

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Departamento de Engenharia Química



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

**FEUP**

Paralab

Projecto e Construção de um Sistema para obter  
Água Ultra Pura

Realizado no âmbito do Programa de Estágios denominado PRODEP por  
Sílvia Cláudia Mesquita Teixeira

66(047.3)  
LEQ 2001/TEIs

Porto, 31 de Julho de 2002



UNIÃO EUROPEIA  
Fundo Social Europeu

prodepIII

Mais Educação

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Departamento de Engenharia Química



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

**FEUP**

Paralab

Projecto e Construção de um Sistema para obter  
Água Ultra Pura

Realizado no âmbito do Programa de Estágios denominado PRODEP por  
Sílvia Cláudia Mesquita Teixeira

Porto, 31 de Julho de 2002



UNIÃO EUROPEIA  
Fundo Social Europeu



Mais Educação

66 (047.3) / LE 9 2001 / TEI 7

Universidade do Porto	
Faculdade de Engenharia	
Biblioteca 4	
Nº	30169
CDU	628 (047.3)
DATA	01/08/2007

**Objectivo:**

O presente estágio tem o objectivo de desenvolver uma unidade de produção de água pura, combinando um módulo de desmineralização, destilação e osmose inversa.

Pretende-se, com esta unidade, obter um consumo de 70 vezes menos água que os destiladores actualmente utilizados para este fim. Esta unidade visa abranger o mercado dos destiladores de água usados nos laboratórios de investigação, sendo viável a sua competitividade no mercado actual.

## **Sumário**

## **Sumário**

Neste trabalho pretendeu-se obter uma unidade de produção de água ultra pura que permita fazer uma correcta gestão de água e de energia em destiladores. Esta unidade combina um módulo de desmineralização e destilação e tem previsto consumos cerca de 70 vezes inferiores para a água potável e cerca de 10 % de consumo de energia eléctrica relativamente às unidades correntemente comercializadas.

## **Índice**

## Índice

<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	<b>5</b>
<b>Capítulo 2 - Sistema de Adsorção por Carvão Activado</b>	<b>7</b>
<b>Capítulo 3- Unidade de Permuta Iónica</b>	<b>9</b>
<b>Capítulo 4 - Dimensionamento da unidade de destilação</b>	<b>13</b>
4.1- Sistema de alimentação ao reebulidor:	13
4.2 - Sistema de arrefecimento em circuito fechado	18
<b>Capítulo 5 - Unidade de Osmose Inversa</b>	<b>24</b>
<b>Capítulo 6 - Análise Económica</b>	<b>26</b>
6.1- Custos para o Sistema de Destilação em estudo	26
- Custos de Investimento	26
- Custos de Operação	26
- Custo Actual	27
6.2 Custos para os Destiladores Existentes Actualmente	28
- Custos de Investimento	28
- Custos de Operação	28
- Custo Actual	29
<b>Capítulo 7 - Conclusão</b>	<b>31</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>33</b>
<b>Anexo A- Esquema da disposição dos equipamentos</b>	<b>35</b>
<b>Anexo B- Especificações das resinas</b>	<b>37</b>
<b>Anexo C- Dimensões do Sistema de Destilação</b>	<b>43</b>



## **Introdução**

## 1. Introdução:

Neste trabalho pretende-se dimensionar uma unidade de destilação que produza cerca de 18 l/h de água destilada de modo a servir o Departamento de Engenharia Química da FEUP.

A esta unidade vai ser acoplado outros tipos de equipamentos (conforme a figura apresentada no Anexo A):

- um filtro de novelo (para a captação de partículas);
- um módulo de permuta iónica (para desmineralização da água);
- um filtro de carvão activado ( para remoção de carbonatos);
- uma módulo de osmose inversa (posterior à destilação para obtenção de água ultra pura).

Estes equipamentos permitem obter uma água sem impurezas e desionizada, o que facilitará a realização de análises laboratoriais deste estabelecimento de ensino.

Desta forma, vai-se tratar cada equipamento separadamente, de modo a apresentar os custos e as razões envolvidas na sua escolha.

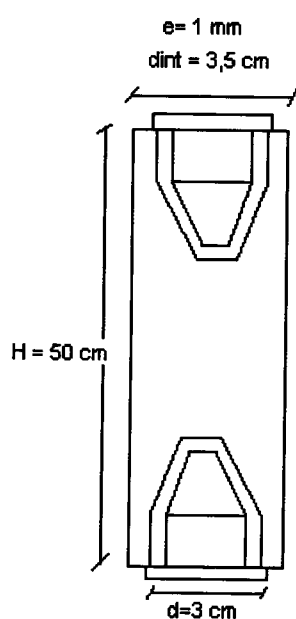
## **Sistema de Adsorção por Carvão Activado**

## 2. Sistema de Adsorção por Carvão Activado

Esta unidade foi projectada com base na dimensão das partículas de carvão activado.

Supondo que as partículas de carvão activado são aproximadamente circulares e que têm um diâmetro de 6 mm, pode-se determinar a altura da coluna multiplicarmos por um factor 80 vezes superior a esse valor. Por outro lado, o diâmetro da coluna pode ser obtido aplicando um factor de aproximadamente 6 vezes superior.

Esta unidade apresenta as dimensões apresentadas na Figura 1:



Com esta unidade pretende-se adsorver todas as partículas, que ainda poderão estar presentes na água, após a etapa de permuta iónica.

## **Unidade de Permuta Iónica**

### 3. Unidade de Permuta Iónica

A permuta iónica baseia-se no uso de resinas sintéticas capazes de permutar os seus iões móveis com os iões que apresentem a mesma polaridade das soluções com as quais a solução entra em contacto. As resinas são caracterizadas pelo meio em que é pretendido que elas operem e pela selectividade/afinidade, ou seja, a capacidade de capturarem iões externos específicos.

Existem quatro grupos de resinas sintéticas que efectuam:

- Permuta de catiões em ambiente fortemente ácido. Forma  $H^+$  e possui afinidade a :  
 $Cr^{3+}$  ;  $Al^{3+}$  ;  $Pb^{2+}$  ;  $Fe^{2+}$  ;  $Ca^{2+}$  ;  $Ni^{2+}$  ;  $Cd^{2+}$  ;  $Cu^{2+}$  ;  $Zn^{2+}$  ;  $Mg^{2+}$  ;  $Ag^+$  ;  $K^+$  ;  $NH_4^+$  ;  $H^+$
- Permuta de catiões em ambiente ácido. Forma  $Na^+$  e possui afinidade a :  
 $H^+$  ;  $Cu^{2+}$  ;  $Pb^{2+}$  ;  $Fe^{2+}$  ;  $Zn^{2+}$  ;  $Ni^{2+}$  ;  $Cd^{2+}$  ;  $Ca^{2+}$  ;  $Mg^{2+}$  ;  $NH_4^+$  ;  $Na^+$
- Permuta de aniões em ambiente fortemente alcalino. Forma  $OH^-$  e possui afinidade a :  
Cianetos ligados a metais; detergentes anódicos; complexos de EDTA;  $NO_3^-$  ;  
 $HCrO_4^-$  ;  $Cl^-$  ;  $HCO_3^-$  ;  $CN^-$  ;  $OH^-$   
É de notar que os primeiros três citados são fixados pelas resinas de uma forma quase irreversível.
- Permuta de aniões em ambiente alcalino. Para além de formar uma solução alcalina livre, possui afinidade a :  
 $OH^-$  ;  $Fe(CN)_6^{4-}$  ;  $CU(CN)_4^{3-}$  ;  $Ni(CN)_4^{2-}$  ; detergentes anódicos ;  $CrO_4^{2-}$  ;  $SO_4^{2-}$  ;  
 $NO_3^-$  ;  $Cl^-$  ;  $F^-$ .

