRAVITY,SOLSTR,ASLP0,FLUID,CPVNAM,SPPNAM)

char(solvetem)

char(northwall,southwall,eastwall,westwall,highwall,lowwall)

Settings

ASK=Y; ANS=N; solvetem=n; EQUALVEL= \$W100; PAUSE=\$13

UNIGRID=\$50

SPELL=\$20; CLS=\$21; EXPRT=\$30; SOLIDMAT=\$70; FLUIDMAT=\$71

USE_PROPS=\$72; SOLVEL=\$73; IMMERSOL=\$R001; MFM = \$L099

GENTRA=\$G001; GRAVITY=\$74; SOLSTR=\$S001; SOLTEM=\$51;

ASLP0=\$P030

FLUID= FIINIT(PRPS)

NODEF=F

LIBREF= 14

GROUP 1. Run title and other preliminaries

TEXT(Combustao de Coque - Queimador Ciclonico : C110

TITLE

DISPLAY

O caso considerado é bifásico 2D turbulento, no qual o ar primário entra tangencialmente a câmara de combustão, transportando consigo o coque de petróleo. O ar secundário também entra tangencialmente posicionado ao longo da câmara ciclônica.



=====

Coal-combustion model; solid phase - carbon only

reactions: $C(s) + 0.5 O_2 > CO$ (exothermic)

$CO + 0.5 O_2 > CO_2$ (exothermic)

$C(s) + CO_2 > 2CO$ (endothermic)

$C(s) + H_2O > CO + H_2$ (endothermic)

$H_2 + 0.5 O_2 > H_2O$ (exothermic)

=====

ENDDIS

**

noxdbegin

ns 7

nr 3

noxdend

**

** control variables

BOOLEAN(NOXCAL,THRAD)

** definition of variables

REAL (PI,AIN1,AIN2,AIN3,CONV1,CONV2,CONV3,CONV4)

REAL (DTF)

REAL (ROGIN1,ROGIN2)

REAL (RIN1, RIN2, RIN3, ROUT, ZLEN, ZQUARL)

REAL (RAIOIN, RAIO1, RAIO2, RAIO3, Z1, Z2, Z3)

REAL (AREA1, AREA2, REXT1, REXT2)

REAL (FGIN1, FGIN2, FGIN3, WGIN1, WGIN2, WGIN3, FGINT)

REAL (UGIN1, UGIN2, USIN, VGIN1, VGIN2, VSIN)

REAL (FVIN1, FVIN2)

REAL (FCOAL,WSIN,ROCOAL,FMCOAL,ROMEAN,GABSR)

REAL (TSIN,TGIN1,TGIN2,TGIN3)

REAL (HSIN,HGIN1,HGIN2,HGIN3)

REAL (OMEGAF,OMEGA1,OMEGA2,OMEGA3)

REAL (TKEIN1,TKEIN2,TKEIN3,EPIN1,EPIN2,EPIN3,DIST1,DIST2,DIST3)

REAL (OUTCO1, GFS)

REAL (HCCO2,HCCO,HHH2O,HCHX)

REAL

(CMOL,HMOL,NMOL,OMOL,O2MOL,N2MOL,CH4MOL,H2OMOL,COMOL,CO
2MOL)

REAL (NOMOL,OHMOL,OXMOL,H2MOL)

CHAR (ANS2)

