

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

Cálculo del Espesor de la Placa del Cuerpo del Riser de la Unidad de Desintegración Catalítica de Lecho Fluidizado

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE: INGENIERO QUÍMICO

PRESENTAN:

Erick Arellano López

Steve Torres Ramírez

DIRECTOR DE TESIS: Ing. Noé Galo Ramírez Hernández



ASESORES DE TESIS:

Dr. Luis Alberto Verduzco Mora M. en C. Francisco Javier Almazán Ruiz

CDMX, 2023



Universidad Nacional Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

Agradecimientos

Índice de contenido

Índice de Figuras VI
Índice de TablasVIII
ObjetivosIX
GeneralIX
EspecíficosIX
ResumenX
IntroducciónXI
Capítulo I Estado del Arte 1
1.1 Fluidización
1.2 Régimen de flujo2
1.3 Régimen de fluidización2
1.4 Aplicación de los lechos fluidizados9
1.5 Reactor de lecho fijo 11
1.6 Reactor de lecho fluidizado 11
1.7 Determinación de parámetros hidrodinámicos13
1.7.1 Propiedades de las partículas de fluidización13
1.7.2 Clasificación de Geldart para las partículas15
1.7.3 Fundamentos hidrodinámicos de fluidización18
1.7.4 Velocidad mínima de fluidización 22
1.7.5 Velocidad terminal
1.8 Cracking
1.8.1 Cracking térmico 29
1.8.2 Cracking Catalítico
1.8.2.1 Craqueo catalítico en lecho fluidizado
Capítulo II Proceso de Craqueo Catalítico49
2.1 Evolución del Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC) 49
2.2 Importancia de la Unidad FCC en la Refinación53
2.2.1 Características de la carga 55
2.2.2 Contribución de la Unidad FCC al pool de gasolina
2.2.3 Química del proceso 62

2.3 Descripción del Proceso FCC 64
2.3.1 Sistema de reacción 66
2.3.2 Sistema de separación de sólidos69
2.3.3 Sistema de agotamiento71
2.3.4 Sistema de regeneración del catalizador73
Capítulo III Diseño Mecánico80
3.1 Mecánica de materiales 81
3.2 Tipos y clasificación de recipientes
3.3 Materiales de construcción 100
3.4 Normatividad 102
3.5 Normatividad Técnica para el Diseño de Recipientes a Presión
3.5.1 Código ASME Sección VIII División 1 111
3.5.2 Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad . 125
Capitulo IV Cálculos135
4.1 Cálculo de parámetros hidrodinámicos136
4.2 Cálculo del Diseño Mecánico del Riser 139
4.2.1 Datos de diseño para el Riser (sección inferior)141
4.2.1.1 Cálculo del espesor por presión interna 142
4.2.1.2 Cálculo del espesor sección cilíndrica (ASME, Sección VIII, División 1,
Párrafo UG-27. c.1) 143
4.2.1.3 Revisión de espesores por Presión externa (FV) 145
4.2.1.4 Revisión del espesor por presión externa con anillos de refuerzo (FV=15
psi), (UG-28.c ASME Sección VIII, División 1)149
4.2.1.5 Diseño del anillo de refuerzo 156
4.2.1.6 Cálculo de momento de inercia 157
4.2.1.7 Cálculo de momento de inercia teórico requerido158
4.2.2 Datos de diseño para el Riser (sección superior)
4.2.2.1 Calculo del espesor por presión interna 159
4.2.2.2 Cálculo del espesor de la sección cilíndrica (ASME, Sección VIII, División
1, Párrafo UG-27. c.1) 161

4.2.2.3 Calculo del espesor de la tapa superior semieliptica 2.1 (ASIME, Seccion
VIII, División 1. Párrafo UG-32.c) 163
4.2.2.4 Revisión de espesores de la sección cilíndrica por Presión externa 164
4.2.2.5 Diseño del anillo de refuerzo 171
4.2.2.6 Cálculo del momento de inercia 172
4.2.2.7 Cálculo de momento de inercia teórico requerido 173
4.2.3 Diseño obtenido del Riser de la Unidad FCC 174
Resultados176
Conclusiones181
Anexos184
Anexos
Anexos184Anexo 1 Hoja de datos de Riser184Anexo 2 Esfuerzos permisibles del material SA-516-70 (acero al carbono)185
Anexos184Anexo 1 Hoja de datos de Riser184Anexo 2 Esfuerzos permisibles del material SA-516-70 (acero al carbono)185Anexo 3 Esfuerzos permisibles del material SA-387-12 (1Cr-1/2Mo)188
Anexos184Anexo 1 Hoja de datos de Riser184Anexo 2 Esfuerzos permisibles del material SA-516-70 (acero al carbono)185Anexo 3 Esfuerzos permisibles del material SA-387-12 (1Cr-1/2Mo)188Anexo 4 Módulo de elasticidad192
Anexos184Anexo 1 Hoja de datos de Riser184Anexo 2 Esfuerzos permisibles del material SA-516-70 (acero al carbono)185Anexo 3 Esfuerzos permisibles del material SA-387-12 (1Cr-1/2Mo)188Anexo 4 Módulo de elasticidad192Anexo 5 Determinación del factor A194
Anexos184Anexo 1 Hoja de datos de Riser184Anexo 2 Esfuerzos permisibles del material SA-516-70 (acero al carbono)185Anexo 3 Esfuerzos permisibles del material SA-387-12 (1Cr-1/2Mo)188Anexo 4 Módulo de elasticidad192Anexo 5 Determinación del factor A194Anexo 6 Determinación del valor B, material SA-516-70 (acero al carbono)196
Anexos184Anexo 1 Hoja de datos de Riser184Anexo 2 Esfuerzos permisibles del material SA-516-70 (acero al carbono)185Anexo 3 Esfuerzos permisibles del material SA-387-12 (1Cr-1/2Mo)188Anexo 4 Módulo de elasticidad192Anexo 5 Determinación del factor A194Anexo 6 Determinación del valor B, material SA-516-70 (acero al carbono)196Anexo 7 Determinación del factor B, material SA-387-12 (1Cr-1/2Mo)197

