

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO MECÂNICO

**PROJETO DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO DE GASES
PROVENIENTES DE UMA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS**

AUTOR: MARCELO OZAWA

ORIENTADOR: PROF. DR. MARCOS DE M. PIMENTA

TRABALHO AVALIADO

1988 COM NOTA DE 10.0

SUMÁRIO

Este trabalho objetiva preencher os requisitos da disciplina PMC - 580 / 581 - PROJETO MECÂNICO I / II pertencentes ao Curriculum do curso de Engenharia Mecânica ministrado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Inicialmente o trabalho apresenta uma introdução sobre tópicos de controle ambiental, em seguida apresenta a análise dos dados de um Projeto, caracterizando-o com planejamento fluxograma, seleção dos equipamentos e descrição da parte processual; em seguida é realizado um estudo teórico dos principais equipamentos (Ciclones e Lavadores do tipo Venturi). Na etapa posterior é desenvolvido um balanço de massa e energia simplificado para obtenção das principais dimensões dos equipamentos envolvidos.

Finalmente, será desenvolvido conjuntamente com demais tópicos, o estudo de caso detalhado da garganta do Lavador Venturi quando acoplado com dampers controladores de vazão e pressão.

É esperado que, a partir desse trabalho, o leitor seja capaz de estudar e analisar outros projetos com fins semelhantes.

AGRADEÇO A TODAS AS PESSOAS QUE DIRETA OU INDIRETAMENTE AJUDARAM NA CONCLUSÃO DESSE TRABALHO. EM ESPECIAL:

- AO MEU ORIENTADOR, PROF. DR. MARCOS DE M. PIMENTA, POR DISPOR-SE AO MEU TRABALHO.**
- AO ENG. OSCAR KAMAKURA (CBC) PELA ORIENTAÇÃO E SUGESTÃO DO TRABALHO.**
- AO SR. SEIITI ISEJIMA (CBC) PELO APOIO NA ÁREA DE INFORMÁTICA.**
- A TODOS MEUS VERDADEIROS AMIGOS.**

.....O. AUTOR.....

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE T. F. :

-AOS MEUS PAIS QUE TANTO AJUDARAM-ME
DURANTE TODA A MINHA VIDA ;

-À MINHA NOIVA VÂNIA PELO APOIO E COM-
PREENSÃO EM TODA A FASE UNIVERSITÁRIA,
E POR TODA A VIDA.

OBRIGADO.

AOS MEUS SOBRINHOS:

ÉRIKA, RODRIGO, CAMILA, FREDERICO, ANDRÉ CÉSAR

E

....À NOVA GERAÇÃO....



ÍNDICE**CAPÍTULO 01 - TÓPICOS DE CONTROLE AMBIENTAL**

1.1 - INTRODUÇÃO	01
1.2 - CONTROLE DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	02
1.3 - NECESSIDADE DE TRATAMENTO DE GASES	04

CAPÍTULO 02 - ANÁLISE DOS DADOS DE PROJETO

2.1 - CONDIÇÕES DE ENTRADA E DE SAÍDA	05
2.2 - PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS COMPONENTES DOS GASES	07

CAPÍTULO 03 - ÁREA PROCESSUAL

3.1 - PLANEJAMENTO DA ESTRUTURA DA PARTE PROCESSUAL DO PROJETO	08
3.2 - FLUXOGRAMA PRELIMINAR (P & D's)	09
3.2.1 - DIAGRAMA DE BLOCOS	09
3.2.2 - FLUXOGRAMA PRELIMINAR	10
3.3 - SELEÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	12
3.4 - DESCRIÇÃO PRELIMINAR DA PARTE PROCESSUAL	16

CAPÍTULO 04 - EQUIPAMENTOS

4.1 - CICLONE	18
4.1.1 - DESCRIÇÃO GENÉRICA	18
4.1.2 - ANÁLISE DE DESEMPENHO	25
4.1.3 - ANÁLISE DO CÁLCULO ESTIMATIVO DA PERDA DE CARGA	38
4.1.4 - EXPERIMENTOS RECENTES	41

4.2	- LAVADOR TIPO VENTURI	46
4.2.1	- DESCRIÇÃO GENÉRICA	46
4.2.2	- ANÁLISE DE DESEMPENHO	51
4.2.3	- AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA	55
4.2.4	- CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS	59
4.2.5	- ESTUDO DE CASO : GARGANTA DO LAVADOR VENTURI	74
4.2.5.1	- PROGRAMA DE CÁLCULO DA ÁREA DA GARGANTA DO LAVADOR VENTURI	78

CAPÍTULO 05 - BALANÇOS PARA DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

5.1	- INTRODUÇÃO	79
5.2	- TORRE DE RESFRIAMENTO	80
5.3	- CICLONE	83
5.4	- LAVADOR VENTURI	86
5.5	- TORRE DE ABSORÇÃO	
5.5.1	- INTRODUÇÃO	90
5.5.2	- PRINCÍPIO DO PROCESSO DE ABSORÇÃO	92
5.5.3	- DIMENSIONAMENTO	93
5.6	- RESULTADO	98
5.7	- DESCRIÇÃO DO PROCESSO	100

CAPÍTULO 06 - PARTE FINAL

6.1	- ANEXOS COMPLEMENTARES	106
6.2	- BIBLIOGRAFIA	107
6.3	- FLUXOGRAMA DE TUBULAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO (P & I)	109

6.4 - DESENHO DOS EQUIPAMENTOS (LAY - OUT)..... 110

CAPÍTULO 01 - TÓPICOS DE CONTROLE AMBIENTAL.

1.1 - INTRODUÇÃO.

Um dos principais problemas que o ser humano tem enfrentado , recentemente , é com relação á preservação do meio ambiente , ou seja á sua própria existência.

O ar atmosférico constitui o meio ambiente no qual nós vivemos e é a respiração vital para o homem , animais e vegetais , além disso alimenta a combustão e é através dele que o som é transmitido.

Com esse ideal vital , o ser humano tem se preocupado com os efeitos que um determinado processo pode causar ao ambiente , no que se refere á Engenharia Industrial. Esta relação é importante na elaboração de projetos , de localização industrial bem como sua operação ou planejamento semelhantes com o mesmo fim em termos de controle de poluição do ar e de ocupação e uso do solo.

✈ Atualmente há Legislações Federais que regulamentam o controle de poluição ambiental , executados pela CETESB e outros órgãos em geral.

Tendo como alicerce esta introdução o presente Projeto toma sentido e necessidade.

1.2 - CONTROLE DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A poluição do ar é um fenômeno decorrente da atividade humana em vários aspectos, dentre os quais destacamos o crescimento populacional, o desenvolvimento industrial e econômico, a concentração populacional e industrial e os hábitos da população.

Apesar de sentida há muito tempo, foi no século XX, principalmente nesta segunda metade, que a poluição do ar assumiu papel de destaque junto à população em geral e junto à comunidade técnico - científica.

Neste século houve várias inovações tecnológicas que juntamente com a explosão demográfica ocorrida, fizeram com que a poluição assumisse este papel de destaque. Dentre essas inovações tecnológicas podemos citar a utilização da energia elétrica, a qual transferiu parte do problema para as usinas termoelétricas à carvão, e também o início efetivo da era do automóvel.

O desenvolvimento da Indústria Química com seus milhares de produtos contribuiu para o aumento de riscos decorrentes da poluição química.

No Brasil, na região do ABC (década de 60) foi detectado problemas de poluição ambiental; foi nessa região que surgiu o CICPAA - Comissão Intermunicipal de Controle da Poluição das Águas e do Ar, o primeiro organismo de controle de poluição, então mantida pelas prefeituras do ABCD e pelas Indústrias da região.

Posteriormente, e analogamente, foi criada a SUSAM - Superintendência de Saneamento Industrial em São Paulo (1971),

a FEEMA - Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente no Rio de Janeiro.

Em maio de 1975, a CETESB absorve a SUSAM e passa a ter poderes também para o controle da poluição do ar em São Paulo, função que exerce até o momento (há Legislações Federais com as quais se apoiam).

Partindo dessa evolução histórica de Controle Ambiental , o que se conclui é que no Brasil , houve uma maior conscientização e participação da comunidade no processo , o desenvolvimento de corpo técnico capaz de lidar com o assunto á transferência e a ao desenvolvimento de tecnologia adequada para a solução do problema ; aprovação da Lei Federal do meio ambiente (Lei 6938 de 31.08.1981) , condições essas que resultaram no encaminhamento das soluções para o problema como por exemplo , o de Cubatão e da região metropolitana de São Paulo.

Finalmente , deve-se ressaltar o papel fundamental que o controle da poluição do ar vem tomando á cada dia.

1.3 NECESSIDADE DO TRATAMENTO DE GASES

No Projeto em questão , existe um grande Incinerador de Resíduos Industriais que por si só , emitiria à atmosfera altos índices no que se refere aos índices de emissão atmosférica permitidos por Legislação Federal.

Assim sendo , torna-se evidente a necessidade de um sistema de tratamento de gases que acoplado à saída dos resíduos incinerados , trate-os de modo que sejam satisfeitos os requisitos mínimos exigidos por Lei.

Por enquanto , esse denominado Sistema de Tratamento é para nós uma caixa preta , pois existem muitas soluções viáveis tanto economicamente quanto tecnologicamente ; com esse intuito , a caixa preta será decifrada , e uma solução possível será apresentada.

O que pode ser previsto , é que como se trata de emissão de poluentes particulados e ácidos , torna-se evidente que o sistema deverá conter coletores de partículas (secos e/ou úmidos) , em um equipamento capaz de absorver parte dos ácidos contidos na vazão de gases.

É válido ressaltar que existem várias soluções possíveis de serem implantadas sem desvantagem nitida , assim sendo a solução apresentada será compatível com as condições de contorno (saída dos gases).

CAPÍTULO 02 - ANÁLISE DOS DADOS DE PROJETO

2.1 - CONDIÇÕES DE ENTRADA E DE SAÍDA

A- Condições de entrada :

Vazão de gases : mínima = 3000 Nm³ / h
 normal = 4500 Nm³ / h
 máxima = 6000 Nm³ / h

Temperatura : mínima = 800 o.C
 operação = 1350 o.C
 máxima = 850 - 1250 o.C

Pressão : 20 mm.c.a. (pressão regulada através do exaustor na saída do sistema)

Composição dos gases :	produtos	% em volume
	CO ₂	7 - 12
	SO ₂	0,1- 0,4
	H ₂ O	2 - 20
	N ₂	60 - 75
	O ₂	7 - 12

outros contaminantes :

Pó + metais pesados (*)	10 gr / Nm ³
HCl	5 gr / Nm ³
SO ₂	3 gr / Nm ³
HF	0,5 gr / Nm ³

(*) metais Cr , Br , Sb , Cu , Mg , Zn , Hg

Pó (90 % Si O₂)

> 5 microns	60 %
1 - 5 microns	10 %
0,5- 1 microns	10 %
0,2- 0,5 microns	6 %
< 0,2 microns	4 %

B - Condições dos gases na saída da chaminé :

Emissão de poluentes corrigidos a 11 % O₂ :

Pó	= 30 mg / Nm ³
SO ₂	= 100 mg / Nm ³
HCl	= 50 mg / Nm ³
HF	= 2 mg / Nm ³

todos os dados em relação á Base Seco

C - Informações sobre o Incinerador

Resíduos : sólido + líquido + gás proveniente de uma
Planta Química

Combustível auxiliar : óleo pesado (classe C)

D - Análise dos dados de Projeto

Pela vazão de gases é possível prever um sistema que satisfaça a uma maior ou menor vazão de gases visto que existem vazões variáveis conforme demanda de incineração , com diferenças de 50 % entre si (da vazão máxima á minima); deverá o sistema poder absorver essas diferenças .

De acordo com dados da temperatura , de inicio poderíamos pensar em resfriar os gases para melhor tratamento dos mesmos , visto que altas temperaturas requer materiais apropriados para o seu manejo , elevando assim, o custo desnecessário do projeto, inviabilizando-o . O decréscimo da temperatura poderia, por exemplo, ser obtido por uma torre de resfriamento.

Pelo dado da pressão (- 20 mm.c.a.) determina que o sistema funcionará de acordo com o gradiente negativo de pressão estabelecido por um ventilador centrífugo ou exaustor em uma posição anterior á chaminé.

Com a composição aproximada dos gases na entrada e na saída do sistema , pode-se concluir que o sistema captará pó, diminuindo sua concentração ; bem como absorver o SO₂ devido a sua possível formação de H₂SO₄ e H₂SO₃ (ambos ácidos),o que

não é conveniente.

Em uma primeira análise , dimensionaríamos o sistema composto de uma Torre de Resfriamento , Coletor de Pó e uma Torre de Absorção.

2.2 - PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS COMPONENTES DO GAS

Esta parte consiste em consultas a tabelas , gráficos e ábacos o que pode ser observado nos anexos complementares no final do trabalho com referências aos equipamentos dimensionados.

CAPÍTULO 03 - AREA PROCESSUAL

3.1 - PLANEJAMENTO DA ESTRUTURA DA PARTE PROCESSUAL DO PROJETO

A partir da análise anteriormente citada , podemos identificar os componentes do sistema :

1. INCINERADOR

2. TORRE DE RESFRIAMENTO

3. EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO :

3.1 COLETORES SECOS

- . Coletores mecânicos inerciais e gravitacionais
- . Coletores mecânicos centrífugos (ex: ciclones)
- . Filtro de tecido (ex: filtro de mangas)
- . Precipitadores eletrostáticos

3.2 COLETORES ÚMIDOS

- . Lavadores com pré-atomização (Lavadores spray)
- . Lavadores com atomização pelo gás (Lavador Venturi)
- . Lavadores com leito móvel
- . Lavadores com enchimento
- . outros

4. EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE GASES E VAPORES

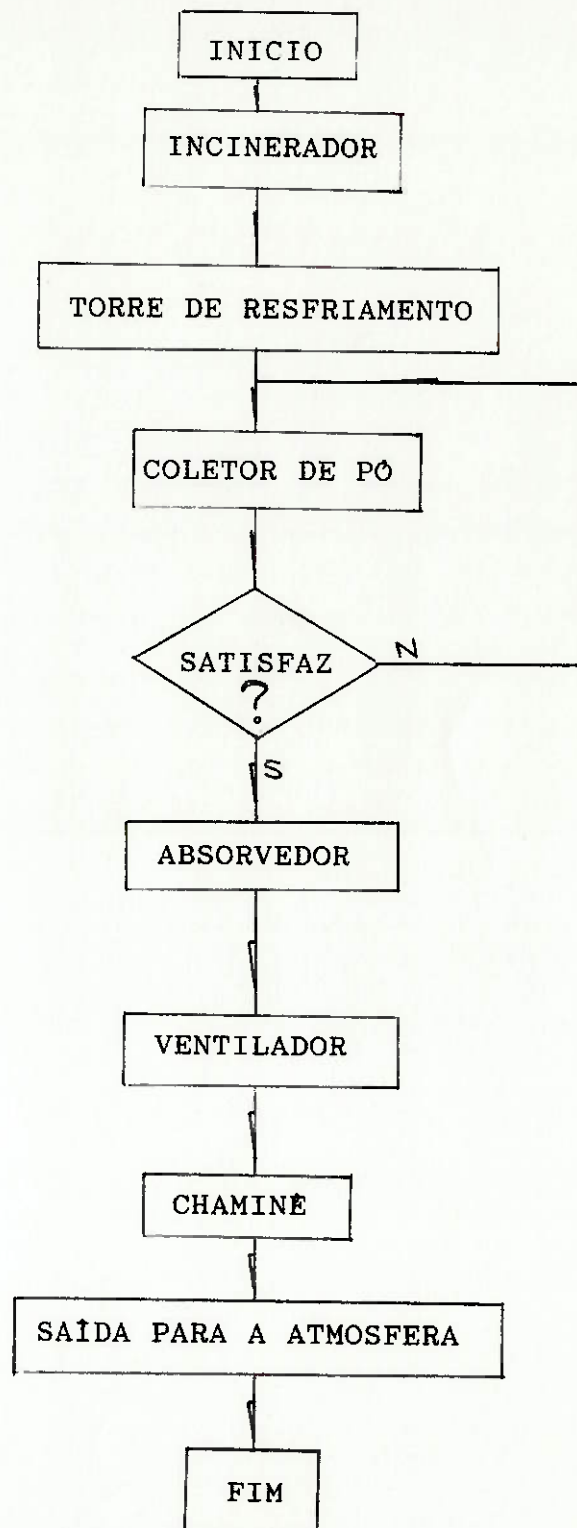
- . Absorvedores
- . Adsorvedores
- . Incineradores de gás com chama direta
- . Controle através de reações químicas
- . Condensadores

A seleção dos equipamentos de controle de poluição do ar a ser utilizado será realizado de acordo com análise de viabilidade técnica , econômica e outros fatores específicos para a fonte em questão.

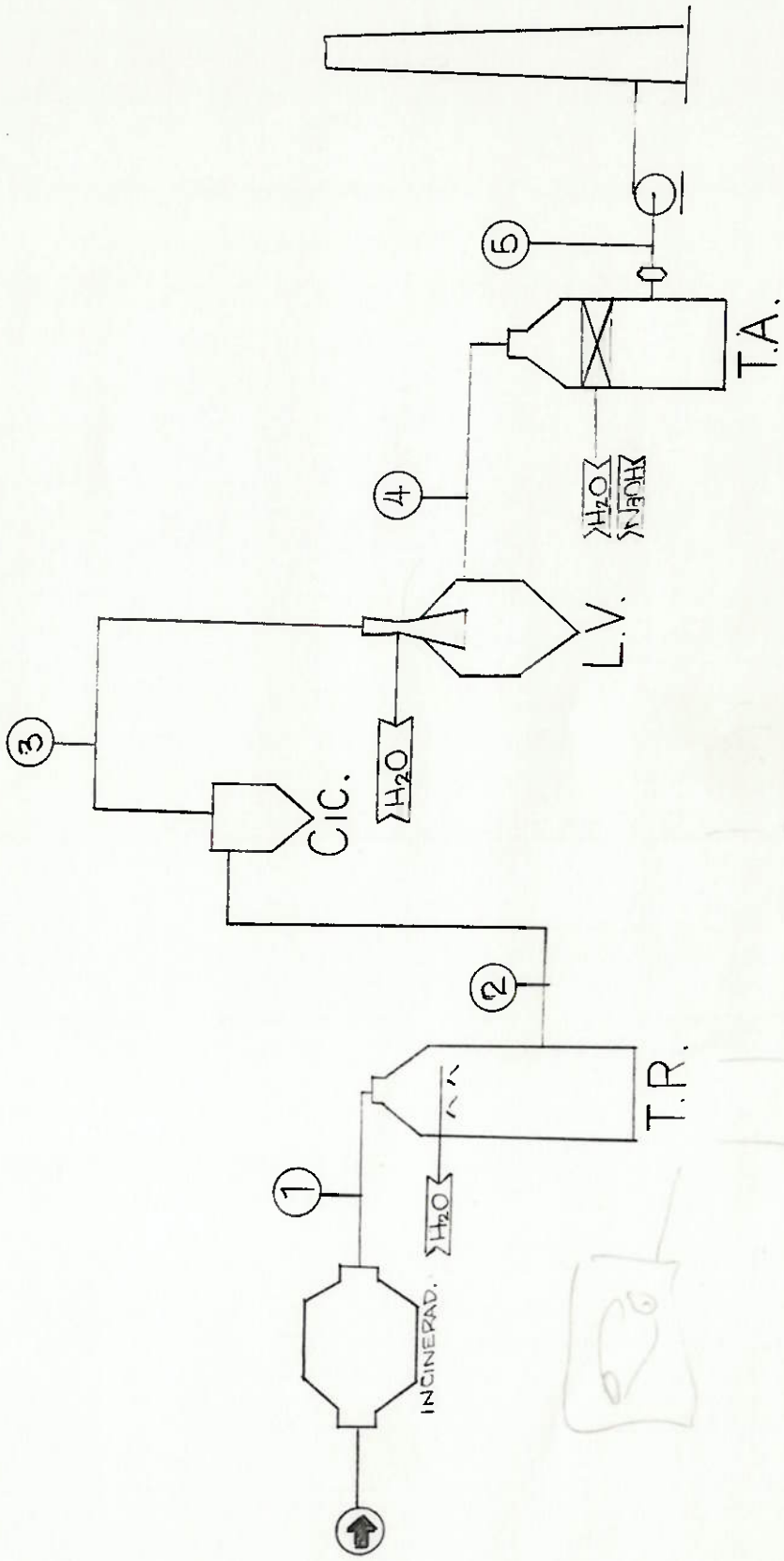
Com esses possíveis métodos, adaptaremos o planejamento para dadas condições.

3.2 - FLUXOGRAMA

3.2.1 - DIAGRAMA DE BLOCOS



3.2.2 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO SISTEMA



3.3 - SELEÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

A. Equipamento 01

Com a finalidade de resfriar os gases , uma torre de resfriamento tem todas as condições viáveis técnicas e econômicas para garantir tal fim , portanto será o equipamento 01 designado.

B. Equipamento 02

Com a finalidade de recolher o material particulado, podemos combinar dois métodos diretos .Em uma primeira etapa colher o particulado mais grosseiro através de coletores secos e em seguida colher o particulado mais fino através de coletores úmidos.

* Primeira Etapa :

A seleção de um ou mais ciclones parece ser a mais conveniente devido a uma série de vantagens sobre os demais tipos : aplicável ao caso , alta eficiência , pequeno espaço requerido, simplicidade de construção e operação, seguro , vida média alta , material de construção de fácil obtenção, perda de carga de baixa à média (depende da eficiência desejada), utiliza poucos equipamentos auxiliares e é disponível no mercado (equipamento e peças) ; além disso , economicamente o seu custo de implantação , operação e manutenção é baixo, comparativamente aos demais . O único equipamento que poderia competir com o ciclone seriam os multi-ciclones pois são mais eficientes , custam menos , resistem melhor à corrosão , no entanto , apresentam um sério problema que é o entupimento frequente , além do mais é preferível que tenha menor eficiência

com menor perda de carga , diminuindo a carga para o ventilador na saída.

* Segunda Etapa :

Como o equipamento não recolhe material particulado abaixo de 5 microns (baixa eficiência) nessa 2a. etapa , selecionaremos um Lavador úmido que supre tal necessidade.

1. Análise de viabilidade técnica e econômica.

- a. Torre de Aspersão.
- b. Lavador de orifício fixo.
- c. Lavador de enchimento.
- d. Lavador de pratos umedecidos.
- e. Lavador de spray de alta pressão.
- f. Lavador venturi.

2 - Matriz de decisão.

CARACTERÍSTICA	A	B	C	D	E	F	PESO
-EFICIÊNCIA (5-10 microns)	3	4	3	4	4	5	10
✓ -ESPAÇO REQUER.	3	2	1	2	1	3	7
-APLICABILIDADE	3	2	1	2	2	4	10
✓ -CONSUMO DE H2O	1	3	2	2	1	2	6
✓ -CONSUMO DE ENERGIA	2	2	2	2	2	2	6
✓ -PERDA DE CARGA	3	1	2	1	2	2	7
-ABSORÇÃO DE VAR. DE VAZÃO	1	1	1	1	1	4	6
-CONTROLES REQUER.	2	2	2	2	2	2	4
-VIDA MÉDIA	3	3	2	1	2	3	4
-MANUT. E INSTAL.	3	2	2	2	2	3	5
✓ -TEMP. MAX. OPER.	4	3	2	2	2	4	6

CARACTERÍSTICA	A	B	C	D	E	F	PESO
✓ -DISPON. NO MERCADO	4	3	3	2	2	3	7
✓ -EQUIP. AUXILIARES	3	2	2	3	3	2	4
-ASSIS. TÉCNICA	2	1	2	2	2	2	4
✓ -CUSTO DE IMPLANT.	2	2	2	2	1	2	9
✓ -CUSTO DE OPERAC.	1	2	2	1	1	2	9
✓ -CUSTO DE MANUTEN.	2	2	1	1	1	1	9

** total : somatória (i= 1 a 17) nota X peso

A : SA = 278

B : SB = 252

C : SC = 211

D : SD = 215

E : SE = 204

F : SF = 314

A partir do modelo , concluímos que o equipamento ' F ' (Lavador do tipo Venturi) é o mais apropriado para tal sistema segundo as características técnicas e econômicas exigidas , caso houvesse algum motivo não técnico para a não escolha do Lavador Venturi , poderíamos optar pelo equipamento ' A ' - Torre de Aspersão.

C. - Equipamento 03

Será devido à conveniência , uma torre de absorção tipo dessulfurizador , que finalmente retirará dos gases teores de SO₂ necessários (Torre de Enchimento).

Feita a análise , optamos pela seguinte estrutura :

1. Incinerador

2. Torre de Resfriamento
3. Ciclones
4. Lavador Venturi
5. Torre de Absorção (Torre de Enchimento)
6. Ventilador e demister
7. Chaminé

3.4 - DESCRIÇÃO PRELIMINAR DA PARTE PROCESSUAL

1. Objetivo

O Sistema de Tratamento objetiva :

- a. Captar o material particulado gerado na incineração de resíduos
- b. Absorver os gases HCl , HF e SO₂ / SO₃ contidos nos gases da incineração.

2. Sequencia do tratamento

2.1 Torre de Resfriamento

* Os gases provenientes do incinerador (T= 1220 o.C) devem ser resfriados (até T = 200 - 250 o.C) para poderem ser tratados , sem que haja condensações ácidas que podem causar corrosões indesejáveis . O resfriamento é realizado através da evaporação da água , faz-se a nebulização de água por meio de bicos aspersores ou enchimento ; a injeção de água na torre é feita transferindo-se água potável de um tanque por meio de uma bomba de recalque.

2.2 Coletores de pó

* A principal finalidade é coletar o material particulado em um ou mais estágios , no nosso caso , utilizando primeiro o ciclone para coletar partículas acima de 5 microns e posteriormente o Lavador Venturi para coletar o particulado mais fino, menor que 5 microns.

2.3 Torre de Absorção

* Na Torre de Absorção faz-se a aspersão de uma solução de NaOH , de forma tal que se absorva o SO₃ / SO₂ nos gases , assim como algum resíduo de HCl e HF .

2.4 Ventilador de tiragem

Próprio para garantir o fluxo , de acordo com pressão negativa do sistema , pode ser do tipo centrífugo de pás retas inclinadas para trás.

2.5 Chaminé

Garantir a saída dos gases em condições pré-estabelecidas , com altura conveniente para dispersão total do gás.

CAPÍTULO 04 - EQUIPAMENTOS

4.1 - CICLONES

4.1.1 - DESCRIÇÃO GÊNÉRICA

Os Ciclones são dispositivos de concepção construtiva bastante simples utilizado para a separação sólido - gás ou sólido - líquido . No caso em questão , trata do primeiro tipo de separação (sólido - gás). São coletores que utilizam primariamente a força centrífuga para coleta de partículas; a captação de partículas por meio de ciclones se faz possível e viável para coleta de material particulado com diâmetro maior que 5 microns (1 E-06 metros). Os ciclones são principalmente empregados quando a carga de material particulado é elevada (maior que 10 g / Nm³) ou quando esta possui um razoável teor de umidade (propensão e formação de aglomerados).

Os Ciclones apresentam grandes vantagens em relação a outros sistemas convencionais de coleta , como por exemplo , baixo custo de construção , equipamento relativamente simples com poucos problemas de manutenção, perda de carga baixa a média , faixa de temperatura de trabalho amplo , coleta a seco , além de requerer um espaço pequeno.

Esse tipo de coletor pode ter entrada tangencial ou radial. São utilizados principalmente como pré-coletores devido á sua eficiência baixa para partículas pequenas , o seu uso apresenta restrições face á impossibilidade de atender normas de emissões mais exigentes.

A eficiência de um ciclone , até a pouco tempo atrás , não era possível de ser matematicamente modelada devido ao

grande número de variáveis envolvidas e ao complicado movimento do ar no interior do mesmo. Podem ser classificados segundo a sua eficiência e perda de carga da seguinte forma:

- Ciclones de baixa eficiência
 - .. ciclones com perda de carga situada entre 5 e 10 cm H₂O
- Ciclones de média eficiência
 - .. ciclones com perda de carga entre 10 e 20 cm H₂O
- Ciclones de alta eficiência
 - .. Ciclones com perda de carga entre 20 e 25 cm H₂O

A separação do material particulado pelo ciclone está baseado na ação da força centrífuga que atua sobre as partículas. O fluxo de gás carregado de pó, geralmente é introduzido pela parte superior do ciclone de maneira a entrar tangencialmente em seu interior como mostra a figura 1 e 2.

O ciclone é basicamente formado por um cilindro de diâmetro D com um tronco de cone associado à sua parte inferior. Observa-se que o fluxo de gás adentra ao ciclone por um tubo de seção retangular e tem por saída, um tubo cilíndrico de diâmetro D_e localizado concentricamente com o eixo do ciclone. Sob a ação da força centrífuga as partículas tendem a se concentrar na fina camada de ar junto à parede interna do corpo do ciclone. Estabelece-se então o movimento helicoidal descendente dos gases, os quais percorrem várias voltas entre as paredes do corpo do ciclone e do tubo de saída (vórtice externo ou outer vortex). Quando o fluxo de gás encontra a parte cônica, inicia-se uma mudança na direção do mesmo, originada por diferença de pressões, de maneira que o fluxo passa a mover-se para cima através do tubo de exaustão (vórtice interno ou inner vortex). Define-se claramente a existência de

dois movimentos helicoidais que podem ser observados na figura 03 e são:

- O primeiro externo e descendente no cilindro e no cone.
- O segundo interno e ascendente partindo da extremidade do cone e saindo através do tubo de exaustão.