=====

*** Note that SI units are used throughout the calculation ***

=====

** DADOS DO QUEIMADOR CICLÔNICO - SI

RAIOIN=0.032



RAIO1=0.052
RAIO2=0.063
RAIO3=0.282
Z1=0.03
Z2=0.15
Z3=0.5
AREA1=0.0012/1.17
AREA2=0.0026*1.21
REXT1=0.065
REXT2=0.25
** conversion factors
PI=3.14159
-- inches to metres
CONV1=0.0254
-- pounds to kilograms
CONV2=0.4536
-- feet to metres
CONV3=CONV1*12.
-- cu.ft to cu.m
CONV4=CONV3**3
** inlet diameters - inches
-- diameter of innermost inlet tube
RIN1= 16.
-- outer diameter of middle inlet annulus
RIN2= 26.
-- outer diameter of outer secondary air annulus
RIN3= 53.
-- quarl depth from inlet plane to furnace wall - inches
ZQUARL= 11.313
-- outer radius of 2-D solution domain - m
ROUT=1.
-- axial length of solution domain - m
ZLEN=5.
-- radii, converted to SI units
RIN1= RIN1*CONV1/2.; RIN2=RIN2*CONV1/2.; RIN3=RIN3*CONV1/2.
ZQUARL=ZQUARL*CONV1
** inlet flow areas
AIN1=PI*RIN1*RIN1; AIN2=PI*RIN2*RIN2-AIN1;
AIN3=PI*RIN3*RIN3-AIN2-AIN1
** length scales for inlet epsilon
DIST1=0.0019; DIST2=0.00085
** inlet mass flow rates - kg/s
-- primary air
FGIN1= 0.04778
-- secondary air
FGIN2= 0.478



```
-- tertiary air
FGIN3= 0.0
** inlet parameters for coal
-- coal mass flow rate - kg/s
FCOAL= 0.0417

-- velocity of coal particles - m/s
USIN= 16
WSIN= 0.0
VSIN= -5.4
-- coal density - kg/(m**3)
ROCOAL=500.
-- mass-fractions of carbon and hydrogen in coal
REAL(CINCL,HINCL); CINCL=0.95;HINCL=0.05
-- convert velocity to SI
-- total gas inlet mass flow rate - kg/s
FGINT= (FGIN1+FGIN2+FGIN3)
-- convert inflows to mass flow per unit area in SI units.
FGIN1=FGIN1/AREA1; FGIN2=FGIN2/AREA2
FMCOAL=FCOAL; FCOAL=FMCOAL/AREA1
== NOTE: fmcoal is kg/s, fcoal is kg/(m**2.s)
** inlet volume flows - m**3/s
-- primary air
FVIN1=0.0402778
-- secondary air
FVIN2=0.403889
-- mean inlet density - kg/m**3
ROMEAN=FGINT/(FVIN1+FVIN2)
-- calculate inlet velocities - m/s
UGIN1=FVIN1/AREA1; UGIN2=FVIN2/AREA2
WGIN1=0.5; WGIN2=0.5; WGIN3=41.935
VGIN1=-8.775; VGIN2=-6.2
** angular velocities at inlet - radians/sec
** solid-body rotation assumed
-- primary air
OMEGA1=UGIN1/REXT1
-- coal
OMEGAF=OMEGA1*0.9
-- secondary air
OMEGA2=UGIN2/REXT2
-- tertiary air
OMEGA3= 0.
** inlet temperatures - deg F
-- coal
TSIN = 150.
-- primary air
```



```
TGIN1= 150.
-- secondary air
TGIN2= 500.
-- convert to deg K
TGIN1=273.+(TGIN1-32.)*5./9.;TGIN2=273.+(TGIN2-32.)*5./9.
TSIN =273.+(TSIN -32.)*5./9.
-- inlet conditions for turbulence - assume 5% intensity
TKEIN1=0.0025*UGIN1*UGIN1;TKEIN2=0.0025*UGIN2*UGIN2
EPIN1=0.1643*TKEIN1**1.5/DIST1; EPIN2=0.1643*TKEIN2**1.5/DIST2
** Molecular masses in kg/kg-mol
CMOL = 12.01115;HMOL = 1.00797;NMOL = 14.0067; OMOL = 15.9994
CH4MOL= CMOL+4.0*HMOL
O2MOL = 2.0*OMOL;N2MOL = 2.0*NMOL
H2OMOL= 2.0*HMOL+OMOL; COMOL = CMOL+OMOL
CO2MOL= 2.0*OMOL+CMOL;NOMOL = NMOL+OMOL
OHMOL = OMOL+HMOL;H2MOL = 2.0*HMOL
-- Do not alter the above settings. Change NOXCAL
-- to T to perform a NOx post-processing run; this
-- is the only change needed.
CHAR(NOXC)
MESG(Main combustion calculation (M) or NOX Post-processing (P
MESG( (Default = M)
READVDU(NOXC,CHAR,M)
IF(:NOXC:.EQ.P)THEN
TEXT(NOX Post-processing calculation : C110
NOXCAL=T
ELSE
+NOXCAL1=F
ENDIF
=====
START OF GROUP-BY-GROUP Q1 SETTINGS
=====
```

GROUP 3. X-direction grid specification

```
CARTES=F; XULAST=2*PI/10
** NX=10
** XFRAC(1)= -10.0; XFRAC(2)=PI/2/NX
```

```
USIN
UGIN2
UGIN1
```

GROUP 4. Y-direction grid specification

```
NREGY=4
```



```
IREGY=1; GRDPWR(Y,5,RAIOIN,1.)
IREGY=2; GRDPWR(Y,3,RAIO1-RAIOIN,1.)
IREGY=3; GRDPWR(Y,2,RAIO2-RAIO1,1.)
IREGY=4; GRDPWR(Y,12,RAIO3-RAIO2,1.)
```

GROUP 5. Z-direction grid specification

```
NREGZ=3
IREGZ=1; GRDPWR(Z,6,Z1,1.)
IREGZ=2; GRDPWR(Z,12,Z2,1.)
IREGZ=3; GRDPWR(Z,25,Z3,1.)
```

GROUP 7. Variables stored, solved & named

```
** Solve for one pressure, two velocities, the volume
  fractions of the 2 phases and the "shadow" volume
  fraction of the second (denser) phase.
ONEPHS=F; SOLVE(P1,W1,W2,R1,R2,RS)
NAME(R1)=GAS;NAME(R2)=FUE;NAME(RS)=SHAD
SOLVE(V1,V2); SOLVE(U1,U2)
SOLUTN(P1,Y,Y,Y,P,P,P)
** Provide storage for inter-phase mass transfer.
STORE(MDOT,CFIP)
STORE(YO2,YCO,YCO2,YN2,YH2,YH2O)
** store temperature and density
STORE(TMP1,TMP2,RHO1); OUTPUT(RHO1,Y,Y,Y,Y,Y,Y)
** enthalpy
SOLVE(H1,H2)
SOLVE(C1,C2); NAME(C1)=MIXF
STORE(ENUT)
-- NOX solution
IF(NOXCAL) THEN
+ STORE(P1,U1,U2,V1,V2,W1,W2,GAS,FUE,SHAD,H1,H2,MIXF,C2,KE,EP)
+ SOLVE(C3,C5); STORE(C4,C6); NAME(C3)=XN; NAME(C5)=XNO
+ STORE(XO,XO2,XH,XOH,CRKT,PRDT,NOSR,EQUI,DEGF)
+ CINT(XNO)=0.0; CINT(XN)=0.0; CINT(C4)=0.0; CINT(C6)=0.0
+ SOLUTN(XN ,Y,Y,Y,N,N,N);SOLUTN(XNO ,Y,Y,N,N,N,N)
ENDIF
TERMS(H1,N,P,P,P,P,P);TERMS(H2,N,P,P,P,P,P)

IF(NOXCAL) THEN
+ THRAD=F
ELSE
MSG( Thermal radiation required ? (default=Y)
READVDU(ANS2,CHAR,Y)
+IF(:ANS2:.EQ.Y) THEN
```



```
+ THRAD=T  
ENDIF
```

```
IF(THRAD) THEN  
+REAL(ABSORB,SCAT,SIGMA,EMPW,EMISW,EMISG,EMPG,TWAL)  
+ABSORB=0.5;SCAT=0.02; EMISG=0.07  
+ SIGMA=5.6697E-8; EMISW=1.0;TWAL=680.  
+ EMPW=SIGMA*TWAL**4; EMPG=SIGMA*EMISG  
+ RADIAT(FLUX,ABSORB,SCAT,H1)  
+ SOLUTN(RADZ,P,P,y,P,P,P)  
+ SOLUTN(H2,P,P,y,P,P,P)  
ENDIF  
ENDIF
```