Índice de Figuras

Figura 1. 1. Régimen de fluidización.	4
Figura 1. 2. Régimen de fluidización de acuerdo con la velocidad del fluido	6
Figura 1. 3. Régimen de fluidización.	7
Figura 1. 4. Ejemplos de lecho fluidizado circulante	9
Figura 1. 5. Clasificación de tipos de partícula según Geldart1	6
Figura 1. 6. Evolución de la pérdida de carga en el lecho Δp con respecto de la	
velocidad superficial del gas U 2	0
Figura 1.7. Mecanismo de reacción del craqueo térmico3	2
Figura 1.8. Formación de α -olefinas durante el proceso de craqueo térmico3	3
Figura 1.9. Estructura tetraédrica de la zeolita4	0
Figura 1.10. Estructura molecular parcial de la zeolita4	0
Figura 1.11. Mecanismo de reacción del craqueo catalítico4	2
Figura 2.1. Esquema de una Unidad de craqueo catalítico del tipo lecho fijo Houdry5	0
Figura 2.2. Dibujo esquemático de una refinería5	4
Figura 2.3. Ejemplo de diseño de una Unidad FCC Side By Side6	5
Figura 2.4. Ejemplo de convertidor catalítico y accesorios de Orthoflow de Kellogg	
Company 6	6
Figura 2.5. Sección de Alimentación de Unidad FCC6	7
Figura 2.6. Típico sistema de ciclones6	;9
Figura 2.7. Vista esquemática de ciclones7	0
Figura 2.8. Agotador de Catalizador7	'1
Figura 2.9. Válvula de corredera típica y una válvula de tapón típica7	3
Figura 2.10. Sistema de regeneración7	'4
Figura 2.11. Diseños de distribuidores de aire7	5
Figura 3.1. Carga externa de un cuerpo8	2
Figura 3.2. Carga interna de un cuerpo8	4
Figura 3.3. Diagrama esfuerzo-deformación para el acero bajo en carbono8	8
Figura 3.4. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria convencional y real, para un	
material dúctil (acero) (no a escala) 8	9

Figura 3.5. Representación de estricción91
Figura 3.6. Ejemplo de esfuerzo cortante93
Figura 3.7. Diagrama esfuerzo permisible de acuerdo con el Código ASME Sección VIII
División 1, Subsección II94
Figura 3.8. Ejemplo de Torsión94
Figura 3.9. Módulo de elasticidad96
Figura 3.10. Clasificación de recipientes a presión97
Figura 3.11. Sección cilíndrica (UG-27-c1)114
Figura 3.12. Esfera (UG-27-d)116
Figura 3.13. Tapa semielíptica (UG-32-c)118
Figura 3.14. Tapa Hemisférica (UG-32-e)119
Figura 3.15. Tapa Toriesférica (UG-32-d)121
Figura 3.16. Transición Cónica (UG-32-d)122
Figura 3.17. Representación esquemática de variables para el diseño de recipientes
cilíndricos sometidos a presión externa 124
Figura 3.18. Tipos de soportes sometidos a presión externa
Figura 3.19. Recipiente a presión por carga de sismo
Figura 3.20. Recipiente a presión por carga de viento
Figura 3.21. Cargas de pared de los recipientes132
Figura 3.22. Cargas combinadas que ejecutan en el recipiente132
Figura 3.23. Cargas combinadas que ejecutan en el recipiente133
Figura 4.1. Representación esquemática del Riser y su distribución de anillos175
Figura I. Clasificación de tipos de partícula según al esquema propuesto por Geldart por
peso y tamaño176
Figura II. De acuerdo con la velocidad de operación y el diámetro de la partícula dentro

Índice de Tablas

Tabla I. Unidades FCC en México de acuerdo con el Sistema Nacional de Refinación.

XIII
Tabla 1.1. Clasificación de las partículas con sus características principales
Tabla 1.2. Valores de las constantes K1 y K2 obtenidos de datos experimentales26
Tabla 1.3. Comparación entre Cracking térmico y Cracking Catalítico
Tabla 2.1. Evolución del craqueo catalítico pre-invención del proceso de craqueo
catalítico en lecho fluidizado52
Tabla 2.2. Pool de gasolinas61
Tabla 2.3. Se presentan las principales reacciones que ocurren en la desintegración
catalítica
Tabla 2.4. Calor de combustión de reacciones dentro del regenerador76
Tabla 2.5. Características de regeneración 77
Tabla 2.6 Evolución del craqueo catalítico pre-invención del proceso de craqueo
catalítico en lecho fluidizado78
Tabla 4.1. Datos de diseño de la sección inferior del Riser 141
Tabla 4.2. Datos de diseño de la sección superior del Riser

Objetivos

General

Calcular el espesor de la placa del cuerpo del Riser de la Unidad de Desintegración Catalítica de Lecho Fluidizado de acuerdo con el código ASME Sección VIII División 1.

Específicos

- Describir el proceso FCC (Fluid Catalytic Cracking), las partes principales de la Unidad y su importancia dentro de la industria de refinación del petróleo.
- Describir la Normatividad técnica aplicable para el diseño mecánico de recipientes a presión.
- Calcular la velocidad mínima, velocidad de operación y velocidad terminal para determinar el comportamiento de las partículas y el fenómeno de fluidización.

Resumen

Con el objeto de comprender el fenómeno presente en este reactor, se estudiaron los diferentes tipos de fluidización, diferencias entre craqueo térmico y catalítico, así como sus parámetros hidrodinámicos a considerar.

Así mismo, el proceso de desintegración catalítica ocupa un lugar fundamental en la industria del petróleo y gas, por esta razón, se menciona el desarrollo y transformación de la unidad a través del tiempo, destacando sus partes principales y su contribución al "pool" de gasolina (Esta es la parte final de la refinería, aquí llegan todas las gasolinas que vienen desde las distintas operaciones de la refinería y se añaden los aditivos finales que permitan su comercialización).

Por otra parte, el estudio de los esfuerzos a los que se encuentra sometido el cuerpo del recipiente a presión y la selección de los materiales, están sujetos a la normalización de diferentes códigos y estándares, asegurando su integridad mecánica, seguridad operacional y correcto desempeño.