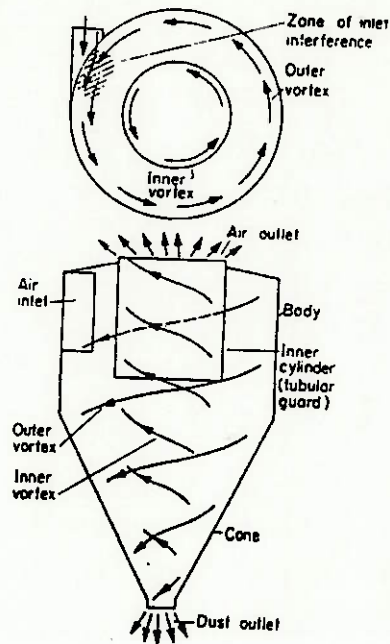
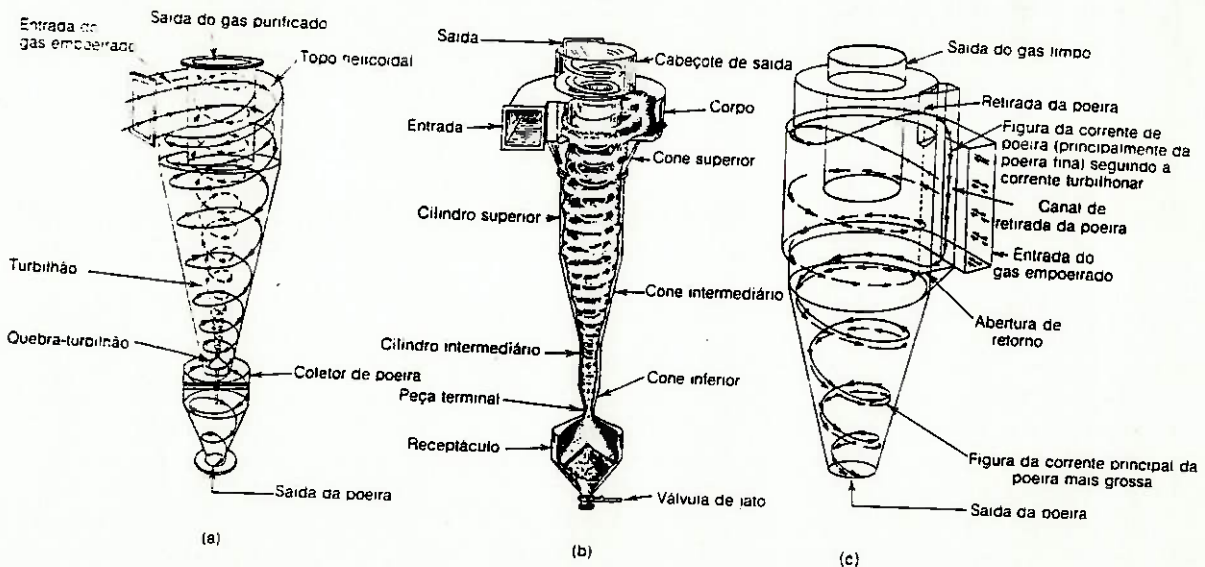


FIGURA 03



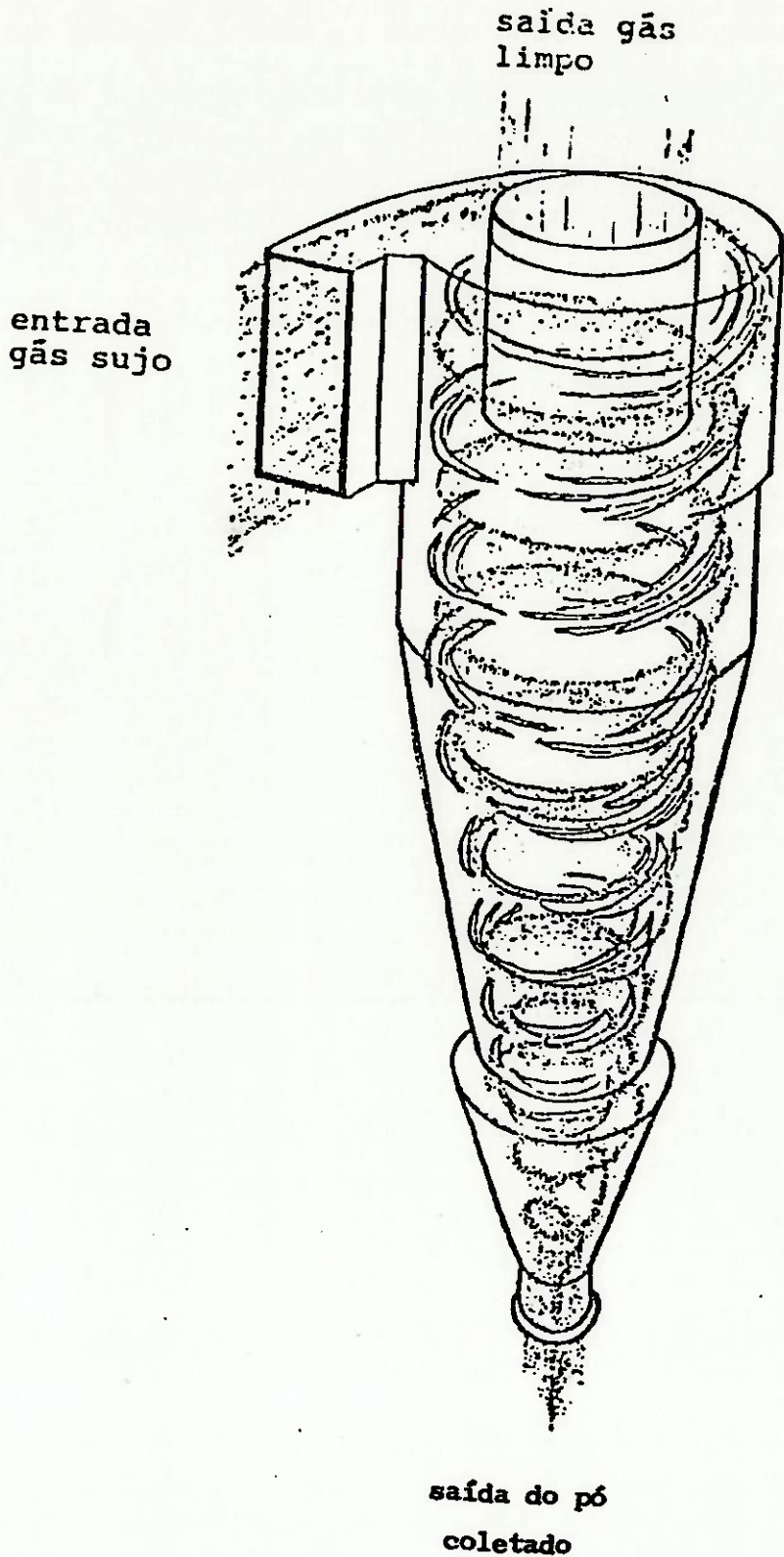


FIGURA 02

FIGURA ESQUEMATICA DE UM CICLONE DE ENTRADA TANGENCIAL

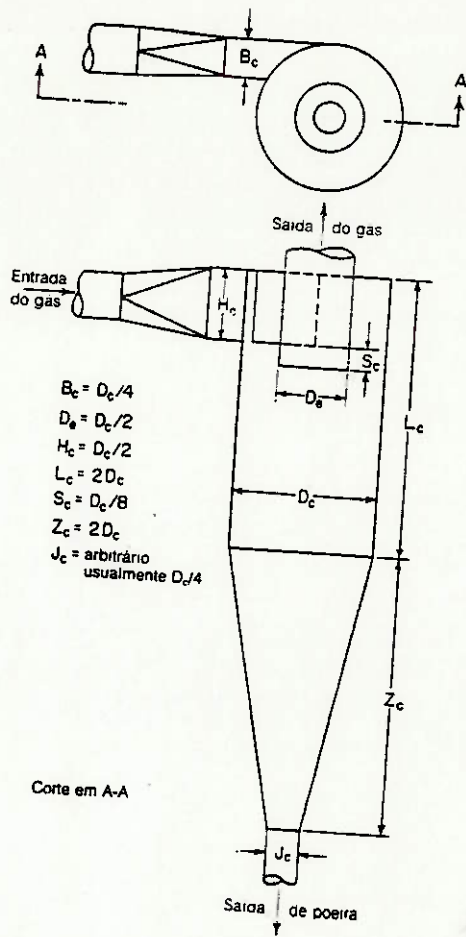
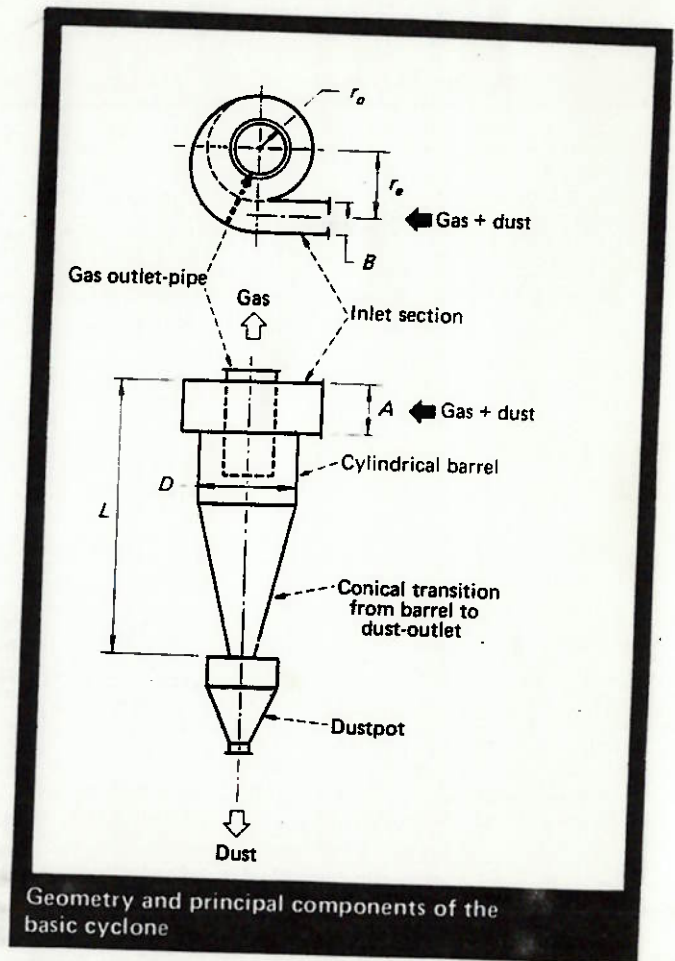


FIGURA 01



Após chocarem -se contra as paredes do ciclone , as partículas movem-se para baixo junto com os gases e são removidos através da boca de descarga localizada no fim da parte cônica .Por vezes , a descarga de pequenas quantidades de ar através desta boca tende a projetar as partículas separadas para fora do ciclone.

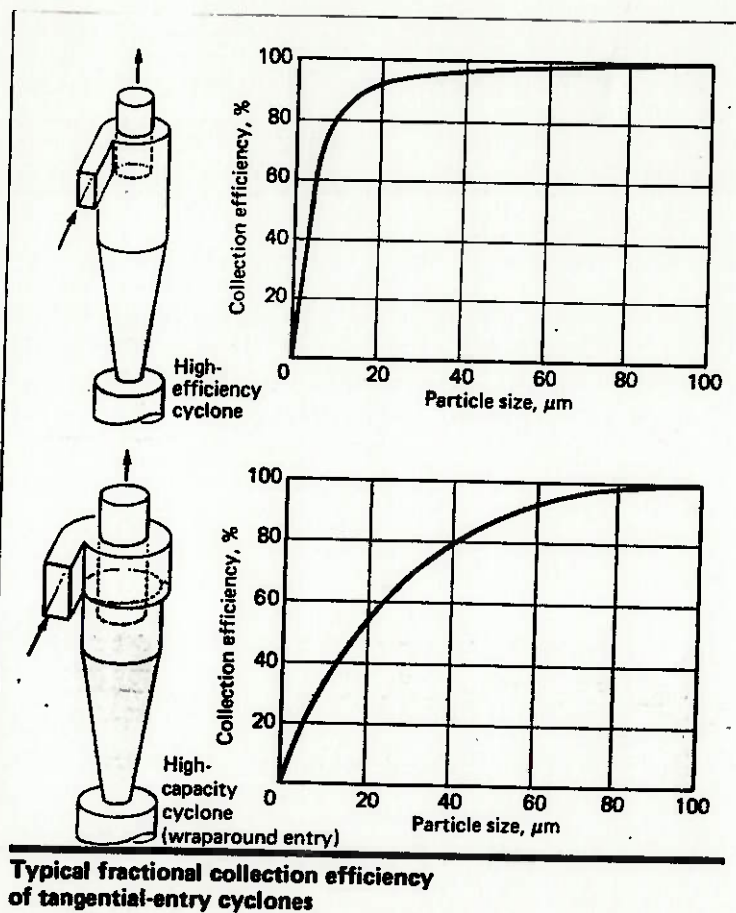
A separação das partículas é tanto melhor quanto menor for o diâmetro do ciclone , maior for a velocidade de entrada dos gases e maior o número de voltas das correntes helicoidais.

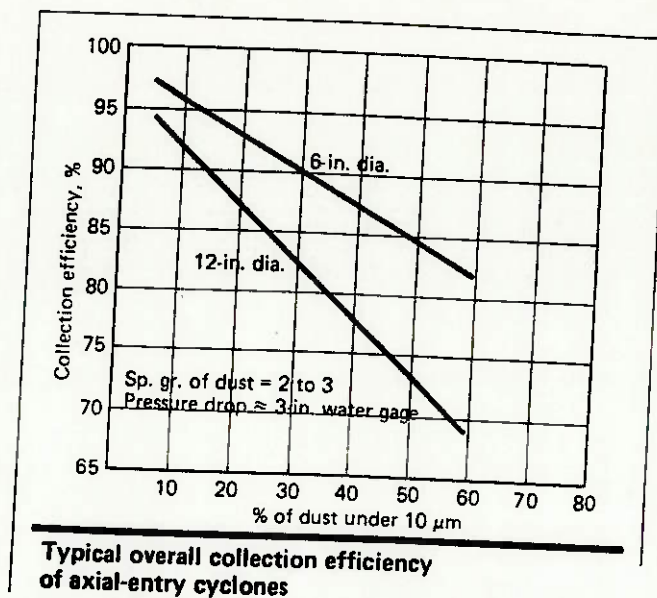
Habitualmente nos interiores dos ciclones , especialmente na porta inferior do cone , existe uma pressão negativa bem acentuada .Quando isso ocorre , o tubo de descarga do material coletado não deve permitir a entrada de ar para dentro do ciclone , uma vez que este arrastaria grande número de partículas de volta ao fluxo de gases .Por outro lado , não deve permitir que o material captado se acumule na parte inferior do cone pois o movimento de rotação do ar reinseriria as partículas na corrente ascendente dos gases e mesmo porque este acúmulo pode chegar até a mudar as características geométricas do ciclone.A solução para este tipo de problema pode ser o uso de válvulas do tipo " mancuna " , as quais se abrem quando é atingido um determinado peso de material particulado sobre a mesma ou então o uso de tampas em série de modo que uma somente se abra quando a outra estiver fechada (compartimento estanque).

4.1.2 - ANALISE DE DESEMPENHO

O escoamento do ciclone é caracterizado pela formação de movimento aspiralado (externo e interno em ciclones de fluxo inverso), bem como o movimento relativo das partículas sólidas em direção á parede do ciclone , tornando bastante complexa a modelagem matemática para o cálculo preciso da eficiência e perda de cargas em ciclones.

As curvas de eficiência podem ser obtidos através do uso de coeficientes experimentais , que são consideradas como boas aproximações .A curva de eficiência de um ciclone , em suma relaciona a eficiência de separação com cada diâmetro do material particulado do que está sendo ciclonado (figuras abaixo - curvas típicas).





Os principais métodos existentes para o cálculo de eficiência de ciclones são de LAPPLE (1951), que utiliza o diâmetro de corte (curt diameter) e o de LEITH - LICHT (1972). Estes métodos são válidos para ciclones de entrada tangencial. A eficiência de ciclones pode ser obtida por dados fornecidos pelos fabricantes . Esses dados , no entanto , devem ser verificados com respeito á sua fundamentação e quanto as condições nas quais os mesmos são aplicáveis.

Nesta análise, objetiva-se obter três pontos notáveis com os quais será possível a definição da curva de eficiência para um dado ciclone . Estes pontos são os seguintes :

1. Diâmetro mínimo (d_0)
2. Diâmetro de corte (d_{50})
3. Diâmetro crítico (d_{100})

cujos modos de obtenção e respectivos significados serão detalhados a seguir.

1. Diâmetro Mínimo (d_0)

O diâmetro mínimo de captação de um ciclone representa

o menor diâmetro que é possível de ser separado do fluxo de gases por este equipamento. Sendo assim, para diâmetros iguais ou menores que o diâmetro mínimo teremos uma eficiência de captação igual a zero (0 %).

Para a obtenção do diâmetro mínimo bem como de outros dois diâmetros notáveis são feitas as seguintes simplificações :

- a.) Não existe influência de uma partícula em movimento sobre as demais e vice versa.
- b.) Uma vez que a partícula se choca com a parede interna do ciclone, é desprezível a possibilidade de que ela volte ao fluxo de gases.
- c.) A lei de STOKES é válida para o movimento da partícula em relação ao escoamento de gases.
- d.) Considera-se que o regime no interior do ciclone seja permanente .
- e.) A velocidade tangencial das partículas é constante em um mesmo raio de rotação.
- f.) A força centrífuga a que a partícula está submetida é muito maior que a força peso atuante sobre a mesma, de forma que instantaneamente o movimento da partícula só possui componentes radial e tangencial .
- g.) As partículas são aproximadamente esféricas.

O diâmetro mínimo é obtido afirmando-se que as forças envolvidas estão em equilíbrio ou seja, a força centrífuga é igual à força de resistência do meio (Lei de STOKES para o regime laminar).

O escoamento de um fluido viscoso e incompressível em

torno de uma esfera foi estudado por STOKES para número de Reynolds $U.D / \nu$ (relação entre forças de inércia e forças viscosas) menor que 1 (um) ; Stokes encontrou que o arrasto (Força que o fluido exerce sobre a esfera) vale :

$$\text{ARRASTO} = 6 \cdot \pi \cdot a \cdot \mu \cdot U$$

Onde ,

a : é o raio da esfera

μ : viscosidade dinâmica absoluta

U : é a velocidade da esfera em relação ao fluido ao longe

nota : $\mu = \nu \cdot \rho$ onde ν : viscosidade cinemática do gás

ρ : massa específica do gás

A força centrífuga atuante sobre a partícula pode ser expressa pela relação :

$$\text{FORÇA CENTRÍFUGA} = m \cdot u \cdot u / R$$

onde , m : massa da partícula

u : velocidade tangencial da partícula

R : distância da partícula ao eixo axial de rotação

Portanto ,valendo-se das simplificações adotadas ,das seguintes considerações ,podemos basear-nos na Lei de Stokes :

a.) o raio da esfera (a) passará a ser o raio da partícula a ser captada.

b.) a velocidade tangencial (u) será a máxima velocidade (p/ o diâmetro mínimo é o pior caso) que uma partícula poderá ter á entrada do ciclone.

Segundo Barth tem-se :

$$\frac{u}{V_e} = \frac{(PI \cdot D_e \cdot (D-b))}{(2 \cdot a \cdot b \cdot \text{alfa}) + (PI \cdot (H-S) \cdot \text{MIN} \cdot (D-b))}$$

onde ,

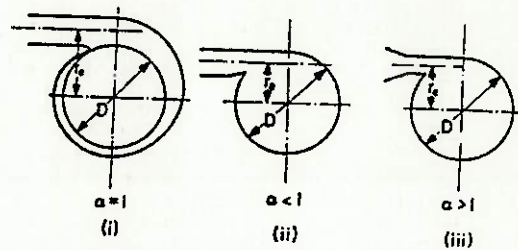
V_e = velocidade á entrada do tubo de saída.

$$V_e = \frac{4 \cdot Q}{3600 \cdot x \cdot PI \cdot (D_e \cdot D_e)}$$

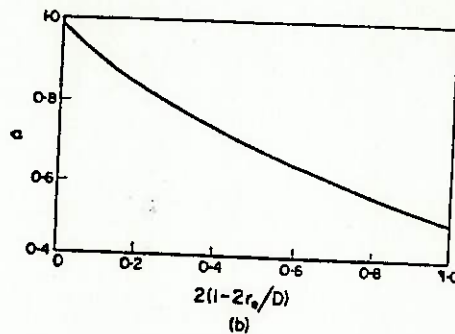
x : No. de ciclones em paralelo

MIN = coeficiente de atrito entre a parede e os gases
(frequentemente $\text{MIN} = 0,02$)

alfa = coeficiente de entrada dos gases no ciclone .Para entrada helicoidal $\text{alfa} = 1$, para outros tipos de entrada ver figuras abaixo.



Entrance designs (a)



c.) a distância da partícula ao eixo axial de rotação
(R) será o valor intermediário entre as duas posições
extremas representadas pelos diâmetros ' D ' e ' D_e ' ,

portanto:

$$R = (D + D_e) / 4$$

Agora ,pois utilizando a Lei de Stokes para regime laminar :

FORÇA CENTRÍFUGA = ARRASTO

$$m \cdot u \cdot u / R = 6 \cdot \text{PI} \cdot a \cdot \text{MI} \cdot U$$

com $a = d / 2$

$$e \quad m = \text{PI} \cdot d \cdot d \cdot d \cdot \text{ROp} / 6$$

portanto
$$U = u \cdot u \cdot \text{ROp} \cdot d \cdot d / (18 \cdot R \cdot \text{MI})$$

onde , $R = (D + D_e) / 4$

Definindo -se tempo de residência (tempo que uma partícula permanece no interior do ciclone) como :

$$t = 3600 \cdot x \cdot V / Q$$

onde : $x = \text{No. de ciclones em paralelo}$

$V = \text{volume efetivo de um ciclone c/ dimensões mostradas na figura 01 .}$

$$V = \frac{\text{PI} \cdot \{ [(H-h) \cdot (D \cdot D \cdot D - B \cdot B \cdot B)] + (D \cdot D \cdot h) - (D_e \cdot D_e \cdot S) \}}{4 \cdot [\frac{4}{(D-B) \cdot 3}]}$$

Com a simplificação (b.) e assumindo-se que as partículas de diâmetro igual ou menor que o diâmetro mínimo percorrem uma trajetória quase que linear entre a boca de entrada e o tubo de escape com uma velocidade U tem-se :

$$t = (D - D_e) / (2 \cdot U) \quad \text{--->} \quad U = (D - D_e) / 2 \cdot t$$

e logo $U = (D - D_e) \cdot Q / (2 \cdot 3600 \cdot X \cdot V)$

portanto da Lei de Stokes + Eq. acima temos :

$$d_0 = \left[\frac{ (D \cdot D - D_e \cdot D_e) \cdot \text{MI} \cdot Q}{U \cdot U \cdot \text{ROp} \cdot X \cdot V \cdot 1600} \right]^{1/2} \cdot 1 \cdot E+06$$

onde ,

d_0 : Diâmetro Mínimo (Microns - m)

U : máxima velocidade tangencial (m / s)

V : volume do ciclone (m³)

Um outro modelo , p/ nossa análise , que será adotado é o modelo deduzido por Gordon e Peisájev , no qual foram adotadas algumas simplificações , de modo que a equação p/ o cálculo do diâmetro mínimo da partícula que o ciclone pode separar é dado por :

$$dp = (9 \cdot MI \cdot (R_2 - R_1) \cdot (R_2 + R_1) / \pi \cdot R_{Op} \cdot V_e \cdot N)^{1/2}$$

em [metros] Eq. 05

onde , MI = viscosidade dinâmica do gás

$R_2 = D / 2$ (D = diâmetro do ciclone)

$R_1 = d / 2$ (d = diâmetro do tubo de saída do gás)

R_{Op} = massa específica da partícula .

V_e = Velocidade de entrada do gás no ciclone.

N = No. de voltas da espiral externa.

Analisando cada parâmetro geométrico e operacional da eq. acima e sabendo-se que o diâmetro da partícula (dp) é indicativo da eficiência de separação de um ciclone , quanto menor ' dp ' melhor o desempenho do ciclone.

Portanto esse modelo também será aplicado com vista a certificação dos resultados , comparando-os.

2. DIÂMETRO DE CORTE (d 50)

O diâmetro de corte de um ciclone representa o diâmetro para o qual uma eficiência de 50 % é obtida na captação do material particulado . Partículas com diâmetro igual ao diâmetro de corte tem , quando em rotação no ponto de máxima velocidade tangencial , 50 % de chances de serem arremessadas contra a parede e 50 % de serem aspiradas pelo tubo de saída. Caso haja uma continuidade no movimento rotacional desta partícula , estará ocorrendo , como no caso anterior , um equilíbrio entre as forças de arrasto e centrífuga.

Considerando-se :

a.) Ponto de máxima velocidade tangencial deve ocorrer sobre o diâmetro $D_e / 2$

b.) Lei de Stokes p/ escoamento laminar, obtém-se:

$$d_{50} = \frac{3 \cdot \left[\frac{Q \cdot \mu \cdot D_e}{7200 \cdot X \cdot \pi \cdot (R_{Op} - R_{Og}) \cdot (H-S) \cdot D} \right]^{1/2}}{V_i \cdot F_i} \cdot 1 \text{ E}+06$$

Onde , d_{50} = diâmetro de corte (micro -metros)

V_i = veloc. média de entrada no ciclone (m/s)

$V_i = Q / (3600 \cdot a \cdot b \cdot x)$

F_i = coeficiente de atrito. (definido como sendo

a relação entre a velocidade tangencial da partícula no raio de entrada do ciclone ($D/2 - b/2$) e a velocidade média no tubo de entrada do mesmo. Experimentalmente obtém-se a relação :

$$UM = \frac{D_e}{2 \cdot (D-b)} + \frac{4 \cdot G \cdot A}{a \cdot b} , \text{ DOIS} = \frac{D_e}{2 \cdot (D-b)} , \text{ TRES} = \frac{2 \cdot G \cdot A}{a \cdot b}$$

$$FI = \frac{\sqrt{UM} - \sqrt{DOIS}}{TRES}$$

G = constante de perda por atrito segundo Stanton e Pannell em " PHYSICAL TRANSPORT (1914) " , G = 0,005 p/ gases.

A = área de contato do ciclone com os gases

$$A = PI \cdot [A1 + \{ (A2) \cdot A3 \}]$$

onde , A1 = Dc . S + D . h

$$A2 = (H-h) \cdot (H-h) + \frac{(D-B) \cdot (D-B)}{4}$$

$$A3 = [B + D] / 2$$

Seguindo outro método , por Lapple temos que

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9 \cdot Mig \cdot b}{2 \cdot PI \cdot Vi \cdot ROp \cdot Nv}}$$

onde :

d 50 = diâmetro de corte

Mig = viscosidade do gás.

a = altura da entrada do ciclone

Vi = Velocidade do gás na entrada do ciclone

ROp = densidade da partícula

Nv = No. de voltas do "vortex" (3 a 10)

Este segundo método servirá á outro exemplo p/ certificação e comparação.

3. DIÂMETRO CRÍTICO (d 100)

O diâmetro crítico de um ciclone representa o diâmetro de partícula a partir da qual a eficiência de captação é de 100 % Inicialmente a principal hipótese para a obtenção deste

ponto notável foi a de que as partículas cujo diâmetro eram iguais ou maiores que o diâmetro crítico colidiram com a parede do ciclone sem mudar sua trajetória. Em outras palavras, estas partículas manteriam sua direção de movimento após deixar a boca de entrada do ciclone, atravessando o fluxo de gases tangencialmente para atingir a superfície do mesmo. Segundo Davies em Proc. Instr. Mechanical Engineering (1951), admite-se que estas partículas possam se mover através de uma secção anelar em movimento semelhante a uma vórtice livre. Considerando o tempo de residência t como função da vazão de gases e das características do ciclone, obtém-se a seguinte expressão :

$$d_{100} = \frac{3 \cdot E+06}{\left[\frac{A \cdot B}{(C+D)} \right]^{1/2}}$$

onde :

$$A = \frac{Q \cdot M_{Ig} \cdot R_{Og}}{3600 \cdot x \cdot 2 \cdot V_i \cdot V_i \cdot (R_{Op} - R_{Og}) \cdot \pi}$$

$$B = 1 - \left[\frac{2 \cdot D_e}{3 \cdot D} \right]^4$$

$$C = \frac{H-h}{D-B} \cdot \frac{D \cdot D \cdot D - B \cdot B \cdot B}{D \cdot D}$$

$$D = \frac{(h-s)}{D} \cdot \left[\frac{D_e}{D} \right]^2$$

Segundo o Método de Lapple :

$$d_{100} = \sqrt{\frac{18 \cdot M_{Ig} \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot V_i \cdot R_{Op} \cdot N_v}}$$

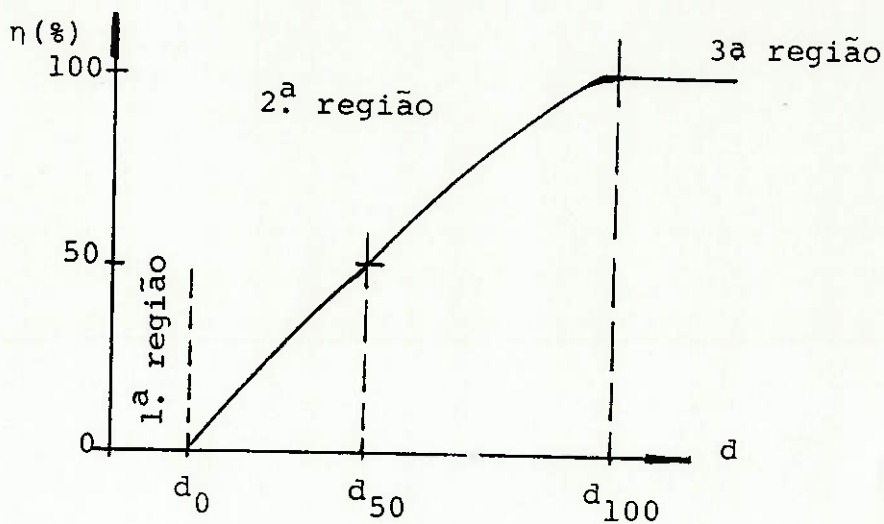
que servirá de certificação e comparação .

* AJUSTAMENTO DA CURVA DE EFICIÊNCIA

Definido os três pontos notáveis, torna-nos possível determinar a curva de eficiência (curva de eficiência fracionária, a qual, correlaciona o diâmetro da partícula com a eficiência de captação do ciclone para a mesma).

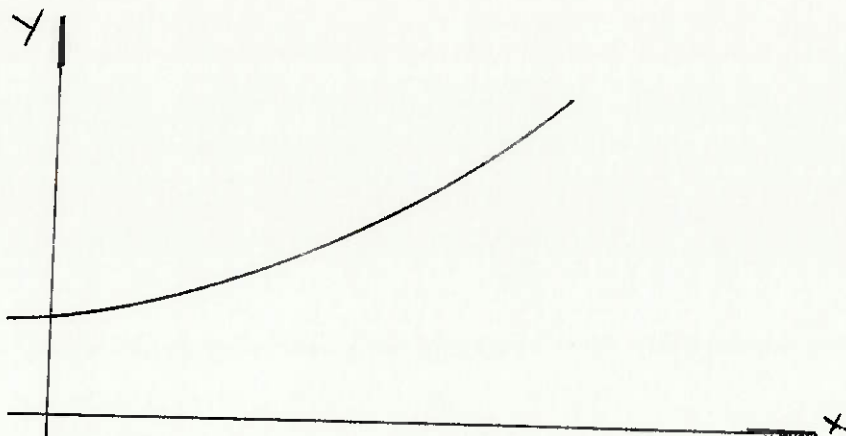
Pode-se dividir a curva de eficiência em três regiões distintas para um diâmetro qualquer de partícula d , a saber :

- a.) região 01 - $d < d_0$... eficiência = 0 %
- b.) região 02 - $d_0 < d < d_{100}$.. $0 < ef. < 100$ %
- c.) região 03 - $d > d_{100}$... eficiência = 100 %



Na figura acima observa-se que na região 02 existe um relacionamento entre diâmetro e eficiência de captação que pode ser aproximada por uma função exponencial. Procede-se ao ajuste de uma curva nesta região da seguinte forma :

Seja a eq. genérica $y = a \cdot e^{(b \cdot x)}$ de uma curva de acordo com a figura 8 onde tem-se os coeficientes



$$b = \frac{\sum (x_i \cdot \ln y_i) - (1/n) \cdot (\sum Sx_i) \cdot (\sum S \ln y_i)}{\sum (x_i \cdot x_i) - (1/n) \cdot (\sum Sx_i) \cdot (\sum Sx_i)}$$

$$a = \text{EXP} \left[\frac{\sum S \ln y_i - b \cdot \sum Sx_i}{n} \right]$$

sendo os pontos (X_i , Y_i) os seguintes (n = 3):

$$(X_1 , Y_1) = (0 , d_0)$$

$$(X_2 , Y_2) = (50 , d_{50})$$

$$(X_3 , Y_3) = (100 , d_{100})$$

obtem-se assim a curva de eficiência fracionária em função do diâmetro da partícula p/ esta região.

MÉTODO (02 ; PARA O CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DE COLETA.

