

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**ESTUDOS SOBRE O DESENVOLVIMENTO
DE PROJETO DE CHAMINÉ**

HENRIQUE NEGRI BOTTI

**VITÓRIA – ES
SETEMBRO/2004**

HENRIQUE NEGRI BOTTI

**ESTUDOS SOBRE O DESENVOLVIMENTO
DE PROJETO DE CHAMINÉ**

Projeto de graduação do aluno Henrique Negri Botti, apresentado ao departamento de engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

**VITÓRIA – ES
SETEMBRO/2004**

HENRIQUE NEGRI BOTTI

**ESTUDOS SOBRE O DESENVOLVIMENTO
DE PROJETO DE CHAMINÉ**

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. DsC Rogério Ramos
Orientador

Prof. MsC Rogério Silveira de Queiroz
Examinador

Prof. DsC João Luiz Marcon Donatelli
Examinador

Vitória - ES, 27 de Setembro de 2004

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de Chaminé Industrial Metálica	03
Figura 2 - Exemplo de Chaminé Industrial de Alvenaria.....	03
Figura 3 - Queimador de Combustíveis Líquidos.....	07
Figura 4 - Queimador de Combustíveis Gasosos	08
Figura 5 - Queimador de Combustíveis Sólidos	09
Figura 6 - Ventiladores:Radial e Axial.....	13
Figura 7 -Ventiladores Instalados em Chaminés	13
Figura 8 - Dispositivos de Controle de Tiragem.....	15
Figura 9 - Tipos Construtivos de Chaminé.....	17
Figura 10 - Modelo de Transferência de Calor	22
Figura 11 - Circuito Térmico Equivalente.....	24
Figura 12 - Escoamento Externo	30
Figura 13 - Perfil de Escoamento Totalmente Turbulento	31
Figura 14 - Perfil da Velocidade do Vento	35
Figura 15 -Gráfico do Perfil do Terreno	35
Figura 16 - Indicação de Alturas Próximas de uma Chaminé.....	36
Figura 17 -Coeficiente de Arrasto para a Chaminé	37
Figura 18 - Momento Aplicado na Chaminé pela Ação do Vento	38
Figura 19 - Gráfico Altura versus Diâmetro simulação 01	43
Figura 20 - Gráfico Altura versus Temperatura simulação 01	44
Figura 21 - Gráfico Altura versus Diâmetro simulação 02	46
Figura 22 - Gráfico Altura versus Temperatura simulação 02	46
Figura 23 - Gráfico Altura versus Diâmetro simulação 03	48
Figura 24 - Gráfico Altura versus Temperatura simulação 03	49
Figura 25 - Gráfico Altura versus Diâmetro simulação 04	51
Figura 26 - Gráfico Altura versus Temperatura simulação 04	51
Figura 27 - Gráfico Altura versus Diâmetro simulação 05	53

Figura 28 - Gráfico Altura versus Temperatura simulação 05	54
Figura 29 - Gráfico Altura versus Diâmetro simulação 06	56
Figura 30 - Gráfico Altura versus Temperatura simulação 06	56
Figura 31 - Tela Principal	62
Figura 32 - Tela de Resposta do Programa.....	64

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Valores de K (Equação de Perda de Carga)	11
Tabela 2 - Entalpia de Formação dos Combustíveis	19
Tabela 3 - Entalpia de Formação dos Produtos	20
Tabela 4 - Entalpia dos Produtos para Diversas Temperaturas	21
Tabela 5 - Propriedades Termofísicas do Ar	27
Tabela 6 - Temperatura e Pressão de Saturação da Água	29
Tabela 7 - Características dos Materiais.....	34
Tabela 8 - Condições do Terreno	36
Tabela 9 - Valores de Cd	39
Tabela 10 - Resultados da simulação 01.....	43
Tabela 11 - Resultados da simulação 02.....	45
Tabela 12 - Resultados da simulação 03.....	48
Tabela 13 - Resultados da simulação 04.....	50
Tabela 14 - Resultados da simulação 05.....	53
Tabela 15 - Resultados da simulação 06.....	55
Tabela 16 - Resultados da simulação alternativa 01	57
Tabela 17 - Resultados da simulação alternativa 02	57
Tabela 18 - Resultados da simulação alternativa 03	57
Tabela 19 - Resultados da simulação alternativa 04	57
Tabela 20 - Resultados da simulação alternativa 05	58
Tabela 21 - Resultados da simulação alternativa 06	58

Sumário

1) INTRODUÇÃO	3
2) CONSIDERAÇÕES TERMODINÂMICAS.....	4
2.1) PERDAS DE RENDIMENTO EM CÂMARAS DE COMBUSTÃO.....	4
2.1.1) DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DA CÂMARA DE COMBUSTÃO.....	5
2.1.1.1) A CÂMARA DE COMBUSTÃO	5
2.1.1.2) QUEIMADORES	6
2.1.1.2.1) QUEIMADORES DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS.....	7
2.1.1.2.2) QUEIMADORES DE GASES COMBUSTÍVEIS	8
2.1.1.2.3) QUEIMADORES DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS PULVERIZADOS	9
2.1.1.3) COMBUSTÃO	9
2.2) GASES	10
2.3) TIRAGEM	10
2.3.1) PERDAS DE CARGA NA CHAMINÉ.....	10
2.3.2) TIRAGEM NATURAL	11
2.3.3) TIRAGEM MECÂNICA	12
2.3.3.1) VENTILADORES.....	12
2.3.4) CONTROLE DA TIRAGEM	14
2.3.4.1) DISPOSITIVOS PARA O CONTROLE DA TIRAGEM	15
2.4) CONSTRUÇÃO DE CHAMINÉS	16
2.5) CONSIDERAÇÕES DO MODELO COMPUTACIONAL.....	17
3) MÉTODO FÍSICO-QUÍMICO	18
3.1) COMBUSTÃO	18
3.1.1) COMBUSTÍVEL	18
3.1.2) ANÁLISE DO PROCESSO DE COMBUSTÃO.....	19
3.1.2.1) PRODUTOS	20
3.1.3) PROCESSO ITERATIVO	22
4) TRANSFERÊNCIA DE CALOR	22
4.1) TRANSFERÊNCIA POR CONVECÇÃO NO LADO INTERNO	24
4.1.1) FATOR DE ATRITO.....	25

4.2) TRANSFERÊNCIA POR CONVECÇÃO NO LADO EXTERNO.....	26
4.3) DETERMINAÇÃO DA ALTURA DA CHAMINÉ	28
5) ESCOAMENTO.....	29
5.1) ESCOAMENTO EXTERNO	30
5.2) ESCOAMENTO INTERNO.....	30
6) DIMENSIONAMENTO DA ESPESSURA DA CHAMINÉ.....	31
6.1) MÉTODO DA TENSÃO ADMISSÍVEL.....	32
6.1.1) CÁLCULO DO MOMENTO	34
7) ANÁLISE AMBIENTAL.....	39
7.1) A DISPERSÃO DA FUMAÇA DA CHAMINÉ E A CONTAMINAÇÃO ATMOSFÉRICA	39
8) MÉTODO ALTERNATIVO	40
9) RESULTADOS.....	42
9.1)SIMULAÇÃO 01	42
9.2) SIMULAÇÃO 02	44
9.3) SIMULAÇÃO 03	46
9.4) SIMULAÇÃO 04	49
9.5) SIMULAÇÃO 05	52
9.6) SIMULAÇÃO 06	54
10) CONCLUSÕES	57
11) SUGESTÕES	59
REFERÊNCIAS	61
APÊNDICE A – PROGRAMA COMPUTACIONAL	62

1) Introdução

O processo de tiragem de gases de combustão é pouco explorado pela literatura devido, entre outras razões, às especificidades de cada aplicação.

A tiragem é o processo de extração dos gases formados pela combustão em uma câmara. Os gases são captados na saída da câmara por uma chaminé e são despejados a uma certa altura na atmosfera.

Para se projetar uma chaminé deve-se considerar todo o processo, desde o tipo de combustível até a geografia da área periférica à chaminé.

Neste contexto será feito um estudo da influência das variáveis do processo na altura da chaminé, utilizando o critério do ponto de orvalho dos gases, ou seja, o vapor d'água não poderá condensar dentro do duto da chaminé.



Figura 1 - Exemplo de chaminé Industrial Metálica

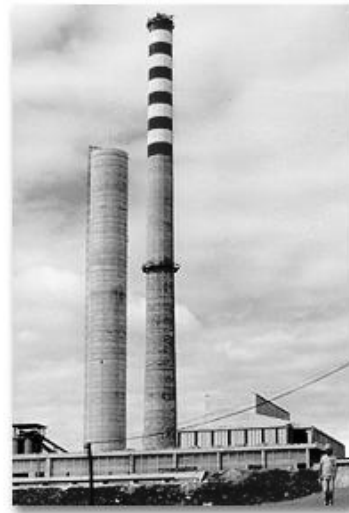


Figura 2 – Exemplo de chaminé Industrial de Alvenaria

2) Considerações Termodinâmicas

2.1) Perdas de Rendimento em Câmaras de combustão [5]

Nas aplicações tecnológicas qualquer transformação energética conduz a perdas de disponibilidade da fonte primária.

Mesmo projetos aperfeiçoados registram uma perda inevitável; outras, entretanto, se adicionam a esta como resultantes de deficiência de projeto, de operação mal conduzida ou de manutenção inadequada.

Por outro lado, o aproveitamento do calor dos combustíveis já atingiu níveis difíceis de serem ultrapassados com o atual conceito de instalações de câmara de combustão.

Basicamente, o aumento da eficiência está relacionado à queda da temperatura da saída dos gases. Temperaturas baixas se aproximam do ponto de orvalho, extremamente crítico pela possibilidade de formação de produtos altamente corrosivos. Os aços aplicados na construção da chaminé apresentariam curta duração.

A diminuição do teor de água dos combustíveis com o aproveitamento do calor sensível dos gases de combustão que se desprendem da chaminé representam uma possibilidade atrativa para o aumento da eficiência do sistema.

A fuligem é produto indesejável pela sua própria natureza. Proporciona, mais do que qualquer outro resíduo, uma poluição ambiental dificilmente aceita pela sociedade e, portanto, deve ser eliminada através dos múltiplos recursos de que dispõe a tecnologia.

A primeira providência a ser adotada para atenuar seu efeito é evitar ao máximo a sua formação.

A quantidade de fuligem é dependente do tipo do combustível, da sua umidade, da sua granulometria (combustíveis sólidos), do tipo de suporte de combustível na câmara de combustão, da temperatura do ar e da combustão, da pressão interna na câmara de combustão, da forma como se procede a mistura ar-combustível e o excesso de ar aplicado na queima.

Há processos que coletam estas fuligens e as retornam à câmara para promover a queima de eventuais restos carbonosos, sendo esta prática, segundo Hildo Pêra [5], contestada por alguns autores.

2.1.1) Determinação do rendimento da câmara de combustão [5]

Há dois métodos para a determinação do rendimento de uma câmara de combustão: o primeiro, chamado método direto, através do qual se obtém o rendimento se forem conhecidas duas quantidades: a descarga de gases e o consumo de combustível na mesma unidade de tempo, porquanto as entalpias se obtêm direto das tabelas em função da pressão e temperatura.

O segundo método é o método indireto no qual se avalia o rendimento pelo conhecimento das perdas.

As perdas acontecem principalmente pelas paredes da câmara que devem possuir baixa condutividade térmica, para que o calor produzido na queima seja melhor aproveitado e não desperdiçado para o ambiente em sua volta.

2.1.1.1) A câmara de Combustão [5]

Compreende o aparelho de combustão, um conjunto de componentes que oferecem as condições necessárias para a queima de combustível. A câmara de combustão é representada por um volume adequadamente dimensionado onde se desenvolve a chama e se completa a combustão. Uma parte não dispensa a outra, pelo contrário, se complementam de forma muito importante devido aos complexos fenômenos surgidos durante a queima dos mais diferentes combustíveis.

São requisitos básicos para se alcançar uma boa combustão:

- Adotar método adequado na alimentação do combustível
- Possibilitar satisfatório ingresso e distribuição do ar de combustão
- Assegurar a estabilidade da queima e a continuidade operacional de forma a cobrir toda a faixa de geração de calor
- Propiciar o controle da forma geométrica da chama
- Permitir satisfatória remoção dos gases
- Assegurar a queima completa do combustível mediante correto volume da câmara de combustão
- Manter a tiragem de forma a possibilitar o escoamento contínuo dos produtos resultantes da combustão

Uma boa combustão se processa sempre com excesso de ar. Em função disto, a atmosfera de uma fornalha é necessariamente oxidante. Nada, porém, impede a existência de determinadas fases da transformação de queima, com regiões fracamente redutoras.

2.1.1.2) Queimadores [5]

Os combustíveis líquidos nas condições e temperaturas ambientes não queimam. Se aquecidos, desprendem vapores na sua superfície que escorvados por pequena chama, provocam um lampejo de rápida extinção. Dificilmente esta chama permanece estável, salvo quando o calor por ela gerado for suficiente para manter a contínua evaporação do combustível. Mesmo assim, a queima fica limitada à fase líquida.

Faltam-lhe as condições essenciais para assegurar o processo de combustão. O mesmo acontece com os combustíveis sólidos pulverizados que, embora divididos em partículas micrométricas, não sustentam a combustão quando agregados.

Os combustíveis gasosos já se encontram na fase de estado da matéria, que lhe propiciam mais facilidades para o processo da queima.

Entretanto, qualquer um destes combustíveis só sustenta queima satisfatória se for apoiado por condições que lhe proporcionem a continuidade do processo; entretanto, aparelhos denominados queimadores foram desenvolvidos com esta finalidade.

Graças à atuação destes aparelhos os combustíveis líquidos são subdivididos em minúsculas partículas, que, aquecidas pelo calor da própria chama e a turbulência provocada pelo ingresso de ar necessário, mantém a combustão. Os diâmetros das partículas variam de acordo com o princípio de pulverização adotado pelo aparelho, podendo situar-se entre um milímetro e duzentos microns.

Um queimador de boa performance pulveriza pelo menos 5% do óleo em partículas da ordem de 50 microns.

Os queimadores de combustíveis sólidos pulverizados, injetam-no simultaneamente com o ar em pressão, responsável por uma formação de dispersão no interior da câmara de combustão capaz de manter o processo de queima.

De conformidade com o tipo de combustível, estes aparelhos se dividem em:

- Queimadores de combustíveis líquidos;
- Queimadores de gases combustíveis;
- Queimadores de combustíveis sólidos pulverizados.

2.1.1.2.1) Queimadores de combustíveis líquidos [5]

Os combustíveis líquidos são queimados nas câmaras de combustão sempre em suspensão, sob duas diferentes técnicas: mediante a projeção da fase líquida no interior da câmara na forma pulverizada de minúsculas gotículas, e pela injeção direta de combustíveis previamente vaporizados.

O primeiro processo é utilizado na queima de combustíveis líquidos de alta viscosidade, enquanto que o segundo é preferencialmente adaptado à combustão de combustíveis leves, cuja aplicação é limitada à instalações de pequeno porte.

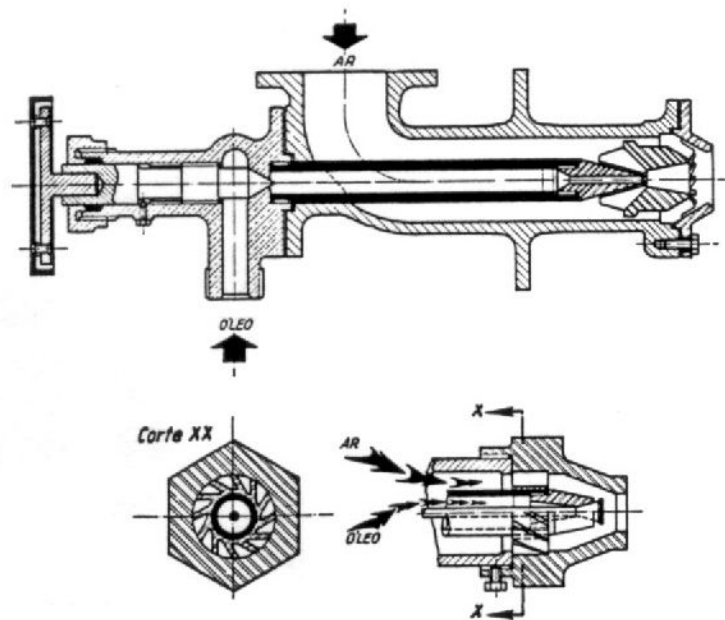


Figura 3 – Queimador de Combustíveis líquidos

2.1.1.2.2) Queimadores de gases combustíveis [5]

Graças ao estado gasoso, o gás é o combustível mais fácil de ser queimado. A mistura com o comburente se processa de forma muito mais fácil do que com qualquer outro combustível.

Uma característica muito importante dos combustíveis gasosos é a velocidade de ignição, consideravelmente aumentada mediante suprimento do comburente pré-aquecido.

A combustão se verifica numa fase única sem problemas ligados à atomização ou pulverização.

Tendo por base o procedimento aplicado na mistura dos dois fluidos, os queimadores de gás são divididos em duas classes:

- Queimadores de mistura completa;
- Queimadores de difusão.

Os primeiros promovem a mistura do ar com o gás antes de injetá-los na câmara de combustão. Alguns tipos desta classe utilizam o ar total necessário à combustão para formar a mistura dos fluidos. Outros recorrem apenas a uma parte do ar, sendo conhecidos como queimadores de pré mistura parcial.

Os queimadores de difusão têm por princípio injetar ambos os fluidos, separadamente, proporcionando a mistura de ambos já no interior da câmara de combustão. O ar é introduzido separadamente com velocidade adequada para produzir a mistura.

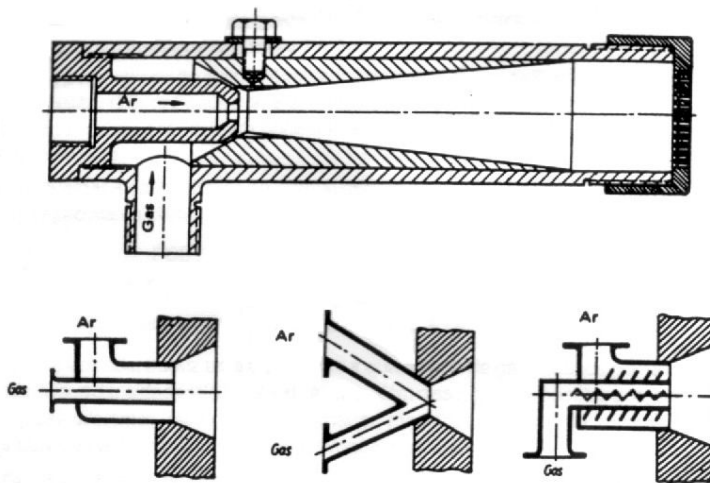


Figura 4 – Queimador de combustíveis Gasosos

2.1.1.2.3) Queimadores de combustíveis sólidos pulverizados [5]

A aplicação dos combustíveis sólidos pulverizados apresenta como exemplo mais importante o carvão mineral, mas, há outras matérias orgânicas pulverizadas e resíduos de processos industriais que se prestam perfeitamente à queima com os mesmos processos utilizados para o carvão mineral.

A técnica de combustíveis sólidos em suspensão tem evoluído de forma a permitir a queima de partículas não necessariamente pulverizadas, mas tão somente reduzidas a tamanhos de alguns milímetros.

