

9.0 (note).
~~Quero~~ 13/12/00.

Ronaldo Uliana de Oliveira

Recuperação da Entalpia de Vaporização nos Gases de Combustão em Caldeiras a Gás

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica para conclusão do curso de
graduação .

São Paulo
2000

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600005970

Ronaldo Uliana de Oliveira

**Recuperação da Entalpia de Vaporização nos
Gases de Combustão em Caldeiras a Gás**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica para conclusão do curso de
graduação .

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Professor orientador: Clemente Greco

São Paulo
2000

À minha avó Áurea, que sempre me
incentivou ao longo dos anos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Doutor Clemente Greco por ter coordenado este trabalho e por ter fornecido grande parte do material necessário à sua elaboração.

SUMÁRIO

Lista de tabelas	
Lista de figuras	
Lista de símbolos	
Resumo	
“Abstract”	
1 Introdução	2
2 Apresentação do Problema	4
3 Objetivos	5
4 Revisão Bibliográfica	6
5 Estudo de Viabilidade	
5.1 Parâmetros e Restrições	7
5.2 Modelagem Matemática	9
6 Caracterização da Torre Recheada	
6.1 Descrição dos Componentes	13
6.2 Fundamentação Teórica e Critérios de Projeto	17
7 Dimensionamento	22
8 Conclusões	25
Anexos	28
Referências Bibliográficas	69

Lista de tabelas

Tabela 1 - Propriedades do Gás Natural Boliviano	9
Tabela 2 – Constantes Utilizadas	13
Tabela 3 – Valores Admitidos para Simulação	14
Tabela 4 – Resultados de Simulação de Combustão no CGComb	15
Tabela 5 – Resultados em Função da Temperatura de Saída dos Gases da Torre	16

Lista de figuras

Figura 1- Esquema simplificado da instalação caldeira + torre recheada	9
Figura 2 – Torre recheada com distribuidor, recheio e grade suporte	13
Figura 3 – Grade Suporte do Tipo Injeção de Gás	14
Figura 4 – Diferentes Tipos de Recheios Randômicos	15
Figura 5 – Diferentes Tipos de Distribuidores de Líquido	16
Figura 6 – Variação do HETP em função do tipo e dimensão do recheio	18
Figura 7 – Correlação Generalizada para Perda de Carga	20

Lista de símbolos

T_{ref} – Temperatura de Referência

PCS – Ponto Calorífico Superior

PCI – Ponto Calorífico Inferior

m_{GN} – massa de gás natural

P_{cald} – pressão da caldeira

P_{atm} – pressão atmosférica

h_{v_i} – entalpia de vaporização da substância i

m_{prod_i} – massa de produtos na posição i

m_{vapor_i} – massa de vapor na posição i

m_{gas_i} – massa de gases secos na posição i

c_{p_i} – calor específico da substância i

T_{adiab} – temperatura de saturação adiabática

w_i – umidade absoluta no ponto i

Resumo

O presente trabalho procura apresentar um meio para a recuperação da entalpia de combustão nos gases de escape de uma caldeira a gás. A entalpia total inserida em um volume de controle para combustão é composta pela soma da entalpia sensível dos componentes mais o PCS do combustível. Corriqueiramente os rendimentos são referenciados ao PCI, já que a diferença $PCS - PCI$ foi consumida pela evaporação da água nos produtos. Com a utilização de uma torre recheada pode-se reaproveitar esta diferença, através de trocas de calor e de massa. Faz-se uma modelagem matemática para o sistema e simulações para o dimensionamento da torre recheada.



1) Introdução

O presente trabalho está dividido em tópicos principais e procura mostrar o desenvolvimento de um projeto de engenharia. Engloba portanto desde as especulações iniciais até uma resposta conclusiva, através de um estudo analítico e criterioso.

Nos itens 2)Apresentação e 3)Objetivos têm-se, respectivamente, um panorama da situação motivadora deste trabalho e uma conseqüente proposta de modificação.

O item 4)Revisão Bibliográfica indica a influência de cada fonte no desenvolvimento do trabalho, de acordo com o conteúdo de cada uma delas.

No item 5)Estudo de Viabilidade procura-se descrever a abordagem do problema, determinar quais são as condições limitantes, simplificar, modelar e reavaliar as previsões iniciais com base nos resultados.

O Item 6)Caracterização da Torre Recheada está dividido em duas partes, a saber: descrição dos componentes internos e depois fundamentação teórica e critérios de projeto. Na primeira explica-se como é constituída uma torre recheada e na segunda apresenta-se alguns meios de seleccioná-los.

No item 7)Dimensionamento são confrontados vantagens e desvantagens dos resultados das simulações e determina-se uma solução ótima.



No item 8) Conclusões procura-se discutir a solução escolhida, considerando-se suas vantagens e restrições sob a ótica de engenharia e custos operacionais.

Nos itens finais Anexos e Bibliografia o leitor deste trabalho encontra o material de apoio utilizado e as ferramentas desenvolvidas para a correta execução do mesmo.



2) Apresentação do Problema

Quando ocorre o processo de combustão de determinado combustível, a água dos produtos gerados passa do estado líquido para o estado gasoso. Tal mudança consome parte do calor liberado ($PCS \cdot \text{kg de combustível}$) e a parcela que efetivamente causa uma elevação de temperatura dos gases de combustão é menor ($PCI \cdot \text{kg de combustível}$).

Tomando como exemplo um gerador de vapor com uma caldeira fogotubular, os produtos de combustão na saída da chaminé (incluindo vapor de água) estão por volta de 230°C . Em um processo convencional toda esta disponibilidade é descartada. Também é preciso atentar para o fato de que o rendimento de uma caldeira é referenciado ao PCI do combustível, ao invés de ter como parâmetro a entalpia total inserida PCS.

A entalpia de vaporização pode ser recuperada com a condensação de vapor de água destes gases, através de troca de calor ou transferência de massa.

Entretanto, para que ocorra condensação por troca térmica a temperatura dos gases deve ser menor que a temperatura do ponto de orvalho, muito pequena para a utilização de um trocador de calor, devido ao baixo rendimento térmico e grandes dimensões que este apresentaria nestas condições.



3)Objetivos

Este trabalho tem por objetivo possibilitar a recuperação da entalpia de vaporização da água nos produtos de combustão de uma caldeira fogotubular, com o propósito de aumentar o rendimento global do gerador de vapor.



4)Revisão Bibliográfica

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica para a obtenção de maiores conhecimentos sobre o tema, permitindo a conjectura de possíveis soluções. Foram consultados livros, páginas da internet e catálogos de fabricantes.

Os livros *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa* e *Fundamentos da Termodinâmica Clássica* prestaram-se como ampla base conceitual para o entendimento dos fenômenos de transferência de calor e de massa. Os volumes *Torres Recheadas* e *Tower Packings and Packet Tower Design* permitiram o estudo e caracterização de uma torre recheada.

Tanto os catálogos de fabricantes quanto as páginas da internet foram úteis na estimativa de custos de cada componente e em que proporção são utilizados na indústria, o que equivale a dizer em que escala são produzidos.

A bibliografia completa encontra-se no final deste trabalho.



5) Estudo de Viabilidade

5.1) Parâmetros e Restrições

A utilização de um trocador de calor é absolutamente inviável, uma vez que a temperatura de condensação da água nos gases de escape é de aproximadamente 60°C . Considerando-se que a água de alimentação da caldeira está a temperatura de bulbo úmido ambiente, a diferença de temperatura entre os dois meios tem uma magnitude pequena (aproximadamente 40°C). Nestas condições um trocador de calor convencional possui rendimento muito baixo e necessita de enorme área de troca de calor, fatores que inviabilizam o seu emprego.

A recuperação da entalpia dos gases de combustão pode ser conseguida através de uma transferência de massa, com a utilização de uma torre recheada acoplada à saída do gerador de vapor. Dessa forma pode-se pré-aquecer a água de alimentação da caldeira.

Devido à sua configuração interna, a área efetiva de contato entre as duas fases presentes na torre recheada é muito maior que a área de sua seção transversal ou área total externa. Conseqüentemente, as trocas de calor e de massa são intensas.

A água de alimentação tem contato direto com os produtos de combustão na torre recheada antes de passar pela caldeira, e está sujeita a



contaminação por partículas sólidas e outras substâncias químicas presentes nos gases. Há portanto a possibilidade da ocorrência de incrustações nos tubos da caldeira e formação de ácido sulfúrico, caso exista a liberação de cinzas e enxofre respectivamente. Portanto, os gases de combustão devem ser limpos e livres de enxofre, limitando a solução para os casos em que o combustível utilizado seja o gás natural.

Para a validação da idéia proposta é indispensável a análise de um modelo de caso real. Este trabalho será baseado numa caldeira com capacidade de 3250 kg de vapor por hora. A tabela 1 apresenta algumas propriedades do combustível obtidos por meio do software CGComb. Simulou-se a queima de gás natural com 10% de excesso de ar a temperatura ambiente. No Anexo A estão listadas as simulações completas, com a relação ar/combustível, ponto de orvalho dos produtos, porcentagem de gases secos, entre outros. Estes valores são necessários à modelagem matemática descrita no próximo item.

Tabela 1 Propriedades do Gás Natural Boliviano

% CH ₄	89,95
% C ₂ H ₆	6,63
% C ₃ H ₈	1,91
% C ₄ H ₁₀	0,48
% C ₅ H ₁₂	0,06
% CO ₂	0,32
% N ₂	0,65
PCS (kJ/kg)	50190
PCI (kJ/kg)	45078

5.2) Modelagem Matemática

Um esquema simplificado do conjunto caldeira + torre recheada pode ser visto na figura 1.

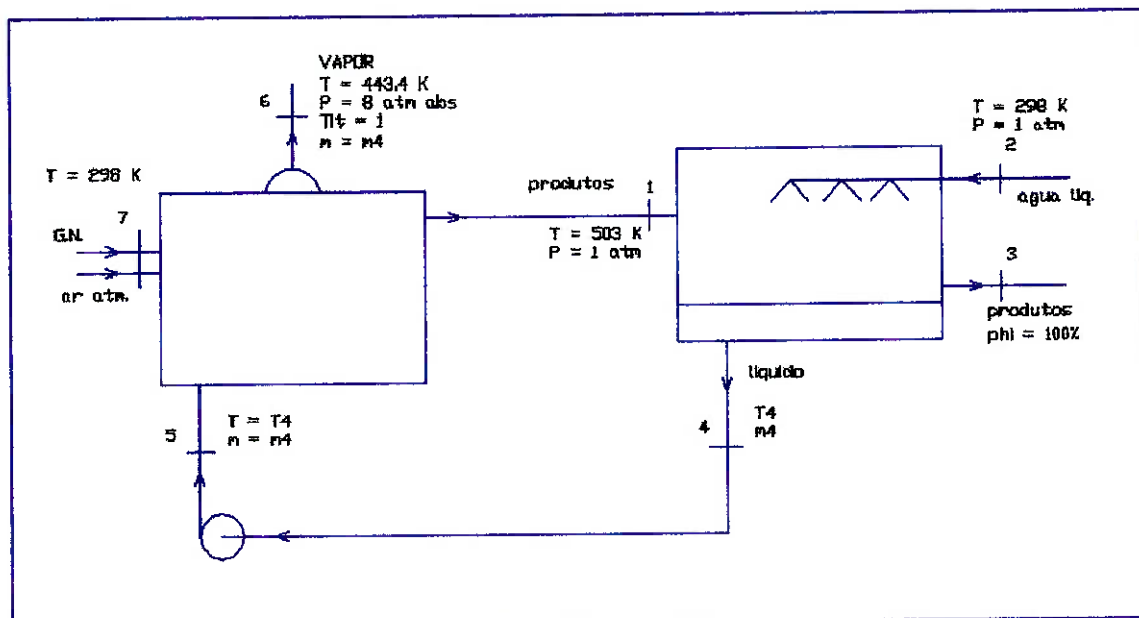


Figura 1 - Esquema simplificado da instalação caldeira + torre recheada

Para o equacionamento do problema foram definidos três volumes de controle, sendo um composto pela caldeira, outro pelo lavador e o terceiro pelo dois equipamentos juntos. Aplicando-se a primeira lei da termodinâmica e manipulando-se as equações de forma conveniente, obteve-se as seguintes relações, referenciadas a 1 kg de gás natural:



$$PCS = m_{liq4}^B h_{vap} + m_{gas}^B cp_{gas} (T_3 - T_{ref}) + m_{vap3}^B h_{vap3}$$

$$PCS + m_{liq4}^B [cp_{liq} (T_4 - T_{ref}) - h_{vap}] = m_{gas}^B cp_{gas} (T_1 - T_{ref}) + m_{vap1}^B h_{vap1}$$

$$cp_{gas} (T_1 - T_3) + w_1 h_{vap1} = w_3 h_{vap3} + \frac{m_{liq4}^B}{m_{gas}^B} cp_{liq} (T_4 - T_{ref})$$

O desenvolvimento completo das equações está listado no Anexo

B.

Como cada modelo de caldeira possui seus próprios parâmetros (como por exemplo rendimento e quantidade de água alimentada, só uma solução numérica será desenvolvida e é referente a uma produção de 3250 kg vapor / hora a uma pressão efetiva de 7 bar. Trata-se de uma caldeira Tenge modelo TG -250/10.

Admite-se alguns dados para a caldeira, combustível e condições ambientes, resumidos nas tabelas seguintes. As listagens completas das características do combustível e simulação da combustão estão no Anexo A.

Tabela 2 - Constantes Utilizadas

Constantes		
Tref.	293	K
PCS	50000	kJ/kg
PCI	45000	kJ/kg
cpH2OI	4,18	kJ/kgK



Tabela 3 - Valores Admitidos para Simulação

Valores Admitidos		
mGN	1,00	kg
Pcald	7,00	bar ef
Tprodcal1	503,00	K
Patm	101350	Pa
coef. Ar	1,10	

Tabela 4 - Resultados da Simulação de Combustão no CGComb

Cgcomb		
rel ar/comb	17,90	
cpgases_c	1,00	kJ/kgK
mvapor1	2,25	kg
mgas1	16,65	kg
mgas3	16,65	kg
cpprod	1,13	kJ/kgK

De posse das equações de primeira lei e os valores admitidos acima, pode-se variar a entalpia recuperada na torre recheada e observar o comportamento do sistema. Para tanto foi desenvolvida uma planilha no Excel.

Muito importante neste ponto é reparar nas condições de contorno. A temperatura de entrada da água alimentada não pode ser superior a 97° C, pois entraria em ebulição na torre recheada, e a segunda lei da termodinâmica não pode ser violada. A tabela seguinte contém uma faixa de interesse:



Tabela 5 - Resultados em função da temperatura de saída dos gases da torre
recheada

T3	rend	Tliq4	w1-w3	mliq/mGN	Tliq4 C
317	105,1	378,1	0,074	19,6	105,1
319	104,4	374,4	0,067	19,4	101,4
321	103,7	370,3	0,059	19,3	97,3
323	102,8	365,7	0,049	19,2	92,7
325	101,9	360,5	0,039	19,0	87,5
327	100,9	354,6	0,028	18,8	81,6
329	99,7	347,8	0,015	18,6	74,8
331	98,4	340,1	0,000	18,3	67,1
333	97,0	331,1	-0,016	18,1	58,1
335	95,3	320,7	-0,035	17,7	47,7

Percebe-se que quanto menor a temperatura de saída dos gases da torre, maior é a relação kg vapor gerado / kg combustível. Vê-se que o rendimento da caldeira pode passar de 100%, quando referenciado ao PCI. A tabela completa com a variação do rendimento, troca de massa e temperatura da água de alimentação em função da temperatura de saída dos gases de combustão estão no *Anexo C*.