A teórica aprovação para o cálculo da eficiência de coleta de um ciclone desenvolvida por Leith e Licht é baseada na idéia da continuidade radial da parte traseira das partículas não coletadas ,seguido do cálculo de um médio tempo de residência para o gás com ciclone de entrada tangencial .A tabela I mostra típicos com todas as dimensões necessárias e fornece valores das dimensões relativas para vários tipos de projetos . A derivação da equação de projeto é dado por Leith and Licht,

Grau ciclone ou fracionária eficiência pode ser calculada por :

$$n_i = 1 - \exp \left[-2 \cdot (A)^{\frac{0,5}{n+1}} \right]$$

onde ,

$$A = \frac{G \cdot TALI \cdot Q \cdot (n+1)}{Dc \cdot Dc \cdot Dc}$$

$$TALI = ROP \cdot Dpi \cdot Dpi / (18 \cdot MI)$$

$$G = 8 \cdot Kc \cdot / (Ka \cdot Ka \cdot Kb \cdot Kb)$$

O expoente de 'vortex', n, pode ser calculado em função do diâmetro do ciclone com Dc em 'feet' e temperatura, T, em graus F :

$$n = 1 - \left[1 - \left(\left(12 \cdot Dc \right)^{0,44} / 2,5 \right) \cdot \left[(T+460)/530 \right]^{0,3} \right]$$

Portanto obtém-se a eficiência para uma dada distribuição de particulado :

$$nT = S (mi \cdot ni)$$

4.1.3. ANÁLISE DO CÁLCULO ESTIMATIVO DA PERDA DE CARGA

Numa avaliação do desempenho de ciclones , o melhor projeto deverá ser aquele que apresenta uma máxima eficiência , aliada a uma mínima perda de carga , o que obviamente implica menor consumo de energia. Com relação ao cálculo da perda em ciclones , existem várias proposições ; dentre as quais há duas fórmulas que tendem a melhor aproximação dos resultados experimentais. Uma é a equação desenvolvida por Shepherd e Lapple , experimentalmente :

$$DP = 0,548 \cdot RO_f \cdot Ve \cdot Ve \cdot a \cdot b / (d \cdot d) \quad (03)$$

[DP] em mm.c.a.

Ve : veloc. de entrada

a . b : dimensões do bocal de entrada

d : diâmetro de saída

RO_f : densidade do fluido

e outra desenvolvida por Casal E Martinez - Benet :

$$Dp = 0,0347 \cdot RO_f \cdot Ve \cdot Ve \cdot [11,3 \cdot A + 3,33]$$

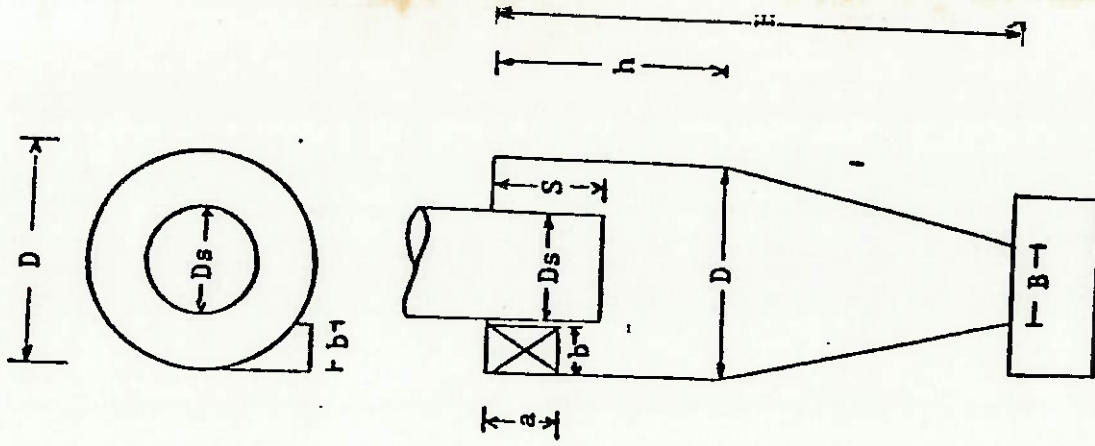
$$A = (a \cdot b \cdot a \cdot b) / (d \cdot d)$$

[DP] em mm.c.a.

A perda de carga caso exceda a 2500 N / m² , exige uma alteração dos parâmetros geométricos para diminuir DP , até ser menor que este limite.

Segue-se características geométricas segundo 3 autores , Lapple , Stairmand e Swif:

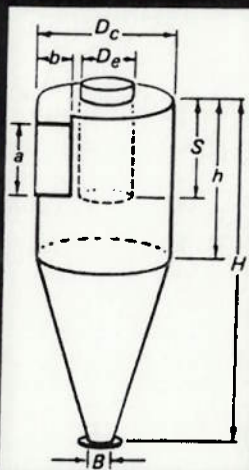
RELAÇÕES GEOMÉTRICAS PADRONIZADAS DE
CICLONES DE ENTRADA TANGENCIAL



ELEMENTO CARACTERÍSTICO	SÍMBOLO	Autor	
		LAPPLE	STAIRMAND SWIFT
Diâmetro do Corpo Cilíndrico	ω	1,0	1,0
Altura de Entrada	a	0,5 D	0,44 D
Largura de Entrada	b	0,25 D	0,21 D
Profundidade do Duto de Saída	S	0,625D	0,5 D
Diâmetro do Duto de Saída	Ds	0,5 D	0,4 D
Altura do Corpo Cilíndrico	h	2,0 D	1,4 D
Altura Total	H	4,0 D	3,9 D
Diâmetro do Duto de Descarga do Pó	B	0,25 D	0,4 D

Design configurations for tangential-entry cyclone

Table I



Nomenclature	High-efficiency		General-purpose		
	Stairmand [12]	Swift [15]	Lapple [4]	Swift [15]	Peterson & Whitby [8]
D_c body dia.	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
a inlet height	0.5	0.44	0.5	0.5	0.583
b inlet width	0.2	0.21	0.25	0.25	0.208
S outlet length	0.5	0.5	0.625	0.6	0.583
D_e outlet dia.	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
h cylinder height	1.5	1.4	2.0	1.75	1.333
H overall height	4.0	3.9	4.0	3.75	3.17
B dust outlet dia.	0.375	0.4	0.25	0.4	0.5
l natural length	2.48	2.04	2.30	2.30	1.8
G $8 K_c / K_a^2 K_b^2$	551.3	699.2	402.9	381.8	324.8
N_H $16 ab / D_e^2$	6.40	9.24	8.0	8.0	7.76
G/N_H	86.14	75.67	50.36	47.7	41.86

4.1.4 - EXPERIMENTOS RECENTES

* Análise teórica relativa aos parâmetros influentes no desempenho de ciclones.

Pode-se analisar teoricamente a eficiência e a perda de carga em ciclones, em função de parâmetros geométricos e operacionais, a partir de modelos teóricos obtidos através de uma série de hipóteses simplificadoras.

Analisando cada parâmetro geométrico e operacional da equação (05), e sabendo-se que o diâmetro da partícula (d_p) é indicativo da eficiência de separação de um ciclone, quanto menor for ' d_p ' melhor o desempenho do ciclone. Os principais parâmetros geométricos do ciclone são apresentados na figura (07)

--- Viscosidade dinâmica do fluido (μ) : pela equação 05 verifica-se que uma menor viscosidade implica em separação de partícula de menor diâmetro, significando uma melhor eficiência. Sproll, com resultados experimentais mostra que um carregamento com finos no escoamento provoca uma diminuição da viscosidade e fator de atrito, mostrando também que o desempenho do ciclone é melhorado. Como também a viscosidade do gás aumenta com a temperatura, o acréscimo de temperatura significará um decréscimo na eficiência. Isto foi verificado experimentalmente por Kreft et alii, onde com o aumento da temperatura do gás a eficiência do ciclone diminui. Em ambos os casos são comprovadas as previsões teóricas.

--Distância ($R_2 - R_1$) como $R_2 = D / 2$ e $R_1 = d / 2$, da

equação (5) temos $(R_2 \cdot R_2 - R_1 \cdot R_1) = (R_2 - R_1) \cdot (R_2 + R_1)$, portanto para $(R_2 - R_1)$ menor , teremos uma melhor eficiência , entretanto este valor não poderá ser muito pequeno, uma vez que isso poderá provocar entupimento nesta região. Considerando $(R_2 - R_1)$ constante , porém aumentando $(R_2 + R_1)$, o que significa aumentar o diâmetro do ciclone , implica numa deterioração da eficiência de coleta do ciclone . Isto é comprovado por diversos autores uma vez que os ciclones de menor diâmetro são de alta eficiência.

--Massa específica da partícula (R_{Op}) : Pela equação (5) , maior massa específica resulta em melhor eficiência , o que é comumente observado.

--Número de voltas da espiral externa (n) : O número de voltas da espiral nos ciclones está associado diretamente à altura H . Assim conforme a equação (5) , um aumento da altura , implica em maior eficiência .^{*} Por isso os ciclones de alta eficiência tem grande altura e pequeno diâmetro. Rosin et alii mostrou a partir de resultados experimentais que a eficiência é uma função do número de voltas da espiral , revelando ainda que , aumentando o número de revoluções , a diferença na eficiência para vários tamanhos de partícula diminui, sendo a redução da diferença mais acentuada para velocidades de entrada maiores , conforme figura 8.

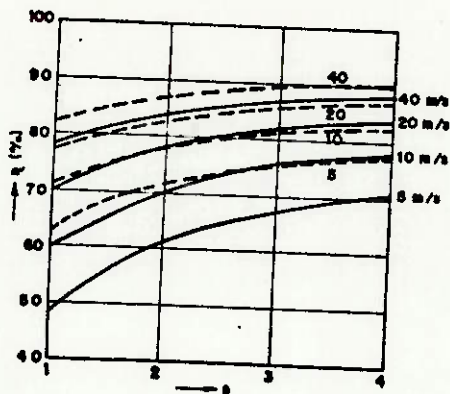


FIGURA 08

Eficiência como uma função do número médio de revoluções no ciclone [—] 40% das partículas acima de mesh 70; [---] 20% das partículas acima de mesh 70; $D = 3$ m; $b = 0,5$ m; $\rho_p = 1200$ kg/m³; $t = 20$ °C (Fonte [8]).

-- Velocidade de entrada (V_e) : sem dúvida um dos parâmetros mais importantes no desempenho de ciclones . Conforme a eq. (5) , o aumento da velocidade resulta em melhor eficiência. Entretanto a partir de resultados experimentais , Koch e Licht limitaram a velocidade de entrada a $V_e / V_s = 1,36$ quando passa a ocorrer a reentrada de partículas na corrente , desfavorecendo a separação , além do que , maior velocidade implica em uma maior perda de carga para o ciclone . Assim Martinez e Casal , limitam a $15 \text{ m/s} < V_e < 30 \text{ m/s}$, $DP \leq 2500 \text{ N/m}^2$.

* RESULTADOS E COMENTARIOS

- Medições no escoamento mostram velocidades elevadas junto a parede , decrescendo até o centro onde tem se uma região anelar de vácuo (ver figura 10);
- Medições do campo de velocidades indicam a existência de movimento espiralado.
- No estudo da perda de carga , valores experimentais preliminares são plotados num gráfico , ao lado das curvas de resultados teóricos calculados via

computador, figura (09).

- O resultado mais importante foi a constatação do funcionamento do ciclone na posição invertida, o que permite concluir que o processo de arraste do material separado não é pela força da gravidade e sim por forças de arraste decorrente, provavelmente, da componente de velocidade axial. A vantagem decorrente dessa constatação é a possibilidade de trabalhar com ciclone invertido de forma que as partículas separadas estarão em nível mais elevado do que permite a sua transferência para o local de uso, ou meio de transporte, por meio de gravidade. Isto elimina o uso de correias ou outro tipo de carregamento.

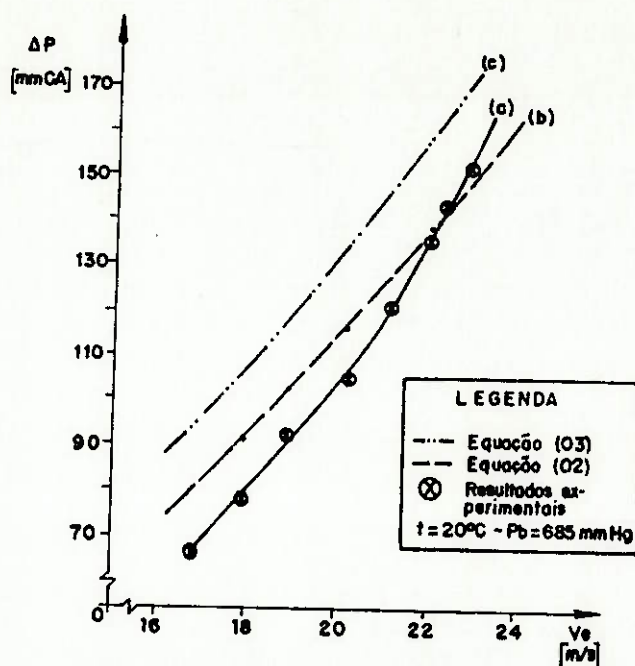
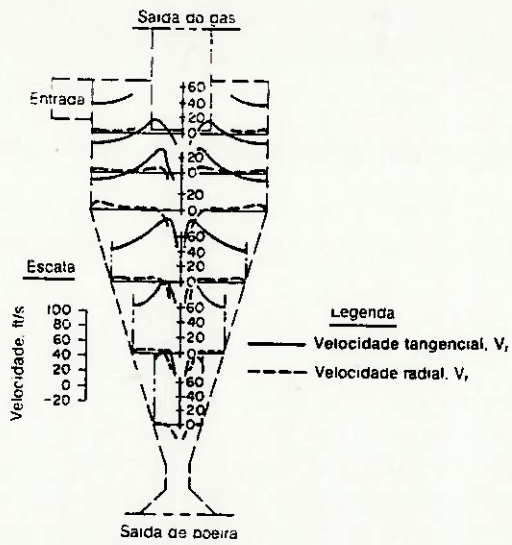


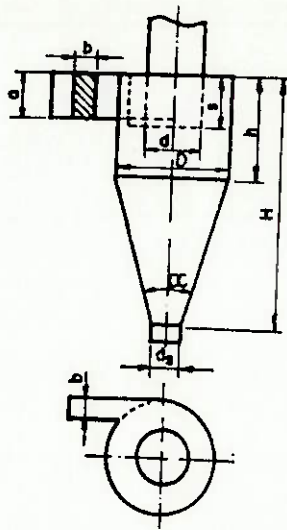
FIGURA 09

Variação da ΔP x v_e (a) Curva obtida experimentalmente em ciclone de $D=0,4m$, $H=1,6m$, sem carga; (b) curva obtida pela Eq.(2); (c) curva obtida pela Eq.(3).



Varição da velocidade tangencial e da velocidade radial em diferentes pontos de um ciclone. [Ter Linden, *Inst. Mech. Engrs. J.*, 160, 235 (1949).]

FIGURA 07



- Parâmetros geométricos do ciclone.

4.2 . - LAVADOR VENTURI

4.2.1 - DESCRIÇÃO GÊNÉRICA

Conceitualmente , o Lavador do tipo Venturi é um dispositivo de controle de poluição do ar, classificado como sendo coletor úmido de material particulado (Lavador com atomização pelo gás).

O Lavador Venturi tem sido reconhecido como um daqueles de maior eficiência de coleta , embora até hoje o seu mecanismo de coleta não tenha sido completamente entendido e toda a imensa experiência acumulada desde a sua descoberta ainda não tenha sido condensada em confiáveis equações de projeto.

* Basicamente, a água é introduzida na secção conhecida como garganta e atomizada pela alta velocidade do fluxo gasoso entre as partículas sólidas e gotas do líquido , colaborando para coletar as partículas através do seu mais importante mecanismo de coleta que é o de impactação . As partículas sólidas são coletadas nas gotas do líquido que por sua vez serão coletadas no separador de gotas .O equipamento é simples e o segredo está na correta escolha de materiais para resistir a corrosão e a abrasão.

A captação do material particulado é explicado com base em dois mecanismos de coleta que são a impactação inercial e a condensação.

* A impactação é o mais importante mecanismo de coleta .A impactação representa a " batida " da partícula contra um obstáculo que faz com que a partícula que esteja em movimento

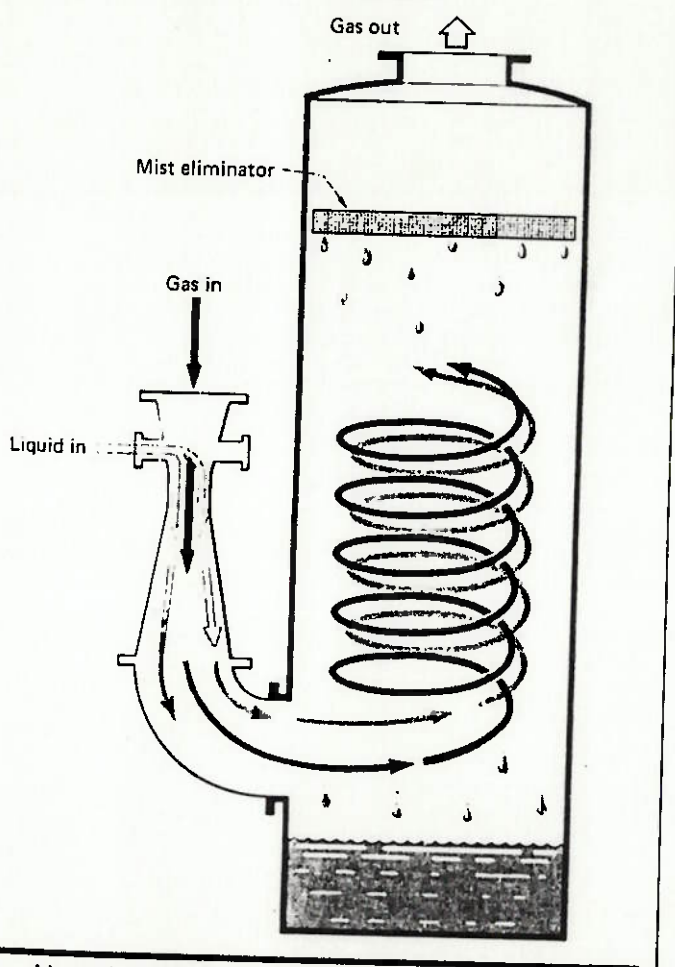
diminua a sua energia e se separe do fluxo gasoso que a transportara.

O controle de partícula por impactação é conseguido através de pequenos obstáculos úmidos, as gotas do líquido de lavagem.

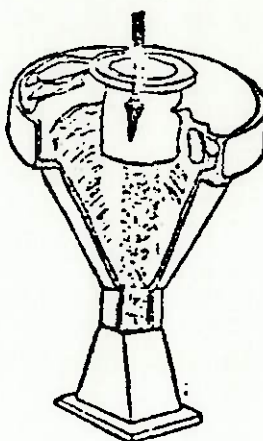
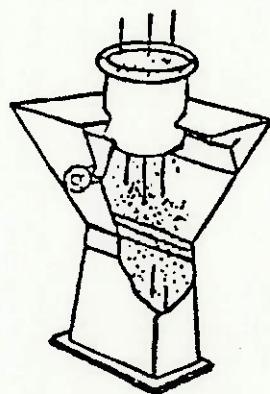
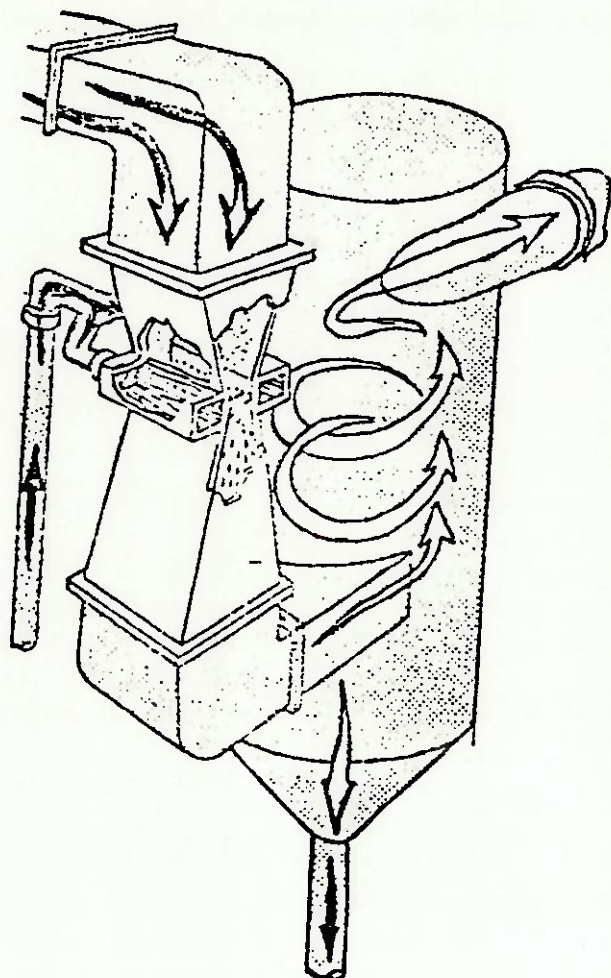
O efeito de condensação é outro mecanismo envolvido no processo; consiste em induzir a formação de água sobre o aerosol que age como núcleo ao se diminuir a temperatura da água abaixo do ponto de orvalho. Se o caudal gasoso for resfriado, uma injeção de vapor pode ser usada para saturar e produzir condensação das gotas, algumas das quais formando-se em volta das partículas. Se o caudal gasoso está a elevadas temperaturas, uma injeção de água irá inicialmente saturar o gás com vapor d'água, seguido por uma diminuição da temperatura devido ao ponto de orvalho da água. Este mecanismo ocorre mais em partículas grandes, uma vez que a eficiência de coleta de partículas pequenas terá sido usualmente baixa pela aplicação do mesmo. Em outros termos, se encontrar saturado na garganta do Venturi, as partículas, atuando como núcleos heterogêneos, propiciarão a condensação assim que os gases atingirem o difusor. Este fenômeno que propicia o aumento do tamanho das partículas, que por sua vez reduz a velocidade das mesmas, amplia o efeito de impactação inercial. Da mesma forma, por aumentar a superfície molhada das partículas, proporciona a aglomeração de novas outras, resultando globalmente em um aumento na eficiência de captação.

A velocidade dos gases na garganta do Venturi

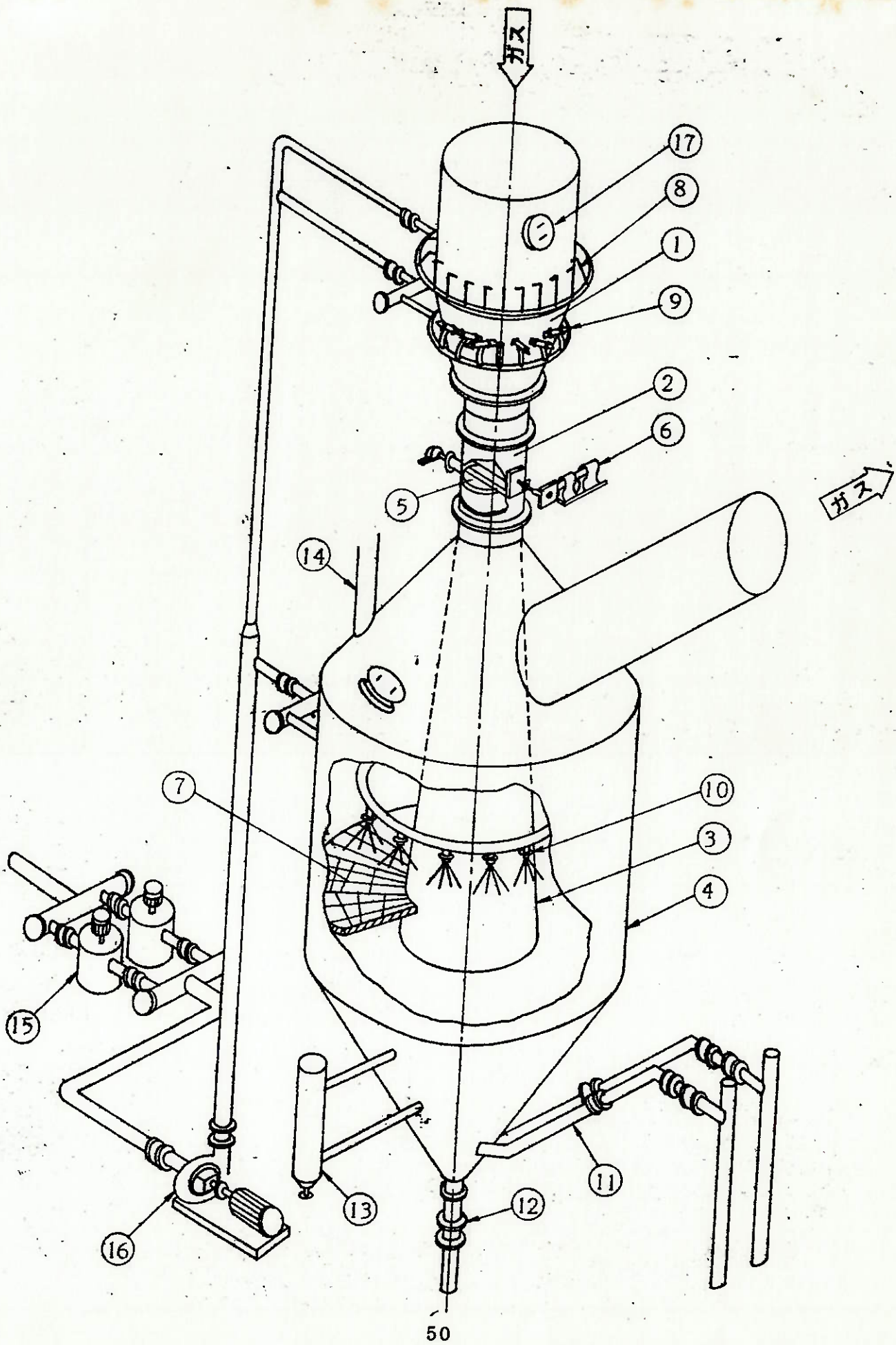
é uma das variáveis mais importantes na operação deste tipo de lavador .Existe um tipo de Lavador Venturi que possui secção variável de escoamento em sua garganta . Esta variação , manual ou automática , é obtida pela variação angular de um corpo em forma de cunha na entrada da garganta .Destá forma é possível manter-se uma determinada velocidade na garganta do Venturi mesmo que ocorram variações no fluxo de gases (vazão , temperatura, umidade , etc.) . Isto é interessante uma vez , que a eficiência de captação é diretamente relacionada com a velocidade . Este recurso adicional , embora encareça o equipamento , se faz bastante útil em plantas onde os regimes de funcionamento são muito distintos , mas a tolerância no padrão de emissão de gases é fixado.



Venturi scrubber equipped with cyclone separator and mesh mist-eliminator



Lavador Venturi - Tres tipos de alimentação de líquido



4.2.2. - MODELAGEM MATEMÁTICA DA EFICIÊNCIA.

A modelagem que a seguir será apresentada foi desenvolvida por Calvert em ' Wet Scrubber System Study (1972) ' e satisfaz as necessidades de modelagem matemática a nível de projeto .

Como modelo de Calvert tem sido bastante usado na Indústria e se apresenta como uma boa aproximação disponível para explicar os vários fatores que influenciam a performance do Lavador Venturi , foi escolhido como o principal assunto a ser estudado. Tal modelo pode também ser usado tanto para previsão de eficiência de coleta de partículas como para perda de carga do gás no Lavador Venturi.

O modelo de Calvert pode ser utilizado desde que seja assumido principalmente o seguinte :

- a.) As partículas se movem com o fluxo gasoso todo o tempo (não escorregamento) e são coletadas somente pelas gotas do líquido .
- b.) O diâmetro médio das gotas é calculado por uma correlação empírica de Nukiyama e Tanasawa (1930). Os valores experimentais são baseados em velocidades do gás acima de 75 m /s.
- c.) A aceleração das gotas pode ser calculada usando uma aproximação de Ingebo (1956) para o coeficiente de arraste C_d para gotas atomizadas , com uma certa aceleração para quais o No. de Reynolds está entre 006 e 400 . A aproximação é :

$$C_d = (55) / (\text{No. de Reynolds})$$

d.) A coleta de partículas por gotas é devido ao parâmetro de impactação inercial somente, cuja fórmula será apresentada posteriormente.

e.) Existe uma concentração uniforme de partículas em qualquer plano perpendicular à direção do fluxo gasoso.

f.) O líquido não atomizado é distribuído na seção transversal até que a velocidade relativa entre o gás e líquido seja :

$$V_r = f * V_g$$

f : fator de velocidade

Tendo como base o exposto, a fórmula final para o cálculo da penetração das partículas através do Lavador Venturi será :

$$P_t = \exp \left\{ 2 \cdot Q_l \cdot V_g \cdot \rho_l \cdot d_0 \cdot F(K_{pt}, f) / (55 \cdot Q_g \cdot \mu_{ig}) \right\}$$

onde ,

P_t : penetração (1 - efic.)

Q_l : vazão do líquido injetado na garganta (cm³/s).

Q_g : vazão do gás (cm³/s)

V_g : velocidade do gás na garganta (cm/s)

ρ_l : densidade do líquido (g/ cm³)

d_0 : diâmetro médio da gota (diâmetro médio de Sauter)

μ_{ig} : viscosidade do gás em g / cm.s (poise)

K_{pt} : parâmetro inercial avaliado nas condições

f : relação da velocidade relativa entre a gota e o gás durante a atomização para velocidade do gás.

d_0 , K_{pt} , $F (K_{pt} , f)$ podem ser calculados respectivamente :

1. Eq. de Nukiyama e Tanasawa

$$d_0 = (50 / V_g) + 91,8 * ((Q_l / Q_g)^{1,5})$$

Esta equação , para ar e água nas condições padrões fornece o resultado do diâmetro da gota em centímetros , velocidade do gás em cm / s e a relação Q_l / Q_g tem as unidades canceladas .

2. Parâmetro Inercial (Kpt)

Assumindo que a coleta de partículas por gotas é somente devido ao parâmetro de impactação inercial a fórmula abaixo pode ser usada ,

$$Kpt = \frac{V_r \cdot R_{Op} \cdot C' \cdot d_p \cdot d_p}{9 \cdot M_{ig} \cdot d_0}$$

$$e V_r = V_g * f$$

$f = 0,2$ p/ poeiras hidrofóbicas (não absorvem água).

$f = 0,45$ p/ poeiras hidrofílicas (absorvem água)

onde ,

V_r : velocidade relativa entre as partículas (viajando na velocidade do gás) e a gota.

R_{Op} : densidade da partícula (g /cm³)

d_p : tamanho da partícula (cm)

e o fator de Cunningham , $C' = 1 + \frac{1,65E+5}{d_p}$

3. F (Kpt , f)

$$F (Kpt , f) = [-0,7 - Kpt \cdot f + A + B]$$

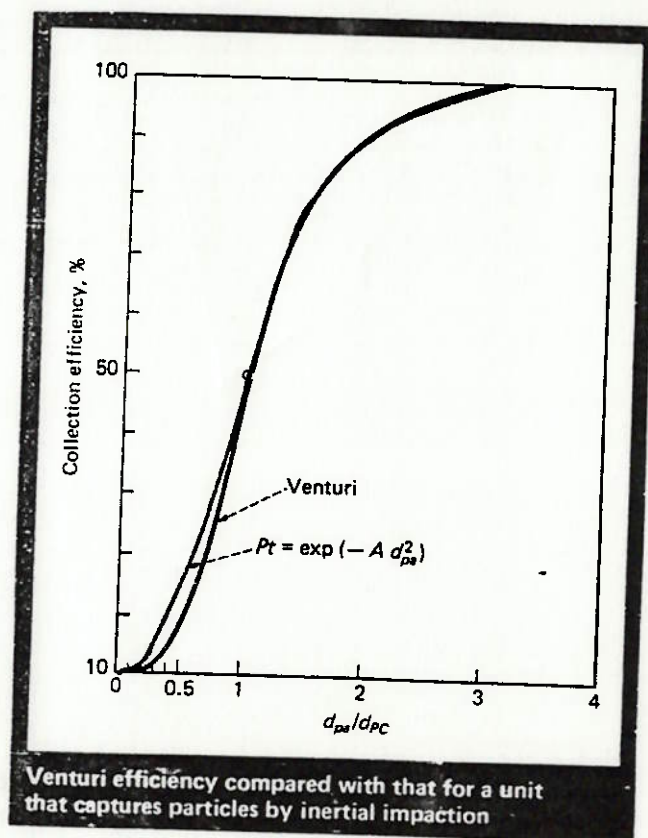
onde , $A = 1,4 \cdot \ln [(Kpt \cdot f + 0,7) / 0,7]$

$$B = 0,49 / [(0,7 + Kpt \cdot f) \cdot Kpt]$$

Para fins práticos " f " é um fator que absorve a influência de vários parâmetros não incluídos explicitamente na equação de cálculo de penetração.