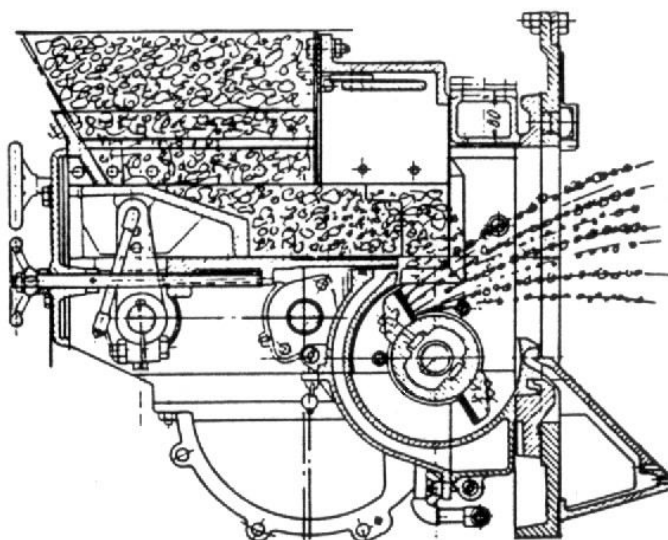


Figura 5 – Queimador de combustíveis sólidos

2.1.1.3) Combustão

As reações de combustão na prática sempre se realizam com excesso de ar. Tecnicamente é impossível assegurar uma combustão completa apenas com suprimento de ar teoricamente necessário. O sistema de injeção de ar e o próprio aparelho de combustão intervêm, no processo de queima, de maneira a estabelecer o excesso de ar necessário. [5]

Quando a admissão de ar for inferior ao teórico, não se verificam as reações de todos os reagentes e a combustão diz-se incompleta.

Embora se tenha enfatizado a necessidade de um excesso de ar para assegurar a combustão completa, por outro lado convém ter presente que valores

acima do tecnicamente admissível pode causar resultados inferiores ao desejável para o processo. Ar em demasia além de acrescentar desnecessariamente o volume de oxigênio que não participa das reações, aumenta proporcionalmente o volume de nitrogênio.[5]

Ambos os gases, inúteis ao processo, só apresentam como resultado o transporte de calor originado no meio para fora do sistema, representando uma queda no rendimento da instalação.

2.2)Gases

Sem domínio das propriedades físicas e termodinâmicas dos fluidos gasosos que intervêm nos processos de combustão e de intercâmbio de calor ao longo do trajeto de uma chaminé, torna-se impossível elaborar o projeto. Dentre as características físicas e termodinâmicas enumeram-se as principais, a saber: densidade, calor específico, entalpia, viscosidade e coeficiente de condutividade térmica. [5]

2.3)Tiragem

2.3.1)Perdas de carga na chaminé

As perdas de carga existentes ao longo do percurso dos fluidos gasosos são de duas origens. A primeira procede do atrito provocado pelo escoamento dos gases contra as paredes metálicas, que são chamadas de perdas distribuídas. A segunda, qualificada como perdas localizadas, resultam das mudanças de direção, restrições ou aumentos abruptos de seções de passagens, que não se encontram neste projeto.

As perdas distribuídas são influenciadas pela velocidade, características físicas do fluido como ainda pelo estado de acabamento das paredes e das dimensões do tubo da chaminé.

Para o cálculo da perda de carga ligada às características geométricas dos caminhos de circulação dos gases, a perda é determinada com o auxílio das conhecidas fórmulas da dinâmica dos fluidos.

$$\Delta p = \frac{k * I * P * v^2 * \gamma_{gas}}{S * 2 * g} \text{ em [mm C.A.]} \quad (1) [5]$$

Onde:

I = comprimento do duto em metros

P = Perímetro do canal em metros

v = velocidade do fluido em m/s

γ_{gas} = peso específico dos gases de combustão em kg/m³

k = fator de acabamento da parede do duto

S = Seção da chaminé

g = Aceleração da gravidade local

Sendo os valores de k mostrados na tabela1[5].

Tabela 1 – Valores de K

K	Condição
0,007	Paredes metálicas
0,014	Paredes de alvenaria
0,007 a 0,014	Paredes de concreto, em função do acabamento

O conhecimento da perda de carga do duto da chaminé é importante, pois determina a capacidade que os gases deverão ter para vencerem esta resistência em seu escoamento.

2.3.2) Tiragem Natural [5]

A própria chaminé propicia o escoamento dos gases de combustão graças à diferença de pressão (referente à diferença de peso das colunas de ar e de gases) e, também, à diferença de temperatura existente entre a base e o topo.

A diferença de temperatura altera o volume dos gases de combustão e contribui para estabelecer uma diferença de pressão entre seus extremos capaz de assegurar o escoamento dos gases.

2.3.3) Tiragem Mecânica [5]

A tiragem mecânica tem a função de vencer as perdas de carga do sistema, com a aplicação de sopradores e exaustores.

Embora se utilizem meios mecânicos, a chaminé continua a fazer parte da instalação, porém, não mais como componente de tiragem mas somente como caminho condutor dos gases para a atmosfera.

Com esta função, a altitude da chaminé fica definida em função da altura dos estabelecimentos e prédios vizinhos às instalações da câmara de combustão.

2.3.3.1) Ventiladores [5]

São aparelhos mecânicos rotativos que tem por função transferir fluidos compressíveis através de dutos, imprimindo-lhes uma velocidade e uma pressão compatíveis com as resistências oferecidas ao escoamento.

No fluido em movimento, se distingue a pressão estática, representada pela pressão que o fluido exerce sobre as paredes internas dos dutos e a pressão dinâmica devido à velocidade do próprio fluido.

A pressão estática representa a energia potencial do fluido e a dinâmica a energia cinética. A pressão total resulta da soma das duas citadas. Em dutos de sucção a pressão estática é negativa, porém a dinâmica continua positiva.

Os ventiladores, sejam sopradores ou exaustores, devem vencer esta pressão total e escoar o volume adequado de fluidos.

Para efeito de definição destas máquinas é conveniente estabelecer como volume o valor das quantidades calculadas no projeto acrescidas de cerca de 25%, a fim de proporcionar segurança de operação.

O aumento da capacidade visa compensar eventuais depósitos fuliginosos que reduzem seções de escoamento ou se prendem nas pás dos rotores.

Do ponto de vista construtivo, os ventiladores se apresentam com dois tipos básicos: o centrífugo e o axial.

No ventilador centrífugo, o fluido é succionado axialmente, porém, prossegue impulsionado por pás radiais rotativas contra o envoltório externo de onde sai tangencialmente. Na máquina axial, o fluido segue trajeto paralelo ao eixo de giro do rotor.

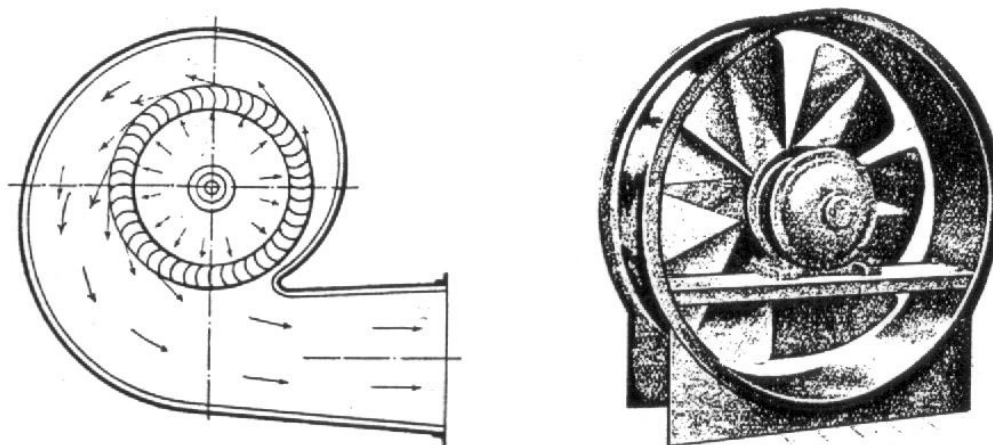


Figura 6 – Ventiladores (E) Radial e (D) Axial

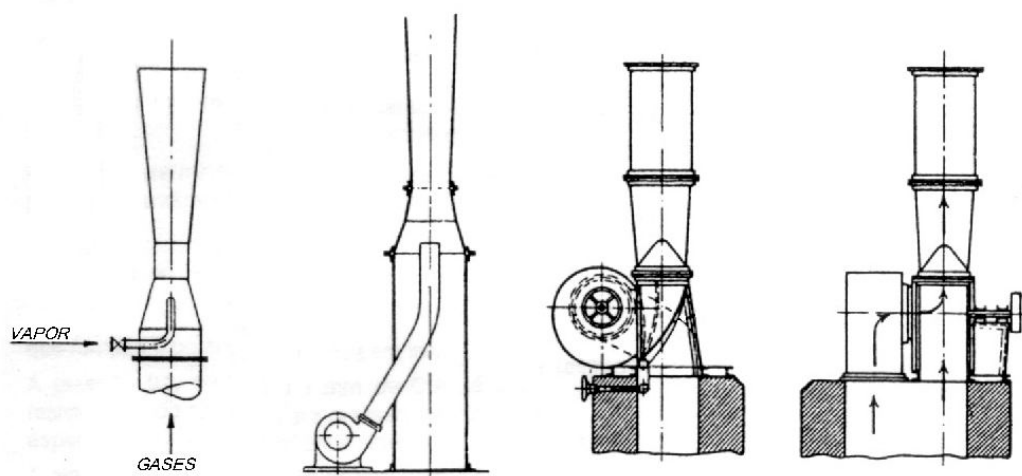


Figura 7 – Ventiladores instalados em chaminés

2.3.4) Controle da tiragem [5]

Pouca atenção é dirigida ao controle da tiragem por desconhecimento da sua importante função. A ausência deste controle, contudo, tem reflexos expressivos nos resultados da eficiência da câmara de combustão. A falta de qualquer controle deste parâmetro provoca insuficiente ou excessiva tiragem.

A tiragem insuficiente é mais facilmente percebida pelo operador da câmara de combustão porque a fornalha fica abafada. A pressão interna da câmara se torna positiva e termina por provocar a formação de misturas dos reagentes favoráveis a detonações que se projetam pela própria boca de alimentação de combustível (se existir). É comum ocorrer o retrocesso de chama com sérios riscos para o operador e para o equipamento.

A tendência é que a operação da fornalha tenha sempre uma tiragem excessiva, porém, tal procedimento traz algumas conseqüências como:

- Aumento das perdas da chaminé, devido ao ingresso excessivo dos gases da combustão.
- Diminuição da temperatura de combustão com conseqüente redução da eficiência de queima.
- Aumento do consumo de energia elétrica do motor do exaustor (tiragem mecânica). O exaustor sobrecarregado pelo maior volume de gases com temperaturas inferiores passa a consumir mais potência.
- Aumento apreciável de elutriação¹ de particulados representando combustível arrastado para a chaminé. Em conseqüência se constata queda de rendimento térmico da unidade, riscos de re-ignição de misturas explosivas e aumento da poluição atmosférica, paralelamente crescem os problemas de limpeza de depósitos internos.
- Alterações do processo de combustão, com modificações na conformação da chama, impedindo a completa queima do combustível. A própria chama passa a sofrer um processo de descontinuidade, podendo até atingir o fenômeno de destaque, que causa o seu afastamento da região favorável à perfeita

¹ Processo por meio do qual se separa uma mistura de partículas de diferentes tamanhos em frações mais ou menos homogêneas mediante a sedimentação numa corrente de fluido.

combustão, ou mesmo a sua extinção. Se tal ocorrência se verificar, origina-se intensa formação de gaseificação propícia a explosões de grande intensidade.

2.3.4.1) Dispositivos para o controle da tiragem [5]

O controle da tiragem se obtém com dispositivos inseridos no circuito dos gases denominados registros. Há dois tipos clássicos: os chamados registros de venezianas, com uma, duas ou mais palhetas -denominado de múltiplas venezianas- e o registro radial. Os primeiros são sempre instalados na descarga dos ventiladores e os últimos na sucção.

Para as chaminés com tiragem natural aplicam-se registros de controle de tiragem constituídos por uma placa guiada por trilhos laterais, que possibilita o seu movimento no sentido vertical, abrindo ou fechando a secção de passagem dos gases.

Cada um destes tipos de registros de controle possui uma curva que caracteriza o seu comportamento, fornecendo a área de passagem equivalente ao ângulo de abertura e a perda de carga provocada pelo estrangulamento da secção.

Considerando cada tipo indicado, pode-se recorrer a fórmulas empíricas que possibilitam o cálculo da perda de carga do dispositivo, porém, como não entraremos neste mérito nos cálculos de nosso modelo computacional, deixaremos de mostrar tais fórmulas devido à extensa explicação que as sucede.

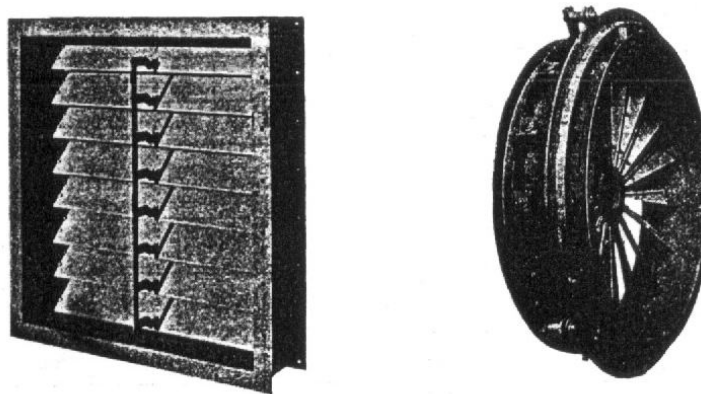


Figura 8 – Dispositivos de controle de tiragem: (D) Venezianas e (E) Radial

2.4) Construção de Chaminés

As chaminés podem ser construídas basicamente com três materiais, associados ou não, em função de suas dimensões, alturas, exigências de durabilidade e até em função de preservação do meio ambiente.

Dentre as construções mais difundidas, se encontram as chaminés metálicas de custo inferior às demais construções. Entretanto, as chaminés de alvenaria e de concreto revestido ainda ocupam posição de preferência nas grandes instalações, mormente nas centrais elétricas, cuja otimização do ciclo, impõem baixas temperaturas de saída dos gases de combustão que comprometem eventuais partes metálicas por efeito de corrosão ácida.

Desta forma poderemos agrupar as chaminés, quanto o tipo construtivo, da seguinte forma:

- Chaminés metálicas inteiramente cilíndricas atirantadas, com diâmetros iguais portanto, desde a base até o topo, servindo de tirantes como recurso para compensar os efeitos da ação do vento, atenuando as vibrações e oscilações resultantes.
- Chaminés metálicas auto-estáveis, também conhecidas como auto-suportáveis, que se compõem de uma parte tronco cônica reforçada, seguida de outra cilíndrica, que completa a altura desejada. Este tipo de chaminé dispensa o atiramento, absorvendo na base toda a ação do vento, graças a adequada fundação de concreto com chumbadores dimensionados para absorver todas as cargas existentes.
- Com o intuito de atenuar os efeitos da vibração e oscilação produzida pelo vento, devido à formação de fluxos vorticosos, a tecnologia encontrou uma solução com o acréscimo de aletas espirais externas.
- Chaminés construídas de tijolos de alvenaria do tipo comum, porém com formatos que facilitam a execução circular da estrutura desde a base até o topo. Um exemplo típico é a chaminé feita com tijolos comuns, amarrados dentro de espaços definidos por uma cinta metálica de reforço, geralmente, o diâmetro interno da base é ligeiramente superior o do topo, dando ao conjunto uma configuração levemente cônica.

- Chaminés de concreto armado, com revestimento interno de alvenaria refratária antiácida, particularmente usadas nas centrais térmicas, que atingem alturas da ordem de 200 metros com gases circulando a velocidades elevadas, até de 30 metros.

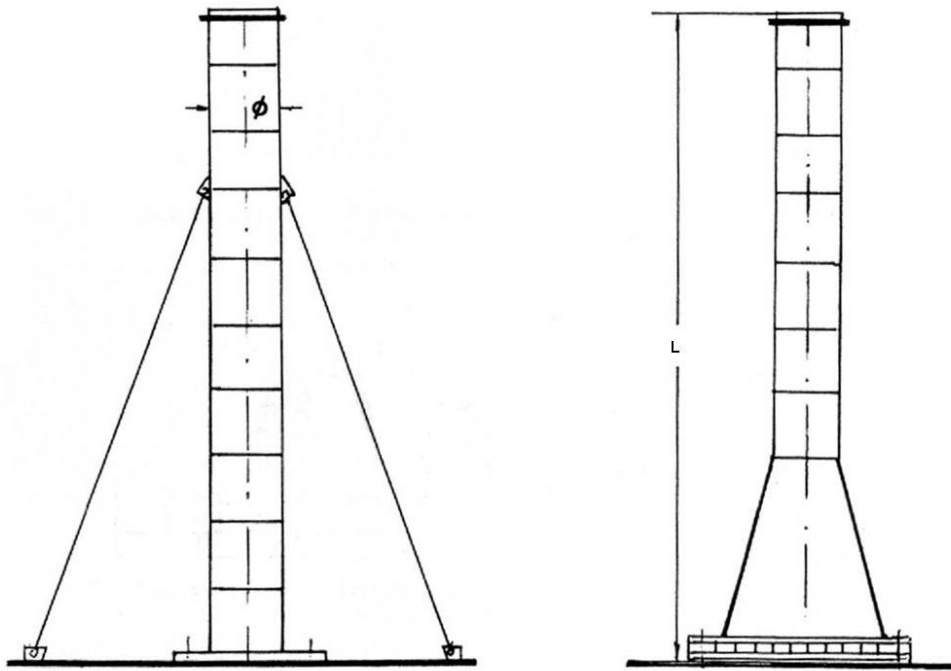


Figura 9 – Tipos construtivos de chaminé: (E) Atirantada e (D) Auto estável

2.5) Considerações do modelo Computacional

Para a análise dos fatores envolvidos no processo de desenvolvimento de uma chaminé, foi elaborado um método computacional cujo objetivo é dimensionar uma chaminé metálica com tiragem natural.

Tal programa computacional foi desenvolvido em linguagem Visual Basic [12] com interface com o Microsoft Excel [11], haja vista que este método faz uso de planilhas de diversos valores. Com este tipo de construção, o programa aceita melhorias e novos dados de uma forma bem simples e funcional, permitindo assim o aprimoramento da sua aplicação.

Quanto à linguagem, o Visual Basic [12] demonstrou ser o mais indicado para as necessidades do programa devido à sua interatividade com o programa Microsoft Excel, programa este muito difundido e com fácil operacionalidade.

3) Método Físico-Químico

3.1) Combustão

A reação de combustão é a reação de oxidação dos elementos do combustível com o oxigênio do ar e podemos representá-la por uma equação química. Todas as substâncias iniciais, que sofrem o processo de combustão, são chamadas de reagentes e as substâncias que resultam do processo são chamados de produtos.[2]

Nos processos de combustão muitos produtos intermediários são formados durante a reação química, porém foram considerados somente os produtos finais, devido à complexidade das reações intermediárias. Outra simplificação importante para o nosso estudo foi a de fixarmos os reagentes em combustíveis hidrocarbonetos do tipo C_xH_y mais ar ($O_2 + 3,76 N_2$) e os produtos finais da combustão em somente CO_2 , H_2O , N_2 , e O_2 , já que a determinação da formação de demais produtos de uma reação de combustão como por exemplo NO_x , CO etc são complexas e depende :

- Da relação ar/combustível;
- Como se procede a mistura ar-combustível;
- Turbulência;
- Tempo de residência e da turbulência;
- Temperatura da chama.

3.1.1) Combustível

Combustível é toda a substância, natural ou artificial, no estado sólido, líquido ou gasoso, capaz de reagir com o oxigênio do ar, mediante centelhamento, liberando energia calorífica e luminosa.[5]

Para o programa computacional, foi utilizado combustível do tipo hidrocarbonetos, líquidos e gasosos, que estão listados, junto com os valores de entalpia de formação (a 298K e 100kPa), na tabela 2.

