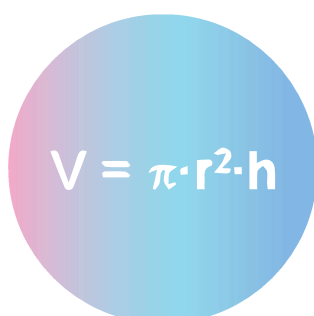


CAPÍTOL 11

MANUAL DE CÀLCUL





PLANTA DE PRODUCCIÓ D'ANILINA

Projecte de Final de Grau en Enginyeria Química

ANILEX CORPORATION

Karen Canales
Àngela Castell
Marta Constantí
Júlia Gavaldà
Mireia Granados

CERDANYOLA DEL VALLÈS, GENER 2017

UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA

ESCOLA D'ENGINYERIA



CAPITOL 11. MANUAL DE CÀLCULS

PLANTA DE PRODUCCIÓ D'ANILINA

CAPÍTOL 11. MANUAL DE CÀLCUL

11.1 TANCS D'EMMAGATZEMATGE I TANCS PULMÓ	6
11.1.1 DISSENY TANCS D'EMMAGATZEMATGE DE FENOL	6
11.1.1.1 REQUERIMENTS I DIMENSIONAMET DELS TANCS	6
11.1.1.2 CÀLCUL PRESSIÓ DE DISSENY	7
11.1.1.3 CÀLCUL TEMPERATURA DE DISSENY	8
11.1.1.4 MATERIAL DE CONTRUCCIÓ	8
11.1.1.5 CÀLCUL ESPESSOR DEL COS CILÍNDRIC.....	9
11.1.1.6 CÀLCUL DE LA PRESSIÓ MÀXIMA COS CILÍNDRIC.....	11
11.1.1.7 DIMENSIONAMENT DEL CAPÇAL SUPERIOR	11
11.1.1.8 CÀLCUL ESPESSOR DEL CAPÇAL SUPERIOR	14
11.1.1.9 CÀLCUL PRESIÓ MAXIMA DE TREBALL CAPÇAL.....	15
11.1.1.10 CÀLCUL GRUIX FONTS PLA	16
11.1.1.11 CALEFACCIÓ DEL TANC.....	16
11.1.1.12 PES DE L'EQUIP	24
11.1.1.13 VENTEIG.....	27
11.1.2 TANC D'EMMAGATZEMATGE D'AMONIAc.....	29
11.1.3 TANC D'EMMAGATZEMATGE DE BENZÈ	32
11.1.4 TANC D'EMMAGATZEMATGE D'ANILINA.....	34
11.1.5 TANC PULMÓ.....	39
11.1.6 CUBETES DE RETENCIÓ.....	42
11.2 DISSENY DEL PACKED BED REACTOR.....	50
11.2.2.BALANÇ D'ENERGIA DEL REACTOR	54
11.2.3.1.PERDUA DE PRESSIÓ	57
11.2.3.DISSENY MECÀNIC DEL REACTOR	59
11.2.3.1.MATERIAL DE CONSTRUCCIÓ	59
11.2.3.2.PRESSIÓ DE DISSENY	60
11.2.3.3.TEMPERATURA DE DISSENY	60
11.2.3.4.GRUIX DE LA VIROLA	60
11.2.3.5. CAPÇALS DEL REACTOR	62
11.2.3.6. TUBS DEL REACTOR	65
11.2.3.7. PLAQUES DE TUBS.....	67
11.2.3.8. PES DEL EQUIP EN BUIT.....	67

11.2.3.9. PES DEL EQUIP AMB FLUID DE PROVA	69
11.2.3.10. PES DEL EQUIP EN OPERACIÓ.....	69
11.2.3.11. AÏLLANT DEL REACTOR	70
11.3 DISSENY DE LES COLUMNES DE SEPARACIÓ	70
11.3.1 INTRODUCCIÓ.....	70
11.3.2 DESTIL·LACIÓ FLASH (V-301)	71
11.3.2.1 DIMENSIONAT V-301.....	72
11.3.3 PURIFICACIÓ FINAL.....	75
11.3.3.1 COLUMNA D'ASSECAT (C-301)	77
11.3.3.2 COLUMNA FLASH V-302	82
11.3.3.3 COLUMNA AL BUIT C-302.....	86
11.3.3.4 COLUMNA AL BUIT C-303.....	97
11.3.3.5 CÀLCUL DEL GRUIX DE L'AÏLLANT (V-301,V-302,C-301,C-302,C-302)	106
11.3.3.6 CÀLCUL DEL PES DE L'EQUIP BUIT I EN OPERACIÓ	108
11.3.3.7 ESTRUCTURA INTERNA I EXTERNA DE LES COLUMNES (C-301,C-302 , C-303,V-301 i V-302)	111
11.4 DISSENY DELS BESCANVIADORS DE CALOR.....	120
11.4.1 PARÀMETRES DE DISSENY A TENIR EN COMPTE PEL MÈTODE KERN	121
11.4.1.1 CIRCULACIÓ DE FLUIDS	122
11.4.1.2 CARACTERÍSTIQUES DELS TUBS.....	122
11.4.1.3 CARACTERÍSTIQUES DE CARCASSA	124
11.4.1.4 VELOCITATS TÍPIQUES DE CIRCULACIÓ	124
11.4.1.5 NÚMERO DE PANTALLES DEFLECTORES I SEPARACIÓ ENTRE ELLES.....	125
11.4.1.6 FACTOR D'EMBRUTIMENT	126
11.4.1.7 PÈRDUES DE PRESSIÓ	126
11.4.2 DISSENY AMB ASPEN EXCHANGER DESIGN AND RATING V 8.4.....	127
11.4.2.1 CARACTERÍSTIQUES DE LA GEOMETRIA DEL BESCANVIADOR	127
11.4.2.2 CARACTERÍSTIQUES DELS CORRENTS.....	128
11.4.2.3 ESPECIFICACIONS DE CODI TEMA	129
11.5 DISSENY DELS COMPRESSORS.....	130
11.6 DISSENY DE LES BOMBES	130
11.7 DISSENY DE CANONADES	135

11.1 TANCS D'EMMAGATZEMATGE I TANCS PULMÓ

Els productes químics principals a emmagatzemar en ANILEX CO. són bàsicament fenol, amoníac i anilina, per un altra banda es dissenyen el tanc pulmó a la sortida del reactor i finalment un emmagatzematge de benzè útil per a la fase de separació. Per tant, per poder fer un disseny mecànic correcte s'utilitza la normativa ASME (American Society of Mechanical Engineers) de disseny de recipients sotmesos a pressió.

11.1.1 DISSENY TANCS D'EMMAGATZEMATGE DE FENOL

L'emmagatzematge del tanc a pressió de fenol treballa en les següents condicions:

Taula11- 1-1: Condicions de treball

Condicions d'emmagatzematge	
Pressió de treball (bar)	1
Temperatura de treball (°C)	45

11.1.1.1 REQUERIMENTS I DIMENSIONAMET DELS TANCS

Per realitzar el disseny dels tancs d'emmagatzematge, cal conèixer el cabal necessari per arribat a la producció mínima de 60000 Tn/any d'anilina, aquesta és de 8.185 Kg/h de fenol.

Tenint en compte que l'empresa proveïdora de fenol es troba en el mateix polígon industrial (Gasos Nobles) que la planta de producció ANILEX CO., i que el subministrament a planta es realitza mitjançant una tubària aïllada, s'emmagatzema el fenol per 4 dies de producció tot i tenint en compte els dies festius i caps de setmana, arribant al volum total per emmagatzemar calculat a continuació.

$$8342 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{m^3}{1060 Kg} \cdot \frac{24h}{1dia} \cdot 4 dies = 755.50 m^3 de fenol$$

Per poder emmagatzemar aquest volum, es necessiten 4 tancs, i cadascun amb un volum de $188.88 m^3$ de fenol.

A continuació, s'estima el diàmetre intern del tanc de fenol, amb l'equació del volum per a un cos cilíndric vertical i la relació geomètrica d'alçada-diàmetre fixat a 2 pels tancs d'emmagatzematge.

$$V_{cilindre} = \frac{\pi}{4} \cdot Di^2 \cdot Hc$$

Equació 11-1-1: Volum cilindre.

$$\frac{Hc}{Di} = 2$$

Equació 11-1-2: Relació geomètrica.

On:

- V cilindre, volum de 188.32 m³ de fenol a emmagatzemar
- Di, diàmetre intern del tanc a calcular (m)
- Hc, alçada del cos cilíndric (m)

$$Di = \sqrt[3]{\frac{V_{cilindre} \cdot 4}{2 \cdot \pi}} = 4.94 \approx 5.0 \text{ metres}$$

Equació 11-1-3: Càlcul diàmetre intern.

Resulta 5 metres de diàmetre intern del tanc de fenol i amb la relació geomètrica s'obté una alçada del cos cilíndric de 10 metres. Aquesta alçada a més, és l'alçada de líquid al tanc del fenol.

A l'apartat 11.1.1.7 es calcula l'alçada total del tanc tenint en compte el capçal superior i estudiant la possibilitat de posar o no l'inferior.

11.1.1.2 CÀLCUL PRESSIÓ DE DISSENY

Per calcular la pressió de disseny a la que s'ha de dimensionar el tanc, la pressió ha de tenir-se en compte les següents pressions:

- Pressió d'operació (Pop): Pressió de treball a la que ha d'operar el tanc amb el seu fluid en condicions d'operació normal. Per tant serà a pressió atmosfèrica.
- Pressió hidrostàtica (ΔP): Pressió que correspon a la pressió que pot arribar a originar el pes del fluid en el tanc.

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 1060 \frac{Kg}{m^3} \cdot 9.81 \frac{m}{s} \cdot 10 m = 102.001 Pa \approx 1 \text{ bar}$$

Equació 11-1-4: Pressió hidrostàtica.

On:

- ρ , la densitat del fenol (Kg/m^3)
- g , la força de la gravetat (9.81 m/s^2)
- h , l'alçada de la columna de líquid (m)

- Pressió de disseny (Pd): Pressió que s'ha de fer servir per al disseny de les parts constructives del recipient que es troba a pressió. Per el seu càlcul s'utilitza les dos pressions anteriorment descrites, més un sobre dimensionament d'un 15%.

$$Pd = Pop + \Delta P + 0.15(Pop + \Delta P)$$

Equació 11-1-5: Pressió de disseny.

Finalment, la pressió utilitzada per el disseny del tanc és de 2.31 bars.

11.1.1.3 CÀLCUL TEMPERATURA DE DISSENY

La temperatura d'operació és la temperatura a la que ha de treballar el tanc en condicions normals, es a dir, 45°C .

El càlcul de la temperatura de disseny té en compte la temperatura d'operació i per motius de seguretat s'afegeix un $\pm 15^\circ\text{C}$, quedant una temperatura de disseny de 60°C .

$$Td = Top \pm 15^\circ\text{C}$$

Equació 11-1-6: Temperatura de disseny

On:

- Td, és la temperatura de disseny ($^\circ\text{C}$)
- Top, és la temperatura d'operació ($^\circ\text{C}$)

11.1.1.4 MATERIAL DE CONTRUCCIÓ

Una bona opció per confeccionar els tancs de fenol és l'acer inoxidable, concretament AISI 304. Aquest és molt aplicable a la indústria química i és molt resistent a temperatures elevades fins els 900°C . A més té una bona resistència mecànica a la tensió i la deformació permanent.

A més, s'ha comprovat addicionalment la seva compatibilitat amb el fenol al 90% de puresa, en la pàgina de l'empresa *Harrington Plastics*, donant:

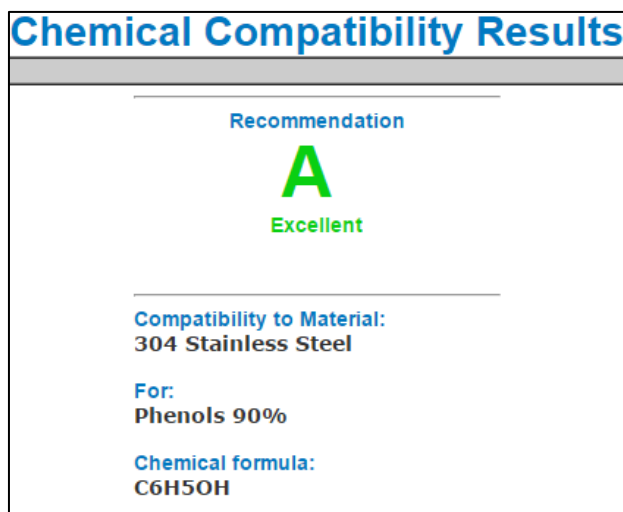


Figura 11-1-1 Compatibilitat material.

Les propietats del material són les següents:

Taula 11-1-2 Propietats a 45°C AISI 304L.

Límit elàstic (bar)	2121,5
$\rho_{\text{AISI 304}}$ (kg/m ³)	7900
$k_{\text{AISI 304}}$ ($\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$)	16

11.1.1.5 CÀLCUL ESPESSOR DEL COS CILÍNDRIC

Per a el càlcul de la paret del tanc d'emmagatzematge és important definir prèviament els següents conceptes.

Límit Elàstic: És el màxim esforç al qual es pot sotmetre el material, i varia segon el material escollit i la temperatura a la que es troba.

Factor de soldadura: Es important que la unió entre les xapes estiguin realitzades amb una soldadura adequada, ja que per el contrari pot crear un greu defecte i la zona soldada es pot veure debilitada i l'estructura pot fallar per fatiga del material o pel

trencament d'unió. Per la realització dels tancs s'ha considerat un factor de soldadura de 0.85, que correspon a un radiografiat parcial.

Gruix per corrosió : En la majoria dels casos al material de construcció se li afegeix un gruix que ha de ser suficient per compensar les pèrdues del gruix de material per corrosió per contacte amb l'ambient, el fluid químic i l'abrasió mecànica que pateix el tanc durant la vida útil. El factor afegit en el tanc de fenol és de 1 mm.

Tolerància a la fabricació : L'equip pot perdre part del seu gruix a causa de la deformació de la seva curvatura per això, tant al cos cilíndric com el capçal, s'afegeix una tolerància de fabricació de 1mm.

Obtingut els paràmetres anteriors, es procedeix a calcular el gruix del cos cilíndric del tanc amb el codi ASME on regeix l'esforç de costura longitudinal.

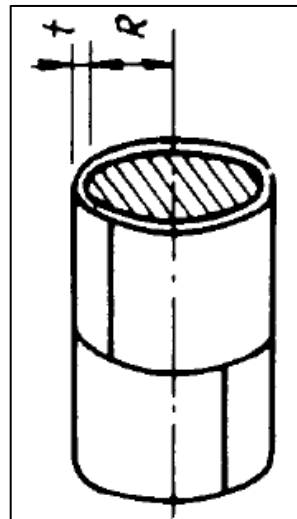


Figura 11-1-2 Casc cilíndric del tanc.

S'escull la formula expressada en funció del diàmetre intern:

$$t = \frac{Pd R}{SE - 0.6P} + C_1 + C_2$$

Equació 11-1-7: Càlcul gruix casc cilíndric.

On:

- t , espessor de la paret (mm)
- P_d , pressió de disseny (bar)
- R , radi intern (mm)
- S , esforç del material (bar)
- E , eficiència de soldadura (0.85)
- C_1 , gruix per corrosió (mm)
- C_2 , tolerància de fabricació (mm)

El gruix obtingut per a la paret del tanc és de 5mm.

11.1.1.6 CÀLCUL DE LA PRESSIÓ MÀXIMA COS CILÍNDRIC

La pressió màxima de treball, coneguda en anglès com “*Maximum Allowance Working Pressure*”, s’obté aïllant la pressió de l’equació 11-6.

$$MAWP_{CILINDRE} = \frac{SEt}{R + 0.6t}$$

Equació 11-1-8: Màxima pressió del cos cilíndric.

El càlcul de l’equació, per al cos cilíndric, s’obté una pressió de treball màxima de 3,78 bar.

11.1.1.7 DIMENSIONAMENT DEL CAPÇAL SUPERIOR

El capçal escollit per aquest tanc és el toriesfèric (o també conegut com Klöppler) per el seu baix cost i per la seva característica que el radi de L (R) es aproximadament el diàmetre intern del tanc, a més de ser àmpliament utilitzat industrialment.

Per poder dimensionar-lo s’escull el catàleg del proveïdor “*Tecnofondi*” on s’agafen les equacions de capçal toriesfèric corresponents per calcular-ho.

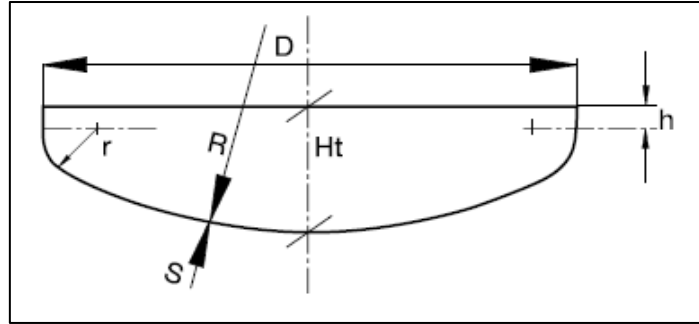


Figura 11-1-3 Capçal toricsfèric.

$$Ht = D \cdot 0.194 + h + s$$

Equació 11-1-9

$$D = 320 \div 5000$$

Equació 11-1-10

$$R = D$$

Equació 11-1-11

$$r = \frac{D}{10}$$

Equació 11-1-12

$$h = 5 \cdot s$$

Equació 11-1-13

$$s = 3 \div 32$$

Equació 11-1-14

Per el càlcul del volum:

$$Vt = 0.0892 \cdot Di^3$$

Equació 11-1-15

On:

- Ht, alçada total del capçal (mm)
- D, diàmetre intern (mm)
- R, radi toriesfèric (mm)
- r, radi dels extrems toriesfèrics (mm)
- h, alçada brida recta (mm)
- s, espessor casc (mm)
- Vt, volum capçal (m^3)

S'obtenen les dimensions següents:

Taula 11-1-3 Dimensions capçal.

Capçal toriesfèric	
Di (mm)	5000
R (L) (mm)	5000
r (mm)	500
Vt (m^3)	10,52
Ht (mm)	1.018
h (mm)	40
s (mm)	8

Cal dir, que la resolució dels tres últims paràmetres, de l'alçada total del capçal, l'alçada de la brida recta i l'espessor, es resol quan s'ha trobat el valor de l'espessor del capçal toriesfèric calculat a l'apartat 11.1.1.8.

11.1.1.8 CàLCUL ESPESSOR DEL CAPÇAL SUPERIOR

Per escollir l'expressió adequada en el càlcul de l'espessor del capçal toriesfèric, es té en compte les següents relacions:

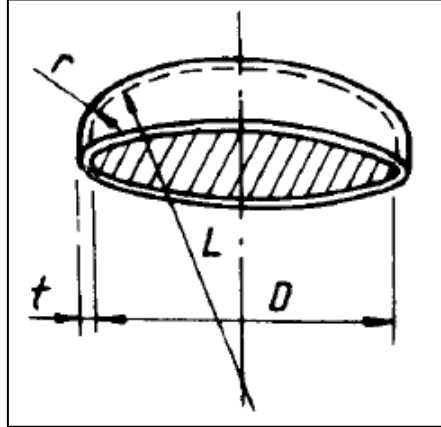


Figura 11-1-16: Capçal toriesfèric superior.

$$\text{Si } \frac{L}{r} = 16 \frac{2}{3} \quad t = \frac{0.085PdL}{SE - 0.1P} + C_1 + C_2$$

Equació 11-1-17: Càlcul espessor capçal.

$$\text{Si } \frac{L}{r} < 16 \frac{2}{3} \quad t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P} + C_1 + C_2$$

Equació 11-1-18: Càlcul espessor capçal.

On:

- M, factor tabulat

Al tanc de fenol, la relació $\frac{L}{r} = 10$ per tant s'escull l'equació 11-15 per el càlcul del gruix. El càlcul dona un gruix de capçal de 7.71 mm, es a dir, que s'escull una xapa de 8mm.

Amb els valors obtinguts anteriorment s'estima l'alçada del tanc amb l'equació 11-17 a un total de 11 metres.

$$H_T = H_t + H_c$$

Equació 11-1-19: Càlcul alçada total.

On:

- H_T , alçada total tanc
- H_t , alçada toriesfèric (m)
- H_c , alçada del cilindre (m)

Per considerar l'opció d'afegir un altre capçal inferior toriesfèric, es procedeix a calcular el percentatge de líquid ocupat al tanc.

$$Vocupat(\%) = 1 - \frac{V_{total} - V_{líquid}}{V_{total}} \cdot 100$$

Equació 11-1-20: Càlcul % volum ocupat.

Sent:

- $Vocupat$ (%)
- V_{total} , 195,84 m³
- $V_{líquid}$, 185,32 m³

Fet el càlcul, s'obté un 92,66 % d'ocupació de líquid al tanc, considerant un percentatge suficient per no afegir un altre capçal toriesfèric i, optant per un fons pla.

11.1.1.9 CÀLCUL PRESSIÓ MÀXIMA DE TREBALL CAPÇAL

Per el càlcul de la pressió màxima permesa del capçal, es procedeix igual que per el càlcul del cilindre de l'apartat 11.1.1.6.

$$MAWP_{TORIESFERIC} = \frac{SEt}{0.855L + 0.1t}$$

Equació 11-1-21: Pressió màxima de treball.

Fet el càlcul s'obté una pressió de treball màxima del toriesfèric de 3.12 bar.

11.1.1.10 CÀLCUL GRUIX FONS PLA

Tenint en compte que és un tanc fixe i que el fons pla tindrà com a suport una base de formigó, es considera que el gruix de la base és la mateixa que la del cos cilíndric més un sobreessor de 1mm. Aquesta expressió s'emptra únicament per el gruix inferior pla.

$$t = 5 + C_1 = 6 \text{ mm}$$

Equació 11-1-22: Fons pla.

11.1.1.11 CALEFACCIÓ DEL TANC

Per mantenir el fenol en estat líquid i a la temperatura d'operació de 45°C es convenient afegir al tanc un sistema de calefacció, a més es important afegir-lo perquè sota dels 40,5°C (temperatura de solidificació) el fenol es solidifica i pot crear un greu problema com la parada de la producció, ocasionant danys a la instal·lació i els equips.

Tenint això en compte, ha de calcular-se principalment les pèrdues de calor de l'equip per convecció natural i sense sistema de calefacció, per això es calcula els coeficients individuals de transmissió de calor vàlid per aire, aigua i líquids orgànics trobat a la bibliografia (Perry's).

$$h = b (\Delta T)^m L^{3m-1}$$

Equació 11-1-23: Coeficient individual de transmissió de calor.

On:

- h, coeficient individual ($W/m^2\text{°C}$)
- ΔT , increment de temperatura (°C)
- L, alçada de líquid al tanc (m)
- m, coeficient tabulat (Perry's)
- b, coeficient (Perry's)

Es considera que el fenol ha d'estar a la temperatura de 45°C i s'escull un entorn molt desfavorable de -9°C, una temperatura recollida del Capítol 1 Especificacions a l'apartat 1.1.3.3 Característiques del medi físic de Tarragona, on és mostra que és la temperatura mínima registrada i, obtenint així un salt tèrmic de 54 °C. Per tant es

calcula el coeficient de calor per convecció del fenol i de l'aire que envolta el tanc, obtenint així els següents resultats.

Taula 11-1-4: coeficient individual fenol i aire.

Fenol		Aire	
b	59	b	1.24
m	0.25	m	0.33
L (m)	10.14	L (m)	10.14
ΔT (°C)	54	ΔT (°C)	54
h (W/m²°C)	90.0	h (W/m²°C)	5.0

Conseqüentment, es procedeix a calcular la calor perduda sense aïllant, tenint en compte la següent representació geomètrica del tanc.

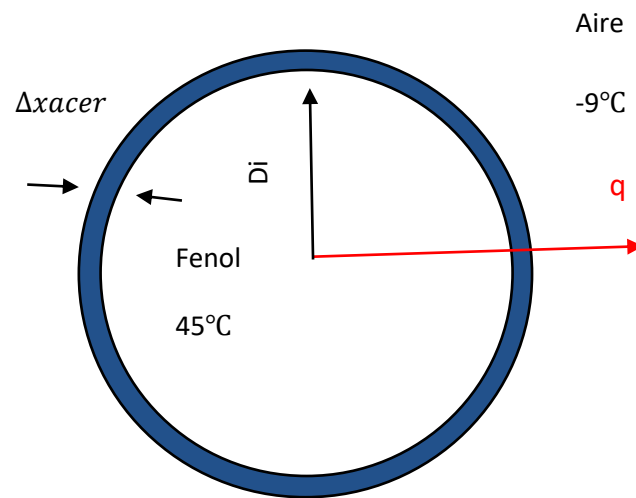


Figura 11-1-4: Transmissió de calor del tanc de fenol.

On:

- Δx_{acer} , es el gruix de l'acer (m)
- D_i , diàmetre (m)
- q , flux de calor (J/s·superfície)

Amb l'equació 11-22, s'obté el cabal de calor del tanc per convecció natural.

$$Q = \frac{\Delta T}{\left(\frac{1}{UA}\right)}$$

Equació 11-1-24: Càlcul cabal de calor.

Desenvolupament:

$$Q = \frac{(T_{fenol} - T_{aire})}{\left(\frac{1}{h_{fenol} \cdot A} + \frac{\Delta x_{acer}}{k_{acer} \cdot A_{ml}} + \frac{1}{h_{aire} \cdot A}\right)}$$

$$Q = \frac{(T_{fenol} - T_{aire})}{\left(\frac{1}{h_{fenol} \cdot \pi D_i L} + \frac{\Delta x_{acer}}{k_{acer} \cdot \frac{2\pi L \Delta x_{acer}}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}} + \frac{1}{h_{aire} \cdot \pi D_e L}\right)}$$

On:

- Q , cabal de calor (J/s)
- U , coeficient global de transmissió de calor ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- h_{fenol} , coeficient individual ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- h_{aire} , coeficient individual ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- k_{acer} , conductivitat tèrmica del material AISI 304 ($16 W/m \text{ } ^\circ C$)
- Δx_{acer} , gruix acer (m)
- Δm_l , àrea mitjana logarítmica
- r_e , radi extern (m)
- r_i , radi intern (m)
- L , longitud (m)
- ΔT ($^\circ C$)
- A , àrea (m^2)

Fent el càlcul pertinent de l'equació 11-22, com a resultat de les pèrdues de calor s'obté un valor de 38.678 J/s, es a dir, 38,678 KJ/s. Sabent la calor perduda es calcula les necessitat de cabal de líquid refrigerant amb el qual s'escalfarà el tanc.

Per fer-ho s'escull un líquid que treballi en un rang de temperatures de 45-100°C, que sigui de fàcil obtenció, econòmic, respectuós amb el medi ambient, elevada calor específica etc. Aquest motiu porta a escollir com a fluid tèrmic, l'aigua.

El càlcul de les necessitats d'aigua amb una temperatura de 70 fins 50 °C es realitza amb l'equació següent:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Equació 11-1-25

$$m = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta T}$$

Equació 11-1-26

On:

- m, cabal màssic d'aigua necessari (Kg/s)
- Q, cabal de calor 38.678 J/s
- ΔT , salt tèrmic de l'aigua (°C)
- C_p , calor específica de l'agua (J/kg°C)

Del càlcul resulta un cabal màssic de 0.46 Kg/s d'aigua, és a dir, un cabal de 1.66 m³/h. A continuació es calcula l'àrea de bescanvi de calefacció de la mitja canya.

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}$$

Equació 11-1-27

Sabent,

- U, coeficient global de transmissió de calor (W/m² °C)
- A, àrea de transmissió de calor (m²)
- ΔT_{ml} , temperatura mitjana logarítmica (°C)

Per el valor del coeficient global, s'escull un valor típic per tancs encamisats de "engineering page", tenint en compte que es tracta d'aigua i un líquid orgànic, el valor oscil·la entre 200-300 W/m² °C). S'escull el valor de 200 W/m² °C.

Variació temperatura de l'aigua.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_s - T_e)}{\ln\left(\frac{T_s - T_f}{T_e - T_f}\right)}$$

Equació 11-28

On:

- T_s , temperatura de sortida de l'aigua (47°C)
- T_e , temperatura d'entrada de l'aigua (70°C)
- T_f , temperatura que es vol mantenir el fenol (45°C)

Llavors,

$$\Delta T_{ml} = \frac{(47 - 70)}{\ln\left(\frac{70 - 45}{47 - 45}\right)} = 9.10^\circ\text{C}$$

Per tant, el càlcul de l'àrea total necessària és de 21.24 m^2 de mitja canya.

Fixant una velocitat de 3 m/s de l'aigua que mantindrà el fenol a la temperatura d'operació, es troba secció hidràulica de la canya amb l'equació 11-27.

$$v = \frac{m}{\text{Secció}}$$

Equació 11-29

Sabent,

- m , cabal d'aigua necessària
- v , velocitat típica
- $\text{secció} = \frac{\pi}{4} D_i^2$

El resultat és d'una secció de 0.00015 m^2 , fent el càlcul adient s'obté un diàmetre intern de mitja canya de 0.015m, arrodonint cap a un diàmetre de 0.02m. Per tant correspon a un DN 20 mm, amb diàmetre extern de 26,67 mm.