Tais parâmetros incluem coleta por outros meios diferentes do parâmetro de impactação , crescimento de partícula devido à condensação e outros efeitos , tamanho de gotas diferentes daqueles preditos na Eq. de Nukiyama e Tanasawa, perda de líquido nas paredes no Venturi e outras variáveis de menor importância.

Uma vez definidas as variáveis envolvidas no processo de captação , para um dado diâmetro médio do material particulado ' d_p ' , obtém-se o valor da penetração e conseqüentemente a eficiência fracionária n' .



4.2.3 - AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA.

Basicamente , a energia consumida por um Lavador tipo Venturi é quase toda proveniente da resistência aerodinâmica deste a passagem dos gases .

A avaliação da perda de carga a seguir é baseado :

1.) MODELO DE CALVERT.

2.) MODELO DE HESKETH (mais recente).

1.) Modelo de Calvert

$$DP = 1,03 E-06 \cdot Vg \cdot Vg \cdot L$$

DP : perda de pressão em cm H2O

Vg : velocidade da garganta do gás em cm /s

L : razão (líquido / gás) em (litros / m3).

2.) Modelo de Hesketh

$$DP = \frac{Vg \cdot Vg \cdot ROp \cdot A^{0,133}}{507} \cdot (0,56 + 0,125 \cdot L + 2,3 E-03 \cdot L \cdot L)$$

DP : perda de pressão em in H2O

Vg : veloc. do gás na garganta em ft / s

ROp : densidade do gás , em lb / ft3

A : área da garganta do venturi , em ft2

L : razão líquido / gás em gal / 1000 ft3

A título de comparação , é possível avaliar a perda de carga por uma dessas equações mencionadas.

Há no fim deste estudo três gráficos que servem de apoio ao valor de DP calculado.

- gráfico 01 : penetração X DP ;

- gráfico 02 : penetração X veloc. do gás na garganta ;

- gráfico 03 : velocidade X DP .

FIGURE 5.3.6-15
 PENETRATION VS. PRESSURE
 DROP WITH AERODYNAMIC
 PARTICLE DIAMETER AS
 PARAMETER, FOR VENTURI
 SCRUBBER

$f = 0.25$
 $T = 25^{\circ}\text{C}$

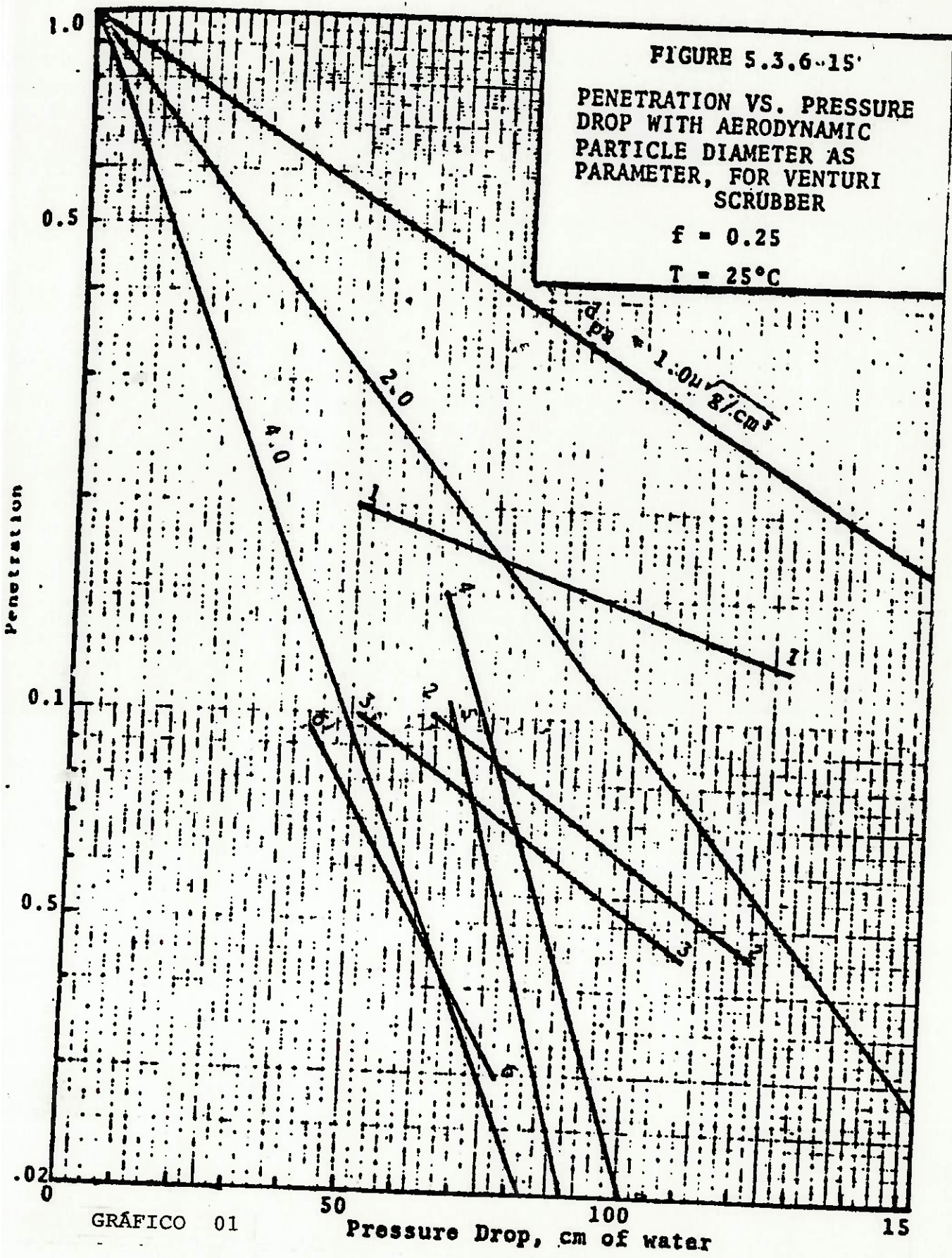


GRÁFICO 01

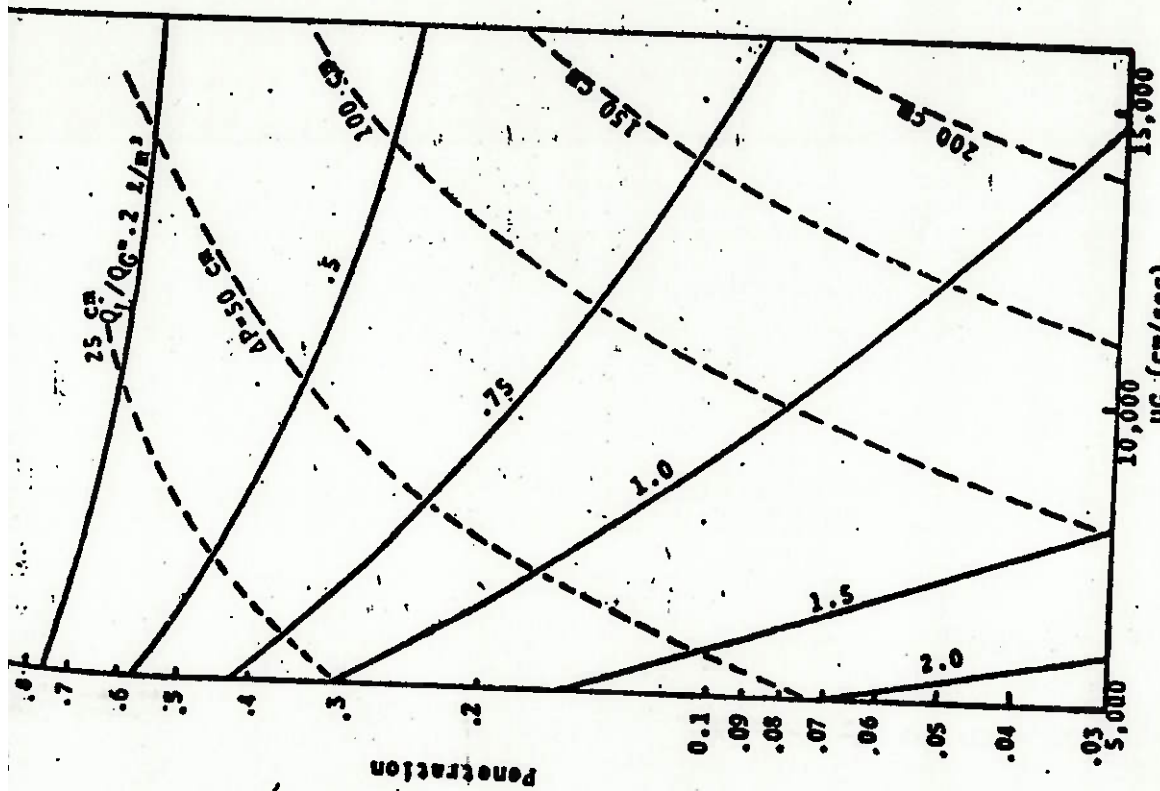


FIGURE 5.3.6-12
 VENTURI SCRUBBER PENETRATION VS.
 GAS THROAT VELOCITY WITH LIQUID TO
 GAS RATIO AND PRESSURE DROP AS
 PARAMETERS
 $d_{pa} = d_p \sqrt{C' p_p} = 2 \mu m/g/cm^3$; $f = 0.25$
 Calculated from Figure 5.3.6-13

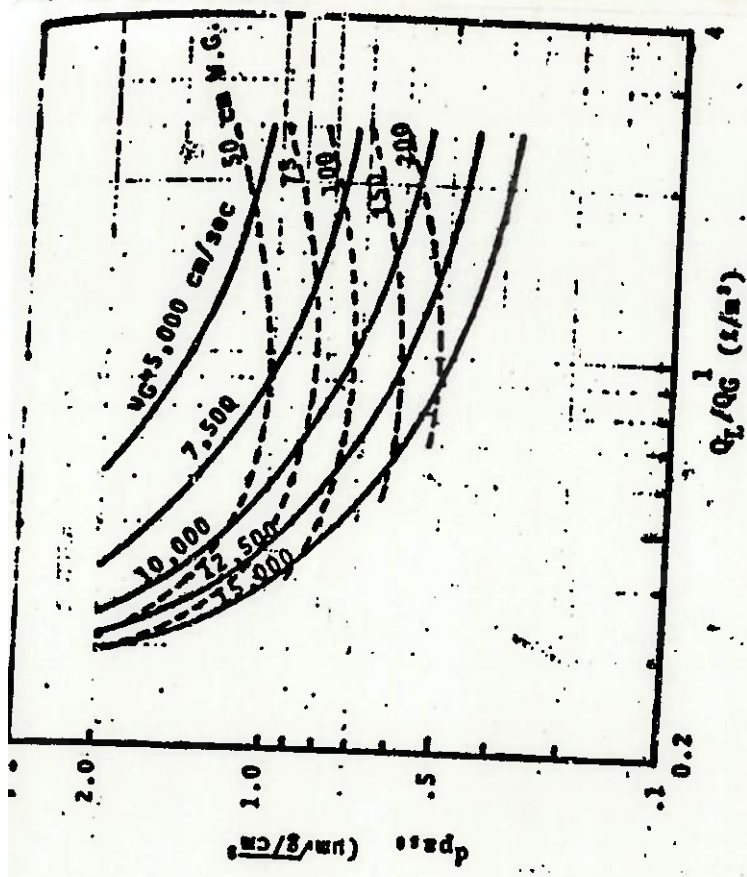


FIGURE 5.3.6-13
 PREDICTED VENTURI PERFORMANCE,
 d_{pa} VS. Q_L/Q_G WITH " u_G " PARAMETER
 AND ΔP PARAMETER
 COMPUTED FROM EQUATION 5.3.6-5 and 5.3.6-6
 WITH $f = 0.25$
 $\rho_L = 1.0$
 $\rho_G = 1.8 \times 10^{-3}$

GRÁFICO 02

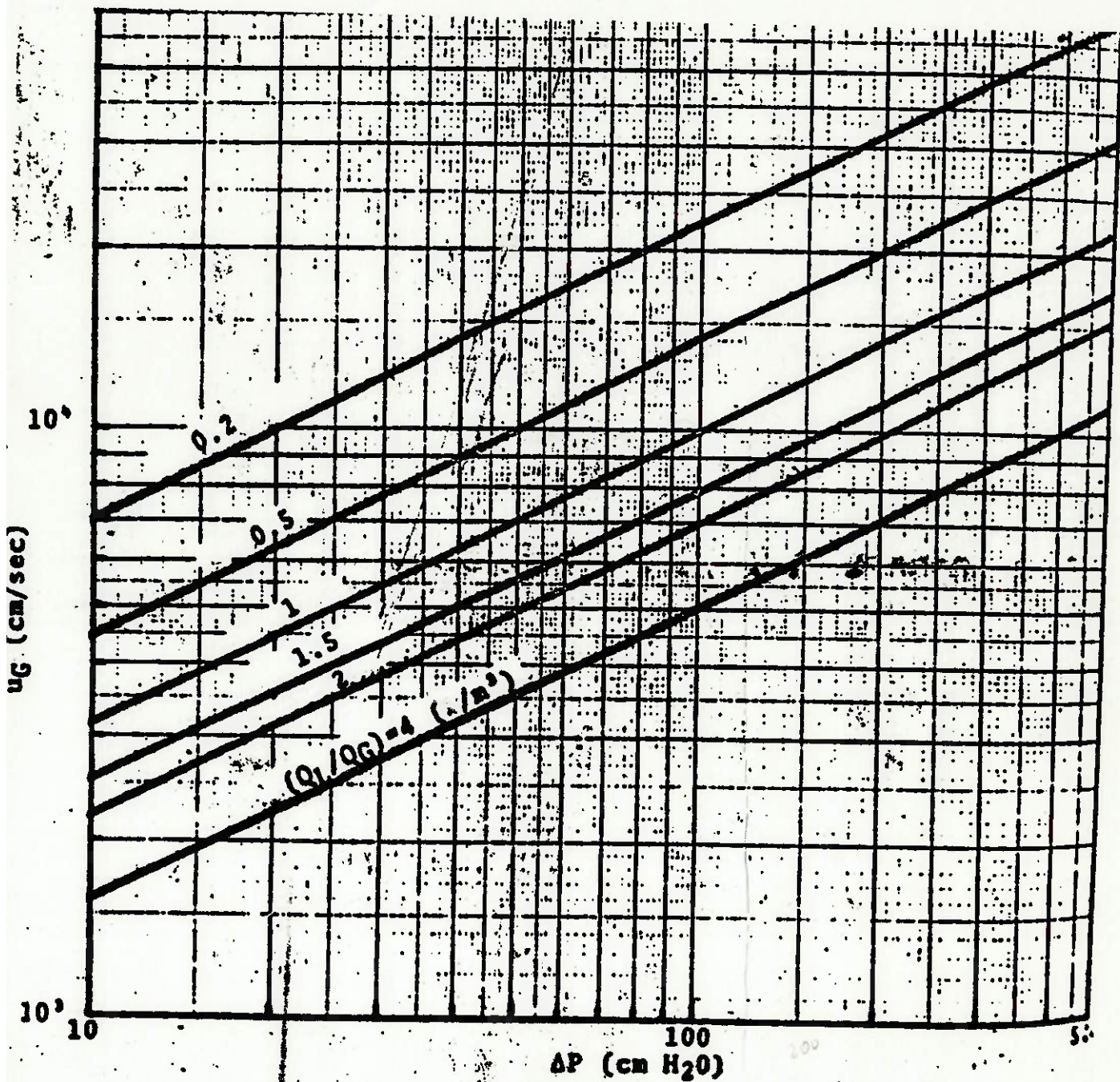


FIGURE 5.3.6-14
PREDICTED PRESSURE DROP FOR VENTURI WITH
STANDARD AIR AND WATER

GRÁFICO 03

4.2.4 CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

1. FATORES QUE AFETAM A COLISÃO ENTRE PARTICULAS E O MEIO DE LAVAGEM .

- A. Colisão e adesão .
- B. Diâmetro molecular e efeito de difusão.
- C. Umidificação e resfriamento
- D. Diâmetro das partículas com relação ao diâmetro das partículas sólidas .
- E. Fenômeno de tensão elétrica entre moléculas líquidas e o pó e moléculas líquidas e o gás.
- F. Reações químicas.
- G. Compressão e expansão do gás.

A. Colisão e adesão.

Entre gotículas do líquido de lavagem e as partículas de pó que são colocados em contato na garganta do Venturi, há colisões e adesões (aglomeração) que são favorecidos por uma velocidade relativa alta entre as partículas líquidas e as partículas de pó .

B. Diâmetro molecular e efeito de difusão.

Para partículas com diâmetros maiores que 0,5 micron , a massa da partícula causa influência significativa no efeito de captação , no entanto para diâmetros menores que , por exemplo , 0,1 micron os movimentos moleculares são maiores que aqueles induzidos por força de inércia. Para partículas com dimensões aproximadamente 0,25

micron e peso específico 2, a velocidade de queda em ar calmo a 20 o.C é de 6,3 micron / seg e o movimento molecular de 8,9 micron / seg , o que é praticamente igual.

As partículas ao redor de 0,25 micron são , portanto as mais difíceis de serem separadas .Aquelas que possuem diâmetro maiores ou menores que 0,25 micron são melhores separadas.

A tabela abaixo refere-se a velocidade de queda e movimento moleculares (Brownian) para partículas microscópicas em ar calmo a 20 o.C e peso específico igual a 2.

DIÂM. DA PARTIC. EM MICRON	VELOC. DE QUEDA MICRON /SEG	MOV. MOLECULAR EM MICRON / SEG
0,10	1,7	14,2
0,25	6,3	8,9
0,50	20,0	6,3
1,00	70,0	4,5
2,50	400,0	2,8
5,00	1.500,0	2,0
10,0	6.000,0	1,4

A um aumento da temperatura corresponde um aumento no movimento molecular.

C. Umidificação e condensação.

A fig. 1a mostra uma partícula líquida quente em contato com um gás seco . Parte do líquido evapora (umidificação do gás) , criando um efeito de aglomeração na zona do líquido

evaporado.

FIGURA 1a

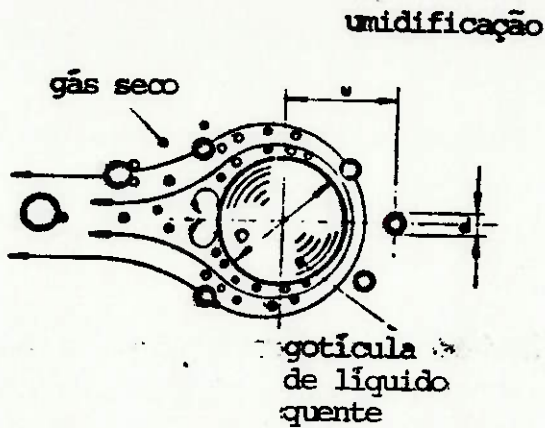
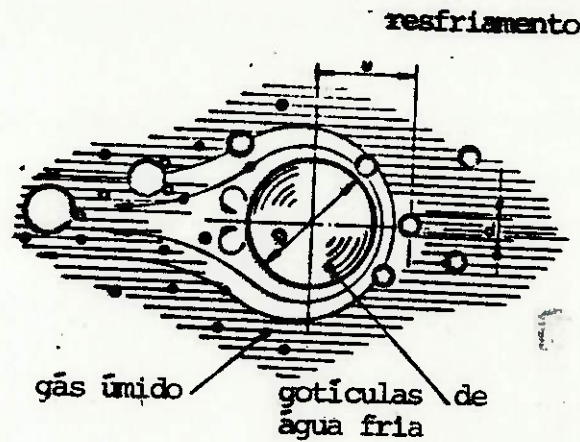


FIGURA 1b



A figura 1b mostra , ao contrário , uma gotícula de líquido frio em contato com um gás quente .Na área próxima a partícula líquida existe uma condensação. As gotículas resultantes , parte aglomera com outras gotículas, parte aglomera com partículas de pó.

O fenômeno de umidificação e condensação dependem de diferentes variáveis entre as quais :

- temperatura dos componentes
- pressões parciais
- superfícies de contato

Se as partículas de pó estiverem a temperatura inferior à da mistura de gás e de líquido na garganta do Venturi , elas podem atuar como centro de condensação. Se pelo contrário , as partículas de pó estiverem muito mais quentes , o fenômeno de aglomeração é impedido.

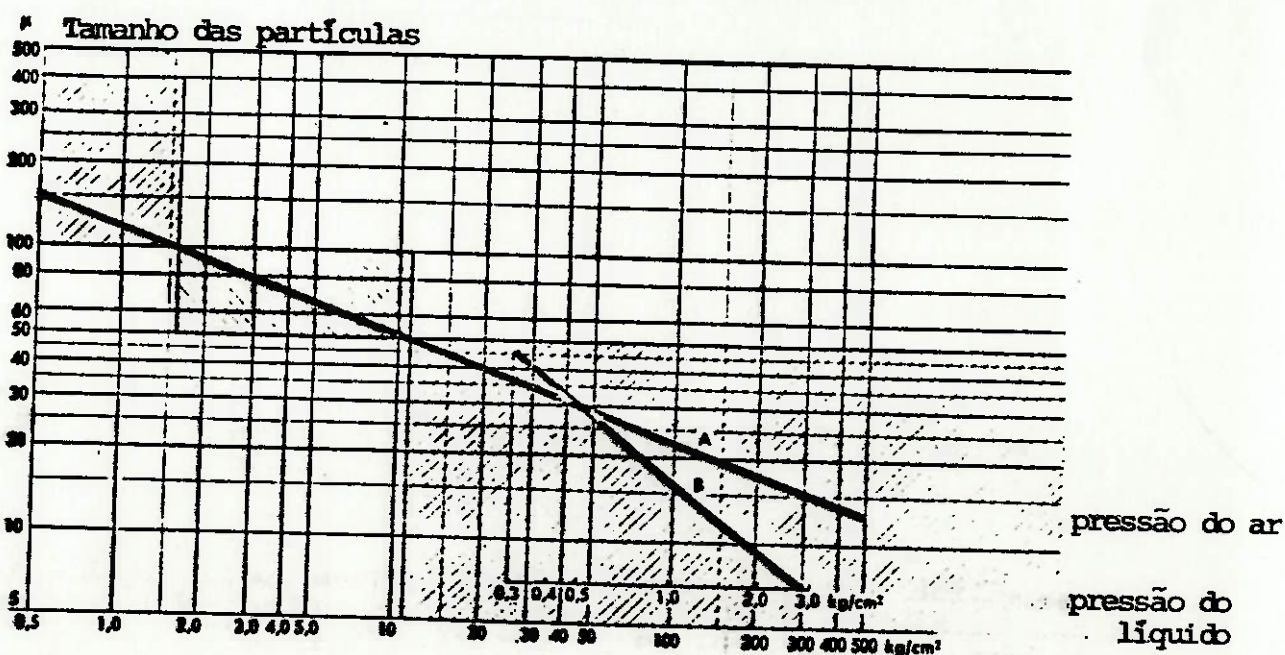
Em alguns casos (pó de granulação fina , alta eficiência) é necessário resfriar-se as partículas de pó antes de adentrar ao Lavador Venturi.

D. Diâmetro das partículas líquidas em relação ao diâmetro das partículas sólidas.

De modo a se obter um bom contato entre as partículas líquidas e as partículas de pó , as pesquisas tem mostrado que as partículas devem ser aproximadamente 100 vezes maiores que as partículas sólidas .Isto significa que as partículas sólidas de 0,2 micron , as gotículas não devem exceder 20 micron.

Para se obter essas partículas com bocais centrifugos , é necessário uma pressão de aproximadamente 150 kg/cm² .Com bocais combinados ar - liquido , é requerida uma pressão de 0,7 kg /cm² para o ar comprimido.

FIG . 2 CURVA A - BOCAL CENTRÍFUGO
CURVA B - BOCAL DE AR COMPRIMIDO



Num Venturi moderno , são obtidas gotículas muito pequenas de modo a reduzir ao máximo os perigos de abrasão de bocais e seu entupimento.

E. Fenômeno de tensão elétrica entre moléculas líquidas e o o pó , e moléculas líquidas e o gás.

Como sabemos , toda partícula tem sua própria carga elétrica , as quais variam em polaridade de acordo com sua composição química.

É possível obter vantagem deste fato de modo a favorecer a aglomeração , se considerarmos que as moléculas no líquido limpo tem polaridade oposta em relação às moléculas no líquido sujo e que podemos introduzir energia necessária para se obter a ionização.

No Venturi , este fenômeno é favorecido pelo atrito entre o gás , líquido e partículas de pó.

F. Reações químicas

Para os casos em que os componentes líquidos e gasosos quando em contato tiverem química ou solubilidade , nós obtemos reações químicas e / ou fenômenos de absorção a serem acrescentados ao fenômeno de aglomeração mecânica.

G. Compressão e expansão.

Durante a passagem através da garganta do Venturi , obtem-se um decréscimo na pressão com seu consequente abaixamento da temperatura .Isto favorece a condensação

e conseqüentemente sua aglomeração.

A posição do ventilador deve ser estudada caso a caso , mas geralmente é colocado após o Venturi e seu separador de névoa. Na passagem do gás pelo ventilador , a temperatura aumenta de aproximadamente 0,008 o.C por cada mm.c.a de aumento de pressão.

2. VALORES DA EFICIÊNCIA FRACIONADA DO LAVADOR VENTURI DE MATERIAL PARTICULADO EM FUNÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DAS PARTICULAS (EM PORCENTAGEM)

Diâm. da partic.(micro-m.)	0 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 44	> 44
Lav. Vent.	95 %	99,5 %	100 %	100 %	100%

(lavador de alta energia)

3. VANTAGENS E DESVANTAGENS

Os lavadores tem sido bem aplicados para sistemas que operam com gás a alta temperatura (540 o.C ou maior) e onde a umidade é um sério obstáculo para lidar com gases . Eles não podem ser usados onde a recuperação do residuo seco é uma necessidade , tendo em vista uma possível reutilização ou venda econômica deste material , e também onde a dificuldade de separar os poluentes do liquido de lavagem (normalmente água)

discordam com as normas de poluição.

Resumidamente , os lavadores Venturi possuem as seguintes vantagens :

- A coleta de material particulado e absorção de gases pode ser realizada simultaneamente
- Altas eficiências de coleta podem ser obtidas para qualquer faixa de tamanho de partículas , desde que aplicada a energia necessária .
- Materiais pegajosos podem ser coletadas sem entupimento
- Efluentes gasosos a altas temperaturas podem ser tratados sem problema
- O conteúdo de umidade do efluente gasoso e / ou o ponto de orvalho não são fatores críticos na operação do lavador.
- Poeiras e gases inflamáveis podem ser manipulados sem perigo
- Outras aplicações tais como transferência de calor , reação química e evaporação aumentam a faixa de uso de coletores úmidos
- Custo inicial é relativamente baixo

As principais desvantagens dos lavadores são:

- Requer altas energias para a coleta de partículas de pequeno tamanho
- Sofre os problemas de corrosão e abrasão decorrentes do processamento o qual está tratando
- Um sistema de disposição do efluente líquido deve ser

pensado na maioria das vezes

- Produz a descarga de uma pluma de vapor proveniente do caudal gasoso saturado de água.

4. Aspectos de corrosão .

Dos muitos estudos já realizados sobre a corrosão em lavadores , testando quais metais seriam mais conveniente para sua fabricação , não existe nenhum material que pode ser considerado absoluto . Todos materiais metálicos selecionados devem ser usados com cautela e julgamento , uma vez que fatores tais como a qualidade da água recirculada , tipo de tratamento , PH , etc. podem alterar a escolha final e impor assim um maior ou menor custo dos materiais.

Testes realizados , na sua maioria com duração de 2 a 3 meses mostraram que os melhores metais foram o titanium , inconel 625 , hastelloy C , e hastelloy G. Os inadequados foram o aço carbono , ferro fundido e monel 400 . A pior condição de corrosão encontrada foi a jusante do separador de gotas onde os gases estão saturados (66 o.C a 82 o.C) e foi encontrado encrustações de cloretos bastante altas. Um outro material que tem resistido bem a baixa temperatura (< 90 o.C) é o poliéster reforçado com fibra de vidro (PFRV) , resina fenólica modificada , elastômeros de poliuretana e mistura fenol - formaldeídos .

O grau de ataque varia com o tipo de lavador utilizado e das diferentes zonas do lavador . Geralmente , o ataque é mais sério na seção de entrada do que comparativamente á saída do

separador e corpo do lavador.

Aços Inoxidáveis são convencionalmente usados nos lavadores. O mecanismo básico pela qual o mesmo resiste ao ataque corrosivo é através da formação de uma interface passiva que resiste a penetração de elementos corrosivos. A formação dessa película é causada por eletroquímica ou reações químicas.

Em Lavadores do tipo Venturi, os metais da família dos 'Alloys' podem facilmente manipular ácidos corrosivos, porém altas velocidades do gás na garganta do Venturi e presença de sólidos pode romper a referida película. Além da garganta geralmente atacada, os bocais de atomização são também frequentemente atingidos (fig 10); um bom projeto da entrada do Venturi pode minimizar a corrosão na garganta (zona crítica) como pode ser visto na fig. 11; ao inverso, a corrosão presente na saída pode ser controlada por intermitentes lavagens para eliminar a concentração de ácido e sólidos.

A corrosão devido à alta velocidade pode ser controlada com o uso de revestimento de alvenaria com uma membrana resistente a corrosão, usualmente borracha ou chumbo, suportado por uma carcaça de aço carbono. O revestimento de alvenaria são também usados quando há alta concentração de ácidos e altas temperaturas na entrada são envolvidas. (fig. 11) (revestimento de alvenaria).

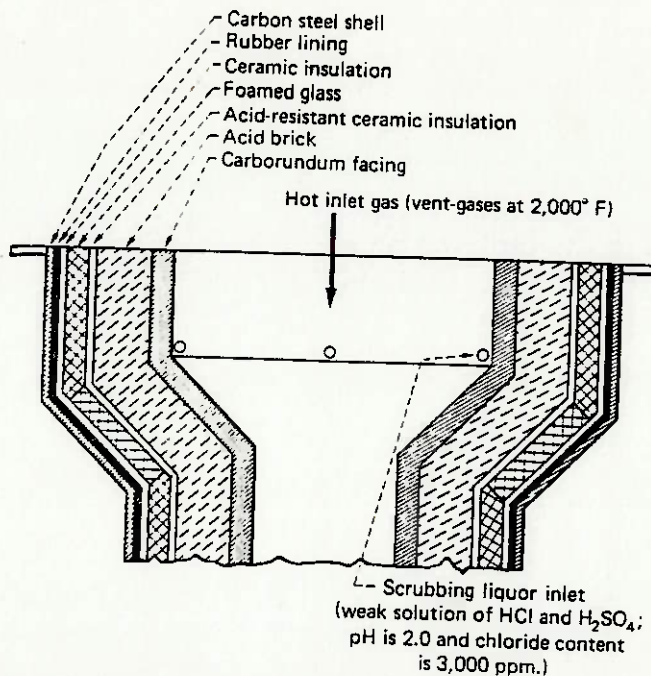


FIGURA 11

Masonry construction resists high-temperature gases and acidic, solids-laden liquor

5. OS TIPOS MAIS USADOS DE LAVADORES DO TIPO VENTURI.

Os Lavadores Venturi são principalmente divididos em classes de acordo com o caminho que é obtido a nebulização por meio da lavagem:

CLASSE 01 : A nebulização é obtida fornecendo água em baixa pressão na parte mais baixa da entrada do cone do Venturi. Um conjunto de flanges é acoplado na zona da garganta do Venturi, onde a velocidade do gás é forte, criando uma forte turbulência que atomiza o líquido e muitas partículas finas.