Neste projecto, a unidade de permuta iónica é composta por duas colunas com resinas aniónica (Forma  $Cl^-$ ) e catiónica (Forma  $Na^+$ ). Esta unidade, já existente no departamento, foi alterada, na medida em que alguns materiais já estavam degradados

no seu aspecto, sendo necessário efectuar algumas modificações tais como substituir parafusos, tampas, filtros e verificar as vedações.

Os dados relativos à composição das resinas, distribuição das suas partículas, entre outros, encontram-se no Anexo B, no entanto, pretende-se avaliar neste ponto a capacidade que estas têm em permutar os iões. Desta forma, procedeu-se à realização de alguns testes às resinas, para verificar o seu funcionamento e determinar a sua capacidade real.

Neste sentido, foi realizada uma experiência que consistiu na utilização de uma coluna de dimensão à escala piloto, conforme os dados que se apresenta a seguir, na qual foram introduzidas as resinas aniónica e catiónica e à qual foram alimentadas soluções de Cloreto de Potássio (KCl) e Ácido Clorídrico (HCl), respectivamente. A coluna possuía um diâmetro de 2,5 cm e uma altura variável conforme a altura do leito leito existente na etapa de perturbação.

Numa primeira etapa, a resina catiónica foi regenerada com Ácido Clorídrico concentrado, sendo em seguida efectuada uma limpeza desta com água destilada, na qual a resina inchou. Após esta fase estar completa, isto é, quando se atingiu um valor de igual ou inferior a 4  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , correspondente ao valor da água destilada, faz-se a perturbação com Cloreto de Potássio (KCl), com uma concentração  $C_{\text{KCl}}$ . Por sua vez, verifica-se que o processo de perturbação está terminado quando a condutividade da solução à saída da coluna for aproximadamente igual à condutividade da solução à entrada, facto que indica que a resina atingiu a saturação. A partir dos resultados obtidos, indicados na Tabela 1, pode-se calcular a capacidade da resina baseando no volume útil desta e na quantidade de solução gasta na perturbação.

Tabela 1- Ensaios realizados com a resina de permuta catiónica.

Ensaio	$C_{\text{KCl}}$ (M)	$V_{\text{gasto KCl}}$ (L)	$V_{\text{resina}}$ ( $\text{cm}^3$ )	Capacidade (eq/L)
1	0,1060	1,8255	94,98	2,04
2	0,0999	1,8580	93,30	1,99
3	0,1080	1,7630	95,20	2,00

A resina aniónica foi regenerada, numa primeira etapa, com Hidróxido de Sódio concentrado, sendo limpa seguidamente com água destilada, até atingir o seu valor de condutividade. Numa segunda etapa, procedeu-se à perturbação desta com ácido

clorídrico, com uma concentração  $C_{HCl}$ , terminado o processo quando a condutividade à saída for aproximadamente a mesma que à entrada. Deste modo, pode-se obter o valor da capacidade desta resina, cujo resultados da experiência estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Ensaio realizados com a resina aniónica.

Ensaio	$C_{HCl}$ (M)	$V_{gasto\ HCl}$ (L)	$V_{resina}$ (cm <sup>3</sup> )	Capacidade (eq/L)
1	0,0985	0,7370	71,6675	1,013
2	0,1041	0,725	71,18	1,06
3	0,0993	0,727	72,16	1,00

Ao comparar os resultados obtidos para as resinas, pode-se referir que a capacidade experimental da resina catiónica (2,0 eq/L) é aproximadamente igual à sua capacidade teórica (2,0 eq/L), enquanto que a capacidade experimental da resina aniónica (1,02 eq/L) é ligeiramente inferior à sua capacidade teórica (1,3 eq/L), no entanto esta resina apresenta uma eficiência de cerca de 80%. Pode-se atribuir esta diferença de valores à existência de erros experimentais como a colmatção do leito ou do filtro, erros de medição, entre outros.

É de salientar que a capacidade da resina tem tendência a diminuir com o tempo à medida que a idade da resina aumenta, devendo ser substituída quando a sua eficiência de permuta iónica for relativamente baixa.

Quando se atinge a etapa de saturação, as resinas catiónica e aniónica, devem ser novamente regeneradas com ácido clorídrico (HCl) e Hidróxido de Sódio (NaOH), respectivamente.

É também importante referir que uma boa regeneração permite uma eficaz permuta de iões, como tal, deve-se aguardar o tempo suficiente, que segundo as especificações de cada resina é, no mínimo, 30 minutos para cada, para que estas possam ser regeneradas.



## **Dimensionamento da unidade de destilação**

## 4. Dimensionamento da unidade de destilação

Vai-se assim proceder ao dimensionamento da unidade de destilação, conforme as várias secções que esta apresenta.

### 4.1 - Sistema de alimentação ao reebulidor:

O calor total presente é dado pela soma de duas parcelas:

- calor transferido por condensação<sub>[3]</sub>:

$$Q_{condensação} = m\lambda = \frac{17,928 \times 2257 \times 10^3}{3600} = 11239,86 \text{ W}$$

- calor transferido no arrefecimento:

$$Q_{arrefecimento} = m.C_p.\Delta T = \frac{17,928 \times 4180,8 \times (100 - 25)}{3600} = 1561,53 \text{ W}$$

$$\Rightarrow Q_{total} = Q_{arrefecimento} + Q_{condensação} = 12801,39 \text{ W}$$

O calor removido pela corrente de alimentação é obtido para uma temperatura média de 52,5°C ( $C_p = 4177 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ), uma vez que se supõe que a temperatura de entrada da água é de 25°C e a de saída para o reebulidor é de 80°C.

$$Q = m.C_p.\Delta T = \frac{17,928 \times 4177 \times (80 - 25)}{3600} = 1144,08 \text{ W}$$

Supondo que este tubo tem um diâmetro interno de 0,0064 m (1/4 in) e um diâmetro externo de 0,0084 m, pode-se determinar a velocidade da corrente de água que entra no reebulidor:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{18 \times 10^{-3}}{3600 \times \pi \times \left(\frac{0,0064}{2}\right)^2} = 0,1554 \text{ m/s}$$

Admitindo que o tubo é rectilíneo, pode-se calcular o comprimento deste da seguinte forma:

- Determinação do coeficiente de transferência de calor interno:

Para este cálculo usa-se a seguinte correlação<sub>[1, pág.291]</sub>:

$$Nu_d = 1,86 \cdot (Re_d \cdot Pr)^{1/3} \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_w}\right)^{0,14}$$

Para uma temperatura média de 52,5°C, as propriedades físicas têm o seguinte valor<sub>[1]</sub>:

$$Cp_{ág} = 4177 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$\rho_{ág} = 986,78 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{ág} = 5,30 \times 10^{-4} \text{ kg/ms} = \mu_f$$

$$k_{ág} = 0,647 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$Pr = 3,42$$

Supondo que a temperatura na parede do tubo é de 90°C:  $\mu_w = 3,186 \times 10^{-4} \text{ kg/ms}$

Esta suposição é válida uma vez que, fazendo um Balanço Energético<sub>[5]</sub>, pode-se calcular a temperatura da parede que é de 89,33°C, que é aproximadamente igual à temperatura suposta.