A partir d'això s'estima l'àrea d'intercanvi d'una volta o espiral de la mitja canya utilitzant el diàmetre del tanc de 5 metres i el de la mitja canya.

$$A_{\text{espira}} = \pi \cdot Dt \cdot Dmc = 0.22 \text{ m}^2$$

Equació 11-1-30

On,

- Dt, diàmetre del tanc (5m)
- Dmc, diàmetre mitja canya (m)

Per saber el nombre d'espises necessàries es divideix l'àrea total necessària entre l'àrea d'una espira.

$$N_{\text{espira}} = \frac{A}{A_{\text{espira}}}$$

Equació 11-1-31

Resulta 98.24 espises per escalfar el tanc de fenol fins l'alçada de 10 metres, perquè només interessa mantenir la temperatura del líquid al tanc

Finalment per comprovar que no hi ha problemes d'espai en la disposició de les espises al llarg del tanc, s'aplica la següent expressió.

$$d, \text{espira} = \frac{H_{\text{liquid}} - Dmc \cdot N_{\text{espira}}}{N_{\text{espira}} - 1} = \frac{10 \text{ m} - 0.015 \text{ m} \cdot 98.24}{98.24 - 1} = 0.08 \text{ m}$$

Equació 11-1-32

Per tant, no hi hauran problemes d'espai pel que fa referència a les espises.

Calculat les pèrdues de calor i les necessitats de calefacció del tanc per mitja canya, cal aïllar-lo tèrmicament perquè es pugui mantenir a la temperatura de 45°C i minimitzar les pèrdues de calor.

El guix necessari es determina a partir de l'equació 11-22, utilitzada per el càlcul de les pèrdues de calor per convecció natural, però tenint en compte la capa d'aïllament. En la figura següent, s'observa una secció transversal del tanc i es diferencien aquestes zones.

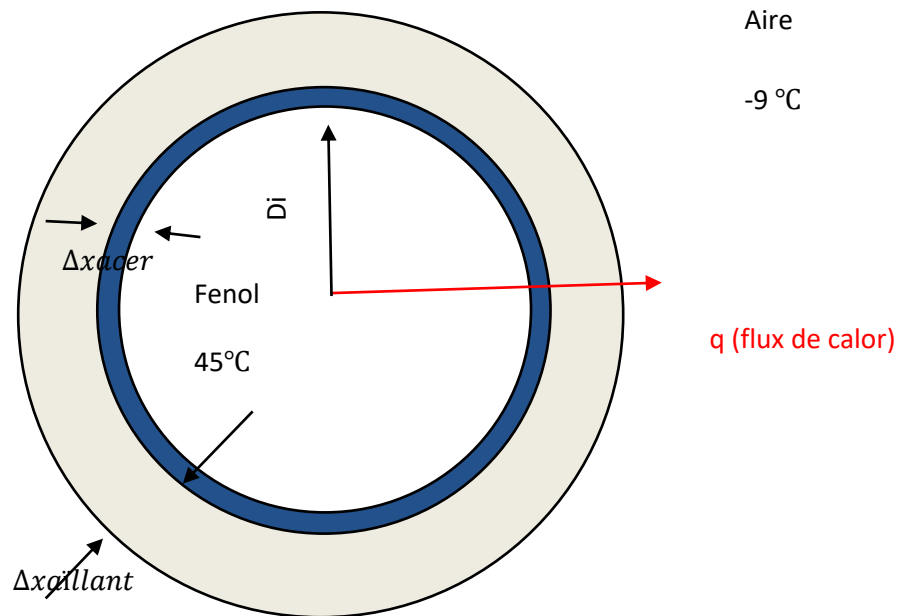


Figura 11-1-5: Transmissió de calor del tanc amb aïllant.

S'hi poden diferenciar tres zones, la primera és el bescanvi de calor que passa entre les parets del tanc (Δx_{acer}), en segon lloc el bescanvi de calor a través de la capa aïllant ($\Delta x_{aillant}$), i per últim la calor que es bescanvia amb l'aire que envolta el tanc.

Com a material aïllant s'utilitza llana de roca perquè es de fàcil instal·lació, aïllant excel·lent contra el fred, la calor i el foc, no genera gasos ni fums tòxics i, aïllant correctament pot reduir-se una energia de més del 50%.

Desenvolupant l'equació 11-1-33, resulta:

$$Q = \frac{(T_{fenol} - T_{aire})}{\left(\frac{1}{h_{fenol} \cdot A} + \frac{\Delta x_{acer}}{k_{acer} \cdot A_{ml}} + \frac{\Delta x_{aillant}}{k_{aillant} \cdot A_{ml}} + \frac{1}{h_{aire} \cdot A} \right)}$$

Equació 11-1-33

$$Q = \frac{(T_{fenol} - T_{aire})}{\left(\frac{1}{h_{fenol} \cdot \pi D_i L} + \frac{\Delta x_{acer}}{k_{acer} \cdot \frac{2\pi L \Delta x_{acer}}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}} + \frac{\Delta x_{aillant}}{k_{aillant} \cdot \frac{2\pi L \Delta x_{aillant}}{\ln\left(\frac{r_{aillant}}{r_e}\right)}} + \frac{1}{h_{aire} \cdot \pi D_{aillant} L} \right)}$$

$$Q' = \frac{(T_{fenol} - T_{aire})}{\left(\frac{1}{h_{fenol} \cdot \pi D_i L} + \frac{1}{k_{acer} \cdot \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}} + \frac{1}{k_{aillant} \cdot \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{r_{aillant}}{r_{ext}}\right)}} + \frac{1}{h_{aire} \cdot \pi \cdot D_{aillant} L} \right)}$$

On

- Q' , cabal de calor intercanviat al sistema amb aillant (kJ/s)
- h_{fenol} , coeficient individual (W/m² °C)
- h_{aire} , coeficient individual (W/m² °C)
- k_{acer} , conductivitat tèrmica del material AISI 304L (W/m °C)
- $k_{aillant}$, conductivitat tèrmica de llana de la roca (W/m °C)
- Δx_{acer} , gruix acer (mm)
- Δm_l , àrea mitjana logarítmica
- L , longitud (m)
- A , àrea (m²)
- r_{ext} , radi extern (m)
- $r_{aillant} = r_{ext} + \Delta x_{aillant}$
- $D_{aillant} = 2(r_{ext} + \Delta x_{aillant})$

Taula 11-1-5: Resultats obtinguts.

Resultats	
k acer (W/m °C)	16
k aillant (W/m °C)	0,045
Q' (kW)	3,84
Δxacer (mm)	5
D aillant (m)	5,08
r aillant (m)	2,54
Δxaillant (m)	0,087
% Reducció calor	90

Es comprova que amb un aïllant de 8.7 cm el bescanvi de calor amb l'exterior es redueix significativament fins un 90% de la calor, i per tant el sistema de calefacció al tanc es considera correcte.

A més, es convenient protegir l'aïllant per poder evitar que el seu gruix disminueixi per efectes ambientals que hi puguin haver i es faci mal be, per aquest motiu s'afegeix un revestiment exterior, en concret una xapa d'alumini perquè es suficientment dúctil per adaptar-se a la forma del tanc i aguanta bé la corrosió. L'espessor d'aquest varia pot variar entre 1-3 mm, segons l'empresa Metalvin S.L. i es col·loca una xapa de 2 mm de gruix.

11.1.1.12 PES DE L'EQUIP

- PES DE L'EQUIP BUIT

Per el càlcul del pes total de l'equip es necessari calcular el pes de l'equip per separat, es a dir, el pes del cilindre, el capçal, el fons i l'aïllament del tanc torisfèric de fons pla. Mitjançant les relacions següents es procedeix al seu càlcul.

Pes del cos cilíndric:

$$Pes_{paret} = A_{anular} \cdot H_{cilindre} \cdot \rho_{material}$$

Equació 11-1-34

On:

$$A_{anular} = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2)$$

Equació 11-1-35

$$H_{cilindre} = H_{total} - H_{toriesfèric}$$

Equació 11-1-36

Obtenint un àrea anular de 0.025 m^2 i coneixent l'alçada del cilindre i la densitat del material de 7900 kg/m^3 , s'obté un pes de 6.144,43 Kg.

Pes del fons pla:

L'expressió corresponen per el càlcul és la següent:

$$Pes_{fons\ pla} = A_{fons} \cdot t_{fons\ pla} \cdot \rho_{material}$$

Equació 11-1-37

Obtenint un pes de 1.143,79 Kg

Pes aïllament:

$$Pes = \frac{\pi}{4} (Gruix_{aïllant}) \cdot Ht \cdot \rho_{llana\ de\ roca}$$

Equació 11-1-38

On:

- Ht , altura tanc (m)
- $\rho_{llana\ de\ roca} = 70 \text{ Kg/m}^3$

Obtenint un pes total de 4,51 Kg.

Pes capçal toriesfèric:

Per calcular el pes del capçal, es necessari calcular el volum d'aquest.

$$V_{toriesfèric} = (0.08918 \cdot De^3 - 0.08918 \cdot Di^3)$$

Equació 11-1-39

On:

- $V_{toriesfèric}$, volum en m^3

- De, diàmetre extern del toriesfèric (m) $\rightarrow De = Di + 2t_{toriesfèric}$
- Di, diàmetre intern (m)

Calculat el volum, amb un valor de 0.099 m^3 , es pot calcular el pes.

$$Pes \text{ toriesfèric} = V_{toriesfèric} \cdot \rho_{material}$$

Equació 11-1-40

El pes obtingut correspon al de 781,682 Kg. La suma de totes les parts dona com a resultat 8.074,41 Kg de tanc de fenol.

- PES DE L'EQUIP EN CONDICIONS DE PROVA

Quan s'especifica un equip es recomanable especificar l'equip en les condicions de prova, es a dir, amb aigua ja que quan es posa en marxa un equip i/o el procés en general es convenient efectuar-ho amb aigua i observar com es comporta l'equip.

Per aquest motiu, es calcula el pes en aquestes condicions amb la següent equació.

$$Pes \text{ equip aigua} = Pe_{equip} + Va_{igua} \cdot \rho_{aigua}$$

Equació 11-1-41

Sabent:

$$Va_{igua} = \frac{\pi}{4} \cdot Di^2 \cdot h_{liquid}$$

Equació 11-1-42

On h_{liquid} , és l'alçada de líquid al tanc, i amb la densitat de l'aigua de 1.000 Kg/m^3 s'obté un pes de 193,40 Kg de pes en condicions de prova.

- PES DE L'EQUIP EN CONDICION D'OPERACIÓ

En aquest cas es similar al càlcul del l'equip en condicions de prova, amb la diferència que en condicions d'operació el tanc d'emmagatzematge contindrà el fenol al 100% de puresa amb el que s'obtindrà el producte d'interès, es a dir, l'anilina.

Per tant:

$$Pes\ d'operació = Pequip + V_{fenol} \cdot \rho_{fenol}$$

Equació 11-1-43

Amb la densitat de 1.060 Kg/m³ de fenol, s'obté un pes de 204.514,41 Kg de pes en condicions d'operació.

11.1.1.13 VENTEIG

L'ús de tancs i recipients de volums fixos per emmagatzemar líquids inflamables i combustibles, pot crear una situació de perill. Per això els tancs han de ser equipats amb un dispositiu de venteig. Pot donar-se venteig normal, sent les operacions diàries com els canvis de nivell de líquid al tanc per l'acció d'omplir-los o buidar-los o bé els canvis de temperatura durant el dia. El venteig d'emergència, es dona quan el líquid i els vapors del tanc s'exposen a un incendi extern, i cal evitar un augment de pressió dins del tanc.

A continuació es calcula la capacitat de venteig.

Superfície humida del tanc:

$$A_{HUMIDA} = \pi \cdot Di \cdot h_{TANC}$$

Equació 11-1-44

- Di, diàmetre intern (m)
- Htanc, alçada del tanc (m)
- Ahumida (m²)
- Calor rebut en cas de foc extern:

$$Q_{FOC} = 139.7 \cdot F \cdot A_{HUMIDA}^{0.82} \cdot 10^3$$

Equació 11-1-45

- Qfoc, (KJ/h)
- F, El factor de reducció és la unitat.
- Capacitat de venteig:

$$C_{VENTEIG} = \frac{4,414 \cdot Q_{FOC}}{\lambda_{vap} \cdot \sqrt{PM_{COMPOST}}}$$

Equació 11-1-46

λ_{vap} , capacitat calorífica d'evaporació (485,0 KJ/Kg)

$PM_{compost}$, pes molecular del fenol. (94,11 Kg/Kmol)

A la taula següent es mostren els resultats del venteig.

Taula 11-1-6: Resultats venteig.

A_{HUMIDA} (m²)	166,82
Q_{FOC} (KJ/h)	9,278+E6
C_{VENTEIG} (m³/h)	8.702,14

11.1.2 TANC D'EMMAGATZEMATGE D'AMONIAC

L'amoníac és necessari com a matèria primera de la producció d'anilina i per això l'emmagatzematge del tanc ha de treballar en les condicions que permetin un bon emmagatzematge.

Taula 11-1-7: Condicions de treball.

Condicions d'emmagatzematge	
Pressió de treball (bar)	2
Temperatura de treball (°C)	-33

En aquestes condicions l'amoníac s'emmagatzema com gas líquid a pressió i en una condició de temperatura de -33 °C, per això s'escull que el tanc estigui emmagatzemat en un tanc criogènic en disposició vertical.

El tanc criogènic està dissenyat per l'emmagatzematge i el transport del gas líquid a temperatures sota 0, i és un equip compacte de geometria cilíndrica de doble paret on l'espai anular de la cara interna i externa està compost per un material aïllant, concretament llana de vidre, i sotmès a pressió al buit per aconseguir minimitzar les pèrdues per evaporació.

A l'igual que el fenol, és necessari conèixer el caudal volumètric de l'amoníac per arribar a la productivitat mínima de 60.000 Tn/any. Partint del caudal màssic de 174,2 Kg/h i la densitat en les condicions d'emmagatzematge, s'obté el caudal volumètric per dia.

$$174,2 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{m^3}{673,1 Kg} \cdot \frac{24 h}{1 dia} = 6,21 m^3/dia$$

Amb aquest volum es pot fer una primera aproximació dels camions necessaris, suposant que aquest es de 10 m³.

$$6,21 \frac{m^3}{dia} \cdot \frac{camió}{10 m^3} = 0,62 \frac{camions}{dia} \approx 1 camió$$

Escollint els dies d'estoc de 4 i sabent que es necessita només un tanc, s'emmagatzema un volum total de 24,85 m³, aproximant-ho a un volum de 25 m³ d'amoníac.

Aplicant les equacions 11-1 de volum d'un cos cilíndric, i 11-2 de la relació de diàmetre/alçada fixat de 2, s'obté un diàmetre intern de 2,51 m i 5,02 m d'alçada, els resultats s'aproximen als següents valors.

Taula 11-1-8: Dimensions cos cilíndric.

Diàmetre intern (m)	3
Alçada cilindre (m)	5

Aquets valors permeten fer una aproximació del tanc necessari per el correcte emmagatzematge de l'amoníac.

Les característiques del tanc venen determinades pel seu distribuïdor, l'empresa *AJA de Iliça, S.L.*, per lo que no es detallaran els càlculs de disseny d'aquest tanc, i només es mostren les especificacions.

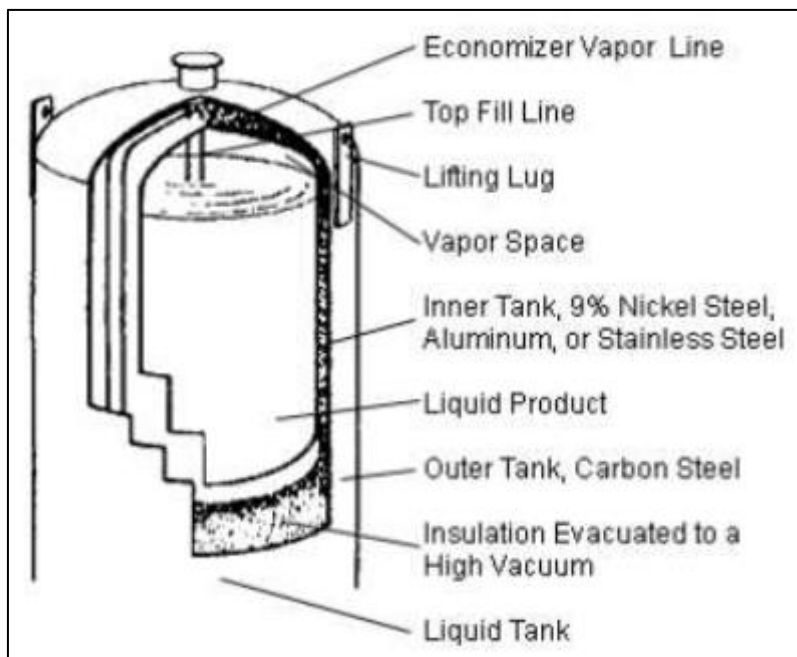


Figura 11-1-6: Esquema tanc criogènic.

Taula 11-1-9: Especificació tanc d'amoníac.

Pressió disseny (bar)	2,7
Temperatura disseny (°C)	-48
Capacitat (m³)	30

Fons superior	Klöppler
Fons inferior	Klöppler
Suport	3 potes
Gruix viroles (mm)	5
Gruix capçal toriesfèric superior (mm)	5
Gruix capçal toriesfèric inferior (mm)	5
Gruix Aïllant (mm)	60
Alçada equip (m)	6
Pes de l'equip buit (Kg)	2.594
Material equip exterior	AISI 304
Material equip interior (en contacte amb l'amoníac)	AISI 3016
Material d'aïllament	Llana de vidre
1 Boca d'homes	DN 500

Saben la densitat de l'aigua i l'amoníac en les condicions d'operació, es pot aproximar els pesos en condicions de prova i en les condicions d'operació.

Taula 11-1-10: Pes de l'equip.

ρ aigua (Kg/m³)	1000
ρ amoníac (Kg/m³)	673,1
Pes condicions de prova (Kg)	27.440
Pes condicions d'operació (Kg)	19.318

Pel càlcul del venteig, segueix el mateix mètode de càlcul que l'apartat 11.1.1.13 del fenol.

Taula 11-1-11: Venteig.

A humida (m²)	47,12
Q foc (KJ/h)	3,290E+6
PM d'amoníac (Kg/Kmol)	17,03
λ_{vap} (KJ/Kg)	1.372
C. Venteig (m³/h)	2.565,22

11.1.3 TANC D'EMMAGATZEMATGE DE BENZÈ

En Anilex CO. el benzè, a més de ser tòxic com altres productes químics, es fa servir en la planta de producció per la seva propietat de ser insoluble amb aigua.

Taula 11-1-12: Condicions de treball.

Pressió de treball (bar)	1
Temperatura de treball (°C)	70

Pel disseny del tanc d'emmagatzematge de benzè s'escull un tanc vertical amb capçal toriesfèric i un fons inferior pla. Així doncs, pel disseny mecànic d'aquest tanc s'ha utilitzat el codi ASME.

A continuació, i del volum necessari a emmagatzemar per 4 dies d'estoc partint del caudal màssic de 1.562 Kg/h.

$$1.562 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{m^3}{822,5 Kg} \cdot \frac{24 h}{1 dia} \cdot 4 dies = 182,31 m^3$$

Per l'emmagatzematge d'aquest volum només serà necessari un tanc, per tant amb l'equació 11-1 i 11-2, es calcula el diàmetre intern i l'alçada de líquid al tanc. Pel càlcul de les dimensions del capçal toriesfèric es fa servir les equacions de l'apartat 11.1.1.8, obtenint així les següents dimensions del tanc i el volum total.

Taula 11-1-13: Dimensions tanc.

Diàmetre intern (m)	5
Alçada cos cilíndric (m)	10
Alçada toriesfèric (m)	1
Alçada total (m)	11
Volum tanc (m³)	182,31
Volum toriesfèric (m³)	11,15
Capacitat (m³)	193,46
Volum ocupat	94 %

Per la pressió i temperatura de disseny juntament amb el càlcul dels gruixos, la pressió màxima de treball permesa del tanc, el seu pes i el càlcul de l'aïllant, es fa servir les equacions fetes servir pel tanc de fenol. Obtenint així els següents resultats.

Taula 11-1-13: Gruixos i pes del tanc.

Tipus de tanc	Tanc hemisfèric de fons pla
Aïllat	Si
Temperatura disseny (°C)	85
Pressió disseny (bar)	2,03
Límit elàstic (bar)	2.486,36
Radiografiat	Parcial
Eficàcia soldadura	0.85
C1 (mm)	1
C2 (mm)	1
Gruix cos cilíndric (mm)	5
Gruix capçal torisfèric (mm)	6
Guix fons pla (mm)	6
MAWP cilindre (bar)	4,22
MAWP capçal (bar)	2,86
Calor convecció natural, Q (KJ/s)	66,6
Q' (KJ/s)	0,21
Gruix aïllant (mm)	0,02
Pes equip buit (Kg)	8.402,92
Pes condicions de prova (Kg)	190.715
Pes condicions operació (Kg)	158.355

Fent servir les equacions 11-41 fins 11-43 pel càlcul del venteig.

Taula 11-1-15: Venteig.

$A_{\text{HUMIDA}} \text{ (m}^2\text{)}$	157,07
$Q_{\text{FOC}} \text{ (KJ/h)}$	8,831+E6
$PM \text{ benzè (Kg/Kmol)}$	78,11
$\lambda_{\text{vap}} \text{ (KJ/Kg)}$	395
$C_{\text{VENTEIG}} \text{ (m}^3\text{/h)}$	11.165,97

Pel que fa al material de construcció del tanc, s'escull el material AISI 304 comprovant la seva bona compatibilitat a la pàgina de l'empresa Harrington plàstics.



Figura 11-1-7: Compatibilitat amb el benzè.

11.1.4 TANC D'EMMAGATZEMATGE D'ANILINA

El producte d'Anilex CO. és l'anilina amb una puresa del 99%, emmagatzemat a les següents condicions.

Taula 11-1-14: Condicions de treball.

Condicions d'emmagatzematge	
Pressió de treball (bar)	69,08
Temperatura de treball (°C)	103,2

Prèviament a l'entrega del producte, aquest ha de ser emmagatzemat i dissenyat amb la normativa ASME, per tant es procedeix el mètode explicat al punt 11.1.1, obtenint així els següents resultats.

Taula 11-1-15: Volum, nº tancs i dimensions cos cilíndric.

Cabal màssic (Kg/h)	7.639
Cabal volumètric (m³/dia)	192,72
Capacitat camió (m³/camió)	25
Núm. Camions al dia	8
Stock (dies)	4
Volum de líquid total a emmagatzemar (m³)	770,88
Núm. tancs	2
Volum líquid per tanc (m³)	385,44
Hc/Di	2
Diàmetre intern (m)	6,3
Alçada cos cilíndric (m)	12,5

A continuació, es mostren els paràmetres de disseny tenint en compte un sobre dimensionament d'un 15% per la pressió i un $\pm 15^{\circ}\text{C}$ de temperatura.

Taula 11-1-18: Valors de disseny.

Temperatura de disseny (°C)	118,2
Pressió disseny (bar)	80,7

S'escull un tanc cilíndric vertical amb un fons pla i capçal superior el·lipsoïdal perquè aquest s'utilitza a pressions entre 20-100 bars segons la Bibliografia *Branan's Rules of Thumb for Chemical Engineers*.

Per tant, el càlcul de gruix i el dimensionament es realitza amb les següents equacions.

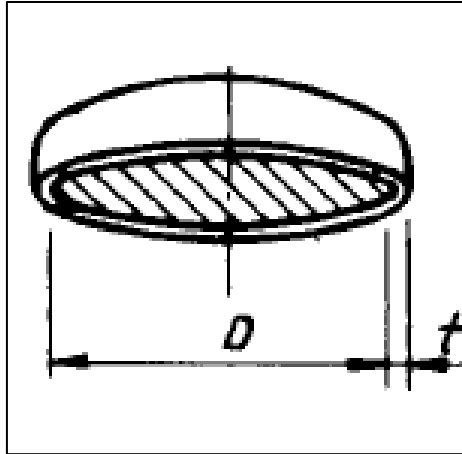


Figura 11-1-8: Capçal superior el·lipsoïdal.

$$H_{el\cdot lipsoïdal} = \frac{D}{4} + (t_{el\cdot lipsoïdal}/1000)$$

Equació 11-1-46: Alçada capçal.

$$V_{el\cdot lipsoïdal} = \pi D^2 H_{el\cdot lipsoïdal} / 6$$

Equació 11-47: Volum capçal.

$$t_{el\cdot lipsoïdal} = \frac{Pd D}{2SE - 0,2Pd} + C_1 + C_2$$

Equació 11-1-48: Càlcul gruix paret.

$$MAWP_{el\cdot lipsoïdal} = \frac{SEt}{R + 0,6t}$$

Equació 11-1-49: Càlcul pressió màxima permesa.

On,

- $H_{el\cdot lipsoïdal}$, és l'alçada del capçal (m)
- $t_{el\cdot lipsoïdal}$, gruix del capçal el·lipsoïdal (mm)
- $MAWP_{el\cdot lipsoïdal}$, màxima pressió de treball permesa (bar)
- Pd , pressió de disseny (bar)

- R, radi intern (mm)
- S, esforç del material (2.196,29 bar)
- E, eficiència de soldadura (1)
- C1, espessor per corrosió (1mm)
- C2, espessor per tolerància de fabricació (1mm)

Els valors de disseny del tanc d'emmagatzematge d'Anilina es mostren a la següent taula.

Taula 11-1-16: Disseny mecànic tanc aniline.

Tipus de tanc	Tanc el·lipsoïdal de fons pla
Aïllat	No
Volum capçal (m^3)	34,53
Volum tanc disseny (m^3)	419,97
Ocupació tanc (%)	92
ρ anilina (kg/m³)	951,3
Límit elàstic (bar)	2.196,29
Radiografiat	Total
Eficàcia soldadura	1
C1 (mm)	1
C2 (mm)	1
Gruix cos cilíndric (mm)	119,68
Gruix capçal hemisfèric (mm)	117,51
Guix fons pla (mm)	120,68
MAWP cilindre (bar)	82,09
MAWP capçal (bar)	82,14
Pes equip buit (Kg)	287.514
Pes condicions de prova (Kg)	672.957
Pes condicions operació (Kg)	654.186
Alçada total (m)	14,2
Alçada capçal (m)	1,7
Alçada cilindre (m)	12,5

Fent servir les equacions **11-41** fins **11-43** pel càlcul del venteig.

Taula 11-1-17: Venteig.

A humida (m^2)	246,27
Q foc (KJ/h)	1,277E+7
PM anilina (Kg/kmol)	93,18
λ vaporització (KJ/Kg)	498
C. Venteig (m^3/h)	11.724,43

Per la construcció del tancs d'anilina, s'utilitza AISI 304 amb la taula de compatibilitats de "Harrington Plastics".

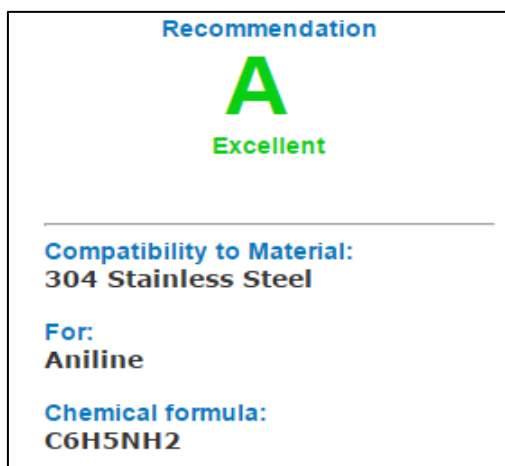


Figura 11-1-8: Compatibilitat amb l'anilina.

11.1.5 TANC PULMÓ

El tanc pulmó es situa a la sortida del reactor, amb la funció d'emmagatzemar els productes de la reacció quan es necessari regenerar el catalitzador.

Per tant aquest tanc pulmó es dissenya en les següents condicions.

Taula 11-1-21: Condicions de treball.

Condicions d'emmagatzematge	
Pressió de treball (bar)	16
Temperatura operació (°C)	385

Per aquest emmagatzematge s'escull un tanc cilíndric vertical amb fons pla i capçal superior torisfèric perquè està el seu rang d'operació es fins a 20 bars pel que fa la bibliografia *Branan's Rules of Thumb for Chemical Engineers*.

Per el càlcul del volum del tanc, es té en compte el temps de residència del reactor més el temps que ha de suportar el tanc pulmó quan es faci el canvi d'uns del reactor en operació per l'altre reactor inactiu. Aquest temps es de pocs segons per tant el temps total que ha de suportar el tanc pulmó serà el següent.

$$t_{operació} = \tau + t_{desviació\ flux} = (1,2 + 5)s = 6,2\ segons$$

Equació 11-1-50

Donat que el caudal de sortida del reactor és de 45.610 Kg/h de productes en fase gas a continuació es calcula el volum necessari a emmagatzemar.

$$45.610 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{m^3}{6,141 Kg} \cdot \frac{1h}{3600s} \cdot 5,2 s = 10,73 m^3$$

Per emmagatzemar aquest volum només és necessari un tanc.

Per els tancs de procés es fixa la relació de diàmetre/alçada a 1,5 (equació 11-1-1), juntament amb l'equació 11-1-2 es calcula les dimensions del tanc i, pel seu disseny mecànic es segueix la normativa de disseny d'ASME seguint el mètode de càlcul de l'apartat 11.1.1 obtenint així els següents resultats.

Dimensionament i tancs necessaris.

Taula 11-1-18: Tancs necessaris i dimensionament.

Núm. tancs	1
Hc/Di	1.5
Diàmetre intern (m)	2,1
Alçada cilindre (m)	3.13

Aquest tanc es refrigera amb el mateix fluid tèrmic que el reactor, per així evitar tenir massa productes químics innecessaris que es puguin barrejar. A més, serà aïllat amb llana de roca per evitar que es refredi els productes de la reacció quan es faci el canvi de flux i pugui seguir el procés en continu. El càlcul de les pèrdues de calor i el càlcul de l'aïllant segueix el mateix mètode de càlcul que l'apartat 11.1.1 , així també com el càlcul mecànic dels seus gruixos.