A contínua superfície líquida na parede interna permite o direto manuseio do gás à alta temperatura (1400 - 1500 o.C) e contendo grande quantidade de pó (~ 150 g / cm³ e acima). Isto também pode ser usado com líquido reciclado, igualmente sujo, sem problemas.

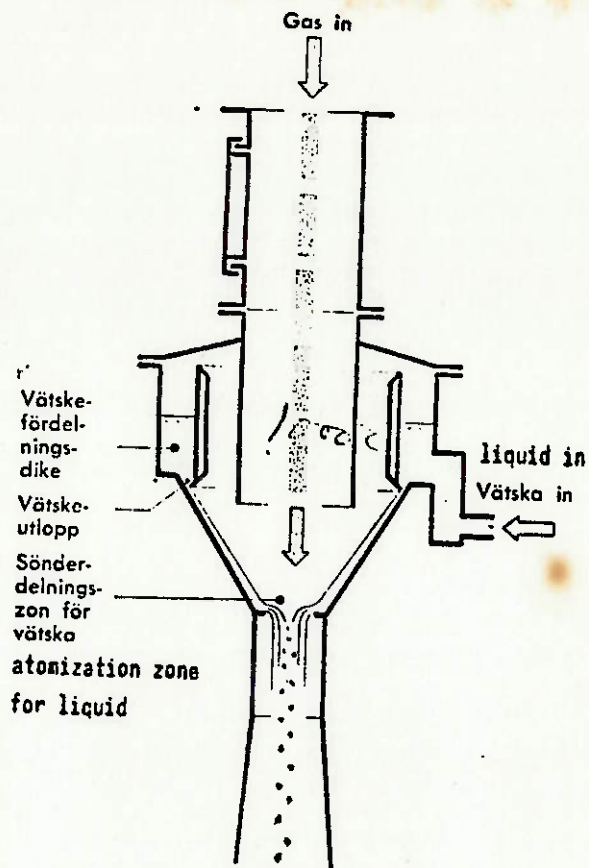
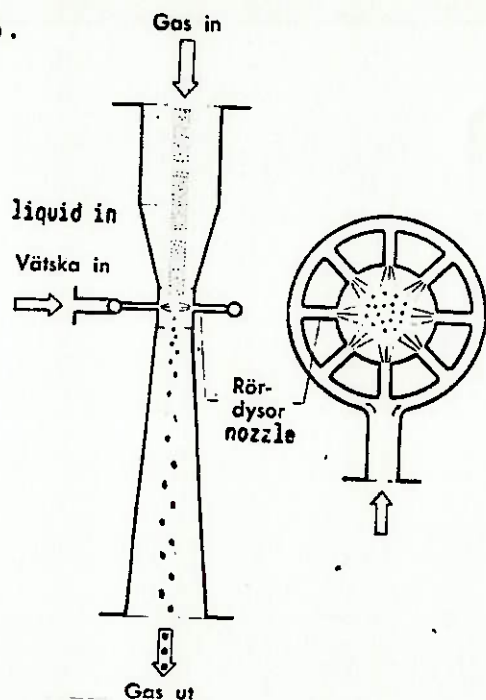


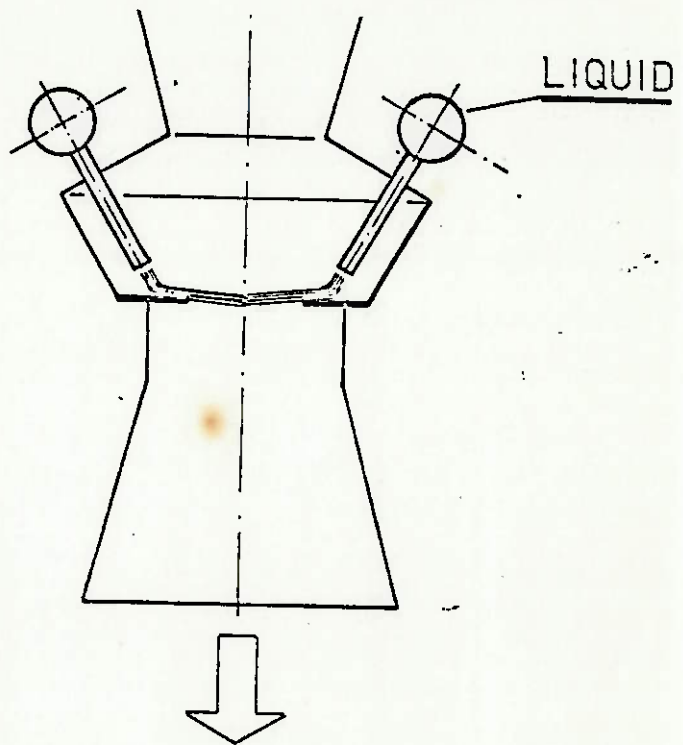
FIGURA 12

CLASSE 02 : A água é injetada na área da garganta do Venturi com bocais de atomização ou alta pressão que requer um completo sistema de limpeza quando é usado líquido sujo recirculado.



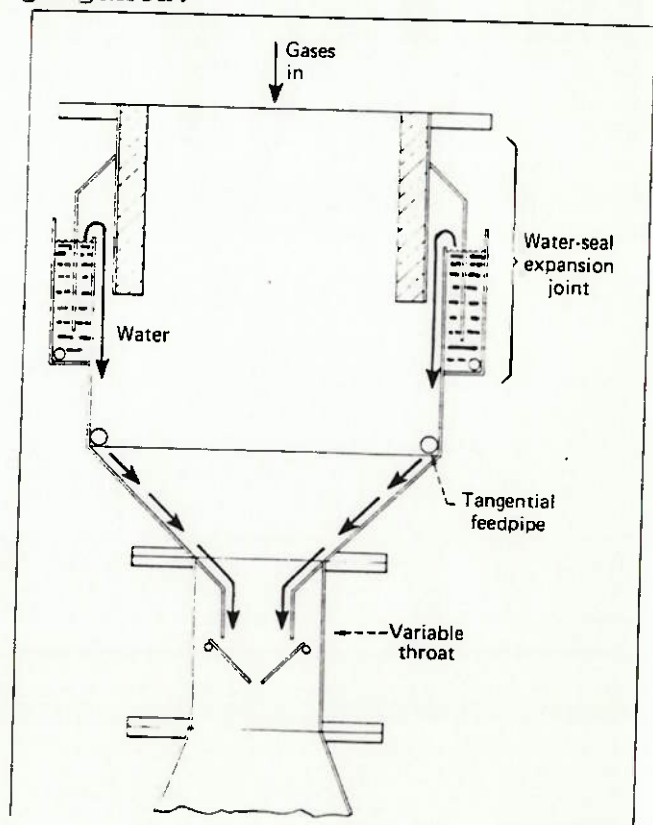
CLASSE 03: Ambos destes tipos podem ser com garganta de área

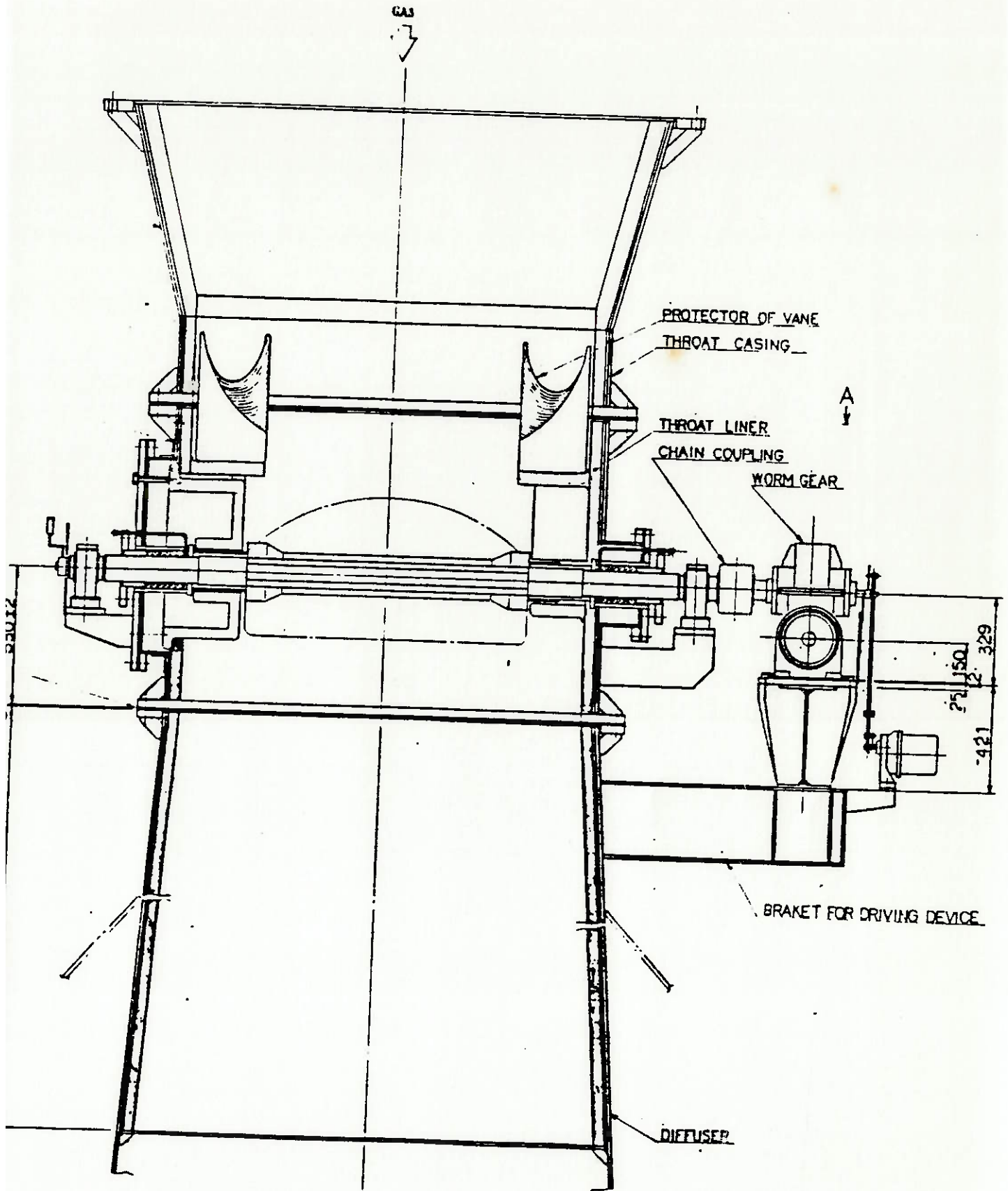
fixa ou variável , e podem com frequencia serem combinados entre si.

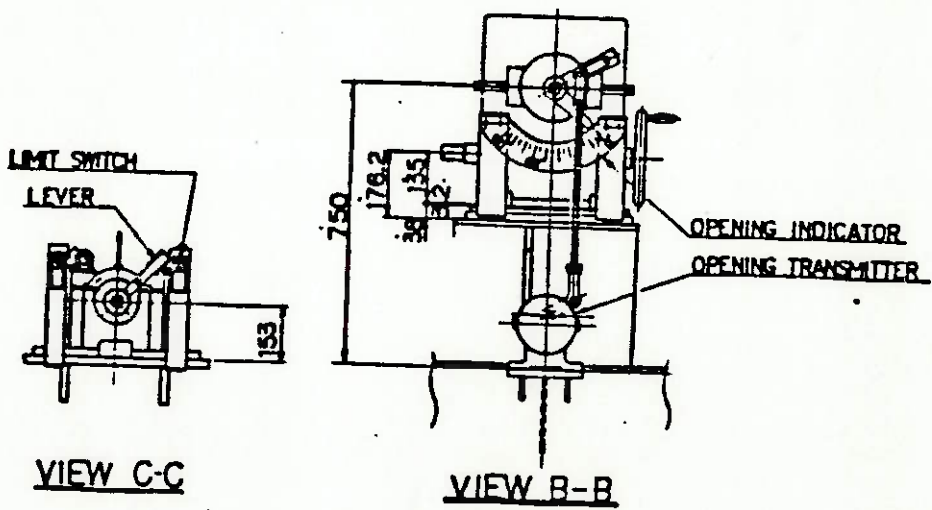
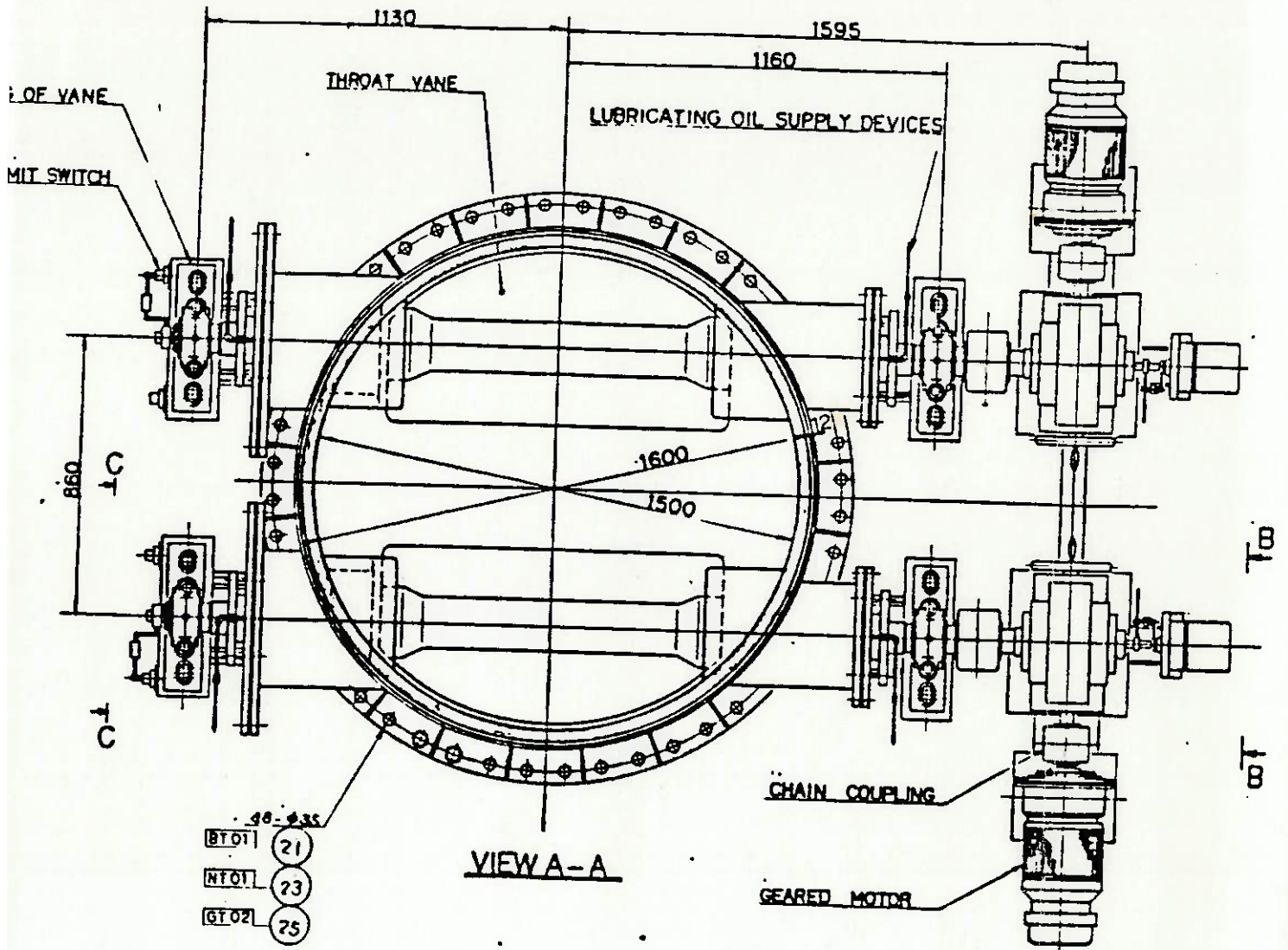


6. LAVADOR VENTURI COM GARGANTA VARIÁVEL.

Como já foi dito , o L.V. com garganta cuja área é variável , é interessante pois absorve variações de fluxo de gases , temperatura ou umidade , permitindo sempre uma eficiência constante . A figura a seguir mostra um L. V. em detalhes com dampers na secção da garganta.





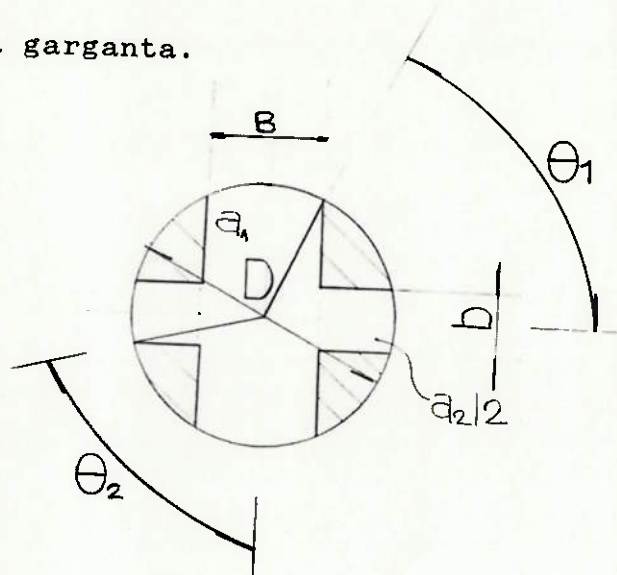


4.2.5. ESTUDO DE CASO : 1.CÁLCULO DA ABERTURA DO DAMPER NA SECÇÃO DA GARGANTA.

2.DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA SIMULADOR.

1.Cálculo da abertura da garganta.

B = cm
 b = cm
 D = cm



1.1 Area a1 (cm2):

$$\text{COS } T1 = B / D$$

$$T1 = \quad \text{em graus} = \quad \text{em radianos}$$

$$C1 = -2 * T1 + \text{SEN} (2 * T1) + 3,1416$$

$$a1 = C1 * D * D / 4 = \quad \text{em cm2}$$

1.2 Area a2 (cm2):

$$\text{COS } T2 = b / D$$

$$T2 = \quad \text{em graus} = \quad \text{em radianos}$$

$$C2 = -2 * T2 + \text{SEN} (2 * T2) + 3,1416$$

$$a2 = (C2 * D * D / 4) - (B * b) = \quad \text{em cm2}$$

1.3 área aberta SO (cm2):

$$SO = a1 + a2 = \quad \text{em cm2}$$

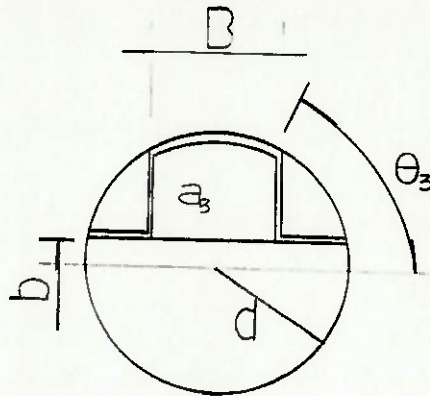
2.0 Damper de controle:

2.1 Completamente fechada : S1 em cm²

B = cm

b = cm

d = cm



$$\cos T3 = (B / 2 * d)$$

T3 = em graus = em radianos

$$C3 = -2 * T3 + \text{SEN} (2 * T3) + 3,1416$$

$$S1 = C3 * d * d - B * d = \text{em cm}^2$$

2.2 Com abertura de 30 graus (em cm²) :

d = cm

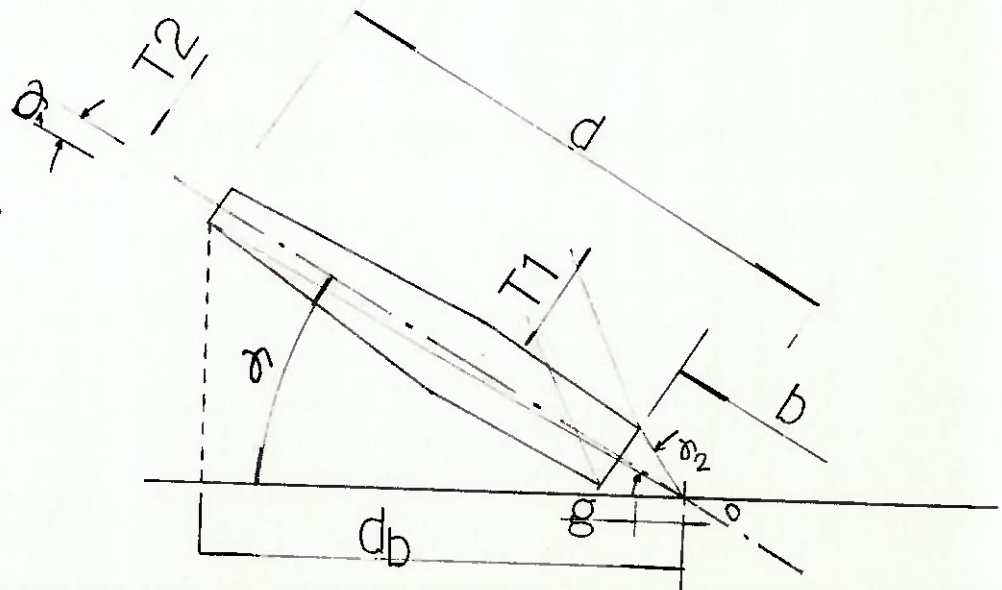
b = cm

t1 = cm

t2 = cm

gama.30 = 30 graus

T3 = em rad.



1. da : correção de ' d ' para placa de espessura ' t2 ' .

$$da = \text{SQRT} (d * d + (t2 * t2 / 4)) = \quad \text{em cm}$$

2. gama1 : correção de 'gama ' para placa de espessura ' t2 ' .

$$\text{TAN} (\text{gama1}) = t2 / (2 * d)$$

$$\text{gama1} = \quad \text{em radianos}$$

3. db30

$$\text{db30} = da * \text{COS} (\text{gama.30} - \text{gama1}) = \quad \text{em cm}$$

4. g1 : comprimento conforme a figura

$$\text{TAN} (\text{gama2}) = T1 / b$$

$$\text{gama2} = \quad \text{em graus}$$

$$g1 = b * \text{COS} (\text{gama.30} - \text{gama2}) / (2 * \text{COS} (\text{gama2})) = \quad \text{em cm}$$

5. T4 :

$$\text{COS} T4 = B / (2 * da)$$

$$T4 = \quad \text{em graus} = \quad \text{em radianos}$$

6. C4 :

$$C4 = -2 * T4 + \text{SEN} (2 * T4) + 3,1416 =$$

7. S2 :

$$S2 = C4 * da * \text{db30} - 2 * B * g1 = \quad \text{em cm}^2$$

8. Total área aberta , com o damper á 30 graus :

$$S (30) = S0 - S2 = \quad \text{em cm}^2$$

9. Podemos discretizar a variação para os demais ângulos.
(variando de 1 grau até 90 graus)

2. DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA SIMULADOR

VIDE PROGRAMACAO EM PASCAL " DAMPER . PAS "

PROGRAMA DAMPER - ESTUDO TEORICO DA ABERTURA DO LAVADOR VENTURI

PARA ENTRADA DE DADOS, ADOPTAR A FIGURA PADRAO DO APENDICE A1 CARACTERISTICAS GEOMETRICAS DA GARGANTA DO LAVADOR VENTURI.

----- ENTRADA DE DADOS -----

Valor da velocidade a ser mantida constante (cm/s) =

Valor da vazao a ser mantida constante (cm³/s) =

Dimensao B (em cm) =

Dimensao b (em cm) =

Diametro D (em cm) =

Dimensao d (em cm) =

Dimensao T1 (em cm) =

Dimensao T2 (em cm) =

EXEMPLO : $V = 95 \text{ m/s}$
 $Q = 3,16 \text{ m}^3/\text{s}$
 $B = 13,2 \text{ cm}$
 $b = 6,3 \text{ cm}$
 $D = 20,6 \text{ cm}$
 $d = 10,3 \text{ cm}$
 $T1 = 1,2 \text{ cm}$
 $T2 = 1,0 \text{ cm}$

```

program DAMPER ( INPUT , OUTPUT );

CONST
M = #77; ( caracter ascii para letra M )
var

BB , B , D , C , A,R1 , AA, C2, C1, C3, C4,RE :REAL ;
TECLA:CHAR;
TETA1, TETA2,K, TETA3, TETA4, S0, S1,T1, T2:REAL ;

G1,DM , G2,F,H,J,V,q,AREA,DA :REAL ;
I,N ,T:INTEGER;
GAMA , GE, DB , S , SS,DIF :ARRAY [1..370] OF REAL ;

```

(procedimento para a criacao de janelas)

```

procedure Frame(UpperLeftX,UpperLeftY,LowerRightX,LowerRightY: integer);
var I: integer;

```

```

begin
  gotoXY(UpperLeftX,UpperLeftY);
  write(chr(218));
  for I:=(UpperLeftX + 1) to (LowerRightX - 1) do
  begin
    write(chr(196));
  end;
  write(chr(191));
  for I:=(UpperLeftY + 1) to (LowerRightY - 1) do
  begin
    gotoXY(UpperLeftX,I);write(chr(179));
    gotoXY(LowerRightX,I);write(chr(179));
  end;
  gotoXY(UpperLeftX,LowerRightY);
  write(chr(192));
  for I:=(UpperLeftX + 1) to (LowerRightX - 1) do
  begin
    write(chr(196));
  end;
  write(chr(217));
end;

```

(procedimento de colocacao das janelas)

```

procedure janelas;
begin
  clrscr;
  frame(1,1,80,3);
  frame(1,4,80,21);
  frame(1,22,80,24);
end;

```

(procedimento de criacao da tela inicial)

```

procedure telinic;
begin
  janelas;
  gotoxy(2,2);

```

```

writeln(' PROGRAMA DAMPER - ESTUDO TEORICO DA ABERTURA DO LAVADOR VENTURI ' );
gotoxy(3,5);
writeln(' PARA ENTRADA DE DADOS , ADOPTAR A FIGURA PADRAO DO APENDICE A1 CARACTE- ');

gotoxy(3,7);
writeln(' -RISTICAS GEOMETRICAS DA GARGANTA DO LAVADOR VENTURI. ');
gotoxy(3,9);
writeln(' ----- ENTRADA DE DADOS ----- ');
gotoxy(3,11);
writeln('Valor da velocidade a ser mantida constante (cm/s) = ');
gotoxy(50,11);
readln(v);
gotoxy(3,13);
writeln('Valor da vazao a ser mantida constante (cm3/s)= ');
gotoxy(45,13);
readln(q);

gotoxy(3,15);
writeln('Dimensao B ( em cm ) = ');
gotoxy(29,15);
readln(BB);
gotoxy(3,16);
writeln('Dimensao b ( em cm ) = ');
gotoxy(29,16);
readln(B);
gotoxy(3,17);
writeln('Diametro D ( em cm ) = ');
gotoxy(29,17);
readln(D);
gotoxy(3,18);
writeln('Dimensao d ( em cm ) = ');
gotoxy(29,18);
readln(DH);
gotoxy(3,19);
writeln('Dimensao T1 ( em cm ) = ');
gotoxy(29,19);
readln(T1);
gotoxy(3,20);
writeln('Dimensao T2 ( em cm ) = ');
gotoxy(29,20);
readln(T2);
gotoxy(3,23);
writeln(' TODOS OS PARAMETROS JA ESPECIFICADOS ');
end;

begin
janelas;
telinic;
( calculo de ai , totalmente aberto )

H:= (D*D/4)-(BB*BB/4);
RE:=SQRT(H) ;
teta1:= ARCTAN( RE / (BB/2) );

```

```

C1:= -2*teta1 +sin(2*teta1) + 3.1416;
A:= C1*D*D/4;
K:=SQRT(D*D-B*B) ;
teta2:=ARCTAN(K/B);
C2:= -2 * teta2 + sin(2*teta2) +3.1416;
AA:=(C2 *D*D/4 ) -BB*B;
so :=A+AA;
{totalmente fechado }
J:=- (BB*BB -4*DM*DM) ;
AREA := Q/V;
F:=SQRT(J) ;
TETA3 :=ARCTAN( F / BB ) ;
C3 := -2 *TETA3 + SIN(2*TETA3) + 3.1416;
S1 :=C3 *DM*DM -BB*B;
DA:=SQRT(DM*DM + (T2*T2/4));
G1:=ARCTAN( T2/ (2*DM) ) ;
G2:=ARCTAN(T1/B);
TETA4:= ARCTAN( ( SQRT(4*DA*DA-BB*BB)/BB ) );
C4 := -2*TETA4 +SIN(2*TETA4) +3.1416;
FOR I:=1 TO 90 DO
  BEGIN
    GAMACIJ:= I*2*3.1416 /360 ;
    DBCIJ:=DA*COS(GAMACIJ - G1 );
    GECIJ:= ( ( B * COS(GAMACIJ+G2) ) / ( 2* COS(G2) ) ) ;
    SCIJ:=C4 * DA*DBCIJ - 2 *BB*GECIJ ;
  END;
CLRSCR;
JANELAS;
GOTOXY(2,2);
WRITELN(' EM GRAUS ----- SECCAO ABERTA EM cm2 ---- DIFERENCA ENTRE AREAS ');

```

```

N:=1;
T:=1;
BEGIN
REPEAT
FOR I:=N TO N+15
DO
BEGIN
( T E A VARIABEL DE CONTROLE DE POSICAO PARA IMPRESSAO )
T:=T+1;
SSCII:=50 - SEI;
GOTOXY(3,3+T);
WRITELN(I);

GOTOXY(15,3+T);
WRITELN (SSCII);
GOTOXY(40,3+T);
DIFCII:= SSCII-AREA;
WRITELN (DIFCII);
END;
GOTOXY(3,23);
WRITELN('APORTE A TECLA " M " PARA CONTINUAR OS CALCULOS DOS DEMAIS ANGULOS ');
REPEAT
GOTOXY(70,23);
READ (KBD,TECLA);
UNTIL TECLA= M;
N:=I;
T:=1;
UNTIL I > 90;
END;

END.