6) Caracterização da Torre Recheada

6.1) Descrição dos Componentes

Internamente uma torre recheada é composta basicamente por grade suporte, recheio e distribuidor, como visto na figura 2.

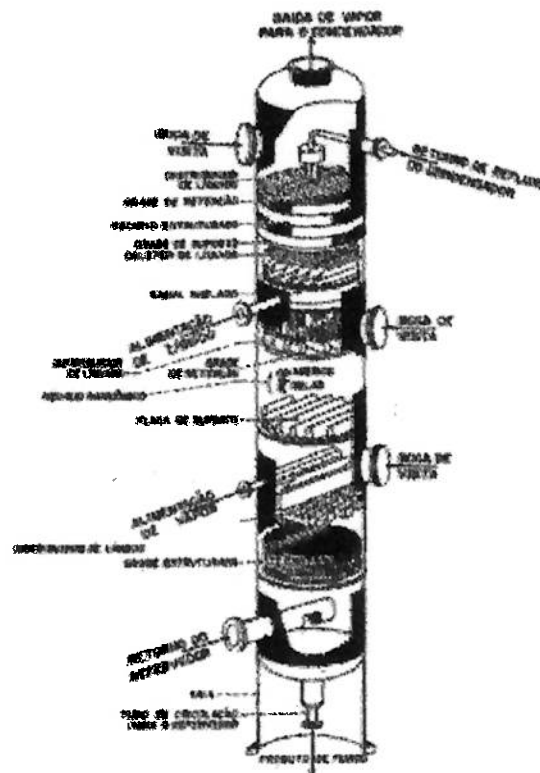


Figura 2 - Exemplo de Torre Recheada com distribuidor, recheio e grade suporte

A grade suporte é responsável pela sustentação mecânica do leito, sendo capaz de suportar seu peso (recheio + líquido). Além disso, deve permitir a entrada de gás e a saída de líquido. Hoje em dia são utilizados basicamente três tipos de suporte: grade de injeção de gás, grade suporte simples e grade suporte plana.

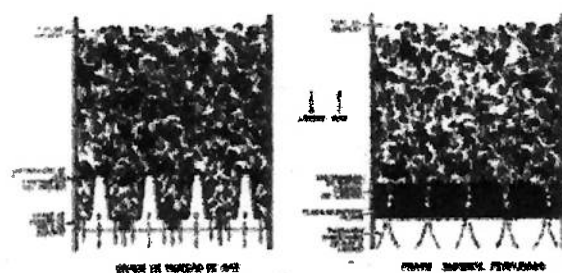


Fig. 2.21 - Comparação de dois sistemas suporte de um leito recheado. (Referência - Catálogo Geral da Agip/Ind. Quím. Ltda.)

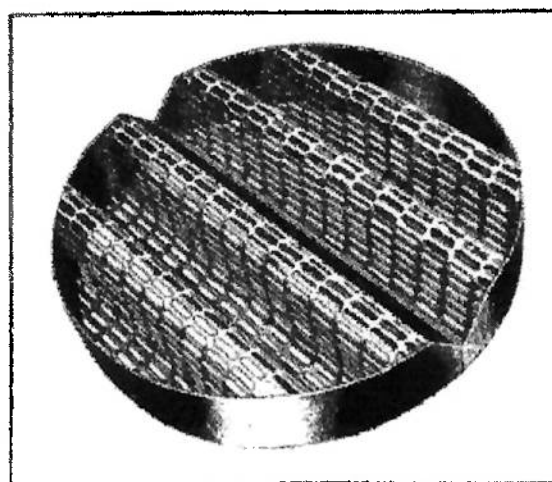


Fig. 2.22 - Grade-suporte de injeção de gás

Figura 3 - Grade Suporte do Tipo Injeção de Gás

O recheio tem como função básica aumentar a área de contato entre gás e líquido a fim de intensificar as trocas térmicas e de massa. Pode ser de dois tipos principais: estruturados ou randômicos. Os recheios estruturados



possuem maior eficiência que os randômicos, porém também são mais caros. Quanto aos materiais de fabricação podem ser de quatro tipos: metálicos, cerâmicos, plásticos e de carvão. A escolha de cada um destes recheios depende das condições de processo, como temperaturas, capacidades, corrosividade do líquido, etc.

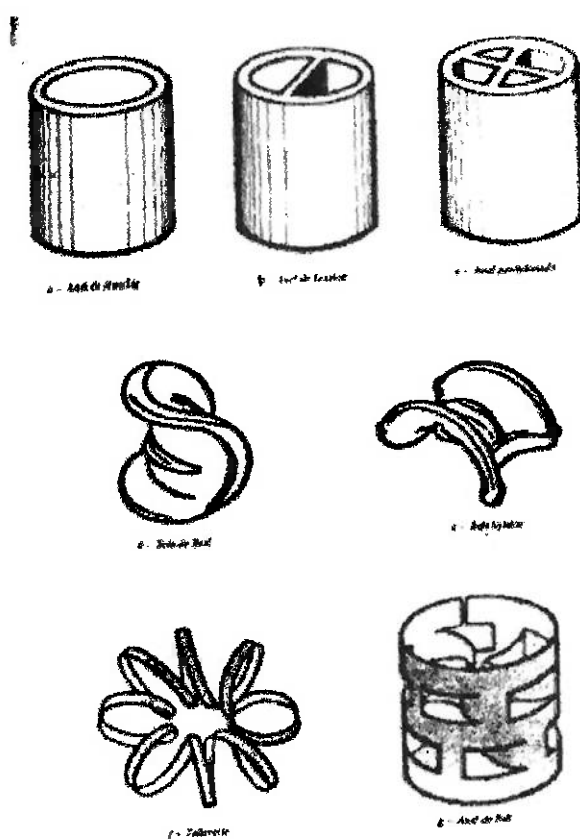


Fig. 6.7 - Recheios não randômicos

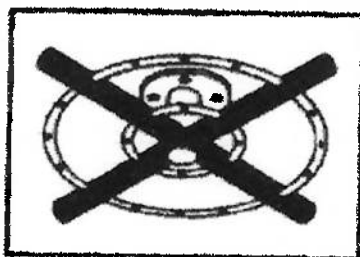
37

Figura 4 - Diferentes Tipos de Recheios Randômicos

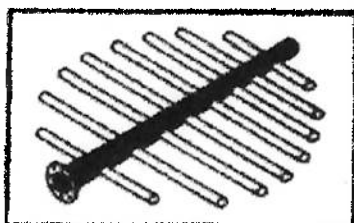
Os distribuidores de líquidos são responsáveis pela injeção de líquido no topo da torre de maneira adequada, para que não se formem caminhos preferenciais de líquido ao longo do recheio. Os principais tipos são:



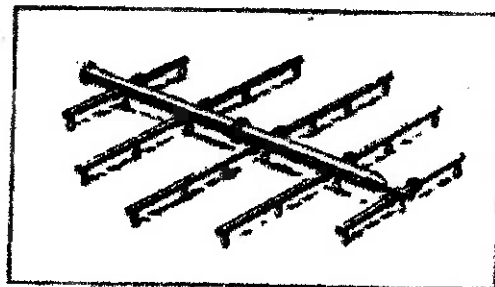
chapa perfurada e chaminé, vertedor de chaminé e de calha, com tubos perfurados, com bicos aspersores.



Tipo de tubos concêntricos



Tipo de tubos paralelos



Tipo de tubos em H com bicos aspersores

Fig. 2.16 - Distribuidoras com tubos perfurados

Figura 5 - Diferentes Tipos de Distribuidores de Líquido

De posse das vazões de entrada e saída (e suas relações), das temperaturas e pressões, deve-se basicamente selecionar um tipo de suporte, enchimento e sistema de distribuição de líquido.



6.2) Fundamentação Teórica e Critérios de Projeto

Os conceitos e equações aqui apresentados serão breves, apenas suficientes para o entendimento das equações pelo leitor leigo. Maiores detalhes e equacionamento completo de torres recheadas podem ser facilmente encontrados nas referências 1, 2 e 3.

Deve-se ter em mente que os fatores de maior interesse em torres recheadas são: queda de pressão, capacidade e distribuidores e suportes. Os fatores relacionados com a eficiência do equipamento são a distribuição e redistribuição do líquido para se obter o máximo de área possível para o contato líquido-vapor.

As qualificações importantes de um recheio são porcentagem de molhabilidade da área total e formato aerodinâmico. A eficiência e a perda de carga são funções da área superficial e porosidade apresentadas por estes recheios.

O tamanho nominal de um recheio não deve ser maior que $1/8$ do diâmetro da torre, com sérios riscos de má distribuição do líquido. Como no início não se conhece o diâmetro da torre, este pode ser estimado adotando-se para o gás velocidade de 1 m/s. O tamanho ótimo é determinado por considerações econômicas, sendo que aumentos de altura são geralmente mais onerosos que aumentos no diâmetro.



O HETP (em português AETP – Altura Equivalente a um Prato Teórico) relaciona transferência de massa com perda de carga. À medida que a dimensão do recheio aumenta, a capacidade máxima e o HETP são também aumentados, mas o custo por unidade de volume e perda de carga são reduzidos.

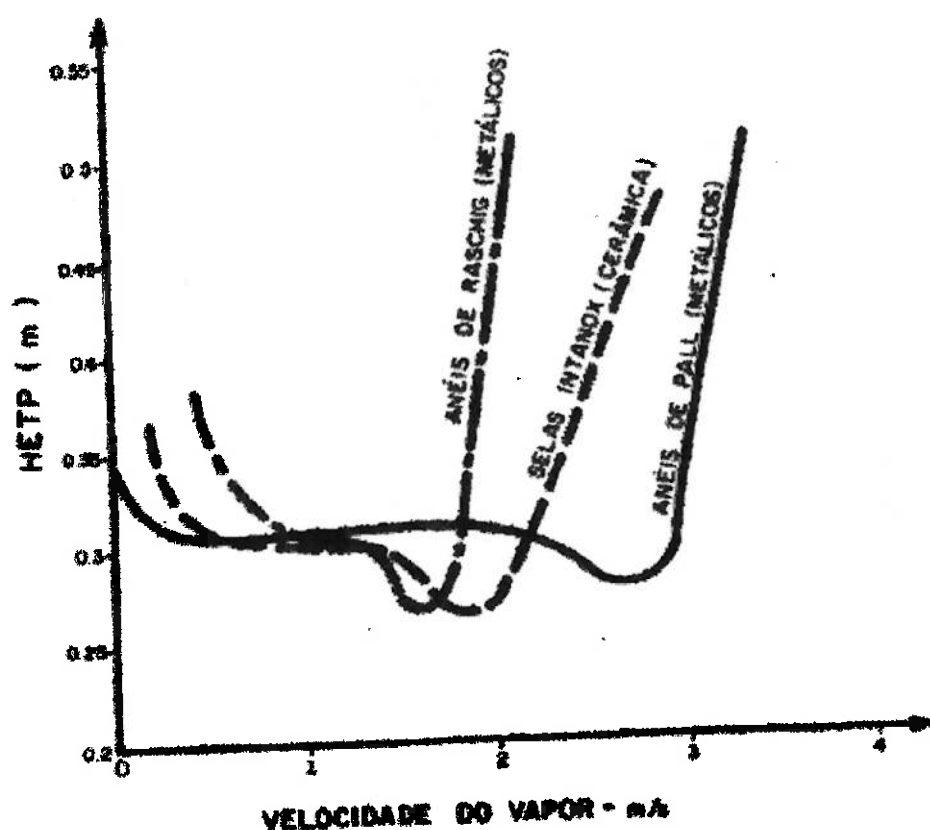


Figura 6 - Gráfico da Variação do HETP em função do tipo e dimensão de recheio

O coeficiente de transferência de massa varia de acordo com o comprimento do leito. No topo, onde o líquido é despejado em certas posições, este coeficiente é baixo. À medida em que o líquido desce pela torre, vai se distribuindo mais uniformemente pelo recheio e o coeficiente de transferência



de massa aumenta, atingindo um valor máximo onde a superfície do recheio está mais molhada. A partir deste ponto os efeitos de canalização começam a aparecer, distribuindo irregularmente o líquido pelo recheio, e o coeficiente começa a decrescer.

Verificou-se também que a transferência de massa diminui sensivelmente quando a razão do líquido é inferior a certo valor crítico, denominado Grau de Molhamento Mínimo. A utilização mais eficiente do recheio, então, está condicionada ao fato da razão de líquido ser inferior a certo limite.

O Grau de Molhamento é definido como:

$WR = V_L / a_p$, onde:

V_L = vazão específica de líquido, $m^3 / (h.m^2)$

a_p = área específica do recheio, m^2/m^3

WR = razão de molhamento, $m^3 / (h.m)$

Numa torre recheada com determinado recheio, sendo irrigada por uma determinada vazão de líquido, há um limite superior para a vazão do gás. A velocidade do gás correspondente a este limite é chamada velocidade de inundação. Esta velocidade pode ser encontrada pela observação da perda de carga apresentada pelo recheio em função da velocidade do gás, e pela observação da retenção de líquido na coluna de recheio.



No chamado ponto de carga o gás começa a impedir o líquido de escoar pela torre, acumulando-se em determinados pontos. A partir deste ponto a retenção de líquido aumenta rapidamente com a vazão do gás. No chamado ponto de inundação o topo do recheio apresenta uma camada de líquido que vai aumentando até sair pelo topo com o gás. A perda de carga no ponto de carga está aproximadamente entre 400 Pa/m e 800 Pa/m, e no ponto de inundação entre 1600 Pa/m a 2500 Pa/m.

A utilização do gráfico de correlação generalizada para perda de carga é um dos meios mais utilizados para o cálculo da velocidade de inundação em torres recheadas.

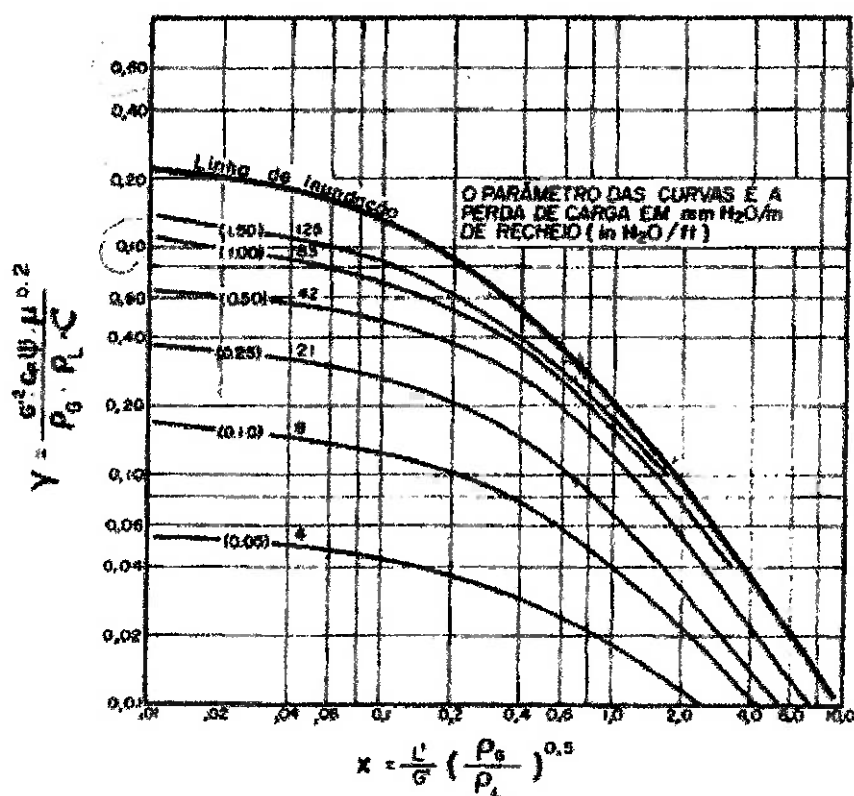


Fig. 2.42 - Correlação generalizada para perda de carga

Figura 7 - Correlação Generalizada para Perda de Carga



São dois os tipos de critério de projeto para serem usados com a correlação generalizada, a saber: afastamento da condição de inundação, onde a razão de gás na torre deve estar abaixo da vazão de inundação, e perda de carga recomendada, estabelecendo-se que os leitos recheados devam operar com perda de carga entre 8-64mm H₂O por metro de recheio. Este trabalho adota o critério do afastamento da condição de inundação.