Introducción

Dentro de la industria de refinación del petróleo, el proceso de desintegración catalítica es uno de los más importantes y complejos, dado que está constituido por una serie de etapas (reacción, separación del producto, agotamiento y regeneración) que interactúan dinámicamente estableciendo equilibrios químicos, térmicos y mecánicos. (Félix Flores, 2006, p. 7)

El nombre técnico formal para este proceso es el de "Desintegración Catalítica de Lecho Fluidizado", (en inglés Fluid Catalytic Cracking (FCC)).

Este proceso es uno de los más flexibles en la refinación del petróleo, dada su capacidad para convertir, en cuestión de segundos, gasóleos pesados de mediano valor en productos de alto valor como son: gasolina de alto octanaje y olefinas, le han dado una preponderancia económica ya que contribuye en un alto porcentaje al "pool" de gasolinas (producción total o fondo común de una refinería), por lo cual no es de sorprender que esta tecnología reciba una gran atención de parte de las compañías de refinación, firmas de ingeniería y proveedores de equipo.

Durante casi 80 años el avance tecnológico de las Unidades de desintegración catalítica, han tenido una evolución significativa y a pesar de tener diferentes configuraciones tienen el mismo objetivo, que es, convertir aquellas alimentaciones de peso molecular elevado y de bajo valor comercial en productos de peso molecular bajo y de alto valor comercial (Félix Flores, 2006).

XI

En la industria se utilizan diferentes tipos de Unidades, diseñadas y modificadas de acuerdo con las necesidades de cada planta. Los principales Licenciadores de estas tecnologías son: UOP (Universal Oil Products), Kellogg Brown y Root – KBR, ExxonMobil Research and Engineering (EMRE), The Shaw Group Inc., CByl Lummus y Shell Global Solutions International.

Existen más de 400 Unidades FCC que operan en todo el mundo con una capacidad de procesamiento de 20 MMBPD (millones de barriles por día). Estados Unidos, China, India, Japón y Brasil tienen la mayoría de las Unidades operativas. (Sadeghbeigi, 2020)

En México, se cuenta con un total de 11 Unidades en las 6 refinerías de Petróleos Mexicanos (PEMEX), con capacidad instalada de procesamiento de 400 mil barriles por día. Dentro de una refinería este proceso es de gran importancia, ya que más del 45% de la gasolina obtenida proviene de la Unidad FCC.

Las 11 Unidades de FCC del Sistema Nacional de Refinación (SNR) de PEMEX se muestran en la Tabla I, se encuentran distribuidas en 6 refinerías, localizadas en Cadereyta, Nuevo León; Ciudad Madero, Tamaulipas; Minatitlán, Veracruz; Salina Cruz, Oaxaca; Salamanca, Guanajuato y Tula, Hidalgo.

En el año 2007 la capacidad total de procesamiento era de 375 mil barriles por día (BPD) (García Rosas, 2016).

Ubicación	Unidad	Modelo	Licenciador	Capacidad, Bpd
Cadereyta, Nuevo León	FCC-I	Orthoflow	ABB Lummus	65,000
Cadereyta, Nuevo León	FCC-II	Side by Side	Stone y Webster	25,000
Cd. Madero, Tamaulipas	FCC-I	Side by Side	Stone y Webster	30,000
Cd. Madero, Tamaulipas	FCC-II	Side by Side	ABB Lummus	30,000
Minatitlán, Veracruz	FCC-I	Side by Side	Stone y Webster	29,000
Minatitlán, Veracruz	FCC-II	Orthoflow	KBR	42,000
Salamanca, Guanajuato	FCC-II	Orthoflow Tipo F	M.W. Kellogg	40,000
Salina Cruz, Oaxaca	FCC-I	Orthoflow Tipo F	M.W. Kellogg	40,000
Salina Cruz, Oaxaca	FCC-II	Ultra Orthoflow	M.W. Kellogg	40,000
Tula, Hidalgo	FCC-I	Orthoflow Tipo F	M.W. Kellogg	40,000
Tula, Hidalgo	FCC-II	Orthoflow	KBR	40,000

Tabla I. Unidades FCC en México de acuerdo con el Sistema Nacional de Refinación.

Fuente: (García Rosas, 2016)

Con el propósito de aumentar la producción de petrolíferos, una de las acciones del Gobierno de México, fue iniciar el desarrollo del Proyecto de la Refinería Olmeca a cargo de Pemex y bajo la coordinación de la Secretaria de Energía con una capacidad de proceso de 340 mil barriles diarios de crudo pesado tipo Maya, la cual se ubica en el municipio de Paraíso, en el estado de Tabasco, la nueva Refinería llamada "Olmeca" contará con una Unidad de FCC que procesará una alimentación de 94,000 BPD mediante la tecnología del Licenciador UOP y se prevé que empiece a operar en el año 2024.

En 1993, Pemex adquirió su participación de la refinería ubicada en Houston, Texas, y se asoció con Shell Oíl Company en el año 2022. La refinería está diseñada para procesar crudo maya pesado con hasta 22 °API y altos contenidos de azufre, la refinería de Deer Park tiene una capacidad de procesamiento de crudo de 340,000 BPD y sus plantas le permiten procesar crudo pesado y ligero sin generar combustóleo, obteniendo una producción de 110,000 MBPD de gasolina, 90 MBPD de diésel y 25 MBPD de turbosina.

Capítulo I Estado del Arte

La función de un lecho puede ser como reactivo, catalizador o inerte. Un lecho se define como partículas dispuestas al azar, pueden tener una forma geométrica determinada, (esferas, cilindros, anillos, etc.) o ser irregulares. Las formas estructuradas se disponen espacialmente de forma ordenada en el reactor.

1.1 Fluidización.

La fluidización es un proceso mediante el cual un fluido tiene contacto con un sólido en forma de pequeñas partículas (lecho), que da origen a algo muy parecido a un líquido. Esto se logra haciendo circular un fluido, ya sea un gas o un líquido, de manera ascendente a través del lecho a una velocidad que sea suficiente para ejercer una fuerza sobre las partículas que contrarreste exactamente su peso; de esta manera, en lugar de una estructura rígida mantenida en su lugar por medio de fuerzas de contacto derivadas de la gravedad, el lecho adquiere propiedades similares a las de un fluido, libre de fluir y deformarse, con las partículas capaces de moverse relativamente libres entre sí (Gibilaro, 2001).