Taula 11-1-19: Resultats disseny mecànic.

Tipus de tanc	Tanc toriesfèric de fons pla
Volum capçal (m^3)	0,83
Volum tanc disseny (m^3)	11,55
Ocupació tanc (%)	92
ρ gasos (kg/m^3)	6.14
Pressió disseny (bar)	18,40
Temperatura de disseny ($^{\circ}C$)	400
Límit elàstic (bar)	2042,93
Radiografiat	Parcial
Eficàcia soldadura	0.85
C1 (mm)	1
C2 (mm)	1
Gruix cos cilíndric (mm)	13
Gruix capçal toriesfèric (mm)	21,6
Guix fons pla (mm)	14
MAWP cilindre (bar)	21,7
MAWP capçal (bar)	20,2

Pes equip buit (Kg)	2.707
Pes condicions de prova (Kg)	13.435
Pes condicions operació (Kg)	2.772
Alçada total (m)	3,7
Alçada capçal (m)	0.54
Alçada cilindre (m)	3,67

Taula 11-1-20: Pèrdues de calor, mitja canya i aïllament.

h gasos ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)	199,44
h aire ($(W/m^2 \text{ } ^\circ C)$)	4,63
k acer ($W/m \text{ } ^\circ C$)	16
Calor per convecció natural, Q (KJ/s)	38,5
m refrigerant (m^3/h)	3,63
A intercanvi (m^2)	8,33
U ($J/s \text{ } m^2 \text{ } ^\circ C$)	300
$\Delta T m l$	15,42
Velocitat fluid (m/s)	2
A mitja canya (m^2)	0.00049
D_i mitja canya (m)	0.025
A espira (m^2))	0,17
N espira	50
d (m)	0,03
Material aïllament	Llana de roca
k aïllant ($J/s \text{ } m \text{ } k$)	0,045
Gruix aïllant (m)	0,1
Q' (KJ/s)	3,6
Reducció calor (%)	90,5

11.1.6 CUBETES DE RETENCIÓ

- **Cubeta de fenol**

Aquest reactiu és un líquid combustible i segons la norma MIE-APQ-001 es tracta d'un producte químic de classe C. Per tant, com es té un total de 4 tancs aquests s'emmagatzemaran en una sola cubeta.

Segons la normativa, en totes les cubetes els recipients no poden estar disposats en més de dos fileres i és precís que cada fila de recipients tingui una via d'accés que permeti la intervenció d'una brigada de lluita contra incendis.

Per dimensionar la cubeta, s'estableix la seva capacitat segons:

- a) El 100% de la capacitat, referit al recipient major.
- b) El 10% de la capacitat global de tots els recipients.

Aplicant els dos criteris:

- a) Es calcula la capacitat referit al recipient major, però com tots els tancs tenen la mateixa capacitat, es calcula per a un tanc.

$$Capacitat\ cubeta = V_{liquid} = 185,32\ m^3$$

- b) Capacitat segons el 10% del global

$$Capacitat\ cubeta = 0,1 \cdot V_{total} = 0,1 \cdot 741,3\ m^3 = 74,13\ m^3$$

Com el volum més gran obtingut és el del recipient major, la cubeta haurà de tenir una capacitat de $185,32\ m^3$.

Per un altra banda, cal conèixer la distància entre recipients a la que es trobaran els tancs:

$$Clase\ C: Distància\ mínima = 0,3 \cdot Dtanc = 0,3 \cdot 5m = 1,5\ m$$

Aquesta es la distància major, però se li pot aplicat una reducció (0,9 de nivell 1) segons si té una mesura o sistema de protecció.

$$D.\ mínima, p = 1,5m \cdot 0,9 = 1,35\ m$$

Saben que la normativa, estableix una distància entra la paret del recipient i la vora interior de la cubeta és com a mínim un metre. Es mostren les dimensions aproximades de la cubeta.

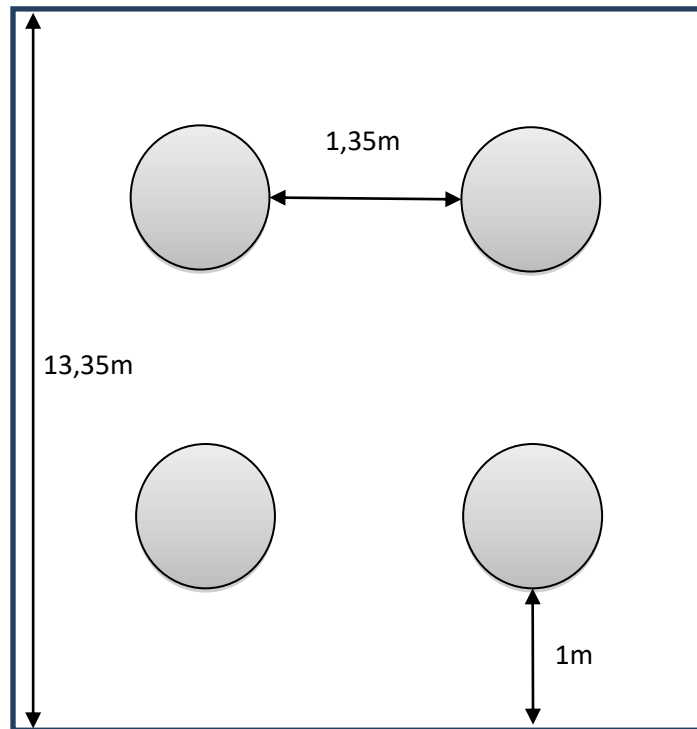


Figura 11-1-9: Cubeta de retenció de fenol.

$$\begin{aligned} \text{Amplada cubeta} &= 2 \cdot d_{\text{cubeta-tanc}} + 2 \cdot D_{\text{tanc}} + D_{\text{mínima},p} \\ &= 2 \cdot 1m + 2 \cdot 5m + 1,35m \end{aligned}$$

$$\text{Amplada cubeta} = 13,35m$$

$$\begin{aligned} \text{Longitud cubeta} &= 2 \cdot d_{\text{cubeta-tanc}} + 2 \cdot D_{\text{tanc}} + D_{\text{mínima},p} \\ &= 2 \cdot 1m + 2 \cdot 5m + 1,35m \end{aligned}$$

$$\text{Longitud cubeta} = 13,35m$$

Sabent les dimensions de la cubeta, es sap l'àrea total d'aquesta.

$$\text{Area} = A \cdot L = 13,35m \cdot 13,35m = 178,22 m^2$$

Seguidament es calcula l'àrea ocupada pels 4 tancs.

$$Area\ ocupada = N \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = 4 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (5m)^2 = 78,54\ m^2$$

A continuació es calcula l'àrea útil en cas que es produeixi un vessament dels producte emmagatzemat.

$$Area\ útil = Area - Area\ ocupada = (178,22 - 78,54)m^2 = 99,68\ m^2$$

Coneguda l'àrea útil, cal calcula l'alçada de la cubeta optima que hauria de tenir la cubeta, més un sobre dimensionament de l'altura 0,15m.

$$hcubeta = \frac{Capacitat\ cubeta}{Àrea\ útil} + 0,15m = \frac{185,32\ m^3}{99,68\ m^2} + 0,15m = 2\ m$$

Finalment, es pot conèixer el volum de la cubeta.

$$Vcubeta = Àrea\ útil \cdot hcubeta = 99,68\ m^2 \cdot 2m = 200,27\ m^3$$

- **Cubeta d'anilina**

A l'igual que el fenol, l'anilina és un líquid combustible i per tant s'emmagatzemen els dos tancs en una mateixa cubeta de retenció seguint el mateix càlcul anterior.

- a) Es calcula la capacitat referit al recipient major, però com tots els tancs tenen la mateixa capacitat es calcula per a un tanc.

$$Capacitat\ cubeta = Vliquid = 385m^3$$

- b) Capacitat segons el 10% del global

$$Capacitat\ cubeta = 0,1 \cdot Vtotal = 0,1 \cdot 770,88\ m^3 = 77,08m^3$$

Com el volum més gran obtingut és el del recipient major, la cubeta haurà de tenir una capacitat de 385 m³

La distància entre els dos tanc ve donat per la normativa APQ-MIE-001 on:

$$Clase\ C: Distància\ mínima = 0,3 \cdot Dtanc = 0,3 \cdot 6,26m = 1,88\ m$$

Tenint en compte que el tanc disposarà d'un sistema de protecció de nivell 1, amb una unitat, el coeficient de reducció correspon a 0,90.

$$D_{\text{mínima},p} = 1,88m \cdot 0,9 = 1,69m$$

Saben que la normativa, estableix una distància entra la paret del recipient i la vora interior de la cubeta és com a mínim un metre, en aquest cas s'aplica una distància de 3 metres . Es mostren les dimensions aproximades de la cubeta.

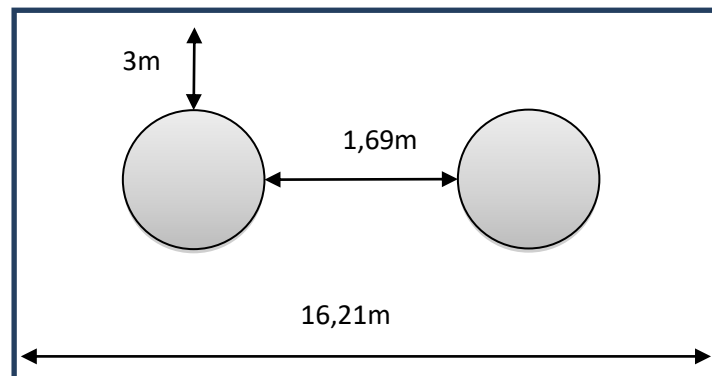


Figura 11-1-10: Cubeta de retenció d'anilina.

$$Amplada\ cubeta = 2 \cdot d_{\text{cubeta-tanc}} + 2 \cdot D_{\text{tanc}} + D_{\text{mínima},p}$$

$$Amplada\ cubeta = 2 \cdot 3m + 2 \cdot 6,26m + 1,69m = 20,21m$$

$$Longitud\ cubeta = 2 \cdot d_{\text{cubeta-tanc}} + 1 \cdot D_{\text{tanc}} = 2 \cdot 3m + 1 \cdot 6,26m = 12,26m$$

Sabent les dimensions de la cubeta, es sap l'àrea total d'aquesta.

$$Area = A \cdot L = 20,21m \cdot 12,26m = 247,80\ m^2$$

Seguidament es calcula l'àrea ocupada pels 4 tancs.

$$Area\ ocupada = N \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (6,26m)^2 = 61,57\ m^2$$

A continuació es calcula l'àrea útil en cas que es produeixi un vessament dels producte emmagatzemat.

$$Area\ útil = Area - Area\ ocupada = (247,80 - 61,57)m^2 = 186,24\ m^2$$

Coneguda l'àrea útil, cal calcula l'alçada de la cubeta optima que hauria de tenir la cubeta, més u

$$hcubeta = \frac{Capacitat\ cubeta}{Àrea\ útil} + 0,15m = \frac{385,44\ m^3}{186,24\ m^2} + 0,15m = 2,22\ m$$

Finalment, es pot conèixer el volum de la cubeta.

$$Vcubeta = Àrea\ útil \cdot hcubeta = 186,24\ m^2 \cdot 2,22m = 413,38\ m^3$$

- **Cubeta de benzè**

Aquest reactiu és altament inflamable i pertany a la categoria B1 de líquids inflamables, de la norma MIE-APQ-001.

- a) Es calcula la capacitat referit al recipient major, però com tots els tancs tenen la mateixa capacitat, es calcula per a un tanc.

$$Capacitat\ cubeta = Vliquid = 182,31\ m^3$$

- b) Capacitat segons el 10% del global

$$Capacitat\ cubeta = 0,1 \cdot Vtotal = 0,1 \cdot 182,31\ m^3 = 18,23m^3$$

Com el volum més gran obtingut és el del recipient major, la cubeta haurà de tenir una capacitat de $182,31\ m^3$.

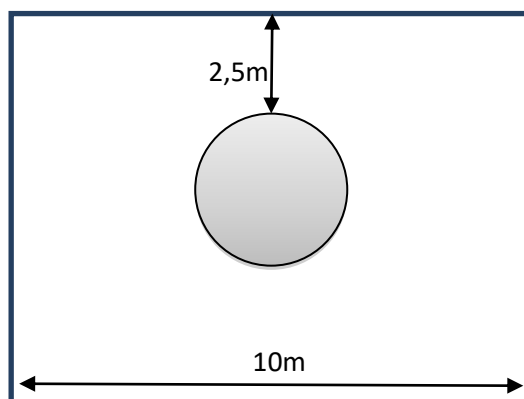


Figura 11-1-11:Cubeta de retenció de benzè.

$$\text{Classe B1} \quad \text{Distància} = 0,5 \cdot Di = 0,5 \cdot 5m = 2,5 m$$

Dimensions de la cubeta

$$\text{Amplada cubeta} = 2 \cdot d_{\text{cubeta-tanc}} + 1 \cdot D_{\text{tanc}} = 2 \cdot 2,5m + 1 \cdot 5m = 10m$$

$$\text{Longitud cubeta} = 2 \cdot d_{\text{cubeta-tanc}} + 1 \cdot D_{\text{tanc}} = 2 \cdot 2,5m + 1 \cdot 5 = 10m$$

Sabent les dimensions de la cubeta, es sap l'àrea total d'aquesta.

$$\text{Àrea cubeta} = A \cdot L = (10 \cdot 10)m = 100m^2$$

Seguidament es calcula l'àrea ocupada pel tanc.

$$\text{Àrea ocupada} = N \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = 1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (5m)^2 = 19,63 m^2$$

A continuació es calcula l'àrea útil en cas que es produeixi un vessament dels producte emmagatzemat.

$$\text{Àrea útil} = \text{Àrea} - \text{Àrea ocupada} = (100 - 19,63)m^2 = 80,37 m^2$$

Coneguda l'àrea útil, cal calcula l'alçada de la cubeta optima que hauria de tenir la cubeta, més útil:

$$h_{\text{cubeta}} = \frac{\text{Capacitat cubeta}}{\text{Àrea útil}} = \frac{182,31 m^3}{80,37 m^2} = 2,27 m$$

Finalment, es pot conèixer el volum de la cubeta.

$$V_{\text{cubeta}} = \text{Àrea útil} \cdot h_{\text{cubeta}} = 80,37 m^2 \cdot 2,25m = 182,31 m^3$$

- **Cubeta de d'amoníac**

El segon reactiu emmagatzemat a Anilex CO. és l'amoníac anhidre classificat com producte químic de classe A1, emmagatzemat en estat líquid a pressió en un tan criogènic.

- c) Es calcula la capacitat referit al recipient major, però com tots els tancs tenen la mateixa capacitat, es calcula per a un tanc.

$$\text{Capacitat cubeta} = V_{\text{liquid}} = 25 m^3$$

d) Capacitat segons el 10% del global

$$Capacitat\ cubeta = 0.5 \cdot V_{total} = 0,5 \cdot 25\ m^3 = 12,5m^3$$

Com el volum més gran obtingut és el del recipient major, la cubeta haurà de tenir una capacitat de $12,5\ m^3$.

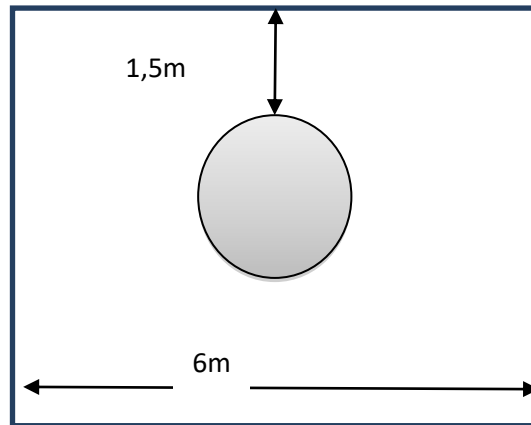


Figura 11-1-12: Cubeta de retenció d'amoníac.

$$Classe\ A1 \quad Distància = 0,5 \cdot Di = 0,5 \cdot 3m = 1,5\ m$$

Dimensions de la cubeta

$$Amplada\ cubeta = 2 \cdot d_{cubeta-tanc} + 1 \cdot D_{tanc} = 2 \cdot 1,5m + 1 \cdot 3m = 6m$$

$$Longitud\ cubeta = 2 \cdot d_{cubeta-tanc} + 1 \cdot D_{tanc} = 2 \cdot 1,5m + 1 \cdot 3m = 6m$$

Sabent les dimensions de la cubeta, es sap l'àrea total d'aquesta.

$$Àrea\ cubeta = A \cdot L = (6 \cdot 6)m = 36m^2$$

Seguidament es calcula l'àrea ocupada pel tanc.

$$Àrea\ ocupada = N \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = 1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (3m)^2 = 7,07\ m^2$$

A continuació es calcula l'àrea útil en cas que es produeixi un vessament dels producte emmagatzemat.

$$Area \text{ útil} = Area - Area \text{ ocupada} = (36 - 7,07)m^2 = 28,93 m^2$$

Coneguda l'àrea útil, cal calcula l'alçada de la cubeta optima que hauria de tenir la cubeta, més útil:

$$hcubeta = \frac{Capacitat \text{ cubeta}}{Àrea \text{ útil}} + 0,15m = \frac{25 m^3}{28,93 m^2} + 0,15 = 1,01 m$$

Finalment, es pot conèixer el volum de la cubeta.

$$Vcubeta = Àrea \text{ útil} \cdot hcubeta = 28,93 m^2 \cdot 1,01m = 29,34 m^3$$

A continuació es mostra una taula amb tots els tancs i dipòsits que necessiten cubeta de retenció.

Taula 11-1-25: Dimensions cubetes de retenció.

Substància	Nº tancs	V _{cubeta} (m ³)	A _{útil} (m ²)	L _{cubeta} (m)	A _{cubeta} (m)	h _{cubeta} (m)
Fenol	4	200	99,68	13,35	13,35	2
Anilina	2	413	186,24	12,26	20,21	2,22
Tanc pulmó	1	-	-	-	-	-
Benzè	1	182	80,37	10	10	2,27
Amoníac	1	29,34	28,93	6	6	1

11.2 DISSENY DEL PACKED BED REACTOR

L'anilina és un compost orgànic que es sintetitza mitjançant una reacció en fase gas catalitzada per un catalitzador sòlid. El fenol i l'amoníac són els dos reactius emprats per donar anilina. El catalitzador triat ha estat l'alúmina, Al_2O_3 . Per aquest motiu, s'ha triat un reactor multitubular de llit fix.

A la planta Anilex CO hi haurà tres reactor multitubulars de llit fix, més coneguts com a PBR (Packed Bed Reactor). La planta treballarà en continu, però degut a l'alta desactivació del catalitzador, caldrà més d'un reactor per mantenir la planta en funcionament, aquest és un dels motius pel que hi haurà més d'un reactor. El segon motiu, és degut a possibles problemes de la planta, com per exemple, una fallada en el subministrament elèctric.

Per tant, la disposició serà de 3 reactors en paral·lel, treballaran en discontinu i hi haurà un en funcionament. Tots els reactors, tindran mateix disseny, per tant ens referirem durant l'explicació del disseny a un de sol.

El PBR consisteix en un o més tubs empacats amb partícules de catalitzador, que operen en posició vertical. Les partícules poden variar en mida i forma: granulars, esfèriques, etc. Aquest tipus de reactor té la necessitat d'eliminar o donar calor, en el nostre cas, eliminar calor, i això fa que no sigui possible tenir un sol tub empackat tot el catalitzador. Els tubs que constitueixin el reactor han d'estar enfilats. L'intercanvi energètic amb els voltants s'obté circulant un fluid entre els espais entre tubs. Com que la temperatura de la nostra reacció és elevada, el diàmetre de tubs ha de ser baix, per evitar augmentar massa la temperatura de la barreja reaccionant.

Les condicions de treball del reactor seran de 16 atm de pressió i 658 K. Aquestes dades han sigut extretes del Exemple III de la patent **U.S. 3.860.650**.

En primer lloc, a partir del balanç de matèria del procés en general, s'han obtingut dades dels cabals d'entrada i sortida al reactor, donant un cabal d'entrada de 7.032,06 m^3/h de barreja d'amoníac i fenol.

Com que aquests dos reactants reaccionen molt lentament, a l'etapa anterior gairebé no han començat a reaccionar, pel que considerem que aquests entren havent reaccionat amb una conversió del 98%. Alguns dels valors utilitzats han estat aproximats, ja que no s'han disposat de dades cinètiques ni del temps de residència del reactor.

Per dur a terme el disseny del reactor, s'han pres valors típics del tipus d'aquest tipus de reactor, i valors donats a la patent **U.S. 3.860.650**.

Un reactor de llit empaquet consisteix en un reactor multitubular. Per començar a determinar les diferents dades de disseny, s'ha triat una velocitat específica, per tub, de reacció. Per triar la velocitat típica s'han tingut en compte dos factors, la pèrdua de càrrega i el temps de residència:

Taula 11-2-1: Valors típics extrets del Trambouze.

$\Delta P/L$ (Pa/m)	>2500
τ (s)	1-3

La velocitat específica triada per cada un dels tubs del reactor és de 5m/s, donant així un temps de residència de 1,2s, el qual entra dins dels valors típics, i evitant una major pèrdua de pressió.

Donat un temps de residència de 1,2s per una velocitat específica de 5m/s, vol dir que els tubs triats són de 6 metres de llarg, aquesta es la longitud típica en els reactors multitubulars, per dos motius, un referent al tema de reacció conversió, i un segon motiu que té a veure amb el tema construcció. El tema conversió, es perquè amb 6 metres de longitud, hi ha suficient llargada per que tingui lloc la reacció, sense tenir una gran pèrdua de càrrega si augmentem molt més la longitud del tub. El segon motiu, la majoria de proveïdors consultats, ens han ofertat tubs de 6 metres, alguns d'aquest proveïdors han estat: Hastinik, Alacer Mas, Aceros Llobregat, entre d'altres. El comprar tubs més petits suposa un major cost, degut al tall del tub, i el comprar tubs més grans, a més a més de major cost, fa que s'hagin d'empalmar tubs i que no sigui un únic, aquest fet afectaria a una sèrie de factors del disseny mecànic del tub. Segons

la patent utilitzada, els tubs eren de 1" de diàmetre, per tant, amb aquestes dues dades, s'ha fet el càlcul de l'àrea de tub i del volum de cada tub, tal i com es mostra a continuació:

$$At = \frac{\pi}{4} \times D^2 = \frac{\pi}{4} \times (0,0254 \text{ m})^2 = 5,067 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Equació 11-2-1: Càlcul de l'àrea de tubs.

On:

- At: àrea de tubs (m^2).
- D: diàmetre del tub (m).

Un cop calculada l'àrea, i donat que coneixem la longitud, s'ha pogut calcular el volum del tub:

$$Vt = At \times L = 5,067 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 6 \text{ m} = 3,040 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Equació 11-2-2: Càlcul del volum de tubs.

On:

- Vt: volum de tubs (m^3).
- L: Llargada de tub (m).

Per acabar de definir el disseny de cada tub del reactor, falta conèixer el cabal que entrarà en cada un d'ells:

$$Qv = At \times vs = 5,067 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 2,534 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Equació 11-2-3: Càlcul del cabal que passa per cada tub.

On:

- Qv: Cabal volumètric que passa per cada tub (m^3/s).

El cabal que passarà per cadascun dels tubs, serà de $2,534 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

El reactor, tal i com s'ha explicat anteriorment, no consta únicament d'un tub, aquest està compost d'un nombre de tubs, on dins de cadascun, té lloc la reacció catalítica, per dins d'aquest hi ha el catalitzador. El nombre de tubs, com ja s'ha establert el cabal que passarà per cadascun d'ells, i es coneix el cabal total d'entrada al reactor, ja es pot saber. El total de tubs que formaran el reactor serà de 771 tubs.

Aquests 771 tubs ocupen un volum de $2,34 \text{ m}^3$. No es sobredimensiona el volum de reacció del reactor ja que aquesta operació consta de 3 reactors en paral·lel. Aquest fet assegura i dóna marge per les possibles ampliacions de producció i per a les possibles tasques de manteniment.

Tenint en compte que es un reactor multitubular refrigerat, és a dir, un intercanviador de calor amb reacció als tubs, s'ha de fixar un pitch per poder saber el volum total que tindrà el reactor, juntament, amb l'àrea, ja que el conjunt de tubs donarà lloc aquests dos valors. El pitch és la distància que hi ha entre tubs i serà igual a 1,250, multiplicat pel diàmetre extern de tubs, en aquest cas, 0,0254 metres, equivalent a 1".

El diàmetre triat, tot i que a càlculs anteriors ja l'hem vist, és per obtenir la menys pèrdua de pressió possible, i perquè en aquest tipus de reactor el valor típic és entre 1" i 2". A més diàmetre, més pèrdua de càrrega.

El pitch triat ha estat el triangular, és a dir, els tubs estaran disposats en forma de triangle ja que proporciona una major eficiència pel que fa a la transferència de calor, tot i les pèrdues de pressió, les quals són més elevades que amb un pitch quadrat. Ja s'han tingut en compte altres mesures de disseny per evitar aquestes pèrdues de pressió.

Agafant els requisits nomenats, el diàmetre del feix de tubs és de 1,012 metres.

Entre tub i tub s'ha de deixar un espai i deixar espai entre carcassa i tubs més exteriors, ja que ha de passar el fluid refrigerant, en aquest cas sal fosa, ja que la reacció arriba a altes temperatures a les quals l'aigua i altres refrigerants s'evaporarien. El diàmetre de carcassa serà de 1,2 m, aquest diàmetre, s'ha consultat amb un proveïdor, el qual ens ha donat preus i valors normals els quals ells fan, en aquest cas, el proveïdor que ens ha donat aquesta informació ha estat Indústries AJA. A més a més, segons el mètode Kern, els diàmetres típics de carcassa oscil·len entre 150 i 1520mm. Agafant doncs, el diàmetre de carcassa anomenat, obtenim una àrea total de reactor de $1,13 \text{ m}^2$. Les fórmules utilitzades són les mateixes que pel càlcul d'àrea de tubs.

El volum total que tindrà la carcassa, s'ha calculat donat que coneixíem dades del àrea total i longitud de tubs. S'ha tingut en compte, que la llargada serà una mica superior a

la dels tubs, donat que hi haurà els capçals. El valor típic en el disseny d'intercanviadors de calor és de 0.025 metres més per cada capçal, fent així una llargada total de 6.05 metres, per la carcassa. A continuació, es presenta el càlcul del volum final que s'ha obtingut de carcassa.

$$V_c = A_c \times L_r = 1,13 \text{ m}^2 \times 6,05 \text{ m} = 6,8 \text{ m}^3$$

On:

- V_c = volum de carcassa (m^3).
- A_r = àrea de carcassa (m^2).
- L_r = llargada total del reactor (m).

El volum de carcassa és de $6,8 \text{ m}^3$.

Tots els valors donats són arrodonits a valor normals.

Taula 11-2-2: Resum de dades obtingudes en el disseny del reactor.

Volum de tubs d'un reactor (m^3)	2,4
Volum de carcassa d'un reactor (m^3)	6,8
Volum de cada tub del reactor (m^3)	0,003
Àrea del total del equip (m^2)	1,13
Àrea de cada tub d'un reactor (m^2)	0,0005
Total de tubs del reactor	771

11.2.2.BALANÇ D'ENERGIA DEL REACTOR

El càlcul del balanç d'energia del reactor multitubular de llit fix es pot fer similar al balanç d'energia d'un intercanviador. S'utilitzen dades de la patent **U.S.3.860.650** i del programa de simulació Aspen Hysys. La conversió de la reacció ha estat del 98%.

La reacció per la producció d'anilina és una reacció exotèrmica, és a dir, que desprèn calor. La entalpia de reacció és de $-8,4 \text{ KJ/mol}$, aquesta dada prové de la patent. El cabal de sortida del reactor d'anilina és de $101,2 \text{ Kmol/h}$.

Per conèixer la calor que despesa de la reacció:

$$Q = \Delta H \times F_s$$

Equació 11-2-4: Càlcul de la calor despesa per la reacció.

On:

- Q: Calor despesa (KJ/h).
- ΔH : Entalpia de reacció (KJ/mol).
- F_s : Cabal molar de sortida (mol/h).

S'ha obtingut una calor despesa de 850.080 KJ/h o, el que és el mateix, 236,13 KW.

El fluid de refrigeració utilitzat és el Syltherm 800, és un fluid refrigerant de Dow. S'ha escollit aquest refrigerant donat el rang de temperatures a les quals aquest és manté líquid i és un fluid apte per a refrigerar la nostra reacció.

Els valors típics de transferència de calor per aquest fluid, s'han trobat a les propietats donades a la pròpia fitxa tècnica del Dow i a la figura 12.1. de Sinnott. La transferència de calor d'aquest fluid està entre 72 i 720 KJ/hm²K. S'ha triat el valor més baix de coeficient individual, per veure com serà en la pitjor de les situacions. Així doncs, la transferència d'energia del nostre reactor és de 72 KJ/hm²K. El salt tèrmic del fluid refrigerant és de 20°C. Aquest entra al equip a 280°C i surt a 300°C. Amb la sèrie de valors coneguts es pot saber quina serà l'àrea d'intercanvi que es requereix. En primer lloc el ΔT_{ml} s'ha calculat:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Equació 11-2-5: Càlcul de la diferència de temperatura logarítmica.

Tot seguit, conegut que ΔT_{ml} és 94,65, s'ha calculat l'àrea d'intercanvi requerida:

$$Q = U \times A_{int} \times \Delta T_{ml}$$

Equació 11-2-6: Balanç d'energia per conèixer l'àrea d'intercanvi.

On:

- Aint: àrea d'intercanvi (m²).
- U: Coeficient individual del bescanvi de calor (KJ/hm²K).