7) Dimensionamento

Embora se possa compreender o funcionamento de uma torre recheada com o uso de leis físicas, grande parte do seu dimensionamento depende de valores empíricos, traduzidos ou não em equações. Cada tipo de recheio, grade e distribuidor possui características únicas, que variam dependendo do modelo e do fabricante. Sendo assim, o dimensionamento realizado está sujeito a parâmetros fornecidos pela literatura, discutidos a seguir.

A torre deve usualmente ser projetada para operar na região de carga, razoavelmente perto do limite máximo, de 40% a 80% da inundação. Isto determinará a área ótima para a qual a eficiência na transferência de massa é máxima.

O diâmetro nominal do recheio deve ser menor que $1/8$ do diâmetro da torre, pois recheios maiores apresentam sérios riscos de formação de caminhos preferenciais devido à não uniformidade do leito e à grande quantidade de espaços vazios junto à parede da torre.

O dimensionamento de uma torre recheada segue as seguintes etapas: escolha do recheio, determinação do diâmetro, determinação dos coeficientes de transferência de massa e avaliação da perda de carga.



Tomando-se como base os valores recomendados da literatura para velocidade do gás, perda de carga, tamanho de recheio, grau de molhabilidade, etc pode-se iniciar o dimensionamento da torre recheada.

Os cálculos foram realizados com o uso de um software específico para dimensionamento de torres recheadas chamado Packed Column Calculator. Este programa utiliza como entrada os mesmos parâmetros que os aqui apresentados, como vazão de líquido, vazão de gás, tipo de recheio, grau de molhabilidade, etc. O método de dimensionamento é baseado na Correlação Generalizada de Perda de Carga, de Eckert.

Não é possível estabelecer em no programa os parâmetros, relacionados a custos. O cálculo é portanto iterativo, e exige diferentes modelos e estimativas.

Foram realizadas algumas iterações, com diferentes tamanhos de recheios, até obter-se uma configuração com melhor conjunto de valores. O julgamento foi parametrizado nas limitações mecânicas de cada constituinte, como estabelecido na literatura, e no fator custo.

A torre recheada está definida da seguinte maneira:

Recheio: Anéis Pall de 1" plásticos

Altura do leito recheado: 1,7 m

Diâmetro interno da torre: 0,9 m

Grade Suporte: Tipo injeção de gás

Distribuidor: com tubos perfurados



Grau de Molhabilidade: 70%

Perda de Carga: 490 Pa/m

Área superficial total de troca: 188 m²

As outras simulações realizadas com seus resultados estão listadas no *Anexo H*, bem como outras informações da solução adotada .



8) Conclusões

Se ficar caracterizado o correto funcionamento da solução aqui pretendida, teremos uma inovação tecnológica. O rendimento do gerador de vapor estará ao redor de 100%, talvez mais, uma vez que a entalpia de vaporização da água nos produtos não é considerada para este cálculo pelos fabricantes do equipamento, ou seja, a entalpia inserida no volume de controle é considerada como sendo o PCI x massa do combustível.

A torre obtida é relativamente pequena, como já era esperado devido às pequenas vazões de gás e líquido. A altura do leito recheado é de 1,7 m e o diâmetro é de 0,9 m. Uma grande vantagem para estas dimensões é a simplicidade para a distribuição de líquido, uma vez que não há tempo suficiente para a formação de caminhos preferencias muito pronunciados, sendo dispensado o uso de redistribuidores de líquido.

Outra consequência importante do pequeno volume de leito recheado é a possibilidade de utilização de uma grade suporte de injeção de gás sem vigas transversais de sustentação. De acordo com fabricantes, este tipo de grade suporte pode suportar 2000 kg/m², e o leito considerado não ultrapassa 900 kg em 0,64 m², o que equivale a 1400 kg/m². A grade tipo injeção de gás é melhor que os outros modelos citados pois possui uma área de passagem muito maior devido à sua geometria que permite, além de se ter uma seção livre maior que a seção transversal do leito, que o gás e o líquido



entrem e saiam por orifícios distintos. Estes fatores minimizam a perda de carga da torre recheada.

O recheio escolhido é randômico devido ao baixo custo e facilidade de obtenção. O recheio estruturado mais barato é cerca de cinco vezes mais caros que o recheio randômico mais caro. O principal fator desta enorme diferença é a necessidade de fabricação sob encomenda dos recheios estruturados, já que dependem do diâmetro da torre. Em muitos casos, como o aqui estudado, os recheios randômicos justificam sua utilidade apesar da maior perda de carga e menor eficiência que apresentam.

Os anéis plásticos são muito mais leves e também mais baratos que os modelos em aço inoxidável. O meio em questão não é corrosivo, o leito é baixo e não está a temperatura alta o suficiente para justificar o emprego de recheios cerâmicos. Somente a parte inferior do leito merece um pouco mais de atenção devido à temperatura de entrada dos gases de combustão (230 C). Hoje já existem recheios plásticos que suportem este nível de temperatura, embora seja um valor limítrofe. Pode-se portanto recomendar o uso de recheios metálicos nos primeiro 300 mm. O comportamento dos anéis Pall metálicos é muito semelhante ao dos anéis plásticos, não havendo influência significativa nos resultados encontrados.

Um parâmetro importante para o dimensionamento que merece comentários é o grau de molhabilidade. Se este for muito pequeno a torre estará sub utilizada; por outro lado se for demasiadamente elevado a operação será tremendamente instável e fatalmente ocorrerão "floodings", ou seja,



transbordamentos na torre. Foi adotado um valor de 70% para o grau de molhabilidade, valor este dentro da faixa recomendada de 40% a 80%.

A perda de carga resultante no leito recheado é de 490 Pa/m, aceitável e coerente com os dados empíricos disponíveis. À saída da caldeira, entre esta e a entrada da torre recheada, deve ser utilizado um ventilador auxiliar para vencer a perda de carga até o escape para a atmosfera, cerca de 1200 Pa. Deve-se lembrar que a caldeira não foi projetada para contrapressões desta magnitude.

Por medida de segurança é aconselhável também a instalação de um sistema de controle da temperatura de entrada dos gases de escape na torre recheada. Uma possibilidade é a instalação de um damper ligado ao ventilador auxiliar, que permite a inserção de ar atmosférico em casos de risco para os anéis plásticos.

Será demandado um maior espaço devido aos periféricos e um maior investimento inicial, em troca de uma melhora no rendimento de cerca de 12%. Isto significa, para um modelo de 3250 kg vapor / hora com produção contínua, uma economia de 14 Nm³ de GN / hora, ou R\$ 1.500,00 por mês, contra cerca de 15% de aumento no capital investido.



Anexos

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942

1941-1942



Anexo A

Características dos Combustíveis

Simulações no CGComb

CGComb - Versão 1.00

Cálculo: Estequiometria

Projeto:GNcampos.cge

Data : 04/07/00

Resultados

Vazões

Dados na temperatura de medição/saída (500.00K)

Volume de oxidante:	11.55	Nm3/Nm3 de comb
Massa do oxidante:	14.78	kg/Nm3 de comb
Volume de produtos:	12.61	Nm3/Nm3 de comb
Volume de produtos:	23.09	m3/Nm3 de comb
Massa total produtos:	15.58	kg/Nm3 de comb

Análise dos Produtos (molar)	gases secos	gases úmidos
%CO2	10.79	8.84
%H2O	-	18.11
%O2	2.09	1.71
%N2	87.11	71.34

Temperaturas

Temperatura adiabática de chama

com dissociação:	2030.0	K
sem dissociação:	2040.5	K
Temperatura dos produtos		
com dissociação:	2030.0	K
sem dissociação:	2040.5	K
Temperatura de orvalho:	331.4	K

Propriedades

Massa molar do comb.:	18.09	kg/kmol
cp do combustível:	2.802	kJ/kg K
Densidade do comb.:	0.807	kg/Nm3
Massa molar dos produtos:	27.68	kg/kmol
cp dos produtos:	1.153	kJ/kg K
cp médio dos produtos:	1.128	kJ/kg K
Densidade dos produtos:	0.675	kg/m3
Perdas por escape:	9.92	%
h formação prod. (ref.25°C):	-2838.0	kJ/kg
h sensível dos produtos :	227.7	kJ/kg
h total dos produtos :	-2610.3	kJ/kg
h total dos produtos :	-3224.2	kJ/Nm3

Equação da Reação

$0.003 \text{ CO}_2 + 0.006 \text{ N}_2 + 0.899 \text{ CH}_4 + 0.066 \text{ C}_2\text{H}_6 + 0.019 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.005 \text{ C}_4\text{H}_{10} + 0.001 \text{ C}_5\text{H}_{12} + 2.379 (\text{O}_2 + 3.780 \text{ N}_2 + 0.077 \text{ H}_2)$

$1.115 \text{ CO}_2 + 2.284 \text{ H}_2\text{O} + 8.998 \text{ N}_2 + 0.216 \text{ O}_2$

CGComb - Versão 1.00

Cálculo: Estequiometria

Projeto:GNbolivia.cge

Data : 04/07/00

Entradas

Banco de Dados: gás Substância: Gás Natural (Bolívia)

Composição do Combustível (base molar úmida)

%CH ₄	:	89.35
%C ₂ H ₆	:	8.03
%C ₃ H ₈	:	0.78
%C ₄ H ₁₀	:	0.07
%C ₅ H ₁₂	:	0.01
%CO ₂	:	0.48
%N ₂	:	1.28
% Cinzas (BU)	:	0.00
% Umidade (BU) (molar)	:	0.00

PCS (kJ/kg)	:	49792.5
PCS (kJ/m ³)	:	40138.7
PCI (kJ/kg)	:	44767.7

Pressão : 101.325 kPa

Temperaturas do Oxidante

Ambiente : 298.15 K

Temperatura do Combustível: 298.15 K

Trocas Térmicas : 0.0 %

Umidade Absoluta do Ar Atmosférico : 0.010 massa vap./massa ar seco

Oxidante : Ar Atmosférico

Coefficiente de Oxidante: 1.10

CGComb - Versão 1.00

Cálculo: Estequiometria

Projeto:GNbolivia.cge

Data : 04/07/00

Resultados

Varões

Dados na temperatura de medição/saída (500K)

Volume de oxidante:	11.28	Nm3/Nm3 de comb
Massa do oxidante:	14.44	kg/Nm3 de comb
Volume de produtos:	12.33	Nm3/Nm3 de comb
Volume de produtos:	22.58	m3/Nm3 de comb
Massa total produtos:	15.23	kg/Nm3 de comb

Análise dos Produtos (molar)	gases secos	gases úmidos
%CO2	10.76	8.80
%H2O	-	18.17
%O2	2.09	1.71
%N2	87.15	71.32

Temperaturas

Temperatura adiabática de chama

com dissociação: 2034.6 K

sem dissociação: 2045.4 K

Temperatura dos produtos

com dissociação: 2034.6 K

sem dissociação: 2045.4 K

Temperatura de orvalho: 331.4 K

Propriedades

Massa molar do comb.:	18.07	kg/kmol
cp do combustível:	2.783	kJ/kg K
Densidade do comb.:	0.806	kg/Nm3
Massa molar dos produtos:	27.67	kg/kmol
cp dos produtos:	1.153	kJ/kg K
cp médio dos produtos:	1.128	kJ/kg K
Densidade dos produtos:	0.674	kg/m3
Perdas por escape:	9.90	%
h formação prod. (ref.25°C):	-2839.5	kJ/kg
h sensível dos produtos :	227.8	kJ/kg
h total dos produtos :	-2611.7	kJ/kg
h total dos produtos :	-3224.5	kJ/Nm3

Equação da Reação

$0.005 \text{ CO}_2 + 0.013 \text{ N}_2 + 0.893 \text{ CH}_4 + 0.080 \text{ C}_2\text{H}_6 + 0.008 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0.001 \text{ C}_4\text{H}_{10} + 0.000 \text{ C}_5\text{H}_{12} + 2.324 (\text{O}_2 + 3.780 \text{ N}_2 + 0.077 \text{ H}$

$1.086 \text{ CO}_2 + 2.241 \text{ H}_2\text{O} + 8.796 \text{ N}_2 + 0.211 \text{ O}_2$

CGComb - Versão 1.00

Classe do combustível: gás

(Composição do combustível em base molar úmida)

Data : 04/07/00

[illegible]



Anexo B

Equações Desenvolvidas



I)

$$\dot{m}_{ar}^B + \dot{m}_{GN}^B + \dot{m}_{liq2}^B = \dot{m}_{vap}^B + \dot{m}_{gas3}^B + \dot{m}_{vap3}^B$$

$$\dot{m}_{ar}^B h_{ar} + \dot{m}_{GN}^B h_{GN} + \dot{m}_{liq2}^B h_{liq2} = \dot{m}_{vap}^B h_{vap} + \dot{m}_{gas3}^B h_{gas3} + \dot{m}_{vap3}^B h_{vap3}$$

$$\dot{m}_{vap}^B = \dot{m}_{liq4}^B$$

$$\dot{m}_{gas3}^B = \dot{m}_{gas}^B$$

$$\dot{m}_{GN}^B PCS = \dot{m}_{vap}^B h_{vap} + \dot{m}_{gas}^B h_{gas3} + \dot{m}_{vap3}^B h_{vap3}$$

Para 1 kg de Gás Natural:

$$PCS = \dot{m}_{liq4}^B h_{vap} + \dot{m}_{gas}^B cp_{gas} (T_3 - T_{ref}) + \dot{m}_{vap3}^B h_{vap3}$$

II)

$$\dot{m}_{liq4}^B = \dot{m}_{vap}^B$$

$$\dot{m}_{GN}^B + \dot{m}_{ar}^B + \dot{m}_{liq2}^B = \dot{m}_{gas1}^B + \dot{m}_{vap1}^B$$

$$\dot{m}_{GN}^B h_{GN} + \dot{m}_{ar}^B h_{ar} + \dot{m}_{liq2}^B h_{liq2} = \dot{m}_{vap}^B h_{vap} + \dot{m}_{gas1}^B h_{gas1} + \dot{m}_{vap1}^B h_{vap1}$$

Para 1 kg de Gás Natural:

$$PCS + \dot{m}_{liq4}^B cp_{liq} (T_4 - T_{ref}) = \dot{m}_{liq4}^B h_{vap} + \dot{m}_{gas1}^B cp_{gas} (T_1 - T_{ref}) + \dot{m}_{vap1}^B h_{vap1}$$

$$PCS + \dot{m}_{liq4}^B [cp_{liq} (T_4 - T_{ref}) - h_{vap}] = \dot{m}_{gas1}^B cp_{gas} (T_1 - T_{ref}) + \dot{m}_{vap1}^B h_{vap1}$$

III)

$$\dot{m}_{gas1}^B = \dot{m}_{gas3}^B$$

$$\dot{m}_{liq4}^B = \dot{m}_{liq2}^B + (\dot{m}_{vap1}^B - \dot{m}_{vap3}^B) = \dot{m}_{liq2}^B + \dot{m}_{gas}^B (\omega_1 - \omega_3)$$

$$\dot{Q}_{vc}^B + \sum \dot{m}_e^B h_e = \sum \dot{m}_s^B h_s + W$$

$$\dot{m}_{gas}^B h_{gas1} + \dot{m}_{vap1}^B h_{vap1} + \dot{m}_{liq2}^B h_{liq2} = \dot{m}_{gas}^B h_{gas3} + \dot{m}_{vap3}^B h_{vap3} + \dot{m}_{liq4}^B h_{liq4}$$