Tabela 2 - Entalpia de formação dos Combustíveis

Nome	hf (kJ/kmol)	M	hf (kJ/kg)
Metano	-74873,0	16,043	-4667,019884
Acetileno	226731,0	26,038	8707,696444
Eteno	52467,0	28,054	1870,214586
Etano	-84740,0	30,07	-2818,091121
Propeno	20430,0	42,081	485,4922649
Propano	-103900,0	44,094	-2356,329659
Butano	-126200,0	58,124	-2171,22015
Pentano	-146500,0	72,151	-2030,463888
Benzeno	82980,0	78,114	1062,293571
Hexano	-167300,0	86,178	-1941,330734
Heptano	-187900,0	100,205	-1875,15593
n-Octano gás	-208600,0	114,232	-1826,108271
n-Octano líquido	-250105,0	114,232	-2189,44779
T-T-Diesel	-174000,0	198,06	-878,5216601

3.1.2) Análise do Processo de Combustão [2]

Foi feita a análise da combustão segundo a primeira lei da termodinâmica:

$$Q_{v.c.} + H_R = H_P \quad (2) [2]$$

Onde os índices R e P referem-se, respectivamente, aos reagentes e produtos.

Porém outra forma desta equação se demonstra mais conveniente:

$$Q_{v.c.} + \sum_R n_e \bar{h}_e = \sum_P n_s \bar{h}_s \quad (3) [2]$$

Assim, uma medida do calor cedido fornece, realmente, a diferença entre a entalpia dos produtos, a temperatura ambiente e dos reagentes. Por iterações encontramos a temperatura na qual se encontram os gases na saída da câmara de combustão.

Formato da equação:

$$H_R + Q_{v.c.} = Q_P \quad (4) \text{ sendo:}$$

$$H_R = \sum_R n_e (\bar{h}^0_f + \Delta \bar{h})_e = (\bar{h}^0_f)_{combustível} \quad \text{em} \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (5)$$

$$H_P = \sum_P n_s (\bar{h}^0_f + \Delta \bar{h})_s \quad \text{em} \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (6)$$

$Q_{V.C.}$ = calor cedido pela câmara de combustão para algum processo industrial
em $\left[\frac{kJ}{kg} \right]$

Na aplicação da primeira lei da termodinâmica às misturas gás-vapor, é útil lembrar que utilizamos a hipótese de que os componentes, na fase vapor, se comportam como gases perfeitos. Assim, estes vários componentes podem ser tratados separadamente durante os cálculos das variações de entalpia.

Com isso, temos:

$$(\bar{h}^0_f)_{combustível} + Q_{V.C.} = \sum_P n_s (\bar{h}^0_f + \Delta \bar{h})_s \quad (7)$$

O segundo termo do somatório ($\Delta \bar{h}$) representa a diferença entre a entalpia em qualquer estado dado e a entalpia a 298K e 0,1 MPa.

As tabelas de entalpia apresentam valores de entalpia referentes a temperatura de 25°C e pressão de 0,1 MPa e também a diferença $(\bar{h} - \bar{h}^0_{f,298})$ para outras temperaturas a pressão de 0,1 MPa.

3.1.2.1)Produtos

A Tabela 3 mostra os valores de entalpia de formação (298K e 100 kPa) para os produtos da combustão de hidrocarbonetos.

Tabela 3 - Entalpia de formação dos Produtos

substância	h (kJ/kmol)	M	h (kJ/kg)
CO ₂	-393522,0	44,01	-8941,64963
H ₂ O	-241826,0	18,015	-13423,5915
O ₂	0,0	31,999	0
N ₂	0,0	28,013	0

A Tabela 4 mostra os valores de entalpia dos produtos para diversas temperaturas. Esses valores serão utilizados na equação (7) para a determinação da temperatura de saída dos produtos.

Tabela 4 – Entalpia dos Produtos para Diversas Temperaturas

	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
Temperatura (K)	Entalpia (kJ/kmol)	Entalpia (kJ/kmol)	Entalpia (kJ/kmol)	Entalpia (kJ/kmol)	Entalpia (kJ/kg)	Entalpia (kJ/kg)	Entalpia (kJ/kg)	Entalpia (kJ/kg)
0	-9364,0	-9904,0	-8683,0	-8670,0	-212,769825	-549,764085	-271,352230	-309,499161
100	-6457,0	-6617,0	-5777,0	-5768,0	-146,716655	-367,305024	-180,536892	-205,904402
200	-3413,0	-3282,0	-2868,0	-2857,0	-77,550557	-182,181515	-89,627801	-101,988363
298	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
300	69,0	62,0	54,0	54,0	1,567825	3,441576	1,687553	1,927676
400	4003,0	3450,0	3027,0	2971,0	90,956601	191,507077	94,596706	106,057902
500	8305,0	6922,0	6086,0	5911,0	188,707112	384,235359	190,193444	211,009174
600	12906,0	10499,0	9245,0	8894,0	293,251534	582,792118	288,915279	317,495449
700	17754,0	14190,0	12499,0	11937,0	403,408316	787,676936	390,605956	426,123585
800	22806,0	18002,0	15836,0	15046,0	518,200409	999,278379	494,890465	537,107771
900	28030,0	21937,0	19241,0	18223,0	636,900704	1217,707466	601,300041	650,519402
1000	33397,0	26000,0	22703,0	21463,0	758,850261	1443,241743	709,490922	766,179988
1100	38885,0	30190,0	26212,0	24760,0	883,549193	1675,825701	819,150598	883,875344
1200	44473,0	34506,0	29761,0	28109,0	1010,520336	1915,403830	930,060314	1003,426980
1300	50148,0	38941,0	33345,0	31503,0	1139,468303	2161,587566	1042,063814	1124,585014
1400	55895,0	43491,0	36958,0	34936,0	1270,052261	2414,154871	1154,973593	1247,135259
1500	61705,0	48149,0	40600,0	38405,0	1402,067712	2672,717180	1268,789650	1370,970621
1600	67569,0	52907,0	44267,0	41904,0	1535,310157	2936,830419	1383,386981	1495,876914
1700	73480,0	57757,0	47959,0	45430,0	1669,620541	3206,050513	1498,765586	1621,747046
1800	79432,0	62693,0	51674,0	48979,0	1804,862531	3480,044407	1614,862964	1748,438225
1900	85420,0	67706,0	55414,0	52549,0	1940,922518	3758,312517	1731,741617	1875,879056
2000	91439,0	72788,0	59176,0	56137,0	2077,686889	4040,410769	1849,307791	2003,962446
2200	103562,0	83153,0	66770,0	63362,0	2353,147012	4615,764641	2086,627707	2261,878414
2400	115779,0	93741,0	74453,0	70640,0	2630,743013	5203,497086	2326,728960	2521,686360
2600	128074,0	104520,0	82225,0	77963,0	2910,111338	5801,831807	2569,611550	2783,100703
2800	140435,0	115463,0	90080,0	85323,0	3190,979323	6409,270053	2815,087971	3045,835862
3000	152853,0	126548,0	98013,0	92715,0	3473,142468	7024,590619	3063,001969	3309,713347
3200	165321,0	137756,0	106022,0	100134,0	3756,441718	7646,738829	3313,291040	3574,554671
3400	177836,0	149073,0	114101,0	107577,0	4040,808907	8274,937552	3565,767680	3840,252740
3600	190394,0	160484,0	122245,0	115042,0	4326,153147	8908,354149	3820,275634	4106,736158
3800	202990,0	171981,0	130447,0	122526,0	4612,360827	9546,544546	4076,596144	4373,897833
4000	215624,0	183552,0	138705,0	130027,0	4899,431947	10188,842631	4334,666708	4641,666369
4400	240992,0	206892,0	155374,0	145078,0	5475,846399	11484,429642	4855,589237	5178,952629
4800	266488,0	230456,0	172240,0	160188,0	6055,169280	12792,450735	5382,668208	5718,345054
5200	292112,0	254216,0	189312,0	175352,0	6637,400591	14111,351651	5916,184881	6259,665155
5600	317870,0	278161,0	206618,0	190572,0	7222,676664	15440,521787	6457,014282	6802,984329
6000	343782,0	302295,0	224210,0	205848,0	7811,451943	16780,183181	7006,781462	7348,302574

3.1.3) Processo Iterativo

Pelo fato de a princípio, a temperatura dos produtos não ser conhecida, e como o valor da entalpia varia em função da temperatura, inicia-se o processo iterativo até que a igualdade (7) seja satisfeita, tendo então a temperatura de saída dos gases pelo valor da entalpia utilizada na equação.

4) Transferência de calor

A transmissão de calor entre os corpos ocorre sempre que existe uma diferença de temperatura entre eles. No caso específico de que trata este trabalho participam do processo dois fluidos, o portador de calor denominado gases de combustão e o receptor de calor, o ar ambiente.[5]

A transferência de calor se verifica pelos três modos reconhecidos pela física: radiação, convecção e condução. Porém não vamos considerar a radiação devido a sua pequena influência na transferência de calor neste caso.

Para o cálculo da transferência de calor considera-se a chaminé um cilindro oco cujas superfícies externas e internas estão expostas a fluidos que se encontram a diferentes temperaturas, na condição de regime estacionário e sem geração interna de calor. [1]

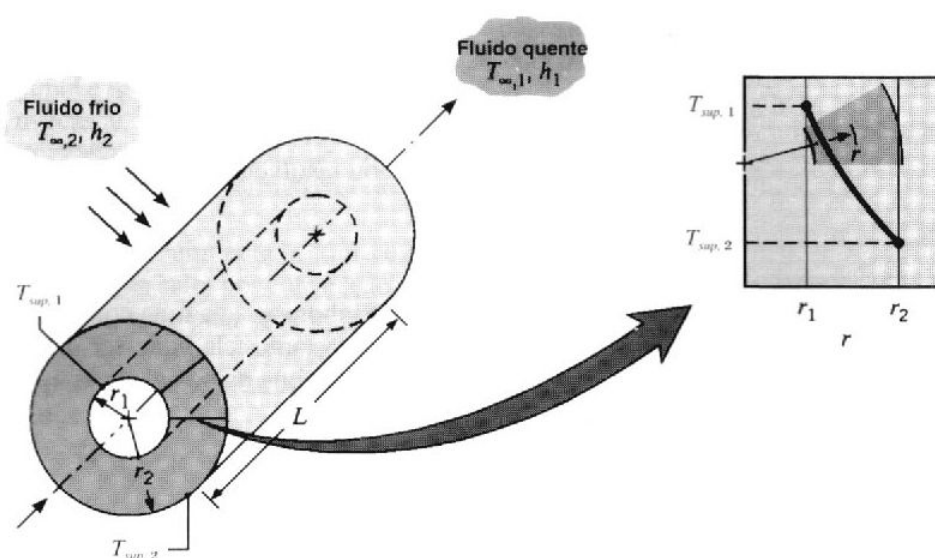


Figura 10 – Modelo de transferência de calor

Como método de resolução, será utilizado o conceito de resistência térmica, uma analogia feita entre as difusões de calor e de carga elétrica.

A transferência de calor, neste caso, possui três etapas:

Transferência convectiva de calor entre o fluido (gases da combustão) e a parede interna:

$$R_{1,conv} = \frac{1}{h_1 2\pi L r_1} \quad (8)$$

onde:

h_1 = coeficiente de convecção interno

r_1 = raio interno da chaminé

L = comprimento da chaminé

Transferência condutiva de calor pela parede da chaminé:

$$R_{2,cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2\pi L k_{mat}} \quad (9)$$

Onde:

r_{ext} = raio externo da chaminé

r_{int} = raio interno da chaminé

L = comprimento da chaminé

k_{mat} = coeficiente de condutividade do material da chaminé

Transferência convectiva entre a parede externa da chaminé e o ar do ambiente:

$$R_{3,conv} = \frac{1}{h_2 2\pi L r_2} \quad (10)$$

Onde:

h_2 = coeficiente de convecção interno

r_2 = raio externo da chaminé

L = comprimento da chaminé

Sendo o circuito equivalente:

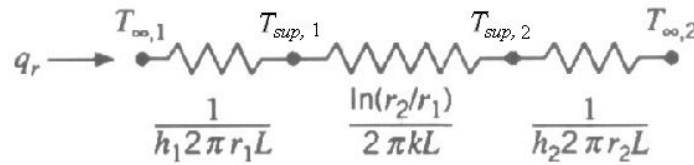


Figura 11 – Circuito Térmico Equivalente

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{1,conv} + R_{2,cond} + R_{3,conv}} \quad (11)$$

Ou seja,

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\frac{1}{h_1 2\pi L r_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2\pi L k} + \frac{1}{h_2 2\pi L r_2}} \quad (12)$$

Sendo,

$T_{\infty,1}$ = temperatura do fluido dentro da chaminé

$T_{\infty,2}$ = temperatura do ar do ambiente em volta da chaminé

4.1) Transferência por Convecção no lado Interno [1]

Para se obter o valor do coeficiente de convecção h_1 utilizamos a relação:

$$h_1 = \frac{Nu_D * K}{D} \quad (13)$$

Onde:

Nu_D = Número de Nusselt

K = Coeficiente de condução do fluido

D = Diâmetro da chaminé

A expressão para se obter o número de Nusselt foi proposta por Gnielinski[8]:

$$Nu_D = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re_D - 1000) Pr}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (14)$$

Onde:

f = coeficiente de atrito

Re_D = Número de Reynolds

Pr = Número de Prandtl

Considerações: escoamento turbulento em tubos circulares válido para $0,5 < Pr < 2000$ e $3000 < Re_D < 5 \times 10^6$ relação esta indicada quando se quer um grau elevado de precisão.

Uma vez que os comprimentos de entrada para escoamentos turbulentos são tipicamente curtos, $10 \leq \frac{X_{cd}}{D} \leq 60$, é freqüentemente razoável se admitir que o número de Nusselt médio em todo o tubo seja igual ao valor associado à região de escoamento completamente desenvolvido, $\bar{Nu}_D \approx Nu_{D,cd}$.

4.1.1) Fator de Atrito

Para um escoamento turbulento completamente desenvolvido, a análise é muito mais complicada, sendo necessário contar com resultados obtidos experimentalmente. Fatores de atrito para uma ampla faixa de números de Reynolds são apresentados no diagrama de Moody [13]. Além de depender do número de Reynolds, o fator de atrito também é uma função das condições na superfície da chaminé. Ele é mínimo para superfícies lisas e aumenta à medida que a rugosidade da superfície também aumenta. Existem correlações que aproximam razoavelmente a condição de superfície lisa, que é o caso de chaminés metálicas, e podem substituir o diagrama de Moody.

Para se obter o fator de atrito, foi utilizada a equação de Petukhov [14] :

$$f = (0,790 \ln Re_D - 1,64)^{-2} \quad (15)$$

válido para $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$.

O valor de Prandtl é tabelado em função da temperatura.

O valor de Re é:

$$Re_D = \frac{\rho U_m D}{\mu} \quad (16)$$

Onde:

ρ = massa específica do fluido

U_m = velocidade média do fluido

D = diâmetro do duto (chaminé)

μ = viscosidade do fluido

4.2) Transferência por Convecção no lado Externo [1]

Procedimento parecido com o lado interno, porém com outra expressão para o Nusselt.

$$\bar{h}_e = \frac{Nu_D * K}{D} \quad (17)$$

Onde:

Nu_D = Número de Nusselt

K = Coeficiente de condução do fluido

D = Diâmetro da chaminé

Para o valor de Nusselt, temos:

$$Nu_D = 0,3 + \frac{0,62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (18)$$

Onde:

Re_D = Número de Reynolds

Pr = Número de Prandt

Esta correlação é proposta por Churchill e Bernstein [15] para cobrir toda a faixa de Re na qual há dados disponíveis, bem como uma ampla faixa de Pr

Considerações: quando $Re.Pr > 0,2$

Para se obter as propriedades dos gases no escoamento interno, os gases foram considerados como se fosse ar, então as propriedades dos gases e do ar externo à chaminé foram consultadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades termofísicas do Ar à pressão atmosférica

T(K)	μ (N.s/m ²)	ρ (kg/m ³)	cp (kJ/kg.k)	k (w/m.k)	Pr
100	0,00000711	3,5562	1,032	0,00934	0,786
150	0,00001034	2,3364	1,012	0,01380	0,758
200	0,00001325	1,7458	1,007	0,01810	0,737
250	0,00001596	1,3947	1,006	0,02230	0,720
300	0,00001846	1,1614	1,007	0,02630	0,707
350	0,00002082	0,995	1,009	0,03000	0,700
400	0,00002301	0,8711	1,014	0,03380	0,690
450	0,00002507	0,774	1,021	0,03730	0,686
500	0,00002701	0,6964	1,030	0,04070	0,684
550	0,00002884	0,6329	1,040	0,04390	0,683
600	0,00003058	0,5804	1,051	0,04690	0,685
650	0,00003225	0,5356	1,063	0,04970	0,690
700	0,00003388	0,4975	1,075	0,05240	0,695
750	0,00003546	0,4643	1,087	0,05490	0,702
800	0,00003698	0,4354	1,099	0,05730	0,709
850	0,00003843	0,4097	1,110	0,05960	0,716
900	0,00003981	0,3868	1,121	0,06200	0,720
950	0,00004113	0,3666	1,131	0,06430	0,723
1000	0,00004244	0,3482	1,141	0,06670	0,726
1100	0,00004490	0,3166	1,159	0,07150	0,728
1200	0,00004730	0,2902	1,175	0,07630	0,728
1300	0,00004960	0,2679	1,189	0,08200	0,719
1400	0,00005300	0,2488	1,207	0,09100	0,703
1500	0,00005570	0,2322	1,230	0,10000	0,685
1600	0,00005840	0,2177	1,248	0,10600	0,688
1700	0,00006110	0,2049	1,267	0,11300	0,685
1800	0,00006370	0,1935	1,286	0,12000	0,683
1900	0,00006630	0,1833	1,307	0,12800	0,677
2000	0,00006890	0,1741	1,337	0,13700	0,672
2100	0,00007150	0,1658	1,372	0,14700	0,667
2200	0,00007400	0,1582	1,417	0,16000	0,655
2300	0,00007660	0,1513	1,478	0,17500	0,647
2400	0,00007920	0,1448	1,558	0,19600	0,630
2500	0,00008180	0,1389	1,665	0,22200	0,613
3000	0,00009550	0,1135	2,726	0,48600	0,536

4.3) Determinação da Altura da Chaminé

A altura da chaminé, segundo o critério que foi adotado, estará condicionada à temperatura de ponto de orvalho dos gases e quando esta for igual à temperatura interna da parede da chaminé, determinará a altura. Para o cálculo da pressão parcial da água fazemos a seguinte equação: [2]

$$P_{SAT} = \frac{nH_2O}{(nCO_2 + nH_2O + nO_2 + nN_2)} * 0,1 \quad (19)$$

Para então, a partir da pressão de saturação, encontrarmos a temperatura de condensação do vapor d'água dos produtos da combustão na Tabela 6.

Tabela 6 - Temperatura e pressão de saturação da água

Temperatura(K)	Pressão (MPa)	Temperatura(K)	Pressão (MPa)
273,16	0,0006113	448,15	0,8920000
278,15	0,0008721	453,15	1,0022000
283,15	0,0012276	458,15	1,1227000
288,15	0,0017051	463,15	1,2544000
293,15	0,0023385	468,15	1,3978000
298,15	0,0031691	473,15	1,5538000
303,15	0,0042461	478,15	1,7230000
308,15	0,0056280	483,15	1,9063000
313,15	0,0073837	488,15	2,1042000
318,15	0,0095937	493,15	2,3178000
323,15	0,0123500	498,15	2,5477000
328,15	0,0157580	503,15	2,7949000
333,15	0,0199410	508,15	3,0601000
338,15	0,0250330	513,15	3,3442000
343,15	0,0311880	518,15	3,6482000
348,15	0,0385780	523,15	3,9730000
353,15	0,0473900	528,15	4,3195000
358,15	0,0578340	533,15	4,6886000
363,15	0,0701390	538,15	5,0813000
368,15	0,0845540	543,15	5,4987000
373,15	0,1013500	548,15	5,9418000
378,15	0,1208200	553,15	6,4117000
383,15	0,1432800	558,15	6,9094000
388,15	0,1690600	563,15	7,4360000
393,15	0,1985300	568,15	7,9928000
398,15	0,2321000	573,15	8,5810000
403,15	0,2701000	578,15	9,2018000
408,15	0,3130000	583,15	9,8566000
413,15	0,3613000	588,15	10,5470000
418,15	0,4154000	593,15	11,2740000
423,15	0,4759000	603,15	12,8450000
428,15	0,5431000	613,15	14,5860000
433,15	0,6178000	623,15	16,5140000
438,15	0,7005000	633,15	18,6510000
443,15	0,7917000	643,15	21,0280000

5) Escoamento

Em se tratando de chaminé existe tanto o escoamento externo quanto o interno. O externo é o escoamento do ar do ambiente em volta da chaminé e o interno que é o fluxo de gases que passa por dentro da mesma.