Assim, pode-se escrever a seguinte relação:

$$h_{\text{int}} = \frac{0,647}{0,0064} \left[ 1,86 \left( \frac{986,78 \times 0,1554 \times 0,0064}{5,30 \times 10^{-4}} \times 3,42 \right)^{1/3} \left( \frac{0,0064}{L} \right)^{1/3} \left( \frac{5,30 \times 10^{-4}}{3,186 \times 10^{-4}} \right)^{0,14} \right] =$$

$$= \frac{693,60}{L^{1/3}} \text{ W/m}^2\text{C}$$

que é válida para  $L < 4,05$  m.

Ajustando este tubo à forma de uma serpentina, obtém-se:

$$h_{int_{serpentina}} = \frac{693,60}{L^{1/3}} \left( 1 + 3,5 \times \frac{0,0064}{dc} \right)$$

- Determinação do coeficiente de transferência de calor externo:

Uma vez que não foi encontrada até à presente data uma correlação que satisfizesse a determinação deste parâmetro para uma serpentina, optou-se por usar, como aproximação, duas correlações aplicadas a condensação em superfícies planas inclinadas, percorridas por um filme de líquido não muito espesso.

• Aproximando a tubos horizontais<sup>[2, pág. 284]</sup>, tem-se que:

$$h_{ext} = 0,72 \left( \frac{\lambda \cdot k_f^3 \cdot \rho_f^2 \cdot g}{d_o \cdot \Delta T_f \cdot \mu_f} \right)^{1/4}$$

As propriedades físicas a uma temperatura do condensado de 95 °C são:

$$\rho_f = 961,98 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_f = 3,00 \times 10^{-4} \text{ kg/ms}$$

$$k_f = 0,679 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_f = 100 - 52,5 = 47,5^\circ\text{C}$$

$$\lambda = 2257 \times 10^3 \text{ J/kg}$$

Substituindo estes valores:

$$h_{ext} = 0,72 \left( \frac{2257 \times 10^3 \cdot 0,679^3 \cdot 961,98^2 \cdot 9,8}{0,0084 \cdot 47,5 \cdot 3 \times 10^{-4}} \right)^{1/4} = 10951,75 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

O coeficiente global de transferência de calor pode ser obtido por:

$$1144,08 = UA_{\text{int}} \frac{(100-80) - (100-25)}{\ln \frac{100-80}{100-25}} \Rightarrow \frac{1}{UA_{\text{int}}} = 0,0364 \quad W / m^2 C$$

Substituindo todos os valores das incógnitas na seguinte equação:

$$0,0364 = \frac{1}{UA_{\text{int}}} = \left( \frac{1}{h_{\text{int}}} + \frac{0,0064 \times \ln(0,0084/0,0064)}{2 \times 16,3} + \frac{0,0064}{0,0084 \times h_{\text{ext}}} \right) \frac{1}{0,0064 \times \pi \times L}$$

Pode-se obter o comprimento do tubo, tal como se encontra na Tabela 3. Estes resultados são obtidos por atribuição de valores para o diâmetro da serpentina,  $d_c$ , através do uso de *Equation Solver* pertencente ao Programa *Excell*.

• Para tubos verticais<sup>[2, pág. 283]</sup> a equação é dada por:

$$h_{\text{ext}} = 0,943 \left( \frac{\lambda \cdot k_f^3 \cdot \rho_f^2 \cdot g}{L \cdot \Delta T_f \cdot \mu_f} \right)^{1/4}$$

Usando os valores das propriedades físicas anteriormente apresentadas para 95°C, tem-se:

$$h_{\text{ext}} = 0,943 \left( \frac{2257 \times 10^3 \cdot 0,679^3 \cdot 961,78^2 \cdot 9,8}{L \cdot 47,5 \cdot 3 \times 10^{-4}} \right)^{1/4} = \frac{4342,43}{L^{1/4}} \quad W / m^2 C$$

(supondo que L é o comprimento total)

Procedendo da mesma forma para o cálculo do comprimento do tubo, obtém-se os valores apresentados na Tabela 3.

Supondo que L representa um semi-comprimento, l, pode-se escrever:

$$h_{ext} = 0,943 \left( \frac{2257 \times 10^3 \cdot 0,679^3 \cdot 961,78^2 \cdot 9,8}{l \cdot 47,5 \cdot 3 \times 10^{-4}} \right)^{1/4} = \frac{4342,43}{l^{1/4}} \quad W/m^2 \cdot ^\circ C$$

considerando que a variável l é dada por:

$$l = \frac{\pi \cdot dc}{2}$$

Estes cálculos também podem ser consultados na Tabela 3.

Tabela 3- Valores obtidos para o dimensionamento da serpentina de pré-aquecimento.

Diâmetro da serpentina	Tubos Horizontais		Tubos Verticais				
	Comprimento (m)	n°. de voltas	Comprimento L (m)	n°. de voltas	Semi-comprimento l (m)	Comprimento total	n°. de voltas
0,08	2,156	9	2,447	10	0,1257	2,225	9
0,10	2,289	7,5	2,586	8,5	0,1571	2,37	8
0,12	2,386	6,5	2,688	7,5	0,1885	2,477	7
0,15	2,492	5,5	2,798	6	0,2356	2,595	6
0,18	2,567	5	2,877	5,5	0,2827	2,682	5
0,20	2,606	4,5	2,918	5	0,3142	2,728	4,5
0,22	2,639	4	2,952	4,5	0,3456	2,767	4
0,25	2,679	3,5	2,994	4	0,3927	2,816	4
0,30	2,730	3	3,047	3,5	0,4712	2,879	3,5

De forma a obter um valor de diâmetro de serpentina e um número de voltas razoavelmente aceitável, pode-se escolher um diâmetro para a serpentina de 15 cm. Por outro lado pretende-se também escolher as piores condições de trabalho, sendo que, a correlação para tubos verticais deve ser escolhida, considerando a variável L como o comprimento total, visto ser o pior caso, isto é, é o caso em que é necessário ter um

maior comprimento para realizar a transferência de calor esperada. A estes valores optou-se por acrescentar um factor de segurança de aproximadamente 10%, o que permite assegurar que o pré-aquecimento pode ser efectuado com um tubo de comprimento de 3 m, um diâmetro de serpentina de 15 cm, com 6,5 voltas e um ângulo de 20° com a horizontal. Esta suposição permite dizer também que a altura desta serpentina é cerca de 0,81 m.