Dividindo-se por $\dot{m}_{gas}^B$:



$$h_{gas1} - h_{gas3} + w_1 h_{vap1} = w_3 h_{vap3} + \left(\frac{n_{liq2}^R}{n_{gas}^R} + w_1 - w_3 \right) h_{liq4}$$

$$c_{p_{gas}} (T_1 - T_3) + w_1 h_{vap1} = w_3 h_{vap3} + \frac{n_{liq4}^R}{n_{gas}^R} c_{p_{liq}} (T_4 - T_{ref})$$

Funções utilizadas em macro do Excel

Function TempSat(Psat)

If 0.000611 <= Psat And Psat < 12.33 Then

A = 42.6776

B = -3892.7

C = -9.48654

End If

If 12.33 <= Psat And Psat <= 22.1 Then

A = -387.592

B = -12587.5

C = -15.2578

End If

If 0.000611 <= Psat And Psat <= 22.1 Then

TempSat = A + B / (Log(Psat) / Log(2.71828182846) + C)

Else

TempSat = 0

End If

End Function

Function Somatória0(Coef, Prop, n)

AuxSoma = 0

For i = 0 To n

AuxSoma = Coef(i) * Prop ^ i + AuxSoma

Next

Somatória0 = AuxSoma

End Function

Function Somatória1(Coef, Prop, n)

AuxSoma = 0

For i = 1 To n



```

    AuxSoma = Coef(i) * Prop ^ i + AuxSoma
Next
Somatória1 = AuxSoma
End Function

```

```
Function PresSat(Tsat)
```

```

Dim A(11)
If 273.16 <= Tsat And Tsat <= 647.3 Then
    A(0) = 10.4592
    A(1) = -0.00404897
    A(2) = -0.000041752
    A(3) = 0.00000036851
    A(4) = -0.0000000010152
    A(5) = 8.6531E-13
    A(6) = 9.03668E-16
    A(7) = -1.9969E-18
    A(8) = 7.79287E-22
    A(9) = 1.91482E-25
    A(10) = -3968.06
    A(11) = 39.5735
    PresSat = Exp(Somatória0(A, Tsat, 9) + A(10) / (Tsat - A(11)))
End If
End Function

```

```

Function Tc(Ts)
    Tc = (647.3 - Ts) / 647.3
End Function

```

```

Function Propriedades(T, A, B, C, D, E)
    Propriedades = A + B * (Tc(T) ^ (1 / 3)) + C * (Tc(T) ^ (5 / 6)) + D * (Tc(T) ^ (7 / 8)) + Somatória1(E, Tc(T), 7)
End Function

```

```

Function VolumeF(Ts)
Dim E(50)

```

```

    If 273.16 <= Ts And Ts <= 647.3 Then
        A = 1
        B = -1.9153882
        C = 12.015186
        D = -7.8464025
        E(1) = -3.888614
        E(2) = 2.0582238
        E(3) = -2.0829991

```



E(4) = 0.82180004

E(5) = 0.47549742

E(6) = 0

E(7) = 0

End If

VolumeF = Propriedades(Ts, A, B, C, D, E) * 0.003155

End Function

Function VolumeG(Ts)

Dim E(50)

Ps = PresSat(Ts)

If 273.16 <= Ts And Ts <= 647.3 Then

A = 1

B = 1.6351057

C = 52.584599

D = -44.694653

E(1) = -8.9751114

E(2) = -0.4384553

E(3) = -19.179576

E(4) = 36.765319

E(5) = -19.462437

E(6) = 0

E(7) = 0

End If

VolumeG = Propriedades(Ts, A, B, C, D, E) * 22.089 * 0.003155 / Ps

End Function

Function EntalpiaL(Tsat)

Dim E(7)

If 273.16 <= Tsat And Tsat < 300 Then

A = 0

B = 0

C = 0

D = 0

E(1) = 624.698837

E(2) = -2343.85369

E(3) = -9508.12101

E(4) = 71628.7928



```
E(5) = -163535.221
E(6) = 166531.093
E(7) = -64785.4585
End If
```

```
If 300 <= Tsat And Tsat < 600 Then
  A = 0.8839230108
  B = 0
  C = 0
  D = 0
  E(1) = -2.67172935
  E(2) = 6.22640035
  E(3) = -13.1789573
  E(4) = -1.91322436
  E(5) = 68.7937653
  E(6) = -124.819906
  E(7) = 72.1435404
End If
```

```
If 600 <= Tsat And Tsat <= 647.3 Then
  A = 1
  B = -0.441057805
  C = -5.52255517
  D = 6.43994847
  E(1) = -1.64578795
  E(2) = -1.30574143
  E(3) = 0
  E(4) = 0
  E(5) = 0
  E(6) = 0
  E(7) = 0
End If
If 273.16 <= Tsat And Tsat <= 647.3 Then
  EntalpiaL = Propriedades(Tsat, A, B, C, D, E) * 2099.3
Else
  EntalpiaL = 0
End If
End Function
```

```
Function EntalpiaLV(Ts)
Dim E(50)
If 273.16 <= Ts And Ts <= 647.3 Then

  A = 0
  B = 0.779221
  C = 4.62668
```



```
D = -1.07931
E(1) = -3.87446
E(2) = 2.94553
E(3) = -8.06395
E(4) = 11.5633
E(5) = -6.02884
E(6) = 0
E(7) = 0
```

End If

EntalpiaLV = Propriedades(Ts, A, B, C, D, E) * 2500.9

End Function

Function EntalpiaVapor(Ts)

Dim E(50)

If 273.16 <= Ts And Ts <= 647.3 Then

```
A = 1
B = 0.457874342
C = 5.08441288
D = -1.48513244
E(1) = -4.81351884
E(2) = 2.69411792
E(3) = -7.39064542
E(4) = 10.4961689
E(5) = -5.46840036
E(6) = 0
E(7) = 0
```

End If

EntalpiaVapor = Propriedades(Ts, A, B, C, D, E) * 2099.3

End Function

Function EntropiaL(Ts)

Dim E(50)

If 273.16 <= Ts And Ts <= 300 Then

```
A = 0
B = 0
C = 0
D = 0
E(1) = -1836.92956
E(2) = 14706.6352
```




```
E(3) = -43146.6046  
E(4) = 48606.6733  
E(5) = 7997.5096  
E(6) = -58333.9887  
E(7) = 33140.0718  
End If
```

```
If 300 < Ts And Ts <= 600 Then
```

```
A = 0.912762917  
B = 0  
C = 0  
D = 0  
E(1) = -1.75702956  
E(2) = 1.68754095  
E(3) = 5.82215341  
E(4) = -63.3354786  
E(5) = 188.076546  
E(6) = -252.344531  
E(7) = 128.058531  
End If
```

```
If 600 <= Ts And Ts <= 647.3 Then
```

```
A = 1  
B = -0.32481765  
C = -2.990556709  
D = 3.23419  
E(1) = -0.678067859  
E(2) = -1.91910364  
E(3) = 0  
E(4) = 0  
E(5) = 0  
E(6) = 0  
E(7) = 0
```

```
End If
```

```
EntropiaL = Propriedades(Ts, A, B, C, D, E) * 4.4289
```

```
End Function
```

```
Function EntropiaV(Ts)  
Dim E(50)
```

```
If 273.16 <= Ts And Ts <= 647.3 Then
```



```
A = 1
B = 0.377391
C = -2.78368
D = 6.93135
E(1) = -4.34839
E(2) = 1.34672
E(3) = 1.75261
E(4) = -6.22295
E(5) = 9.99004
E(6) = 0
E(7) = 0
```

End If

EntropiaV = Propriedades(Ts, A, B, C, D, E) * 4.4289

End Function

Function VolumeEspecSuperaq(P, T)

```
Dim A(5)
Dim B(5)
Ts = TempSat(P)
R = 0.000461631
B(1) = 0.0527993
B(2) = 0.00375928
B(3) = 0.022
A(0) = -3.741378
A(1) = -0.0047838281
A(2) = 0.000015923434
M = 40
```

$$\text{VolumeEspecSuperaq} = ((R * T) / P) - B(1) * \text{Exp}(-B(2) * T) + (1 / (10 * P)) * (B(3) - \text{Exp}(\text{Somatória0}(A, T, 2))) * \text{Exp}((Ts - T) / M)$$

End Function

Function EntalpiaSuperaquecido(P, T)

```
Dim A(10)
Dim B(100)
Ts = TempSat(P)
B(11) = 2041.21
B(12) = -40.40021
B(13) = -0.48095
B(21) = 1.610693
```



```

B(22) = 0.05472051
B(23) = 0.0007517537
B(31) = 0.0003383117
B(32) = -0.00001975736
B(33) = -0.000000287409
B(41) = 1707.82
B(42) = -16.99419
B(43) = 0.062746295
B(44) = -0.00010284259
B(45) = 0.000000064561298
M = 45

```

```

A(0) = B(11) + B(12) * P + B(13) * P ^ 2
A(1) = B(21) + B(22) * P + B(23) * P ^ 2
A(2) = B(31) + B(32) * P + B(33) * P ^ 2
A(3) = B(41) + B(42) * Ts + B(43) * Ts ^ 2 + B(44) * Ts ^ 3 + B(45) * Ts ^ 4

```

```

EntalpiaSuperaquecido = Somatória0(A, T, 2) - A(3) * Exp((Ts - T) / M)
End Function

```

```

Function EntropiaSuperaquecido(P, T)
Dim A(5)
Dim B(5)
Dim C(5)

```

```

Ts = TempSat(P)
A(0) = 4.6162961
A(1) = 0.01039008
A(2) = -0.000009873085
A(3) = 0.00000000543411
A(4) = -1.170465E-12
B(1) = -0.4650306
B(2) = 0.001
C(0) = 1.777804
C(1) = -0.01802468
C(2) = 0.00006854459
C(3) = -0.0000001184424
C(4) = 8.142201E-11
M = 85

```

```

EntropiaSuperaquecido = Somatória0(A, T, 4) + (B(1) * Log(10 * P + B(2)) /
Log(2.71828182846)) - Somatória0(C, Ts, 4) * Exp((Ts - T) / M)

```

```

End Function

```



Anexo C

Resultados para o Sistema Caldeira + Torre Recheada

ESTIMATIVA DO RENDIMENTO GLOBAL
DO SISTEMA CALDEIRA + LAVADOR DE GASES

Constantes	
Tref.	293,00 K
PCS	55500,00 kJ/kg
PCI	50000,00 kJ/kg
cph2OI	4,18 kJ/kgK

Valores Admitidos	
MGN	1,00 kg
Pcald	7,00 bar ef
Tprodcal1	503,00 K
Patm	101350 Pa
coef. Ar	1,10

Cálculos Diretos	
hv_vap_ca	2685,16 kJ/kg
improd_cal	18,90 kg
Tvapor_ca	443,43 K
hv1	2846,06 kJ/kg
w1	0,135
w1-w3	0,01

CGcomb	
rel ar/comt	17,90
cp gases_c	1,00 kJ/kgK
mvapor1	2,25 kg
mgas1	16,65 kg
mgas3	16,65 kg
cp prod	1,13 kJ/kgK

Tadiab_3	329,00 K
----------	----------

Chute p/ tabela

h vap_3	2518,55 kJ/kgK
Psat_3	16417 Pa
w3	0,120 kg vap/kg ar
mvapor3	2,00 kg

Cálculos em função da temperatura Tadaib_3

em I	ml iq_4	18,57 kg
em II	T_4	347,84 K
em III	Tadiab_3	329,00 K

Equações desenvolvidas pela primeira lei no volume de controle

rend_ant	91,20 %
rend	99,72 %
melhora	9,33 %

Comparação entre rendimentos

troc_lav	mp*cp*dT
4256,57	3716,12

comparação com trocador de calor

PCS/PCI	1,1100
---------	--------

rendimento máximo

T3	rend	Tliq4	w1-w3	mliq/mGN	Tliq4 C
293	109,8	401,8	0,121	20,4	128,8
295	109,6	400,7	0,119	20,4	127,7
297	109,3	399,5	0,116	20,4	126,5
299	109,1	398,2	0,114	20,3	125,2
301	108,8	396,7	0,111	20,3	123,7
303	108,4	395,1	0,108	20,2	122,1
305	108,1	393,4	0,105	20,1	120,4
307	107,7	391,4	0,101	20,1	118,4
309	107,3	389,3	0,097	20,0	116,3
311	106,8	386,9	0,092	19,9	113,9
313	106,3	384,3	0,087	19,8	111,3
315	105,8	381,4	0,081	19,7	108,4
317	105,1	378,1	0,074	19,6	105,1
319	104,4	374,4	0,067	19,4	101,4
321	103,7	370,3	0,059	19,3	97,3
323	102,8	365,7	0,049	19,2	92,7
325	101,9	360,5	0,039	19,0	87,5
327	100,9	354,6	0,028	18,8	81,6
329	99,7	347,8	0,015	18,6	74,8
331	98,4	340,1	0,000	18,3	67,1
333	97,0	331,1	-0,016	18,1	58,1
335	95,3	320,7	-0,035	17,7	47,7
337	93,5	308,5	-0,056	17,4	35,5
339	91,3	293,9	-0,080	17,0	20,9
341	88,9	276,5	-0,107	16,6	3,5
343	86,1	255,2	-0,139	16,0	-17,8
345	82,9	228,7	-0,176	15,4	-44,3
347	79,1	195,0	-0,219	14,7	-78,0
349	74,7	150,9	-0,270	13,9	-122,1



Anexo D

Exemplos de Torre Recheada e Acessórios

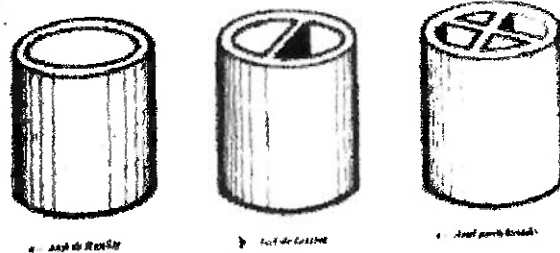
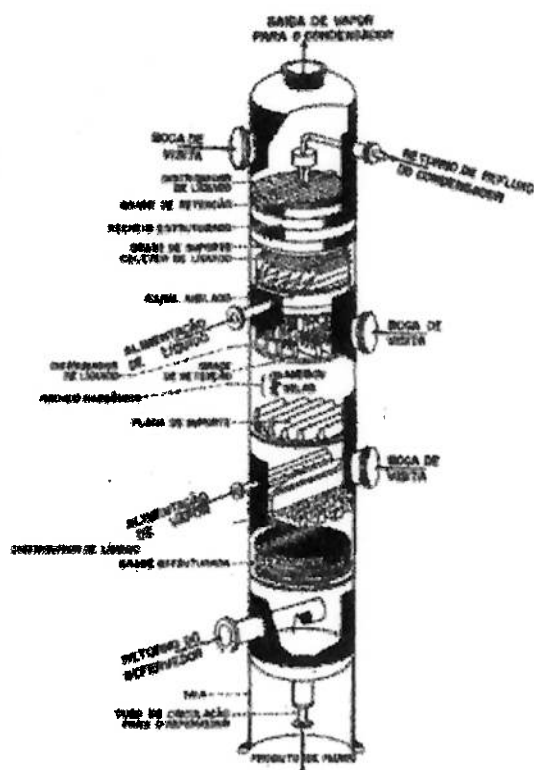
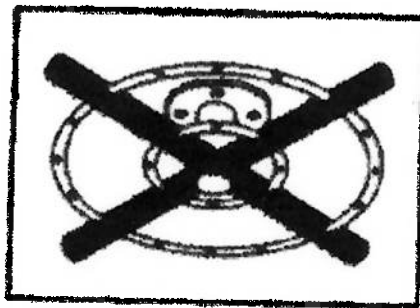
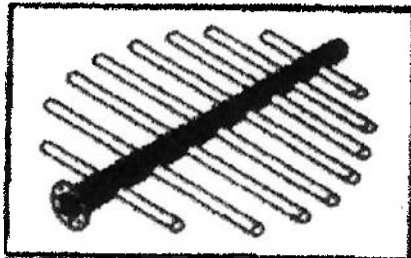