```


EM GRAUS ----- SECCAO ABERTA EM cm2 ----- DIFERENCA ENTRE AREAS

31	1.1113160228E+03	7.9552654907E+02
32	1.1148377619E+03	7.9904828817E+02
33	1.1185432133E+03	8.0275373962E+02
34	1.1224312484E+03	8.0664177471E+02
35	1.1265006828E+03	8.1071120909E+02
36	1.1307502769E+03	8.1496080318E+02
37	1.1351787362E+03	8.1938926249E+02
38	1.1397847118E+03	8.2399523808E+02
39	1.1445668006E+03	8.2877732689E+02
40	1.1495235460E+03	8.3373407227E+02
41	1.1546534380E+03	8.3886396433E+02
42	1.1599549141E+03	8.4416544046E+02
43	1.1654263594E+03	8.4963688574E+02
44	1.1710661072E+03	8.5527663354E+02
45	1.1768724396E+03	8.6108203592E+02
46	1.1828435879E+03	8.6705411420E+02

PERTE A TECLA " M " PARA CONTINUAR OS CALCULOS DOS DEMAIS ANGULOS

4 GRAUS ----- SECCAO ABERTA EM cm2 ----- DIFERENCA ENTRE AREAS

	1.1828435879E+03	8.6705411420E+02
	1.1889777332E+03	8.7318825951E+02
	1.1952730070E+03	8.7948353330E+02
	1.2017274917E+03	8.8593801799E+02
	1.2083392211E+03	8.9254974747E+02
	1.2151061814E+03	8.9931670770E+02
	1.2220263111E+03	9.0623683743E+02
	1.2290975024E+03	9.1330802868E+02
	1.2363176012E+03	9.2052812751E+02
	1.2436844083E+03	9.2789493458E+02
	1.2511956796E+03	9.3540620589E+02
	1.2588491271E+03	9.4305965341E+02
	1.2666424195E+03	9.5085294584E+02
	1.2745731829E+03	9.5878370923E+02
	1.2826390015E+03	9.6684952780E+02
	1.2908374183E+03	9.7504794460E+02

PERTE A TECLA " M " PARA CONTINUAR OS CALCULOS DOS DEMAIS ANGULOS

EM GRAUS ----- SECCAO ABERTA EM CM2 ----- DIFERENCA ENTRE AREAS

01	1.2908374183E+03	9.7504794460E+02	0
02	1.2991659360E+03	9.8337646230E+02	0
03	1.3076220176E+03	9.9183254395E+02	0
04	1.3162030874E+03	1.0004136137E+03	0
05	1.3249065314E+03	1.0091170578E+03	0
06	1.3337296985E+03	1.0179402248E+03	0
07	1.3426699011E+03	1.0268804274E+03	0
08	1.3517244158E+03	1.0359349421E+03	0
09	1.3608904845E+03	1.0451010108E+03	0
10	1.3701653152E+03	1.0543758415E+03	0
11	1.3795460826E+03	1.0637566090E+03	0
12	1.3890299294E+03	1.0732404557E+03	0
13	1.3986139664E+03	1.0828244928E+03	0
14	1.4082952745E+03	1.0925058008E+03	0
15	1.4180709045E+03	1.1022814308E+03	0
16	1.4279378786E+03	1.1121484050E+03	0

PERTE A TECLA " M " PARA CONTINUAR OS CALCULOS DOS DEMAIS ANGULOS

1 GRAUS ----- SECCAO ABERTA EM CM2 ----- DIFERENCA ENTRE AREAS

17	1.4279378786E+03	1.1121484050E+03	0
18	1.4378931914E+03	1.1221037177E+03	0
19	1.4479338102E+03	1.1321443365E+03	0
20	1.4580566766E+03	1.1422672030E+03	0
21	1.4682587071E+03	1.1524692335E+03	0
22	1.4785367940E+03	1.1627473203E+03	0
23	1.48888878065E+03	1.1730983328E+03	0
24	1.4993085916E+03	1.1835191179E+03	0
25	1.5097959749E+03	1.1940065012E+03	0
26	1.5203467619E+03	1.2045572882E+03	0
27	1.5309577387E+03	1.2151682650E+03	0
28	1.5416256731E+03	1.2258361994E+03	0
29	1.5523473155E+03	1.2365578418E+03	0
30	1.5631194000E+03	1.2473299264E+03	0
31	1.5739386453E+03	1.2581491716E+03	0
32	1.7179423405E+03	1.4021520668E+03	0

PERTE A TECLA " M " PARA CONTINUAR OS CALCULOS DOS DEMAIS ANGULOS

CAPÍTULO 05 - BALANÇO DE MASSA E ENERGIA.

5.1. - Introdução :O balanço de massa e energia que aqui será detalhado , consiste em um balanço global com objetivo principal de dimensionamento dos equipamentos .

A. - O balanço de massa de processo Industrial consiste no levantamento das quantidades de materiais que entram , deixam ou se acumulam no sistema num intervalo de tempo considerado.

O princípio adotado é a " Lei da conservação das massa ". Tal princípio pode ser equacionado :

$$\{ \text{ massa que entra no sistema } \} - \{ \text{ massa que sai do sistema } \} = \\ = \{ \text{ massa acumulada no sistema } \}.$$

Se

acúmulo > 0 --- acréscimo de matéria no sistema.

acúmulo < 0 --- decréscimo de matéria no sistema .

acúmulo $= 0$ --- entrada = saída.

Partindo do princípio acima citado , vamos agora calcular , dimensionar e analisar cada equipamento.

Analisando a folha de dados do Projeto em questão :

A.) Condições dos gases no Sistema :

$Q_g = 5180 \text{ Nm}^3 / \text{h}$ (base úmido) (vazão adotada p/ cálculo)

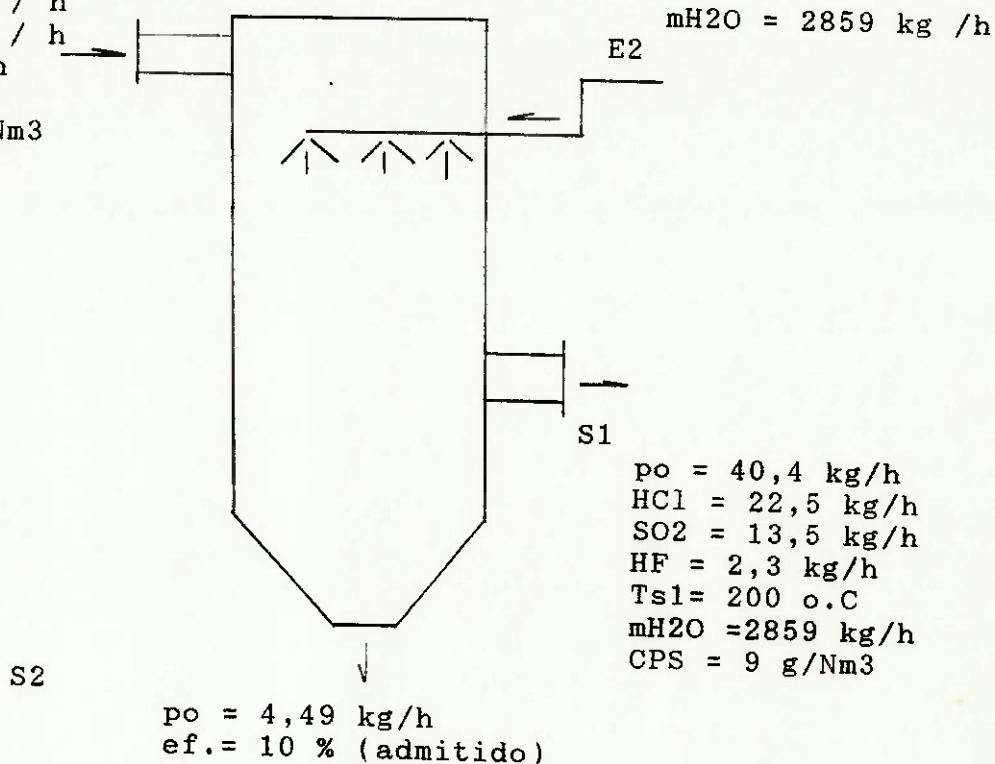
Temperatura = $1220 \text{ }^\circ\text{C}$

Pressão = $- 20 \text{ mm.c.a.}$

composição dos gases :	% volume
CO ₂	8,7
SO ₂	0,14
H ₂ O	13,26
N ₂	71,06
O ₂	6,84

5.2 - TORRE DE RESFRIAMENTO

$p_o = 44,9 \text{ kg / h}$ E1
 $\text{HCl} = 22,5 \text{ kg / h}$
 $\text{SO}_2 = 13,5 \text{ kg / h}$
 $\text{HF} = 2,3 \text{ kg / h}$
 $T_1 = 1220 \text{ o.C}$
 $\text{CPE} = 10 \text{ g / Nm}^3$



1. Entrada na Torre

$$Q_g (\text{úmido}) = 5180 \text{ Nm}^3 / \text{h}$$

contaminantes (massa) - base seco.

pó + metais pesados	10 g /Nm ³
HCl	5 g /Nm ³
SO ₂	3 g /Nm ³
HF	0,5 g /Nm ³

$$Q_g(\text{seco}) = 5180 \cdot (1 - 0,1326) = 4493 \text{ Nm}^3 / \text{h}$$

$$Q_{p_o} = 10 \text{ g /Nm}^3 \cdot Q_g(\text{seco}) = 44,9 \text{ kg / h}$$

$$Q_{\text{HCl}} = 22,5 \text{ kg / h}$$

$$Q_{\text{SO}_2} = 13,5 \text{ kg / h}$$

$$Q_{\text{HF}} = 2,3 \text{ kg / h}$$

Admitindo um rendimento de 10 % para materiais particulados (o que é razoável) pois há pulverização de gotículas de água contra o fluxo de gases.

Então temos $\text{ef.} = 10 \% \text{ em S2}$

$$m_{p_o} = 4,49 \text{ kg / h}$$

Vamos fixar a temperatura de saída em $T_{s1} = 200 \text{ o.C}$ e assim calculamos a quantidade de água necessária para obtenção

dessa temperatura. A essa mesma temperatura não ocorre condensação dos componentes do gás e portanto não haverá problemas de corrosão - formação de ácidos .

Em E1 a porcentagem de H2O é de 13,26 % , portanto:
 $m \text{ H2O} = 5180 \cdot 0,1326 \cdot 18 / 22,4$

$$m \text{ H2O} = 551,9 \text{ kg / h}$$

utilizando a simbologia a seguir temos :
 ver tabela VI ANEXOS

A. Volume de água necessário para o resfriamento do gás.

$$T_{e1} = 1220 \text{ o.C}$$

$$T_{s1} = 200 \text{ o.C}$$

	umido(%)	seco(w)	C(Te1)	C(Ts1)	w.C(Te1)	w.C(Ts1)
H2O	13,26	--	9,37	8,15	--	--
CO2	8,70	0,100	12,02	9,61	1,202	0,961
O2	6,84	0,079	7,98	7,16	0,640	0,573
N2	71,06	0,819	7,58	6,96	6,220	5,707
SO2	0,14	0,001	12,23	10,16	0,020	0,020
					-----	-----
			total ---		8,082	7,261

onde o C(ti) - calor específico molecular ,pode ser obtido da tab.I do anexo para várias temperaturas.

$$C_{ge} = 8,082 / 22,414 = 0,36 \text{ kcal / Nm}^3 \text{ o.C}$$

$$C_{gs} = 7,261 / 22,414 = 0,323 \text{ kcal / Nm}^3 \text{ o.C}$$

$$C_{ae} = 9,37 / 18,015 = 0,5201 \text{ kcal / Nm}^3 \text{ o.C}$$

$$C_{as} = 8,15 / 18,015 = 0,453 \text{ kcal / Nm}^3 \text{ o.C}$$

utilizando a tabela II , com % H2O = 13,26 %

$$\text{temos } X_e = 0,12479 \text{ kg / Nm}^3$$

$$h_e = C_{ge} \cdot T_e + X_e \cdot (C_{ae} \cdot T_e + 545)$$

$$h_e = 0,36 \cdot 1220 + 0,12479 \cdot (0,5201 \cdot 1220 + 545)$$

$$h_e = 586,4 \text{ kcal / Nm}^3$$

Admitindo a Torre de Resfriamento como um Sistema adiabático ,

pela lei da conservação de energia , resulta em processo isoentálpico : $h_e = h_s$

$$h_s = C_{gs} \cdot T_s + X_s \cdot (C_{as} \cdot T_s + 595)$$

$$X_s = (h_s - C_{gs} \cdot T_s) / (C_{as} \cdot T_s + 595)$$

$$X_s = (586,4 - 0,323 \cdot 200) / (0,453 \cdot 200 + 595)$$

$$X_s = 0,7611 \text{ kg} / \text{Nm}^3$$

$$\text{temos } Q_e = 5180 \text{ Nm}^3 / \text{h}$$

$$Q_d = Q_e \cdot (1 - \text{H}_2\text{O} \%) = 5180 \cdot (1 - 0,1326) = 4493 \text{ Nm}^3 / \text{h}$$

$$\text{volume d'água} = (X_s - X_e) \cdot Q_d = 2859 \text{ kg} / \text{h}$$

$$\text{vazão d'água} = (\text{volume d'água}) \cdot (22,414 / 18,015)$$

$$\text{vazão d'água} = 3557,1 \text{ Nm}^3 / \text{h}$$

$$Q_s = Q_e + [\text{vazão d'água(spray)}]$$

$$Q_s = 5180 + 3557,1 = 8737,1 \text{ Nm}^3 / \text{h}$$

$$\% \text{H}_2\text{O na saída} = \left\{ \frac{ [\text{vazão d'água(entrada)} + \text{vazão (spray)}]}{Q_s} \right\} \cdot 100$$

$$\% \text{H}_2\text{O} = \left(\frac{ 5180 \cdot 13,26\% + 3557,1 }{ 8737,1 } \right) \cdot 100 = 48,6 \%$$

- Volume efetivo da Torre

$$F_I = 0,8 \text{ E} + 08 \text{ (VER gráfico 01)}$$

$$P_{SI} = 1,01228 \text{ (gráfico 02 , com \% CO}_2 \text{ , } T_e \text{ , } T_s \text{)}$$

adotando altitude local = 0 metros

$$P = 760 \text{ mmHg}$$

$$V = F_I \cdot P_{SI} \cdot (Q_e / 3600) \cdot (760 / P) \cdot d \cdot d$$

adotando $d = 0,0004$ -- diâmetro da gotícula

$$V = 18,64 \text{ m}^3$$

adotando 30 % de segurança :

$$V_e = 1,3 \cdot V = 24,24 \text{ m}^3$$

- Dimensões da Torre

$$V_e = H \cdot 3,1416 \cdot D \cdot D / 4$$

é comum em estudos e projetos adotar $H = 3 \cdot D$, portanto substituindo na eq. acima, e resolvendo para 'D':

$$D = 2,175 \text{ m} \quad \text{---} \quad H = 6,525 \text{ metros}$$

(OBSERVAR GRÁFICO 03 DO ANEXO)

Portanto na saída da Torre temos :

$$Q_{\text{gas}} = 8737,1 \text{ Nm}^3 / \text{h}$$

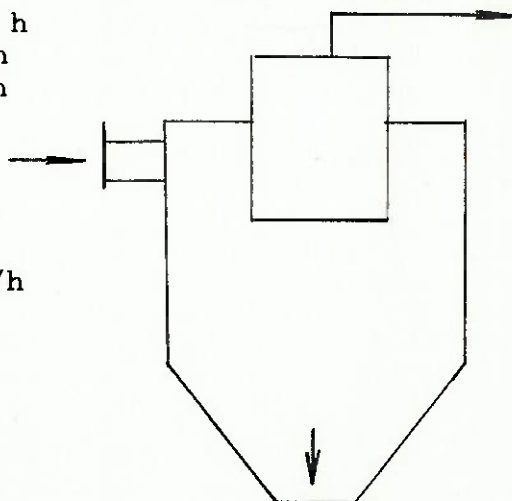
$$T_{s1} = 200 \text{ o. C}$$

$$P = -25-5 = -30 \text{ mm.c.a.}$$

logo,	entrada % vol.	saída % vol.
CO2	8,70	5,16
SO2	0,14	0,08
H2O	13,26	48,57
N2	71,06	42,13
O2	6,84	4,06

5.3 - CICLONE (COLETOR DA 1a. ETAPA)

$m_{H_2O} = 2859 \text{ kg / h}$
 $p_o = 40,4 \text{ kg / h}$
 $HCl = 22,5 \text{ kg / h}$
 $SO_2 = 13,5 \text{ kg / h}$
 $HF = 2,3 \text{ kg / h}$
 $T_{e1} = 200 \text{ o.C}$
 $P = - 30 \text{ mm.c.a.}$
 $CPE = 9 \text{ g / Nm}^3$
 $Q_e = 8737,1 \text{ Nm}^3 / \text{h}$



$Q_e = 8737,1 \text{ Nm}^3 / \text{h}$
 $HCl = 22,5 \text{ kg / h}$
 $SO_2 = 13,5 \text{ kg / h}$
 $HF = 2,3 \text{ kg / h}$
 $T_{s1} = 200 \text{ o.C}$
 $P = - 104 \text{ mm.c.a.}$
 $p_o = 30,704 \text{ kg / h}$
 $CPS = 6,84 \text{ g / Nm}^3$

$$p_o = 9,7 \text{ kg / h} \quad CPS = 2,16 \text{ g / Nm}^3$$

- Cálculo da eficiência

1. diâmetro mínimo
temos :

$$Q_e = 8737,1 \text{ Nm}^3 / \text{h}$$

$$Q_e = 4,2 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$V_e \text{ (veloc. de entrada) } = 15 \text{ m /s} \quad \text{e} \quad 1 \text{ ciclone}$$

$$\text{portanto } A_i = Q_e / V_e = 0,28 \text{ m}^2$$

considerando as dimensões de Lapple temos :

$$A_i = a \cdot b = 0,5D \cdot 0,25D = 0,125 D \cdot D$$

$$\text{portanto } D = 1,50 \text{ metros}$$

$$\text{logo, } a = 0,5 D = 0,75 \text{ m}$$

$$b = 0,25 D = 0,375 \text{ m}$$

$$S = 0,625 D = 0,9375 \text{ m}$$

$$D_e = 0,5 D = 0,75 \text{ m}$$

$$h = 2 \cdot D = 3,0 \text{ m}$$

$$H = 4 \cdot D = 6,0 \text{ m}$$

$$B = 0,25 \cdot D = 0,375 \text{ m}$$

$$\text{temos } Q = 15120 \text{ m}^3 / \text{h} \quad , \quad D = 1,5 \text{ m} \quad ,$$

$$D_e = 0,75 \text{ m} \quad , \quad R_{Op} = 1700 \text{ kg} / \text{m}^3 \quad , \quad x = 1 \text{ ciclone}$$

Determinação de U :

$$U = 27,4 \text{ m /s}$$

Determinação de V :

$$V = 7,20 \text{ m}^3$$

portanto utilizando o estudo relativo a ciclones feito anteriormente , temos :

$$d_0 = 5,73 \text{ micron- metros}$$

2. Diâmetro de corte (d50)

temos A = 25,34 m²

$$FI (fi) = 0,98$$

portanto utilizando as equações do estudo realizado anteriormente:

$$d50 = 8,9 \text{ micron-metros}$$

3. Diâmetro crítico (d100)

Retomando o mesmo procedimento para determinação de d100 , conforme estudo realizado anteriormente , temos :

$$d100 = 9,377 \text{ micron-metros}$$

Portanto para determinação da eficiência temos:

$$(X1 , Y1) = (0 , 5.37)$$

$$(X2 , Y2) = (50 , 8.9)$$

$$(X3 , Y3) = (100 , 9.4)$$

$$a = 5,79 \quad , \quad b = 0,0056$$

$$\text{temos eficiência} = 23,98 \% = 24 \%$$

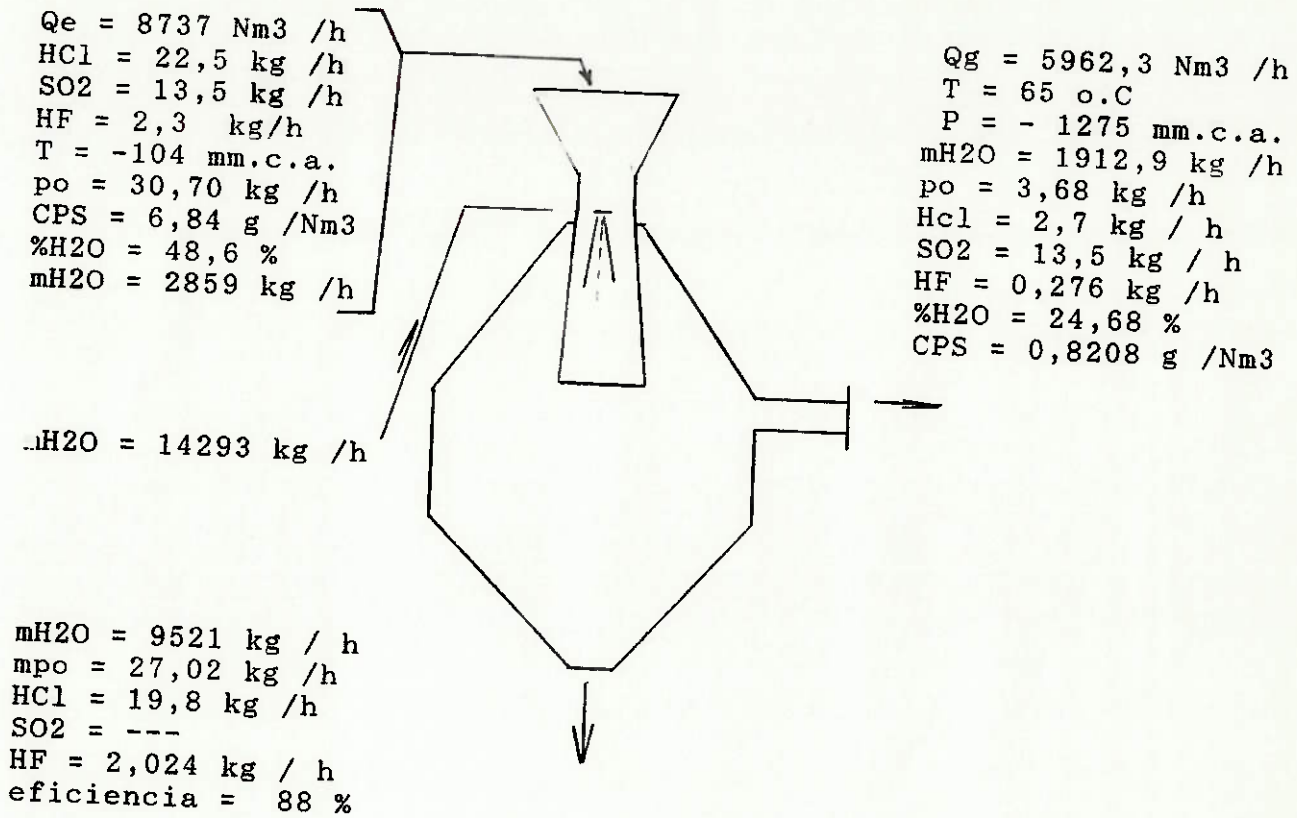
- Cálculo da perda de carga : DP

$$DP = 57,66 \text{ mm.c.a.} \quad (\text{ equação } 04)$$

$$DP = 107,73 \text{ mm.c.a} \quad (\text{ equação } 03)$$

adotaremos o valor mais alto , visando garantir os aspectos de segurança para o dimensionamento do ventilador .

5.4.- LAVADOR VENTURI



a. Resfriamento dos gases

$T = 200 \text{ o.C}$ --- $T \text{ vapor.}$

$P = 10009 - 917 = 9092 \text{ mm.c.a. (} 0,880 \text{ kgf} / \text{cm}^2 \text{)}$

$P = 9092 = 0.880$
 $P_{\text{atm}} 10330$

----- tabela vapor d' água
 $T (\text{vap.}) = 95,6 \text{ o.C}$

$m\text{H}_2\text{O} \cdot 595 = 8737 \cdot 0,336 \cdot (200 - 95,6)$

$m\text{H}_2\text{O} = 515,7 \text{ kg} / \text{h}$

$Q\text{H}_2\text{O} = 515,7 \cdot (22,4 / 18) = 642 \text{ Nm}^3 / \text{h}$

b. Vazão de gas seco

$Q_{\text{gas seco}} = (1 - 0,486) \cdot 8737 = 4490,8 \text{ Nm}^3 / \text{h}$

c. Resfriamento do gás seco

$$0,486 \cdot 8737 \cdot 0,336 (96 - T_f) = m_{H2O2} \cdot (T_f - 25)$$

d. Água condensada

$$(48,6 - \%H_2O(T_f)) \cdot 4888 \cdot (18 / 22,4) \cdot 595 = m_{H2O3} \cdot (95,6 - 25)$$

e. Resfriamento da água condensada

$$\{ 4888 + [(0,486 - \%H_2O(T_f)) \cdot 4888] \} \cdot (95,6 - T_f) = m_{H2O4} \cdot (T_f - 25)$$

f. Da tabela II, temos para $T_f = 65$ o.C e $\% H_2O = 24,7\%$

----- $m_{H2O2} = 1106 + 642 \text{ Kg / h}$

----- $m_{H2O3} = 7912 \text{ Kg / h}$

----- $m_{H2O4} = 4633 \text{ Kg / h}$

Total = 14293 kg / h

L / G = $14293 / 8737 = 1,63$

Qg umido = $4490,8 / 0,7532 = 5962,3 \text{ Nm}^3 / \text{h}$

-- Cálculo da eficiência do L. V.

a.1 Perda de carga : DP (Hesketh)

1. velocidade do gás

Q = $8737 \text{ Nm}^3 / \text{h}$ T = 65 o.C

Qefetivo = $3,16 \text{ m}^3 / \text{s}$

Qef. = Ag . V

adotando V = 95 m / s --- Ag = $0,0333 \text{ m}^2$

portanto Vg = $95 \text{ m / s} = 311,7 \text{ ft / s}$

2. L / G

$$L / G = 9,14 \text{ U.S. gal} / 1000 \text{ ft}^3$$

3. ROg

$$ROg = 1,2 \text{ kg} / \text{m}^3 = 0,075 \text{ lb} / \text{ft}^3$$

4. Ag

$$Ag = 0,0333 \text{ m}^2 = 0,358 \text{ ft}^2$$

Portanto conforme modelo de Hesketh temos :

$$DP = 23,75 \text{ inch. H}_2\text{O} = 603,3 \text{ mm.c.a.}$$

a.2 Conforme Calvert

temos :

$$Vg = 9500 \text{ cm} / \text{s}$$

$$L / G = 1,26$$

$$\text{Portanto } DP = 1171,3 \text{ mm.c.a.}$$

-- Cálculo da eficiência .

Hesketh

$$\text{Penetração} = 0,0374$$

$$\text{Eficiência} = 1 - 0,0374 = 96,3 \%$$

Calvert

temos

$$ROl = 1 \text{ g} / \text{cm}^3$$

$$DP = 117,13 \text{ cm.c.a.}$$

$$ROp = 1,7 \text{ g / cm}^3$$

$$MIg = 1,89 \text{ E-04 g / cm.s}$$

portanto,

para $dp < 5$ micron.metros

$$Kc = 1 + (0,172 / dp)$$

dp	Kc	eficiência
0,4	1,43	31,4 %
0,7	1,25	63,4 %
1,5	1,12	98,4 %
2,5	1,07	100,0 %

tabulando os valores para faixa de particuldos :

FAIXA	% em peso	EF.%	EF.parcial %
0 - 0,2 micron	5,6	10	0,56
0,2- 0,5	8,4	31,4	2,64
0,5- 1,0	14,0	96,0	13,44
1 - 5	72,0	99,9	71,99

portanto , somando os valores da última coluna = 88,6 % .

5.5 - TORRE DE ABSORÇÃO (Dessulfurizador) .

5.5.1 - INTRODUÇÃO

A Torre de Absorção é um equipamento destinado a retirar o SO₂ contido nos gases . A tecnologia disponível para a dessulfurização de gases está caracterizada pelos seguintes processos :

A. Processos úmidos

- calcáreo
- cal
- cal / calcáreo
- carbonato de sódio
- duplo alcali
- wellman-lord
- soda
- amônia

B. Processos úmido / seco

- spray dry com carbonato de sódio
- spray dry com soda
- spray dry com cal

C. Processos secos

- óxido de cobre
- carvão ativado

O quadro 03 mostra os processos mais utilizados e difundidos.

O balanço que a seguir é realizado , consiste no seguinte : (duplo sal solúvel de alcali) Uma solução de NaOH reage com SO₂ formando sulfato e sulfito de sódio. Esta solução de sulfito e sulfato é então regenerada fazendo-se reagir com cal ou pedra de cal , para formar lama de sulfito e sulfato de cálcio como refugo. A solução regenerada contendo NaOH é então reciclada para o absorvedor de SO₂ , mas este processo é não regenerável , uma vez que o SO₂

PROCESSOS DE DESSULFURIZAÇÃO DISPONÍVEIS A NÍVEL MUNDIAL,
COM OS REAGENTES UTILIZADOS, REAÇÕES PRINCIPAIS, RESÍDUOS E PRODUTOS FORMADOS

PROCESSO	BASE	REAGENTE	REAÇÃO PRINCIPAL	REAÇÃO DE RECUPERAÇÃO	RESÍDUO	PRODUTO	OBS
Calcáreo	úmida	Calcáreo (CaCO ₃)	CaCO ₃ +SO ₂ + CaSO ₃ ·CO ₂ CaSO ₃ +SO ₂ +H ₂ O → Ca(HSO ₃) ₂		Lama de sulfito/ Bissulfito/sulfato de cálcio	-	
Calcáreo com produção de gesso	ídem	ídem	ídem	CaSO ₃ + 1/2 O ₂ + 2H ₂ O → CaSO ₄ ·2H ₂ O	-	Gesso (sulfato de cálcio)	
Cal	ídem	Cal (CaO ou Ca(OH) ₂)	Ca(OH) ₂ +SO ₂ + CaSO ₃ ·H ₂ O CaSO ₃ +SO ₂ +H ₂ O + Ca(HSO ₃) ₂		Lama de sulfito/ Bissulfito/sulfato de cálcio	-	
Cal com produção de Gesso	ídem	ídem	ídem	CaSO ₃ + 1/2 O ₂ + 2H ₂ O + CaSO ₄ ·2H ₂ O	-	Gesso	
Cal/Calcáreo	ídem	Cal e Calcáreo	CaCO ₃ +SO ₂ + CaSO ₃ +CO ₂ Ca(OH) ₂ +SO ₂ + CaSO ₃ +H ₂ O CaSO ₃ +SO ₂ +H ₂ O + Ca(HSO ₃) ₂		Lama de sulfito/ Bissulfito/sulfato de cálcio	-	
Cal/Calcáreo com produção de gesso	ídem	ídem	ídem	CaSO ₃ + 1/2 O ₂ + 2H ₂ O + CaSO ₄ ·2H ₂ O	-	Gesso	
Duplo-Alcali	ídem	Soda Cáustica (NaOH) e Cal (na recuperação)	2NaOH+SO ₂ + Na ₂ SO ₃ +H ₂ O Na ₂ SO ₃ +SO ₂ +H ₂ O + 2NaHSO ₃	NaHSO ₃ +NaOH + Na ₂ SO ₃ Na ₂ SO ₃ +Ca(OH) ₂ + 2NaOH+CaSO ₃	Lama de sulfito de cálcio	Soda (re-utilizada no lavador)	
Soda	ídem	Soda Cáustica (NaOH)	ídem		Solução de sulfito/bissulfito / sulfato de sódio	-	
Wellman-Lord	ídem	Sulfato de Sódio (Na ₂ SO ₃)	SO ₂ +Na ₂ SO ₃ +H ₂ O + 2NaHSO ₃	2NaHSO ₃ + Na ₂ SO ₃ +SO ₂ +H ₂ O	-	Sulfato de sódio (re-utilizado no lavador) e diox. enx. concentrado	1
Amônia	ídem	Amônia (NH ₃)	NH ₃ +SO ₂ +H ₂ O + NH ₄ HSO ₃ 2NH ₃ +SO ₂ +H ₂ O + (NH ₄) ₂ SO ₃		Solução de sulfito/bissulfito/sulfato de amônia	-	
Amônia com recuperação	ídem	ídem	ídem	NH ₄ HSO ₃ +NH ₃ + (NH ₄) ₂ SO ₃ (NH ₄) ₂ SO ₃ +1/2 O ₂ + (NH ₄) ₂ SO ₄	-	Sulfato de amônia	2, 3
Carbonato de sódio	ídem	Carbonato de sódio (Na ₂ CO ₃)	Na ₂ CO ₃ +SO ₂ + Na ₂ SO ₃ +CO ₂		Solução de sulfito de sódio	-	
Magnésio com recuperação	ídem	Oxido de magnésio (MgO)	MgO+SO ₂ +H ₂ O + MgSO ₃	MgSO ₃ + MgO+SO ₂	-	-	
Spray-Dry	Absorção úmida/coleto a seco	Cal ou soda ou carbonato de sódio	Vide reações acima para o reagente utilizado		Sulfito/bissulfito/sulfato de cálcio em forma sólida (pó)	-	Óxido de magnésio (re-utilizado no lavador) e diox. enx. conc. 1

OBS: 1 - SO₂ concentrado pode ser transformado em enxofre elementar ácido sulfúrico ou SO₂ líquido. Processo mais adequado para fábricas de ácido sulfúrico, refinarias de petróleo, indústrias químicas em geral e grandes fontes de SO₂.
 2 - O Resíduo pode ser comercializado para indústrias de fertilizantes
 3 - O sulfato de amônia pode ser vendido para indústrias de fertilizantes
 4 - A coleto final deve ser feita por filtro de tecido ou precipitador eletrostático

não é recuperado.