Assim, conclui-se que, para um tubo horizontal com diâmetro de espiral de 15 cm, o comprimento total é de 2,52 m, dando 5,5 voltas. Admite-se também a existência de um ângulo apertado de aproximadamente 20°.

## 4.2 - Sistema de arrefecimento em circuito fechado

### 4.2.1 - Serpentina helicoidal

Nesta secção vai-se proceder ao estudo da transferência de calor no sistema de arrefecimento fechado deste equipamento. Ele será avaliado para duas estações do ano, no Verão e no Inverno, de modo a abranger as condições limite de trabalho e a facilitar o dimensionamento do sistema.

#### No Verão:

Supondo que a temperatura de entrada da água proveniente do arrefecimento no tanque é de 35°C, e a temperatura desta à saída da serpentina é de 50°C, o caudal de água que é necessário para condensar o vapor e arrefecer a água é obtido por:

$$Q = 12801,39 = \frac{m \times 4174 \times (50 - 35)}{3600} \Leftrightarrow m = 736,06 \text{ kg / h}$$

Como a densidade da água é de 0,992 Kg/dm<sup>3</sup>, temos que o caudal de água tem o valor de 0,730 m<sup>3</sup>/h.

A velocidade de circulação da água é de:

$$v = \frac{0,730}{3600 \times \pi \times \left(\frac{0,02}{2}\right)^2} = 0,645 \text{ m/s}$$

O coeficiente global de transferência de calor é dado pela equação:

$$12801,39 = UA_{\text{int}} \frac{(100 - 50) - (100 - 35)}{\ln \frac{100 - 50}{100 - 35}} \Leftrightarrow \frac{1}{UA_{\text{int}}} = 0,00447$$

- Determinação do coeficiente de transferência de calor interno:

Para o calculo deste parâmetro, usa-se a seguinte relação, para convecção forçada em tubos, aplicada a um tubo rectilíneo<sub>[2, pág. 247]</sub>:

$$\frac{h_{\text{int}} \cdot d}{k} = 0,023 \cdot \left(\frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu}\right)^{0,8} \cdot \left(\frac{Cp \cdot \mu}{k}\right)^{0,4} \quad \text{válido para } Re > 10000 \text{ e } 0,7 < Pr < 160$$

Para uma temperatura média de 42,5°C, tem-se:

$$Cp_{\text{ág}} = 4174 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{ág}} = 990,96 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{\text{ág}} = 6,26 \times 10^{-4} \text{ kg/ms}$$

$$k_{\text{ág}} = 0,636 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$Pr = 4,11$$

Assim, obtém-se:

$$h_{\text{int}} = \frac{0,023 \times 0,636}{0,02} \times \left(\frac{990,96 \times 0,645 \times 0,02}{6,26 \times 10^{-4}}\right)^{0,8} \times 4,11^{0,4} = 3612,01 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

Sendo esta equação válida para as condições fixadas.

Admitindo um diâmetro interno de 0,02 m e externo de 0,022 (1mm de espessura), para uma serpentina tem-se<sub>[2, pág. 305]</sub>:



$$h_{int_{serpentina}} = 3612,01 \left( 1 + 3,5 \times \frac{0,02}{dc} \right)$$

em que  $dc$  é o diâmetro da serpentina.

- Determinação do coeficiente de transferência de calor externo:

Usando a mesma fórmula para o cálculo deste parâmetro temos:

Para a temperatura de condensado de  $95^{\circ}\text{C}$ , as propriedades físicas são:

$$\rho_{ág} = 961,98 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{ág} = 3,00 \times 10^{-4} \text{ kg/ms}$$

$$k_{ág} = 0,679 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda = 2257 \times 10^3 \text{ J/kg}$$

$$\Delta T = 57,5^{\circ}\text{C}$$

O dimensionamento deste sistema vai ser realizado da mesma forma que foi para a serpentina anterior, isto, é usando as duas correlações, assim:

• Para tubos horizontais, tem-se que:

$$h_{ext} = 0,72 \left( \frac{2257 \times 10^3 \cdot 0,679^3 \cdot 961,98^2 \cdot 9,8}{0,022 \cdot 57,5 \cdot 3,00 \times 10^{-4}} \right)^{1/4} = 8207,38 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

Pode-se então substituir os valores dos coeficientes de transferência de calor na seguinte equação e calcular  $L$ , cujo resultado encontra-se apresentado na Tabela 4.

$$0,00447 = \frac{1}{UA_{int}} = \left( \frac{1}{h_{int}} + \frac{0,02 \times \ln(0,022/0,02)}{2 \times 16,3} + \frac{0,02}{h_{ext} \times 0,022} \right) \frac{1}{0,02 \times \pi \times L}$$

• Para tubos verticais a equação é dada por:

$$h_{ext} = 0,943 \left( \frac{2257 \times 10^3 \cdot 0,679^3 \cdot 961,98^2 \cdot 9,8}{L \cdot 57,5 \cdot 3,00 \times 10^{-4}} \right)^{1/4} = \frac{4139,89}{L^{1/4}} \quad W/m^2 \cdot ^\circ C$$

Procedendo da mesma forma para o dimensionamento deste tubo, obtém-se os resultados que se encontram na Tabela 4.

Supondo que L representa um semi-comprimento, l:

$$h_{ext} = 0,943 \left( \frac{2257 \times 10^3 \cdot 0,679^3 \cdot 961,98^2 \cdot 9,8}{l \cdot 57,5 \cdot 3,00 \times 10^{-4}} \right)^{1/4} = \frac{4139,89}{l^{1/4}} \quad W/m^2 \cdot ^\circ C$$

Estes cálculos também podem ser consultados na Tabela 4.

Tabela 4- Valores obtidos para o dimensionamento da serpentina de arrefecimento.

Diâmetro da serpentina	Tubos Horizontais		Tubos Verticais				
	Comprimento (m)	nº. de voltas	Comprimento (m)	nº. de voltas	Semi-comprimento	Comprimento total	nº. de voltas
0,08	1,128	4,5	1,615	6,5	0,1257	1,199	5
0,10	1,182	4	1,678	5,5	0,1571	1,28	4,5
0,12	1,225	3,5	1,727	4,5	0,1885	1,346	4
0,15	1,275	3	1,784	4	0,2356	1,425	3,5
0,18	1,312	2,5	1,827	3,5	0,2827	1,488	3
0,20	1,333	2,5	1,85	3	0,3142	1,524	2,5
0,22	1,35	2	1,87	3	0,3456	1,555	2,5
0,25	1,373	2	1,896	2,5	0,3927	1,597	2
0,30	1,402	1,5	1,929	2	0,4712	1,655	2

Como o referido anteriormente, o diâmetro escolhido para a espiral é de 15 cm, e escolheu-se a correlação para tubos verticais considerando a variável L como o comprimento total, visto ser o pior caso. A estes valores optou-se por acrescentar um factor de segurança de aproximadamente 50%, para assegurar que o arrefecimento seja realizado sem grandes elevações de temperatura nesta serpentina, o que permite referir

que o comprimento do tudo é de 2,8 m, dando 6 voltas com um ângulo de 20° com a horizontal. Esta suposição permite dizer que a altura desta serpentina é cerca de 0,92 m.