GROUP 9. Properties of the medium (or media)

```
** densities and temperatures  
-- take cpsolid=cpgas=1.1e3  
CP1=1.1E3; CP2=1.1E3  
** rho1=grnd7 activates computation of rho1, tmp1, tmp2  
and gas-phase composition in rho section of gxprop.for  
RHO1=GRND7  
RHO2=ROCOAL; PRESS0=1.E5; TEMP0=0.  
RHO1A=CINCL ; RHO1B=1.0-CINCL  
-- evaluate inlet densities - currently only used for fiinit(rho1)  
ROGIN1=PRESS0/(287.41*TGIN1)  
ROGIN2=PRESS0/(287.41*TGIN2)  
** turbulence model  
IF (.NOT.NOXCAL) THEN  
+ TURMOD(KEMODL); KELIN=3  
ENDIF
```

GROUP 10. Inter-phase-transfer processes and properties

```
** Set constant interphase friction factor and activate  
the calculation of the interphase mass transfer by:  
CFIPS=GRND1; CFIPC=1.E5; CFIPA=1.0E-3; RLOLIM=1.0E-6  
** grnd3 is an mdot option making the mass-transfer rate  
proportional to (cmdtc-mixf), where cmdtc stands for the  
saturation value of mixf, i.e. the largest value which can  
be attained as a result of mass transfer.  
GFS=0.232/(0.232+CINCL*16./12.)  
CMDOT=GRND3; CMDTA=1.E4; CMDTC=GFS  
CINT(MIXF)=0.; CINT(C2)=0.  
PHINT(MIXF)=1.0 ; PHINT(H1)=GRND7;PHINT(H2)=GRND7  
GROUP 11. Initialization of variable or porosity fields
```



```
FIINIT(GAS)=0.9999; FIINIT(FUE)=0.01; FIINIT(SHAD)=0.0001
FIINIT(MDOT)=0.01*FMCOAL*0.5*XULAST/PI
FIINIT(FUE)=1.E-5; FIINIT(GAS)=1.0-FIINIT(FUE)
FIINIT(SHAD)=FIINIT(FUE)
  HCCO2 = heat of combustion for C + O2 -> CO2
  HCCO = " " " " C + 0.5 O2 -> CO
  HHH2O = " " " " H2 + 0.5 O2 -> H2O
  H = CP*T + HCHX*YCHX + HCOCO2*YCO * HH2*YH2
HCCO2=32.792E6; HCCO=9.208E6; HHH2O=120.9E6
HCHX=CINCL*HCCO2 + HINCL*HHH2O
HCHX
HGIN1=CP1*(TGIN1-TEMP0);HGIN2=CP1*(TGIN2-TEMP0)
HSIN=CP2*TSIN + HCHX
FIINIT(H1)=HGIN1; FIINIT(H2)=HSIN
FIINIT(RHO1)=ROGIN1;FIINIT(TMP2)=TSIN
  -- initially none of the second phase has entered the first
FIINIT(MIXF)=0.; FIINIT(C2)=1.
  ** flow field initialisation
IF (.NOT.NOXCAL) THEN
INIADD=F; IURINI=-1

FIINIT(KE)=TKEIN1; FIINIT(EP)=EPIN1
PATCH(INIT1,INIVAL,1,1,6,7,1,6,1,1)
PATCH(INIT2,INIVAL,1,1,19,20,20,28,1,1)
INIT(INIT1,W1,ZERO,WGIN1); INIT(INIT2,W1,ZERO,WGIN2)
INIT(INIT1,U1,ZERO,OMEGA1); INIT(INIT2,U1,ZERO,OMEGA2)
INIT(INIT1,U2,ZERO,OMEGAF); INIT(INIT2,U2,ZERO,OMEGA3)
INIT(INIT1,V1,ZERO,VGIN1);INIT(INIT1,V2,ZERO,VSIN)
INIT(INIT2,V1,ZERO,VGIN2)

INIT(INIT1,KE,ZERO,TKEIN1); INIT(INIT2,KE,ZERO,TKEIN2)
INIT(INIT1,EP,ZERO,EPIN1); INIT(INIT2,EP,ZERO,EPIN2)
INIT(INIT1,H1,ZERO,HGIN1); INIT(INIT2,H1,ZERO,HGIN2)
INIT(INIT1,RHO1,ZERO,ROGIN1); INIT(INIT2,RHO1,ZERO,ROGIN2)
ENDIF
  ** block region behind furnace wall above quarl
CONPOR (BLOCK1,0.,CELL,1,1,#4,#4,#1,#1)
  ** INCLINACAO
CONPOR (BLOCK3,0.,CELL,1,1,11,22,7,8)
CONPOR (BLOCK4,0.,CELL,1,1,12,22,8,9)
CONPOR (BLOCK5,0.,CELL,1,1,13,22,9,10)
CONPOR (BLOCK6,0.,CELL,1,1,14,22,10,11)
CONPOR (BLOCK7,0.,CELL,1,1,15,22,11,12)
CONPOR (BLOCK8,0.,CELL,1,1,16,22,12,13)
CONPOR (BLOCK9,0.,CELL,1,1,17,22,13,14)
CONPOR (BLOCK10,0.,CELL,1,1,18,22,14,15)
```



```
CONPOR (BLOCK11,0.,CELL,1,1,19,22,15,16)
CONPOR (BLOCK12,0.,CELL,1,1,20,22,16,17)
CONPOR (BLOCK13,0.,CELL,1,1,21,22,17,18)
CONPOR (BLOCK14,0.,CELL,1,1,22,22,18,19)
```