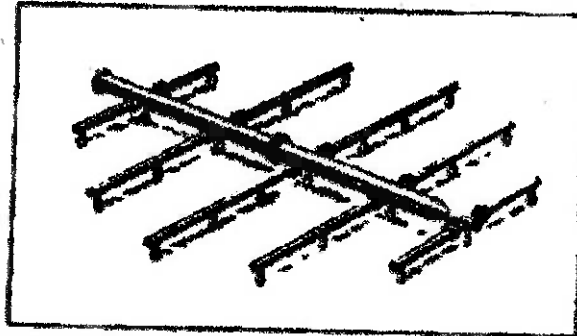
Fig. 2.1 - Epoxide monomers



Tipo de tubos concêntricos



Tipo de tubos paralelos



Tipo de tubos em U com bleos asperos

Fig. 2.16 - Distribuidoras com tubos perfurados

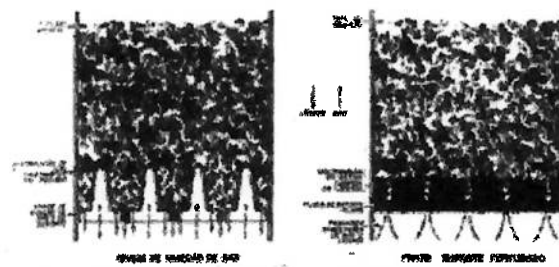


Fig. 2.21 - Comparação entre sistemas de apoio de um leito retangular (Reforçado - Castilho, Grad da Agip/Int. Chem. 1986)

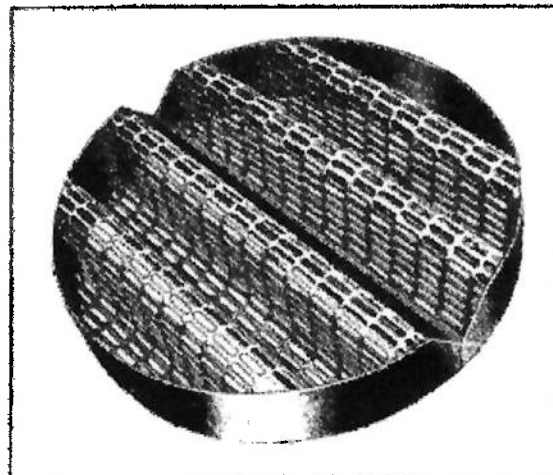


Fig. 2.22 - Grade-suporte de injeção de gás



Anexo E

Gráficos e Correlações Importantes

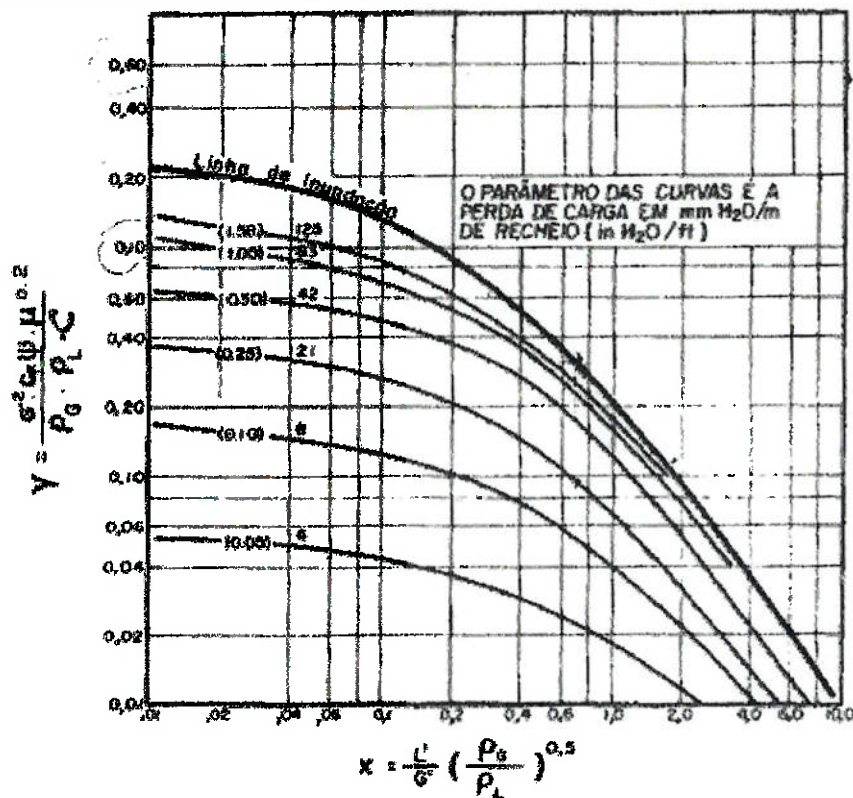


Fig. 2.42 - Correlação generalizada para perda de carga

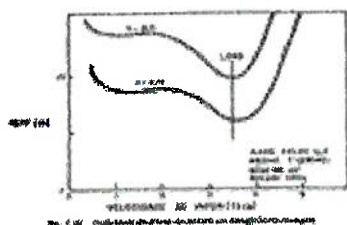


Fig. 2.43 - Perfil de pressão de contato em condições de escoamento

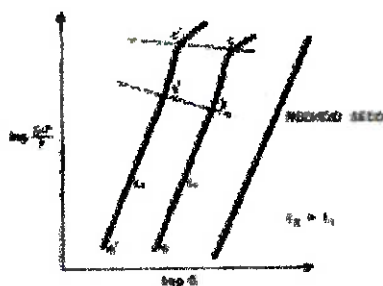


Fig. 2.44 - Perfil de pressão de contato em condições de escoamento

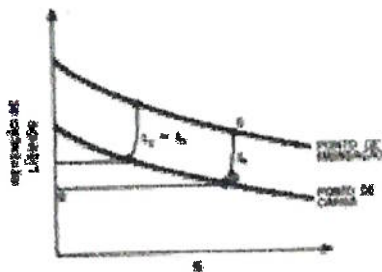


Fig. 2.45 - Exemplo de aplicação da correlação para perda de carga

De acordo com a correlação para perda de carga, a perda de carga ΔP_L é dada por:

A perda de carga ΔP_L é dada por:

A perda de carga ΔP_L é dada por:

A perda de carga ΔP_L é dada por:

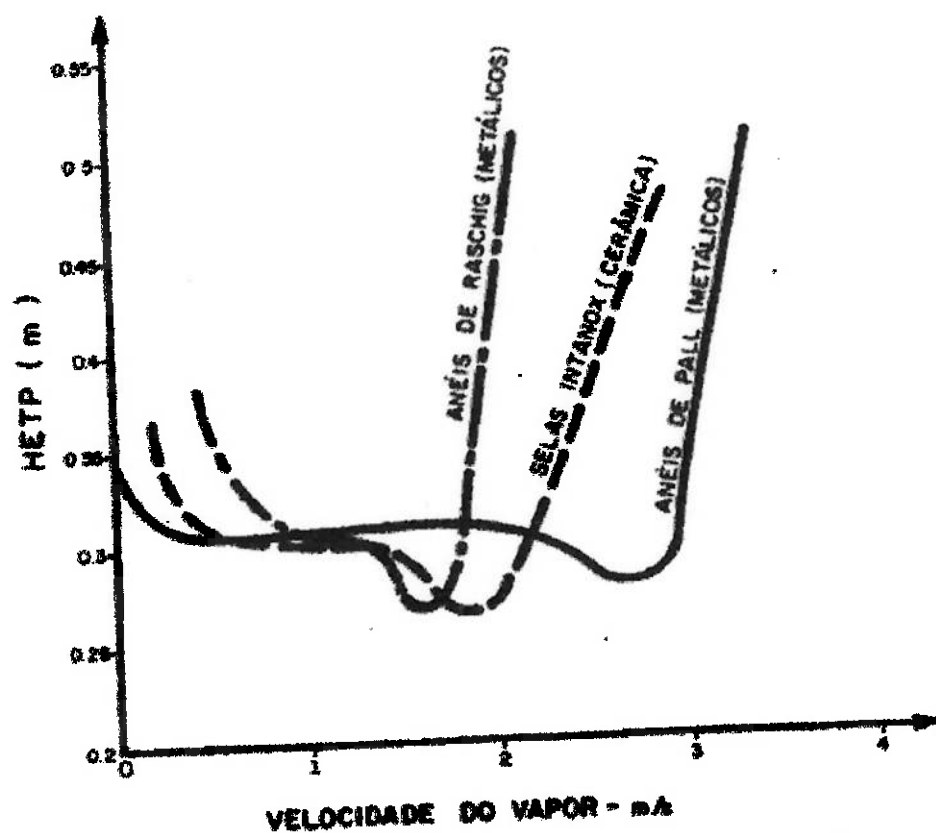


Gráfico da Variação do HETP em função do tipo e dimensão de recheio



Anexo F

Simulações de Torres Recheadas



Anexo G

Catálogos de Fabricantes

Tab. 2.1 – Características dos recheios (dados Açoplast).

Dimensões		mm	poleg	6	10	13	16	19	25	38	50	76	100	150
				1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	1	1 1/2	2	3	4	6
Anéis Rasbig	Espessura	mm		0,8	1,6	2,4	2,4	2,4	3,2	6,35	6,35	9,5		
	Peso	kg/m ³		970	990	840	770	745	680	650	630	570		
	Quantidade	peças/m ³		3000000	872000	378000	198000	109000	47700	13700	5800	1790		
	Área Superficial	m ² /m ³		788	440	400	328	262	190	115	92	62		
	Área Livre	%		60	58	65	68	69	72	73	74	77		
	Packing Factor	adimensional		1600	1000	580	380	255	155	95	65	37		
Selas Intalox	Espessura	mm												
	Peso	kg/m ³		875	810	745		710	680	630	600	600		
	Quantidade	peças/m ³		4150000	1800000	600000		219000	73000	23000	8600	1800		
	Área Superficial	m ² /m ³		985		623		335	256	195	118	92		
	Área Livre	%		64	67	69		71	72	74	75	75		
	Packing Factor	adimensional		725	330	200		145	92	52	40	22		
Selas Berl	Espessura	mm												
	Peso	kg/m ³		897		865		769	721	609	641			
	Quantidade	peças/m ³		3995000		572500		176700	77740	20500	8840			
	Área Superficial	m ² /m ³		900		485		270	250	144	105			
	Área Livre	%		60		63		66	69	75	72			
	Packing Factor	adimensional		900		240		170	110	65	45			
Anéis Cross Partition	Espessura	mm										7,9	9,5	15,8
	Peso	kg/m ³										1170	1300	1122
	Quantidade (ord.)	peças/m ³										2620	1100	320
	Área Superficial	m ² /m ³										141	105	69
	Área Livre	%										49	53	48
	Packing Factor	adimensional												
Selas Super Intalox	Espessura	mm												
	Peso	kg/m ³							570		620			
	Quantidade	peças/m ³							52600		6350			
	Área Superficial	m ² /m ³							250		105			
	Área Livre	%							77		75			
	Packing Factor	adimensional							60		30			
Anéis Pall	Espessura	mm							3	4	5	8	10	
	Peso	kg/m ³							615	590	540	530	480	
	Quantidade	peças/m ³							44500	16400	5300	1530	780	
	Área Superficial	m ² /m ³							220	165	120	75	55	
	Área Livre	%							73	76	72	77	81	
	Packing Factor	adimensional												
Esferas	Espessura	mm												
	Peso	kg/m ³		1320	1310	1300	1300	1300	1280		1300			
	Quantidade	peças/m ³		4750000	1140000	580000	330000	142000	71000		8500			
	Área Superficial	m ² /m ³		420	390	314	210	157	125		65			
	Área Livre	%		44	44	45	45	45	45		45			
	Packing Factor	adimensional												

TORRES recheadas

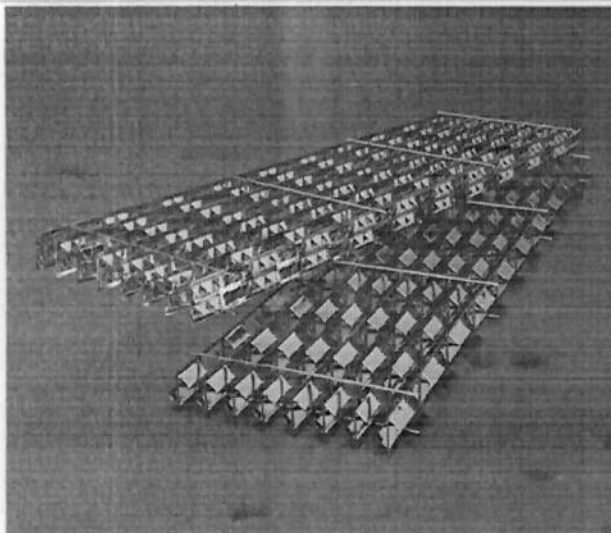
Tab. 2.1 – CARACTERÍSTICAS DOS RECHEIOS (Dados Açoplast).

Esta tabela substitui a Tab. 2.1 apresentada nas páginas 39 e 40.