## **Unidade de Osmose Inversa**

## 5. Unidade de Osmose Inversa

Esta unidade tem o objectivo de produzir água ultra pura, baseia-se no fenómeno de osmose, ou seja da transferência e separação selectiva de fluídos por uma membrana semi-permeável. Esta membrana deve ser permeável ao solvente (ex.: água) mas impermeável ao soluto (ex.: sais) e pode ser construída à base de acetato de celulose ou à base de polímeros, entre outros.

Na presença de dois líquidos de concentrações diferentes contidos em vasos interligados por uma membrana semi-permeável existe um diferencial de pressão hidrostática (pressão osmótica) que é definida pela lei de Van't Hoff como sendo:

$$p = N.i.R.T$$

em que:

p – diferença de pressão

N – Concentração molar do soluto

i – grau de dissociação no equilíbrio

R – Constante dos gases perfeitos

T – Temperatura absoluta da solução

No caso do solvente ser água e o soluto ser um sal, se considerar ter num dos vasos água pura e no outro vaso água com sal, o sentido natural de transferência de água será do vaso com água pura para o vaso com água e sais. Para permitir a filtração é necessário inverter o sentido da transferência o qual se consegue aplicando uma pressão mecânica superior à pressão osmótica, conseguindo-se assim o efeito de osmose inversa. No caso em estudo, pretende-se proceder dessa forma de modo a retirar da água (solvente), todas as impurezas (soluto) que poderão ainda existir após a etapa de destilação. Devido à sua pureza e a questões económicas, esta água só deverá ser usada em casos estritamente necessários, isto é, deverá existir um controlo rigoroso da água retirada nesta unidade.

## **Análise Económica**

## 6. Análise Económica

### 6.1- Custos para o Sistema de Destilação em estudo

A análise económica deste equipamento foi realizada com base nos Custos de Investimento e nos Custos de Operação.

#### - Custos de Investimento

Na Tabela 5, pode-se observar os custos de investimento das variadas unidades existentes.

Tabela 5- Custo de aquisição de cada equipamento (CI).

Tipo de Equipamento	Unidade	Custo Total (Euros)
Unidade de Permuta Iónica	1	349,16
Unidade de Destilação	1	1908,12
Unidade de Osmose Inversa	1	558,65
Sistema de Automatação e Controlo	1	268,80
Total		3084,73

#### - Custos de Operação

A facturação da água é efectuada com um período de 2 meses, segundo uma tarifa doméstica (tarifa aplicada à FEUP). Os valores apresentados na Tabela 6 fornecem a indicação do custo da água por m<sup>3</sup>.

Para determinar o custo devido à electricidade gasta pelo sistema, basta relacionar a quantidade de electricidade necessária para a resistência (12,8 kW) com a tarifa simples usada, na qual o preço da electricidade aplicada à Faculdade de Engenharia é de 0,09 euro/kWh.

Tabela 6- Preços em vigor relacionados com o consumo da água.

Quantidade (m <sup>3</sup> )	Preços (euro/m <sup>3</sup> )			
	Água	Saneamento	Resíduos	Total
0 – 5	0,46	0,10	0,10	0,66
6 – 10	0,74	0,10	0,10	0,94
11 – 15	0,74	0,10	0,10	0,94
16 – 25	1,35	0,10	0,10	1,55
26 – 50	2,03	0,10	0,10	2,23
> 50	2,03	0,10	0,10	2,23

Na Tabela 7 está apresentado os custos de operação e manutenção do equipamento em estudo.

Tabela 7- Custos anuais de funcionamento do equipamento (CO).

Serviços Utilizados	Subtotal (Euros)
Água	22,8
Electricidade	2261,52
Manutenção (5% CI)	154,24
Total	2438,56

### - Custo Actual

Para que se possa fazer a comparação entre este sistema e um sistema com quatro destiladores em paralelo, vai-se determinar o custo actual ( $CA_A$ ) do equipamento, supondo que o tempo de vida útil do equipamento é de 8 anos e também que a taxa de juro é de 10%, assim, pode-se usar a seguinte relação:

$$\begin{aligned}
 CA_A &= CI + CO(1+i)^{-n} = 3084,73 + 2438,56 \left[ (1+0,1)^{-1} + \dots + (1+0,1)^{-8} \right] = \\
 &= 3084,73 + 2038,56 \frac{1 - (1+0,1)^{-8}}{0,1} = 13960,30 \quad \text{Euro}
 \end{aligned}$$



## 6.2 Custos para os Destiladores Existentes Actualmente

Para analisar a viabilidade da construção e funcionamento do destilador projectado, vai-se determinar os custos associados ao investimento no equipamento e ao funcionamento deste.

### - Custos de Investimento

Neste tipo de equipamento não se incorpora os custos da unidade de permuta iónica, dado que o caudal de água utilizado é muito elevado, além de que a maior parte da água segue para o esgoto.

Para o sistema de destilação requerido, os seus custos de investimento resumem-se aos valores presentes na Tabela 8:

Tabela 8- Custo de aquisição de quatro destiladores de 3500 W cada (CI).

Tipo de Equipamento	Unidade	Custo Total (Euros)
Unidade de Destilação	4	2992,79
Total		2992,79

### - Custos de Operação

Na Tabela 9 está apresentado os custos de operação e manutenção deste sistema de destilação.

Tabela 9- Custos anuais de funcionamento dos destiladores (CO).

Serviços Utilizados	Subtotal (Euros)
Água	2436,96
Electricidade	2419,20
Manutenção (5% CI)	149,64
Total	5005,8

**- Custo Actual**

Supondo que o tempo de vida do equipamento é de 8 anos e que a taxa de juro é de 10%, pode-se determinar o custo actual (CA) do equipamento, usando a seguinte relação:

$$\begin{aligned} CA_b &= CI + CO(1+i)^{-n} = 2992,79 + 5005,8 \left[ (1+0,1)^{-1} + \dots + (1+0,1)^{-8} \right] = \\ &= 2992,79 + 5005,8 \frac{1 - (1+0,1)^{-8}}{0,1} = 29698,36 \text{ Euro} \end{aligned}$$

## **Conclusão**

## 7. Conclusão

Este estudo permitiu encontrar uma forma de gerir melhor a quantidade de água e a energia usados neste tipo de equipamentos, de modo que se pode concluir que, para os destiladores existentes actualmente, é necessário recorrer a 4 destiladores com resistências de 3500 W cada para produzir a quantidade de água requerida pelo Departamento, o que levaria a custos muito avultados comparativamente ao custo do equipamento em estudo. Desta forma, a concretização deste projecto é importante, uma vez que permite a redução de gastos financeiros ao departamento, bem como o aproveitamento dos recursos ambientais disponíveis que ele proporciona, permitindo motivar e incentivar a sua aplicação em variadas instituições particulares ou estatais.

O projecto estudado está neste momento em fase de construção, no entanto, quando construído, o equipamento projectado deverá ser operado por um funcionário responsável, que deverá controlar rigorosamente a quantidade de água gasta por cada laboratório, bem como, distribuir esta de acordo com o tipo de pureza da água necessária para cada uso.