Según Kunii y Levenspiel (1991) "La fluidización es la operación mediante la cual las partículas sólidas se transforman en un estado fluido mediante la suspensión en un gas o líquido".

1.2 Régimen de flujo

El comportamiento de un gas fluyendo a través de un tubo depende de la presión, ya que puede estar en estado molecular, intermedio, o viscoso. Como resultado se pueden tener diferentes regímenes de flujo, y es posible definirlos mediante el grupo adimensional Knudsen, definido como la relación entre la trayectoria libre promedio de las moléculas (λ) y el diámetro del ducto (D) como se presenta en la ecuación siguiente:

$$Kn = \frac{\lambda}{D} \tag{1.1}$$

Si Kn > 1, se tiene flujo molecular. En estas condiciones, el gas está muy disperso, existen pocas colisiones entre moléculas lo cual hace que el concepto de viscosidad no tenga aplicación. No es posible fluidizar.

Si Kn \approx 1, se tiene flujo intermedio. El comportamiento está regido tanto por el fenómeno molecular y la viscosidad. Se puede operar un lecho fluidizado en estas condiciones.

Si Kn < 1, el gas está en un estado viscoso. El flujo observado puede ser laminar, de transición o turbulento, dependiendo en el número de Reynolds. Los lechos fluidizados operan comúnmente en estas condiciones.

1.3 Régimen de fluidización

Kunii y Levenspiel (1991) en su obra "*Fluidization Engineering*" explica los distintos regímenes de fluidización que se presentan a continuación:

Si un fluido circula en dirección ascendente, a través de un lecho de partículas finas y el caudal es bajo, el fluido simplemente se filtra a través de los espacios vacíos entre partículas estacionarias; este estado se denomina lecho fijo, ver inciso (a) de la figura 1.1. Al aumentar el caudal, se alcanza un punto en el que todas las partículas quedan suspendidas por el gas o el líquido que fluye hacia arriba.

En este punto la fuerza de fricción entre el fluido y las partículas se equilibra con el peso de éstas, desapareciendo entonces la componente vertical de la fuerza de compresión entre partículas adyacentes. De este modo, la pérdida de carga a través de un volumen determinado de lecho es igual al peso de las partículas existentes por unidad de área. El lecho se considera simplemente fluidizado y se aprecia en el inciso (b) de la figura 1.1, donde se denomina lecho a mínima fluidización o lecho en comienzo de fluidización.

Si entonces se aumenta aún más la velocidad por encima de este punto, las partículas del sólido se mantienen en suspensión en la corriente gaseosa, por lo cual como se muestra en los incisos (c y d) de la figura 1.1 y los incisos (e y g) de la figura 1.3 se puede decir que el lecho es fluidizado.



Figura 1. 1. Régimen de fluidización. Fuente: Kunii y Levenspiel (1991)

Mientras es fácil de distinguir entre los lechos fijos (está quieto) y fluidizados (está suspendido), el estado de mínima fluidización U_{mf} es el punto de transición entre los anteriores, y muy difícil de observar.

En función del tipo de fluido (líquido o gas), y del tamaño de las partículas, los lechos fluidizados se comportan de forma diferente.

En sistemas sólido-líquido, van en aumento de la velocidad de flujo sobre la mínima de fluidización produce una expansión progresiva y homogénea del lecho. Un lecho con estas características se denomina no burbujeante, de fluidización particulada

u homogéneamente fluidizada como se puede observar en el inciso (c) de la figura 1.1. Resulta poco frecuente observar este comportamiento, teniendo lugar sólo en ciertos casos de partículas muy ligeras con gas denso a alta presión.

Generalmente el comportamiento de los sistemas gas-sólido es bastante diferente. Así, al producirse un incremento en la velocidad del gas por encima de la correspondiente a la mínima fluidización, se observan grandes inestabilidades con aparición de burbujas y canales.

A mayores velocidades, el lecho toma el aspecto de un líquido en ebullición, la agitación pasa a ser más violenta y el movimiento de las partículas más vigoroso, ascendiendo rápidamente grandes burbujas a través del lecho; además, el lecho no se expande. En el inciso (d) de la figura 1.1, se muestra el tipo de lecho que se conoce como lecho de fluidización agregativa, burbujeante o heterogénea.

Si las partículas son de tamaño intermedio, tras el estado de mínima fluidización, aparece directamente la fluidización burbujeante.

En la figura 1.2 se observa que a medida que aumenta la velocidad, en los sistemas gas-sólido, las burbujas son más rápidas y pueden coalescer y crecen a medida que ascienden.



Figura 1.2. Régimen de Fluidización de acuerdo con la velocidad del fluido. Fuente: (Conesa, 2010)

Si el lecho es profundo y la velocidad de paso de gas es alta, la coalescencia de las burbujas puede llegar a alcanzar el diámetro del tubo, este fenómeno se conoce como sluging, caracterizado por la aparición de burbujas que ocupan la sección transversal del depósito, denominadas slugs.

El sluging puede ser de dos tipos, slug plano o de pared y slug axial, dependiendo del tamaño de las partículas del lecho. En el caso de partículas más finas, éstas caen suavemente por la pared que rodea las burbujas, dando lugar a burbujas de tamaño elevado; a continuación, en el inciso (e) de la figura 1.3, se observa el fenómeno conocido con el nombre de sluging con slugs axiales.



Figura 1. 3. Régimen de fluidización. Fuente: Kunii y Levenspiel (1991)

Para partículas de mayor grosor, la fracción de lecho por encima de las burbujas es empujada hacia arriba, como si lo hiciera un pistón. Las partículas caen desde el slug, que finalmente se desintegra. A partir de dicho instante aparece un nuevo slug, repitiéndose continuamente este movimiento inestable. El comportamiento se llama sluging con slugs de pared ver inciso (f) de la figura 1.3.

El fenómeno de sluging se debe tener especialmente en cuenta en el diseño de lechos fluidizados largos y estrechos. Este tipo de lecho también es conocido como lecho fragmentado.