Dimensões		mm	poleg	6	13	16	19	25	32	38	50	75	90
				1/4	1/2	5/8	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	3	3 3/4
Super Intalox (polipropileno)	Espessura	mm											
	Peso	kg/m ³						94			60		48
	Quantidade	peças/m ³						57210			6780		1483
	Área Superficial	m ² /m ³						206			108		86
	Área Livre	%						90			93		94
	Packing Factor	adimensional						33			21		12
Pall Rings (polipropileno)	Espessura	mm											
	Peso	kg/m ³				95		71		70	62		55
	Quantidade	peças/m ³				213600		50270		14870	6127		1173
	Área Superficial	m ² /m ³				341		206		128	102		85
	Área Livre	%				87		90		91	92		92
	Packing Factor	adimensional				97		62		40	24		16

Tab. 2.1 – Características dos Recheios (dados Acopast)

		Dimensões	mm	6	10	13	15	16	19	25	32	38	40	50	70	75	90
			pol.6g	1.4	3/8	1/2		3/8	3/4	1	1 1/4	1 1/2		2	2	3	3 1/2
HY-PAK	Aço carbono	Espessura	mm							0.45		0.61		0.68		0.91	
		Peso	kg/m ³							313		278		230		205	
		Quantidade	peças/m ²							29900		9390		3670		1090	
		Área Superficial	m ² /m ³														
	Aço inox 304	Área Livre	%							96		96		97		97	
		Packing Factor	adimensional							43		26		18		15	
		Espessura	mm							0.44		0.56		0.64		0.79	
		Peso	kg/m ³							294		257		212		176	
	Alumínio (5052 O)	Quantidade	peças/m ²							29900		9390		3670		1090	
		Área Superficial	m ² /m ³														
		Área Livre	%							96		96		97		97	
		Packing Factor	adimensional							43		26		18		15	
RASCHIG RINGS	Aço carbono	Espessura	mm							0.51		0.64		0.81		1.02	
		Peso	kg/m ³							118		100		92		77	
		Quantidade	peças/m ²							29900		9390		3670		1090	
		Área Superficial	m ² /m ³														
	Aço inox 304	Área Livre	%							96		96		97		97	
		Packing Factor	adimensional							43		26		18		15	
		Espessura	mm							0.41		0.49		0.61		0.81	
		Peso	kg/m ³							301		245		223		202	
	Alumínio (5052 O)	Quantidade	peças/m ²							29900		9390		3670		1090	
		Área Superficial	m ² /m ³														
		Área Livre	%							96		96		97		97	
		Packing Factor	adimensional							43		26		18		15	
INTALOX METAL TOWER PACKING (IMTP)	Aço carbono	Espessura	mm	0.45		0.45		0.45	0.45	0.81	0.76	0.76		0.76		0.76	
		Peso	kg/m ³	1451		746		602	495	495	631	390		297		206	
		Quantidade	peças/m ²	3209400		402590		207700	110900	49330	25675	13210		5790		1860	
		Área Superficial	m ² /m ³	870		422		338	268	204	166	122		94		68	
	Aço inox 304	Área Livre	%	82		84		86	88	85	87	90		92		95	
		Packing Factor	adimensional	700		300		170	155	115	110	83		57		32	
		Espessura	mm	0.40		0.40		0.38	0.40	0.48	0.78	0.64		0.79		0.79	
		Peso	kg/m ³	1272		654		493	434	434	1293	323		307		215	
	Alumínio (5052 O)	Quantidade	peças/m ²	3209400		402680		207700	110900	49330	25675	13210		5790		1860	
		Área Superficial	m ² /m ³	864		422		338	268	203	168	122		94		68	
		Área Livre	%	82		84		86	88	85	87	90		92		95	
		Packing Factor	adimensional	700		300		170	155	115	110	83		57		32	
	Cobre	Espessura	mm	0.41		0.41		0.41	0.41	0.48	0.81	0.69		0.81		0.81	
		Peso	kg/m ³	1430		737		578	488	431	1456	383		346		202	
		Quantidade	peças/m ²	3209400		402590		207700	110900	49330	25675	13210		5790		1860	
		Área Superficial	m ² /m ³	885		421		337	268	203	173	122		94		68	
PALL RINGS	Aço carbono	Área Livre	%	82		84		86	88	85	87	90		92		95	
		Packing Factor	adimensional	700		300		170	155	115	110	83		57		32	
	Aço inox 304	Espessura	mm	0.41		0.41		0.41	0.41	0.48	0.81	0.69		0.81		0.81	
		Peso	kg/m ³	1430		737		578	488	431	1456	383		346		202	
	Alumínio (5052 O)	Quantidade	peças/m ²	3209400		402590		207700	110900	49330	25675	13210		5790		1860	
		Área Superficial	m ² /m ³	885		421		337	268	203	173	122		94		68	
		Área Livre	%	82		84		86	88	85	87	90		92		95	
		Packing Factor	adimensional	700		300		170	155	115	110	83		57		32	
	Cobre	Espessura	mm	0.41		0.41		0.41	0.41	0.48	0.81	0.69		0.81		0.81	
		Peso	kg/m ³	1430		737		578	488	431	1456	383		346		202	
		Quantidade	peças/m ²	3209400		402590		207700	110900	49330	25675	13210		5790		1860	
		Área Superficial	m ² /m ³	885		421		337	268	203	173	122		94		68	
INTALOX METAL TOWER PACKING (IMTP)	Aço carbono	Área Livre	%	82		84		86	88	85	87	90		92		95	
		Packing Factor	adimensional	700		300		170	155	115	110	83		57		32	
	Aço inox 304	Espessura	mm	0.41		0.41		0.41	0.41	0.48	0.81	0.69		0.81		0.81	
		Peso	kg/m ³	1430		737		578	488	431	1456	383		346		202	
	Alumínio (5052 O)	Quantidade	peças/m ²	3209400		402590		207700	110900	49330	25675	13210		5790		1860	
		Área Superficial	m ² /m ³	885		421		337	268	203	173	122		94		68	
		Área Livre	%	82		84		86	88	85	87	90		92		95	
		Packing Factor	adimensional	700		300		170	155	115	110	83		57		32	
	Cobre	Espessura	mm	0.41		0.41		0.41	0.41	0.48	0.81	0.69		0.81		0.81	
		Peso	kg/m ³	1430		737		578	488	431	1456	383		346		202	
		Quantidade	peças/m ²	3209400		402590		207700	110900	49330	25675	13210		5790		1860	
		Área Superficial	m ² /m ³	885		421		337	268	203	173	122		94		68	
PALL RINGS	Aço carbono	Área Livre	%	82		84		86	88	85	87	90		92		95	
		Packing Factor	adimensional	700		300		170	155	115	110	83		57		32	
	Aço inox 304	Espessura	mm	0.41		0.41		0.41	0.41	0.48	0.81	0.69		0.81		0.81	
		Peso	kg/m ³	1430		737		578	488	431	1456	383		346		202	
	Alumínio (5052 H-32)	Quantidade	peças/m ²	3209400		402590		207700	110900	49330	25675	13210		5790		1860	
		Área Superficial	m ² /m ³	885		421		337	268	203	173	122		94		68	
		Área Livre	%	82		84		86	88	85	87	90		92		95	
		Packing Factor	adimensional	700		300		170	155	115	110	83		57		32	
	Cobre	Espessura	mm	0.41		0.41		0.41	0.41	0.48	0.81	0.69		0.81		0.81	
		Peso	kg/m ³	1430		737		578	488	431	1456	383		346		202	
		Quantidade	peças/m ²	3209400		402590		207700	110900	49330	25675	13210		5790		1860	
		Área Superficial	m ² /m ³	885		421		337	268	203	173	122		94		68	

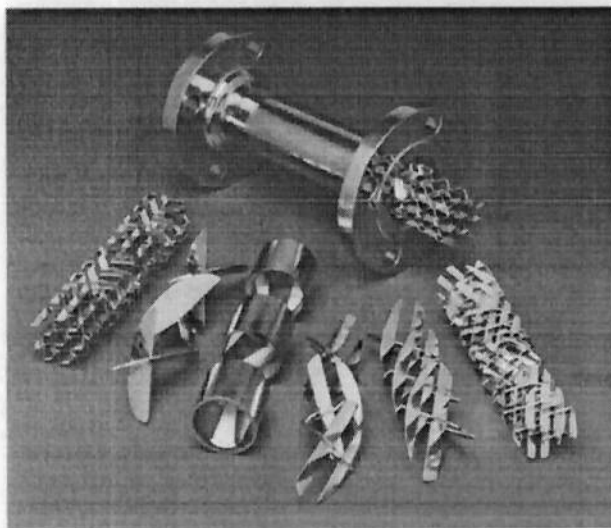


FLEXIGRID® Structured Packing

Now there's a choice in tower grids — one style FLEXIGRID® structured packing for high capacity, another for high efficiency. Both styles are stronger than other grids on the market, thus reducing maintenance costs. Both tend to coke or foul far less because they eliminate the horizontal planes where liquids or solids can stagnate. In dirty conditions, they increase run lengths and eliminate bottlenecks.

Style 2 has small triangular projections that provide superior capacity with a low pressure drop. Style 3 has large rectangular projections that create higher local velocities for more efficiency.

Request Koch's FLEXIGRID® Structured Packing brochure.

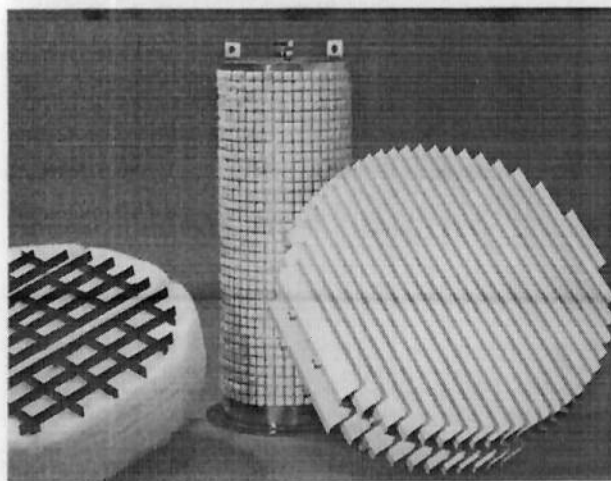


KOCH STATIC MIXERS⁽¹⁾

The Koch Static Mixer, an in-line mixer with no moving parts, is a simple, cost-effective solution to many mixing and contacting problems. It consists of a series of stationary, rigid elements placed lengthwise in a pipe. These form intersecting channels that split, rearrange, and recombine component streams into smaller and smaller layers until one homogeneous stream exists.

The unit is compact and easy to install. More affordable than dynamic agitator systems, Koch static mixers have long lives and low pressure drops. They can be fabricated from most plastics and metals, to fit pipes or vessels of any size and shape, for a wide range of industrial applications.

Request Koch's Static Mixing Technology brochure. (1) Licensee of Sulzer Brothers, Ltd., Winterthur, Switzerland.



MIST ELIMINATORS

In 1965, we introduced our first mist elimination equipment in the form of mesh pads, now known as FLEXIMESH® mist eliminators. Within the next decade, we brought out FLEXICHEVRON® and then FLEXIFIBER® mist eliminators. Koch was the first to manufacture and market all three types — mesh, chevrons, and fiber beds. FLEXIMESH® is the most economical for removal of mist particles down to 10 microns or less. FLEXIFIBER® captures submicron mist particles at collection efficiencies of up to 99.95%. FLEXICHEVRON® has the greatest resistance to fouling or flooding.

With more than 30,000 installations worldwide, Koch is now recognized as the international leader in total entrainment separation technology.

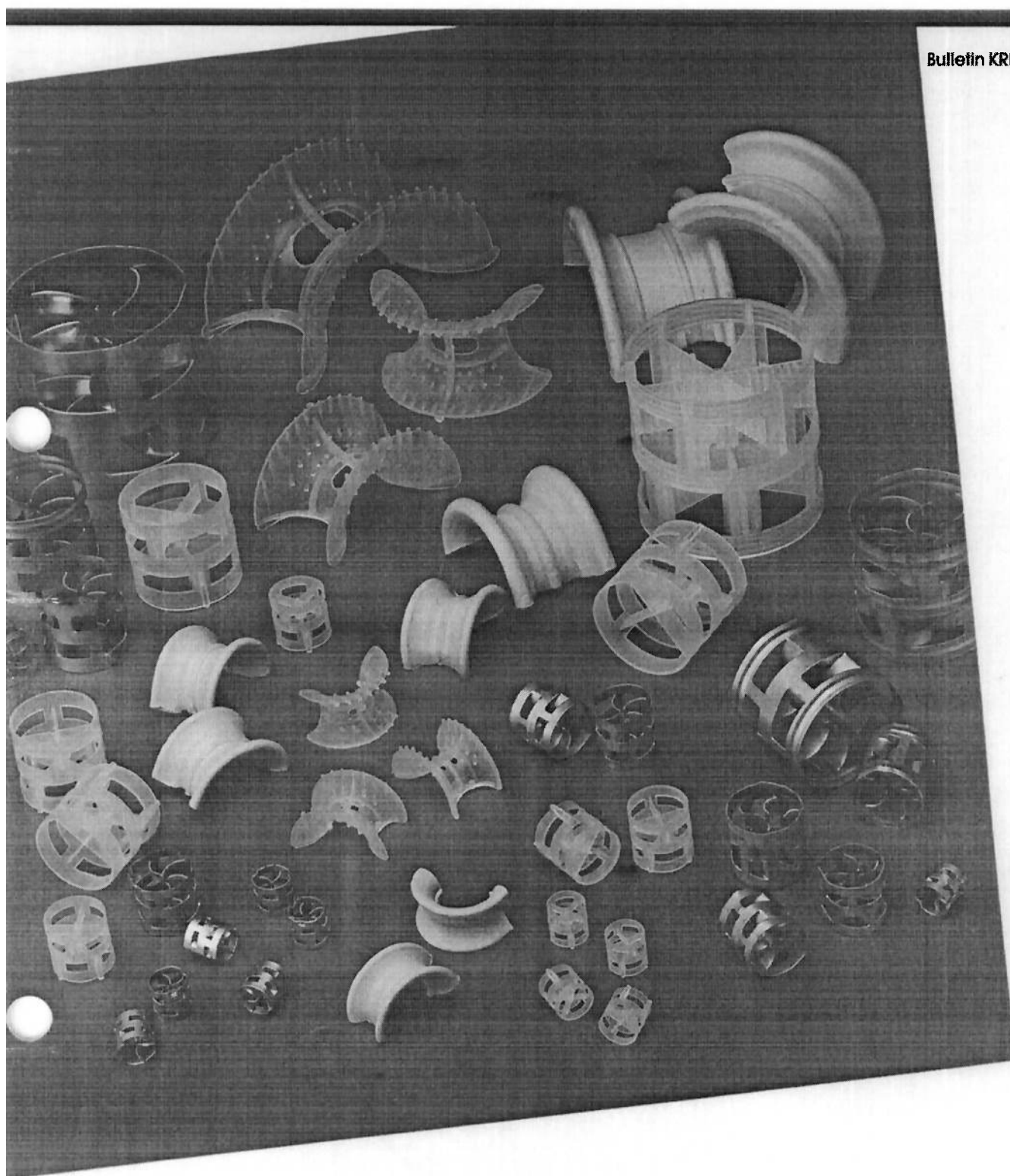
Request Koch's Mist Eliminators brochure.