Este equipamento não dispensa a realização de manutenções periódicas e de reparação, que deverão estar previstas num *Manual de Operação e Manutenção*, onde deverá ficar registado todos os dados relativos aos fornecedores do equipamento, garantias, avarias, prazos, etc., procedimento que deverá ser realizado quando o equipamento estiver construído e colocado em exploração.

## **Bibliografia**

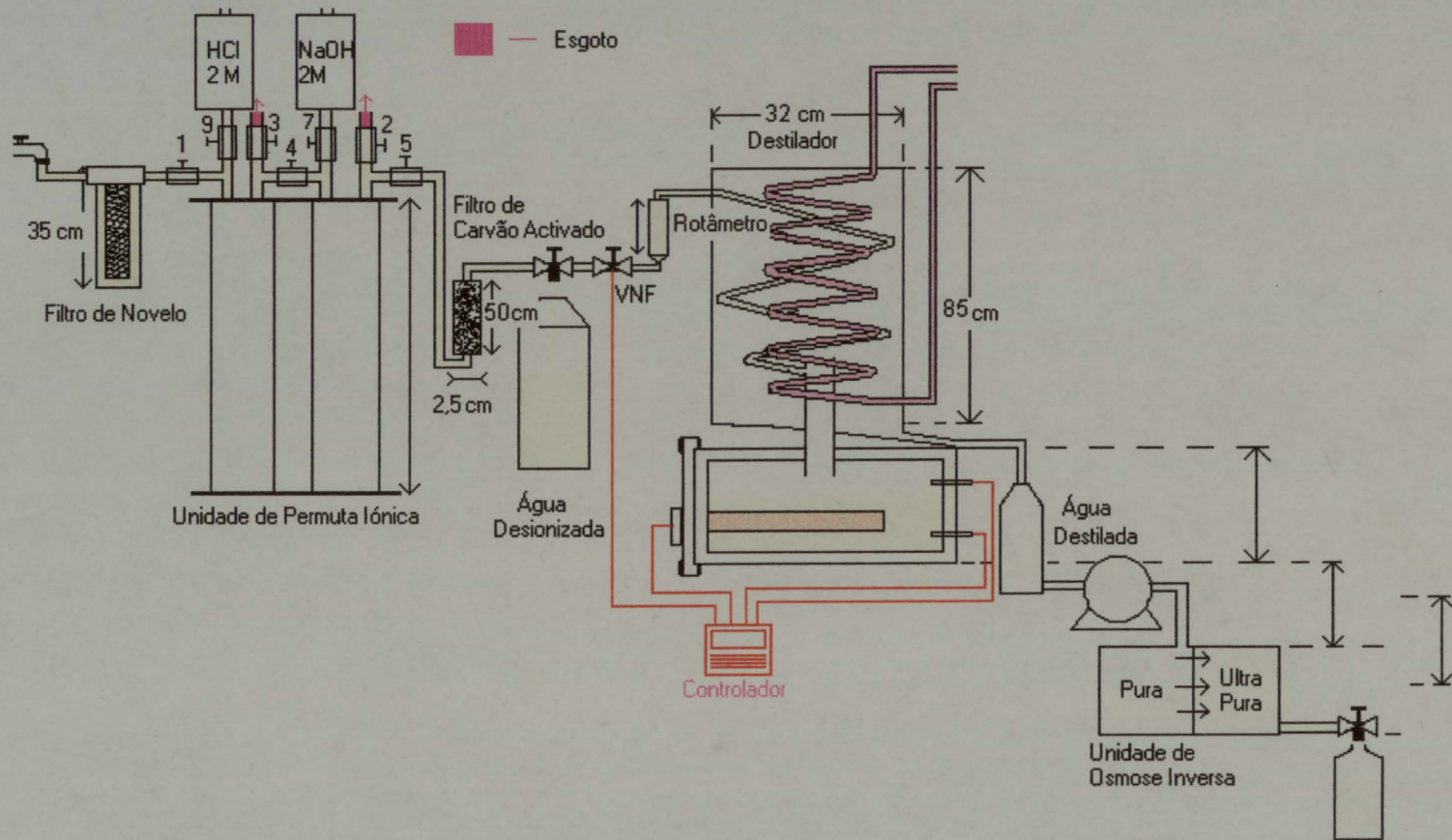
## Bibliografia

- [1] - Perry, Robert H., Green, Don W.; *Perry's Chemical Engineer's Handbook*, 7<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, (1997).
- [2] - Holman, J.P., *Heat Transfer*, 8<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, (1995).
- [3] - Coulson, J. M., *Tecnologia Química*, voll, 3<sup>a</sup> edição, Fundação Calouste Gulbenkian, (1977).
- [4] - Smith, J.M., *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*; 5th ed.
- [5] - Kreith, F., *Princípios da Transmissão de Calor*, Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo, (1969).
- [6] - Coulson & Richardson's, *Chemical Engineering*, Vol. 6, 3th edition, Butterworth Heineman, (1999);
- [7] - McCabe, Warren L., Smith, Julian C., *Unit Operations of Chemical Engineering*, 5th edition, McGraw-Hill, (1993).

## **Anexos**

**Anexo A- Esquema da disposição dos equipamentos**

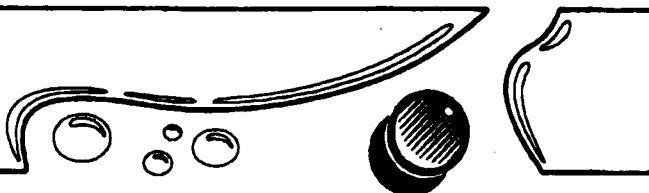




## **Anexo B- Especificações das resinas**



# ION EXCHANGE RESINS



## PRODUCT DATA SHEET

# AMBERLITE IR120 Na

## Industrial Grade Strongly Acidic Cation Exchange Resin

AMBERLITE IR120 Na is a gel type strongly acidic cation exchange resin of the sulphonated polystyrene type. It is used for water softening (in Na<sup>+</sup> form) as well as for water demineralisation (in H<sup>+</sup> form) in co-flow regenerated units. Its principal characteristics are excellent physical, chemical and thermal stability, good ion exchange kinetics and high exchange capacity.

### PROPERTIES

Matrix _____	Styrene divinylbenzene copolymer
Functional groups _____	Sulphonates
Physical form _____	Amber beads
Ionic form as shipped _____	Na <sup>+</sup>
Total exchange capacity <sup>[1]</sup> _____	≥ 2.0 eq/L (Na <sup>+</sup> form)
Moisture holding capacity <sup>[1]</sup> _____	45 to 50 % (Na <sup>+</sup> form)
Shipping weight _____	840 g/L
Specific gravity _____	1.26 to 1.30 (Na <sup>+</sup> form)
Particle size	
Uniformity coefficient _____	≤ 1.9
Harmonic mean size _____	600 to 800 μm
Fine contents <sup>[1]</sup> _____	< 0.300 mm : 2 % max
Maximum reversible swelling _____	Na <sup>+</sup> → H <sup>+</sup> : 11 %
Chemical resistance _____	Insoluble in dilute solutions of acids or bases and common solvents

<sup>[1]</sup> Contractual value  
Test methods available upon request.