** sas added friction to south wall of blockage.

```
WALL(WALL1,SOUTH,1,1,#4,#4,#1,#1,1,1)
```

```
WALL(WALL2,HIGH,1,1,#4,#4,#1,#1,1,1)
```

** restarts

** IF (.NOT.NOXCAL) THEN

-- for a restart main combustion run (NOT a NOX post-

-- processing run) activate the next statement.

```
RESTRT(ALL)
```

** ENDIF

** IF (NOXCAL) THEN

** + RESTRT(P1,U1,U2,GAS,FUE,SHAD,H1,H2,MIXF,C2,TMP1,TMP2)

** + RESTRT(RHO1,RMIX,YH2O,YH2,YN2,YCO2,YO2,YCO,CFIP,MDOT)

** + RESTRT(V1,V2,W1,W2)

** ENDIF

GROUP 13. Boundary conditions and special sources

```
XCycle=T
```

```
OUTCO1=1.E3
```

** NOX sources

IF (NOXCAL) THEN

```
+ PATCH(NOXSR,FREEVL,1,NX,1,NY,1,NZ,1,1)
```

```
+ COVAL(NOXSR,XNO,FIXFLU,GRND); COVAL(NOXSR,XN,GRND,GRND)
```

```
+ PATCH(NOXIN1,NORTH,1,1,6,7,1,6,1,1)
```

```
+ COVAL(NOXIN1,XNO,FGIN1,0.); COVAL(NOXIN1,XN,FGIN1,0.)
```

```
+ PATCH(NOXIN2,NORTH,1,1,19,20,20,28,1,1)
```

```
+ COVAL(NOXIN2,XNO,FGIN2,0.); COVAL(NOXIN2,XN,FGIN2,0.)
```

```
+ PATCH(OUTLET,HIGH,1,NX,1,NY,NZ,NZ,1,1)
```

```
+ COVAL(OUTLET,P1,OUTCO1,0.0)
```

ELSE

== sources for main calculation

```
IURVAL=-1
```

** primary air inlet

```
PATCH(INPRMA,NORTH,1,1,6,7,1,7,1,1)
```

```
COVAL(INPRMA,P1,FIXFLU,ROGIN1*25);
```

```
COVAL(INPRMA,W1,ONLYMS,WGIN1)
```

```
COVAL(INPRMA,U1,ONLYMS,OMEGA1);
```

```
COVAL(INPRMA,V1,ONLYMS,VGIN1)
```

```
COVAL(INPRMA,H1,ONLYMS,HGIN1);
```

```
COVAL(INPRMA,KE,ONLYMS,TKEIN1)
```



```
COVAL(INPRMA,EP,ONLYMS,EPIN1); COVAL(INPRMA,MIXF,ONLYMS,1.)
remember, mixf=c1 !!
** primary coal inlet
PATCH(INPRMC,NORTH,1,1,6,7,1,4,1,1)
COVAL(INPRMC,P2,FIXFLU,FCOAL); COVAL(INPRMC,W2,ONLYMS,WSIN)
COVAL(INPRMC,U2,ONLYMS,OMEGAF);
COVAL(INPRMC,V2,ONLYMS,VSIN)
COVAL(INPRMC,H2,ONLYMS,HSIN); COVAL(INPRMC,C2,ONLYMS,1.)
** secondary air inlet
PATCH(INSEC,NORTH,1,1,19,20,20,24,1,1)
COVAL(INSEC,P1,FIXFLU,ROGIN2*25);
COVAL(INSEC,W1,ONLYMS,WGIN2)
COVAL(INSEC,U1,ONLYMS,OMEGA2); COVAL(INSEC,V1,ONLYMS,VGIN2)
COVAL(INSEC,H1,ONLYMS,HGIN2); COVAL(INSEC,KE,ONLYMS,TKEIN2)
COVAL(INSEC,EP,ONLYMS,EPIN2); COVAL(INSEC,MIXF,ONLYMS,0.)
** Outlet at high end
OUTLET(OUTLET,HIGH,1,1,1,NY,NZ,NZ,1,1)
COVAL(OUTLET,P1,OUTCO1*0.1,0.0)
COVAL(OUTLET,P2,OUTCO1*RHO2,0.0); VALUE(OUTLET,C2,0.0)
** Radiative wall loss
IF(THRAD) THEN
+ PATCH(WALNR, NORTH, 1, NX,NREGY,NREGY,NREGZ,NREGZ, 1, 1)
+ COVAL(WALNR, RADY,EMISW/(2.0-EMISW),EMPW)
+ PATCH(WALLR, HIGH , 1, NX,NREGY,NREGY,NREGZ,NREGZ, 1, 1)
+ COVAL(WALLR, RADZ,EMISW/(2.0-EMISW),EMPW)
ENDIF
ENDIF
```

GROUP 15. Termination of sweeps

```
LSWEEP=8000
IF (NOXCAL) THEN
+ LSWEEP=120
ENDIF
```

GROUP 16. Termination of iterations

```
-- recover inlet mass flow rates in kg/s (not per unit area)
FGIN1=FGIN1*AREA1; FGIN2=FGIN2*AREA2
FGIN1=FGIN1*0.5*XULAST/PI; FGIN2=FGIN2*0.5*XULAST/PI
FMCOAL=FMCOAL*0.5*XULAST/PI
-- set residual normalising factors
```