En la fluidización de partículas finas a una velocidad del gas suficientemente alta, se supera el valor de la velocidad terminal de los sólidos. En este momento, el arrastre

de partículas llega a ser apreciable con lo que desaparece la superficie superior del lecho y, en lugar de burbujas, se observa un movimiento turbulento de grupos de sólidos y espacios de gas de varios tamaños y formas. Este estado se denomina de lecho fluidizado turbulento, ver inciso (g) de la figura 1.3.

Con un aumento adicional de la velocidad del fluido, los sólidos se eliminan del lecho con el gas. En este estado, en el inciso (h) de la figura 1.3, tenemos un lecho fluidizado en fase dispersa, diluida o pobre con transporte neumático de partículas.

Tanto en la fluidización turbulenta como en la fase dispersa, se arrastran grandes cantidades de partículas, lo que impide las operaciones en estado estacionario. Para el funcionamiento en estado estable en estos modos de contacto las partículas arrastradas deben ser recuperadas por ciclones y devueltas a los lechos. En general, los sistemas que emplean ciclones para la recuperación de partículas se conocen con el nombre de lechos fluidizados circulantes.

En los lechos fluidizados turbulentos con arrastre moderado de partículas, se utilizan ciclones internos como se observa en el inciso (a) de la figura 1.4. Por otro lado, la velocidad de arrastre es mucho mayor en los lechos fluidizados de fase dispersa, lo que normalmente requiere el uso de ciclones fuera del lecho, ver inciso (b) de la figura 1.4. En los lechos fluidizados circulantes es crucial, para desarrollar correctamente las operaciones, que la recirculación de las partículas a través de los elementos de retención sea suave y uniforme. (Kunii & Levenspiel, 1991).



Figura 1. 4. Ejemplos de lecho fluidizado circulante

1.4 Aplicación de los lechos fluidizados

De acuerdo con Gibilaro (2001), a continuación, se mencionan algunas aplicaciones de los lechos fluidizados:

Los lechos fluidizados líquidos se emplean ampliamente en el tratamiento de agua,

procesamiento de minerales y tecnología de fermentación.

Los lechos fluidizados por gas se utilizan ampliamente en los reactores químicos y también como cámaras de combustión para elevar el vapor para la generación de energía. Esta última aplicación puede implicar la quema de carbón y residuos urbanos y agrícolas en lechos de arena fluidizados por aire. Los desechos agrícolas y los cultivos energéticos cultivados específicamente se pueden fluidizar en vapor para producir un gas combustible rico en hidrógeno.

Una aplicación importante de la tecnología de lecho fluidizado se encuentra en el reactor de craqueo catalítico, o "desintegración catalítica", que se encuentra en el corazón del proceso de refinación del petróleo. Aquí, las partículas de catalizador que promueven la descomposición de las grandes moléculas de petróleo crudo en los componentes más pequeños de gasolina, diésel, fuel oil (combustóleo), etc., son fluidizadas por el crudo vaporizado.

Un subproducto no deseado de las reacciones es el carbono, que se deposita en las superficies de las partículas bloqueando su acción catalítica. Las propiedades del estado fluidizado se explotan adicionalmente para superar este problema. El catalizador se reactiva continuamente haciéndolo circular a otro lecho, donde se fluidiza con aire en el que el carbón se quema, y luego se vuelve a regenerar, para continuar realizando su función catalítica asignada.

Atendiendo a los dos tipos de fluido que pueden ser empleados, líquidos y gases, existen dos tipos de fluidización: fluidización sólido-gas y fluidización sólido-líquido. Por lo tanto, al referirse a fluidización se entenderá que es fluidización solido-gas, ya que es el principio utilizado en el craqueo catalítico.

1.5 Reactor de lecho fijo

Si un fluido circula en un lecho de partículas y el caudal es bajo, las partículas permanecen estacionarias, a este fenómeno se le conoce como lecho fijo.

Los reactores de lecho fijo son los equipos más utilizados en la industria de procesos (farmacéutica, alimenticia, petrolera, etc.), principalmente como reactores catalíticos, con catalizadores sólidos granulares convencionales y en sus diferentes variantes operacionales que existen, por lo que Froment (1990) nos presenta las dos ventajas principales de este tipo de reactor:

- a) Altas conversiones de reacción.
- b) Altas cargas de catalizador por unidad de volumen de líquido.

Así mismo, con el uso de los reactores de lecho fijo Froment (1990) menciona algunos inconvenientes:

- a) La baja selectividad del catalizador, debido al largo tamaño de la partícula.
- b) Mala transmisión de calor debido a la pequeña mezcla.

1.6 Reactor de lecho fluidizado

Los reactores de lecho fluidizado se utilizan ampliamente en las industrias de procesos (donde se involucran procedimientos químicos, físicos, mecánicos, etc.), una característica distintiva de un reactor de lecho fluidizado es el lecho de sólidos o partículas catalíticas que está soportado por un flujo de gas.

Estos reactores tienen una excelente transferencia de calor y un buen mezclado de las partículas con el fluido. Los lechos fluidizados han sido muy usados en los procesos químicos, en los que los parámetros como la difusión o transferencia de calor son los principales parámetros de diseño. A continuación, Kunii y Levenspiel (1991) nos presentan algunas ventajas:

- a) El comportamiento del fluido que se presenta en las partículas (fluidización) permite un control continuo, propiciando un mezclado rápido de las partículas alcanzando igualdad de condiciones de temperatura en el lecho, lo que permite un control sencillo y seguro de operaciones isotérmicas.
- b) Los lechos fluidos se pueden utilizar en operaciones de gran tamaño.
- c) Las velocidades de transferencia de calor y masa entre el gas y las partículas son mayores comparados con otros modos de contacto.
- d) La capacidad de transferencia de calor entre un lecho fluidizado y un objeto inmerso en su interior es alta, con lo cual los intercambios de calor en los lechos fluidizados requieren una superficie de transferencia relativamente baja.