### SUGGESTED OPERATING CONDITIONS

Minimum bed depth _____	700 mm
Service flow rate _____	5 to 40 BV*/h
Regenerant _____	HCl            H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NaCl
Level (g/L) _____	50 to 150    60 to 240    80 to 250
Concentration (%) _____	5 to 8        0.7 to 6        10
Flow rate (BV/h) _____	2 to 5        2 to 20        2 to 8
Minimum contact time _____	<u>30 minutes</u>
Slow rinse _____	2 BV at regeneration flow rate
Fast rinse _____	2 to 4BV at service flow rate

\* 1 BV (Bed Volume) = 1 m<sup>3</sup> solution per m<sup>3</sup> resin

## PERFORMANCE

The operating capacity depends on several factors such as the water analysis and the level of regeneration. The data to calculate the operating capacity and the ionic leakage with co-flow regeneration are given in the Engineering Data Sheets : EDS 0262 A, EDS 0264 A and EDS 0265 A.

## LIMITS OF USE

AMBERLITE IR120 Na is suitable for industrial uses. For other specific applications such as pharmaceutical, food processing or potable water applications, it is recommended that all potential users seek advice from Rohm and Haas in order to determine the best resin choice and optimum operating conditions.

## HYDRAULIC CHARACTERISTICS

Figure 1 shows the bed expansion of AMBERLITE IR120 Na, as a function of backwash flow rate and water temperature.

Figure 2 shows the pressure drop data for AMBERLITE IR120 Na, as a function of service flow rate and water temperature. Pressure drop data are valid at the start of the service run with a clear water and a correctly classified bed.

Figure 1

### BED EXPANSION

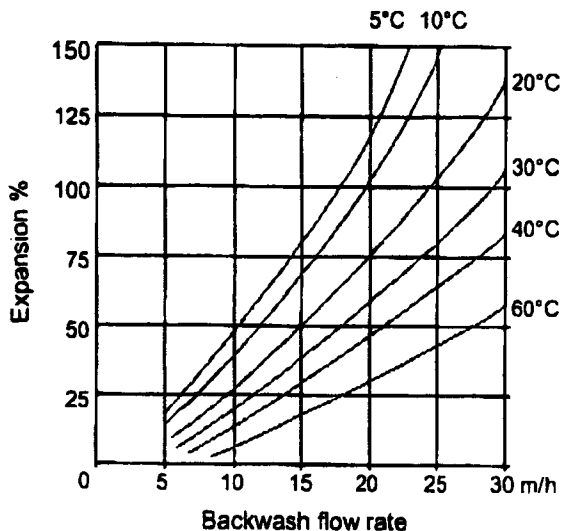
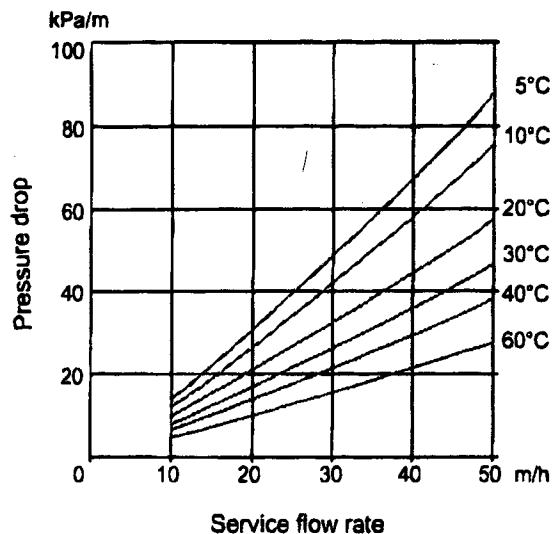


Figure 2

### PRESSURE DROP



In Europe, all our products are produced in ISO 9002 certified manufacturing facilities.

### CAUTION

Ion exchange resins and polymeric adsorbents, as produced, contain by-products resulting from the manufacturing process. The user must determine the extent to which organic by-products must be removed for any particular use and establish techniques to assure that the appropriate level of purity is achieved for that use. The user must ensure compliance with all prudent safety standards and regulatory requirements governing the application. Except where specifically otherwise stated, Rohm and Haas Company does not recommend its ion exchange resins or polymeric adsorbents, as supplied, as being suitable or appropriately pure for any particular use. Consult your Rohm and Haas technical representative for further information. Acidic and basic regenerant solutions are corrosive and should be handled in a manner that will prevent eye and skin contact. Nitric acid and other strong oxidising agents can cause explosive type reactions when mixed with Ion Exchange resins. Proper design of process equipment to prevent rapid buildup of pressure is necessary if use of an oxidising agent such as nitric acid is contemplated. Before using strong oxidising agents in contact with Ion Exchange Resins, consult sources knowledgeable in the handling of these materials.

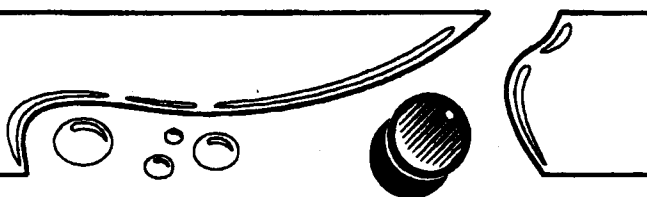
*Rohm and Haas Company makes no warranties either expressed or implied as to the accuracy of appropriateness of this data and expressly excludes any liability upon Rohm and Haas arising out of its use. We recommend that the prospective users determine for themselves the suitability of Rohm and Haas materials and suggestions for any use prior to their adoption. Suggestions for uses of our products of the inclusion of descriptive material from patents and the citation of specific patents in this publication should not be understood as recommending the use of our products in violation of any patent or as permission or license to use any patents of the Rohm and Haas Company. Material Safety Data Sheets outlining the hazards and handling methods for our products are available on request.*

*AMBERLITE is a trademark of Rohm and Haas Company, Philadelphia, U.S.A.*





## ION EXCHANGE RESINS



PRODUCT DATA SHEET

# AMBERLITE IRA402 Cl

## Industrial Grade Strongly Basic Anion Exchanger

AMBERLITE IRA402 Cl is a premium grade strongly basic anion exchange resin of the type 1, with a clear gel structure. It is based on crosslinked polystyrene and has a very high bead integrity, good regeneration efficiency and excellent rinse performance. It is used in co-flow regeneration and conventional counterflow systems with downflow loading and upflow regeneration with air or water holddown. Combined with a strong acid cation exchanger, AMBERLITE IRA402 Cl reduces both strong and weak acid concentrations to extremely low levels. Its main use is therefore water demineralisation. Other fields of application include the treatment of electroplating waste and the isolation of anionic metal complexes.