Serão feitas algumas considerações sobre os dois casos.

5.1) Escoamento Externo [1]

No escoamento externo o fluido da corrente livre (no caso o ar do ambiente) é levado ao repouso no ponto de estagnação dianteiro, com um conseqüente aumento de pressão. A partir deste ponto, a pressão diminui com o aumento da distância percorrida em torno do cilindro, e a camada limite se desenvolve sob a influência de um gradiente de pressão favorável, e ainda assim, a pressão atinge um valor mínimo. Na parte traseira do cilindro ocorre a continuação do desenvolvimento da camada limite na presença de um gradiente de pressão adverso.

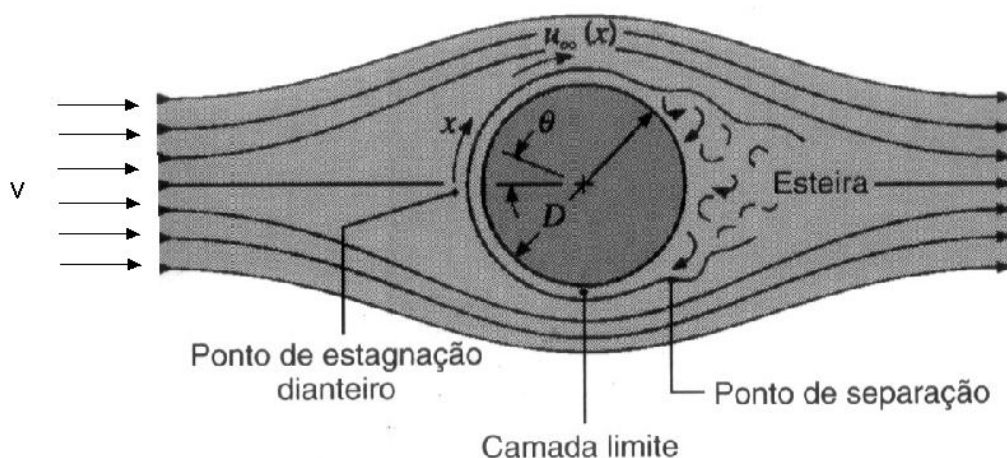


Figura 12– Escoamento Externo na visão superior da chaminé

5.2) Escoamento Interno [4]

Devido às condições de saída da câmara de combustão, os gases proporcionam um escoamento totalmente turbulento, resultado também da turbulência da combustão.

Uma vez que a análise das condições em escoamentos turbulentos é consideravelmente mais complicada, foram utilizadas correlações empíricas.

No escoamento turbulento acontece flutuação de velocidades presentes, mistura macroscópica de partículas de camadas adjacentes. No caso da chaminé, em que o campo de velocidade média é unidimensional, não há relação universal

entre o campo de tensões e o campo de velocidade média; assim, nos escoamentos turbulentos se deve apoiar solidamente sobre teorias semi-empíricas e dados experimentais.

O perfil de velocidade para escoamento turbulento completamente desenvolvido através de um tubo liso (chaminé) é mostrado no gráfico semilogarítmico a seguir, onde: $\frac{\bar{u}}{u_*}$ está plotado contra $\log(\frac{yu_*}{\nu})$.

Na região muito próxima à parede, onde o cisalhamento viscoso predomina, o perfil de velocidade média segue uma relação viscosa linear, sendo esta região chamada de subcamada viscosa.

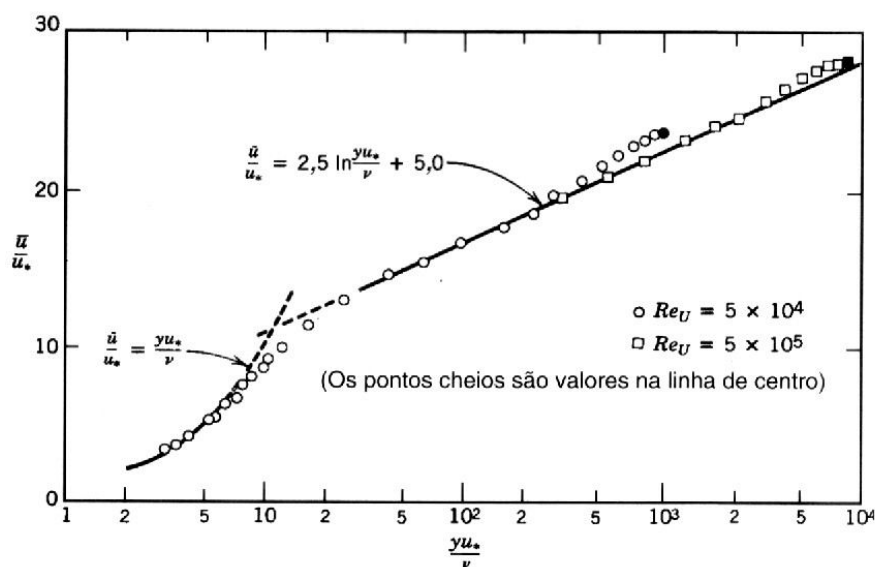


Figura 13 – Perfil de Escoamento Totalmente Turbulento

6) Dimensionamento da Espessura da Chaminé

Para uma chaminé projetada corretamente, a tensão máxima de compressão não deve exceder à tensão admissível da chaminé. Pode-se abordar o problema de

diversas maneiras: método da tensão admissível, método de interação e o método de estados limites.[3]

6.1) Método da tensão Admissível [3]

Esse método se baseia na hipótese de que a tensão seja igual à de uma coluna com carga centrada. Desse modo, devemos ter a tensão admissível do material maior que a tensão aplicada à coluna, sendo a tensão admissível sob carga centrada. [3]

$$\frac{P}{A} + \frac{Mc}{I} \leq \sigma_{adm} \quad (20)$$

Onde:

P = Peso próprio da chaminé

A = Área da seção transversal da chaminé

Mc = Momento produzido pelo vento

I = Momento de Inércia de área

σ_{adm} = Tensão admissível do material

A tensão admissível é obtida pelo relação : [3]

$$\sigma_{adm} = \frac{\pi^2 * E}{CS * \left(\frac{L}{r}\right)^2} \quad (21)$$

Onde:

E = Módulo de Elasticidade do material

CS = Coeficiente de Segurança

$\frac{L}{r}$ = Índice de Esbeltez

Ou pela relação: [3]

$$CS = \frac{\sigma_{rup}}{\sigma_{adm}} \quad (22)$$

Onde:

σ_{rup} = Tensão de ruptura do material

σ_{adm} = Tensão admissível do material

No programa, foi utilizada a relação que resultar na maior tensão admissível.

A maior parte das normas de engenharia especifica que a tensão admissível seja determinada para o maior valor do índice de esbeltez, não importando se esse valor corresponde realmente ao plano em que ocorre a flexão.

Para o coeficiente de segurança temos especificações da American Institute of Steel Constrution (AISC) para tubos longos, intermediários e médios. Para tubos longos adota-se o coeficiente de 1,92 e para tubos intermediários e curtos tem-se a expressão:[3]

$$C.S. = \frac{5}{3} + \frac{3}{8} \frac{\frac{L}{r}}{C_c} - \frac{1}{8} \left(\frac{\frac{L}{r}}{C_c} \right)^3 \quad (23)$$

Sendo:

$\frac{L}{r}$ = Índice de Esbeltez

C_c = Valor de $\frac{L}{r}$ no qual ocorre a tensão crítica

A Tabela 7 nos mostra as propriedades dos materiais utilizados no programa computacional. [6]

Tabela 7 – Características dos Materiais

Especificação	Descrição	Limite de ruptura (MPa)	ρ = Massa específica (Kg/dm ³)	K = Coef. Condutividade (W/m.k)	Módulo de Elasticidade (GPa)
AISI 1040	Steel, as rolled	620	7,845	51,9	200
AISI 1050	Steel, cold drawn, 19-32 mm (0.75-1.25 in) round	690	7,85	49,8	205
AISI 1060	Steel, normalized at 900°C (1650°F)	779	7,85	49,8	205
AISI 1070	Steel, hot rolled, 19-32 mm (0.75-1.25 in) round	703	7,87	51,9	200
AISI 1080	Steel, hot rolled, 19-32 mm (0.75-1.25 in) round	772	7,85	47,7	205
AISI 1090	Steel, hot rolled, 19-32 mm (0.75-1.25 in) round	841	7,87	51,9	200
AISI 1116	Steel, hot rolled	440	7,85	49,8	200
AISI 1118	Steel, as rolled	525	7,85	49,8	205
AISI 1141	Steel, as rolled	675	7,85	49,8	205
AISI 4024	Steel	500	7,85	44,5	205

6.1.1) Cálculo do Momento

O momento é calculado a partir da força do vento atuante na lateral da chaminé que depende da velocidade do vento e do coeficiente de arrasto da superfície externa da chaminé.

Para calcularmos a velocidade consideramos a seguinte relação: [10]

$$U_z = \left(\frac{Z}{Z_r} \right)^\alpha U_r = c_{f_p} \cdot U_r \quad (24)$$

Onde:

c_{f_p} é um fator de correlação

“ α ” varia em função da elevação, hora do dia, estação do ano, tipo de terreno, temperatura vento etc.

Z = Altura que se deseja obter a velocidade do vento

Z_r = Altura na qual foi obtido o valor da velocidade do vento

U_r = Velocidade do vento na altura Z_r

Deve-se lembrar que é necessário considerar o valor máximo da velocidade do vento na região de instalação da chaminé para que o seu dimensionamento suporte as condições críticas do ambiente.

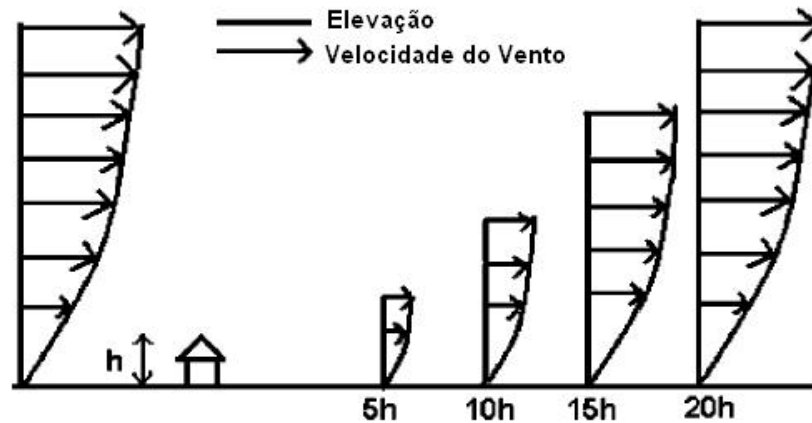


Figura 14 – Perfil da Velocidade do Vento [10]

Uma função que correlaciona α com a rugosidade da superfície em volta da chaminé é: [10]

$$\alpha = 0,096(\log_{10} Z_0) + 0,016(\log_{10} Z_0)^2 + 0,24 \quad (25)$$

O valor de Z_0 é retirado do gráfico:

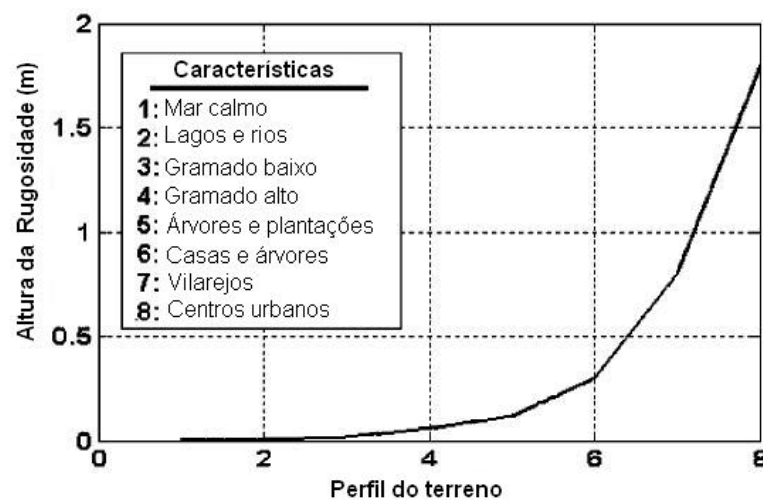


Figura 15 – Gráfico Perfil do Terreno versus Altura da Rugosidade[10]

A Tabela 8 mostra os valores do gráfico de rugosidade utilizados no programa computacional:

Tabela 8 – Condições do Terreno

Número	Condições Ambiental	Rugosidade
1	Mar calmo	0,001
2	Lagos e rios	0,01
3	Gramado baixo	0,0345
4	Gramado alto	0,065
5	Árvores e plantações	0,125
6	Casas e árvores	0,31
7	Vilarejos	0,8
8	Centros urbanos	1,6

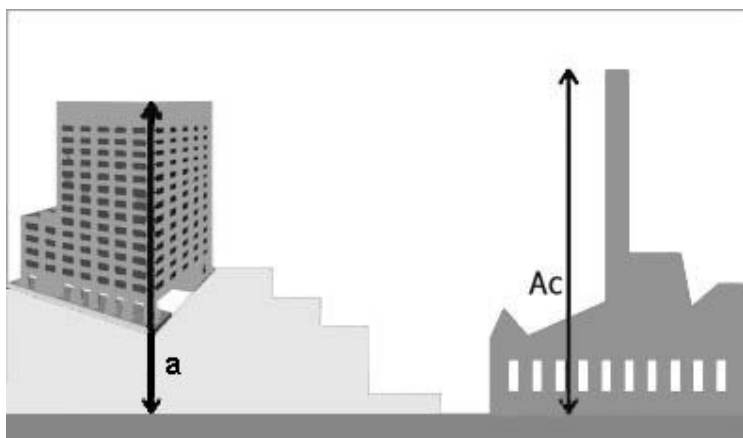


Figura 16 – Indicação de alturas Próximas de uma Chaminé

Cálculo da força em função da velocidade:[4]

$$F_D = \frac{C_D A \rho V_{máx}^2}{2} \quad (26)$$

Onde:

C_D = Coeficiente de arrasto

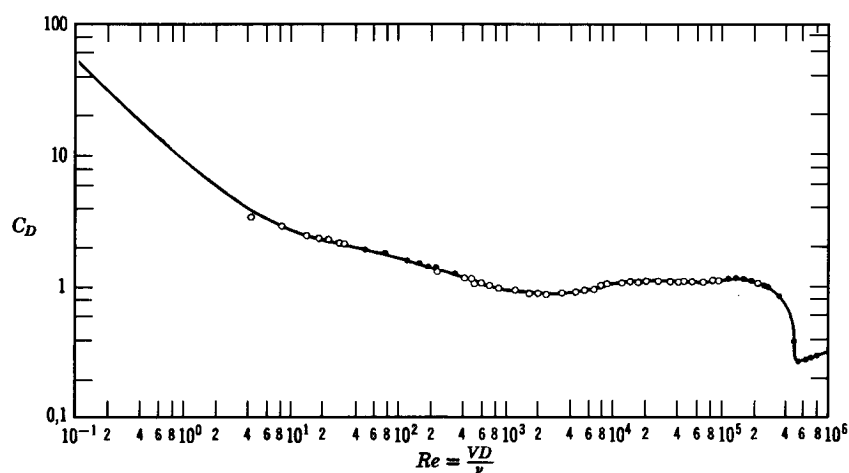
A = área da seção lateral da chaminé = $L \cdot d$

ρ = massa específica do fluido

$V_{máx}$ = velocidade máxima do vento

O coeficiente C_D varia com o número de Reynolds como mostrado no gráfico da Figura 17.

Para o programa computacional este gráfico de função logarítmica foi linearizado para se obter uma iteração maior do programa. A linearização foi feita da seguinte forma: foram fixados os valores de Re e lidos os valores de Cd gerando a tabela 9.



Coeficiente de arrasto para um cilindro circular liso como função do número de Reynolds

Figura 17 – Coeficiente de arrasto para a chaminé [4]

Tabela 9 - Valor de Cd em função do número de Reynolds

Re	Cd	Re	Cd	Re	Cd	Re	Cd
0	35	8	2,80	600	1,00	40000	1,20
0,2	32,00	10	2,60	800	0,95	60000	1,20
0,4	19,00	20	2,30	1000	0,90	80000	1,20
0,6	14,00	40	2,00	2000	0,85	100000	1,20
0,8	11,00	60	1,80	4000	0,90	200000	1,10
1	10,00	80	1,70	6000	0,95	400000	0,75
2	6,00	100	1,60	8000	1,00	600000	0,28
4	4,00	200	1,40	10000	1,10	800000	0,33
6	3,50	400	1,20	20000	1,20	1000000	0,36

A força do vento pode ser considerada como uma única força no meio do comprimento da Chaminé, com isso o momento fica: [4]

$$M_o = F_D * \frac{L}{2} \quad (27)$$

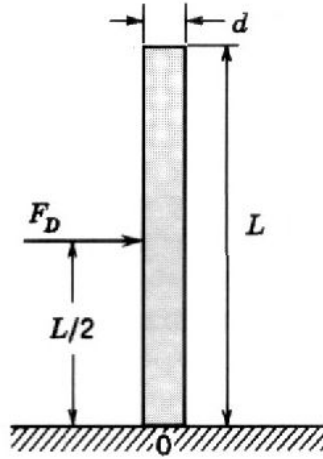


Figura 18 – Momento Aplicado na Chaminé pela Ação do Vento

Voltando na equação (20), temos:

$$\frac{P}{A} + \frac{Mc}{I} \leq \sigma_{adm} \text{ onde:}$$

$$I = \pi(R_e^4 - R_i^4) \quad (28)$$

$$A = \pi(R_e^2 - R_i^2) \quad (29)$$

$$\frac{N}{A} = \frac{V * \rho * g}{A} = \frac{\rho * A * L * g}{A} = \rho * L * g \quad (30)$$

Portanto,

$$(\sigma_{adm} - \rho * L * g)\pi(R_e^4 - R_i^4) = 4 * Mc \quad (31)$$

$$R_e = \sqrt[4]{\frac{4 * Mc}{(\sigma_{adm} - \rho * L * g)\pi} + R_i^4} \quad (32)$$

Assim, podemos achar o valor do raio externo em função da tensão admissível, momento, altura da chaminé, e raio interno.

Para a implementação do modelo de cálculo de chaminé ora proposto foi desenvolvido o programa computacional escrito em linguagem Visual Basic que se encontra listado no apêndice A.

7) Análise ambiental

7.1) A dispersão da fumaça da chaminé e A Contaminação Atmosférica [9]

O projeto de uma chaminé deve ser elaborado com análise não somente das razões relativas a dinâmicas dos gases e da escolha dos materiais para construção, mas também por questões de contaminação do ar, especialmente se a descarga dos gases for em regiões muito habitadas. Por motivos de ordem econômica, a tendência é reduzir cada vez mais a temperatura de saída dos gases da chaminé e, por conseqüência, substituir, quando conveniente, a tiragem natural pela tiragem mecânica (forçada). A temperatura mínima de dispersão vem, deste modo, ligada unicamente ao grau de resistência à corrosão dos materiais postos em contatos com os gases da combustão.