L'àrea de bescanvi obtinguda és de 124,74 m².

La massa necessària del refrigerant és calculada també segons els balanç d'energia:

$$Q = ms \times Cp \times \Delta T$$

Equació 11-2-7: Balanç d'energia amb dades del refrigerant.

On:

- ms: massa de refrigerant necessària (kg/h).
- Cp: calor específic del refrigerant (KJ/KgK).

La resta de nomenclatura ja és coneguda.

Coneixent els valors de Q i del salt tèrmic, les úniques dades desconegudes eren el calor específic i la massa de refrigerant. A la fitxa tècnica del Syltherm 800, podem trobar una Cp de 2,08 KJ/KgK pel rang de temperatures a les que opera. Així doncs, la massa de refrigerant necessària és de 20.356,32 Kg/h o el que és el mateix, 29,69 m³/h.

Per finalitzar amb el balanç d'energia i veure si aquest és vàlid, s'ha de conèixer l'àrea necessària d'intercanvi dels tubs. Per un sol tub aquesta es pot calcular:

$$A_{intt} = 2 \times \pi \times r \times L$$

Equació 11-2-8: Càlcul de l'àrea d'intercanvi necessària per un tub.

S'obté un àrea d'intercanvi de 0,48 m², si el total de tubs és de 771 tubs, l'àrea total de bescanvi serà de 370,08 m².

El coeficient individual triat ha estat pel pitjor dels casos. Al calcular l'àrea d'intercanvi mínima per aquest coeficient dóna una àrea inferior a la disponible, per tant, el reactor no tindrà problemes de bescanvi de calor.

Finalment, donat que coneixem el cabal màssic de refrigerant, podem calcular l'àrea transversal del total de carcassa i conèixer la velocitat del fluid refrigerant.

Aquesta àrea, es trobarà restant el volum de tubs del volum total, aquesta resta serà de 4,4 m³ i dividit la longitud de 6 metres, obtenim un àrea de 0,73 m². Si dividim el cabal màssic de refrigerant entre l'àrea transversal del tub, la velocitat del refrigerant és de 0,01 m/s.

Les velocitats típiques d'un fluid en estat líquid a la carcassa oscil·len entre 0,3 i 1 m/s. La velocitat del nostre refrigerant està per sota dels valors típics. L'únic valor que es pot modificar per obtenir la velocitat desitjada és la massa de refrigerant. Donat que modificant el valor de la massa del refrigerant, el balanç d'energia i de matèria no seria el correcte, i que el propi equip ja té un àrea de bescanvi suficientment elevada, no farem passar més massa de refrigerant, perquè seria passar un excés d'aquest innecessari i que suposaria un cost molt més elevat.

11.2.3.1. PERDUA DE PRESSIÓ

És important conèixer, en aquest tipus de reactors, el número de passos per tub mitjançant velocitats típiques de circulació. Gràcies al mètode Kern, s'ha pogut calcular tota una sèrie de dades que ampliaran la informació que ja tenim del PBR.

Les velocitats típiques d'un gas dins del tub depenen de la pressió d'operació, en aquest cas, la pressió de reacció. Donat que la pressió de reacció és de 16 atm, fa disminuir bastant el rang de velocitats. La velocitat del nostre gas de reacció és de 5 m/s, i aquesta velocitat entra dins del rang de 5 a 10 m/s. La velocitat de 5 m/s, s'ha explicat en apartats anteriors per què ha estat triada.

Així doncs, coneguda la velocitat del nostre fluid, podem calcular la pèrdua de càrrega del reactor. Pels PBR no podem utilitzar les correlacions típiques donades pel mètode Kern, així doncs, s'ha utilitzat l'equació d'Ergun extreta del *Trambouze*:

$$\frac{\Delta P_t}{L} = 150 \times \frac{\mu_f \times v_o \times (1 - \varepsilon)^2}{D_p^2 \times \varepsilon^3} + 1,75 \times \frac{\rho_f \times v_o^2 \times (1 - \varepsilon)}{D_p \times \varepsilon^3}$$

Equació 11-2-9: Equació d'Ergun.

On:

- L: longitud dels tubs (6 m).
- μ_f : Viscositat del gas ($1,35 \times 10^{-3}$ kg/ms).
- v_o : velocitat (5 m/s).
- ε : porositat del llit (0,55). Aquesta s'ha calculat segons "Calculation of average bed porosity" de Pushnov (...).
- D_p : diàmetre de la partícula del catalitzador (1,5 mm).
- ρ_f : densitat del gas ($8,92$ kg/m³).

Algunes d'aquestes dades són extrems del simulador *Aspen Hysys*.

Així doncs la pèrdua de pressió és de 704,22 Pa, el que és el mateix 0,70 KPa. Si tenim en compte valors típics, per un gas de més de 10 atm la pèrdua de pressió es aproxima a 0,1xPmanomètrica, si el nostre gas està a 16 atm, la pèrdua màxima pot ser de 162 KPa. La pèrdua de pressió és molt petita en el nostre reactor.

Retornan al mètode Kern, a la carcassa la altura de les pantalles o baffles cuts ha de ser entre un 15 i un 45% del diàmetre de carcassa. El percentatge escollit és de 25% ja que entre dins dels valors òptims. L'altura lliure serà de 0,3 m. L'espaiat entre pantalles (l_B) està entre 0,2 a 1 vegades el diàmetre de carcassa, escollim 0,4 ja que està dins dels valors òptims. L'espaiat obtingut és de 0,48 m. Per tant, el número de pantalles és:

$$\frac{L}{l_B} - 1 = \frac{6 \text{ m}}{0,4 \text{ m}} - 1 = 14$$

Equació 11-2-10: Càlcul del número de pantalles.

El número de pantalles obtingut és de 14, i donat que és un número parell es considera correcte, ja que a més a més, es troba dins del rang de valors possible entre 1 i 16.

11.2.3. DISSENY MECÀNIC DEL REACTOR

11.2.3.1. MATERIAL DE CONSTRUCCIÓ

Es procedeix al disseny mecànic del reactor, només es presentaran els càlculs per un, els altres dos son iguals tant en disseny funcional com en disseny mecànic.

Pel disseny del reactor, on té lloc la reacció catalítica en fase gas, s'ha escollit un material de construcció resistent a altes temperatures i pressions. Per escollir el material de construcció, també es té en compte, que aquest material sigui resistent a la corrosió davants dels productes que es manipulen dins del reactor.

El material triat ha sigut el acer inoxidable 321 (AISI 321), aquest compleix amb tots els requeriments de construcció necessaris pel reactor, aportant també unes bones propietats mecàniques. Tota aquesta informació ha sigut obtinguda del Perry's, el qual apareix a la bibliografia.

AISI type	UNS	Composition, %*							Mechanical properties†			
		Cr	Ni	Mo	C	Si	Mn	Other	Yield strength, kip/in ² (MPa)‡	Tensile strength, kip/in ² (MPa)‡	Elongation, %	Hardness, HB
304	S30400	18-20	8-10.5		0.08	1.0	2.0		35 (241)	82 (565)	60	149
304L	S30403	18-20	8-12		0.03	1.0	2.0		33 (228)	79 (545)	60	143
308	S30800	19-21	10-12		0.08	1.0	2.0		30 (207)	85 (586)	55	150
309	S30900	22-24	12-15		0.20	1.0	2.0		40 (276)	95 (655)	45	170
309S	S30908	22-24	12-15		0.08	1.0	2.0		40 (276)	95 (655)	45	170
310	S31000	24-26	19-22		0.25	1.5	2.0		45 (310)	95 (655)	50	170
310S	S31008	24-26	19-22		0.08	1.5	2.0		45 (310)	95 (655)	50	170
316	S31600	16-18	10-14	2.0-3.0	0.08	1.0	2.0		36 (248)	82 (565)	55	149
316L	S31603	16-18	10-14	2.0-3.0	0.03	1.0	2.0		34 (234)	81 (558)	55	146
317	S31700	18-20	11-15	3.0-4.0	0.08	1.0	2.0		40 (276)	85 (586)	50	160
317L	S31703	18-20	11-15	3.0-4.0	0.03	1.0	2.0		35 (241)	85 (586)	55	150
321	S32100	17-19	9-12		0.08	1.0	2.0	(5 × C) Ti§	30 (207)	85 (586)	55	160
347	S34700	17-19	9-13		0.08	1.0	2.0	(10 × C)(Cb + Ta)§ 0.20 Co	35 (241)	90 (621)	50	160

Figura 11-2-1: Dades per diferents materials de construcció. Taula obtinguda bibliogràficament.

La taxa de corrosió del inox 321 és molt inferior a altres acers inoxidables disponibles al mercat. Aquest material, s'estabilitza contra la formació de carburs de crom per addició de titani. Una altra raó de la tria d'aquest material és que aguanta intervals de temperatura molt elevats, de 427°C a 816°C. El 321 proporciona unes molt bones condicions de deformació i de resistència a la tensió. A la figura 11-2-1 podem veure les propietats mecàniques del 321.

El límit elàstic d'aquest material, com es pot veure a la taula adjunta del *Perry's*, és de 207 MPa, aquest valor serà necessari pel disseny mecànic.

11.2.3.2.PRESSIÓ DE DISSENY

El reactor de llit empaquetat dissenyat opera a 16 atm de pressió. Si més no, aquesta pressió no es la utilitzada per fer el disseny mecànic.

El codi de disseny ASME, utilitzat pel disseny mecànic del reactor, juntament amb el codi TEMA, recomana dissenyar un recipient i els seus components per una pressió superior a la que opera. Aquest requisit senyalat pel codi ASME es compleix utilitzant una pressió de disseny del 10% superior a la pressió de treball.

Per calcular la pressió de disseny es procedeix a fer un sobredimensionament del 10% sobre la pressió d'operació:

$$Pd = Pop \times (1 + 0.1) = 16 \text{ atm} \times (1 + 0,1) = 17,6 \text{ atm}$$

On:

- Pd: pressió de disseny (atm).
- Pop: pressió d'operació (atm).

Finalment, la pressió a la qual es faran els càlculs de disseny és de 17,6 atm.

11.2.3.3.TEMPERATURA DE DISSENY

La temperatura d'operació és de 385°C. La temperatura de disseny s'ha calculat sumant 15°C a la temperatura d'operació.

$$Td = Top + 15^{\circ}C = 385^{\circ}C + 15^{\circ}C = 400^{\circ}C$$

On:

- Td: Temperatura de disseny (°C).
- Top: Temperatura d'operació (°C).

La temperatura de disseny pel reactor serà de 400°C.

11.2.3.4.GRUIX DE LA VIROLA

Els gruixos del reactor s'han calculat segons el codi ASME i TEMA. El gruix de la virola, en concret, amb ASME.

El reactor de llit empaquet treballa a altes pressions internes, per aquest motiu, s'ha escollit el recipient amb pressió interna de la norma ASME, per calcular el gruix.

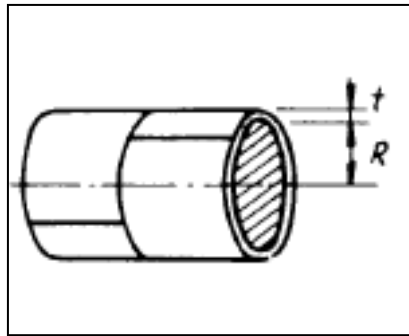


Figura 11-2-2: Figura extreta d'ASME. Representació del tipus de virola utilitzat.

La figura 11-2-2 presenta el tipus de virola dissenyat pel reactor empaquet, tot i que a la figura aparegui en horitzontal, no afecta al seu disseny en vertical, per ambdós casos és igual.

El càlcul del gruix de la virola s'ha calculat utilitzant la fórmula següent:

$$t = \frac{PdRr}{(SE) - (0,6Pd)}$$

Equació 11-2-11: Equació pel càlcul del gruix de virola.

On:

- t : gruix (m).
- S: Valor del esforç del material o límit elàstic (atm).
- E: Eficiència de la junta.

Les altres variables que apareixen a la fórmula ja són conegudes per apartats anteriors.

La variable E o eficiència de la junta es refereix a l'eficiència de soldat. L'eficiència de soldat és un valor que depèn del radiografiat. En el cas de les viroles s'utilitza un radiografiat parcial amb junta de soldadura en X. Per aquest tipus de soldadura s'usa un valor de 0,85, que és un radiografiat parcial. També són coneguts altres factors tals com el 0,7 i el 1. Si més no, el més utilitzat és el 0,85 i el 0,7 el que menys. El valor de 1 és usat per a casos molt concrets.

El límit elàstic escollit és el del material utilitzat en el disseny del reactor, 321, que com ja s'ha dit anteriorment és de 2042,93 atm..

El gruix de la virola obtingut ha estat de 6 mm. Aquest gruix no és el definitiu, ja que s'ha de tenir en compte un sobre-gruix. El sobre-gruix serveix per disminuir la corrosió al equip i que pugui aguantar la pressió interna al llarg de la seva vida útil. El sobre-gruix o C.A. és de 1 a 12 mm, donat que es vol que la vida útil dels reactors sigui d'uns 20 anys. S'ha decidit utilitzar un C.A. de 10 mm. A més a més, les parts del equip a les quals el material del equip pateix una deformació, perden gruix, on s'afegeix un 10% més de gruix del donat.

$$t = \frac{PdRr}{(SE) - (0,6Pd)} = \frac{17,6 \text{ atm} \times 0,6 \text{ m}}{(2042,93 \text{ atm} \times 0,85) - (0,6 \times 17,6 \text{ atm})} + 0,01 \text{ m} = 0,018 \text{ m}$$

Amb el 10% de tolerància de fabricació, el gruix final és de 18 mm.

11.2.3.5. CAPÇALS DEL REACTOR

El reactor té dos extrems, un superior i un inferior, és a dir, té un capçal i un fons. Tant el fons com el capçal es consideren iguals pel disseny mecànic. Per tal de calcular els capçals, s'ha seguit el codi de disseny ASME. El disseny geomètric pel capçal i el fons ha estat un fons Klopper. Aquesta mena de fons, aguanten altes pressions internes. Donat que el reactor multitubular de la planta Anilex CO treballa a 16 atm de pressió, s'ha considerat que el fons Klopper és una bona tria pel disseny.

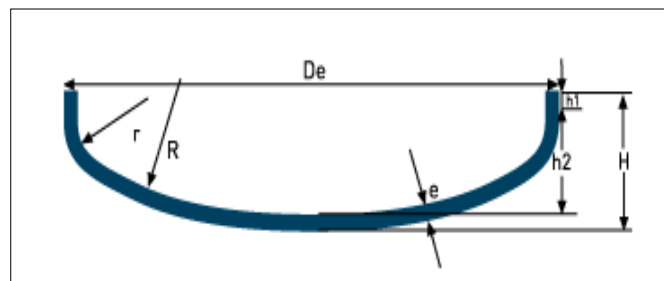


Figura 11-2-3: Esquema d'un fons Klopper.

Totes les dades que requereix el disseny del fons requereixen conèixer el gruix del capçal. Per calcular el gruix del capçal o fons, s'ha utilitzat el codi ASME, la fórmula per fons toriesfèric.

La relació R/r donada al codi ASME per capçals toriesfèrics a de ser igual o inferior a 16 2/3. En el cas del reactor multitubular de la planta, aquesta relació era inferior, de raó 10. Per tant, l'equació utilitzada ha estat:

$$t = \frac{PRM}{2SE - 0,2P}$$

Equació 11-2-12: Càlcul del gruix de capçal i fons.

Aquesta equació, és referent a:

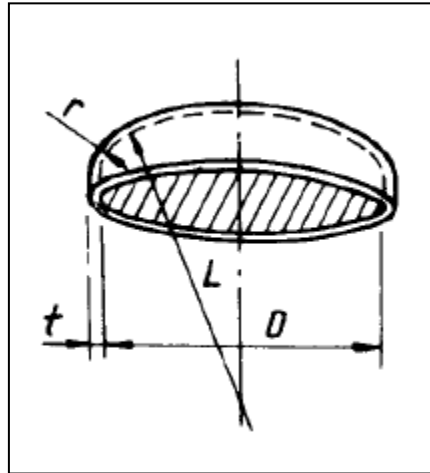


Figura 11-2-4: Representació extreta del codi ASME. Referència utilitzada pel càlcul del fons.

On:

- M: factor M. Aquest factor s'extreu del ASME en funció de la relació R/r obtinguda.

VALORES DEL FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16 ² / ₃	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	

Figura 11-2-5: Taula extreta del codi ASME. Factors M segons relació R/r.

El valor del factor M obtingut és de 1,54, ja que la relació R/r és de 10.

La resta de nomenclatura ja és coneguda.

En aquest cas, el valor de E, eficàcia de soldadura ha canviat a 1, ja que aquest tipus de peces tenen un radiografiat total en X.

Substituint els valors a la fórmula, i sumant la sobre-dimensió a la corrosió C.A., la qual es de 0,0102 metres i la sobre-dimensió C2, del 10%, per la prevenció de alteracions en el gruix, obtenim un gruix final de 20 mm.

Conegut el gruix del capçal, podem conèixer tots els altres valors de la geometria d'un Klopper. Seguint la nomenclatura de la figura 11-2-5 es presenten les següents equacions:

$$R = De$$

Equació 11-2-13

$$r = \frac{R}{10}$$

Equació 11-2-14

$$h1 = 3,5e$$

Equació 11-2-15

$$h2 = 0.1935De - 0.455e$$

Equació 11-2-16

$$h2 = 0.1935De - 0.455e$$

Equació 11-2-17

$$H = h2 + h1 + e$$

Equació 11-2-18

$$Dd = 1,11De + 1,85h1$$

Equació 11-2-19

$$V = 0.1(Di)^3$$

Equació 11-2-20

On:

- De: Diàmetre exterior (m).
- e: t, gruix (m).

- R: Radi esfèric interior (m).
- r: Radi rebordeig interior (m).
- h1: Pestanya (part recta) (m).
- h2: Fletxa (m).
- H: Alçada exterior (m).
- V: Volum (m³).
- Dd: Diàmetre interior (m).

Finalment, els valors obtinguts es presenten a la taula 11-27:

Taula 11-2-3: Resultats geomètrics del fons Kloppe.

e (m)	0,020
De (m)	1,220
r (m)	0,122
h1 (m)	0,070
h2 (m)	0,227
H (m)	0,317
Dd (m)	1,484
V (m³)	0,173
Pes (kg)	278,000

El pes s'ha obtingut gràcies a un proveïdor que ens l'ha proporcionat: Horfasa.

11.2.3.6. TUBS DEL REACTOR

Els tubs del reactor, també dissenyats en AISI 321, han estat dissenyats per la normativa TEMA. Les sigles de la normativa tema volen dir **Tubular Exchanger Manufacturers Association**, és a dir, Associació de Fabricants d'Intercanviadors tubular.

La normativa TEMA és específica pel disseny d'intercanviadors de carcassa i tubs. La semblança mecànica entre un reactor multitubular i un intercanviador de carcassa i tubs fa possible un disseny mecànic lògic pel reactor de la planta Anilex CO.

El diàmetre dels tubs ha estat fixat a 1", per tenir una pèrdua de càrrega mínima. Si el material escollit és AISI 321, el qual conté titani entre d'altres materials, i el diàmetre

de tub és de 1", les temperatures que pot aguantar són fins a 1626 °C. Aquesta informació està extreta de la taula següent:

Taula 11-2-4: Temperatures que suporten els tubs en funció del diàmetre i el material. Dades extretes de TEMA.

Tube OD	Tube Materials and Temperature Limits ° F (° C)	
	Carbon Steel & High Alloy Steel, 759 (399) Low Alloy Steel, 850 (454) Nickel-Copper, 600 (316) Nickel, 850 (464) Nickel-Chromium-Iron, 1000 (538)	Aluminum & Aluminum Alloys, Copper & Copper Alloys, Titanium Alloys At Code Maximum Allowable Temperature
1/4 (6.4)	26 (660)	22 (559)
3/8 (9.5)	35 (889)	30 (762)
1/2 (12.7)	44 (1118)	38 (965)
5/8 (15.9)	52 (1321)	45 (1143)
3/4 (19.1)	60 (1524)	52 (1321)
7/8 (22.2)	69 (1753)	60 (1524)
1 (25.4)	74 (1880)	64 (1626)
1-1/4 (31.8)	88 (2235)	76 (1930)
1-1/2 (38.1)	100 (2540)	87 (2210)
2 (50.8)	125 (3175)	110 (2794)

La reacció que té lloc dins dels tubs és a 385°C, per tant, el diàmetre escollit es vàlid pel reactor dissenyat.

El gruix del tub s'ha calculat mitjançant la norma TEMA:

$$t_o = t_l \left(1 + \frac{d_o}{4R_o} \right)$$

Equació 11-2-21: Càlcul del gruix dels tubs.

On:

- t_o : Gruix de la paret del tub (m).
- t_l : Mínim gruix de paret del tub de les normes Coda (m). Donada la pressió de disseny s'ha escollit un valor de 0,002 metres.
- d_o : Diàmetre exterior de tub (m).
- R_o : Radi de la curvatura del tub (m).

El valor de gruix obtingut ha estat de 3 mm, però donat que alguns proveïdors ens han passat preus d'aquests tubs, ens han aconsellat triar un gruix de 2,77, ja que és un valor estàndard de venda.

En concret, el disseny mecànic final triat pel tub ha estat de 1" (33,4x2.77), el 33,4 representa el diàmetre extern i el 2,77 el gruix del tub, totes dues mesures en mm. Aquestes dades han estat proporcionades per *Aceros Llobregat*.

11.2.3.7. PLAQUES DE TUBS

Els tubs del reactor es mantenen fixos degut a una placa on són ficats i fixats mitjançant soldadura. Aquesta placa ha de ser capaç d'aguantar l'efecte corrosiu tant del fluid refrigerant com del fluid de reacció. És per aquest motiu, que tot l'equip ha estat dissenyat amb AISI 321 i capaç de suportar altes pressions i temperatures.

Pel disseny mecànic de la placa de tubs, s'ha utilitzat la norma TEMA:

Taula 11-2-5: Taula procedent de la norma TEMA.

TABLE R-4.41
BAFFLE OR SUPPORT PLATE THICKNESS
Dimensions in Inches (mm)

Nominal Shell ID	Plate Thickness					
	Unsupported tube length between central baffles. End spaces between tubesheets and baffles are not a consideration.					
	24 (610) and Under	Over 24 (610) to 36 (914) Inclusive	Over 36 (914) to 48 (1219) Inclusive	Over 46 (1219) to 60 (1524) Inclusive	Over 60 (1524)	
6 - 14 (152-356)	1/8 (3.2)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)	
15 - 28 (381-711)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	
29 - 38 (737-965)	1/4 (6.4)	5/16 (7.5)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)	
39 - 60 (991-1524)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)	5/8 (15.9)	
61 - 100 (1549-2540)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)	3/4 (19.1)	3/4 (19.1)	

Pel disseny de la placa es necessita saber el diàmetre de carcassa i la llargada de tubs, donat que totes dues dades són conegudes, seguint la taula 11-2-5 podem saber el gruix de la placa.

El diàmetre de carcassa és de 1200 mm i la llargada de tubs de 6000 mm, així doncs: el gruix del plat és de 15,9 mm.

11.2.3.8. PES DEL EQUIP EN BUIT

El pes del equip en buit es calcula restant el volum total del equip utilitzant mesures internes al volum total del equip utilitzant mesures externes.

El volum de virola s'obté:

$$Volum\ virola = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times L$$

Equació 11-2-22: Càlcul del volum de virola.

On:

- D: diàmetre extern o intern (m).
- L: Llargada de la virola (m).

El volum dels fons es calcula:

$$Volum\ fons = 0,1 \times D^3$$

Equació 11-2-23: Càlcul del volum de fons.

On D és la mateixa que per la formula del volum de virola.

Quan substituïm els corresponents diàmetres a l' equació 11-2-23 obtenim els següents resultats:

Taula 11-2-6: Taula de resultat dels volums.

Volum extern virola (m³)	8,385
Volum intern virola (m³)	8,143
Volum extern fons (m³)	0,182
Volum intern fons (m³)	0,173

Amb aquestes dades s'ha calculat el volum total ocupat pel material de construcció del equip. S'ha tingut en compte la diferència de volums dels fons s'ha de multiplicar per dos:

$$Vt = (Vve - Vvi) + 2 \times (Vfe - Vfi)$$

Equació 11-2-24: Càlcul del volum ocupat pel material de construcció del equip.

Obtenim un volum de 0,26 m³.

Per conèixer el pes en buit s'ha de multiplicar el volum obtingut per la densitat del material a les condicions a les quals s'ha fet el disseny del reactor. La densitat del AISI 321 en les condicions de disseny és de $7,9\text{g/cm}^3$.

Finalment, s'obté un pes d'equip en buit de 2.053,81 kg.

Els tubs del equip, també s'han de tenir en compte per el càlcul del pes. Aceros Llobregat, a la mateixa oferta que ens ha passat amb els preus del metre de tub, ens ha adjuntat el pes de cada un dels tubs. El pes de cada tub és de 3,18 Kg. Si el número total de tubs és de 771, el pes total de tubs serà de 2.451,78 Kg.

11.2.3.9. PES DEL EQUIP AMB FLUID DE PROVA

Tots els equips han de passar una prova per comprovar que no hi ha fuites i que l'equip està en perfectes condicions de construcció. En el cas del reactor, la prova duta a terme ha estat una prova hidràulica.

El càlcul del pes del equip s'ha de repetir amb el fluid de prova.

El volum útil del reactor és de $8,14\text{ m}^3$, i la densitat del aigua líquida és de 1000 Kg/m^3 . Si es multiplica la densitat de l'aigua pel volum útil obtenim un pes de 8140 Kg. Aquest pes, s'ha de sumar el pes dels tubs i el pes de la carcassa obtinguts al apartat anterior.

El pes del equip amb fluid de prova és de 12.645,59 Kg.

11.2.3.10. PES DEL EQUIP EN OPERACIÓ

El pes del equip amb el fluid d'operació canviarà, ja que la densitat del fluid respecte la del aigua tampoc és igual. Donat que dins l'equip circulen dos fluids diferents, el del refrigerant i el fluid de reacció, s'han de tenir en compte ambdós per saber el pes del equip.

Per dur a terme els càlculs s'ha de conèixer la densitat del fluid refrigerant i la densitat del fluid de reacció, les quals són: $692,87$ i $8,929\text{ Kg/m}^3$ respectivament. Donat que coneixem el volum que ocupa la carcassa i el volum que ocupen els tubs, s'haurà de multiplicar el volum de carcassa per la densitat del fluid refrigerant i el volum dels tubs per la densitat del fluid de reacció. Aquests pesos s'haurà de sumar el pes del equip en buit, donant un pes d'equip en operació de 9.279,73 Kg.

11.2.3.11. AÏLLANT DEL REACTOR

Degut a les altes temperatures que assoleix el reactor, aquest ha de ser aïllat, per dos motius: protegir l'equip de la temperatura exterior, per tal que no hi hagi una intervenció negativa en la transferència de calor; evitar accidents per part dels operaris quan hagi de realitzar operacions al mateix reactor o properes a ell.

Actualment, els dos aïllants més utilitzats són el neoprè i la llana de roca. Pel cas dels reactors, s'ha utilitzat llana de roca i s'ha donat un gruix de 100 mm. Per tal de revestir l'equip, s'ha equipat d'una xapa d'alumini, de 1 mm de gruix.

11.3 DISSENY DE LES COLUMNES DE SEPARACIÓ

11.3.1 INTRODUCCIÓ

Durant la reacció de producció d'anilina es formen subproductes indesitjats que han de ser extrets juntament amb el reactius que han quedat sense reaccionar. Per a dur a terme aquesta separació s'han dissenyat cinc equips que permetran extreure aquests compostos indesitjat i obtenir anilina amb una puresa màxima, l'objectiu principal d'aquestes separacions serà:

- Separar de la mescla la quantitat d'amoníac que ha estat introduïda al reactor en excés, i per tant extreure la quantitat màxima possible que no ha reaccionat.
- Separar l'aigua que es forma com a subproducte de la reacció d'aminació del fenol.
- Per últim, separar l'anilina de les restes de fenol sense reaccionar i de la resta d'impureses.

L'ordre de separació és aquest degut al punt d'ebullició dels compostos ja que l'amoníac es el que té el punt més baix seguit de l'aigua i per últim el fenol i l'anilina.

Durant el disseny de les columnes de separació s'ha de tenir en compte les següents condicions :

- El tipus d'aliment a separar, és a dir si està en fase gas, líquida o mescla de les dues fases .
- La temperatura a la que entra a la columna.
- Pressions i condicions per tal de dur a terme la separació, en aquest cas la pressió juga un paper molt important degut a la formació d'azeòtrops que dificulten la separació .

El càlcul de les unitats de separació s'ha fet mitjançant el programa *ASPEN HYSYS*® que permet un disseny molt exacte, pel contrari el gruixos de les columnes de destil·lació multicomponent s'ha calculat mitjançant el mètode *ASME* ja que treballaran a pressions molt baixes.

11.3.2 DESTIL·LACIÓ FLASH (V-301)

L'objectiu principal d'aquesta separació és extreure el màxim d'amoníac en excés que no ha reaccionat per recircular-ho a dintre el reactor disminuint així la quantitat d'amoníac fresc que s'ha d'introduir al reactor.

Es tracta d'una operació de separació d'una sola etapa, on la entrada de la mescla en bona part és vapor, perquè el volum sigui suficientment gran al tambor de separació i perquè es produeixi un vapor més ric en el component més volàtil, en aquest cas el amoníac. Com el vapor i el líquid estan en estret contacte, les dues fases s'aproximen al equilibri. A l'indústria, normalment, són utilitzades a l'inici del procés de separació per reduir la càrrega d'entrada dels altres processos.