GROUP 17. Under-relaxation devices

```
** relaxations on pressure and density
```



```
RELAX(RHO1,LINRLX,0.1); RELAX(MDOT,LINRLX,0.01)
RELAX(P1,LINRLX,0.0001)
RELAX(U1,FALS DT,0.0001)
RELAX(V1,FALS DT,0.0000001)
RELAX(W1,FALS DT,0.0001)
RELAX(U2,FALS DT,0.0000001)
RELAX(V2,FALS DT,0.0000001)

** relaxations on volume fractions
RELAX(SHAD,LINRLX,0.001); RELAX(FUE,LINRLX,0.001)
RELAX(GAS,LINRLX,0.001); RELAX(MIXF,LINRLX,0.001)
** relaxations on other variables
DTF=ZLEN/WGIN3
SARAH=0.0
RELAX(H1,FALS DT,.01*DTF); RELAX(H2,FALS DT,.01*DTF)
RELAX(KE,LINRLX,0.001); RELAX(EP,LINRLX,0.001)
IF(THRAD) THEN
+ RELAX(H1,FALS DT,.1*DTF); RELAX(H2,FALS DT,.1*DTF)
+ RELAX(RADY,FALS DT,.1*DTF); RELAX(RADZ,FALS DT,.1*DTF)
ENDIF
```

GROUP 18. Limits on variables or increments to them

```
VARMAX(MIXF)=CMDTC; VARMIN(MIXF)=0.
VARMAX(C2)=1.; VARMIN(C2)=0.; VARMIN(FUE)=1.E-12
VARMIN(SHAD)=1.E-12; VARMIN(RHO1)=PRESS0/(287.*5000.)
** additional settings for NOX calculation
IF (NOXCAL) THEN
RELAX(XNO,FALS DT,DTF); RELAX(XN,FALS DT,DTF)
VARMIN(XNO)=0.; VARMAX(XNO)=1.
VARMIN(XN)=0.; VARMAX(XN)=1.
VARMIN(U2)=-500; VARMAX(U2)=500
-- low reference for NOX variables to suppress early cutoff
RESREF(XNO)=1.E-22*FGINT*0.5*XULAST/PI
RESREF(XN)=RESREF(XNO)
ENDIF
```

GROUP 19. Data communicated by satellite to GROUND

```
LSG62=noxc al
```

GROUP 21. Print-out of variables

```
OUTPUT(C2,N,N,N,N,N,N)
IF(NOXCAL) THEN
+ OUTPUT(C4,N,N,N,N,N,N); OUTPUT(C6,N,N,N,N,N,N)
```



```
+ OUTPUT(H1,N,N,N,N,N,N); OUTPUT(H2,N,N,N,N,N,N)
+ OUTPUT(U2,N,N,N,N,N,N); OUTPUT(SHAD,N,N,N,N,N,N)
+ OUTPUT(FUE,N,N,N,N,N,N); OUTPUT(TMP2,N,N,N,N,N,N)
+ OUTPUT(CFIP,N,N,N,N,N,N)
ENDIF
OUTPUT(TMP1,Y,Y,Y,Y,Y,Y); OUTPUT(TMP2,Y,Y,Y,Y,Y,Y)
```

GROUP 22. Spot-value print-out

```
** sas changed monitoring point
IZMON=NZ*3/4; IYMON=NY/2
GROUP 23. Field print-out and plot control
*NPLT=10; ORSIZ=0.4
TSTSWP=-1
```

GROUP 24. Dumps for restarts

```
** FIINIT(W1)=WGIN1
** FIINIT(W2)=WSIN
FIINIT(V1)=VGIN1
FIINIT(V2)=VSIN
** FIINIT(U1)=UGIN1
FIINIT(U2)=UGIN2
```

```
DISTIL=f
IF(NOXCAL) THEN
+ EX(P1 )=5.752E+01; EX(U1 )=2.407E+00; EX(V1 )=1.866E+00
+ EX(V2 )=1.714E+00; EX(W1 )=3.503E+01; EX(W2 )=2.955E+01
+ EX(GAS )=9.500E-01; EX(MIXF)=2.047E-02; EX(NPOR)=9.913E-01
+ EX(VPOR)=9.500E-01; EX(DEGF)=1.429E+03; EX(EQUI)=2.711E-01
+ EX(NOSR)=3.453E+00; EX(CRKT)=1.036E+03
+ EX(XO2 )=1.558E-01; EX(RHO1)=3.856E-01
+ EX(TMP1)=1.042E+03; EX(YN2 )=7.139E-01; EX(TMP2)=6.337E+02
+ EX(YCO2)=7.130E-02; EX(YO2 )=1.556E-01
ELSE
+ EX(P1 )=5.752E+01; EX(U1 )=2.407E+00; EX(U2 )=2.496E+00
+ EX(V1 )=1.866E+00; EX(V2 )=1.714E+00; EX(W1 )=3.503E+01
+ EX(W2 )=2.955E+01; EX(GAS )=9.500E-01; EX(KE )=1.085E+01
+ EX(EP )=2.311E+02; EX(H1 )=1.147E+06; EX(H2 )=3.604E+07
+ EX(MIXF)=2.047E-02; EX(NPOR)=9.913E-01; EX(VPOR)=9.500E-01
+ EX(ENUT)=5.748E-02; EX(RHO1)=3.856E-01; EX(TMP2)=6.354E+02
+ EX(TMP1)=1.042E+03; EX(YN2 )=7.139E-01; EX(YCO2)=7.130E-02
+ EX(YO2 )=1.556E-01; EX(RADY)=1.106E+05; EX(RADZ)=2.517E+05
ENDIF
LIBREF= 110
STOP
```