KOCH ENGINEERING COMPANY INC

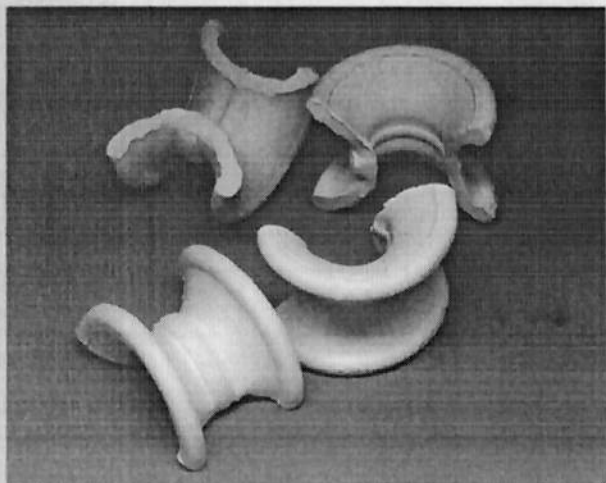
Random Packing

Bulletin KRP-2

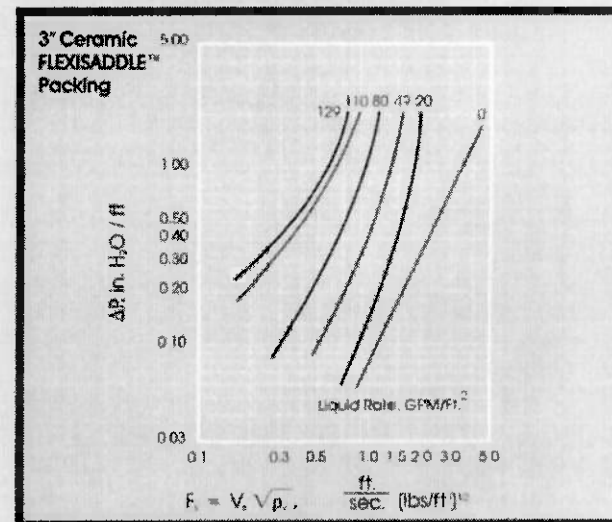
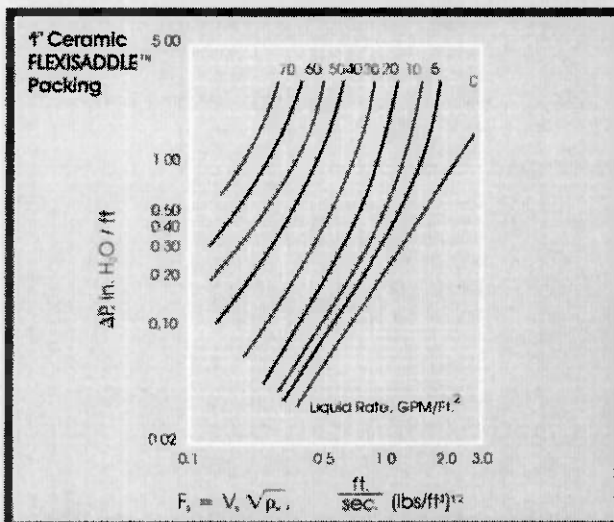
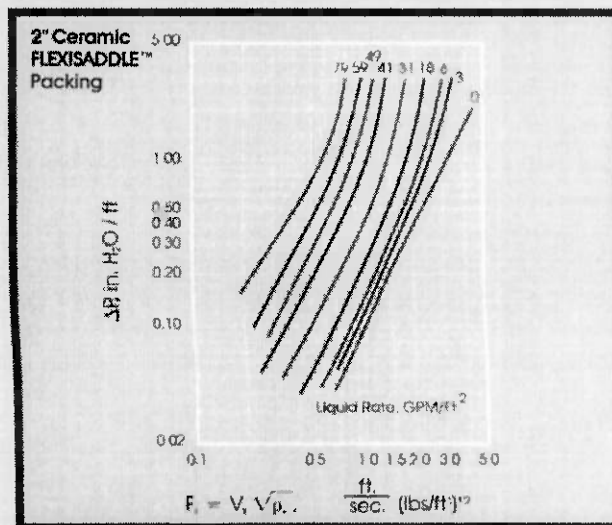
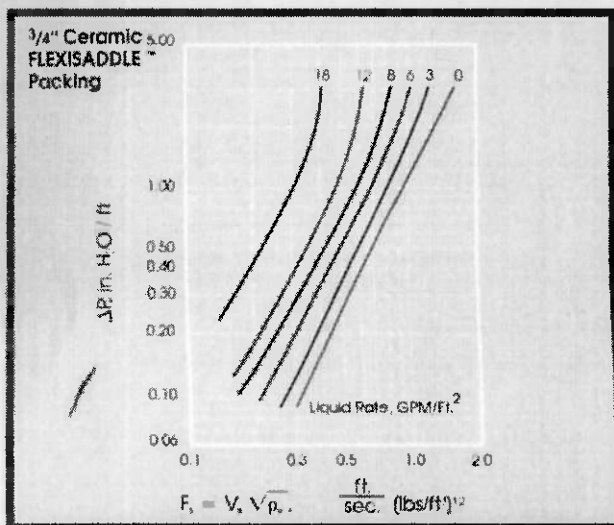
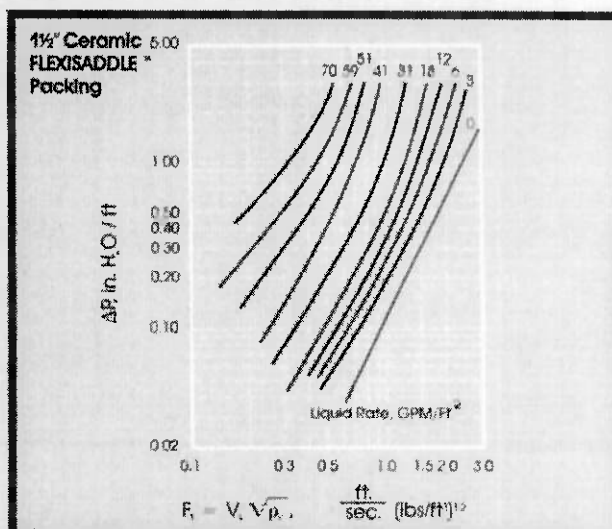


Ceramic FLEXISADDLE™ Random Packing

Pressure Drop — Capacity Curves

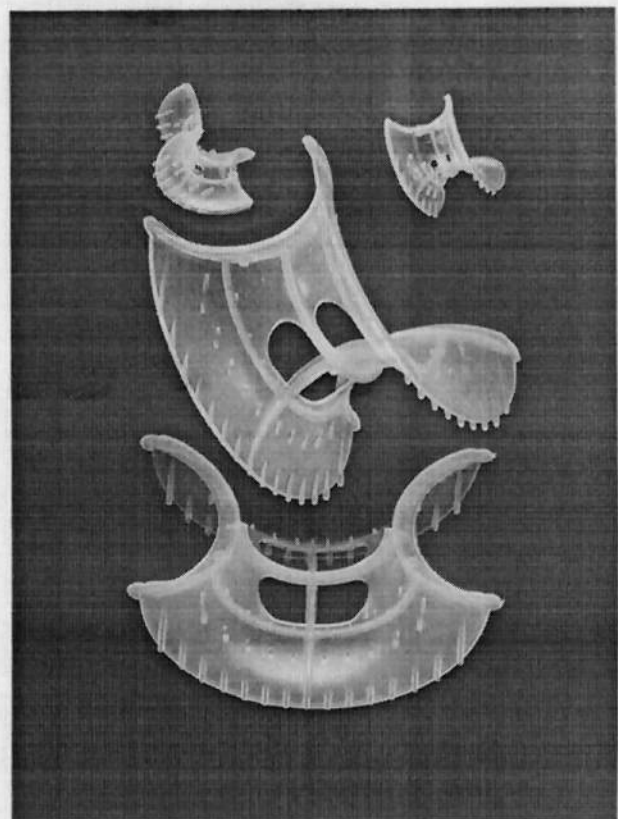


Ceramic FLEXISADDLE™ packing is available in five sizes ranging from 1/2" to 3".

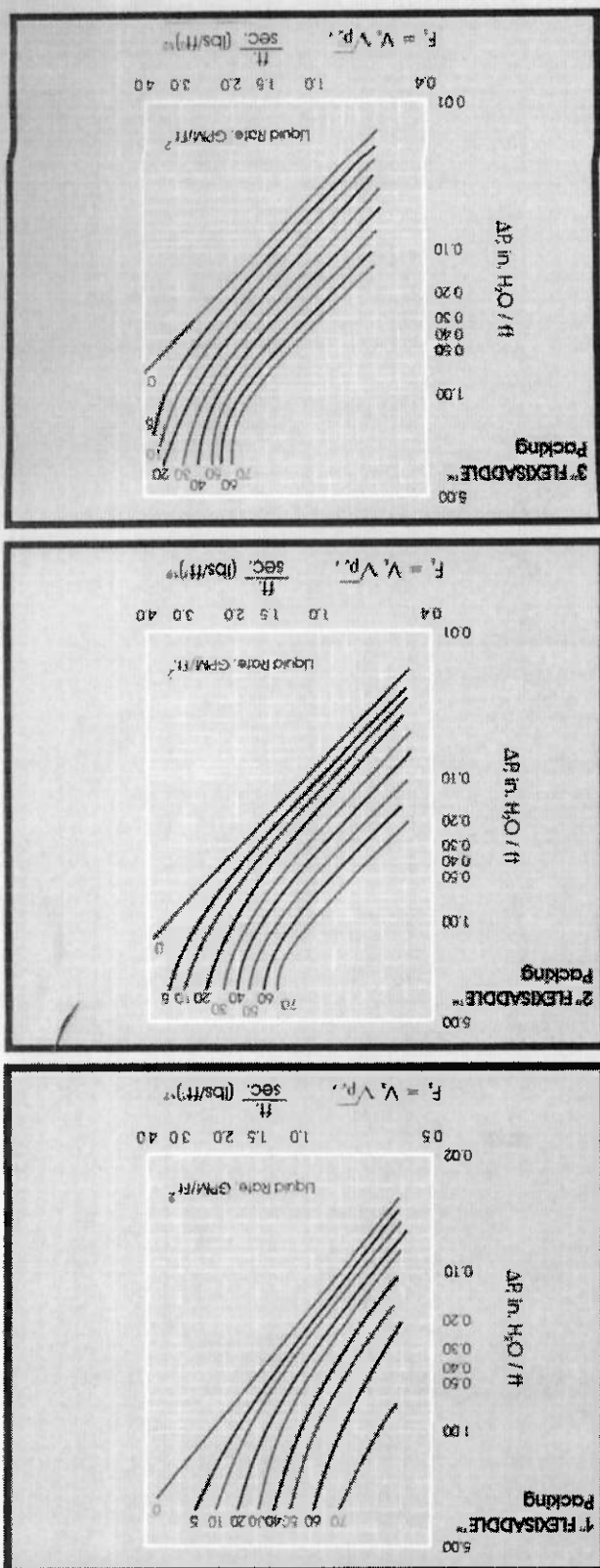


Plastic FLEXISADDLE™ Random Packing

Pressure Drop — Capacity Curves

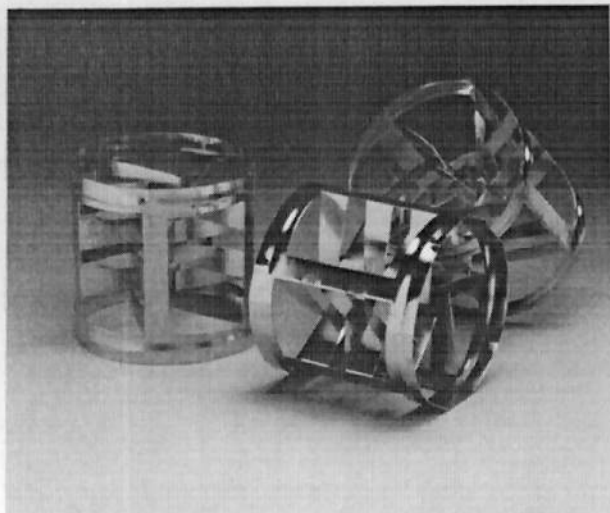


Plastic FLEXISADDLE™ packing is available in three sizes ranging from 1" to 3".

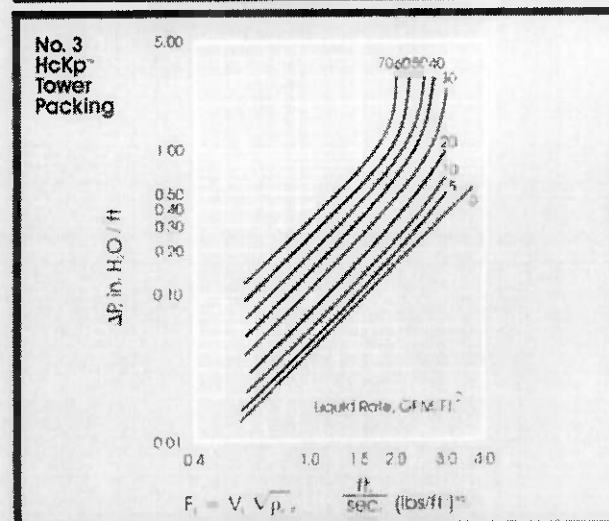
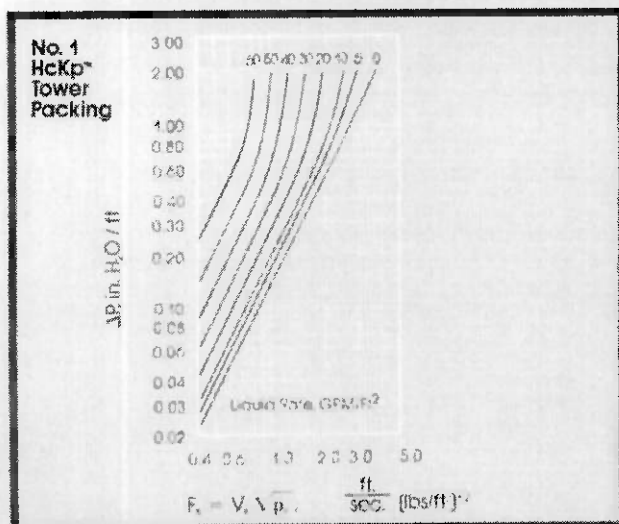
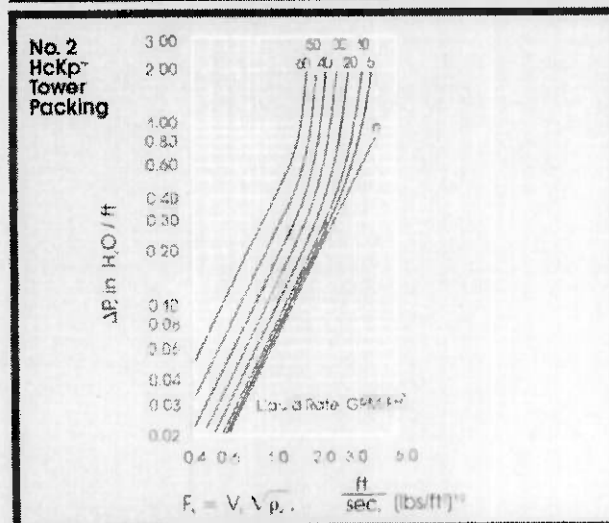
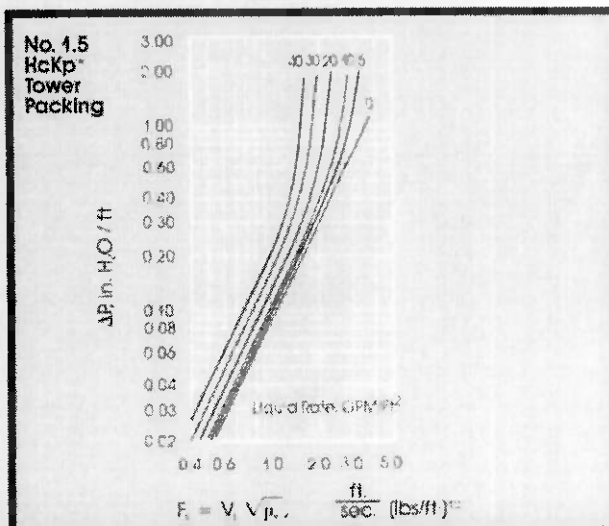


Koch HcKp™ Random Packing

Pressure Drop — Capacity Curves

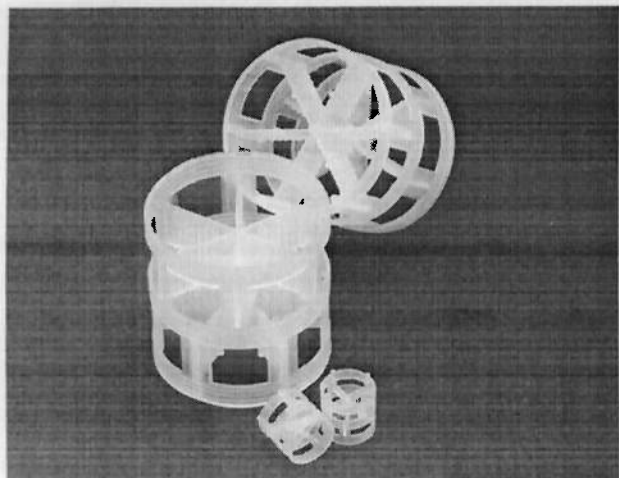


HcKp™ random packing comes in several sizes, to meet your requirements in capacity, efficiency, and pressure drop.