Aquesta columna s'ha escollit per dur a terme la separació d'amoníac, ja que aquest tipus d'unitat permet una separació per volatilitats, de manera ràpida i amb un cost econòmic baix.

El càlcul de la volatilitat es realitza mitjançant la següent equació:

$$\alpha = \frac{K \text{ component}}{K \text{ del component HK}}$$

Equació 11-3-1: Càlcul de la volatilitat.

On el component *Heavy Key* és el fenol.

Taula 11-3-1: Volatilitat dels components.

COMPONENTS	K	α
FENOL	$4,545 \cdot 10^{-3}$	1
AMONÍAC	9,726	2139,93
ANILINA	$8,053 \cdot 10^{-3}$	1,772
AIGUA	0,5611	123,45

En aquesta columna l'objectiu principal es separar l'amoníac que no ha reaccionat i que ha estat introduït en excés dins al reactor per a produir la reacció desitjada. Com que les separacions no tenen un eficàcia del 100% no obtindrem una separació total del amoníac de la resta i per tant s'hauran de addicionar diverses unitats que permetin obtenir una **purificació final** el més òptima possible per separar la resta d'amoníac i les altres impureses.

- **Característiques del aliment**

- Taula 11-3-2: Composició molar del aliment.

Component	Composició (molar)
Anilina	0,0460
Fenol	0,0020
Amoníac	0,9060
Aigua	0,0460

11.3.2.1 DIMENSIONAT V-301

El programa *ASPEN HYSYS*® permet provar diferents condicions d'operació per tal d'obtenir una màxima separació aplicant el mètode rigorós, i a més a més, per la columna flash s'ha pogut dissenyar pràcticament tot per aquest programa.

- **Dades de dimensionament del HYSYS**

Taula 11-3-3: Dades de dimensionament del Hysys.

Dades	
Diàmetre (m)	3
Altura (m)	11
L/D	3
Velocitat de vapor màxima admissible(m/s)	1
Altura líquid (m)	1,039

- **Dades de construcció del HYSYS**

Taula 11-3-4: Dades de construcció del Hysys.

Característiques	
Tipus de material	AISI 316
Densitat massica (kg/m³)	8027
Tensió admissible (bar)	1227,3
Espessor de carcassa (mm)	6
Altura del capsal (m)	0.30
Corrosió admissible (mm)	3

Per determinar el material adequat pel disseny de la columna, s'ha de tenir en compte les propietats del fluid, ja que els compostos que s'han de separar poden produir corrosió i per tant es necessari un material que sigui resistent. S'ha escollit el acer inoxidable AISI 316L per les seves propietats.

- **Pressió de disseny**

Pel càlcul de la pressió de disseny s'utilitzen la següent equació:

$$P_{disseny,1} = 1,1 \cdot P_{operació}$$

Equació 11-3-2

On la $P_{operació} = 2,21$ bar

$$P_{disseny,1} = 1,1 \cdot 2,21 = 2,43 \text{ bar}$$

Equació 11-3-3

La pressió de disseny serà **2.43 bar**.

- **Temperatura de disseny**

La temperatura de disseny s'estableix 15°C per sobre de la temperatura d'operació de la columna. Com en el cas de la columna flash, hi ha la mateixa temperatura per la part superior que la inferior la temperatura d'operació és de 72,98°C.

$$T_{disseny} = T_{operació} + 15^{\circ}\text{C}$$

Equació 11-3-4

$$T_{disseny} = 72,98 + 15^{\circ}\text{C} = 87,98^{\circ}\text{C}$$

La temperatura de disseny serà **87,98°C**.

Mitjançant la eina de "Equipment desing" de *ASPEN HYSYS*® es pot dissenyar els següents paràmetres de la columna flash:

- **Capçal i espessor del capçal**

Es tria un capçal amb **geometria el·lipsoïdal**, s'ha calculat el gruix d'aquest mitjançant la fórmula per la geometria triada:

$$t = \frac{P \cdot D}{2SE - 0,2P} + C1 = \frac{2,43 \cdot 3035}{2 \cdot 1220 \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 2,43} = 3,55 + 3 = 6,55 \approx 7 \text{ mm}$$

Equació 11-3-5

On C1=3mm, D=3035mm S=1220 bar (esforç màxim permisible a la temperatura de disseny) E=0,85

- **Altura de la columna**

Es calcula a partir de la següent equació:

$$H_{total} = H + (2 \cdot H_{capsal}) = 11,2\text{m} + (2 \cdot 0,3048) = 11,81\text{m} \approx 12 \text{ m} \quad (\text{eq 6})$$

On H_{Total} : Altura total de la columna (m), H : Altura de la columna (m) i H_{capsal} :
Altura del capsal (m).

L'altura total de la columna flash és de **12m**.

11.3.3 PURIFICACIÓ FINAL

Un cop separat gran part de l'amoníac de la resta de compostos es duu a terme la purificació final en aquest cas l'objectiu es obtenir una anilina el més pura possible per fer-ho es necessiten 4 equips que permetran aquesta purificació final.

A la següent columna s'ha d'extreure l'aigua formada com a subproducte de la reacció i el fenol que no ha reaccionat, en aquestes separacions el problema principal que es presenta és la formació de l'azeòtrop anilina-aigua i anilina-fenol.

En aquest cas, l'anilina és parcialment miscible amb l'aigua i això provoca que si la separació no es duu a terme en les condicions adients, part de l'anilina i aigua sortiran tant per caps como per cues.

Per la separació d'azeòtrops existeixen diversos mètodes per tal de dur-ho a terme, depenen així del grau de puresa que es vulgui obtenir, estudiats els casos i tenint en compte diversos factors, s'ha escollit l'absorció amb benzè, aquest tipus de columna utilitzen el benzè com a dissolvent orgànic, la funció principal d'aquest es desplaçar la volatilitat de l'aigua, aquesta columna treballa a pressió atmosfèrica; seguidament és introduït a una separador de tres fases que elimina l'amoníac, l'aigua i una part de benzè, per tant, a continuació, s'haurà de introduir a una columna al buit per separar el benzè del fenol i l'anilina, per últim el residu de cues s'introdueix conjuntament amb el residu de cues de la columna d'absorció a una última columna que treballa al buit per tal de separar al màxim l'anilina del fenol. Tot i així, aquest tipus de separació presenta diversos inconvenients:

1. La columna C-302 s'emporta part de l'anilina per caps juntament l'amoníac que no ha estat separat a la primera columna i també part del fenol.
2. L'addició de benzè comporta una despesa econòmica degut a la compra d'un nou producte i el seu posterior tractament com a residu.

Tot i presentar aquest dos tipus d'inconvenients es pot reduir l'impacte de diverses formes; en el primer desavantatge s'ha introduït seguidament un separador de tres fases que permet separar aquest tipus d'impureses, pel que respecta el segon tot i representar una despesa, la separació és molt més efectiva i s'aconsegueix una puresa del 99,26 %.

Existeixen altres mètodes per duu a terme aquesta separació, un d'ells consta de dues columnes que treballen a diferents pressions; una, a una baixa pressió i l'altra, a alta pressió. Entre aquestes dues columnes es situa un decantador que permet la separació de la fase orgànica, l'inconvenient d'aquest mètode es el cost addicional d'una altra columna i del temps de decantació que es necessitarà per separar aquestes dues fases, per tant, com es vol treballar en continu s'haurà de duplicar totes aquestes unitats augmentant encara més la despesa econòmica.

Per una altra banda, un altre mètode que resulta efectiu és una extracció líquid-líquid, en aquest tipus de sistema s'introdueix dins la columna un component extern, això permet la formació d'un azeòtrop terciari, per tant aquí també s'haurà d'utilitzar una altra columna de destil·lació que es connectarà a la sortida del extractor líquid-líquid que permetrà la separació final de l'anilina de l'aigua, aquest mètode també representa una despesa econòmica important tal com passa amb el mètode anterior, a més l'addició d'un component extern comporta un despesa addicional més el posterior tractament.

Per últim, un altre mètode molt semblant al utilitzat, és la utilització de dues columnes al buit, aquest procés resultaria molt més econòmic però la separació no és gens efectiva ja que el producte final no és gens pur i presenta moltes impureses.

Finalment, cal remarcar que el procés escollit es el que s'ha considerat més adient degut a la complexitat del procés, tot i que resulta una despesa econòmica alta el producte final és més pur i per tant la qualitat d'aquest.

11.3.3.1 COLUMNA D'ASSECAT (C-301)

En aquest columna, l'objectiu principal és la separació de l'aigua de la resta de components, com s'ha esmentat anteriorment presenta un inconvenient que és la formació de l'azeòtrop aigua-anilina, per tant s'introdueix un corrent de benzè que permet separar aquest azeòtrop.

- **Característiques de l'aliment:**

Taula 11-3-5: Composició del aliment.

Component	Composició (molar)
Anilina	0,7873
Fenol	0,0363
Amoníac	0,0976
Aigua	0,0789

Cabal d'entrada del corrent de la mescla es de 112 kmol/h a una temperatura de 206,8°C i una pressió d'1 bar.

Taula 11-3-6: Composició del benzè.

Component	Composició (molar)
Benzè	1

El corrent introduït de benzè entra amb un cabal de 20 kmol/h a una temperatura de 70°C i una pressió d'1 bar.

11.3.3.1.1 DIMENSIONAT C-301

Com aquesta columna és un tipus d'absorbidor sense condensador s'ha afegit posteriorment a la sortida de caps per tal de controlar millor la separació, això ens permet controlar més la temperatura per tal d'obtenir una separació més eficient, per tant s'han resolt el nombre de plats mínims, temperatures i pressions mitjançant el mètode *shortcut* del ASPEN HYSYS®. Aquest mètode, demana una relació de reflux que en aquest cas no es té ja que la columna treballa sense condensador , per tant per tenir una idea de per on començar a s'han estimat el nombre de plats per aquest

mètode i seguidament s'han utilitzat per començar a iterar diferents valors per tal d'obtenir la separació desitjada.

Taula 11-3-7: Dades de la columna C-301.

Paràmetres columna	C-301
Nº de plats mínim	10
Plat de l'aliment	8
Pressió d'operació (bar)	0,5
Relació de reflux mínima	5
Temperatura calderí (°C)	-38,53
Temperatura conden. (°C)	159

Aquest són els paràmetres obtinguts pel mètode *shortcut*, a continuació es presenten els valors reals obtinguts per aquest tipus de columna.

Equació 11-3-8: Paràmetres de la columna C-301 obtinguts realment.

Paràmetres columna	C-301
Nº de plats	15
Plat de l'aliment	7
Pressió d'operació (bar)	1
Cabal de Caps (kg/h)	9854
Cabal de cues (kg/h)	625,7
Temperatura reboiler (°C)	184,2

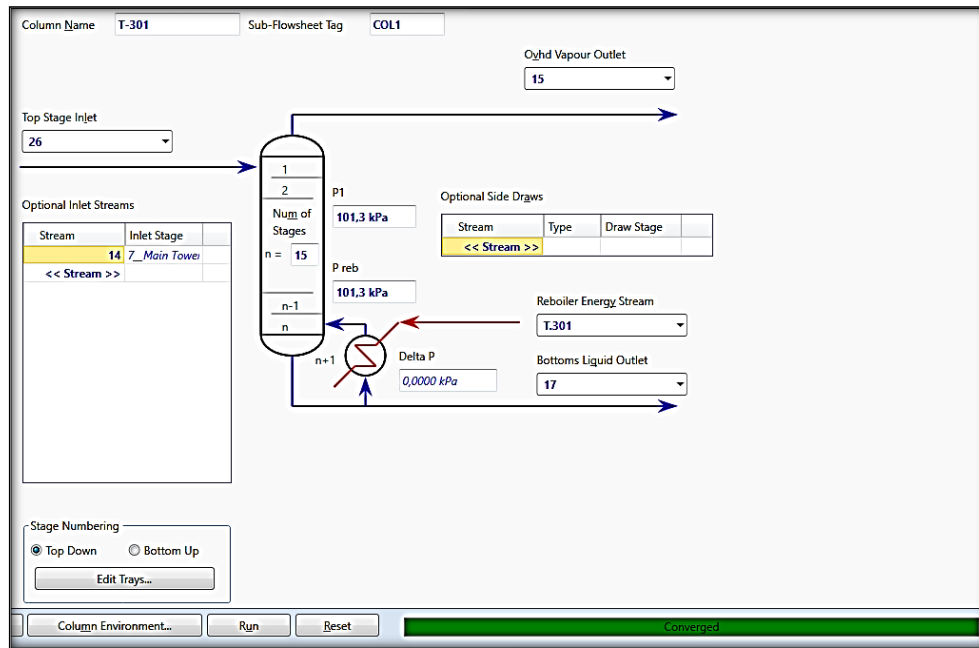


Figura 11-3-1: Figura extreta del ASPEN HYSYS.

Amb aquests paràmetres s'han obtingut les següents composicions:

Equació 11-3-9: Composició dels components per caps.

Component caps	Composició (molar)
Anilina	0,6527
Fenol	0,0296
Amoníac	0,0872
Aigua	0,0705
Benzè	0,1600

Equació 11-3-10: Composició dels components per cues.

Component cues	Composició (molar)
Anilina	0,9477
Fenol	0,0523
Amoníac	0
Aigua	0
Benzè	0

Com s'observa el residu de cues surt anilina i fenol que el que es vol obtenir per tal de separar en la última fase, pel contrari es perd anilina per la part de caps, per corregir aquest problema s'ha dissenyat dues unitats d'operació que permetran separar i obtenir anilina i fenol.

11.3.3.1.2 DISSENY MECÀNIC C-301

L'eina "equipment design" del ASPEN HYSYS® permet el disseny de les columnes , tot i així, el gruix del material i del aïllant s'han calculat pel AMSE.

Totes les columnes de rectificació s'han dissenyat amb rebliment degut a la seva gran eficiència davant les pèrdues de pressió, per tant és aconsellable quan es treballa al buit, en aquesta columna, tot i que, no es treballi al buit, s'ha escollit igualment aquest tipus de rebliment per l'eficiència de separació ja que actualment s'utilitzen gairebé sempre aquest tipus de columnes.

- **Pressió i temperatura de disseny**

Amb l'equació 1 i 2 s'han calculat la temperatura i la pressió de disseny.

Taula 11-3-11: Temperatura i pressió de disseny de la C-301.

Temperatura(°C)	Pressió (bar)
191.6	1.1

- **Dimensionament de la columna (dades HYSYS)**

Amb l'eina "equipment design" del ASPEN HYSYS® s'han calculat els valors següents de la columna C-301.

Taula 11-3-12: Dades de la columna C-301.

Dades	
Diàmetre de la columna (m)	1
Altura de la columna (m)	8,5
Altura capçal (m)	0,25
Índex d'inundació màxima (%)	50
Tipus de rebliment	Mellapack™(estructurat) 250 Y

HETP (m)	0,49
----------	------

Resultats hidràulics obtinguts a partir del *ASPEN HYSYS*®

Hydraulic Results	
Max Flooding [%]	45,40
Section DeltaP [kPa]	1,567
DP per Length [kPa/m]	0,2049
Flood Gas Vel. [m3/h-m2]	1,114e+004
Flood Gas Vel. [m/s]	3,094

Figura 11-3-2: Resultats hidràulics.

- **Càlcul del gruix de carcassa i de capçal per pressió interna**

L'eina "equipment design" no ha permès el càlcul de dels gruixos per tant s'ha optat pel mètode *ASME* per tal de calcular aquests paràmetres.

Aquest mètode consta de dues parts:

1- Càlcul del gruix per pressió interna de la carcassa en aquest cas **cilíndrica**.

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P}$$

Equació 11-3-6: Càlcul del gruix de la virola.

On :

- P (pressió de disseny): 1 bar
- R (radi de la columna)=500 mm
- S(Esforç del material AISI 316)= 996,29 bar a la temperatura de disseny
- E (eficiència de la junta): 0,85

$$t = \frac{1 \cdot 500}{996,29 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 1} = 0,6 \text{ mm}$$

En aquest cas, s'ha de tenir en compte el gruix mínim de la columna que és el gruix necessari per a que pugui aguantar el seu propi pes i qualsevol càrrega addicional. Per tant, s'han utilitzats valors de referència segons el diàmetre de columna, per tant per

un diàmetre de 1 m el gruix mínim és de 5mm tenint en compte que 2 mm corresponen al gruix per corrosió .

$$t_{TOTAL} = t + 5 = 5,6 \text{ mm} \approx 6 \text{ mm de gruix total de carcassa}$$

2- Càlcul del gruix de capçal per pressió interna, per un capçal **hemisfèrica**.

Com que es treballa a pressió atmosfèrica s'ha escollit un capçal el·lipsoïdal que suporta fins a 15 bar de pressió interna.

$$t = \frac{PR}{2SE - 0,8P}$$

Taula 11-3-7: Càlcul del gruix de capçal.

On

- P (pressió de disseny): 1 bar
- R(radi de la columna): 500 mm
- S (Esforç del material acer AISI 316): 996,6 bar (a la temperatura de disseny)
- E (eficiència de la junta): 0,85

$$t = \frac{1 \cdot 500}{2 \cdot 996,29 \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 1} = 0,32 \text{ mm}$$

Per tant gruix total $t_{Total} = 5 + 0,32 = 5,32 \text{ mm} \approx 5 \text{ mm de gruix total de capçal}$

En aquest cas com la pressió interna no es menor a la externa no s'ha de calcular el gruix per pressió externa.

11.3.3.2 COLUMNA FLASH V-302

En aquesta columna l'objectiu principal és extreure part de l'aigua i amoníac per tal d'obtenir anilina, benzè i fenol , tot i que aquesta etapa no es del tot efectiva , suposa treure part d'aquests compostos per facilitar posteriorment la separació següent.

Com s'ha esmentant anteriorment és una columna que treballa amb una sola etapa d'equilibri i proporciona una separació per volatilitats.

On el component *Heavy Key* és el fenol.

Taula 11-3-13: Volatilitat dels components.

COMPONENTS	K	α
FENOL	$3,162 \cdot 10^{-2}$	1
AMONÍAC	34,74	1.098,67
ANILINA	$5,023 \cdot 10^{-2}$	1,58
AIGUA	3,507	110,91
BENZÈ	2,673	84,535

El més volàtil com es pot veure és l'amoníac seguidament de l'aigua i el benzè per tant seran els tres components que s'esperen que sortiran majoritàriament per caps.

- **Característiques del aliment**

Taula 11-3-14: Volatilitat dels components.

Component	Composició (molar)
Anilina	0,6527
Fenol	0,0296
Amoníac	0,0872
Aigua	0,0705
Benzè	0,1600

- **Composició de la separació**

Taula 11-3-15: Composició molar de caps.

Component per caps	Composició (molar)
Anilina	0,0390
Fenol	0,011
Amoníac	0,4527
Aigua	0,1737
Benzè	0,3335

Taula 11-3-15: Composició molar de cues.

Component per cues	Composició (molar)
Anilina	0,7773
Fenol	0,0354
Amoníac	0,0130
Aigua	0,0495
Benzè	0,1247

11.3.3.2.1 DIMENSIONAT V-302

El programa *ASPEN HYSYS*® permet dimensionar i dissenyar fàcilment les columnes de separació flash.

- **Dades de dimensionament del HYSYS**

Taula 11-3-16: Dades de dimensionament del Hysys.

Dimensionat	
Diàmetre (m)	0,8
Altura (m)	4
L/D	5
Velocitat de vapor màxima admissible(m/s)	3,2
Altura líquid (m)	1,8

- **Dades de construcció del HYSYS**

Taula 11-3-17: Dades de construcció del Hysys.

Característiques	
Tipus de material	AISI 316
Densitat massica (kg/m ³)	8027
Tensió admissible (KPa)	9,170·10 ⁴
Espessor de carcassa (mm)	6
Altura del capsal (m)	0,3
Corrosió admissible (mm)	3

En aquest equip s'ha escollit l'acer AISI 316L degut a la seva resistència davant la corrosió ja que en aquest procés s'estan tractant amb compostos corrosius.

- **Pressió de disseny**

Pel càlcul de la pressió de disseny s'utilitzen la següent equació:

On la $P_{operació} = 1 \text{ bar}$

$$P_{disseny,1} = 1,1 \cdot 1 = 1,1 \text{ bar}$$

La pressió de disseny serà **1,1 bar**.

- **Temperatura de disseny**

Com en el cas de la columna flash hi ha la mateixa temperatura per la part superior que la inferior, la temperatura d'operació és de 110,71°C.

Com que el *ASPEN HYSYS*® no calcula el gruix del capçal s'ha de fer pel mètode ASME.

- **Capçal i espessor del capçal**

Es tria un capçal amb **geometria el·lipsoïdal (forma del capçal donada per "l'equipment design")**, s'ha calculat el espessor d'aquest mitjançant la fórmula per la geometria triada:

$$t = \frac{P \cdot D}{2SE - 0,2P} + C1 = \frac{1,1 \cdot 800}{2 \cdot 1.227,26 \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 1,1} = 0,84 \text{ mm} + 3 = 3,84 \text{ mm} \approx 4 \text{ mm de gruix}$$

On $C1=3 \text{ mm}$, $D=800 \text{ mm}$ $S=1.227,26$ (Esforç màxim permisible a la temperatura de disseny) $E=0,85$ (eficàcia de la junta)

- **Altura de la columna**

Es calcula a partir de la següent equació:

$$H_{total} = H + (2 \cdot H_{capsal}) = 4 \text{ m} + (2 \cdot 0,3) = 4,6 \text{ m} \approx 5 \text{ m d'altura total} \quad \text{On}$$

H_{Total} : Altura total de la columna (m), H : Altura de la columna (m) i $H_{capçal}$: Altura del capçal (m).

L'altura total de la columna flash és aproximadament 5 m.

11.3.3.3 COLUMNA AL BUIT C-302

En aquest penúltim pas de separació, el corrent d'entrada a la columna és pobre en amoníac i aigua prèviament separats pel separador flash.

En aquest cas, l'objectiu principal de la separació serà extreure el benzè i la resta d'impureses que no s'han aconseguit separar per tal d'obtenir anilina i fenol lliures.

Un dels mètodes que s'utilitzen a l'indústria per la separació de aquest azeòtrop és la separació per columna de destil·lació amb diversos plats, entre 15-50 plats al buit amb una relació de reflux de 20:1. En aquest cas s'ha simulat aquest disseny amb l'eina *ASPEN HYSYS*® per la separació de l'anilina, però s'ha obtingut uns valors de separació no desitjats .

Mitjançant l'eina "shortcut" s'han obtingut diversos valors que ens permetran després fer el càlcul rigorós per tal d'obtenir la separació desitjada.

- **Característiques de l'aliment:**

Taula 11-3-17: Característiques del aliment.

Component	Composició (molar)
Anilina	0,7773
Fenol	0,0354
Amoníac	0,0230
Aigua	0,0495
Benzè	0,1247

Cabal d'entrada del corrent de la mescla es de 103,9 kmol/h a una temperatura de 176,5°C i una pressió d'0,8 bar.

11.3.3.3.1 DIMENSIONAT C-302

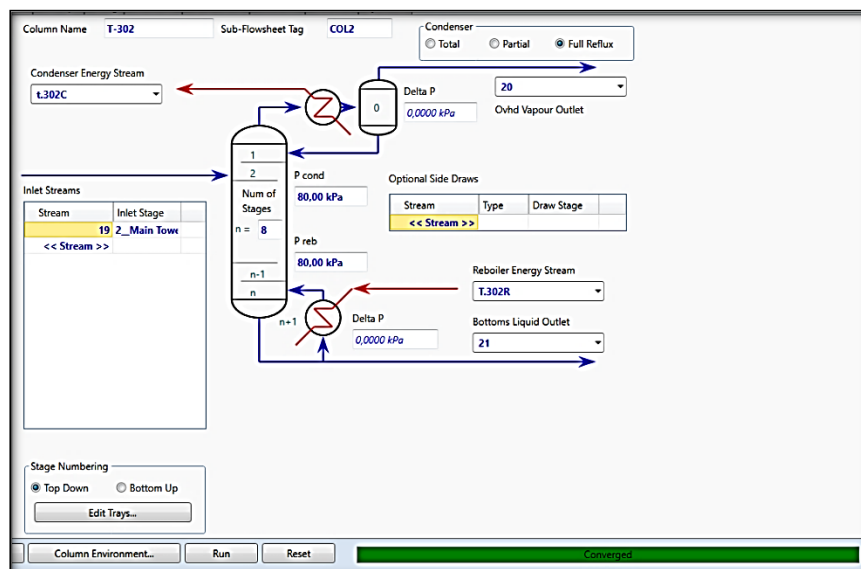
Taula 11-3-18: Dimesnionat C-302.

Paràmetres columna	C-302
Nº de plats mínim	8
Plat de l'aliment	4
Pressió d'operació (bar)	0,8
Relació de reflux mínima	3,8
Temperatura calderí (°C)	10,95
Temperatura conden. (°C)	175,4

Aquest són els paràmetres obtinguts pel mètode *shortcut*, a continuació es presenten els valors reals obtinguts per aquest tipus de columna.

Taula 11-3-19: Paràmetres obtinguts de la columna C-302.

Paràmetres columna	C-302
Nº de plats	8
Plat de l'aliment	2
Pressió d'operació (bar)	0,8
Relació de reflux	6
Cabal de Caps (kg/h)	1357
Cabal de cues (kg/h)	7640
Temperatura calderí (°C)	175,4
Temperatura conden. (°C)	113,3



Amb aquests paràmetres s'han obtingut les següents composicions:

Taula 11-3-20: Composició molar per caps.

Component caps	Composició (molar)
Anilina	0,1097
Fenol	0,0022
Amoníac	0,0618
Aigua	0,2348
Benzè	0,5916

Taula 11-3-21: Composició molar per cues.

Component cues	Composició (molar)
Anilina	0,9557
Fenol	0,0443
Amoníac	0
Aigua	0
Benzè	0

Com s'observa, el residu de cap surt anilina i fenol, amb aquestes condicions és la màxima separació que es pot obtenir si el que es vol per cues sigui només anilina i fenol, després el corrent de caps juntament amb el corrent de cues del segon separador flash (V-302) s'hauran de tractar per evitar el mínim impacte ambiental degut a que l'anilina es un producte bastant tòxic.

11.3.3.3.2 DISSENY MECÀNIC

Igualment que a la columna C-301 l'eina "*equipment design*" del ASPEN HYSYS® ha permès el disseny de les columnes .

Com s'ha esmentat anteriorment les columnes són de rebliment estructurat per tal d'obtenir una millor eficiència, un altre dels motius per haver escollit aquest tipus de columnes és que com treballa en condicions de buit la pèrdua de pressió és menor que amb la utilització de plats.

- **Pressió i temperatura de disseny**

Amb l'equació 1 i 2 s'han calculat la temperatura i la pressió de disseny.

Taula 11-3-22: Temperatura i pressió de disseny.

Temperatura(°C)	Pressió (bar)
191	1

La pressió de disseny en aquest cas de columnes al buit es fa per un 1 bar de pressió.

- **Dimensionament de la columna (dades HYSYS)**

Amb l'eina "equipment design" del ASPEN HYSYS® s'han calculat els valors següents de la columna C-302.

Taula 11-3-23: Dimensionament de la columna C-302.

Dades	
Diàmetre de la columna (m)	1,5
Altura de la columna (m)	5
Altura del capçal (m)	0,5
Índex d'inundació màxima (%)	45,40
Tipus de rebliment	Mellapac (estructurat) 250
HETP (m)	0,55

A continuació es presenten els resultats hidràulics (ASPEN HYSYS®)

Hydraulic Results	
Max Flooding [%]	55,63
Section DeltaP [kPa]	1,145
DP per Length [kPa/m]	0,2807
Flood Gas Vel. [m3/h-m2]	1,630e+004
Flood Gas Vel. [m/s]	4,527

Taula 11-3-3: Resultats hidràulics.

- **Càlcul del gruix de carcassa i de capça per pressió interna**

El càlcul del gruix s'ha fet mitjançant el mètode ASME.

Es calcularà de la mateixa forma que s'ha fet per la columna C-301.

Aquest mètode consta de dues parts:

- 1- Càlcul de gruix per pressió interna de la carcassa en aquest cas **cilíndrica**.

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P}$$

Equació 11-3-9: Càlcul del gruix de virola.

On :

- P (pressió de disseny): 1 bar
- R (radi de la columna)=750 mm
- S(Esforç del material AISI 316 a la temperatura de disseny)= 1075 bar a la temperatura de disseny
- E (eficiència de la junta): 0,85

$$t = \frac{1 \cdot 750}{1075 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 1} = 0,82 \text{ mm}$$

En aquest cas s'ha de tenir en compte el gruix mínim de la columna que és el gruix necessari per a que pugui suportar el seu propi pes i qualsevol càrrega addicional, per tant s'han utilitzats valors de referència segons el diàmetre de columna, per tant per un diàmetre de 1,5 m el gruix mínim es de 7mm tenint en compte que 2 mm corresponen al gruix per corrosió .

$$t_{TOTAL} = t + 7 = 7,8 \text{ mm} \approx 8 \text{ mm de gruix total de carcassa}$$

2- Càlcul del gruix de capçal per pressió interna, per un capçal **hemisfèrica**.

$$t = \frac{PR}{2SE - 0,8P}$$

Taula 11-3-10: Càlcul del gruix de capçal.