Cálculo: Estequiometria

Projeto: Queimador_Ciclônico.cge

Data : 09/12/00

Entradas

Banco de Dados: sólido Substância: Coque de petróleo

Composição do Combustível (base mássica úmida)

%C : 86,30
%H : 3,77
%O : 1,72
%N : 1,51
%S : 5,38
% Cinzas (BU) : 0,32
% Umidade (BU) : 1,00

PCS (kcal/kg) : 8472,0
PCI (kcal/kg) : 8269,6

Pressão : 1,033 kgf/cm²

Temperaturas do Oxidante

Ambiente : 25,00 °C

Temperatura do Combustível: 25,00 °C

Trocas Térmicas : 0,0 %

Umidade Absoluta do Ar Atmosférico : 0,010 massa vap./massa ar seco

Oxidante : Ar Atmosférico

Coeficiente de Oxidante: 1,10

Cálculo: Estequiometria

Projeto: Queimador_Ciclônico.cge

Data : 09/12/00

Resultados**Vazões**

Dados na temperatura de medição/saída (25,00°C)

Volume de oxidante:	9,86	Nm3/kg de comb
Massa de oxidante:	12,62	kg/kg de comb
Volume de produtos:	10,10	Nm3/kg de comb
Volume de produtos:	11,03	m3/kg de comb
Massa total produtos:	13,62	kg/kg de comb
Massa de gases:	13,61	kg/kg de comb

Análise dos Produtos (molar)	gases secos	gases úmidos
%CO2	16,92	15,94
%H2O	-	5,81
%O2	1,94	1,83
%N2	80,75	76,06
%SO2	0,40	0,37