### PROPERTIES

Matrix _____	Styrene divinylbenzene copolymer
Functional groups _____	-N <sup>+</sup> (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>
Physical form _____	Pale yellow translucent beads
Ionic form as shipped _____	Chloride
Total exchange capacity <sup>11</sup> _____	≥ 1.30 eq/L (Cl <sup>-</sup> form)
Moisture holding capacity <sup>11</sup> _____	49 to 55 % (Cl <sup>-</sup> form)
Specific gravity _____	1.063 to 1.093 (Cl <sup>-</sup> form)
Shipping weight _____	670 g/L
Particle size	
Uniformity coefficient _____	≤ 1.6
Harmonic mean size _____	600 - 750 μm
Fine contents <sup>11</sup> _____	< 0.300 mm : 1.0 % max
Coarse beads _____	> 1.180 mm : 5.0 % max
Maximum reversible swelling _____	Cl <sup>-</sup> → OH <sup>-</sup> : 30 %

<sup>11</sup> Contractual value

Test methods are available on request.

### SUGGESTED OPERATING CONDITIONS

Maximum operating temperature _____	60°C
Minimum bed depth _____	700 mm
Service flow rate _____	5 to 40 BV*/h
Regenerant _____	NaOH
Flow rate _____	2 to 8 BV/h
Concentration _____	2 to 4 %
Level _____	60 to 150 g/L
Minimum contact time _____	30 minutes
Slow rinse _____	2 BV at regeneration flow rate
Fast rinse _____	4 to 8 BV at service flow rate

\* 1 BV (Bed Volume) = 1 m<sup>3</sup> solution per m<sup>3</sup> resin

## HYDRAULIC CHARACTERISTICS

AMBERLITE IRA402 Cl gives a pressure drop of about 13 kPa/m bed depth per 10 m/h at 15°C.

A backwash flow rate of 6.5 m/h gives a bed expansion of about 70 % at 15°C.

Pressure drop data are valid at the start of the service run with a clear water and a correctly classified bed.

## LIMITS OF USE

AMBERLITE IRA402 Cl is suitable for industrial uses. For all other specific applications such as pharmaceutical, food processing or potable water applications, it is recommended that all potential users seek advice from Rohm and Haas in order to determine the best resin choice and optimum operating conditions.

**In Europe, all our products are produced in ISO 9002 certified manufacturing facilities.**

### CAUTION

Ion exchange resins and polymeric adsorbents, as produced, contain by-products resulting from the manufacturing process. The user must determine the extent to which organic by-products must be removed for any particular use and establish techniques to assure that the appropriate level of purity is achieved for that use. The user must ensure compliance with all prudent safety standards and regulatory requirements governing the application. Except where specifically otherwise stated, Rohm and Haas Company does not recommend its ion exchange resins or polymeric adsorbents, as supplied, as being suitable or appropriately pure for any particular use. Consult your Rohm and Haas technical representative for further information. Acidic and basic regenerant solutions are corrosive and should be handled in a manner that will prevent eye and skin contact. Nitric acid and other strong oxidising agents can cause explosive type reactions when mixed with Ion Exchange resins. Proper design of process equipment to prevent rapid buildup of pressure is necessary if use of an oxidising agent such as nitric acid is contemplated. Before using strong oxidising agents in contact with Ion Exchange Resins, consult sources knowledgeable in the handling of these materials.

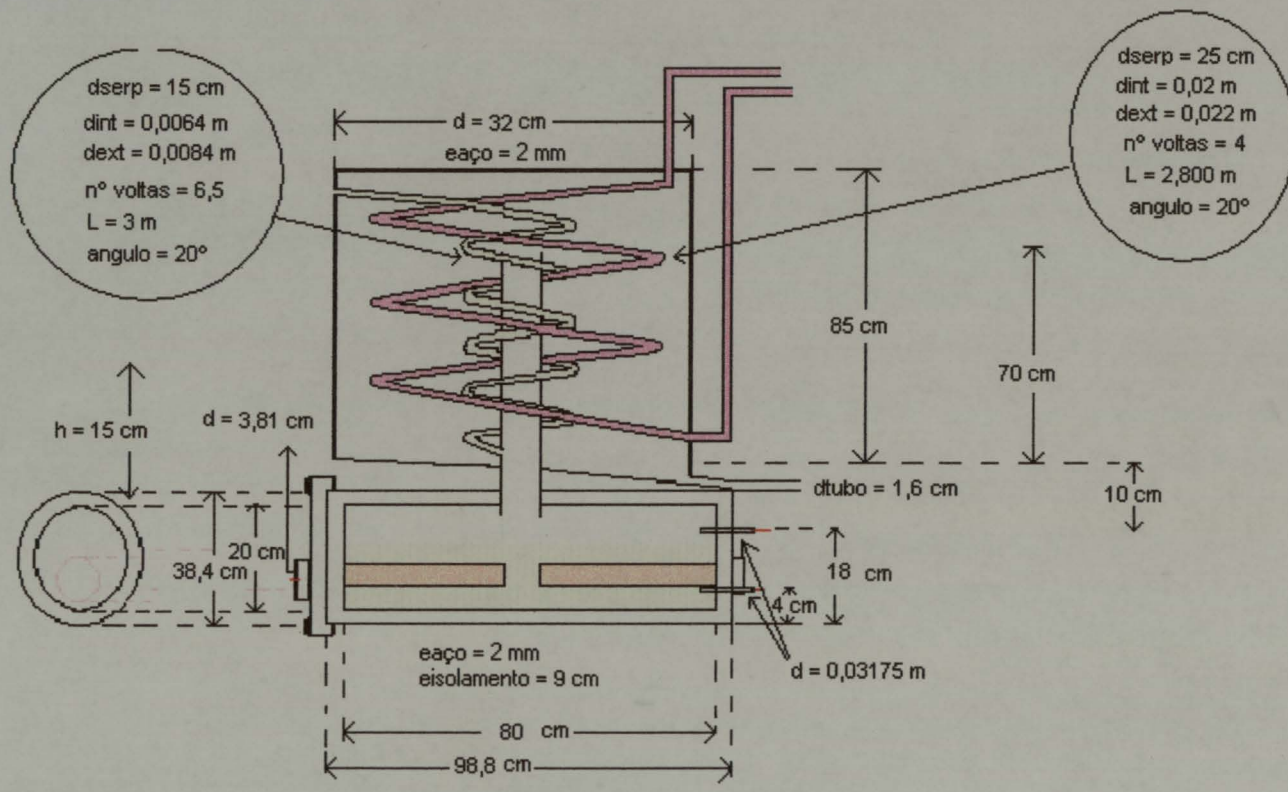
*Rohm and Haas Company makes no warranties either expressed or implied as to the accuracy of appropriateness of this data and expressly excludes any liability upon Rohm and Haas arising out of its use. We recommend that the prospective users determine for themselves the suitability of Rohm and Haas materials and suggestions for any use prior to their adoption. Suggestions for uses of our products of the inclusion of descriptive material from patents and the citation of specific patents in this publication should not be understood as recommending the use of our products in violation of any patent or as permission or license to use any patents of the Rohm and Haas Company. Material Safety Data Sheets, outlining the hazards and handling methods for our products are available on request.*

*AMBERLITE is a trademark of Rohm and Haas Company, Philadelphia, U.S.A.*



Rohm and Haas/Ion Exchange Resins - 75579 Paris Cedex 12 - Tel. (33) 01 40 02 50 00 - Fax : 01 43 45 28 19

## **Anexo C- Dimensões do Sistema de Destilação**







FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



000090169