On

- P (pressió de disseny): 1 bar
- R(radi de la columna): 750 mm
- S (Esforç del material acer AISI 316 a la temperatura de disseny): 1075 bar (a la temperatura de disseny)
- E (eficiència de la junta): 0,85

$$t = \frac{1 \cdot 750}{21075 \cdot 0,85 - 0,8 \cdot 1} = 0,45 \text{ mm}$$

Per tant gruix total $t_{Total} = 7 + 0,45 = 7,45 \text{ mm} \approx 8 \text{ mm de gruix total de capçal}$

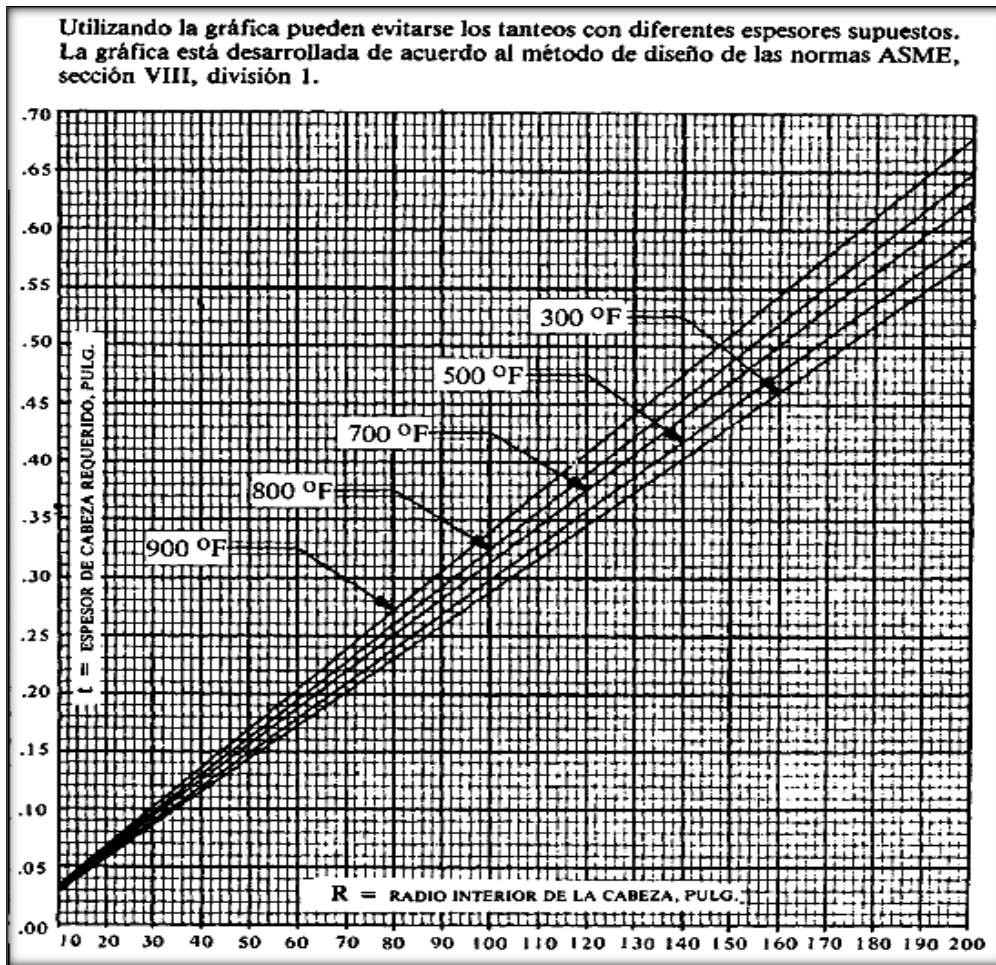
En aquest cas com la pressió interna és menor a la externa s'ha de calcular el gruix per pressió externa.

- **Càlcul del gruix del capçal i de la carcassa per pressió externa**

En aquest cas per pressió interna també es calcula per dos passos, però de diferent forma ja que primer s'ha de suposar un gruix per tal de trobar una pressió que no sigui menor a la de disseny.

1- Càlcul del gruix de la carcassa:

- Suposar un gruix (en aquest cas com és una columna al buit la gràfica següent permet estimar un valor de gruix)



Gràfic 11-3-1. Aproximació de gruix per pressió externa.

- **Càlcul gruix**

Per un radi de 750 mm = 29,52 polzades per una temperatura aproximada de 300°F el gruix és de 0,08 polzades = 2mm, aquest serà el valor que s'ha escollit com a valor per calcular la pressió .

Per una carcassa cilíndrica:

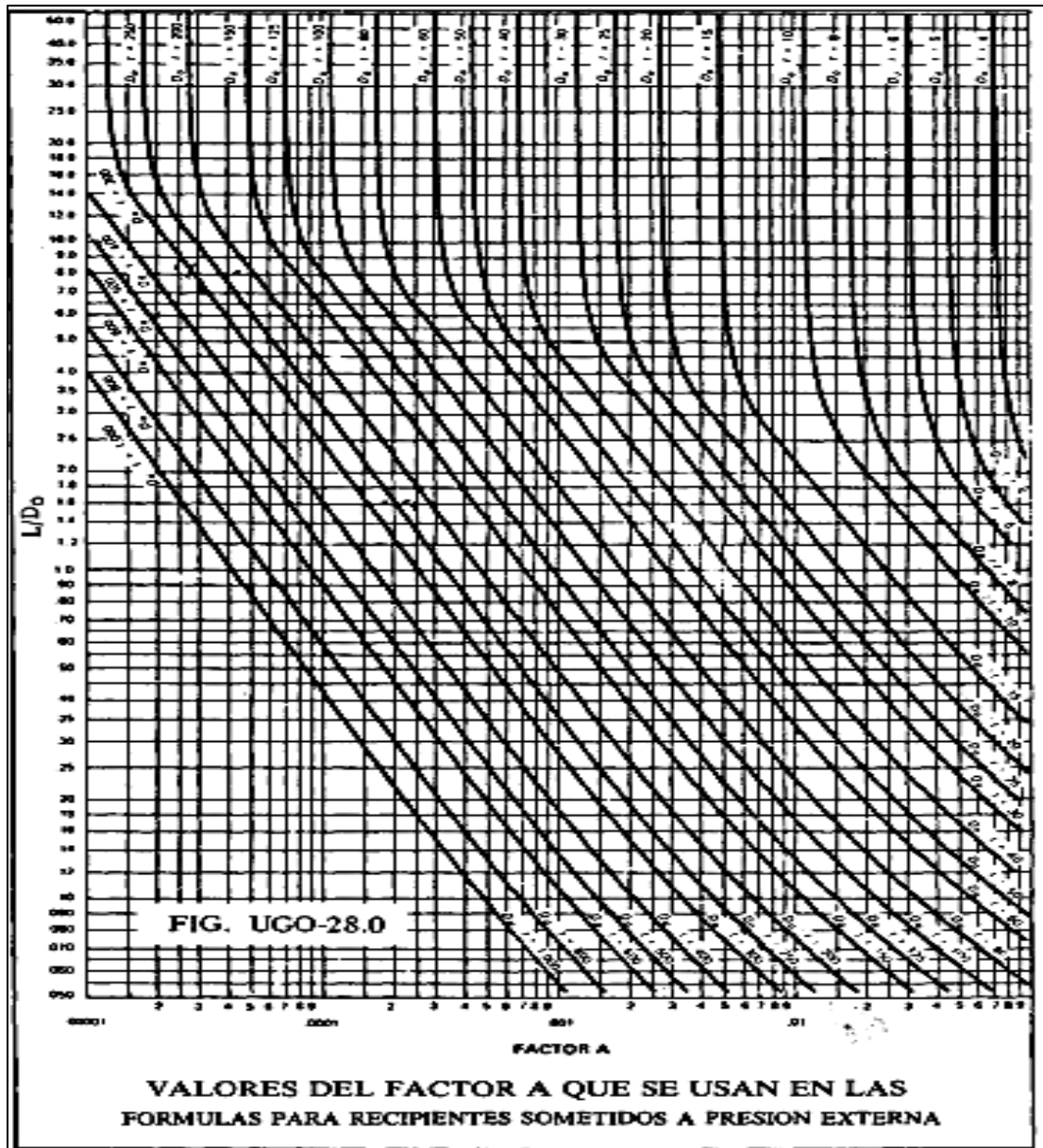
$$Pa = \frac{4B}{3 \cdot \left(\frac{DO}{t}\right)}$$

On:

B(factor que s'ha obtingut per la gràfica **Gràfic 11-3-3**)

D_0 (diàmetre intern de la columna + el gruix sense tenir en compte el gruix mínim)=1502mm

T(el gruix trobat per la gràfica)=2 mm



Gràfic 11-3-2.Valors de factor A.

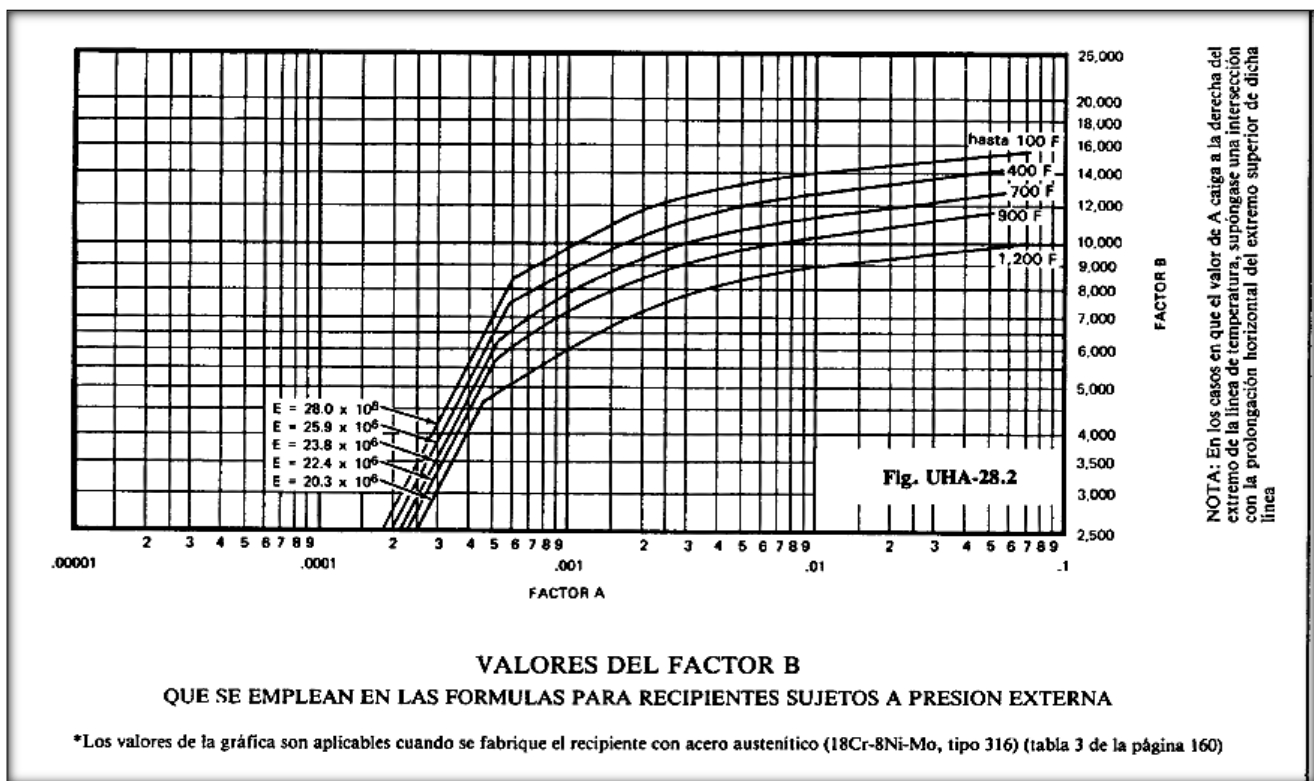
Per calcular B , primer s'ha de trobar A , amb la gràfica 11-3-2, llavors es necessita saber:

Taula 11-3-23

Do/t	L/Do
170	3,43

On L es el valor de la llargada de la columna més una tercera part de l'alçada del capçals $L = 5000mm + \left(\frac{1}{3}\right) * 500 = 5166,67 mm$

Llegint a la **gràfica 11-3-1** $A=0,001$



Gràfic 11-3-3.Valors del factor B.

Per trobar B , amb el valor de A, i amb el valor de la Elasticitat del material que per l'acer AISI 316L és de 2,000,000 , és pot trobar el factor B però com el valor de A cau a l'esquerra de la gràfica la pressió s'ha de calcular per aquesta altra fórmula:

$$Pa = \frac{2AE}{3\left(\frac{Do}{t}\right)}$$

Taula 11-3-11: Càlcul de pressió.

On E és l'elasticitat del material (AISI 316): 2.000.000

$$Pa = \frac{2 \cdot 0,0001}{3\left(\frac{1502}{9}\right)} = 0,17 \text{ bar}$$

Com que la pressió es menor que la de disseny s'han d'afegir anelles de rigidesa que suporten la diferència de pressió i el pes de la columna, per tant s'afegeixen dos d'aquests anells per tant ara L s'haurà de dividir entre 3 perquè seran les zones que quedaran dividies per aquests dos anelles.

- **L:** 1750 mm
- **Do/t:** 167 (en aquest cas t s'han tingut en compte els 2mm suposats més els 7 mm de gruix mínim)
- **L/Do:** 1,16

Llavors mirant a la gràfica ... es trobà el valor de A que en aquest cas correspon a 0.0003 per una E de 2.000.000 el valor de B correspon a 6000 per tant amb l'equació ...

$$Pa = \frac{4 \cdot 6000}{3 \cdot (167)} = 47,77 \text{ bar}$$

Per tant com la pressió és major que la pressió de disseny necessitarem un gruix de carcassa de 9mm i dos anelles de rigidesa.

2- Càlcul del gruix de capçal per pressió externa

En aquest cas, el gruix de capçal és calcula de la mateixa forma que per pressió interna, la diferència es que el valor de eficàcia de la junta en aquest cas és 1.

$$t = \frac{PR}{2SE - 0,8P} = \frac{1 \cdot 750}{2 \cdot 1 \cdot 1075 - 0,8 \cdot 1} = 0,60 \text{ mm}$$

$$t_{\text{TOTAL}} = 7 + 0,60 = 7,60 \text{ mm} \approx 8 \text{ mm totals de gruix de capçal}$$

Per tant els gruixos per dissenyar la columna han de ser els valors més grans, és a dir els calculats per pressió externa.

Taula 11-3-24: Resultats obtinguts.

Gruix carcassa (mm)	Gruix capçal (mm)
9	8

Com s'han afegit dues anelles de rigidesa, s'ha de saber si aquestes suportaran el pes de la part que subjecten, per fer-ho s'ha utilitzat el mètode ASME :

1- Càlcul de la inèrcia:

$$I_v = \frac{\pi}{64} \cdot (D_o^4 - D_i^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (1509^4 - 1500^4) = 6,02 \cdot 10^9 \text{mm}^4$$

2- Càlcul de la inèrcia pel mètode ASME:

$$I_v = \frac{D_o^2 \cdot L_s \cdot \left(t + \frac{A_s}{L_s}\right) \cdot A}{10,9}$$

On

- A_s (àrea de la secció transversal): 1767145,868 mm²
- L_s (llargada de la zona entre anella i anella):1750 mm
- t (gruix)=9 mm
- A (Factor determinat per la gràfica 11-3-1):0.003

Llavors :

$$I_v = \frac{1509^2 \cdot 1750 \cdot \left(9 + \frac{1767145,868}{1750}\right) \cdot 0.003}{10,9} = 1,12 \cdot 10^9 \text{mm}^4$$

Per tant, com el moment d'inèrcia calculat pel mètode ASME és menor que el calculat amb l'equació 1 la rigidesa del casc es satisfactòria.

11.3.3.4 COLUMNA AL BUIT C-303.

Per últim un cop separat les impureses del fenol i l'anilina en la columna al buit C-302 i el corrent per cues de la C-302, aquests corrent es mesclen i porten a una última columna al buit que permetrà fer la separació de l'anilina del fenol, un dels problemes que presenta aquesta separació és la formació d'un altre azeòtrop anilina-fenol.

Per poder separar aquest tipus d'azeòtrop s'ha optat per una columna al buit, tot i que la separació no és del tot efectiva s'obté una anilina d'una puresa del 99,26% .

Mitjançant l'eina "shortcut" com en la resta de les columnes s'han obtingut diversos valors que ens permetran després fer el càlcul rigorós per tal d'obtenir la separació desitjada.

- **Característiques de l'aliment:**

Taula 11-3-25: Composició molar de l'aliment.

Component	Composició (molar)
Anilina	0,9551
Fenol	0,0449
Amoníac	0
Aigua	0
Benzè	0

Cabal d'entrada del corrent de la mescla es de 88,72 kmol/h a una temperatura de 125,4°C i una pressió d'0,8 bar.

11.3.3.4.1 DIMENSIONAT C-303
Taula 11-3-26: Paràmetres de la C-302.

Paràmetres columna	C-302
Nº de plats mínim	3,6
Nº de plats	19
Plat de l'aliment	10
Pressió d'operació (bar)	0,2
Relació de reflux mínima	6
Temperatura calderí (°C)	10,53
Temperatura conden. (°C)	150

Aquest són els paràmetres obtinguts pel mètode *shortcut*, a continuació es presenten els valors reals obtinguts per aquest tipus de columna.

Taula 11-3-27: Paràmetres de la C-302.

Paràmetres columna	C-302
Nº de plats	26
Plat de l'aliment	13
Pressió d'operació (bar)	0,07
Relació de reflux	9
Cabal de Caps (kg/h)	7705
Cabal de cues (kg/h)	560,7
Temperatura calderí (°C)	103,2
Temperatura conden. (°C)	100,4

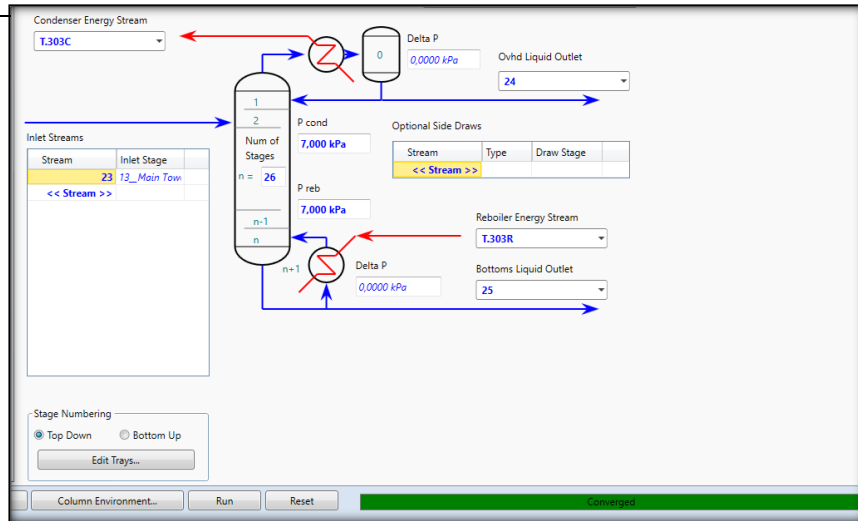


Figura 11-3-4: Captura de pantalla del Hysys.

Amb aquests paràmetres s'han obtingut les següents composicions:

Taula 11-3-28: Composició molar de components de caps.

Component caps	Composició (molar)
Anilina	0,9927
Fenol	0,0073
Amoníac	0
Aigua	0
Benzè	0

Taula 11-3-29: Composició molar de cues.

Component cues	Composició (molar)
Anilina	0,4350
Fenol	0,5650
Amoníac	0
Aigua	0
Benzè	0

Com s'observa al corrent de caps gairebé surt tot anilina tot i que es perd per cues degut a la formació d'aquest azeòtrop que ha dificultat aquesta separació, per tant per no perdre aquesta anilina i fenol , s'ha decidit recircular el corrent de cues cap al

reactor ja que això disminuirà la quantitat de fenol necessària que s'haurà d'aportar al reactor.

- **Puresa del producte**

$$Puresa (\%) = \frac{(massa\ producte)}{(massa\ total)} \cdot 100 = \frac{7648,4}{7705} \cdot 100 = 99,26\%$$

- **Rendiment de les etapes de separació**

$$Rendiment (\%) = \frac{massa\ final\ producte}{massa\ inicial\ producte} \cdot 100 = \frac{7648,4}{9424,76} \cdot 100 = 81,16$$

$\approx 81\%$ de rendiment de les etapes de separació

11.3.3.4.2 DISSENY MECÀNIC

Igualment que a la columna C-301 l'eina "equipment design" del ASPEN HYSYS® ha permès el disseny de les columnes .

En aquest cas com es tracta d'una columna al buit el rebliment que s'ha escollit estructurat ja que dona millor eficiència com s'ha esmentat anteriorment.

- **Pressió i temperatura de disseny**

Amb l'equació 1 i 2 s'han calculat la temperatura i la pressió de disseny.

Taula 11-3-30: Temperatura i pressió de disseny.

Temperatura(°C)	Pressió (bar)
140,4	1

La pressió de disseny en aquest cas de columnes al buit es fa per un 1 bar de pressió.

- **Dimensionament de la columna (dades HYSYS)**

Amb l'eina "equipment design" del ASPEN HYSYS® s'han calculat els valors següents de la columna C-303.

Taula 11-3-31: Dades de disseny la C-303.

Dades	
Diàmetre de la columna (m)	3
Altura de la columna (m)	23
Altura del capçal (m)	0,5
Índex d'inundació màxima (%)	57,75
Tipus de rebliment	Mellapac 250 (estructurat)
HETP (m)	0,8969

A continuació es presenten els resultats hidràulics de la columna que s'han obtingut mitjançant l'eina "equipment design" del ASPEN HYSYS®:

Hydraulic Results	
Max Flooding [%]	57,76
Section DeltaP [kPa]	8,390
DP per Length [kPa/m]	0,3598
Flood Gas Vel. [m3/h-m2]	5,615e+004
Flood Gas Vel. [m/s]	15,60

Taula 11-3-32: Resultats hidràulics.

- **Càlcul del gruix de carcassa i de capça per pressió interna**

El càlcul del gruix s'ha fet mitjançant el mètode ASME.

Es calcularà de la mateixa forma que s'ha fet per la columna C-301.

Aquest mètode consta de dues parts:

3- Càlcul de gruix per pressió interna de la carcassa en aquest cas **cilíndrica**.

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P}$$

Equació 11-3-12: Càlcul del gruix de virola.

On :

- P (pressió de disseny): 1 bar
- R (radi de la columna)=1900 mm
- S(Esforç del material AISI 316)= 1151 bar a la temperatura de disseny
- E (eficiència de la junta): 0,85

$$t = \frac{1 \cdot 1900}{1151 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 1} = 1,94 \text{ mm}$$

Com amb les altres columnes s'ha tingut en compte el gruix mínim que ha de tenir per suportar la seva càrrega i càrregues addicionals, en aquest cas el gruix mínim pel diàmetre de columna és de 12mm que ja inclou 2mm per el gruix de corrosió admissible.

$$t_{\text{TOTAL}} = t + 12 = 13,94 \text{ mm} \approx 14 \text{ mm de gruix total de carcassa}$$

4- Càlcul del gruix de capçal per pressió interna, per un capçal **hemisfèrica**.

$$t = \frac{PR}{2SE - 0,8P}$$

Taula 11-3-13: Càlcul del gruix del capçal.

On

- P (pressió de disseny): 1 bar
- R(radi de la columna): 1900 mm
- S (Esforç del material acer AISI 316): 1150 bar (a la temperatura de disseny)
- E (eficiència de la junta): 0,85

$$t = \frac{1 \cdot 1900}{2 \cdot 1150 \cdot 0,85 - 0,8 \cdot 1} = 0,97 \text{ mm}$$

Per tant gruix total

$$t_{\text{Total}} = 12 + 0,97 = 12,97 \text{ mm} \approx 13 \text{ mm de gruix total de capçal}$$

En aquest cas com la pressió interna és menor a la externa s'ha de calcular el gruix per pressió externa.

- **Càlcul del gruix del capçal i de la carcassa per pressió externa**

En aquest cas com a la columna C-302 per pressió externa també es calcula per dos passos, però de diferent forma ja que primer s'ha de suposar un gruix per tal de trobar una pressió que no sigui menor a la de disseny.

3- Càlcul del gruix de la carcassa:

Suposar un gruix (en aquest cas com és una columna al buit la **gràfica 11-3-1** permet estimar un valor de gruix)

Per un radi de 1900 → 0,22 inch de gruix

- **Càlcul gruix**

Per un radi de 1900 mm= 74,80 polzades per una temperatura aproximada de 284°F aproximadament 300°F el gruix és de 0,22 polzades = 5,6mm, aquest serà el valor que s'ha escollit per la **gràfica 11-3-1** com a valor per calcular la pressió .

Per una carcassa cilíndrica:

$$Pa = \frac{4B}{3 \cdot \left(\frac{DO}{t}\right)}$$

Equació 11-3-14: Càlcul de la pressió de disseny.

On:

B(factor que s'ha obtingut per la **gràfica 11-3-3**)

DO(diàmetre intern de la columna + el gruix sense tenir en compte el gruix mínim)=5021mm

t(el gruix trobat per la **gràfica 11-3-1**)=7,36 mm

Per calcular B , primer s'ha de trobar A , amb la **gràfica 11-3-2**, llavors es necessita saber:

Taula 11-3-33

Do/t	L/Do
680	5,8

On L es el valor de la llargada de la columna més una tercera part de l'alçada del capçals $L = 22000mm + \left(\frac{1}{3}\right) * 500 = 22166mm$

Llegint a la gràfica 11-3-1 $A=0,000015$

Per trobar B , amb el valor de A i amb el valor de la Elasticitat del material (E) que per l'acer AISI 316 és de 2,000,000 , és pot trobar el factor B però com el valor de A cau a l'esquerra de la gràfica la pressió s'ha de calcular per aquesta altra fórmula:

$$Pa = \frac{2AE}{3\left(\frac{Do}{t}\right)}$$

Equació 11-3-15: Càlcul de la pressió.

On E és l'elasticitat del material (AISI 316): 2.000.000

$$Pa = \frac{2 \cdot 0,000015 \cdot 2.000.000}{3(680)} = 0,029bar$$

Com que la pressió es menor que la de disseny com ha succeït a la columna C-302 s'han d'afegir anelles de rigidesa que suporten la diferència de pressió i el pes de la columna, per tant s'afegeixen dos d'aquests anells per tant ara L s'haurà de dividir entre 3 perquè seran les zones que quedaran dividides per aquests dos anelles.

- L: 7416,67 mm
- Do/t:201 (en aquest cas t s'ha suposat per un gruix de 19 mm mínim)
- L/Do:1,94

Llavors mirant a la **gràfica 11-3-2** es trobà el valor de A que en aquest cas correspon a 0.0035 per una E de 2.000.000 el valor de B correspon a 3500 .

$$Pa = \frac{4 \cdot 3500}{3 \cdot (201)} = 23,21 \text{ bar}$$

Per tant com la pressió és major que la pressió de disseny necessitem un gruix de carcassa de 19 mm i dos anelles de rigidesa.

4- Càlcul del gruix de capçal per pressió externa

En aquest cas el gruix de capçal es calcula de la mateixa forma que per pressió interna, la diferència és que el valor de eficàcia de la junta en aquest cas és 1.

$$t = \frac{PR}{2SE - 0,8P} = \frac{1,67 \cdot 1900}{2 \cdot 1 \cdot 1150 - 0,8 \cdot 1,67} = 1,4 \text{ mm}$$

$$t_{\text{TOTAL}} = 12 + 1,4 = 13,4 \text{ mm} \approx 15 \text{ mm totals de gruix de capçal}$$

Per tant els gruixos per dissenyar la columna han de ser els valors més grans, és a dir els calculats per pressió externa.

Taula 11-3-34: Resultat de gruixos.

Gruix carcassa (mm)	Gruix capçal (mm)
19	15

Com s'han afegit dues anelles de rigidesa, s'ha de saber si aquestes suportaran el pes de la part que subjecten, per fer-ho s'ha utilitzat el mètode ASME :

3- Càlcul de la inèrcia:

$$Iv = \frac{\pi}{64} \cdot (Do^4 - Di^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (3819^4 - 3800^4) = 2,06 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4$$

Equació 11-3-16.

4- Càlcul de la inèrcia pel mètode ASME:

$$I_v = \frac{D_o^2 \cdot L_s \cdot \left(t + \frac{A_s}{L_s}\right) \cdot A}{10,9}$$

Equació 11-3-17

On

- As(àrea de la secció transversal): 11341149,5mm²
- Ls (llargada de la zona entre anella i anella):7416 mm
- t(gruix)=19 mm
- A(Factor determinat per la **gràfica 11-3-2**):0.0035

Llavors :

$$I_v = \frac{3819^2 \cdot 7416 \cdot \left(9 + \frac{11341149,5}{7416}\right) \cdot 0.0035}{10,9} = 5,38 \cdot 10^{10} mm^4$$

Per tant com el moment d'inèrcia calculat pel mètode ASME és menor que el calculat amb l'equació la rigidesa del casc es satisfactòria.

- **Càrrega per vent**

Per últim s'ha de tenir en compte la càrrega per vent degut a que les torres són d'una altura considerable, per tant s'haurà d'instal·lar una estructura externa que doti al equip d'un suport extern per tal de absorbir les vibracions produïdes pel vent.

11.3.3.5 CÀLCUL DEL GRUIX DE L'AÏLLANT (V-301,V-302,C-301,C-302,C-302)

El tipus d'aïllant utilitzat serà la llana de roca degut a les temperatures que es treballen durant el procés , aquest tipus de material està indicat per temperatures mitjanes-altes.

Aquests gruixos venen definits pel fabricant i s'han calculat aproximadament de la següent forma.

Per un salt tèrmic de 160 °C el fabricant recomana un gruix de 120mm .

$$Gruix aïllant (mm) = \frac{\Delta T (del equip) * (gruix aïllant (120mm))}{\Delta T (160^{\circ}C)}$$

Equació 11-3-17: Càlcul del gruix d'aïllant.

Taula 11-3-35: Taula de resultats.