Temperaturas

Temperatura adiabática de chama

com dissociação: 1995,6 °C

sem dissociação: 2061,7 °C

Temperatura dos produtos

com dissociação: 1995,6 °C

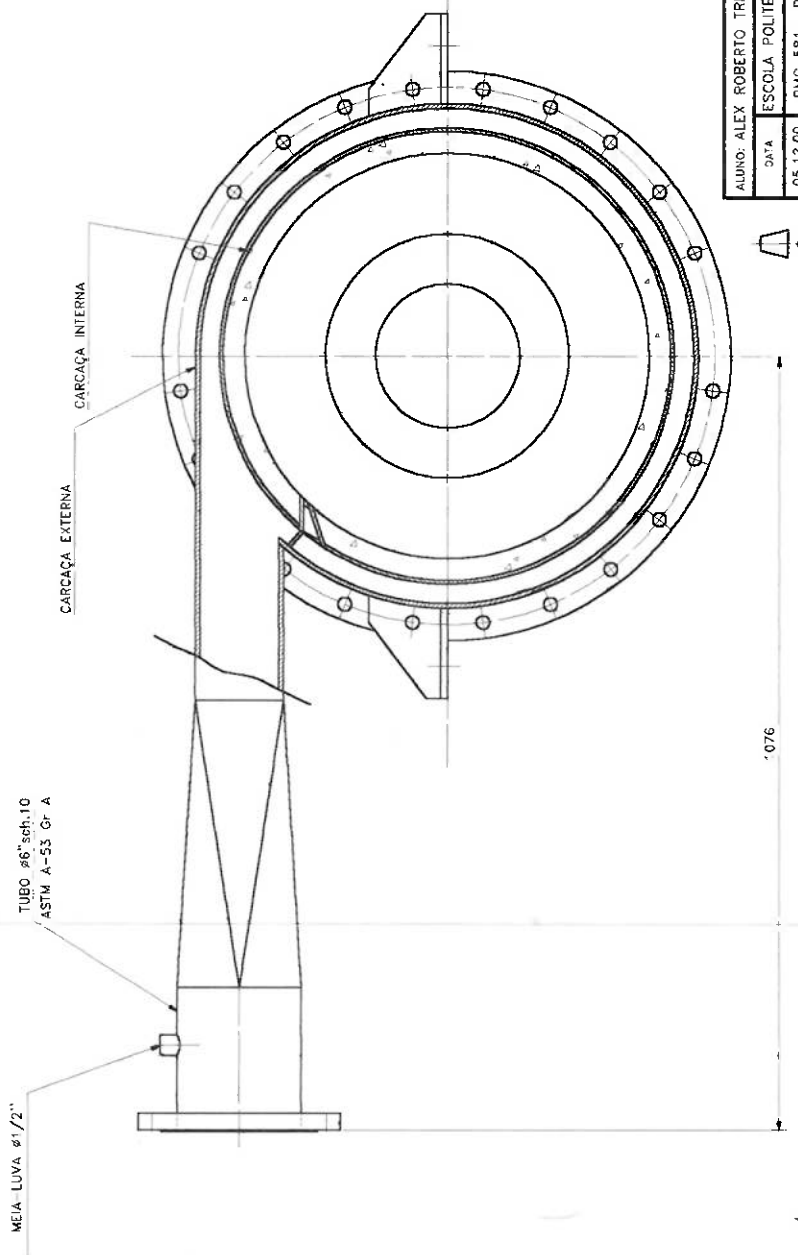
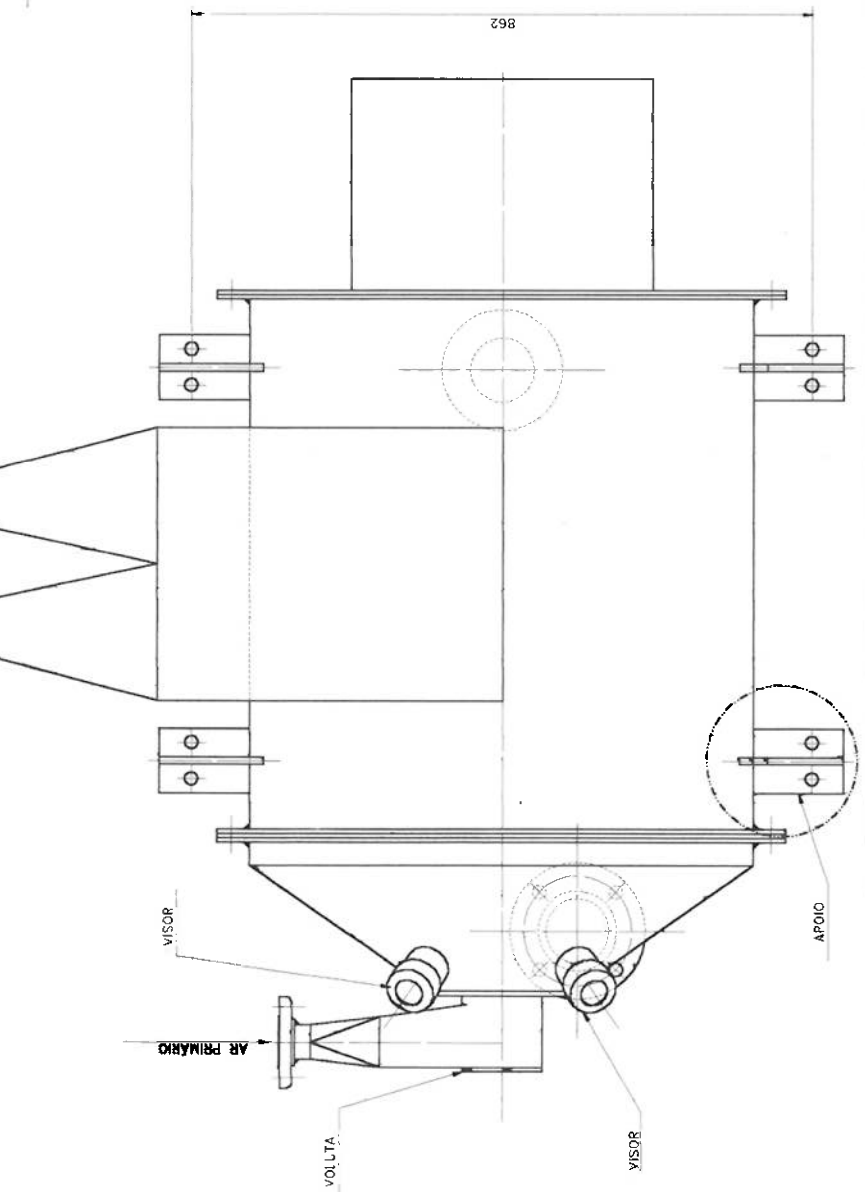
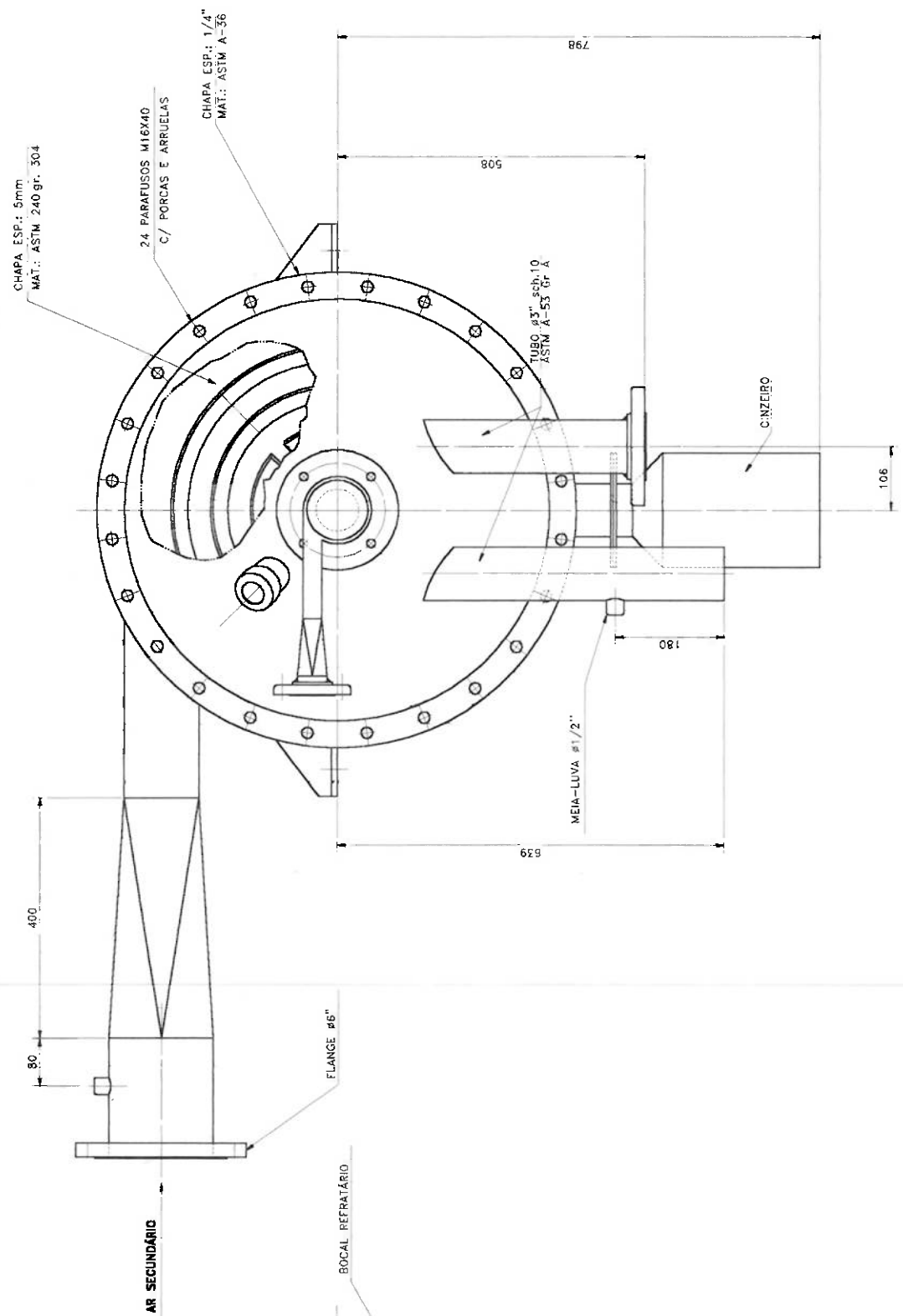
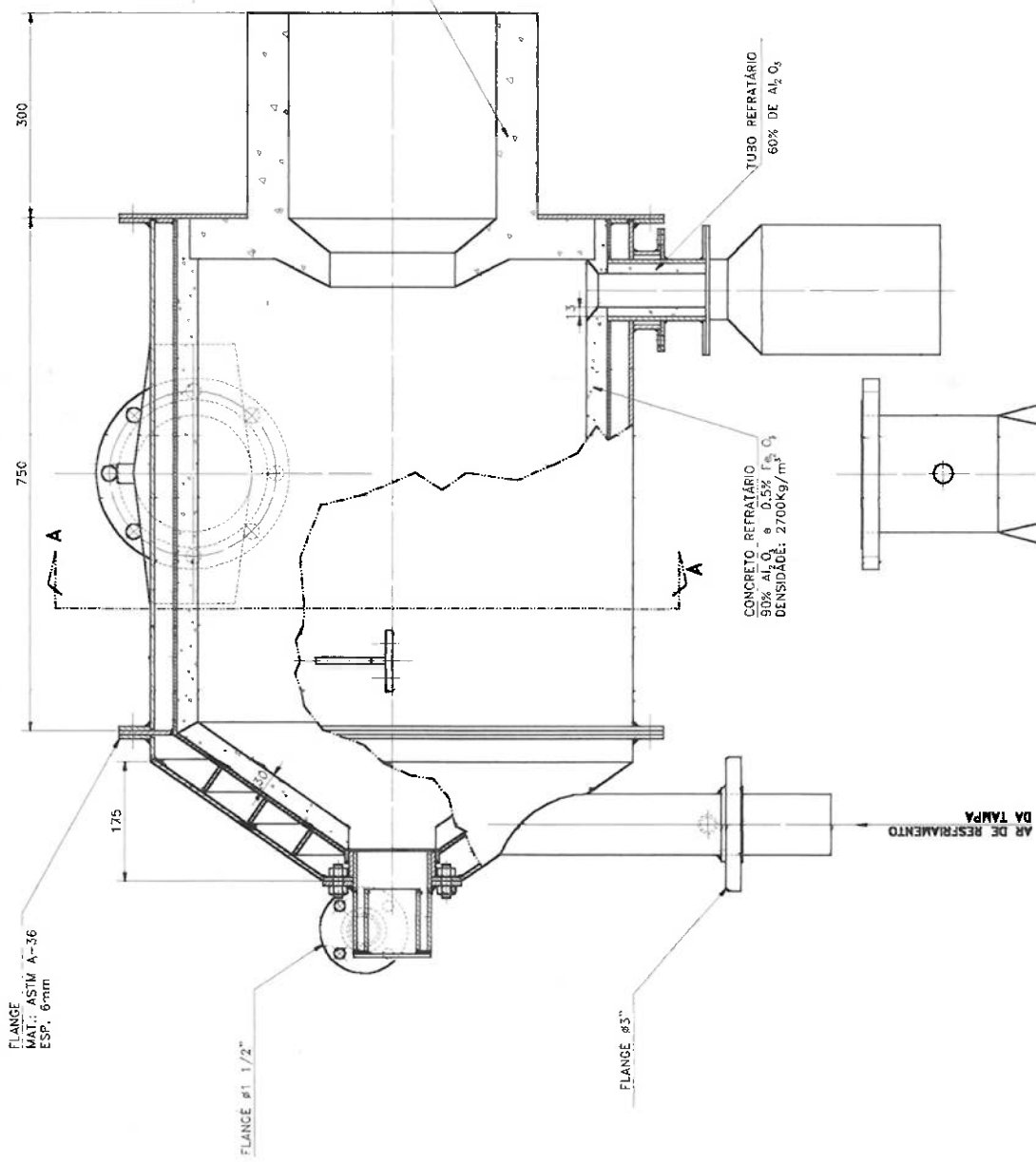
sem dissociação: 2061,7 °C

Temperatura de orvalho: 35,8 °C

Equação da Reação

$$0,632 \text{ C} + 0,329 \text{ H} + 0,009 \text{ O} + 0,009 \text{ N} + 0,015 \text{ S} + 0,005 \text{ H}_2\text{O} + 0,797 (\text{O}_2 + 3,780 \text{ N}_2 + 0,077 \text{ H}_2\text{O}) =$$

$$0,632 \text{ CO}_2 + 0,230 \text{ H}_2\text{O} + 3,018 \text{ N}_2 + 0,015 \text{ SO}_2 + 0,072 \text{ O}_2$$



CORTE "A-A"

ALUNO: ALEX ROBERTO TRIGUEIRO DE SOUSA	NTUSP: 2235131
DATA: 05.12.00	ESCOLA: POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCALA: -	PROJETO MECÂNICO II
FECHA: -	FORMA: A3
DESIGNO: -	CONJUNTO