O isolamento da chaminé é um meio que é freqüentemente aplicado na indústria para reduzir as perdas de calor, impedindo que os gases saiam a temperaturas inferiores ao ponto de orvalho dos gases.

As contaminações progressivas do ar em grandes cidades e o aumento da altura média dos edifícios impõem que as descargas dos gases e de substâncias nocivas na atmosfera se façam em alturas cada vez mais elevadas altas para garantir a segura dispersão dos contaminantes. Deve-se operar de modo que a concentração seja muito baixa em regiões habitadas.

O estudo da dispersão dos contaminantes é bem mais complicado e os resultados obtidos com os cálculos nem sempre estão de acordo com a realidade.

Os gases saem de uma chaminé com uma certa velocidade e uma temperatura superior as do ar ambiente e tendem primeiro a elevar-se, impulsionados por sua quantidade de movimento e para depois ocorrer a propagação.

Do ponto de vista da contaminação atmosférica, os fornos alimentados com combustíveis gasosos e líquidos não têm, geralmente, necessidade de chaminés

altas, não considerando a presença de SO₂. Os produtos da combustão estão quase isentos de contaminantes do tipo partículas sólidas sem queimar ou cinzas. Como, porém, na prática industrial atual, está quase completamente abandonado o emprego da simples tiragem natural para a retirada dos gases do interior dos fornos, não existem para este propósito particular problemas de dimensionamento relacionados com a dinâmica dos gases.

Pelo contrário, os fornos em que se utilizam combustíveis sólidos ou no estado de pulverizado produzem emissões gasosas de elevado conteúdo de contaminantes. Para obter, nestes casos, uma dispersão na atmosfera de acordo com as normas contra a contaminação, são necessárias chaminés de alturas consideráveis. À margem de algumas aplicações caracterizadas por fortes perdas de carga, a maior parte das fornalhas com ar insuflado e pressurizado nas câmaras de combustão necessita de uma tiragem mínima ao que se gera nas chaminés normais. Por diversas razões, as alturas das chaminés estão normalmente superiores à que é requerida pela dinâmica do sistema, porque na base da chaminé são utilizados, com frequência, dispositivos de controle de tiragem para reduzir o excessivo efeito da aspiração.

8) Método Alternativo

Um método para cálculo da altura de uma chaminé é proposto por Hildo Pêra [5] e pelo Giuliano Salvi [9] e possui a equação:

$$H = \frac{\Delta p}{1,29 \left(\frac{1}{1 + 0,00367 t_a} - \frac{1}{1 + 0,00367 t_g} \right)} \quad [\text{em m}] \quad (33)$$

onde:

Δp = Perda de carga ou tiragem [mm C.A.]

t_a e t_g = São respectivamente a temperatura do ar e a temperatura média do gás (°C)

Este método se difere da prática por não considerar a perda de carga da própria chaminé. Alguns autores sugerem um fator de multiplicação de 1,5 para a definição da altura efetiva.

A temperatura média do gás depende do conhecimento da temperatura no topo da chaminé. Neste método adota-se, para efeito de cálculo, estabelecer a temperatura do topo, atribuindo uma perda de 0,3 a 0,6°C por metro de altura de chaminé de alvenaria ou de concreto. Para chaminés metálicas existe o método por transferência de calor que é utilizado neste trabalho para esta determinação.[5]

9) Resultados

Com a utilização do programa desenvolvido com este trabalho foram feitas algumas simulações e serão demonstradas as comparações com o método proposto por Hildo Pêra [5] e pelo Giuliano Salvi [9].

9.1) Simulação 01

Combustível: Metano
Quantidade de Calor: 0 watts
Porcentagem de Ar teórico: 100
Fluxo de Combustível: 1kg/s
Eficiência do forno: 0,90
Material: AISI 1040
Velocidade do Vento: 20m/s
Altura Relativa do vento: 10m
Condições de terreno: Centros Urbanos
Temperatura do Ar: 290K

Resposta do programa:

Temperatura de Saída: 2348,40 K
Pressão Parcial da Água: 0,01901 MPa
Temperatura de Saturação: 332,04 K
Mistura Ar/Combustível: 13,6
Energia Perdida: 29641265,41 Watts
Coeficiente de Convecção Externo: 1053,38 w/m²k
Coeficiente de Convecção Interno: 6457,67 w/m²k

Tabela 10 – Resultados da simulação 01

Diâmetro (m)	Altura (m)	Velocidade dos Gases (m/s)	Cd	Espessura (m)	Tensão (Pa)	Re	Perda de Carga (mm C.A.)
0,1	8,49	1599,15	1,16	0,00349026	35436972,45	143783,04	3530158,557
0,12	8,09	1110,52	1,13	0,00167189	56200145,55	170123,69	1351850,959
0,14	7,75	815,89	1,10	0,001	83353656,87	195932,67	599167,221
0,16	7,47	624,67	1,06	0,001	117184656,99	221520,14	296215,112
0,18	7,22	493,56	1,02	0,001	158760554,30	246612,54	158877,060
0,2	7,02	399,79	0,97	0,001	207327904,65	271769,59	91216,553
0,22	6,83	330,40	0,93	0,001	265018350	296354,4097	55105,357
0,24	6,68	277,63	0,89	0,001	321243523,3	321171,5049	34882,434
0,26	6,53	236,56	0,85	0,001	321243523,3	345378,0209	22852,460
0,28	6,40	203,97	0,80	0,001	321243523,3	369557,7145	15462,380
0,3	6,29	177,68	0,76	0,001	321243523,3	393822,9448	10762,939
0,32	6,18	156,17	0,71	0,001	321243523,3	417627,8518	7658,172
0,34	6,09	138,33	0,65	0,001	321243523,3	441613,3132	5573,259
0,36	6,00	123,39	0,60	0,001	321243523,3	465256,4182	4125,962
0,38	5,92	110,74	0,54	0,001	321243523,3	488835,7963	3106,635
0,4	5,85	99,95	0,49	0,001	321243523,3	512528,9937	2375,431
0,42	5,78	90,65	0,43	0,001	321243523,3	535815,9476	1838,941
0,44	5,72	82,60	0,38	0,001	321243523,3	559391,4739	1442,179
0,46	5,66	75,57	0,32	0,001	321243523,3	582547,4431	1142,652
0,48	5,61	69,41	0,28	0,001	321243523,3	605914,3975	915,468
0,5	5,55	63,97	0,28711	0,001	321243523,3	628434,5637	738,464

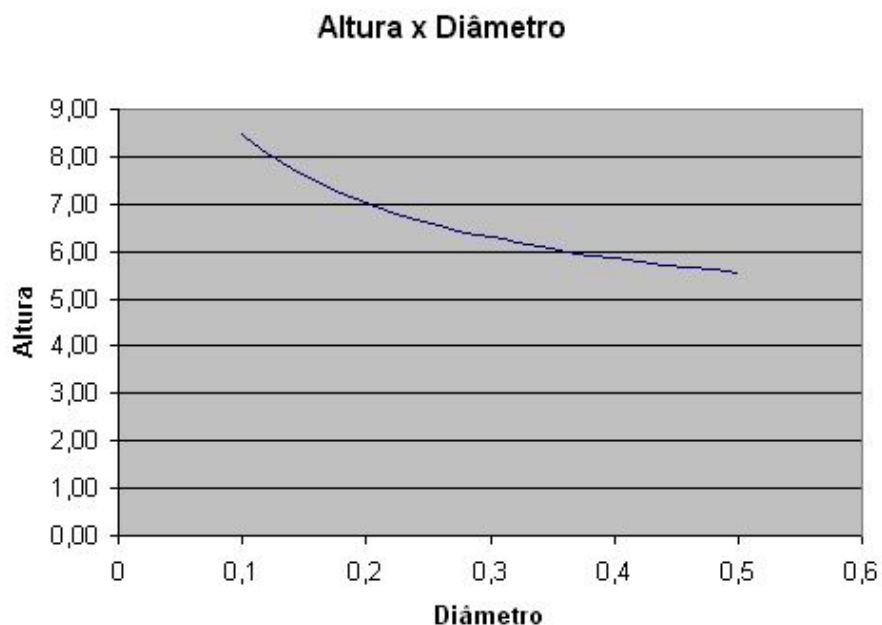


Figura 19 – Gráfico Altura versus Diâmetro simulação 01

Distribuição de temperatura para o diâmetro de 0,30m:

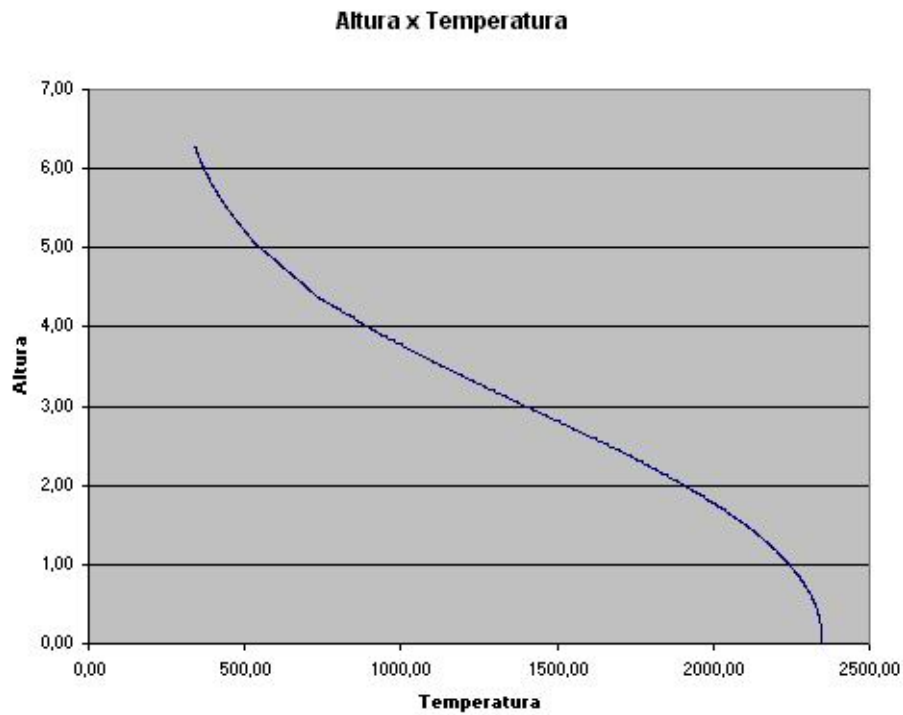


Figura 20 – Gráfico Altura versus Temperatura simulação 01

9.2) Simulação 02

Combustível: Metano

Quantidade de Calor: 10000000 watts

Porcentagem de Ar teórico:100

Fluxo de Combustível: 1kg/s

Eficiência do forno: 0,90

Material: AISI 1040

Velocidade do Vento: 20m/s

Altura Relativa do vento: 10m

Condições de terreno: Centros Urbanos

Temperatura do Ar: 290K

Resposta do programa:

Temperatura de Saída: 1683,54K

Pressão Parcial da Água: 0,01901 MPa

Temperatura de Saturação: 332,04 K

Mistura Ar/combustível: 13,6

Energia Perdida: 19866514,53 Watts

Coeficiente de Convecção Externo: 1031,59 w/m²k

Coeficiente de Convecção Interno: 6519,61 w/m²k

Tabela 11 – Resultados da simulação 02

Diâmetro (m)	Altura (m)	Velocidade dos Gases (m/s)	Cd	Espessura (m)	Tensão (Pa)	Re	Perda de Carga (mm C.A.)
0,1	8,01	1599,15	1,16	0,0027322	39811355,00	141419,34	3330573,621
0,12	7,62	1110,52	1,13	0,00128449	63346779,54	167218,12	1273313,264
0,14	7,30	815,89	1,11	0,001	93946875,88	192648,39	564376,866
0,16	7,02	624,67	1,07	0,001	132689858,98	217543,39	278370,828
0,18	6,79	493,56	1,03	0,001	179505373,25	242306,74	149414,853
0,2	6,59	399,79	0,98	0,001	235267075,29	266803,95	85629,214
0,22	6,42	330,40	0,94	0,001	299948916,2	291167,3473	51797,422
0,24	6,27	277,63	0,90	0,001	321243523,3	315360,1912	32741,446
0,26	6,13	236,56	0,86	0,001	321243523,3	339186,7344	21452,616
0,28	6,01	203,97	0,81	0,001	321243523,3	363023,4005	14520,141
0,3	5,90	177,68	0,77	0,001	321243523,3	386665,5463	10095,603
0,32	5,80	156,17	0,73	0,001	321243523,3	410139,2397	7187,281
0,34	5,71	138,33	0,67	0,001	321243523,3	433500,2341	5225,502
0,36	5,63	123,39	0,62	0,001	321243523,3	456971,1211	3871,528
0,38	5,55	110,74	0,56	0,001	321243523,3	479876,2096	2912,470
0,4	5,48	99,95	0,51	0,001	321243523,3	503027,7872	2225,190
0,42	5,41	90,65	0,45	0,001	321243523,3	525684,1594	1721,224
0,44	5,36	82,60	0,40	0,001	321243523,3	549121,0373	1351,412
0,46	5,30	75,57	0,35	0,001	321243523,3	571688,5207	1069,974
0,48	5,25	69,41	0,29	0,001	321243523,3	594430,5701	856,721
0,5	5,20	63,97	0,28426	0,001	321243523,3	617059,3888	691,894

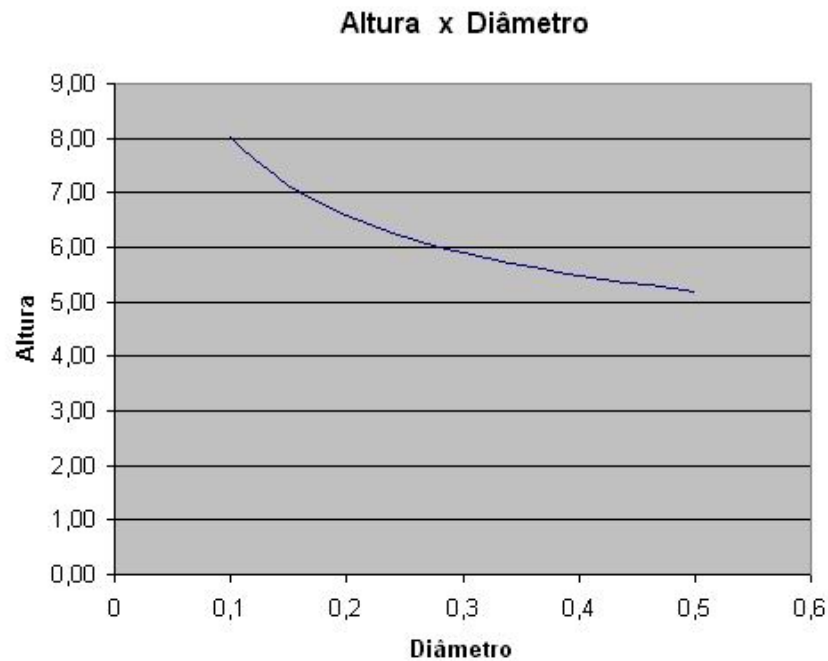


Figura 21 – Gráfico Altura versus Diâmetro simulação 02

Distribuição de temperatura para o **diâmetro de 0,30m**:

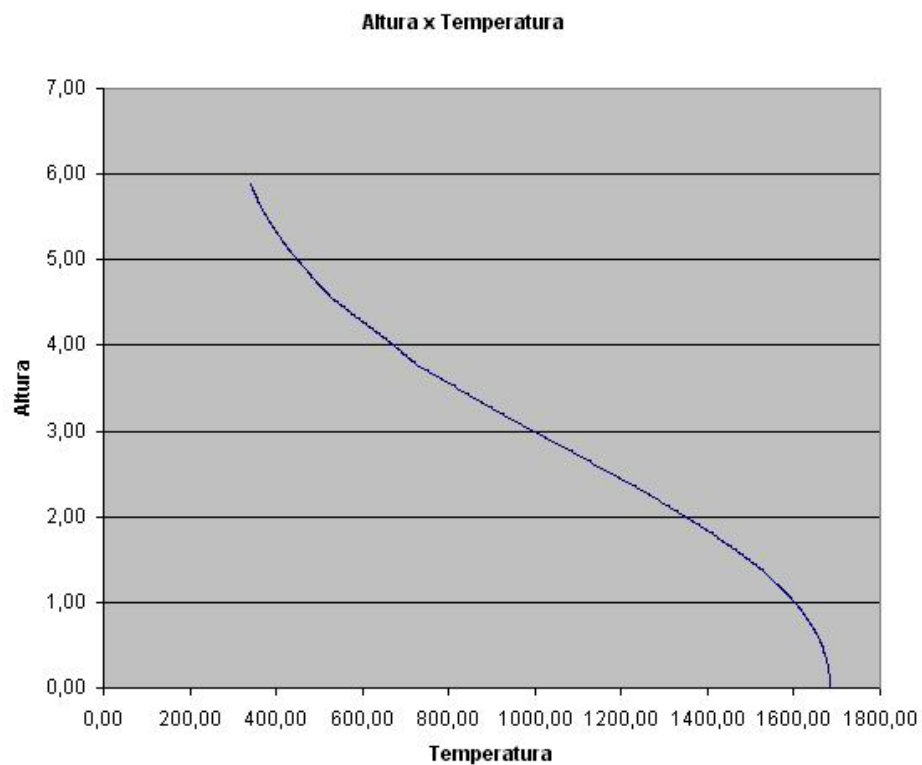


Figura 22 – Gráfico Altura versus Temperatura simulação 02

9.3) Simulação 03

Combustível: Metano

Quantidade de Calor: 10000000 watts

Porcentagem de Ar teórico: 400

Fluxo de Combustível: 1kg/s

Eficiência do forno: 0,90

Material: AISI 1040

Velocidade do Vento: 20m/s

Altura Relativa do vento: 10m

Condições de terreno: Centros Urbanos

Temperatura do Ar: 290K

Resposta do programa:

Temperatura de Saída: 763,76 K

Pressão Parcial da Água: 0,00512 MPa

Temperatura de Saturação: 306,30 K

Mistura Ar/combustível: 65,2

Energia Perdida: 44894426,49 Watts

Coeficiente de Convecção Externo: 235,29 w/m²k

Coeficiente de Convecção Interno: 3265,11 w/m²k

Tabela 12 – Resultados da simulação 03

Diâmetro (m)	Altura (m)	Velocidade dos Gases (m/s)	Cd	Espessura (m)	Tensão (Pa)	Re	Perda de Carga (mm C.A.)
0,1	15,71	7255,93	1,13	0,03015413	10349506,02	174932,73	134484542,378
0,12	15,28	5038,84	1,09	0,02019874	15753888,78	208244,18	52567014,032
0,14	14,79	3702,01	1,03	0,0126197	22887149,94	240659,81	23540960,579
0,16	14,31	2834,35	0,97	0,00765678	31932482,97	272431,88	11682503,100
0,18	13,84	2239,48	0,92	0,00460702	43206075,62	303529,44	6270031,881
0,2	13,41	1813,98	0,87	0,00281394	56816493,49	334177,94	3587360,187
0,22	13,01	1499,16	0,81	0,00175197	73040335,6	364375,2866	2161026,422
0,24	12,67	1259,71	0,76	0,00112544	91651852	394464,5378	1362123,830
0,26	12,34	1073,36	0,69	0,001	113393554,2	424060,4892	889087,705
0,28	12,05	925,50	0,62	0,001	137915780,1	453528,1985	599367,341
0,3	11,79	806,21	0,56	0,001	165381486,3	482852,6881	415339,959
0,32	11,55	708,59	0,49	0,001	196068569,2	511946,1851	294664,812
0,34	11,32	627,68	0,42	0,001	230428913,4	540760,0909	213278,966
0,36	11,12	559,87	0,35	0,001	267711741,1	569595,1878	157430,352
0,38	10,93	502,49	0,28	0,001	308744237,7	598221,2453	118085,987
0,4	10,75	453,50	0,29	0,001	321243523,3	626640,3201	89867,920
0,42	10,58	411,33	0,29	0,001	321243523,3	654893,4886	69300,346
0,44	10,44	374,79	0,30	0,001	321243523,3	683424,9679	54191,766
0,46	10,28	342,91	0,31	0,001	321243523,3	711226,2457	42726,778
0,48	10,15	314,93	0,31	0,001	321243523,3	739394,1693	34100,130
0,5	10,01	290,24	0,32175	0,001	321243523,3	767008,5807	27420,808