Columnes	Temperatura exterior (°C)	Temperatura interior (°C)	Gruix aïllant (mm)
V-301	20	72,98	40
V-302	20	95,71	57
C-301	20	130	83
C-302	20	176,5	117
C-303	20	125,4	79

Aquest aïllant recobreix la part externa del equip i per sobre s'inclou un xapa fina per recobrir-lo , aquesta xapa haurà de ser d'acer 316 també per tal de resistir a la corrosió oxidativa que pot suportar l'equip davant agents ambientals externs.



Figura 11-3-5



Figura 11-3-6

En aquestes imatges s'observa les estructures de la llana de roca i de la xapa de recobriments per als equips

11.3.3.6 CÀLCUL DEL PES DE L'EQUIP BUIT I EN OPERACIÓ

- **Pes de la columna buida i en operació**

$$V1 = \pi \cdot (r_{columna} + \Delta x_{acer})^2 \cdot h \text{ carcassa}$$

$$V2 = \frac{4}{3} \pi (r + \Delta x_{acer})^2 \text{ capçal hemisfèric (dels dos capçals)}$$

$$V3 = \frac{4 \cdot \pi \cdot ((a \cdot b \cdot c) \cdot \Delta x_{acer})}{3} \text{ (a, b i c els semieixos) capçal el·lipsoïdal (dels dos capçals)}$$

$$V_{total} = volum \text{ carcassa} + volum \text{ capçal}$$

Equació 11-3-18: Càlcul del volum total.

Amb la densitat de l'acer, es pot saber aproximadament quan pesarà la columna buida.

Densitat de l'acer AISI 316= 8027 kg/m³.

El pes en operació s'ha calculat de la forma següent:

Pes operació = pes buit + pes líquid on el

$$pes \text{ líquid} = \frac{volum \text{ columna buida}}{2} \cdot \rho_{líquid}$$

Equació 11-3-19: Càlcul pes líquid.

També s'haurà de tenir en compte el pes de les peces internes de les columnes com els distribuïdors, el rebliment..., per tant aquests pesos són referits al pes de la columna buida i amb líquid, per tant s'ha suposat que aquest pes està referit a un 15% del pes de la columna buida.

Per tant el pes en operació serà:

$$Pes \text{ operació} = pes \text{ buit} + pes \text{ líquid} + pes \text{ accessoris interns}$$

Equació 11-3-20: Càlcul del pes del equip en operació.

Taula 11-3-36: Resultats de pes obtinguts.

Columna	Pes de la columna buida (Kg)	Pes totals del accessoris interns(kg)
V-301	718.230	107.734
V-302	16.877	2.532
C-301	60.228	9.034
C-302	91.956	13.793
C-303	2.166.339	324.951

Taula 11-3-36A: Pes i volum del equip buit.

Carcassa				Capçal				Volums				PES BUIT	
Unitat	radi (m)	altura (m)	gruix (m)	radi (m)	a (m)	b(m)	c(m)	gruix (m)	V ₁ (m ³)	V ₂ (m ³)	V ₃ (m ³)	V _{total} (m ³)	Pes total (kg)
V-301	1,6	11	0,009	-	0,304	1,6	0,8	0,007	89,5	-	0,01141	89,5	718.230
V-302	0,4	4	0,009	-	0,3048	0,4	0,1905	0,004	2,1	-	0,00039	2,1	16.877
C-301	0,5	8	0,006	0,5	-	-	-	0,005	6,4	1,1	-	7,5	60.228
C-302	0,75	5	0,009	0,75	-	-	-	0,008	9,0	2,4	-	11,5	91.956
C-303	1,9	22	0,019	1,9	-	-	-	0,015	254,5	15,4	-	269,9	2.166.339

Taula 11-3-36B: Pes en operació.

PES EN OPERACIO (kg)			
Unitat	plíquid (kg/m ³)	Pes líquid (kg)	PES EN OPERACIÓ (Kg)
V-301	1,677	75	826.039
V-302	2,164	2	19.411
C-301	1431,25	5369	74.631
C-302	1,883	11	105.760
C-303	932,4	125819	2.617.109

11.3.3.7 ESTRUCTURA INTERNA I EXTERNA DE LES COLUMNES (C-301,C-302 , C-303,V-301 i V-302)

- **Estructura interna (C-301,C-302 i C-303)**

L'estructura interna de les columnes de destil·lació amb rebliment és senzilla però s'ha de dissenyar acuradament per tal d'obtenir un major rendiment .

- **Suports del rebliment:**

La funció principal d'aquest suport es subjectar el pes del rebliment humit mentre que permet el pas lliurement del gas i del líquid. S'utilitzen reixetes de plats perforats on es dipositarà el rebliment. S'ha tenir en compte que el disseny d'aquest suport es correcte ja que pel contrari pot causar una pèrdua de pressió elevada i una inundació local.

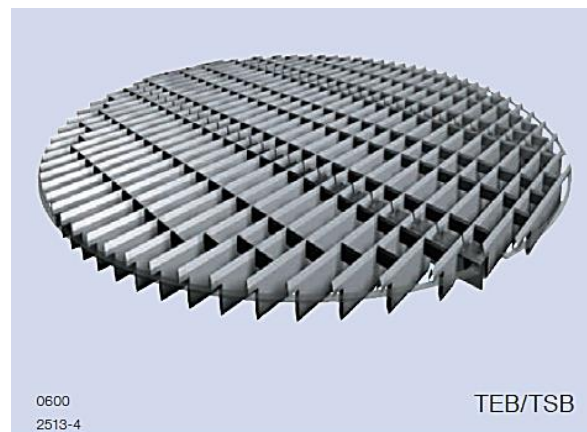


Figura 11-3-7.Suport de rebliment escollit.

- **Distribuïdors de líquid:**

Els distribuïdors de líquid permeten una disposició uniforme del líquid al llarg de la columna per tant són peces essencials que permeten una bona separació .

Alhora d'escollir el tipus de distribuïdor és important tenir en compte el diàmetre de la columna, per diàmetres petits és poden utilitzar una canonada oberta central o un dispositiu de polvorització però per columnes amb diàmetres més grans es necessiten dissenys més acurats per assegurar una bona distribució per qualsevol cabal de líquid .

Taula 11-3-37: Especificacions de les columnes

Columna	Diàmetre (m)	Càrrega específica del líquid($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$)	Tipus de distribuïdor
C-301	1	$1,11 \cdot 10^4$	VRGF
C-302	1,5	$1,63 \cdot 10^4$	VRGF
C-303	4	$5,615 \cdot 10^4$	VRGF

Amb la Taula 11-3-37 i el diàmetre de la columna es poden escollir els tipus de de distribuïdors adients en cada cas.

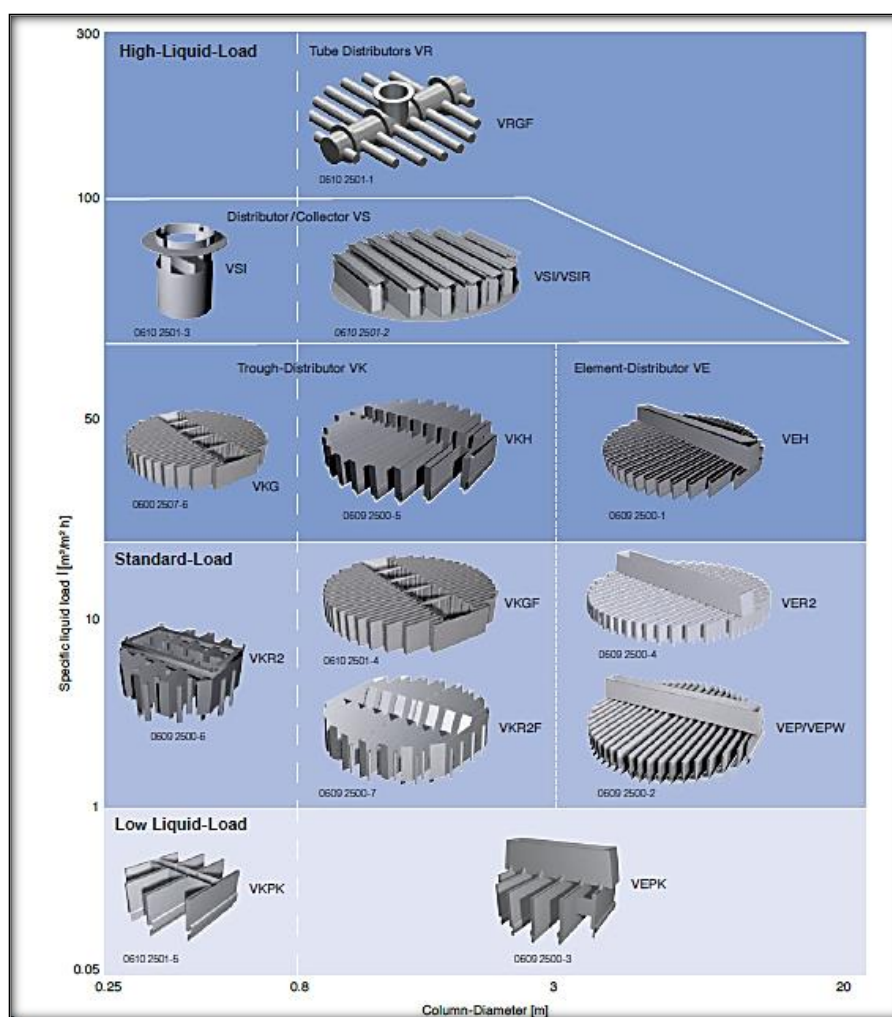


Figura 11-3-7. Tipus de distribuïdors de líquid i suports de rebliment.

Com són columnes amb una altra càrrega específica de líquid en tots els casos s'utilitzaran distribuïdors tipus (VRGF) que són coneguts també com distribuïdors de canonada Kosch-Glitsch,LP).

En aquest cas no s'han utilitzat distribuïdors de líquid degut a que el rebliment que s'utilitza estructurat i per tant la quantitat de líquid que s'ha quedat a les parets es menor que en un rebliment desordenat.

- **Tipus de rebliment:**

En aquest cas per les temperatures, pressions i tipus de mescla s'han utilitzats rebliments estructurats tipus *Mellapack*® (mellacarbon) específics per les separacions al buit i amb substàncies corrosives ja que el carboni no reacciona amb molts solvents.



Figura 11-3-8. Rebliment estructurat Mellacarbon™

Aquest tipus de rebliment té una alta estabilitat tèrmica superior als 400°C, també presenta una alta mobilitat inclús en sistemes aquosos i una excel·lent resistència davant la corrosió.

S'ha utilitzat el model Mellacarbon™ 250 Y ja que dona millor resultat per un HETP superior a 0,3.

Aquest tipus de rebliment estructurat està indicat per torres de separació al buit degut a que té una baixa pèrdua per pressió, cal indicar també que per la columna a pressió atmosfèrica tot i no treballar al buit, la mescla a separar es corrosiva i per tant igualment s'ha escollit aquest tipus de rebliment.

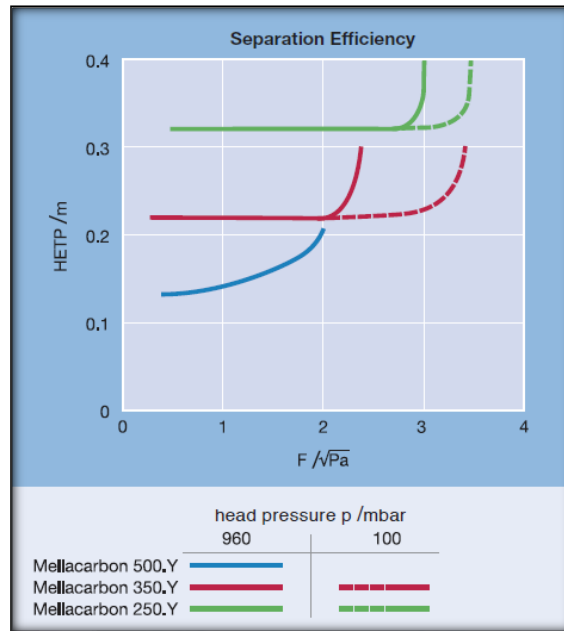


Figura 11-3-8A.Tipus de rebliment segons la càrrega i les etapes teòriques.

En aquesta gràfica s'observa el nombre d'etapes en front la càrrega introduïda , per tant s'observa ja que per nombre d'etapes superior a 0,3 el millor és el 250Y.

- **Estructura interna (V-301 i V-302)**

Els recipients flash contenen una malla interna que impedeix l'arrossegament de gotes pel vapor.

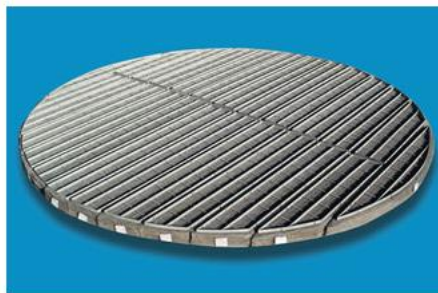


Figura 11-3-9.Malla interior

El tipus de material en aquest cas es l'acer 400 per tal resistir la corrosió de la mescla.

- **Estructura externa**

Pel que fa a l'estructura externa s'han de tenir en compte els suports del recipient, el tipus dependrà del mida, forma, pes, temperatura, i pressió, aquest tipus de suport es recomanat per estructures verticals degut a que no imposen càrregues concentrades a la carcassa i són especialment recomanats per torres altes sotmès a càrregues per vent.

En aquest cas com es tracta d'un recipient vertical i columnes amb un altura considerable, s'utilitzen suports de tipus faldilla , aquestes estructures han de ser capaces de suportar el pes del recipient i del seu contingut i aguantar les càrregues per vent.

Aquest tipus de suport consisteix amb una carcassa cònica o cilíndrica soldada a la base del recipient. S'han de proporcionar obertures per tal de facilitar l'accés per qualsevol canonada.

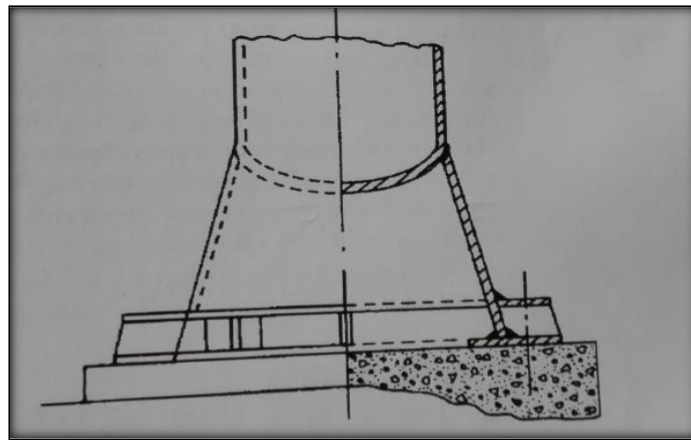


Figura 11-3-10.Estructura en forma de faldilla per recipients horitzontals.

11.3.4 DISSENY DEL TANC AGITAT

El barrejador T-302 s'encarrega de homogeneïtzar les corrents 24 i 29 tal i com s'ha mostrat en el diagrama de procés.

Pel disseny d'aquest mesclador s'ha tingut en compte el seu volum, les seves dimensions i la agitació que s'utilitzarà.

11.3.4.1 CÀLCUL DEL VOLUM, DIÀMETRES I ALTURA DEL MESCLADOR

El tanc barrejador serà cilíndric amb fons toriesfèrics. Es tria un temps de residència de 10 minuts per assegurar un temps de contacte favorable.

- Volum

$$V = Q \cdot \tau = 9,36 \frac{m^3}{h} \cdot 10 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 1,56 \text{ m}^3$$

Equació 11-3-20

- Sobredimensionat

$$V = 2 \text{ m}^3$$

Equació 11-3-21

- Diàmetre i altura del tanc

$$1,5 \cdot D = H$$

Equació 11-3-22

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot 1,5 \cdot D = 2 \text{ m}^3$$

Equació 11-3-23

$$D \text{ tanc} = 1,20 \text{ m}$$

Equació 11-3-24

$$H \text{ tanc} = 1,79 \text{ m} \approx 1,80 \text{ m}$$

Equació 11-3-25

11.3.4.2 CÀLCUL DE LA POTÈNCIA DEL AGITADOR

Els agitadors de turbina són els més adequats per mescles amb viscositat baixa. Per aquest motiu s'ha decidit dissenyar un agitador tipus turbina dimensionat a partir de les següents correlacions.

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad ; \quad \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \quad ; \quad \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4} \quad ; \quad \frac{E}{D_a} = 1 \quad ; \quad \frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$

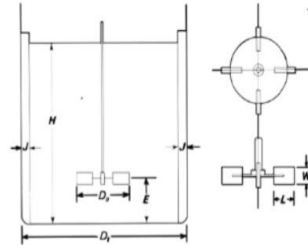


Figura 11-3-11: Proporcions del agitador

Taula 11-3-38. Càlculs dels paràmetres del agitador.

D agitador (m)	0,4
W (m)	0,08
L (m)	0,1
E (m)	0,4
J (m)	0,1

Sabent que el règim del fluid estarà en estat turbulent, es calcula el Reynolds a partir de la següent fórmula.

$$Re = \frac{\rho \cdot N \cdot Da^2}{\mu} = \frac{879,05 \frac{Kg}{m^3} \cdot 7m/s \cdot (0,4^2m)}{3,363 \cdot 10^{-4} \frac{Kg}{m \cdot s}} = 2927552,78$$

On :

$$Da = D_{tanc} \cdot 1/3 = 0,40 \text{ m}$$

N =número de revolucions típiques per aquest agitador = 80rpm - 400rpm i passant-ho a m/s multiplicant per $\frac{2\cdot\pi}{60s}$ i per 0,2m que és el radi del agitador, la velocitat típica és de 1,68 m/s – 8,38 m/s.

Mitjançant la figura següent, es tria un número de potència de 5 ja que es tracta d'un agitador de turbines, amb disc de fulles planes (c) i a partir del número de potència es pot calcular la potència del agitador.

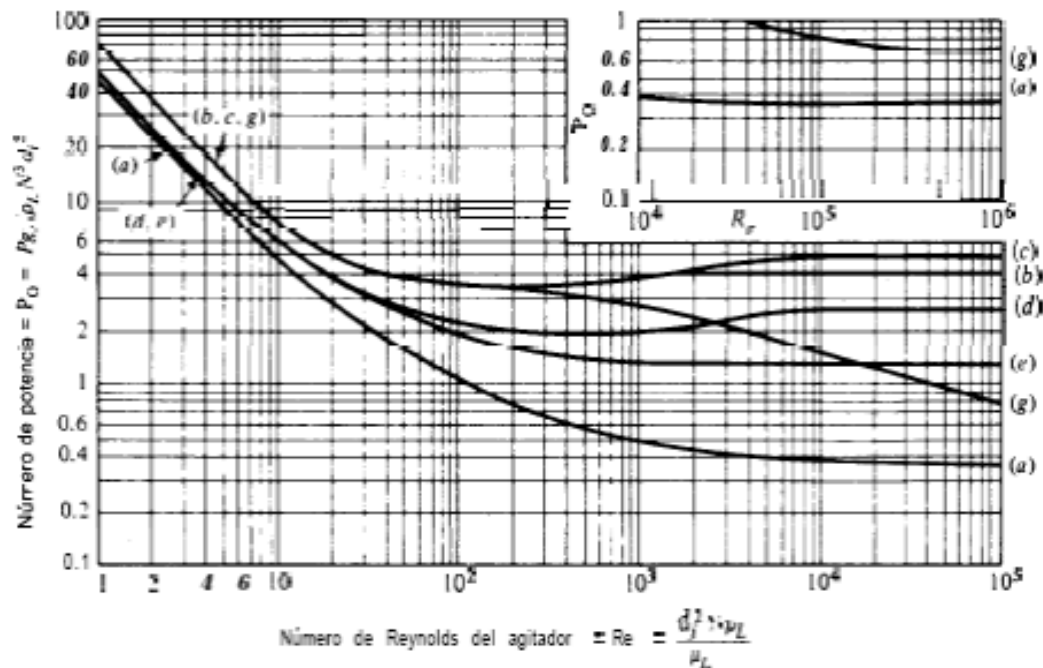


Figura 6.5 Potencia para la agitación de impulsores sumergidos en líquidos de una sola fase con una superficie gas/líquido [excepto curvas (c) y (g)]. Las curvas corresponden a los impulsores de la figura 6.3: (a) impulsores marinos, (b) turbinas de hoja plana, $w = d_t/5$, (c) turbinas de disco de hoja plana con y sin una superficie gas/líquido, (d) turbinas de hoja curva, (e) turbinas de hojas fijas, (g) turbinas de hojas planas, sin *mamparas*, sin interfase gas/líquido, sin vórtices.

Gràfic 11-3-4. Gràfica del número de potència per cada tipus d'agitador.

$$P = Np \cdot N^3 \cdot Da^5 \cdot \rho = 5 \cdot 7^3 (m/s)^3 \cdot 0,4^5 m \cdot 879,05 \frac{kg}{m^3} = 15,44 KW = 16KW$$

Finalment, la potència real amb un rendiment del motor teòric del 70%.

$$Potència\ real = \frac{P}{\eta} = \frac{16}{0,7} = 22,1\ KW$$

11.3.4.2 DISSENY MECÀNIC DEL TANC AGITAT

- S'ha triat l'**espessor mínim estàndard** per diàmetres entre 1 – 2 m que inclou els 2 mm per corrosió. Aquests espessor, 7mm, suportaran la càrrega pròpia del equip i qualsevol peça addicional .

- **La temperatura de disseny :**

$$T_{disseny} = T_{operació} + 15^{\circ}C$$

Equació 11-3-26

- **Pressió de disseny :**

$$P_{disseny} = P_{operació} \cdot 1,1$$

Equació 11-3-27

- **Volum capçal hemisfèric** es calcula sabent el radi del tanc i el espessor que ja s'ha esmentat.

$$V (dos capçals) = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (r_{tanc} + \Delta x_{acer})^2 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (0,6 + 0,007)^2 = 1,5 m^3$$

Equació 11-3-28

Per tant, el volum per cada capçal és de 0,75 m³.

- S'ha suposat que l'**altura del capçal** serà una sisena part de l'alçada del tanc.

$$H_{capçal} = 1,8 \cdot \frac{1}{6} = 0,3 m$$

Equació 11-3-29

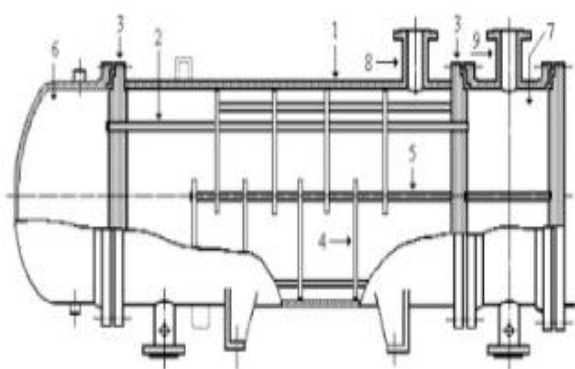
Per tant, l'altura de capçal és de 0,3 m.

11.4 DISSENY DELS BESCANVIADORS DE CALOR

En aquest apartat es detalla el procediment que s'ha realitzat per calcular els paràmetres dels diversos bescanviadors de calor que hi ha a la planta. Al procés de producció d'anilina d'Anilex CO s'utilitzen bescanviadors de calor de carcassa i tubs els quals són els més utilitzats en la majoria de indústries químiques amb gran varietat de configuracions i permeten treballar amb un ampli rang de temperatures i pressions.

Degut a que presenten elevades àrees de contacte permet que aquest tipus de bescanviadors de calor siguin ideals per tenir un gran bescanvi de calor entre el fluid de procés i el refrigerant. A més a més, tenen un cost baix i una operació fàcil. A la **Figura 11-4.1** podem veure l'estructura d'aquest tipus de bescanviador de calor.

Taula 11-4.1: Parts d'un intercanviador de calor.



1	Carcassa
2	Tubs
3	Placa de tubs
4	Pantalles Deflectores
5	Deflector longitudinal
6	Capçal posterior
7	Capçal fix
8	Boca de la carcassa
9	Boca pels tubs

Figura 11-4.1: Parts d'un intercanviador de calor.

Aquest equip és utilitzat davant diferents funcions: canvi de temperatura (refrigeració i calefacció), i canvi d'estat (condensador i evaporador).

Taula 11-4.2: Funcions dels bescanviadors de calor de la planta.

E-100	Evaporador	E-302	Evaporador
E-101	Calefacció	E-303	Evaporador
E-102	Calefacció	E-304	Condensació parcial
E-200	Evaporador	E-305	Condensació total
E-201	Refrigeració	E-306	Evaporador
E-300	Refrigeració	E-307	Evaporador
E-301	Condensació parcial	E-308	Condensador

El disseny dels bescanviadors s'ha dut a terme mitjançant el programa *Aspen Shell and Tube Exchanger* i tenint en compte els paràmetres de disseny del mètode Kern. El programa *Aspen* segueix el codi *TEMA* (*Tubular Exchanger Manufacturers Association*) i *ASME* (*American Society of Mechanical Engineers*) en el disseny mecànic.

El codi *TEMA* presenta tres estàndards per la construcció mecànica els quals especifiquen disseny, fabricació i materials a utilitzar en els bescanviadors de carcassa i tubs. Aquests són:

Classe R: Per aplicacions en petroli i processos relacionats.

Classe C: Per aplicacions en processos comercials.

Classe B: Per serveis en processos químics.

Aplicables a les següents limitacions:

- Diàmetre intern de la carcassa ≤ 1524 mm (60 in)
- Pressió ≤ 207 bar
- Relació (Diàmetre intern de la carcassa)·(Pressió) ≤ 105000 mm·bar

11.4.1 PARÀMETRES DE DISSENY A TENIR EN COMPTE PEL MÈTODE KERN

Els paràmetres de disseny que ha de complir un intercanviador de carcassa i tub són els que es presenten tot seguit.

11.4.1.1 CIRCULACIÓ DE FLUIDS

Per garantir un perfecte bescanvi de calor ens hem d'assegurar que l'equip es trobarà en les millors condicions possibles. Per això, és imprescindible que és tingui en compte per on passarà cada un dels dos fluids, les normes bàsiques de assignació de fluids són:

- Tubs: El fluid que passarà per tubs serà el més corrosiu i tòxic dels dos, que tingui un major temperatura o pressió, que generi major embrutiment i circuli amb un cabal més gran.
- Carcassa: El fluid més viscos, el que tingui menys caiguda de pressió, amb menys cabal, i més net.

S'ha triat el refrigerant *SYLTHERM 800* de la casa *DOW* per al bescanvi de calor ja que es tracta del refrigerant utilitzat al reactor. Les característiques principals del *SYLTHERM 800* són: potencial d'incrustació baix, baix punt de congelació, estabilitat a altes temperatures, llarga vida útil, no corrosiu, baixa toxicitat i poca olor.

Per les seves característiques poc corrosives i poc tòxiques s'ha triat que el fluid que circuli per la carcassa sigui el fluid refrigerant *SYLTHERM 800*.

11.4.1.2 CARACTERÍSTIQUES DELS TUBS

Els tubs d'un bescanviador tenen diàmetres externs entre 16 i 50 mm. Generalment s'utilitzen tubs de diàmetres petits degut a que l'equip és més econòmic i compacte, encara que els tubs més amples són més fàcils de netejar per mètodes mecànics i s'usen per fluids amb elevat risc d'incrustacions.

El gruix del tub va en funció de la pressió interna i del factor de corrosió.

La longitud de tubs típica oscil·la entre 1,83 i 4,88 metres. S'ha de tenir en compte que a tubs més llargs el diàmetre de carcassa serà més baix.

Els tubs s'han de disposar de forma triangular, quadrada o romboïdal tal i com es mostra a continuació:

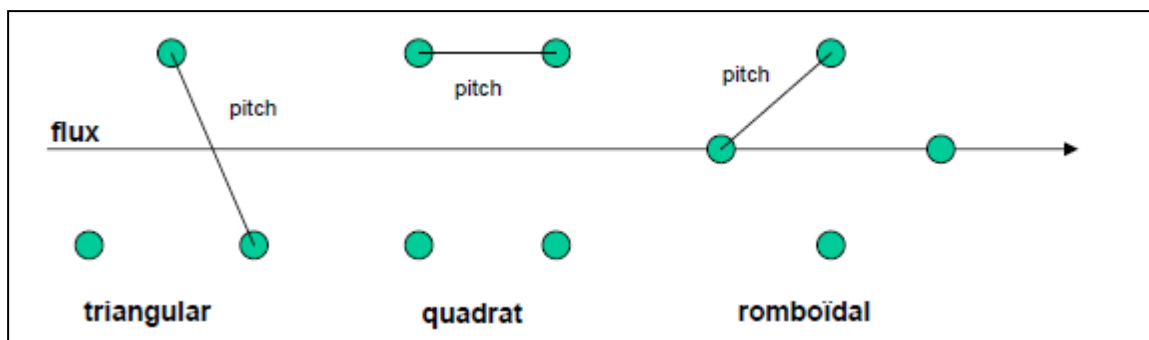


Figura 11-4-2: Possibles disposicions dels tubs.

El pitch és la distància entre els centres de dos tubs consecutius. Segons el pitch escollit té unes característiques o altres.

Els pitch triangulars i romboïdals presenten altes velocitats de transferència de calor, mentre que un pitch quadrat té pèrdues de pressió més baixes. Quasi sempre per feixos fixes s'utilitza el pitch triangular (30°), i per norma, el pitch recomanat és de 1,25 vegades el diàmetre extern del tub.

Taula 11-4-3: Tipus, característiques i aplicacions de les diferents disposicions de tubs.