Con las ventajas del uso de los lechos fluidizados en aplicaciones industriales, Kunii y Levenspiel (1991) mencionan algunas desventajas:

 a) La presencia de burbujas en lechos burbujeantes disminuye el mezclado entre la fase densa y el gas que atraviesa el lecho en forma de burbujas.

- b) El rápido mezclado de partículas en el lecho provoca tiempos de residencia variables. El tratamiento continuo de solidos proporciona productos no uniformes y un rendimiento bajo, especialmente a altos niveles de conversión.
- c) La erosión en depósitos y tuberías debida a la abrasión por las partículas puede ser pronunciada. Por otra parte, las partículas finas en ocasiones son arrastradas por el gas y deben ser reemplazadas.
- d) En operaciones no catalíticas a alta temperatura, la aglomeración y sinterización de las partículas finas puede requerir un descenso en la temperatura de trabajo, reduciéndose así la velocidad de la reacción de forma considerable.

El menor costo de operación de los lechos fluidizados frente a otros reactores es el principal incentivo para su aplicación en la industria de procesos.

1.7 Determinación de parámetros hidrodinámicos

Es muy importante comprender los elementos clave del comportamiento hidrodinámico de los lechos fluidizados, ya que las características de flujo afectan el contacto gas-sólido, la transferencia de calor y masa, la dispersión del gas a medida que pasa a través del lecho, arrastre, desgaste, etc., todos los cuales están relacionados con el proceso general y el rendimiento del reactor.

1.7.1 Propiedades de las partículas de fluidización

El término con el que se determina la masa de las partículas es la densidad de partícula, ρ_p , definida como la relación entre la masa de una partícula, m_p , y su volumen hidrodinámico, V_h ; ver ecuación (1.2). Se entiende por volumen hidrodinámico el volumen

visto por el fluido en su interacción con la partícula e incluye el volumen de todos los poros que ésta pueda tener.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_h} \tag{1.2}$$

En partículas no porosas, se puede medir la densidad de partícula fácilmente con la ayuda de aparatos como el picnómetro (instrumento de medición que permite conocer la densidad de una sustancia mediante gravimetría), pero éstos no se pueden utilizar con partículas porosas porque dan el valor de la densidad absoluta, ρ_{abs} (masa de partícula entre volumen de material sólido que compone la partícula) y ésta no es apropiada cuando se estudia la interacción con un fluido.

Existe otro término que permite caracterizar el lecho de partículas. Éste es la densidad aparente del lecho, ρ_b representado en la ecuación (1.3), que define el cociente entre la masa de todas las partículas que forman el lecho, m_b , y el volumen que ocupan incluyendo los espacios vacíos entre ellas, denominado volumen aparente, V_{ap} .

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_{ap}} \tag{1.3}$$

A partir de la fracción de vacío del lecho fijo, ε , que representa la relación entre el volumen de espacios que separan las partículas del lecho y el volumen aparente de la ecuación (1.4), se puede establecer la dependencia entre las densidades de lecho y partícula como se muestra en la ecuación (1.5).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sum V_h}{V_{ap}} \tag{1.4}$$

$$\rho_b = (1 - \varepsilon)\rho_b \tag{1.5}$$

Generalmente, el término empleado para definir el tamaño de las partículas es el diámetro de partícula, d_p . En caso de no ser esféricas representa el diámetro de una esfera con la misma relación superficie a volumen que la partícula no esférica en cuestión. (Barreira, 2007, págs. 18-19)

1.7.2 Clasificación de Geldart para las partículas

La capacidad y el modo en que las diferentes partículas fluidizan varía según su naturaleza. Geldart clasifica las partículas en cuatro grupos distintos *(C, A, B, y D),* atendiendo a sus propiedades de fluidización en condiciones ambiente como se muestra en la figura 1.5, la clasificación de Geldart es la referencia que actualmente se utiliza más en todos los campos de la tecnología de partículas. A continuación, se describe los cuatro grupos según Geldart:

Grupo C: Son partículas cohesivas o polvos muy finos. La fluidización normal es extremadamente dificultosa (a veces, casi imposible) para estos sólidos porque las fuerzas interpartículas son más grandes que la acción del gas. La harina es un sólido característico de este grupo.

Grupo A: Son materiales con muy pequeño tamaño de partícula y/o baja densidad (< 1.4 g/cm³). Estos sólidos fluidizan fácilmente, y son los que primero tienen fluidización

homogénea, y tras superar el punto de mínimo burbujeo, tienen fluidización burbujeante. Las burbujas son pequeñas y rápidas, y la calidad de fluidización es buena. Los catalizadores FCC son característicos de estos sólidos.

Grupo B: Son materiales tipo arena con tamaños de partícula comprendidos entre 40 μ m y 500 μ m, y densidades comprendidas entre 1.4 y 4 g/cm³. Estos sólidos fluidizan de forma excelente, con fuerte formación de burbujas tras la mínima fluidización.

Grupo D: Son partículas grandes. Los lechos de estos sólidos son algo más complejos que las partículas del *Grupo B*. A medida que las partículas son más grandes, su comportamiento es errático con burbujas grandes que explotan o con un marcado canaleo. Ejemplos de este caso son el secado de granos de habas o café tostado.



Figura 1. 5. Clasificación de tipos de partícula según al esquema propuesto por Geldart por peso y tamaño (1972, 1973). Fuente: (Rhodes, 2008)

Las propiedades de fluidización de una partícula en aire se pueden predecir si pertenece a uno de los cuatro grupos. No obstante, se debe tener en cuenta que la operación a temperaturas y presiones por encima del ambiente puede suponer que una partícula, en concreto, muestre un comportamiento típico de un grupo diferente al que realmente pertenece.

El estado de fluidización burbujeante es el que más comúnmente se encuentra en los sistemas de uso comercial, puesto que el rango de velocidades del gas de fluidización en el que tiene lugar el estado no burbujeante con partículas del grupo A es pequeño. La velocidad superficial del gas a la que aparecen las primeras burbujas se conoce como velocidad de mínimo burbujeo, U_{mb} .

En las partículas del grupo A, donde $U_{mb} > U_{mf}$ (velocidad de mínima fluidización), las burbujas se dividen y coalescen continuamente existiendo un máximo tamaño de burbuja alcanzado. De ahí que la fluidización sea suave y de buena calidad.