Altura x Diâmetro

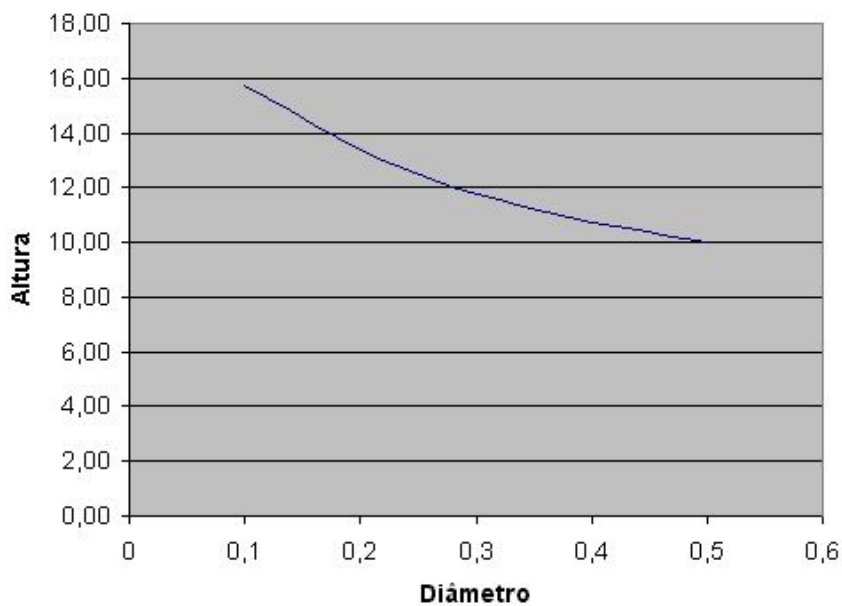


Figura 23 – Gráfico Altura versus Diâmetro simulação 03

Distribuição de temperatura para o diâmetro de 0,30m:

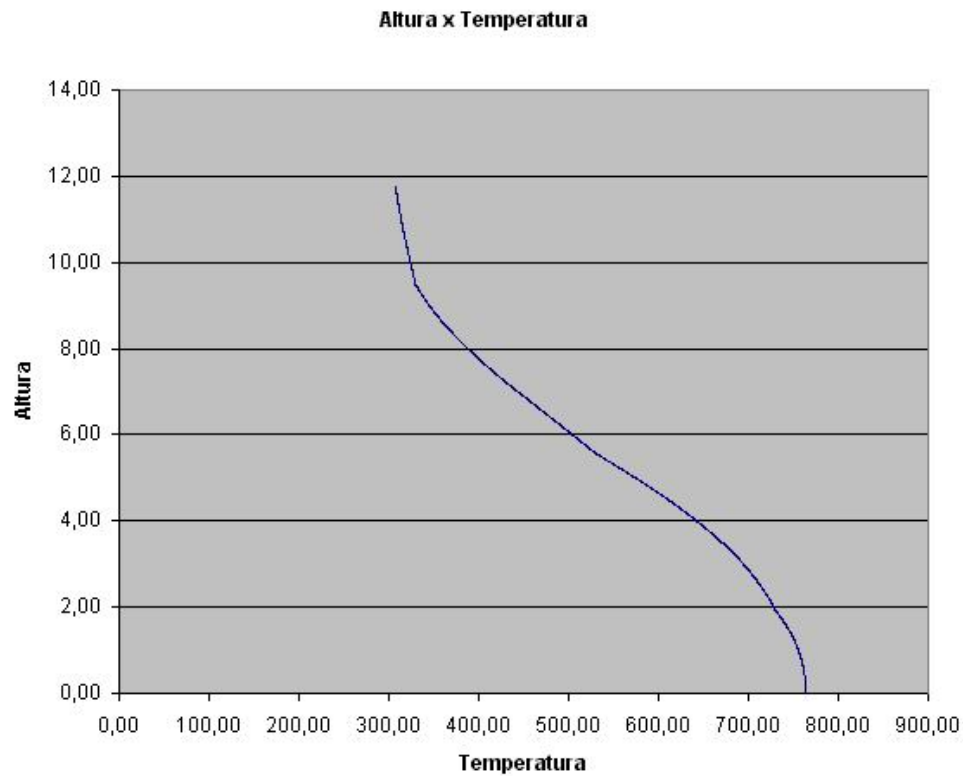


Figura 24 – Gráfico Altura versus Temperatura simulação 03

9.4) Simulação 04

Combustível: Diesel

Quantidade de Calor: 0 watts

Porcentagem de Ar teórico: 100

Fluxo de Combustível: 1kg/s

Eficiência do forno: 0,90

Material: AISI 1040

Velocidade do Vento: 20m/s

Altura Relativa do vento: 10m

Condições de terreno: Centros Urbanos

Temperatura do Ar: 290K

Resposta do programa:

Temperatura de Saída: 2379,54 K

Pressão Parcial da Água: 0,01193 MPa

Temperatura de Saturação: 322,38 K

Mistura Ar/combustível: 11,3

Energia Perdida: 25597811,62 Watts

Coeficiente de Convecção Externo: 38,18w/m²k

Coeficiente de Convecção Interno: 168,90 w/m²k

Tabela 13 – Resultados da simulação 04

Diâmetro (m)	Altura (m)	Velocidade dos Gases (m/s)	Cd	Espessura (m)	Tensão (Pa)	Re	Perda de Carga (mm C.A.)
0,1	8,27	1353,86	1,16	0,00312459	37347451,54	143683,11	2464700,444
0,12	7,86	940,18	1,13	0,00147144	59537335,08	169846,05	941401,638
0,14	7,53	690,75	1,10	0,001	88295406,52	195679,87	417266,416
0,16	7,24	528,85	1,06	0,001	124748354,11	221042,97	205777,216
0,18	7,00	417,86	1,02	0,001	168896605,69	246177,75	110406,374
0,2	6,80	338,47	0,98	0,001	220960252,43	271192,03	63331,178
0,22	6,61	279,72	0,93	0,001	282953085,5	295727,9548	38224,929
0,24	6,45	235,05	0,89	0,001	321243523,3	320217,5091	24141,383
0,26	6,31	200,28	0,85	0,001	321243523,3	344597,3998	15827,825
0,28	6,18	172,69	0,80	0,001	321243523,3	368699,3328	10701,803
0,3	6,06	150,43	0,76	0,001	321243523,3	392639,1077	7432,330
0,32	5,93	132,21	0,71	0,001	321243523,3	415646,1387	5267,001
0,34	5,84	117,12	0,66	0,001	321243523,3	439398,1323	3830,689
0,36	5,76	104,46	0,60	0,001	321243523,3	463061,9398	2839,021
0,38	5,69	93,76	0,55	0,001	321243523,3	486794,586	2140,193
0,4	5,62	84,62	0,49	0,001	321243523,3	510261,974	1635,667
0,42	5,56	76,75	0,44	0,001	321243523,3	533762,7942	1267,906
0,44	5,51	69,93	0,38	0,001	321243523,3	557542,9907	995,742
0,46	5,45	63,98	0,33	0,001	321243523,3	580474,2033	788,617
0,48	5,40	58,76	0,28	0,001	321243523,3	603632,3156	631,606
0,5	5,36	54,15	0,28677	0,001	321243523,3	627097,8554	511,179

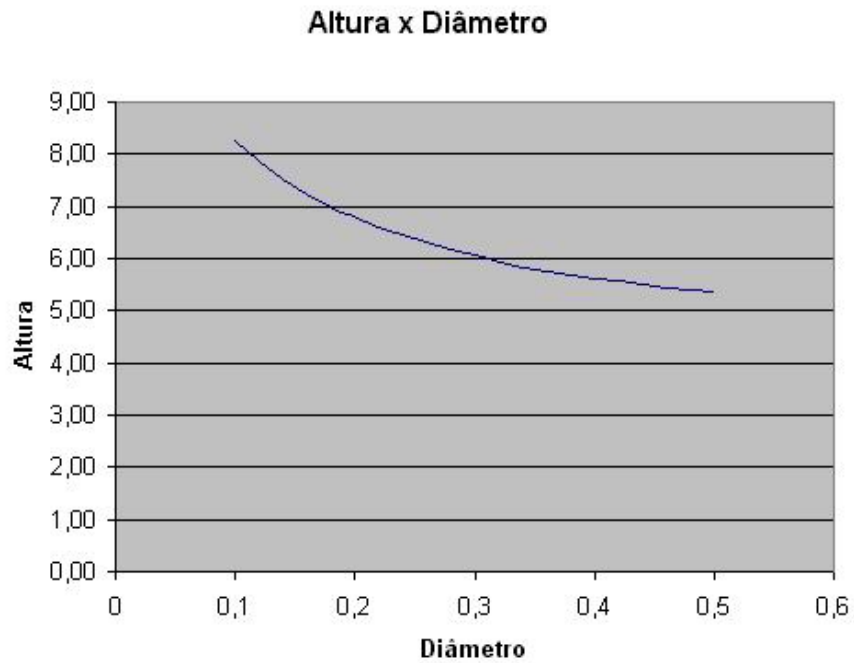


Figura 25 – Gráfico Altura versus Diâmetro simulação 04

Distribuição de temperatura para o diâmetro de 0,30m:

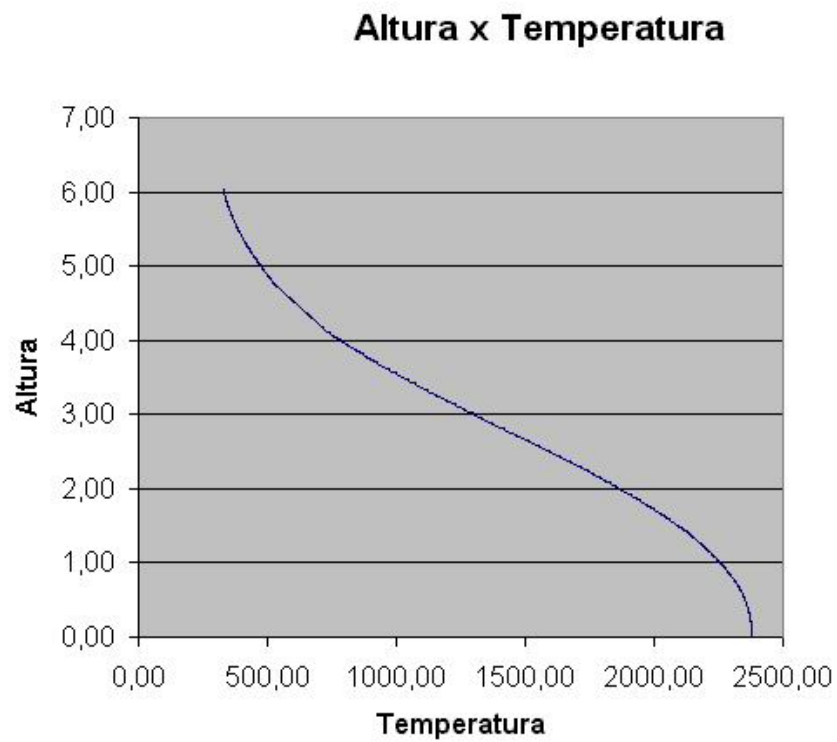


Figura 26 – Gráfico Altura versus Temperatura simulação 04

9.5) Simulação 05

Combustível: Diesel

Quantidade de Calor: 10000000 watts

Porcentagem de Ar teórico:100

Fluxo de Combustível: 1kg/s

Eficiência do forno: 0,90

Material: AISI 1040

Velocidade do Vento: 20m/s

Altura Relativa do vento: 10m

Condições de terreno: Centros Urbanos

Temperatura do Ar: 290K

Resposta do programa:

Temperatura de Saída: 2308,91K

Pressão Parcial da Água: 0,01193 MPa

Temperatura de Saturação: 322,38 K

Mistura Ar/Combustível: 11,3

Energia Perdida: 24720154,71 Watts

Coeficiente de Convecção Externo: 28,65 w/m²k

Coeficiente de Convecção Interno: 133,37w/m²k

Tabela 14 – Resultados da simulação 05

Diâmetro (m)	Altura (m)	Velocidade dos Gases (m/s)	Cd	Espessura (m)	Tensão (Pa)	Re	Perda de Carga (mm C.A.)
0,1	8,22	1353,86	1,16	0,00304589	37803181,93	143421,59	2449798,990
0,12	7,82	940,18	1,13	0,00143874	60147970,42	169595,67	936610,790
0,14	7,50	690,75	1,10	0,001	89003182,50	195464,08	415604,000
0,16	7,21	528,85	1,06	0,001	125788641,65	220785,65	204924,548
0,18	6,96	417,86	1,02	0,001	170843524,55	245779,14	109775,481
0,2	6,76	338,47	0,98	0,001	223582903,10	270713,07	62958,642
0,22	6,58	279,72	0,93	0,001	285539086,6	295367,7866	38051,442
0,24	6,42	235,05	0,89	0,001	321243523,3	319832,971	24029,097
0,26	6,27	200,28	0,85	0,001	321243523,3	343967,3768	15727,491
0,28	6,15	172,69	0,81	0,001	321243523,3	368243,437	10649,852
0,3	5,99	150,43	0,77	0,001	321243523,3	390970,8307	7346,478
0,32	5,90	132,21	0,71	0,001	321243523,3	415100,6672	5240,356
0,34	5,81	117,12	0,66	0,001	321243523,3	438820,1543	3811,011
0,36	5,73	104,46	0,60	0,001	321243523,3	462468,7666	2824,234
0,38	5,66	93,76	0,55	0,001	321243523,3	486151,8037	2128,909
0,4	5,59	84,62	0,49	0,001	321243523,3	509498,9304	1626,936
0,42	5,53	76,75	0,44	0,001	321243523,3	532924,3601	1261,065
0,44	5,48	69,93	0,38	0,001	321243523,3	556692,0254	990,321
0,46	5,42	63,98	0,33	0,001	321243523,3	579516,9451	784,276
0,48	5,38	58,76	0,28	0,001	321243523,3	603305,14	629,267
0,5	5,33	54,15	0,28652	0,001	321243523,3	626094,6765	508,318

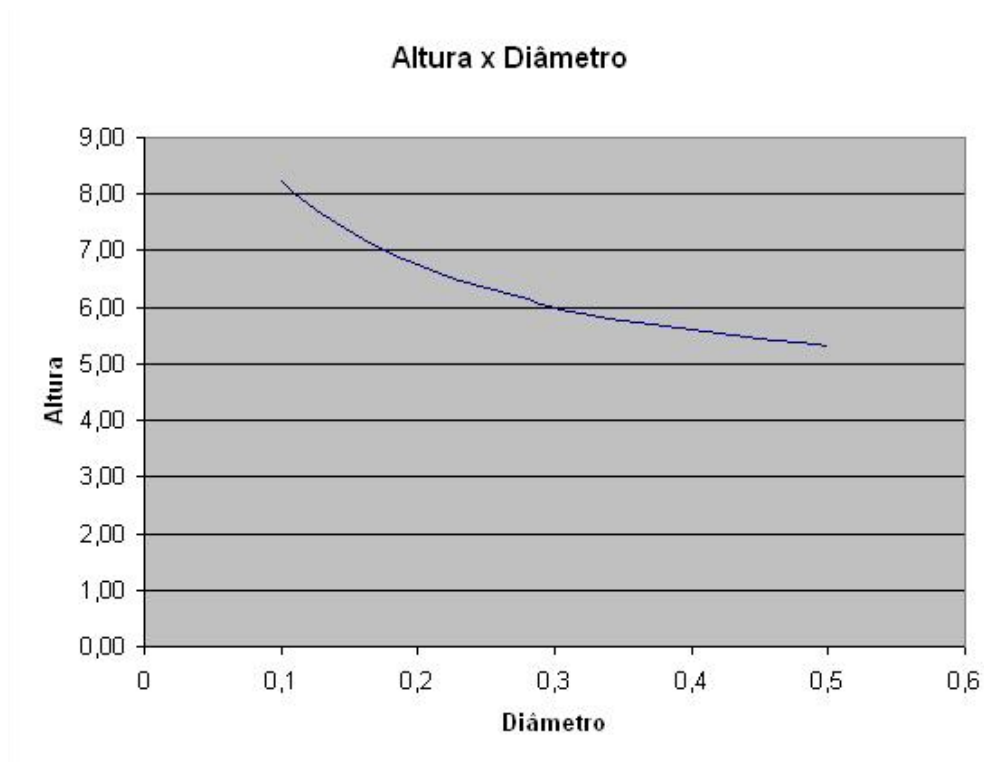


Figura 27 – Gráfico Altura versus Diâmetro simulação 05

Distribuição de temperatura para o diâmetro de 0,30m:

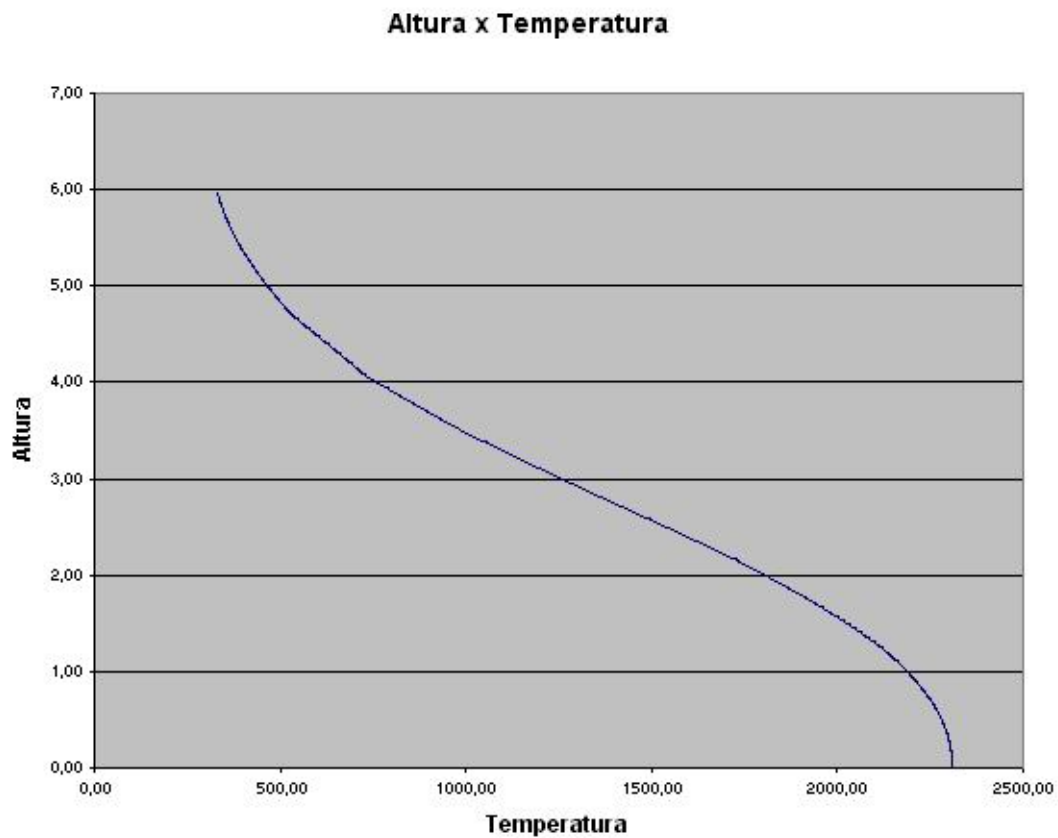


Figura 28 – Gráfico Altura versus Temperatura simulação 05

9.6) Simulação 06

Combustível: Diesel

Quantidade de Calor: 10000000 watts

Porcentagem de Ar teórico: 400

Fluxo de Combustível: 1kg/s

Eficiência do forno: 0,90

Material: AISI 1040

Velocidade do Vento: 20m/s

Altura Relativa do vento: 10m

Condições de terreno: Centros Urbanos

Temperatura do Ar: 290K

Resposta do programa:

Temperatura de Saída: 943,63 K

Pressão Parcial da Água: 0,00312 MPa

Temperatura de Saturação: 297,86 K

Mistura Ar/Combustível: 54,4

Energia Perdida: 37223792,79 Watts

Coefficiente de Convecção Externo: 319,42 w/m²k

Coefficiente de Convecção Interno: 3753,42 w/m²k

Tabela 15 – Resultados da simulação 06

Diâmetro (m)	Altura (m)	Velocidade dos Gases (m/s)	Cd	Espessura (m)	Tensão (Pa)	Re	Perda de Carga (mm C.A.)
0,1	16,62	5062,20	1,12	0,03513948	9247193,65	178842,98	83160765,094
0,12	16,21	3515,42	1,08	0,02429425	13998079,44	213065,47	32595994,919
0,14	15,75	2582,76	1,02	0,01578488	20182127,55	246518,55	14653043,421
0,16	15,26	1977,42	0,96	0,00982923	28080374,11	279167,67	7281855,844
0,18	14,78	1562,41	0,91	0,00602467	37885073,45	311165,27	3913806,637
0,2	14,34	1265,55	0,85	0,00372335	49685959,40	342729,92	2242263,409
0,22	13,93	1045,91	0,80	0,00233527	63711102,47	373841,6122	1352462,304
0,24	13,56	878,85	0,74	0,0014907	80015679,16	404659,5333	852100,731
0,26	13,22	748,85	0,67	0,001	98799734,41	435155,1391	556739,676
0,28	12,92	645,69	0,60	0,001	119967339,3	465511,6422	375629,605
0,3	12,64	562,47	0,53	0,001	143886600,9	495598,4347	260272,484
0,32	12,39	494,36	0,45	0,001	170384206,2	525568,9833	184760,391
0,34	12,15	437,91	0,39	0,001	200021771,7	555240,5839	133804,016
0,36	11,94	390,60	0,32	0,001	232203274,3	584930,6191	98805,081
0,38	11,73	350,57	0,28	0,001	268066880,5	614229,7163	74074,288
0,4	11,55	316,39	0,29	0,001	306357139,4	643648,3778	56437,723
0,42	11,38	286,97	0,30	0,001	321243523,3	672906,1072	43569,569
0,44	11,21	261,48	0,31	0,001	321243523,3	701824,4086	34011,806
0,46	11,06	239,23	0,31	0,001	321243523,3	730847,3859	26869,119
0,48	10,91	219,71	0,32	0,001	321243523,3	759559,218	21424,269
0,5	10,78	202,49	0,32711	0,001	321243523,3	788432,5241	17260,612

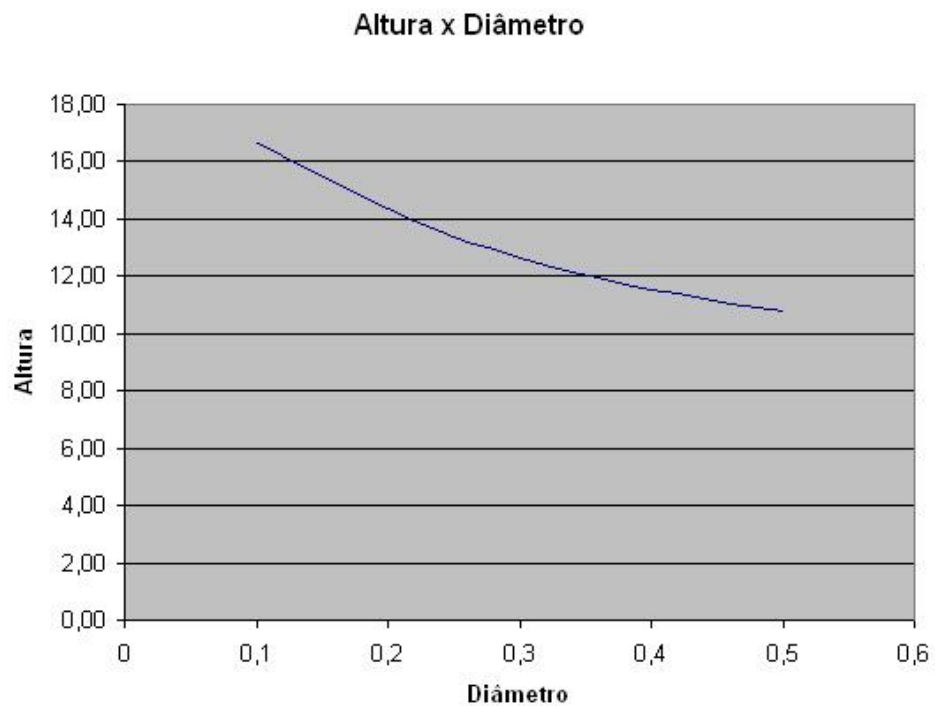


Figura 29 – Gráfico Altura versus Diâmetro simulação 06

Distribuição de temperatura para o **diâmetro de 0,30m**:

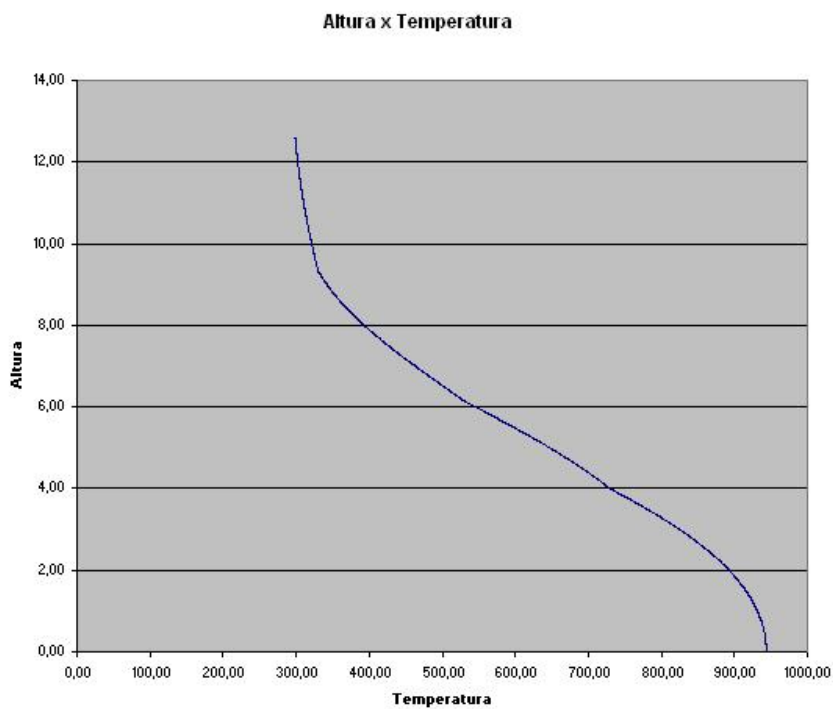


Figura 30 – Gráfico Altura versus Temperatura simulação 06

Utilizando o método proposto por Hildo Pêra[5] e por Giuliano Salvi[9] :

Simulação 1:

Temperatura de Saída: 2348,40 K

Temperatura de Saturação: 332,04 K

Tabela 16 – Resultados das simulação alternativa 01

Altura (m)	Perda de Carga (mmC.A.)	Ta(°C)	Tg (°C)	mm C.A/m
11307,4765	10762,939	17	1067,07	0,952

Simulação 2:

Temperatura de Saída: 1683,54 K

Temperatura de Saturação: 332,04 K

Tabela 17 – Resultados das simulação alternativa 02

Altura (m)	Perda de Carga (mmC.A.)	Ta(°C)	Tg (°C)	mm C.A/m
10743,51351	10095,603	17	1007,79	0,940

Simulação 3:

Temperatura de Saída: 763,76 K

Temperatura de Saturação: 306,30 K

Tabela 18 – Resultados das simulação alternativa 03

Altura (m)	Perda de Carga (mmC.A.)	Ta(°C)	Tg (°C)	mm C.A/m
441995,4371	415339,959	17	535,03	0,940

Simulação 4:

Temperatura de Saída: 2379,54 K

Temperatura de Saturação: 322,38 K

Tabela 19 – Resultados das simulação alternativa 04

Altura (m)	Perda de Carga (mmC.A.)	Ta(°C)	Tg (°C)	mm C.A/m
7449,250296	7432,33	17	1350,96	0,998

Simulação 5:

Temperatura de Saída: 2308,91 K

Temperatura de Saturação: 322,38 K

Tabela 20 – Resultados das simulação alternativa 05

Altura (m)	Perda de Carga (mmC.A.)	Ta(°C)	Tg (°C)	mm C.A/m
7398,906883	7346,478	17	1315,645	0,993

Simulação 6:

Temperatura de Saída: 943,63 K

Temperatura de Saturação: 297,86 K

Tabela 21 – Resultados das simulação alternativa 06

Altura (m)	Perda de Carga (mmC.A.)	Ta(°C)	Tg (°C)	mm C.A/m
317124,3803	260272,484	17	620,745	0,821

10) Conclusões

No programa desenvolvido com este trabalho foram utilizados vários parâmetros do processo de tiragem; com isso o programa se mostrou eficiente para determinar condições físicas da chaminé, como por exemplo, as condições de troca de calor que são bem modeladas pelo programa. O usuário deste programa pode também utilizá-lo para determinar as características físicas de uma instalação de chaminé já existente.

Para os resultados, foram escolhidas três variáveis do processo para compararmos os valores e assim visualizar a diferença causada. Variou-se o tipo de combustível, porcentagem de ar, e a quantidade de calor retirado da câmara de combustão.

A influência da escolha do combustível está no valor da entalpia de formação (Tabela 2) e foram selecionados dois combustíveis que são amplamente empregados em instalações industriais: metano e o diesel. O diesel possui uma entalpia de formação maior que o metano, portanto a temperatura de saída da combustão com o diesel é maior.

Metano: Temperatura de Saída: 2348,40 K

Diesel: Temperatura de Saída: 2379,54 K

A quantidade de calor retirado do processo de combustão faz com que a temperatura de saída dos gases diminua [equação (7)], por isso nas simulações 2,3,5,6 responderam valores de temperaturas menores que as simulações 1 e 4.

A porcentagem de ar da mistura também faz com que a temperatura diminua, já que o ar acaba roubando calor dos gases da combustão. Nas simulações 3 e 6 foram obtidos os seguintes valores para temperatura de saída:

Metano: Temperatura de Saída: 763,76 K

Diesel: Temperatura de Saída: 943,63 K

Porém, como a quantidade de ar aumenta bruscamente a velocidade dos gases, a altura necessária para atingir o ponto de orvalho dos produtos é maior (simulações 3 e 6).

Os valores dos coeficientes de convecção externo e interno, são calculados a cada iteração do programa, portanto os valores que o programa responde são relativos aos últimos 10cm da chaminé. Isso explica a variação destes valores.

Os perfis de temperatura possuem o mesmo formato porque as condições ambientais não foram modificadas e, como as influências são as mesmas, não há motivo para mudança de perfil, somente os valores de altura se diferenciam.

O método proposto por Hildo Pêra [5] e Giuliano Salvi [9], equação (33), é muito simples e não considera as condições de operação da chaminé, portanto a resposta do programa desenvolvido junto com este trabalho apresenta-se mais completa de argumentos para determinar a altura com maior garantia de exatidão nos resultados.

11) Sugestões

NO DIMENSIONAMENTO

Uma das opções para dimensionamento seria a utilização do critério de estados limites que consiste em determinar o estado que corresponde à máxima capacidade de serviço da estrutura, que é atingido quando provoca efeitos

incompatíveis com as condições de uso da estrutura (NBR 8800), como : deslocamentos, vibrações ou deformações.[7]

Uma das vantagens é poder se avaliar a flexão do duto da chaminé, já que esta se demonstra como uma situação crítica devido à ação do vento na lateral.

Com este critério poderá ser feito um dimensionamento mais elaborado melhorando a confiabilidade do projeto com menor custo em materiais.[7]

COMBUSTÃO

É interessante fazer uma análise melhor da câmara de combustão para que possamos também dimensioná-la, tornando assim um projeto de câmara de combustão e chaminé. O processo de combustão também deve ser revisto com outros métodos e não somente pela primeira lei da termodinâmica.

CHAMINÉ

A altura da chaminé não depende somente do ponto de orvalho dos produtos, existem também normas ambientais para serem obedecidas, além da dispersão dos gases a ser considerada. Nosso critério é eficiente para determinar a altura na qual irá ocorrer a presença de água, sendo esta informação importante, porém não é o bastante para determinar altura da chaminé de um projeto real.

TIRAGEM

Devido à grande aplicação nas indústrias, a tiragem mecânica também deve ser considerada como uma opção num projeto de chaminé, junto com a especificação dos equipamentos a serem instalados.

É preciso também fazer algumas modelagens com chaminés em funcionamento para confrontar resultados teóricos e resultados práticos e assim estipular erros do programa.

REFERÊNCIAS

- [1] INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. . **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.,1998.
- [2] VAN WYLEN, Gordon J.; SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Claus. **Fundamentos da Termodinâmica**. 5ª Edição. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda. 1998.
- [3] BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON JUNIOR, E. Russell. **Resistência dos Materiais**. 3ª Edição. São Paulo: Editora Makron Books Ltda. 1995.
- [4] FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 4ª Edição. Rio de Janeiro.: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.,1998.
- [5] PÊRA, Hildo. **Geradores de Vapor**. 1ª Edição. São Paulo: Editora Fama. 1990.
- [6] MATERIAL Property Data, c2004. Disponível em <www.matweb.com>. Acesso em 30 jul. 2004.
- [7] FERREIRA, Walnório Graça. **Dimensionamento de Elementos de Perfis de Aço Laminados e Soldados**. 1ª Edição. Vitória: Editora Grafer,2004.
- [8] GNIELINSKI, V., Int. Chen. Eng.,16,359,1976.
- [9] SALVI, Giuliano. **La Combustion – Teoria y Aplicaciones**. 2ª Edição. Madrid: Editora Dossat S.A.,1975.
- [10] KHAN, M.J.; IQBAL, M.T.; MAHBOOB, S.. A Wind Map of Bangladesh. **Science Direct**, Canadá, 03 out. 2003. Disponível em <www.sciencedirect.com>. Acesso em 30 jul. 2004.
- [11] EXCEL.EXE: Microsoft Excel for Windows application file. Versão 7: Microsoft, c1999. 1 CD Rom. Configuração: Mínima PC 486 ou mais avançado.
- [12] EXCEL.EXE: Microsoft Visual Basic for Windows application file. Versão 6.0: Microsoft, c1999. 1 CD Rom. Configuração: Mínima PC 486 ou mais avançado.
- [13] MOODY, L. F., Trans, ASME, 66,671,1944. GNIELINSKI, V., Int. Chen. Eng.,16,359,1976.
- [14] PETUKHOV, B. S., in T. F. Irvine and J.P. Hartnett, Eds., Advances in Heat Transfer, vol. 6, Academic Press. New York,1970.
- [15] CHURCHILL, S.W., BERNSTEIN, M.. J. Heat Transfer, 99, 300, 1977.

APÊNDICE A

Programa Computacional 'Dimensionamento de Chaminé Industrial'

Este programa foi desenvolvido com o objetivo de dimensionar a altura da chaminé e a espessura da parede com entradas de dados da combustão, dados físicos da chaminé e das condições ambientais e levando em consideração o critério de ponto de orvalho na saída dos gases de combustão.

Linguagem: Visual Basic [12]

Interface: Microsoft Excel 2000 [11] – Utilização de planilhas de valores tabelados de propriedades dos elementos utilizados no programa

Dimensionamento de Chaminé Industrial

Entrada de Dados

Calcular Gráfico Apagar Tudo

Combustão

Reação: C H + (O₂ + 3,76 N₂) → CO₂ + H₂O + O₂ + N₂

Tipo de Combustível:

Quantidade de Calor: Watts

% de Ar Teórico:

Fluxo de Combustível: Kg/s

Eficiência do forno:

Temperatura de saída: K

Pressão Parcial da água: Mpa

Temperatura de Saturação: K

Mistura Ar/Combustível:

Da Chaminé

Diâmetro Interno: m

Material:

Coef. de Segurança:

Descrição do Material

Limite de Ruptura: Mpa

Densidade(massa específica): kg/dm³

Condutividade Térmica: w/m.k

Condições Ambientais

Velocidade do Vento: m/s

Altura Relativa: m

Condições de Terreno:

Temperatura do Ar: K

Dados da Chaminé:

Energia Perdida: Watts

Coefficiente de convecção externo: w/m².k

Coefficiente de convecção interno: w/m².k

Figura 31 – Tela Principal

Entradas de Dados

1.1) Combustão

- Combustível – Contém uma lista de opções de diversos combustíveis.

- Quantidade de calor [w] – Quantidade de calor a ser disponibilizado pela câmara de combustão.
- % de ar teórico – Porcentagem de ar que participa da mistura ar-combustível.
- Fluxo de Combustível [kg/s] – Fluxo de combustível que será injetado na câmara de combustão.
- Eficiência do Forno – valor de 0,01 a 0,99 que representará a eficiência da câmara de combustão, relacionando as perdas de energia.

1.2) Da Chaminé

- Diâmetro Interno [m] – Valor do diâmetro interno que é permitido pelas características construtivas da câmara de combustão.
- Material – Contém uma lista de opções de diversos materiais para a construção do duto da chaminé.
- Coeficiente de segurança – Coeficiente de segurança utilizado na equação para o dimensionamento da espessura da parede do duto da chaminé.

1.3) Condições Ambientais

- Velocidade média do Vento [m/s] – Valor da velocidade média do vento para o cálculo da transferência de calor por convecção externa.
- Altura Relativa [m] – Altura na qual foi medida a velocidade média do vento.
- Condição do Terreno – Contém lista de opções de diversas características de terreno para identificar as condições da área periférica à chaminé.
- Temperatura do Ar [K] – Temperatura mínima da localidade onde será instalada a chaminé, valor este para o cálculo da transferência de calor por convecção na parte externa.
- Velocidade máxima do vento [m/s] – Valor máximo que o vento pode alcançar na região, utilizado no dimensionamento da espessura do duto da chaminé.