TIPUS DE PITCH	ANGLE	CARACTERÍSTIQUES FLUID CARCASSA	APLICACIONS
TRIANGULAR	30°	NET	S'utilitza per factors d'incrustació baixos i per qualsevol règim de flux.
ROMBOÏDAL	60°	NET	Rarament s'utilitza, per les altes caigudes de pressió que origina
QUADRAT	90°	BRUT	S'utilitza amb flux turbulent i quan la neteja mecànica és crítica.

En el cas dels bescanviadors de calor utilitzats en aquest procés, com que el fluid de la carcassa és net, *SYLTHERM 800*, s'utilitza per a tots els dissenys el pitch triangular per afavorir les altes velocitats de transferència de calor.

11.4.1.3 CARACTERÍSTIQUES DE CARCASSA

Els diàmetres de carcassa típics estan entre 150 i 1520 mm. S'ha de complir que el quocient entre la longitud de tubs i el diàmetre de carcassa estigui comprés entre 4 i 6.

Segons la normativa TEMA, hi ha les diferents configuracions de carcassa:

E: un sol pas

F: dos passos amb pantalla deflectora longitudinal

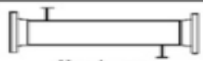
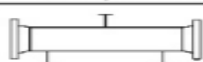
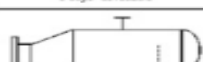
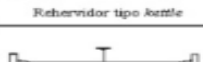
G: flux distribuït

H: doble flux distribuït

J: flux dividit

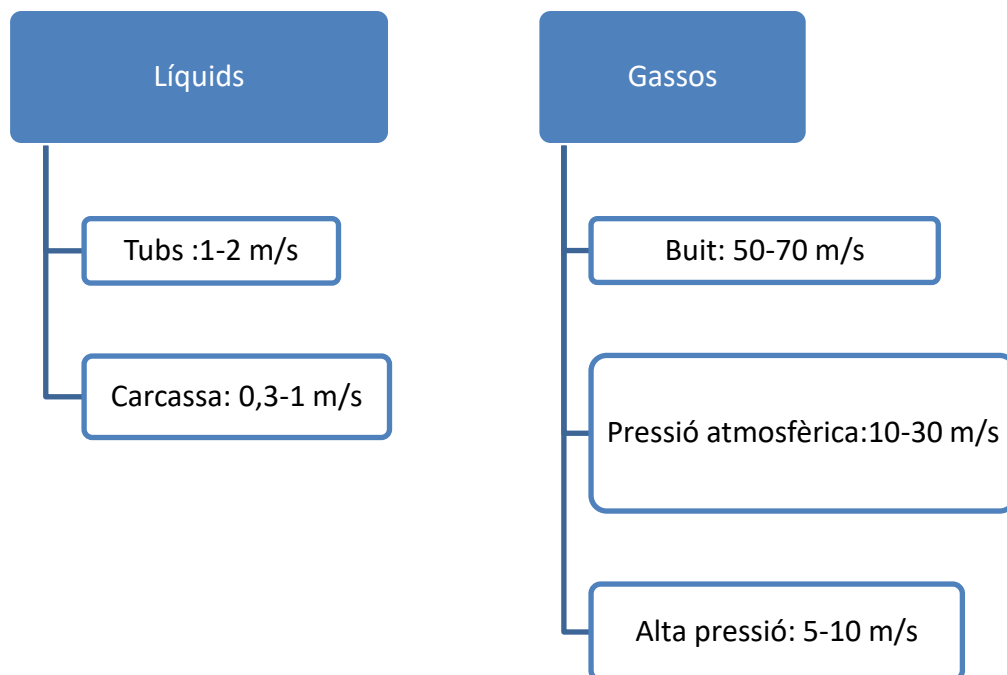
K: Rebullidor tipus Kettle

X: Flux creuat

	TIPOS DE CARCAZAS
E	 Un solo paso
F	 Dos pasos con deflector longitudinal
G	 Flujo distribuido
H	 Doble flujo distribuido
J	 Flujo dividido
K	 Rehervidor tipo kettle
X	 Flujo cruzado

11.4.1.4 VELOCITATS TÍPIQUES DE CIRCULACIÓ

Les velocitats típiques del fluid van en funció del seu estat i de si són fluids que circulen per carcassa o tub.



11.4.1.5 NÚMERO DE PANTALLES DEFLECTORES I SEPARACIÓ ENTRE ELLES

Les pantalles deflectores són determinades per dos característiques geomètriques:

- L'alçada lliure de la pantalla és l'espai que queda entre la pantalla i la carcassa, per on passarà el fluid del costat de la carcassa. Aquesta està entre un 15 i un 45% del diàmetre de carcassa. Els òptims de disseny són entre un 20 i un 25%.
- L'espaiat entre pantalles oscil·la entre 0,2 i 1 vegades el diàmetre de carcassa, sent el rang òptim entre 0,3 i 0,5 el diàmetre de carcassa.

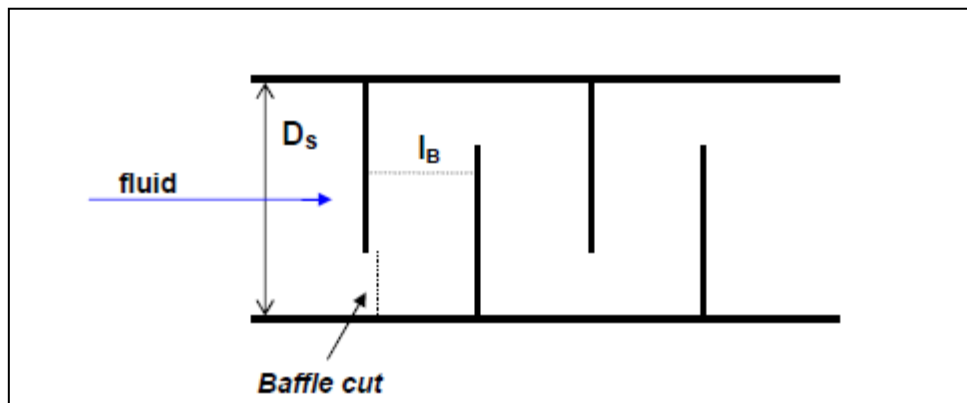


Figura 11-4-3: Representació del les pantalles deflectores.

On:

- Baffle cut: Pantalla deflector.
- l_B : Espaiat entre pantalles.

11.4.1.6 FACTOR D'EMBRUTIMENT

El factor d'embrutiment dependrà del fluid que passi per l'intercanviador. A continuació es mostra una taula amb els factor d'embrutiment típics segons el tipus de fluid:

Taula 11-4-4: Factor d'embrutiment per diferents fluids.

PRODUCTE QUÍMIC	FACTOR D'EMBRUTIMENT (°Cm²/W)
Vapor	0,00009
Aigua destil·lada	0,00009
Aigua de torre	0,0002
Líquids orgànics	0,0002
Orgànics en evaporació	0,0004

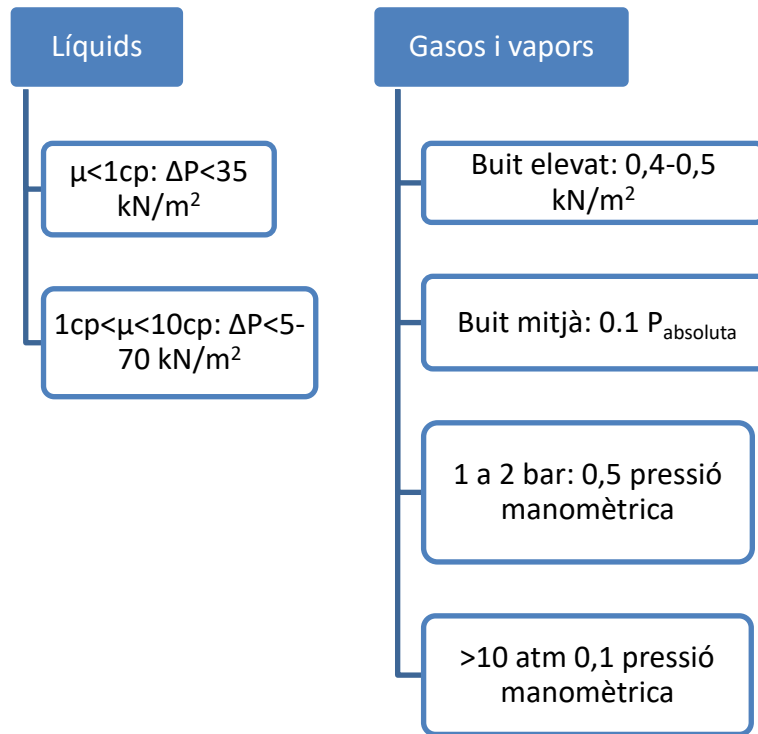
Les dades de la taula 11-4-3 han estat extretes del McCabe Unit Operation in Chemical Engineering.

11.4.1.7 PÈRDUES DE PRESSIÓ

Les pèrdues de pressió són degudes a pèrdues per fricció i a contraccions i expansions com a principal motiu.

Les pèrdues per fricció es poden estimar per mètodes correlatius, en funció de si tenim un sistema isoterm, no isoterm o considerant contracció i expansió.

Depenent de l'estat del fluid els límits per les pèrdues de pressió seran uns o altres:



11.4.2 DISSENY AMB ASPEN EXCHANGER DESIGN AND RATING V 8.4

11.4.2.1 CARACTERÍSTIQUES DE LA GEOMETRIA DEL BESCANVIADOR

S'estableixen unes característiques bàsiques de la geometria com en aquest cas d'exemple, Figura 11-4-4, que el fluid calent anirà als tubs, també s'estableix un pitch triangular com anteriorment s'ha explicat, el tipus de bescanviador serà BEM i el material que s'utilitzarà es SS 316L.

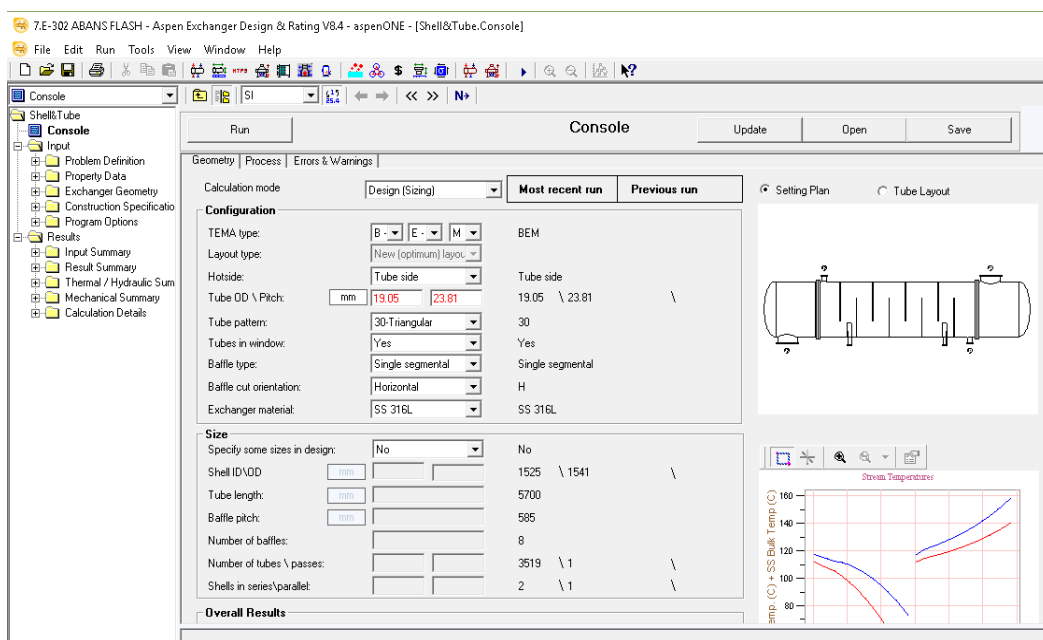
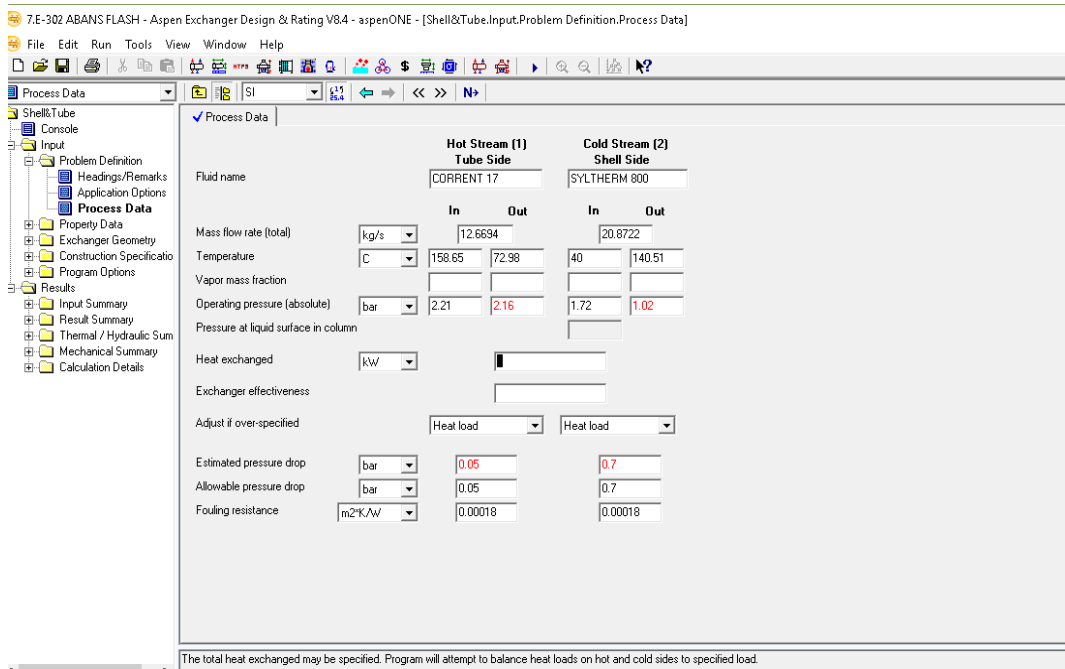


Figura 11-4-4: Geometria del bescanviador de calor.

11.4.2.2 CARACTERÍSTIQUES DELS CORRENTS

En aquest cas, com a exemple, es dissenya un bescanviador de calor per refredar 45610 Kg/h (12,67 Kg/s) amb el refrigerant triat pels bescanviadors de carcassa i tubs (*SYLTHERM 800*) de 158,65°C a 72,98°C on s'estableix un coeficient d'incrustació baix 0,00018 m²·K/W.



	Hot Stream (1) Tube Side		Cold Stream (2) Shell Side	
	In	Out	In	Out
Fluid name	CORRENT 17		SYLTHERM 800	
Mass flow rate (total)	12.6694		20.8722	
Temperature	158.65	72.98	40	140.51
Vapor mass fraction				
Operating pressure (absolute)	2.21	2.16	1.72	1.02
Pressure at liquid surface in column				
Heat exchanged				
Exchanger effectiveness				
Adjust if over-specified	Heat load		Heat load	
Estimated pressure drop	0.05		0.7	
Allowable pressure drop	0.05		0.7	
Fouling resistance	0.00018		0.00018	

The total heat exchanged may be specified. Program will attempt to balance heat loads on hot and cold sides to specified load.

Figura 11-4-5: Característiques del corrent fred i calent.

A més a més, al apartat de “Property Data” s’especifica les propietats del corrent de procés i del corrent refrigerant. En la Figura 11-4-5 s’observa la composició del “Hot stream” és a dir, del corrent de procés.

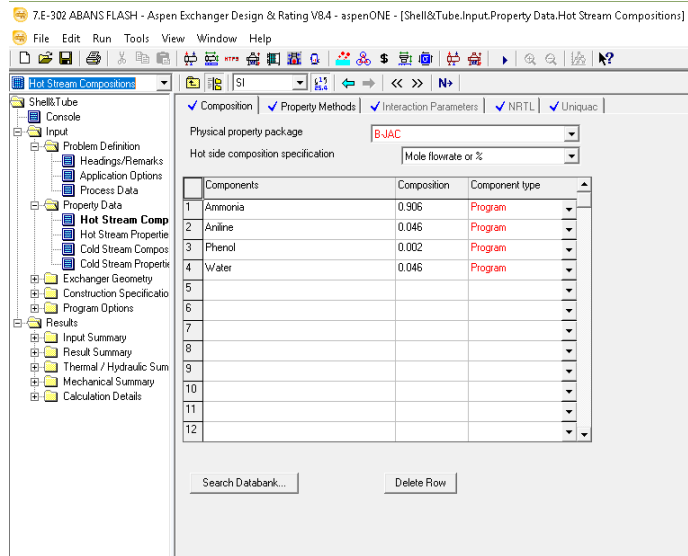


Figura 11-4-6: Característiques del corrent calent.

11.4.2.3 ESPECIFICACIONS DE CODI TEMA

7.E-302 ABANS FLASH - Aspen Exchanger Design & Rating V8.4 - aspenONE - [Shell&Tube.Results.Result Summary.TEMA Sheet]

File Edit Run Tools View Window Help

TEMA Sheet

Heat Exchanger Specification Sheet

1						
2						
3						
4						
5						
6	Size	1525-5700	mm	Type	BEM	Hor
7	Surf./Unit(elt.)	2341.5	m ²	Shells/Unit	2	Surf./shell (elt.)
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT					
9	Fluid allocation	Shell Side		Tube Side		
10	Fluid name	SYL THERM 800		CORRENT 17		
11	Fluid quantity, Total	20.8722		12.6594		
12	Vapor (In/Out)	0	0	3.2379	0.7846	
13	Liquid	20.8722	20.8722	0	2.4533	
14	Noncondensable	0	0	9.4316	9.4316	
15						
16	Temperature (In/Out)	°C	40	140.51	158.65	72.99
17	Dew / Bubble point	°C			116.59	-133.49
18	Density	Vapor/Liquid	kg/m ³	/ 1043.96	/ 960.57	1.28 /
19	Viscosity		mPa s	/ 2.4916	/ 0.59	0.0141 /
20	Molecular wt. Vap				20.73	17.57
21	Molecular wt. LC				17.03	
22	Specific heat	kJ/(kg K)	/ 1.632	/ 1.916	2.16 /	2.161 / 2.227
23	Thermal conductivity	W/(m K)	/ 0.1386	/ 0.1263	0.0395 /	0.0312 / 0.207
24	Latent heat	kJ/kg			535.1	673.7
25	Pressure (abs)	bar	1.72	1.67091	2.21	2.16294
26	Velocity	m/s	0.13			14.49
27	Pressure drop, allow./calc.	bar	0.7	0.04909	0.05	0.04706
28	Fouling resistance (min)	m ² K/W	0.00018		0.00018	0.00022 As based
29	Heat exchanger	3710.3	kW		MTD corrected	13.78 °C
30	Transfer rate, Service	115	Duty	115.9	Clean	121.6
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL					
32	Sketch					

Figura 11-4-7: Especificacions del bescanviador amb el codi TEMA.

Taula 11-4-5: Resultats de calor bescanviat (KW) en cada bescanviador

BESCANVIADOR	CALOR BESCANVIAT (KW)	BESCANVIADOR	CALOR BESCANVIAT (KW)
E-100	79	E-302	2381
E-101	293	E-303	1850
E-102	520	E-304	1434
E-200	856	E-305	267,4
E-201	6828	E-306	1,8
E-300	2426	E-307	2,6
E-301	3710	E-308	754,5

11.5 DISSENY DELS COMPRESSORS

Per desplaçar fluids en estat gas s'utilitzen compressors, ventiladors o bufadors. Depenent de la diferència de pressions entre l'entrada i la sortida de l'equip, és més apropiada la utilització d'un tipus o un altre.

Un compressor d'aire és un dispositiu mecànic accionat per un motor elèctric. L'energia elèctrica és transformada en energia mecànica la qual impulsa al fluid a una determinada velocitat i pressió. Cal destacar que l'energia mecànica es transforma en cinètica en arribar al fluid. Com a conseqüència de produir-se un canvi important en la pressió del gas, també es produeix un canvi en la temperatura i la densitat del gas o vapor. S'ha considerat que la compressió és politròpica alhora de realitzar els càlculs per determinar la potència de cada compressor utilitzant la següent expressió:

$$W_p = N \cdot \frac{Y}{Y-1} \frac{Z \cdot R \cdot T}{PM} (r^{\frac{Y-1}{Y}} - 1)$$

$$W = W_p \cdot m$$

On:

- N és el nombre d'etapes del compressor

- $\gamma = C_p/C_v$
- PM és el pes molecular del fluid (kg/kmol)
- R és la constant dels gasos (8.31 KJ/K·Kmol)
- T és la temperatura del fluid
- r és el factor de relació de pressions (P_2/P_1)
- w és la potència real de l'equip (kJ/kg)
- W_p és la potència de l'equip (kJ/kg)
- m és el cabal màssic (kg/s)

$$W_p = N$$

Exemple de càlcul de la potència del compressor K-304:

$$W_p = 2 \cdot \frac{1,066}{1,066 - 1} \frac{1 \cdot 8,31 \cdot 284,6}{93,73} \left(28,85^{\frac{1,066-1}{1,066-1,0}} - 1 \right) = 27,7 \text{ kW}$$

11.6 DISSENY DE LES BOMBES

Balanç energia mecànica

La funció principal de la bomba és la de proporcionar al fluid la pressió necessària per que es desplaci entre dos punts de la planta. Per determinar la potencia necessària de la bomba es realitza un balanç d'energia mecànica entre els punts inicial i final de desplaçament del fluid, tenint en compte també les pressions inicials i finals de la canonada.

$$\frac{\Delta P}{\rho} + g \cdot (z_2 - z_1) + \frac{1}{2a} (v_2^2 - v_1^2) = w - e_v$$

Equació 11-6-1

On:

- ΔP = Increment de pressions entre el punt 1 i 2
- ρ = Densitat del fluid (kg/m³)
- g = Acceleració de la gravetat (m/s²)
- w = Treball bomba per unitat de massa (J/kg)

- $(z_2 - z_1)$ = Increment alçada entre els dos punts
- e_v = Pèrdues de càrrega totals
- $(v_2 - v_1)$ = Increment velocitat del fluid (m/s)
- α = Constant depèn del tipus de flux (laminar = 0,5/ turbulent = 1)

En el recorregut del fluid es considera que la velocitat del fluid a través de la canonada és constant, per tant, el terme d'energia cinètica queda anul·lat.

Exemple de càlcul de la potència de la bomba P-101:

$$\frac{100.000}{673,1} + 9,81 \cdot (3 - 3) + \frac{1}{2\alpha} (1,5 - 1,5) = w - 60,5$$

11.6.1 CÀLCUL PÈRDUES DE CÀRREGA EN TRAMS RECTES

Les pèrdues de càrrega que experimenta el fluid en els trams rectes d'instal·lació són degudes a la fricció del fluid entre les parets de la canonada i a la turbulència d'aquest. Aplicant un balanç macroscòpic de quantitat de moviment en el sistema s'obté la següent expressió.

$$e_{v, \text{trams rectes}} = 2 \cdot f \cdot \frac{L}{D} \cdot v^2$$

Equació 11-6-2

On:

- f = factor de fricció de *Fanning*.
- L = longitud de la canonada (m).
- D = diàmetre intern de la canonada (m).
- v = velocitat a la que circula el fluid per l'interior de la canonada (m/s).

Càlcul de les pèrdues de càrrega en trams rectes de la bomba P-101:

$$e_{v, \text{trams rectes}} = 2 \cdot 0,015 \cdot \frac{10}{0,0078} \cdot 1,5 = 57,69 \frac{m^2}{s^2}$$

El factor de fricció de *Fanning* depèn del Reynolds i de la rugositat relativa, paràmetre característic del material de la canonada.

Totes les canonades de la planta estan fabricades d'acer inoxidable, menys les de l'aigua de torre que són d'acer al carboni, per tant, la rugositat relativa es determina dividint la rugositat absoluta entre el diàmetre intern de la canonada. En la següent taula es troben les rugositats absolutes dels materials més comuns de fabricació de canonades.

El Reynolds depèn del fluid que hi circula per la canonada i es calcula amb la següent equació adimensional:

$$Re = \frac{D \cdot \rho \cdot v}{\mu}$$

Equació 11-6-3

On:

- D = diàmetre de la canonada (m).
- ρ = densitat del fluid (Kg/m³).
- μ = viscositat del fluid (Kg/m·s).
- Un cop determinat el Reynolds i la rugositat relativa, es determina el factor de fricció f amb la gràfica de Moody.

11.6.2 Càlcul pèrdues de càrrega en accidents

Durant el recorregut el fluid experimenta una pèrdua de càrrega en diferents accessoris o accidents que distorsionen el recorregut del fluid. Els accidents característics d'una instal·lació com aquesta són colzes, vàlvules, filtres, etc.

Existeixen dos mètodes generalitzats per determinar les pèrdues de càrrega en accidents, en aquest cas s'utilitza el mètode dels coeficients de pèrdues (K).

$$e_{v,accidents} = K \frac{v^2}{2}$$

Equació 11-6-4

On:

- v = velocitat del fluid per la canonada
- K = el valor del paràmetre que depèn dels diferents accessoris

Càlcul de la pèrdua de càrrega en accidents de la bomba P-101:

$$e_{v,accidents} = 2,5 \frac{1,5^2}{2} = 2,81 \frac{m^2}{s^2}$$

En la taula següent es mostra el valor de K pels diferents accessoris:

Les pèrdues de càrrega totals son el sumatori de les pèrdues de càrrega dels trams rectes més la dels accidents.

$$e_{v,totals} = e_{v,rectes} + e_{v,accidents}$$

Equació 11-6-5

11.4.3 Càlcul Potència de la Bomba

Una cop determinades les pèrdues de càrrega totals i coneixent el terme d'energia potencial, es pot aïllar el treball de la bomba per unitat de massa.

La relació entre el treball de la bomba per unitat de massa i la potència d'aquesta és:

$$P_{teòrica} = W \cdot m$$

Equació 11-6-6

On:

- P = potència de la bomba (W).
- m = cabal màssic que ha de tractar la bomba (Kg/s).
- W = treball per unitat de massa (J/Kg).

Substituint els valors obtinguts en els apartats anteriors, la potència teòrica de la bomba P-101 és de 11,51 kW.

El valor trobat és la potència teòrica de la bomba. Però tota l'energia produïda no és utilitzada per impulsar al fluid, sinó que una part es dissipa en forma de calor, fregament dels rotors de la bomba, etc. Per tant, utilitzant el factor de rendiment de la bomba es determina la potència real necessària. En aquest cas es fixa un valor estàndard del 75%.

$$P_{real} = \frac{P_{teòrica}}{rendiment}$$

Equació 11-6-7

11.4.4 CÀLCUL DEL TEMPS PER REALITZAR EL BUIT

Sabent el cabal que necessiten tractar les bombes de buit i el diàmetre nominal de les canonades que van a parar a les bombes de buit, juntament amb la capacitat dels equips els que se'ls realitza el buit (ciclons), es pot calcular el temps necessari de buit.

$$t = \frac{V \ln P1}{Q \ln P2}$$

Equació 11-6-8

On:

- V és el volum de l'equip que es troba al buit en m3
- QL és el cabal que es tracta
- t és el temps requerit (min)
- P1 és la pressió inicial
- P2 és la pressió final

11.7 DISSENY DE CANONADES

Pel disseny de canonades del procés de producció d'anilina és necessari dimensionar-les correctament pel correcte transport dels fluids.

Pel càlcul del diàmetre nominal de les canonades es necessari conèixer el cabal volumètric del fluid que hi circula i la velocitat del fluid. El cabal volumètric es troba en l'apartat balanç de matèria 1.7 del capítol 1. I les velocitats dels corrents corresponen a les velocitats típiques dels líquids i els gasos.

FASE	VELOCITATS TÍPIQUES (m/s)
Líquid	1-3
Gas	10-30

Taula 11-7-1: Rang de velocitat típiques dels líquids i gasos

Coneixent el cabal volumètric i la velocitat del fluid es calcula l'àrea a partir de la següent equació:

$$Q = v \cdot A$$

Equació 11-7-1

On,

- Q és el cabal volumètric (m³/s)
- V és la velocitat (m/s)
- A és l'àrea de la secció transversal de la canonada (m²)

L'àrea transversal té la següent relació amb el diàmetre intern de la canonada.

$$A = \pi \frac{D^2}{4}$$

Equació 11-7-2

El fregament del fluid amb les parets de la canonada provoca una caiguda de pressió. Cal conèixer aquesta pèrdua de pressió per comprovar que el diàmetre escollit per a la circulació del fluid sigui suficient, perquè si resultes ser massa petit la pèrdua de carga seria massa elevada. L'equació per calcular la pèrdua de carga és la següent:

$$H = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g}$$

Equació 11-7-3

On,:

- H és la pèrdua de carga (m.c.l)
- f és el factor de Fanny
- L és la longitud de la canonada (m)
- v és la velocitat del fluid (m/s)
- D és el diàmetre intern de la canonada (m)
- g és la gravetat (m²/s)

El factor de Fanny es troba en la següent gràfica que es funció del Reynolds i K/D , on K és el coeficient de rugositat del material de la canonada.

Exemple de càlcul del diàmetre de la canonada de la línia 101:

Per la canonada hi passa un cabal de $0,26 \text{ m}^3/\text{h}$ i la velocitat del fluid que hi circula és $1,5 \text{ m/s}$. Sabent aquestes dades les substituïm a l'equació 11.7.1 i obtenim una àrea transversal de $47,9 \text{ mm}^2$.

Amb l'equació 11.7.2 aïllem el diàmetre i obtenim que la canonada de la línia 101 té un diàmetre nominal de $1/2''$.

I per comprovar que el diàmetre calculat és correcte perquè hi circuli el fluid en aquestes condicions calculem la pèrdua de càrrega i es comprova que no sigui molt elevada.