Gases lavados passam através de um demister e são descarregados para a atmosfera. A quantidade de SO₂ assim removida normalmente ultrapassa 90 % .

O processo de absorção por soda cáustica por via úmida que usa NaOH como absorvedor apresenta as seguintes características :

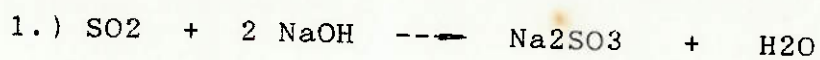
1. A soda cáustica (NaOH) é de fácil aquisição.
2. A soda cáustica possui alto poder de reação com o SO₂ e com isso possibilita a construção com zona de absorção de tamanho relativamente reduzido.
3. Operação e manejo do equipamento extremamente simples, pois em se tratando de um processo que utiliza solução líquida , não há necessidade de manuseio de lamas como no processo de cal e magnésio.
4. Não há problema de incrustação na parede da tubulação e equipamento.
5. É possível a seleção de um dos vários processos de tratamento de efluente do dessulfurizador , dependendo da finalidade. Dentre os quais :
 - a. Sistema de recuperação de Na₂SO₃ ;
 - b. Sistema de despejo de Na₂SO₄ ;
 - c. Sistema de recuperação de NaOH .

5.5.2 - PRINCÍPIO DO PROCESSO DE ABSORÇÃO POR SODA CAUSTICA.

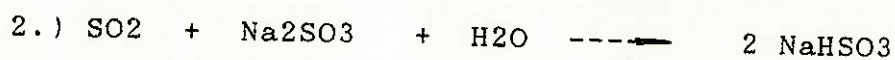
Os gases provenientes do Lavador Venturi com temperatura em torno de 65 o.C são lavados com solução aquosa de soda , para remoção de partículas sólidas , e ao mesmo tempo

resfriados .

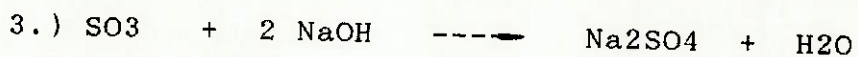
Na zona de absorção de gás ocorrem as seguintes reações:



Paralelamente , á medida que vai se formando mais Na_2SO_3 este reage com SO_2 conforme a reação abaixo :



Pequenas quantidades de SO_3 nos gases reagem com a soda :



O gás limpo passa então por um eliminador de névoa , e é expelido pela chaminé , saturado com vapor d'água.

A medida que a soda for sendo consumida , o PH vai diminuindo e conseqüentemente também a eficiência de retenção de SO_2 .

5.5.3 - DIMENSIONAMENTO DO EQUIPAMENTO

1. Condições de Projeto

Vazão de gás = 5962 Nm³ / h

Temperatura = 65 o.C

Composição do gás

CO₂ = 7,6 %

SO₂ = 0,12 %

H₂O = 24,68 %

N₂ = 61,70 %

O₂ = 5,95 %

massa molecular média = 29,12

eficiência de abatimento de SO₂ = 99 %

2. Cálculo da concentração de liquido necessária

a.) Admitindo solução de liquido no fundo da torre :
PH = 7,0

b.) Para cada mol de SO₂ são necessários 1,75 moles de NaOH;

c.) No. de moles de SO₂ (nSO₂)

$$nSO_2 = 5962 \cdot 0,0012 / 22,4 = 0,32 \text{ Kmoles / h}$$

d.) Massa de soda necessária para ef= 99 %

$$M(\text{NaOH}) = 0,32 \cdot 0,99 \cdot 1,75 \cdot 40 = 22,2 \text{ Kg / h}$$

e.) Admtindo-se L / G = 2 litros / Nm³

$$\text{vazão de liquido} = 2 \cdot 5960 = 11920 \text{ litros / h}$$

$$\text{concentração} = (22,2 \cdot 100) / (11920 + 22,2) = 0,19 \%$$

f.) Cálculo do W.R. (wetting rate)

admtindo -se densidade da solução = 1,0

$$\text{Vol. de NaOH} = 19 \cdot 36,15 = 686,9 \text{ ft}^3 / \text{h}$$

g.) Seleção do recheio

g.1) Diâmetro estimado da torre

$$\text{Vol. ef. do gás} = 5960 \cdot (273 + 65) / 273 = 7380 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$\text{Vol. ef. do gás} = 7380 \cdot 36,315 = 268000 \text{ ft}^3 / \text{h}$$

$$\text{Vol. ef. do gás} = 268000 / 3600 = 74,4 \text{ ft}^3 / \text{s}$$

$$\text{estimando } V(\text{gás}) = 3 \text{ ft} / \text{s}$$

$$74,4 = 3 \cdot \text{PI} \cdot D \cdot D / 4 \quad \text{-----} \quad D = 5,6 \text{ ft} (1,7 \text{ m})$$

$$\text{diâmetro nominal do recheio } D_i / 15 = 0,37 \text{ pol.}$$

recheio : sela intalox (diâmetro nominal = 0,5 pol.)

(TAB.III) ap : área específica do recheio = 142 ft² / ft³

g.2) Cálculo do W.R.

$$W.R. = L.A / a_p = \text{vazão de líquido} / \text{área específica}$$

$$W.R. = 686,9 / 142 = 4,8 \text{ ft}^3 / \text{ft}^2 \cdot \text{h}$$

$$M.W.R. = 0,85 \text{ ft}^3 / \text{ft}^2 \cdot \text{h} \quad (\text{para recheios } \leq 3 \text{ pol.})$$

$$\text{portanto } W.R = 4,8 > M.W.R. = 0,85 \quad \text{---- OK !}$$

sendo M.W.R. o mínimo W.R.

g.3) Cálculo do diâmetro da torre

Observar gráfico _ 04

$$\text{1o.eixo x : } (L / G') \cdot (RO_g / RO_l)$$

$$L = 11920 \text{ kg / h}$$

$$G' = 5962 \cdot (29,12 / 22,4) = 7751 \text{ kg / h}$$

$$RO_g = P \cdot M / (R \cdot T) = 1 \cdot 29,12 / (0,082 \cdot (273 + 65)) = 1,05 \text{ kg / m}^3$$

$$RO_l = 1000 \text{ kg / m}^3$$

$$\text{eixo X} = 11920 \cdot (1,05 / 1000) / 7751 = 0,0498 = 0,05$$

$$\text{eixo Y na linha de flooding para X} = 0,05 \quad \text{----- Y} = 0,176$$

considerando ponto de operação , 50 % do flooding

$$Y_{op.} = 0,176 \cdot 0,5 = 0,088$$

$$0,088 = \frac{G \cdot G \cdot C_f \cdot M^{0,2} \cdot RO(H_2O)}{G_c \cdot R_a \cdot R_L \cdot R_L}$$

$$C_f = 270 \text{ fig 9.12 A}$$

$$M_i = 0,5 \text{ Cp a } 60 \text{ o.C H}_2\text{O} \quad , \quad RO_l = 1000 \text{ kg / m}^3 = 62,4 \text{ lb/ft}^3$$

$$G_c = 4,18 \text{ E+08 lb} \cdot \text{ft} / \text{lb} \cdot \text{h} \cdot \text{h}$$

$$0,088 = G \cdot G \cdot 270 \cdot 0,5^{0,2} / (4,18 \text{ E+08} \cdot 0,066 \cdot 62,4)$$

$$G = 803 \text{ lb / h} \cdot \text{ft}^2$$

g.4) Cálculo da área da Torre

$$\text{vazão de gás } G' = 7751 \text{ kg / h}$$

$$G' = 7751 \cdot 2,2 = 17052 \text{ lb / h}$$

$$\text{Area } A = G' / G = 17052 / 803 = 21,2 \text{ ft}^2 \quad (1,97 \text{ m}^2)$$

g.5) Cálculo do diâmetro (D) da Torre

$$21,2 = \text{PI} \cdot D \cdot D / 4 \quad \text{-----} \quad D = 1,6 \text{ m} \quad (5,25 \text{ ft})$$

recheando : tamanho do enchimento

$$0,5 = D_i / x \quad \text{----} \quad x = 10,5 \quad (D_i \text{ em ft})$$

é recomendável tamanho de enchimento :

$$(D_i / 10) > (\text{dia. nominal ench.}) > (D_i / 20)$$

portanto no caso ($D_i / 10,5$) ----> OK ! dentro do intervalo

g.6) Estimativa da perda de carga

Figura 04 $X = 0,5$ e $Y = 0,088$ ----->

$$\text{DP} = 1,1 \text{ pol H}_2\text{O / ft de enchimento}$$

g.7) Cálculo da altura de enchimento

- cálculo de Koga

$$\text{Koga} = C_1 \cdot C_2 \cdot (L')^{0,17} \cdot (F_s)^{0,6} \cdot (P_i)^{-0,21}$$

$$C_2 = 0,69 \quad , \quad C_1 = 8,71 \quad , \quad C_3 = 0,66 \quad (\text{TAB. IV E V})$$

$$L' = 11920 / (3,785 \cdot 60 \cdot 53,37) = 0,98 \text{ GPM / ft}^2$$

$$F_s = G \cdot \sqrt{(\text{ROg})} = 1,42 \cdot \sqrt{(0,066)} = 0,365$$

P_i = pressão parcial em ATM do SO_2

$$P_i = 0,0012 \cdot 1 = 0,0012$$

$$\text{Koga} = 0,69 \cdot 8,71 \cdot (0,98)^{0,17} \cdot (0,365)^{0,6} \cdot (0,0012)^{-0,21}$$

$$\text{Koga} = 12,64$$

g.8) Cálculo da altura de enchimento

$$\text{Koga} = N / (H \cdot A \cdot P \cdot \text{DYlm})$$

$N = \text{No. de moles / h de } \text{SO}_2 \text{ transferido}$

$$N = 0,32 \cdot 0,99 / 0,4536 = 0,70 \text{ lb mol / h}$$

$$K_{oga} = 12,64$$

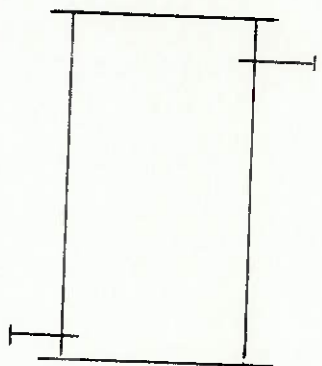
$$A = 21,2 \text{ ft}^2$$

$$P = 1 \text{ ATM}$$

$$DY_{lm} = \frac{(Y_{\text{SO}_2} - Y_{\text{SO}_2'})_{(2)} - (Y_{\text{SO}_2} - Y_{\text{SO}_2'})_{(1)}}{\ln \left[\frac{(Y_{\text{SO}_2} - Y_{\text{SO}_2'})_{(2)}}{(Y_{\text{SO}_2} - Y_{\text{SO}_2'})_{(1)}} \right]}$$

(1) : topo da coluna (2) : fundo da coluna

Y : fração molar



$$\begin{aligned} \text{so}_2 &= 0,0012 \cdot 0,01 = 1,2\text{E-}05 \\ Y_{\text{SO}_2'} &= 0 \\ &(1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &(2) \\ \text{so}_2 &= 0,0012 \\ Y_{\text{SO}_2'} &= 0 \end{aligned}$$

$$DY_{lm} = \frac{(0,0012 - 0) - (1,2\text{E-}05 - 0)}{\ln \left[\frac{0,0012}{1,2 \text{E-}05} \right]} = 2,6 \text{ E } -04$$

portanto ,

$$12,64 = \frac{0,70}{H \cdot 21,2 \cdot 1 \cdot 2,6\text{E-}04}$$

ou seja , $H = 10 \text{ ft} = 3,06 \text{ metros}$

perda de carga = 11 pol H₂O = 280 mm.c.a.

5.6 - RESULTADO DO BALANÇO DE MASSA / MATERIAL

DESCRIMIN. A POSICAO	1	2	3	4	5
VAZAO DE GAS (Nm ³ /h)	5180	5737	5737	5962	5962
TEMPERATURA (oC)	1200	200	200	35	35
PRESSAO (mmHg)	-20	-36	-105	-1275	1500
H2O (%vol.)	10.26	41.57	49.57	24.63	24.63
CONC. SO ₂ (mg/Nm ³)	10000	9000	8000	620	10
CONC. SO ₂ (mg/Nm ³)	3000	3000	3000	3000	30
HCl (mg/Nm ³)	5000	5000	5000	500	0
HF (mg/Nm ³)	500	500	500	50	0

TABELA I - RESULTADO DO BALANCO MATERIAL/MASSA

5.7 - DESCRIÇÃO DO PROCESSO / EQUIPAMENTOS

A. SEQUÊNCIA DE TRATAMENTO

A.1 TORRE DE RESFRIAMENTO.

Os gases provenientes do incinerador estão a uma temperatura de aproximadamente 1200 o.C e devem ser resfriados até 200 o.C para poderem ser tratados sem que haja condensações ácidas que venham a causar corrosões indesejáveis.

O resfriamento de gases é realizado na Torre de Resfriamento (QT-01) através da evaporação de água em seu interior. Para tanto , faz-se a nebulização de água por meio de bicos aspersores que permitem a obtenção de um jato de cone cheio e gotícula de diâmetro médio de 150 micra. Desta forma , assegura-se uma boa evaporação evitando-se gotejamento ou jatos d'água indesejáveis que favorecem a corrosão e a danificação de refratário anti-ácido da Torre.

A injeção de água na Torre é feita transferindo-se água potável de um tanque de água por meio de uma bomba de recalque.

Esta bomba assegura uma pressão nos bicos na ordem de 3,0 kgf/cm² . A aspersão é feita de forma eficiente , injetando-se ar comprimido com a água , a uma pressão no mínimo idêntica à pressão da água. Para se assegurar esta igualdade de pressões para a água e para o ar comprimido , um controlador de pressão diferencial das linhas de água e ar comprimido é colocado na linha de alimentação de ar comprimido.

O controle da vazão de água na Torre é feita por uma válvula de controle instalada na linha de água de retorno da Torre ao tanque de água. Esta válvula é comandada por um

controlador de temperatura instalado no duto de saída da Torre e ajustado a uma temperatura de 200 o.C .

A Torre deverá possuir uma carcaça em aço carbono revestida em até pelo menos á metade com refratário anti-ácido.

Os bicos de aspersão , em material resistente á corrosão e altas temperaturas , ficarão embutidos no refratário anti-ácido e dispostas de forma tal que os cones de nebulização cubram eficientemente toda a área seccional da Torre.

Como proteção adicional aos bicos de aspersão , faz-se purga continua dos nichos de locação dos bicos , no refratário, com ar comprimido.

Uma vez que o gás é desacelerado na Torre , uma pequena parte dos particulados é retida , por gravidade no fundo da Torre. Este pó é retirado através de válvula dupla basculante até um container de pó.

A.2 CICLONE

Os gases arrefecidos na Torre são direcionados ao ciclone para pré-captação dos particulados mais grosseiros (acima de 5 microns).

No ciclone , através de forças centrífugas e criação de vortex , o particulado mais grosso é retido no seu fundo e o particulado mais fino é expelido em direção ao Lavador Venturi. O pó coletado nos ciclones é descarregado através de válvulas dupla basculantes até um container de pó . Os ciclones podem ser feitos em aço carbono isolados termicamente para proteção

pessoal.

A.3 LAVADOR VENTURI

Os gases oriundos do ciclone são resfriados e saturados no L. V.

Numa posição imediatamente anterior à garganta do L.V. , o material particulado se agrega às gotículas de água injetada através de um bocal especial e são posteriormente aceleradas na garganta do Venturi; através da impactação inercial (choque) e condensação , o particulado em contato com as gotículas d'água são coletados , tornando assim sua captação eficiente . Na garganta do Venturi existe um sistema de controle de vazão e pressão , com dois dampers simetricamente posicionados que se abrem e fecham conforme instrumentação, acionados por motor elétrico; os dampers serão revestidos por hastelloy B ou monel , o que melhor se apropriar. Em seguida , o gás sofre uma expansão na carcaça do Lavador e as gotículas d'água com os particulados agregados são separados por inércia , em sua maioria , do fluxo de gases.

A garganta do Venturi , nesta aplicação , de área variável , possui um revestimento anti - abrasivo á base de alumina ou concreto especial. Além deste revestimento é feita uma injeção de água em toda a sua superfície como proteção adicional a abrasão.

A água injetada no Lavador Venturi é descarregada em parte , numa canaleta de concreto e em um tanque de sedimentação para posterior recirculação através de uma bomba que recalca líquido do tanque para a parte superior do L.V. . Os bicos de

injeção de água são alimentados pelo recalque da bomba , posicionados acima do dampers, podem ser desmontados facilmente, caso haja necessidade de manutenção.

Com a saturação do gás no L.V. , há concomitantemente a absorção dos gases HCl e HF , de forma eficiente.

Os sólidos decantados no tanque de sedimentação formam uma lama no fundo do tanque que deve ser removido periodicamente por via manual. A suspensão intermediária (slurry) é também periodicamente filtrada em um filtro á vácuo , separando uma lama desidratada da água , que retorna ao tanque de sedimentação.

A.5 TORRE DE ABSORÇÃO

Os gases provenientes do L.V. são lavados com própria solução aquosa de soda , para remoção de partículas sólidas , e ao mesmo tempo resfriados. Ocorrem várias reações químicas entre o SO₂ e o NaOH de tal forma que o SO₂ aos poucos vai sendo absorvido.

Na Torre de Absorção faz-se a aspensão de uma solução de NaOH , de forma tal que absorva o SO₂ / SO₃ contido nos gases , assim como algum residuo de HCl e HF .

Como a carcaça e as principais partes são construídos em aço inoxidável, são resistentes á alta temperatura e corrosão. Mesmo ocorrendo falha repentina no sistema de esfriamento do gás , o equipamento não sofre nenhum dano (outro material , que poderia ser adotado, é o aço carbono , revestido internamente com borracha , com enchimento feito em fiberglass , promovendo um turbilhamento dos gases e um melhor contato gás/absorvente).

A solução de NaOH deve ser recirculada do fundo da Torre aos bocais de aspersão de forma contínua em um regime , por exemplo , de 8 horas. Após este período , há a drenagem do efluente líquido até o sistema de tratamento de efluentes da planta industrial e uma reposição de nova solução de NaOH é necessária .

Uma vez que há um arraste de névoa da Torre de Absorção, faz-se a complementação da coluna líquida com solução nova , de tempos em tempos (make-up).

Para minimizar este arraste , deve haver um demister de impactação , no duto de saída do gás tratado .

A.5 VENTILADOR DE TIRAGEM

O ventilador de tiragem , do tipo centrífugo , de pás retas inclinadas para trás deve ser fabricado totalmente em aço inox TP - 316 L ; este ventilador deve possuir na parte inferior de sua carcaça , um dreno contínuo de descarga de névoa condensada na carcaça.

A.6 DUTOS DE INTERLIGAÇÃO.

Devido a corrosividade dos gases seria aconselhável o seu dimensionamento (de materiais) com o aço inox ou aço carbono com algum tipo de revestimento , mas que não ocasione alta perda de carga ; adotando velocidade do gás entre 10 a 15 m/s para a vazão em questão (portanto, possível de determinar o diâmetro da tubulação).

A.7 CHAMINÉ

A chaminé deve ser dimensionada para ser auto -

portante ; o seu diâmetro deve ser determinado de forma que não se tenha arraste de névoa condensada nas paredes. Deverá ser de aço carbono , revestido com chapas de aço inox , de espessura fina e fixadas por solda de filete.

CAPÍTULO 06 - PARTE FINAL

6.1 - ANEXOS COMPLEMENTARES

- TABELA I - CALOR MOLECULAR MÉDIO
- TABELA II - ESTADO DO AR SATURADO
- TABELA III - CARACTERÍSTICAS DO RECHEIO
- TABELA IV - SIMBOLOGIA
- TABELA V - FATOR C1 , C2 , C3 PARA TORRE DE ABSORÇÃO.
-
- GRÁFICO I - FATOR DE TEMPERATURA X TEMP. DO GAS DE ENTRADA
- GRÁFICO II - FATOR
- GRÁFICO III - VOLUME DA TORRE DE ABSORÇÃO X ALTURA EFETIVA
- GRÁFICO IV - CORRELAÇÃO P/ PERDA DE CARGA P/ TORRE DE ABSORÇÃO
- GRÁFICO V - FATOR ' Cf '
- GRÁFICO VI - COMPLEMENTOS P/ SELEÇÃO - TORRE DE ABSORÇÃO

TABELA I . - CALOR MOLECULAR MÉDIO À PRESSÃO CONSTANTE , ENTRE 0 e T °C EM KCAL / KMOL .
 PARA CONVERTE-LO EM VALOR CORRESPONDENTE A 1 Kg BASTARÁ DIVIDI-LO PELO PESO MOLECULAR ' M ' DA ÚLTIMA LINHA .

t °C	H ₂	N ₂	O ₂	CO	H ₂ O	CO ₂	SO ₂	NH ₃
0	6,84	6,93	6,99	6,96	8,00	8,62	9,29	8,36
100	6,88	6,94	7,06	6,97	8,06	9,17	9,74	8,69
200	6,93	6,96	7,16	7,00	8,15	9,61	10,16	9,11
300	6,94	7,00	7,27	7,05	8,26	10,02	10,52	9,56
400	6,96	7,06	7,38	7,12	8,38	10,37	10,82	10,03
500	6,98	7,11	7,49	7,19	8,51	10,69	11,09	10,52
600	7,00	7,18	7,59	7,28	8,65	10,98	11,33	11,01
700	7,02	7,25	7,68	7,36	8,79	11,22	11,54	11,47
800	7,05	7,32	7,77	7,44	8,94	11,46	11,72	11,91
900	7,08	7,39	7,85	7,50	9,08	11,65	11,87	12,31
1000	7,12	7,46	7,92	7,57	9,22	11,85	12,00	12,68
1100	7,16	7,52	7,98	7,64	9,37	12,02	12,13	13,02
1200	7,19	7,58	8,04	7,70	9,51	12,18	12,23	13,34
1300	7,24	7,64	8,10	7,75	9,64	12,32	12,33	13,63
1400	7,28	7,70	8,15	7,80	9,78	12,45	12,41	13,89
1500	7,32	7,76	8,19	7,86	9,91	12,57	12,48	14,14
1600	7,36	7,80	8,24	7,90	10,04	12,69	12,55	14,38
1700	7,41	7,84	8,28	7,94	10,16	12,79	12,61	14,60
1800	7,46	7,88	8,33	7,99	10,28	12,88	12,67	14,80
1900	7,50	7,92	8,37	8,02	10,39	12,98	12,71	14,99
2000	7,54	7,95	8,41	8,06	10,50	13,06	12,77	15,16
2100	7,58	7,97	8,44	8,09	10,60	13,11	12,81	15,32
2200	7,62	8,00	8,48	8,12	10,69	13,16	12,85	15,47
2300	7,66	8,03	8,51	8,15	10,78	13,21	12,89	15,61
2400	7,70	8,06	8,54	8,18	10,87	13,26	12,93	15,75
2500	7,74	8,10	8,58	8,21	10,97	13,31	12,96	15,88
2600	7,78	8,13	8,62	8,24	11,06	13,39	12,99	16,00
2700	7,82	8,16	8,65	8,26	11,14	13,47	13,02	16,11
2800	7,86	8,18	8,68	8,28	11,22	13,55	13,04	16,21
2900	7,89	8,20	8,71	8,30	11,30	13,62	13,07	16,31
3000	7,92	8,22	8,74	8,32	11,38	13,69	13,10	16,41
M	2,016	28,16	32,00	28,01	18,02	44,01	64,06	17,03

PARA CALCULAR O VALOR MOLECULAR MÉDIO À PRESSÃO CONSTANTE DE UMA MISTURA GASOSA , BASTARÁ MULTIPLICAR OS VALORES DA TABELA PELO VOLUME ESPECÍFICO DOS RESPECTIVOS GASES . DIVIDINDO A SUA SOMA POR 22,41 OBTÉM-SE O CALOR ESPECÍFICO MÉDIO À PRESSÃO CONSTANTE EM UNIDADES KCAL/Nm³ .°C

TABELA II - ESTADO DO AR SATURADO AR = . GAMA = 1,293 Kg / Nm³
 VAPOR = 0,804 Kg / Nm³

TEMP. [°C]	PROPR. DO VAPOR SATURADO	ENTALPIA DO VAPOR [kcal/kg]	UNIDADE DO AR [kg/m ³]	(Xe) [kg/m ³]	TEMP. H ₂ O [°C]	(% H ₂ O) UNID. RELAT.	TEMP. DO AR SATURADO [°C]
10	9,21	601,6	9,4	9,06	98,788		
11	9,84	602,0	10,1	10,55	98,705	1,294	1,05008
12	10,52	602,5	10,7	11,20	98,616	1,383	1,05468
13	11,23	602,9	11,4	12,06	98,522	1,477	1,05934
14	11,98	603,4	12,1	12,88	98,423	1,576	1,06407
15	12,79	603,8	12,9	13,75	98,318	1,681	1,06887
16	13,63	604,2	13,7	14,60	98,206	1,793	1,07375
17	14,53	604,7	14,5	15,46	98,089	1,911	1,07869
18	15,48	605,1	15,4	16,70	97,964	2,035	1,08373
19	16,48	605,6	16,4	17,81	97,833	2,166	1,08885
20	17,53	606,0	17,4	18,98	97,693	2,306	1,09406
21	18,65	606,4	18,4	20,21	97,547	2,452	1,10601
22	19,83	606,9	19,5	21,52	97,392	2,607	1,10477
23	21,07	607,3	20,6	22,91	97,229	2,770	1,11029
24	22,38	607,8	21,8	24,38	97,056	2,943	1,11593
25	23,75	608,2	23,1	25,94	96,874	3,125	1,12169
26	25,21	608,6	24,4	27,57	96,684	3,315	1,12758
27	26,74	609,1	25,8	29,31	96,482	3,517	1,13360
28	28,35	609,5	27,3	31,14	96,270	3,729	1,13976
29	30,04	610,0	28,8	33,08	96,048	3,951	1,14594
30	31,82	610,4	30,4	35,12	95,814	4,185	1,15255
31	33,69	610,8	32,1	37,29	95,567	4,432	1,15920
32	35,66	611,2	33,9	39,58	95,308	4,691	1,16602
33	37,73	611,7	35,7	41,99	95,036	4,963	1,17303
34	39,89	612,1	37,7	44,54	94,751	5,248	1,18024
35	42,17	612,5	39,7	47,23	94,451	5,548	1,18767
36	44,56	612,9	41,8	50,07	94,137	5,862	1,19532
37	47,07	613,38	44,0	53,08	93,807	6,192	1,20320
38	49,69	613,82	46,3	56,24	93,462	6,537	1,21122
39	52,44	614,26	48,7	59,59	93,100	6,899	1,21974
40	55,32	614,70	51,2	63,11	92,721	7,278	1,22842
41	58,34	615,12	53,8	66,84	92,325	7,675	1,23739
42	61,50	615,54	56,5	70,78	91,908	8,091	1,24667
43	64,80	615,96	59,4	74,94	91,474	8,525	1,25631
44	68,26	616,38	62,4	79,33	91,019	8,980	1,26628
45	71,88	616,80	65,4	83,98	90,543	9,456	1,27664
46	75,65	617,24	68,7	88,88	90,046	9,953	1,28740
47	79,60	617,68	72,0	94,06	89,527	10,473	1,29857
48	83,71	618,12	75,5	99,54	88,948	11,015	1,31021
49	88,02	618,56	79,2	105,33	88,417	11,582	1,32232
50	92,52	619,00	83,0	111,45	87,826	12,173	1,33493
51	97,21	619,40	87,0	117,94	87,209	12,791	1,34809
52	102,09	619,80	91,0	124,79	86,565	13,434	1,36184
53	107,21	620,20	95,3	132,05	85,893	14,106	1,37620
54	112,52	620,60	99,7	139,74	85,194	14,805	1,39123
55	118,05	621,00	104,3	147,89	84,465	15,534	1,40696
56	123,82	621,44	109,1	156,52	83,706	16,293	1,42344
57	129,83	621,88	114,1	165,69	82,914	17,085	1,44072
58	136,10	622,32	119,2	175,42	82,091	17,908	1,45890
59	142,63	622,76	124,6	185,81	81,230	18,770	1,47808
60	149,39	623,20	130,1	196,73	80,343	19,656	1,49818
61	156,44	623,60	135,9	208,44	79,414	20,585	1,51928
62	163,79	624,00	141,9	220,92	78,446	21,553	1,54168
63	171,39	624,40	148,1	234,12	77,449	22,550	1,57006
64	179,32	624,80	154,5	248,33	76,404	23,595	1,59523
65	187,56	625,20	161,1	263,47	75,320	24,679	1,61679
66	196,10	625,62	168,1	279,63	74,197	25,802	1,64491
67	204,96	626,04	175,1	297,0	73,026	26,973	1,67475
68	214,18	626,46	182,5	315,55	71,816	28,183	1,70662
69	223,75	626,88	190,1	335,53	70,558	29,441	1,74049
70	233,70	627,30	198,0	357,03	69,251	30,748	1,77673
71	243,98	627,70	206,2	380,19	67,896	32,103	1,81553
72	254,72	628,10	214,7	405,37	66,483	33,516	1,85729
73	265,76	628,50	223,3	432,37	65,032	34,968	1,90214
74	277,23	628,90	232,5	461,76	63,522	36,477	1,95026
75	289,15	629,30	241,9	493,79	61,954	38,045	2,00280
76	301,43	629,70	251,4	528,57	60,337	39,662	2,05896
77	314,23	630,10	261,4	566,84	58,653	41,346	2,12020
78	327,40	630,50	271,8	608,55	56,927	43,078	2,18734
79	341,08	630,90	282,4	654,69	55,121	44,878	2,26033
80	355,20	631,30	293,3	705,59	53,263	46,737	2,34081
81	369,83	631,68	304,6	762,23	51,337	48,663	2,42936
82	384,99	632,06	316,2	825,51	49,343	50,656	2,52763
83	400,66	632,44	328,4	896,58	47,281	52,718	2,63719
84	416,84	632,82	340,8	976,77	45,152	54,847	2,75994
85	433,54	633,20	353,7	1067,86	42,955	57,044	2,89821
86	450,82	633,58	366,8	1172,53	40,681	59,319	3,05498
87	468,70	633,96	380,4	1293,70	38,329	61,670	3,23480
88	487,16	634,34	394,4	1435,65	35,899	64,100	3,44266
89	506,21	634,72	408,7	1603,92	33,393	66,606	3,68583
							3,97372

TABELA III - CERAMIC BERL SADDLE PACKINGS

NOMINAL SIZE	APPROX. AVERAGE SUFACE AREA ft ² /ft ³
1/4	274
1/2	142
3/4	82
1	76
1 1/2	44
2	32

TABELA IV

SIMBOLOGIA :