3) Estrutura

Sub diametrovariavel

' Declaração das Variáveis

Dim Q ' Quantidade de calor a ser retirada da câmara de combustão por unidade de massa

Dim eficiencia 'Eficiência da câmara de combustão

Dim AC ' Relação ar/combustível

Dim X ' Quantidade de Carbono do combustível

Dim Y ' Quantidade de hidrogênio do combustível

Dim qco2 ' Quantidade de co2 nos produtos da combustão

Dim qh2o ' Quantidade de H2O nos produtos da combustão

Dim o2 ' Quantidade de o2 nos produtos da combustão

Dim n2 ' Quantidade de N2 nos produtos da combustão

Dim ar ' Porcentagem de ar(em relação a estequiométrica) nos reagentes da combustão

Dim armist 'Quantidade de ar que entra na câmara de combustão

Dim arr 'Fração de ar nos reagentes da combustão

Dim total 'Parcela da equação de combustão

Dim Mcomb ' Massa do combustível

Dim fluxo ' Fluxo de combustível

Dim calor 'Quantidade total de calor a ser retirada da câmara de combustão

Dim hcomb ' Entalpia de formação do combustível

Dim hprod1 'Valor inferior da tabela de entalpia

Dim hprod2 'Valor superior da tabela de entalpia

Dim part 'Porcentagem para obter valores intermediários na tabela

Dim dtemp 'Valor entre os valores inferior e o superior da tabela

Dim temp 'Temperatura de saída dos gases da combustão

Dim Psat 'Pressão de saturação da água

Dim Ps1 'Valor inferior da tabela de pressão

Dim Ps2 'Valor superior da tabela de pressão

Dim PartTsat 'Porcentagem para obter valores intermediários na tabela
 Dim dTsat 'Valor entre os valores inferior e o superior da tabela
 Dim Tsat 'Temperatura de saturação da água
 Dim Tpi 'Temperatura da parede interna
 Dim Tpiest 'Temperatura parede interna estimada para os cálculos das propriedades
 Dim Tfiest 'Temperatura do filme interno estimada para os cálculos das propriedades
 Dim Tfeest 'Temperatura do filme externo estimada para os cálculos das propriedades
 Dim Tamb 'Temperatura do ambiente
 Dim Tes1 'Valor inferior da tabela de temperatura para análise dos gases internos
 Dim Tes2 'Valor superior da tabela de temperatura para análise dos gases internos
 Dim PartTsss 'Porcentagem para obter valores intermediários na tabela
 Dim Dmiint 'Valor de mi entre os valores inferior e o superior da tabela
 Dim miint 'valor do Mi interno
 Dim droint 'Valor de ro entre os valores inferior e o superior da tabela
 Dim roint 'Valor de ro interno
 Dim dcpint 'Valor de cp entre os valores inferior e o superior da tabela
 Dim cpint 'Valor de cp interno
 Dim ka 'valor de ka do material da chaminé
 Dim dprint 'Valor de prandt entre os valores inferior e o superior da tabela
 Dim Printe 'Valor de Prandtl interno
 Dim hi 'Coeficiente de convecção interno
 Dim Tex1 'Valor inferior da tabela de temperatura para análise do ar ambiente
 Dim Tex2 'Valor superior da tabela de temperatura para análise do ar ambiente
 Dim PartTx 'Porcentagem para obter valores intermediários na tabela
 Dim dmiext 'Valor de mi entre os valores inferior e o superior da tabela
 Dim miext 'valor de mi externo
 Dim droext 'Valor de ro entre os valores inferior e o superior da tabela
 Dim roext 'valor de ro externo
 Dim dcpext 'Valor de cp entre os valores inferior e o superior da tabela
 Dim cpext 'Valor de cp externo
 Dim dprext 'Valor de prandt entre os valores inferior e o superior da tabela
 Dim Prext 'Número de Prandtl externo
 Dim Reext 'Número de Reynolds externo

Dim Nuext 'Número de Nusselt externo
 Dim he 'Coeficiente de convecção externo
 Dim Reint 'Número de Reynolds interno
 Dim f 'Rugosidade interna da chaminé
 Dim Nuint 'Número de Nusselt interno
 Dim R1 'Resistência térmica da convecção externa
 Dim R2 'Resistência térmica da condução pela parede da chaminé
 Dim R3 'Resistência térmica da convecção externa
 Dim Rtotal 'Resistência térmica total da chaminé por unidade de comprimento
 Dim qtotal 'Quantidade de calor transferida pela parede da chaminé
 Dim tpe 'Temperatura da parede externa
 Dim diametroint 'Diâmetro interno da chaminé
 Dim diametroext ' Diâmetro externo da chaminé
 Dim raoint ' Valor do raio interno da parede da chaminé
 Dim raioext 'Valor do raio externo da parede da chaminé
 Dim espessura1 ' Valor mínimo da espessura de 1mm
 Dim espessura2 'valor calculado pela formula de dimensionamento
 Dim espessura 'Valor da espessura da parede da chaminé
 Dim Too 'Temperatura do ambiente
 Dim Tgas ' Temperatura interna dos gases
 Dim mponto ' Massa por tempo
 Dim Tint ' Temperatura interna
 Dim rough 'Rugosidade da região periférica da chaminé
 Dim Fd ' Força proporcionada pelo vento lateral na chaminé
 Dim Cd ' Coeficiente de arrasto da chaminé
 Dim Mo ' Momento relativo a força do vento
 Dim mat ' ' Descrição do material utilizado na construção da chaminé
 Dim tensaurup ' Tensão de ruptura do material utilizado na construção da chaminé
 Dim tensaoadm1 'Tensão admissível do material pelo metodo 1
 Dim tensaoadm2 'Tensão admissível do material pelo metodo 2
 Dim tensao
 Dim romaterial 'Massa específica do material utilizado na construção da chaminé
 Dim deltatemp ' Diferença de temperatura em cada iteração
 Dim Uoo 'Velocidade média do vento na região da chaminé

Dim Uoomax 'Velocidade máxima do vento na região da chaminé

Dim E 'Modulo de Elasticidade

Dim energiafora 'Energia que está contida nos gases após a saída da câmara de combustão

Dim Dmin ' Diametro mínimo para o intervalo de valores

Dim Dmax ' Diametro máximo para o intervalo de valores

Dim p' contador

'Entrada de Dados da reação de combustão

' Definição do combustível

i = 4

Do While (Worksheets("capa").Cells(12, 3)) <> (Worksheets("hforcomb").Cells(i, 7))

i = i + 1

Loop

X = Worksheets("hforcomb").Cells(i, 2)

Y = Worksheets("hforcomb").Cells(i, 3)

ar = Worksheets("capa").Cells(16, 3)

arr = (ar / 100)

hcomb = Worksheets("hforcomb").Cells(i, 6)

Mcomb = Worksheets("hforcomb").Cells(i, 5)

Worksheets("capa").Cells(10, 10) = X

Worksheets("capa").Cells(10, 12) = Y

co2 = X

Worksheets("capa").Cells(10, 17) = co2

h2o = Y / 2

Worksheets("capa").Cells(10, 20) = h2o

o2 = (X + (Y / 4)) * (arr - 1)

Worksheets("capa").Cells(10, 23) = o2

n2 = 3.76 * (X + (Y / 4)) * arr

Worksheets("capa").Cells(10, 26) = n2

```

armist = co2 + (h2o / 2) + o2
Worksheets("capa").Cells(10, 14) = armist
AC = (o2 + n2) * (Worksheets("hforcomb").Cells(7, 11) / Mcomb)
Worksheets("capa").Cells(18, 15) = AC

```

```

calor = Worksheets("capa").Cells(14, 3)
fluxo = Worksheets("capa").Cells(18, 3)
eficiencia = Worksheets("capa").Cells(20, 3)

```

'Dados do material da chaminé

```

i = 3
Do While (Worksheets("capa").Cells(28, 3)) <> (Worksheets("material").Cells(i, 2))
i = i + 1
Loop

```

```

E = (Worksheets("material").Cells(i, 7))
mat = (Worksheets("material").Cells(i, 2))
romaterial = (Worksheets("material").Cells(i, 5))
tensaorup = (Worksheets("material").Cells(i, 4))
ka = (Worksheets("material").Cells(i, 6))
Worksheets("capa").Cells(26, 8) = (Worksheets("material").Cells(i, 3))
Worksheets("capa").Cells(28, 15) = tensaorup
Worksheets("capa").Cells(29, 15) = romaterial
Worksheets("capa").Cells(30, 15) = ka

```

'Determinação da temperatura de saída dos gases

```

Q = (calor / 1000) / (fluxo)
total = (hcomb - (Q * (1 / eficiencia))) ' favor verificar o sinal
i = 3
Do While co2 * (Worksheets("hprod").Cells(i, 6) + Worksheets("hforcomb").Cells(3,
12)) + h2o * (Worksheets("hprod").Cells(i, 7) + Worksheets("hforcomb").Cells(4, 12))

```

```
+ o2 * (Worksheets("hprod").Cells(i, 8) + Worksheets("hforcomb").Cells(5, 12)) + n2 *
(Worksheets("hprod").Cells(i, 9) + Worksheets("hforcomb").Cells(6, 12)) < total
i = i + 1
```

```
hprod1 = (co2 * (Worksheets("hprod").Cells(i - 1, 6) +
Worksheets("hforcomb").Cells(3, 12)) + h2o * (Worksheets("hprod").Cells(i - 1, 7) +
Worksheets("hforcomb").Cells(4, 12)) + o2 * (Worksheets("hprod").Cells(i - 1, 8) +
Worksheets("hforcomb").Cells(5, 12)) + n2 * (Worksheets("hprod").Cells(i - 1, 9) +
Worksheets("hforcomb").Cells(6, 12)))
```

```
hprod2 = (co2 * (Worksheets("hprod").Cells(i, 6) + Worksheets("hforcomb").Cells(3,
12)) + h2o * (Worksheets("hprod").Cells(i, 7) + Worksheets("hforcomb").Cells(4, 12))
+ o2 * (Worksheets("hprod").Cells(i, 8) + Worksheets("hforcomb").Cells(5, 12)) + n2 *
(Worksheets("hprod").Cells(i, 9) + Worksheets("hforcomb").Cells(6, 12)))
```

Loop

```
part = (total - hprod1) / (hprod2 - hprod1)
dtemp = (Worksheets("hprod").Cells(i, 1) - Worksheets("hprod").Cells(i - 1, 1)) * part
temp = Worksheets("hprod").Cells(i - 1, 1) + dtemp
Worksheets("capa").Cells(12, 15) = temp
```

'Fluxo de gases na saída da câmara de combustão

```
mponto = (fluxo + (fluxo * AC))
```

'Determinação da pressão parcial de saturação do vapor d'agua

'Determinação da temperatura de saturação do vapor d'agua

```
i = 4
```

```
Psat = (h2o / (co2 + h2o + o2 + n2)) * (0.1)
```

```
Do While (Psat) > (Worksheets("agua sat.").Cells(i, 3))
```

```
i = i + 1
```

```
Ps1 = Worksheets("agua sat.").Cells(i - 1, 3)
```

```
Ps2 = Worksheets("agua sat.").Cells(i, 3)
```

Loop


```
Worksheets("grafico").Cells(4, 9) = Tpi
Worksheets("grafico").Cells(5, 9) = L
Worksheets("grafico").Cells(6, 9) = o
Worksheets("grafico").Cells(7, 9) = diametroint
```

incremento = 0.01

L = L + incremento ' Incremento utilizado a cada looping

espessura = 0

$T_{piest} = (T_{amb} + T_{int}) / 2$

$T_{fiest} = (T_{piest} + T_{int}) / 2$

$T_{feest} = (T_{piest} + T_{amb}) / 2$

' Cálculo da Velocidade relativa do vento

i = 2

Do While (Worksheets("capa").Cells(40, 3)) <> (Worksheets("ambiental").Cells(i, 2))

i = i + 1

Loop

Uref = Worksheets("capa").Cells(36, 3)

rough = Worksheets("ambiental").Cells(i, 3)

Zalt = L

'Determinação da velocidade do vento na extremidade superior externa da chaminé

Zref = Worksheets("capa").Cells(38, 3)

$\alpha = 0.096 * \text{Log(rough)} + 0.016 * (\text{Log(rough)})^2 + 0.24$

$U_{oo} = ((Zalt / Zref)^\alpha) * Uref$

'Determinação das propriedades do ar externo

Text = Tamb

j = 4

```

Do While Tfeest > Worksheets("ar prop").Cells(j, 2)
    j = j + 1
    Tex1 = Worksheets("ar prop").Cells(j - 1, 2)
    Tex2 = Worksheets("ar prop").Cells(j, 2)
    Loop
    PartTx = (Tfeest - Tex1) / (Tex2 - Tex1)
    dmiext = (Worksheets("ar prop").Cells(j, 3) - Worksheets("ar prop").Cells(j - 1, 3)) *
PartTx
    miext = Worksheets("ar prop").Cells(j - 1, 3) + dmiext
    droext = (Worksheets("ar prop").Cells(j, 4) - Worksheets("ar prop").Cells(j - 1, 4)) *
PartTx
    roext = Worksheets("ar prop").Cells(j - 1, 4) + roext
    dcpext = (Worksheets("ar prop").Cells(j, 5) - Worksheets("ar prop").Cells(j - 1, 5)) *
PartTx
    cpext = Worksheets("ar prop").Cells(j - 1, 5) + dcpext
    dprext = (Worksheets("ar prop").Cells(j, 7) - Worksheets("ar prop").Cells(j - 1, 7)) *
PartTx
    Prext = Worksheets("ar prop").Cells(j - 1, 7) + dprext
    dkaext = (Worksheets("ar prop").Cells(j, 6) - Worksheets("ar prop").Cells(j - 1, 6)) *
PartTx
    kaext = Worksheets("ar prop").Cells(j - 1, 6) + dprext

```

' Determinação de ro a temperatura ambiente

```

    j = 4
    Do While Tamb > Worksheets("ar prop").Cells(j, 2)
        j = j + 1
        Tex1a = Worksheets("ar prop").Cells(j - 1, 2)
        Tex2a = Worksheets("ar prop").Cells(j, 2)
        Loop
        PartTxa = (Tamb - Tex1a) / (Tex2a - Tex1a)
        droexta = (Worksheets("ar prop").Cells(j, 4) - Worksheets("ar prop").Cells(j - 1, 4))
* PartTxa

```

roexta = Worksheets("ar prop").Cells(j - 1, 4) + roiexta

' Calculo de Re somente para o cálculo de Cd

Uoomax = Worksheets("capa").Cells(44, 3)

Reexte = (roexta * Uoo * diametroint) / miext

i = 4

Do While Reexte > (Worksheets("arrasto").Cells(i, 2))

i = i + 1

Reexte1 = Worksheets("arrasto").Cells(i - 1, 2)

Reexte2 = Worksheets("arrasto").Cells(i, 2)

Loop

PartRe = (Reexte - Reexte1) / (Reexte2 - Reexte1)

dReexte = (Worksheets("arrasto").Cells(i, 3) - Worksheets("arrasto").Cells(i - 1, 3))

* PartRe

Cd = Worksheets("arrasto").Cells(i - 1, 3) + dReexte

' Valor da força que atua sobre a lateral da chaminé

Fd = Cd * raioint * L * roexta * ((Uoo) ^ 2)

' Cálculo da espessura

CS = Worksheets("capa").Cells(30, 3)

tensoadm1 = ((3.14 ^ 2) * E * 1000000000) / (CS * (L / raioint) ^ 2)

tensoadm2 = (tensaorup * 1000000 / CS)

If tensoadm1 < tensoadm2 Then tensao = tensoadm1

If tensoadm1 > tensoadm2 Then tensao = tensoadm2

Mo = Fd * (L / 2) 'momento causado pela força do vento

raioext = (((4 * Mo * raioint) / ((tensao - (romaterial * L * 9.81)) * 3.14)) + (raioint) ^ 4) ^ 0.25


```

espessura1 = raioext - raoint
espessura2 = 0.001
If espessura1 > espessura2 Then espessura = espessura1
If espessura1 < espessura2 Then espessura = espessura2
diametroext = 2 * raioext

```

'Propriedade dos gases internos na chaminé

```

i = 4
Do While (Tfiest > Worksheets("ar prop").Cells(i, 2))
    i = (i + 1)
    Tes1 = Worksheets("ar prop").Cells(i - 1, 2)
    Tes2 = Worksheets("ar prop").Cells(i, 2)
Loop
PartTsss = (Tint - Tes1) / (Tes2 - Tes1)
Dmiint = (Worksheets("ar prop").Cells(i, 3) - Worksheets("ar prop").Cells(i - 1, 3)) *
PartTsss
miint = Worksheets("ar prop").Cells(i - 1, 3) + Dmiint
droint = (Worksheets("ar prop").Cells(i, 4) - Worksheets("ar prop").Cells(i - 1, 4)) *
PartTsss
roint = Worksheets("ar prop").Cells(i - 1, 4) + droint
dcpint = (Worksheets("ar prop").Cells(i, 5) - Worksheets("ar prop").Cells(i - 1, 5)) *
PartTsss
cpint = Worksheets("ar prop").Cells(i - 1, 5) + dcpint
dprint = (Worksheets("ar prop").Cells(i, 7) - Worksheets("ar prop").Cells(i - 1, 7)) *
PartTsss
Printe = Worksheets("ar prop").Cells(i - 1, 7) + dprint
dkaint = (Worksheets("ar prop").Cells(i, 6) - Worksheets("ar prop").Cells(i - 1, 6)) *
PartTx
kaint = Worksheets("ar prop").Cells(i - 1, 6) + dprext

```

'Cálculo do número de Reynolds, Nusselt e o h externo

```

Reext = (roext * Uoo * diametroext) / miext

```

$$\text{Nuext} = 0.3 + (0.62 * ((\text{Reext}) ^ 0.5) * (\text{Prxt} ^ 0.33)) / ((1 + (0.4 / \text{Prxt}) ^ 0.66) ^ 0.25) * (1 + ((\text{Reext} / 282000) ^ 0.625) ^ 0.8)$$

$$\text{he} = (\text{Nuext} * \text{kaext}) / \text{diametroext}$$

'Cálculo do número de Reynolds, Nusselt e o h interno

$$\text{vint} = (\text{mponto} / \text{roint}) / ((\text{raoint} ^ 2) * 3.14)$$

$$\text{Reint} = (\text{roint} * \text{vint} * \text{diametroint}) / \text{miint}$$

$$f = (0.79 * ((\text{Log}(\text{Reint}) / \text{Log}(2.7182818)) - 1.64)) ^ -2$$

$$\text{Nuint} = ((f / 8) * (\text{Reint} - 1000) * \text{Printe}) / (1 + (12.7 * (f / 8) ^ 0.5) * ((\text{Printe} ^ 0.66) - 1))$$

$$\text{hi} = (\text{Nuint} * \text{kaint}) / \text{diametroint}$$

'Resistência térmica da parede da chaminé, da convecção externa e interna

$$\text{R1} = (1 / (2 * 3.14 * \text{he} * \text{raioext} * \text{L}))$$

$$\text{R2} = (\text{Log}(\text{raioext} / \text{raoint})) / (\text{Log}(2.7182818) * 2 * 3.14 * \text{ka} * \text{L})$$

$$\text{R3} = (1 / (2 * 3.14 * \text{raoint} * \text{hi} * \text{L}))$$

'Resistência total

$$\text{Rtotal} = (\text{R1} + \text{R2} + \text{R3})$$

$$\text{qtotal} = (\text{Tint} - \text{Tamb}) / \text{Rtotal}$$

'Determinação das temperaturas interna e externa da parede da chaminé

$$\text{Tpi} = (\text{Tint} - (\text{qtotal} * \text{R3}))$$

$$\text{tpe} = (\text{Tpi} - (\text{qtotal} * \text{R2})) \text{ ' verificar se está certo}$$

$$\text{deltatemp} = (\text{qtotal} / (\text{mponto} * \text{cpint}))$$

$$\text{Tint} = (\text{Tint} - \text{deltatemp})$$

$$\text{p} = \text{p} + 1$$

$$\text{Worksheets("Disttemp").Cells(p, w - 1) = Tint}$$

```
Worksheets("Disttemp").Cells(p, w) = L
```

Loop 'Final do loop para o cálculo de L(comprimento da chaminé)

'Resposta do programa na planilha grafico

```
o = o + 1
altura = L
Worksheets("grafico").Cells(o, 2) = altura
Worksheets("grafico").Cells(o, 1) = diametoint
Worksheets("grafico").Cells(o, 3) = vint
Worksheets("grafico").Cells(o, 5) = espessura
Worksheets("grafico").Cells(o, 6) = tensao
Worksheets("grafico").Cells(o, 4) = Cd
Worksheets("grafico").Cells(o, 7) = Reexte
perdacarga = (0.007 * L * 2 * 3.14 * raioint * (vint) ^ 2 * roint * 9.81) / ((raioint) ^ 2 *
3.14 * 2 * 9.81)
Worksheets("grafico").Cells(o, 8) = perdacarga
Tpi = temp
Tint = temp
altura = 0
L = 0
tensao = 0
espessura = 0
Loop
End Sub
```