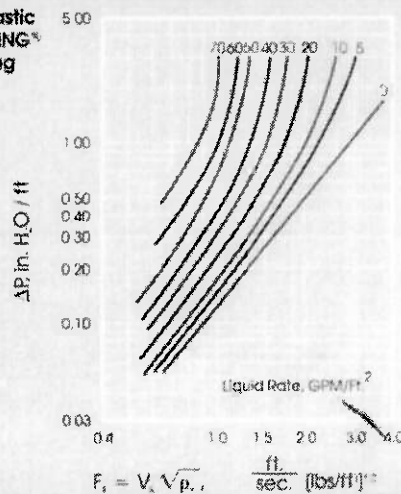
Plastic FLEXIRING® Random Packing

Pressure Drop — Capacity Curves

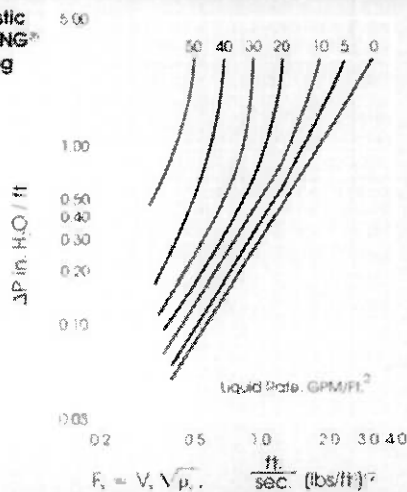


Plastic FLEXIRING® packing is available in five sizes ranging from 5/8" to 3 1/2" in diameter.

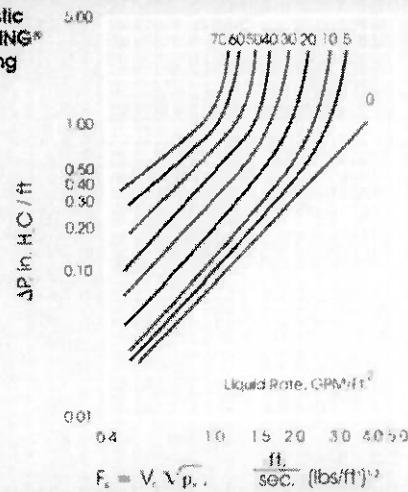
1 1/2" Plastic FLEXIRING® Packing



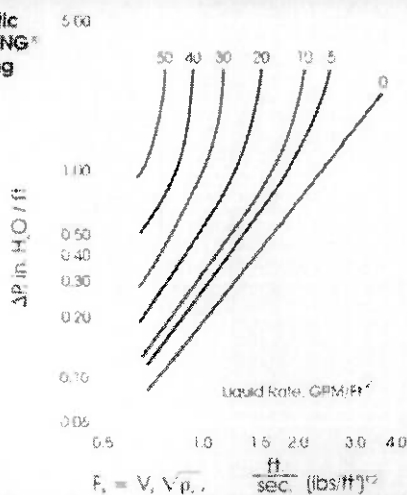
5/8" Plastic FLEXIRING® Packing



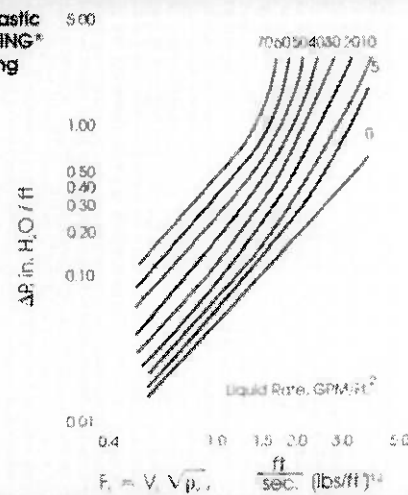
2" Plastic FLEXIRING® Packing



1" Plastic FLEXIRING® Packing

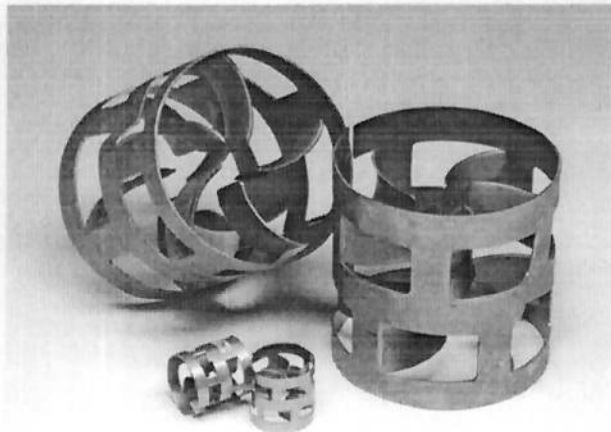


3 1/2" Plastic FLEXIRING® Packing

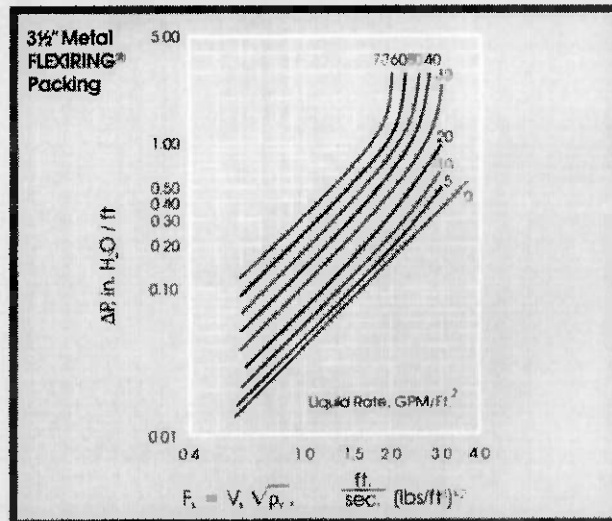
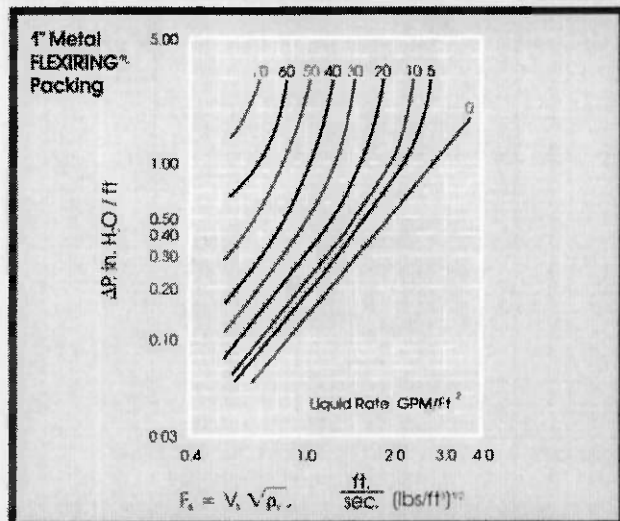
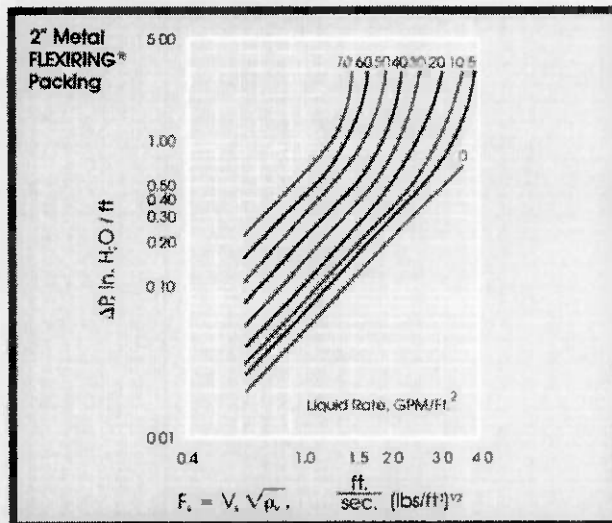
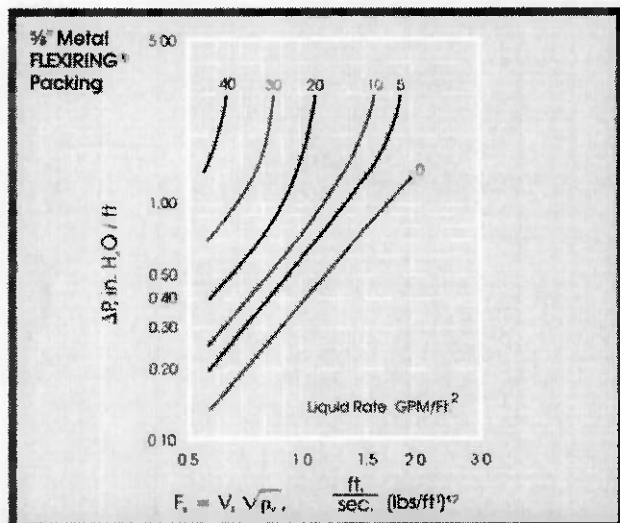
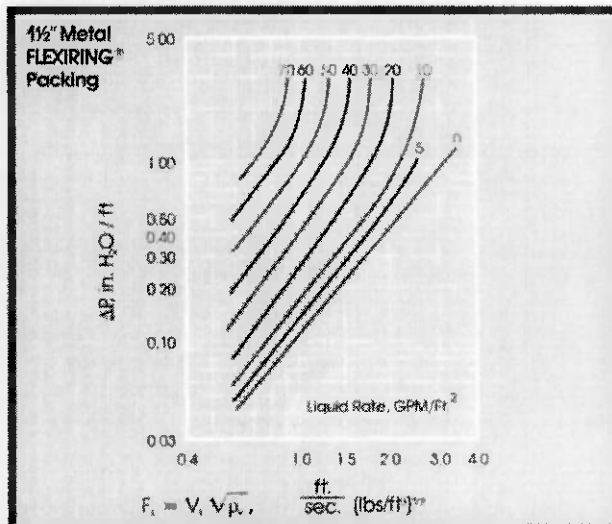


Metal FLEXIRING® Random Packing

Pressure Drop — Capacity Curves



Metal FLEXIRING® tower packing is available in five sizes ranging from 3/8" to 3 1/2" in diameter.



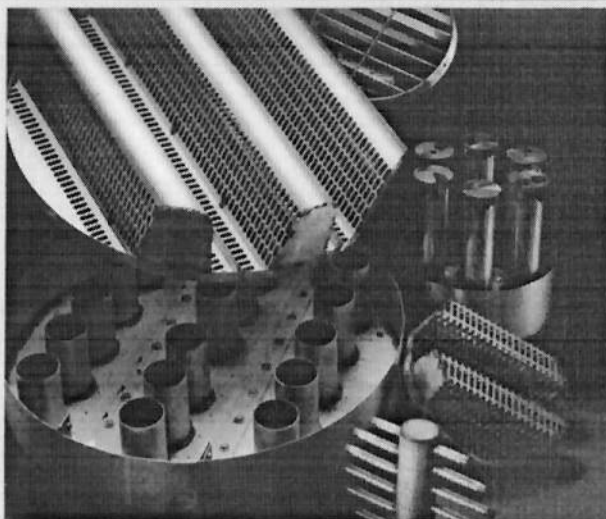
Other Koch Products

Internals

The proper selection and design of packed tower distributors, collectors, supports, and other column internals are essential for optimum performance of the packing.

At Koch Engineering we take special care to assure that liquid and vapor distribution to the packed bed are uniform and that the equipment is selected to best handle any special process considerations, such as fouling or foaming. We offer a proven line of distributors and redistributors for a wide range of flow rates, physical properties, and turndown requirements. In addition, our complete line of support plates, collectors, holdowns, and various other items complete the arrangement and assure maximum performance from whatever random or structured packing is chosen for each service.

Request Koch's Packed Tower Internals brochure.



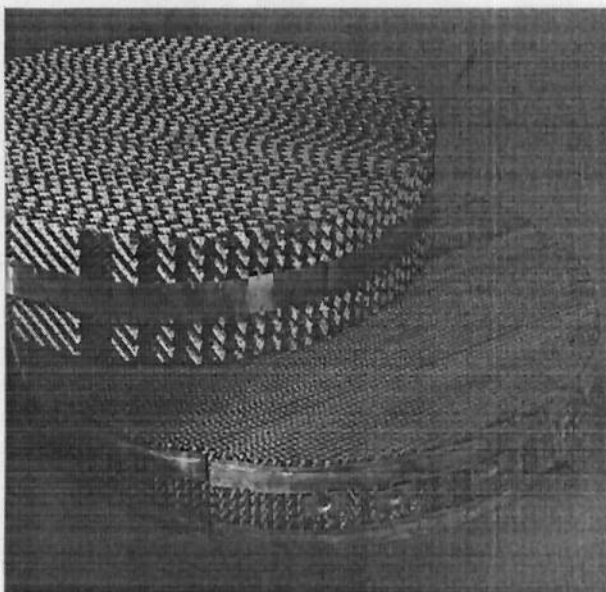
FLEXIPAC® and Koch/Sulzer® Structured Packings⁽¹⁾

FLEXIPAC® structured packing provides higher capacity, higher efficiency and lower pressure drop than any tray or random packing available.

Revamping existing packed or trayed columns with FLEXIPAC® packing will increase the operating capacity of the tower, lower the pressure drop, and lower the energy cost of the distillation or absorption operation. FLEXIPAC® packing elements may be fabricated in a variety of metals and plastics, and in ceramic.

KOCH/SULZER™ structured packing is the most efficient commercial tower packing available today. Fabricated of a woven metal wire or plastic gauze, it is particularly suited for applications where very low pressure drop is important and liquid rates are low (as low as 0.1 gpm/ft²). HETP is generally 5-8", regardless of column size. Pressure drop is as low as 0.2mm Hg per theoretical tray.

Request Koch's FLEXIPAC® Structured Packing brochure and Koch/Sulzer™ Packing brochure. (1) Licensee of Sulzer Brothers, Ltd., Winterthur, Switzerland.

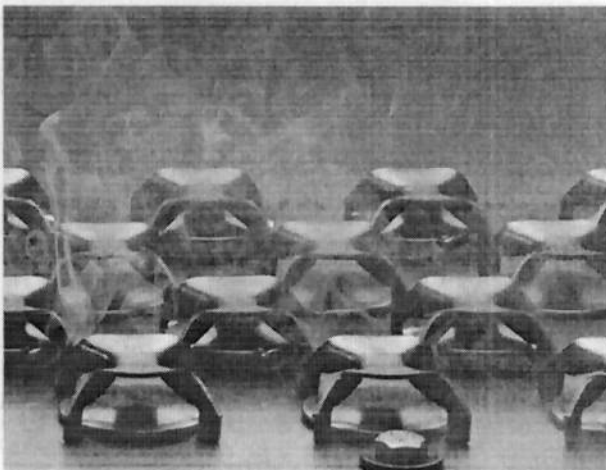


FLEXITRAY® Valve Trays

These valve-type trays have replaced bubble cap and sieve trays as the industry standard. FLEXITRAY® valve trays have a higher efficiency over a broader range of operating conditions than sieve trays and can handle liquid loadings up to 10% greater than other tray types. Other advantages include low cost, simple installation, low pressure drop, excellent turndown, and reduced maintenance. They have demonstrated superior performance in more than 15,000 installations.

Koch also manufactures sieve, bubble cap, tunnel, dualflow, chimney, disc-and-donut, and other specialty trays to meet specific customer requirements.

Request Koch's FLEXITRAY® Valve Tray brochure.





Bibliografia

- 1) Caldas, Jorge Navaes, e Lacerda, Antonio Ignácio de , *Torres Recheadas* , Col. Tecnologia Brasileira, 1988
- 2) Leva, Max , *Tower Packings and Packet Tower Design* , The United States Stoneware Company, Akron, Ohio, USA, Second edition 1953
- 3) Norman, W.F. , *Absortion, Distillation and Cooling Towers*, Longmans, Manchester, 1961
- 4) Incropera, Frank P, e Witt, David P. de, *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1992
- 5) Wylen, Gordon Van, e Sonntag, Richard, e Borgnakke, Claus, *Fundamentos da Termodinâmica Clássica*, Edgard Blücher, São Paulo, 1995
- 6) Perry, Robert H. e Chilton, Cecil H. , *Chemical Engineers' Handbook* , McGraw-Hill Kogakusha Ltd, Tokio, fourth edition, 1973