En las partículas de los grupos B y D, con $U_{mb} = U_{mf}$, las burbujas crecen de manera continua sin existir un límite en cuanto al tamaño máximo alcanzado (sólo el definido por el diámetro del lecho). Por ello la fluidización es de peor calidad y lleva asociada grandes fluctuaciones de presión.

En el grupo C, las fuerzas entre partículas son grandes comparadas con las fuerzas de inercia debidas al gas de fluidización. Así, las partículas no son capaces de alcanzar la separación necesaria y la fluidización como tal no se produce. No aparecen burbujas, sino que se forman canales de gas a través del lecho de partículas. Sin embargo, la fluidización se puede conseguir con la ayuda de agitadores mecánicos o

mediante vibración. En la tabla 1.1 se resume la clasificación de Geldart, de acuerdo con

diversas características de las partículas y otros aspectos relativos a su fluidización.

Grupo	С	А	В	D
Características principales	Cohesivas, dificultad para fluidizar	ldeales para fluidización. Muestran un rango de no burbujeo	Comienzo del burbujeo a <i>U_{mf}</i>	Tamaño elevado
Partículas típicas	Harina Cemento	Catalizadores de craqueo	Arena de construcción	Grava Granos de café
Expansión del lecho	Baja por aparición de canales	Alta	Moderada	Baja
Velocidad de desaireación	Inicialmente rápida, luego exponencial	Lenta, lineal	Rápida	Rápida
Propiedades de Burbuja	No hay burbujas, sólo canales	Formación y coalescencia de burbujas hasta tamaño máximo	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite	Crecimiento de burbujas sin límite de tamaño
Mezcla de	Muy baja	Alta	Moderada	Baja
Mezcla de gas	Muy baja	Alta	Moderada	Baja
Aparición de chorros	No	No	Sólo en lechos poco profundos	Si, incluso en lechos profundos

Tabla 1.1. Clasificación de las partículas con sus características principales

Fuente: (Rhodes, 2008)

1.7.3 Fundamentos hidrodinámicos de fluidización

Un gas que se mueve en sentido ascendente a través de un lecho fijo de partículas experimenta una pérdida de carga, debida a la resistencia por fricción, que aumenta con el incremento de su velocidad. No obstante, se alcanza un punto donde el empuje que el gas ejerce sobre las partículas se iguala con el peso aparente de éstas en el lecho. En este punto las partículas se encuentran sustentadas por el gas, de modo que la separación entre ellas aumenta y el lecho comienza a fluidizar.

Por lo tanto, el comienzo de la fluidización está asociado a una pérdida de carga del gas a lo largo del lecho que es igual al peso aparente de todas sus partículas, por unidad de área de lecho perpendicular a la dirección del peso. En general se puede expresar con la ecuación siguiente:

 $perdida \ de \ carga \ en \ el \ lecho = rac{peso \ aparente \ de \ las \ particulas \ del \ lecho}{seccion \ transversal \ de \ lecho}$

En efecto, suponiendo un lecho de partículas de densidad ρ_p , con una altura L en un depósito de sección transversal A, siendo ε la fracción de vacío y ρ_g la densidad del gas fluidizante, se define la pérdida de carga a través de éste como:

$$\Delta P = \frac{(\rho_P - \rho_F) LA(1 - \varepsilon)g}{A}$$
(1.6)

Simplificando la ecuación (1.6), se obtiene la ecuación (1.7):

$$\Delta P = (\rho_P - \rho_F) L(1 - \varepsilon)g \tag{1.7}$$

Generalmente, la pérdida de carga medida a través del lecho evoluciona con la velocidad superficial del gas de forma muy similar a la mostrada más adelante, ver figura 1.6. La curva tiene diferente forma según se varía la velocidad del gas en sentido ascendente *(O'ABC)* o descendente *(ODC)*, presentando una pequeña histéresis (diferencia máxima que se produce cuando un fluido atraviesa un intervalo, primero en dirección ascendente y luego descendente).
El hecho de existir mayor pérdida de carga en el tramo *O'AB* de la curva tomada en sentido ascendente se debe a la necesidad de vencer las fuerzas de atracción entre las partículas del lecho, cuando se incrementa paulatinamente la velocidad del gas desde cero. En la curva de sentido descendente no se presenta este comportamiento pues se parte del estado de lecho fluidizado, habiéndose vencido por tanto esas fuerzas entre partículas.



Figura 1. 6. Evolución de la pérdida de carga en el lecho Δp con respecto de la velocidad superficial del gas U. Fuente: (Davidson & Harrison, 1963).

El incremento de pérdida de carga en el tramo O'AB es más pronunciado en partículas con elevada relación de compactación.

En cualquier caso (sentido ascendente o descendente), se observan dos tramos bien diferenciados: un tramo definido por los segmentos O'A/OD, que corresponde al estado de lecho fijo, donde la pérdida de carga aumenta con la velocidad superficial del gas; otro tramo determinado por los segmentos *BC/DC*, para el estado de lecho fluidizado, donde la pérdida de carga permanece constante frente al aumento de velocidad del gas.

Como se ha dicho, los tramos *BC/DC* definen el comportamiento del lecho en estado fluidizado y en ellos es aplicable a la ecuación (1.7). Por otra parte, los tramos *O'A/OD* corresponden al lecho fijo, donde el movimiento relativo entre las partículas es nulo y su separación permanece constante. En este tramo, la relación entre la pérdida de carga y la velocidad del gas se determina mediante la expresión propuesta en 1952 por el ingeniero químico turco Sabri Ergun, donde expresa el factor de fricción en una sección empacada en función del número de Reynolds modificado como se puede ver en la ecuación (1.8).

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{\mu_g U}{d_p^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2 \Phi} + 1.75 \frac{\rho_g U^2}{d_p} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 \Phi^2}$$

$$\begin{bmatrix} componente\\ laminar \end{bmatrix} \begin{bmatrix} componente\\ turbulento \end{bmatrix}$$
(1.8)

Siendo *U* la velocidad superficial del gas, μ_g su viscosidad dinámica y d_p el diámetro de partícula, Φ esfericidad de la partícula, ε porosidad de la partícula; en un lecho con fracción de vacío en estado fijo.