Q_e - VAZAO DO GAS NA ENTRADA (umido)	Nm^3/h
Q_s - VAZAO DO GAS NA SAIDA	Nm^3/h
Q_d - VAZAO DO GAS NA ENTRADA (seco)	Nm^3/h
C - CALOR ESPECIFICO MOLAR	$\text{kcal}/(\text{kmol}\cdot\text{oC})$
W - PERCENTUAL VOLUMETRICO EM BASE SECA	
C_{ge} - CALOR MOLECULAR MEDIO DO GAS NA ENTRADA	$\text{kcal}/(\text{Nm}^3\cdot\text{oC})$
C_{gs} - CALOR MOLECULAR MEDIO DO GAS NA SAIDA	$\text{kcal}/(\text{Nm}^3\cdot\text{oC})$
C_{ae} - CALOR MOLECULAR MEDIO DA AGUA NA ENTRADA	$\text{kcal}/(\text{kg}\cdot\text{oC})$
C_{as} - CALOR MOLECULAR MEDIO DA AGUA NA SAIDA	$\text{kcal}/(\text{kg}\cdot\text{oC})$
h_e - ENTALPIA DO GAS A ENTRADA	kcal/Nm^3
h_s - ENTALPIA DO GAS A SAIDA	kcal/Nm^3
X_e - MASSA ESPECIFICA DO VAPOR D'AGUA PRESENTE NO GAS A ENTRADA	kg/Nm^3
X_s - MASSA ESPECIFICA DO VAPOR D'AGUA PRESENTE NO GAS A SAIDA	kg/Nm^3
V_e - VOLUME EFETIVO DA TORRE	m^3
FI - COEFICIENTE DE TEMPERATURA	
PSI - COEFICIENTE DE COMPOSICAO DO GAS	
d - DIAMETRO MAXIMO DA PARTICULA D'AGUA	"
p - PRESSAO BAROMETRICA LOCAL	mm Hg
H - ALTURA DA TORRE	"
D - DIAMETRO DA TORRE	"
T_e - TEMPERATURA DE ENTRADA	oC
T_s - TEMPERATURA DE SAIDA	oC

TABELA V - CONSTANTE C2 PARA Kga EQUATION

SIZE	1" or #1	1 1/2" or # 1 1/2	2" or #2
PLASTIC PALL RING	0,64	0,59	0,51
METAL PALL RING	0,80	0,69	0,59
CERAMIC I.S.	0,69	0,61	0,53
CERAMIC S.I.S.	0,85	----	0,56
PLASTIC S.I.S.	0,80	----	0,53

TABELA V - CORRELAÇÃO EMPÍRICA DE NORTON

LIQUID FILM CONTROL Koga < 4 C3 = 0,05

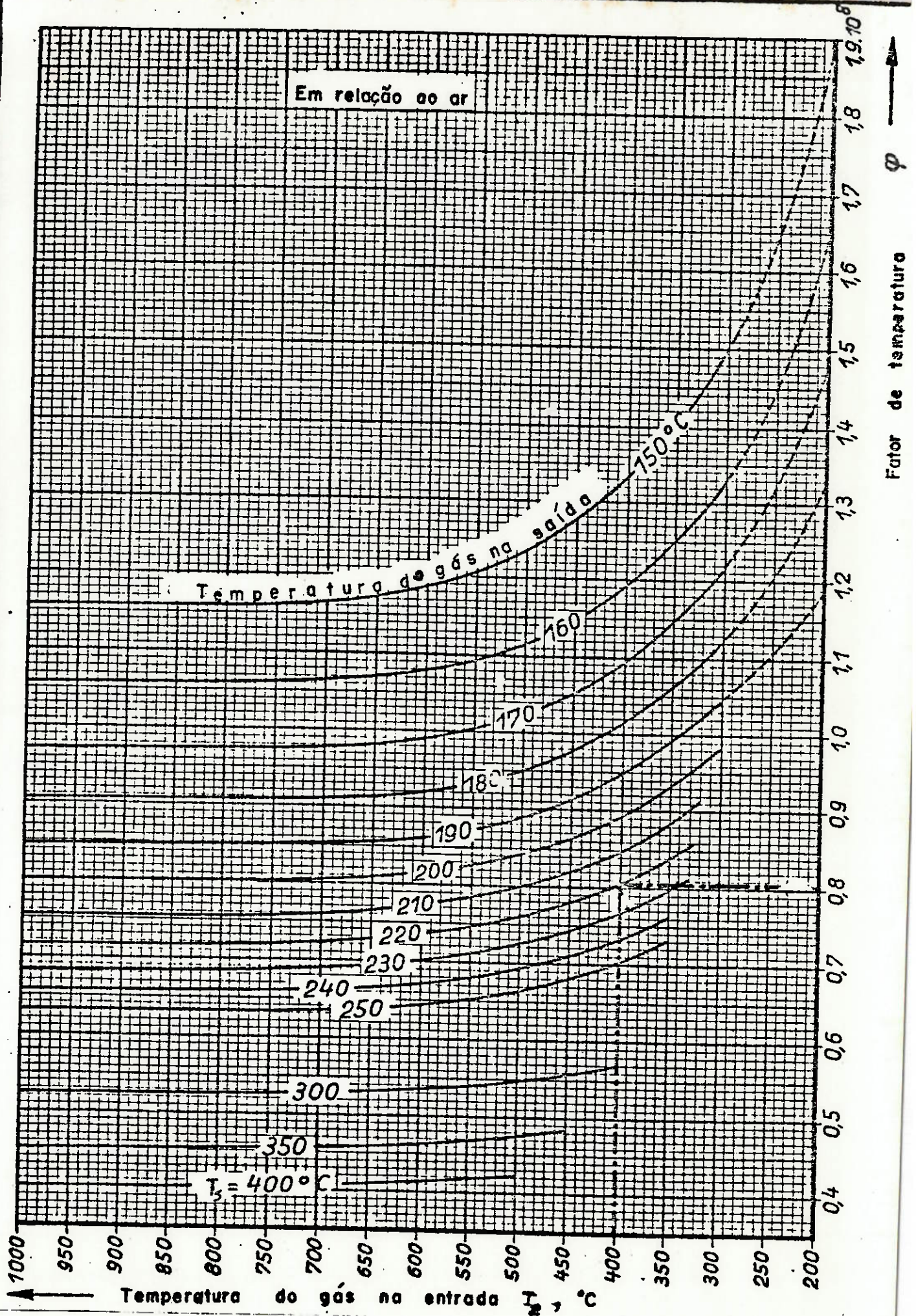
ABSORBED COMPONENT	SOLVENT	CONVERSION	C1
C02	H2O	-----	0,3
C12	H2O	-----	0,1
H2S	H2O	-----	0,17
S02	30 wt.% NaOH	S/Na = 1 to 1,2	2,62

GAS FILM CONTROL Koga > 10 C3 = 0,66

C12	5 wt.% NaOH	< 0,95 C1/Na	10,25
S02	4 wt.% NaOH	< 0,5 S/Na	8,71
HF	H2O	-----	10,25

GRÁFICO I

Em relação ao ar



Fator de temperatura ϕ

Temperatura do gás na entrada T_1 °C

GRÁFICO II

k [Vol.-% CO₂]

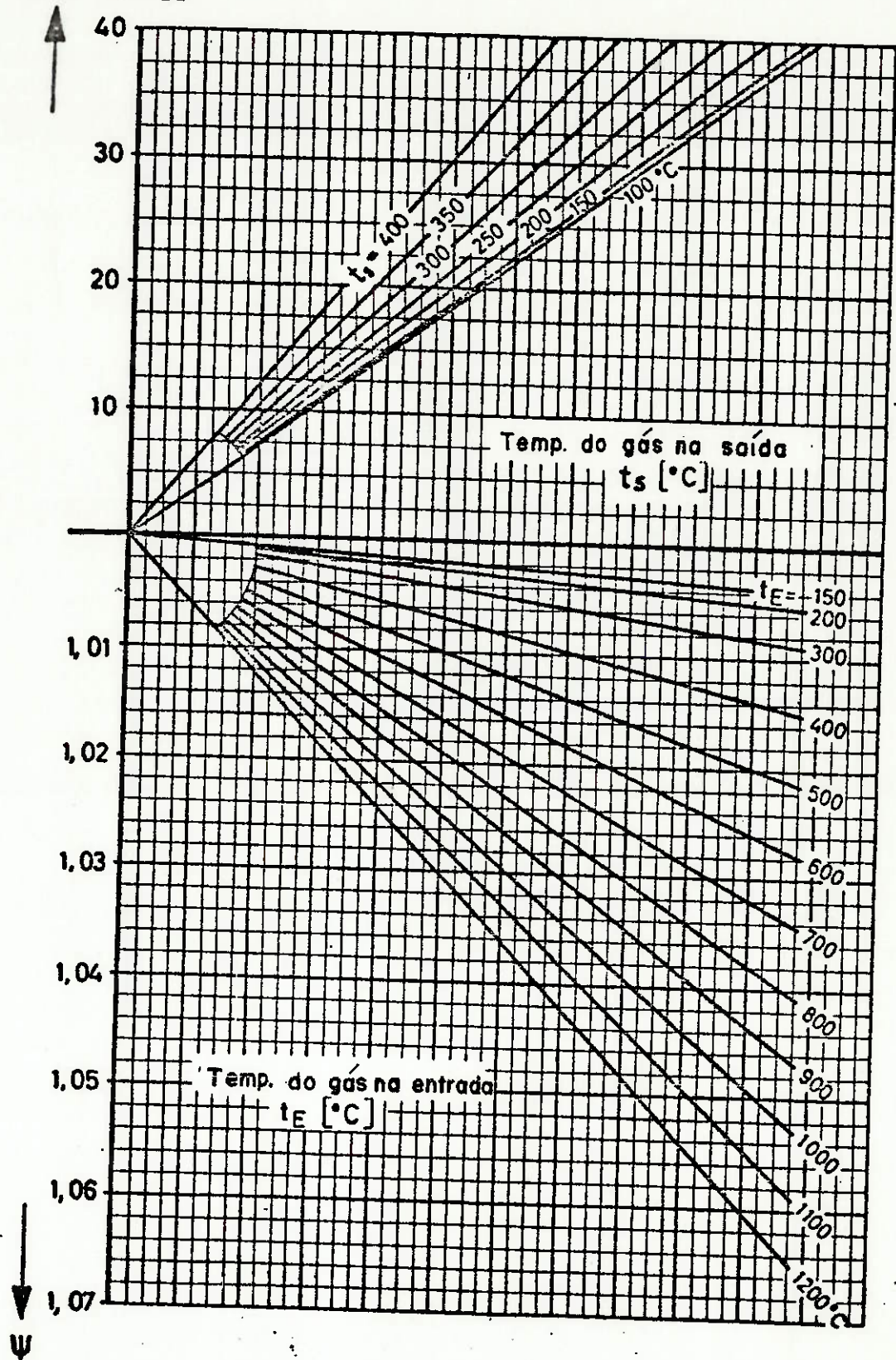


GRÁFICO III

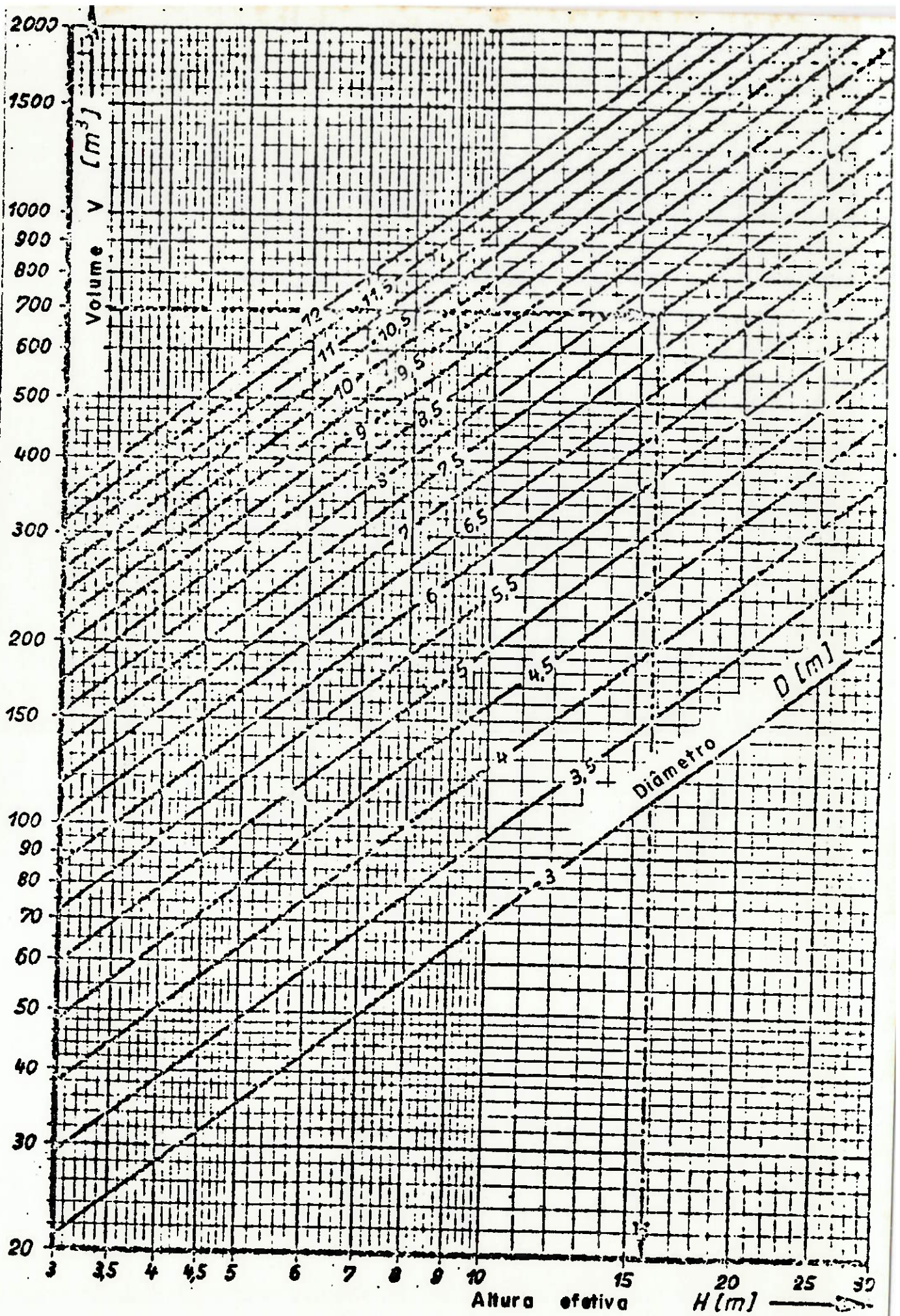
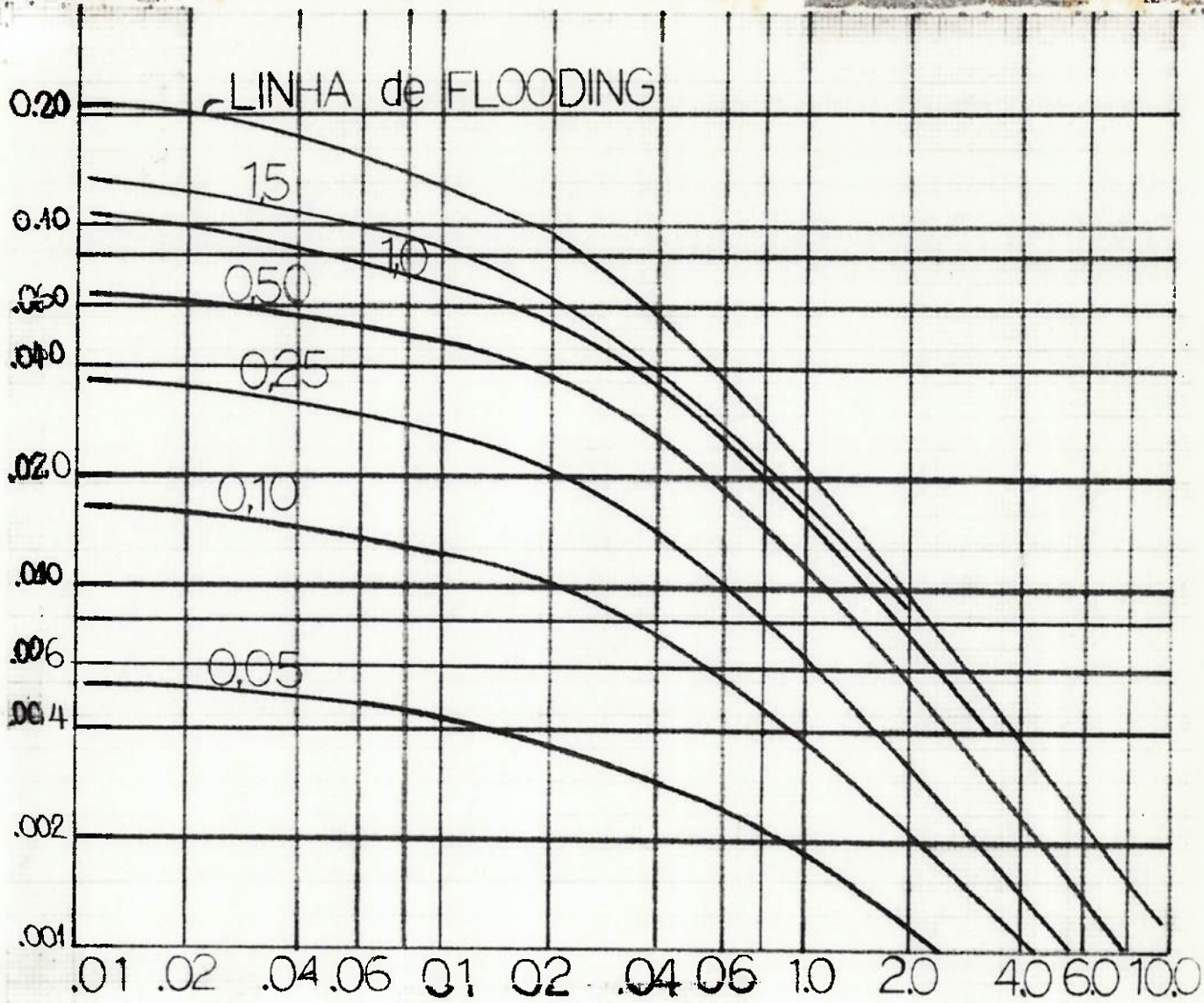


GRÁFICO IV



$$\frac{L}{G} \left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0,5}$$

- L = RAZÃO DE LÍQUIDO , lb / hr . ft²
- G = RAZÃO DE GÁS , lb / hr . ft²
- ρ_L = DENSIDADE DO LÍQUIDO , lb / ft³
- ρ_g = DENSIDADE DO GÁS , lb / ft³
- Cf = CARACTERIZAÇÃO DO RECHEIO
- μ_i = VISCOSIDADE DO LÍQUIDO , Cp
- ϕ = $\rho(H_2O) / \rho_L$

Gc' = FATOR DE CONVERSÃO = 4,18 . 1E+08 Lb . ft / lbf . hr²

GRÁFICO IV-CORRELAÇÃO GENERALIZADA PARA PERDA DE CARGA
 (O PARÂMETRO DAS CURVAS É A PERDA DE CARGA EM
 in H₂O / ft DE RECHEIO) .

GRÁFICO V

Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants

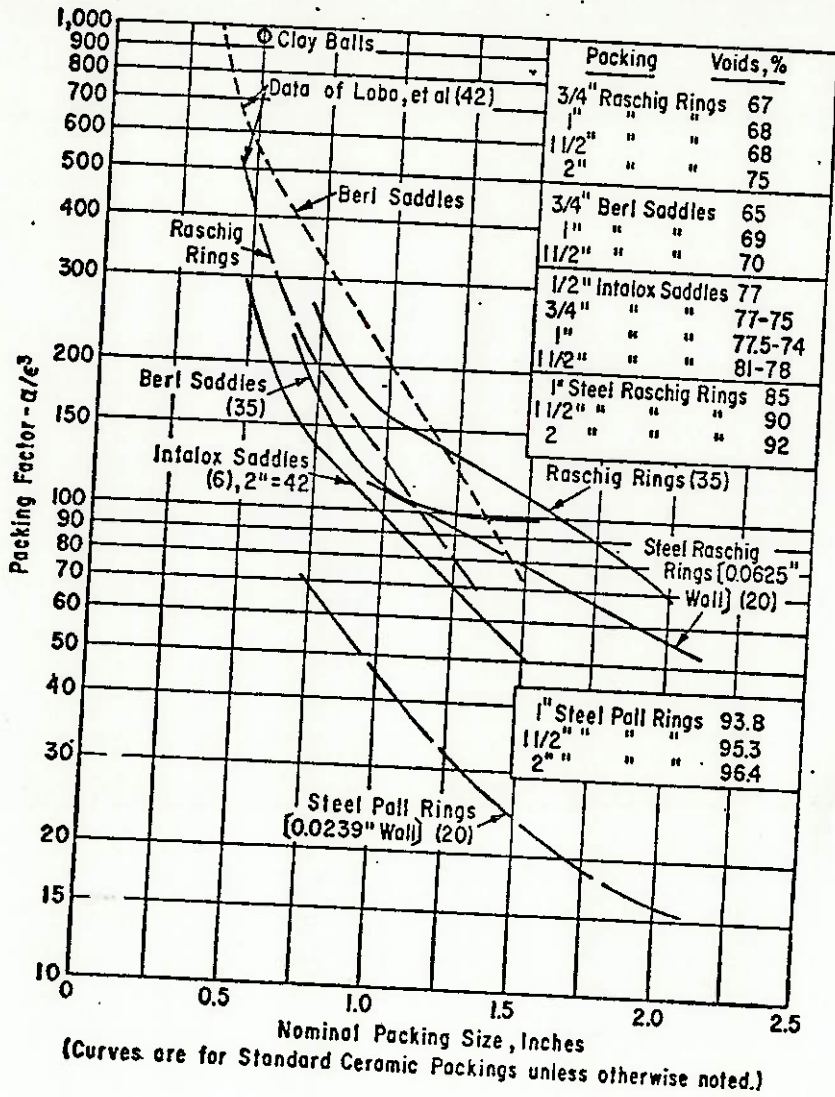
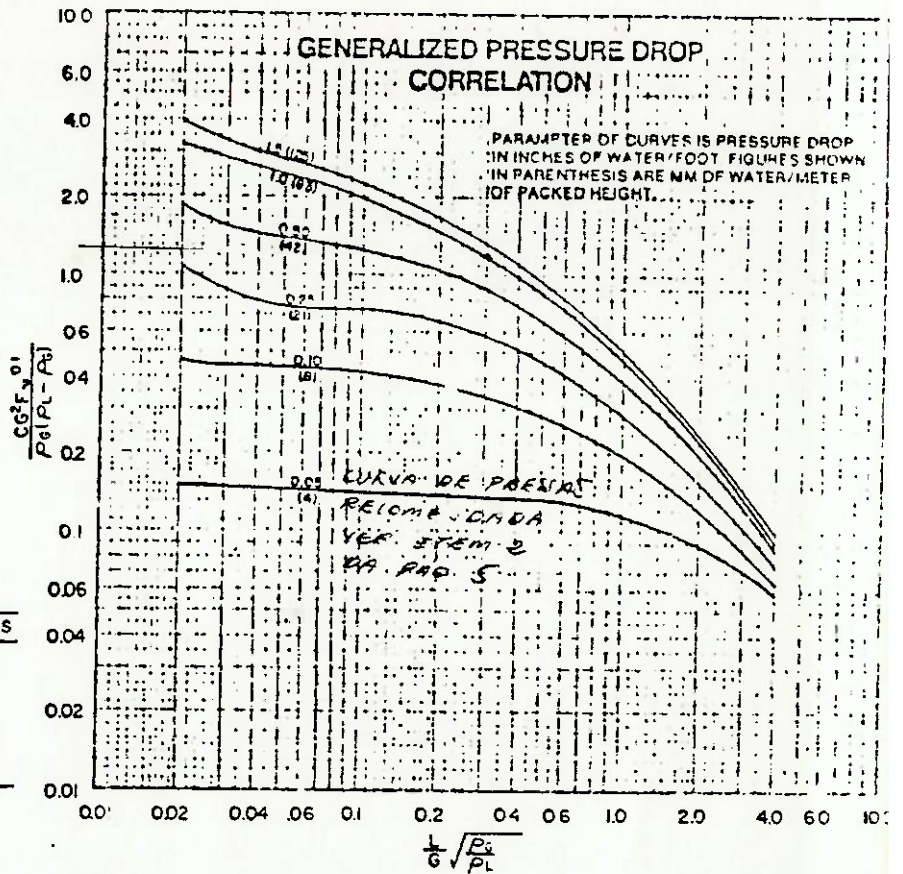


GRÁFICO VI

Design Techniques for Sizing Packed Towers



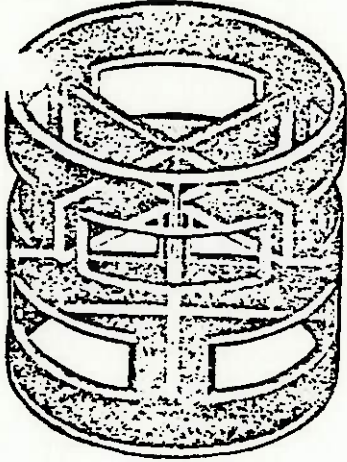
GENERALIZED PRESSURE DROP CORRELATION			
PROPERTY	SYMBOL	BRITISH UNITS	METRIC UNITS
Gas Rate	G	Lbs/ft ² sec	KG/M ² s
Liquid Rate	L	Lbs/ft ² sec	KG/M ² s
Gas Density	P _g	Lbs/ft ³	KG/M ³
Liquid Density	P _L	Lbs/ft ³	KG/M ³
Liquid Viscosity	ν	Centistokes	Centistokes
Conversion Factor	C	1.000	10.764
Packing Factor	F	—	—

Packing Factors (DUMPED PACKING)

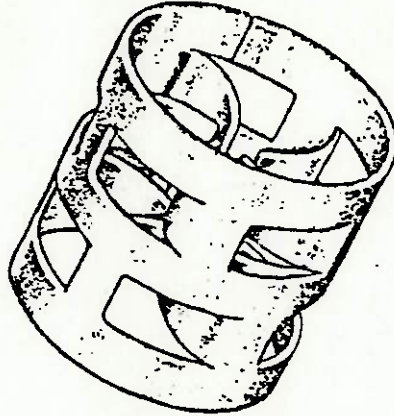
Packing Type	Mat'l.	Nominal Packing Size (Inches)										
		1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	1 or #1	1 1/4	1 1/2	2 or #2	3	3 1/2 or #3
Hy-Pak™	Metal						43			18		15
Super Intalox* Saddles	Ceramic						60			30		
Super Intalox Saddles	Plastic						33			21		16
Pall Rings	Plastic				97		52		40	24		16
Pall Rings	Metal				70		48		33	20		16
Intalox™ Saddles	Ceramic	725	330	200		145	92		52	40	22	
Raschig Rings	Ceramic	1600	1000	580	380	255	155	125	95	65	37	
Raschig Rings	1/32" metal	700	390	300	170	155	115					
Raschig Rings	1/16" metal			410	290	220	137	110	83	57	32	
Berl Saddles*	Ceramic	900		240		170	110		65	45		

Packing factors determined with an air-water system in 30" I.D. tower.
*Data by Leva

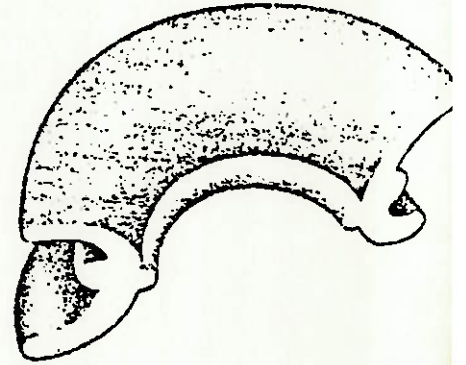
Plastic PALL RING



Metal PALL RING



Ceramic INTALOX®



6.2 - BIBLIOGRAFIA

LIVROS :

- [L1] - STREETER , VICTOR L. & WYLIE , E. BENJAMIN
MECÂNICA DOS FLUIDOS , 7a.ED. , NEW YORK
Ed. Mc GRAW HILL , 1982.
- [L2] HOLMAN , J.PHILIP TRANSFERÊNCIA DE CALOR
6a.Ed. , SÃO PAULO , Ed. Mc GRAW HILL, 1983
- [L3] STOECKER , W.F. & JONES , J.W.
REFRIGERAÇÃO E AR CONDICIONADO , 3a. Ed.
SÃO PAULO , Mc GRAW HILL, 1985
- [L4] YAMANE, EITARO & SAITO , HEIZO
TECNOLOGIA DE CONDICIONAMENTO DO AR , 1a.Ed.
SÃO PAULO , Ed EDGARD BLUCHER, 1986
- [L5] CAVASENO , VINCENT INDUSTRIAL AIR POLUTION
ENGINEERING , 1a.Ed. (E.U.A.) s.ed. , 1977
- [L6] WYLEN, G.J.V. & SONNTAG , R. E.
FUNDAMENTOS DA TERMODINÂMICA CLASSICA
2a. Ed. , SÃO PAULO , Ed.EDGARD BLUCHER, 1976
- [L7] SILVA , REMI B. DA - TORRE DE RESFRIAMENTO
1a. Ed. , SÃO PAULO , USP , 1966
- [L8] GRILLO , M.CÉLIA A. - TURBO PASCAL
1a. Ed. , RIO DE JANEIRO , ED LIVROS TÉCNICOS
E CIENTÍFICOS , 1988
- [L9] SCHMITZ , EBER A. & TELES , A.A. DE SOUZA
PASCAL E TÉCNICAS DE PROGRAMAÇÃO , 2a.Ed.
RIO DE JANEIRO , LIVROS TÉCNICOS E CIENTÍFICOS
EDITORA S.A. , 1985
- [L10] LOMBARDI , GIANCARLO
SISTEMA DE DESPOEIRAMENTO DE GASES , SÃO PAULO , s.ed.
EPUSP , 1984
- [L11] ASSOC. BRAS. DE NORMAS TÉCNICAS , RIO DE JANEIRO,
PNB- 66 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS, RIO DE JANEIRO
ELABORADO PELA COMISSÃO DE ESTUDOS DA A.B.N.T. , 1970

MANUAIS :

- [M1] - PERRY & CHILTON
MANUAL DE ENGENHARIA QUÍMICA, 5a.Ed. , RIO DE JANEIRO
GUANABARA DOIS , 1980
- [M2] - CBC - INDÚSTRIAS PESADAS , SÃO PAULO
MANUAL TÉCNICO DE ENGENHARIA , SÃO PAULO , s.ed. , 1979

APOSTILAS :

- [A1] DIONISI , FABIO A.R.
ENGENHARIA DE PROCESSOS QUIMICOS APLICADO A PROJETOS
INDUSTRIAIS , SÃO PAULO , s.ed. , 1987
- [A2] ASSOC. BRAS. DE ENG. QUIMICA , SÃO PAULO
CONTROLE DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA , SÃO PAULO ,
s.ed. , 1986
- [A3] FUN. P/ O DESENV. TECNOL. DA ENGENHARIA, SÃO PAULO
TORRES DE ABSORÇÃO , SÃO PAULO , s.ed. , 1985

PERIÓDICOS :

- [P1] VARELA S. et alii
DESEMPENHO DE CICLONES - UMA ANÁLISE TEÓRICO -
EXPERIMENTAL , FLORIANÓPOLIS , s.ed. , IX COBEM ,1987
- [P2] ECKERT , JOHNS
TOWER PACKING AND PACKED TOWER DESIGN, (E.U.A.) ,
s.ed. , APRIL 14 , 1975

6.3 FLUXOGRAMA DE TUBULAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO

6.4 LAY - OUT DOS EQUIPAMENTOS