La ecuación de Ergun se obtuvo de manera experimental en un amplio rango de tamaños y formas de partícula, reflejando las componentes laminar y turbulenta del gradiente de presión. En condiciones de flujo laminar domina el primer término de la ecuación y, entonces, la pérdida de carga aumenta de forma lineal con la velocidad superficial del gas y es independiente de su densidad. En condiciones de flujo turbulento domina el segundo término y la pérdida de carga aumenta con el cuadrado de la velocidad, siendo ahora independiente de la viscosidad del gas.

En términos del número de Reynolds en la ecuación (1.9), se considera flujo completamente laminar cuando Re < 10 y flujo completamente turbulento para Re > 2000. Pero en la práctica, se utiliza generalmente la expresión de Ergun para determinar la pérdida de carga en el lecho fijo para todo el rango de condiciones de flujo, sin atender al régimen en que se esté evaluando; en este trabajo se seguirá dicha consideración.

$$Re = \frac{Ud_p \rho_g}{(1 - \varepsilon)\mu_q} \tag{1.9}$$

1.7.4 Velocidad mínima de fluidización

La velocidad de mínima fluidización, U_{mf} , es la velocidad superficial del gas a la que el lecho comienza a fluidizar. Experimentalmente, se ha comprobado que esta velocidad es dependiente del tamaño y la densidad de las partículas del lecho, de las propiedades del gas fluidizante, y las condiciones de presión y temperatura en las que se lleva a cabo el proceso.

La velocidad de mínima fluidización define el paso del estado de lecho fijo al de lecho fluidizado. De este modo, es posible obtener una expresión para su cálculo igualando la expresión de pérdida de carga en el lecho fijo donde la ecuación (1.8), es particularizada para las condiciones de mínima fluidización, con la expresión de perdida de carga en el lecho fluidizado por lo que se requiere de la ecuación (1.7). Asimismo, se obtiene:

$$(1 - \varepsilon_{mf})(P_P - P_g)g = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_{mf}^2} \frac{\mu_g U_{mf}}{d_p^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_{mf}} \frac{\rho_g U_{mf}^2}{d_p}$$
(1.10)

La ecuación (1.10) permite determinar la velocidad de mínima fluidización, conocidas las propiedades de las partículas y del fluido, además de la fracción de vacío del lecho. Esta ecuación se puede expresar en función del número adimensional de Reynolds, que evalúa el movimiento entre el fluido y la partícula en función de la velocidad de éste, y el número adimensional de Arquímedes, que valora la interacción entre fluido y partícula en función de la diferencia de sus densidades.

De esta forma, multiplicando por $\frac{\mu_g^2}{\rho_g d_p^3}$ se obtiene la ecuación:

$$(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_{mf}^2} \frac{\mu_g^2}{\rho_g d_p^3} \frac{U_{mf} d_p \rho_g}{\mu_g} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_{mf}} \frac{U_g^2}{\rho_g d_p^3} \frac{U_{mf}^2 d_p^2 \rho_g^2}{\mu_g^2}$$
(1.11)

Que se puede expresar de la forma siguiente:

$$(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g\frac{\rho_g d_p^3}{\mu_g^2} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_{mf}^2} \frac{\mu_g^2}{\rho_g d_p^3} Re_{mf} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_{mf}} \frac{U_g^2}{\rho_g d_p^3} Re_{mf}^2$$
(1.12)

Donde Re_{mf} es el número de Reynolds en el comienzo de la fluidización:

$$Re_{mf} = \frac{U_{mf}d_p\rho_g}{\mu_q} \tag{1.13}$$

Finalmente, la ecuación (1.13) se puede expresar como:

$$Ar = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_{mf}^2} Re_{mf} + 1.75 \frac{1}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_{mf}} Re_{mf}^2$$
(1.14)

Siendo la ecuación siguiente, el número de Arquímedes:

$$Ar = \frac{\rho_p (\rho_p - \rho_g) g d_p^3}{\mu_q^2} \tag{1.15}$$

En todas las ecuaciones el subíndice " $_{mf}$ " representa las condiciones de mínima fluidización, por tanto, u_{mf} es la velocidad superficial de flujo mínima para que se produzca la fluidización del lecho y así el resto de los parámetros con este subíndice están calculados bajo este régimen de flujo.

Analizando el desarrollo anterior, se tiene que el cálculo de la velocidad de mínima fluidización pasa por conocer las características de las partículas (densidad ρ_p y diámetro d_p) y del fluido (densidad ρ_g y viscosidad μ_g) durante la operación. Además, es preciso saber el valor de la fracción de vacío al comienzo de la fluidización, ε_{mf} , parámetro que

resulta complejo de determinar con exactitud y que, en la práctica, se aproxima al valor de la fracción de vacío en el lecho fijo, ε .

La velocidad mínima de fluidización se determina experimentalmente o bien, mediante correlaciones obtenidas por resultados experimentales. Distintos autores han resuelto esta ecuación con datos experimentales amplios. La ecuación más aceptada es la de Wen y Yu (Martín, Salcedo, & Font, 2011).

Cuando se desconoce los valores de la porosidad y/o esfericidad, se puede emplear la ecuación (1.16) de la forma siguiente:

$$Ar = K_1 R e_{mf}^2 + K_2 R e_{mf} (1.16)$$

Donde $K_1 y K_2$ se puede expresar de la manera siguiente:

$$K_1 = \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_{mf}} \tag{1.17}$$

$$K_2 = 150 \frac{\left(1 - \varepsilon_{mf}\right)}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_{mf}^2} \tag{1.18}$$

Wen y Yu notaron que $K_1 y K_2$ variaban muy poco para diferentes valores de Reynolds y desde entonces otros investigadores han propuesto valores para estos coeficientes. En la tabla 1.2 se muestra una síntesis de valores para $K_1 y K_2$ propuestos por diferentes investigadores.

datos experimentales			
Investigadores	K ₂ /2K ₁	1/ <i>K</i> ₁	
Wen y Yu (1966)	33.7	0.0408	
Richardson (1971)	25.7	0.0365	
Swenana y Vogel (1977)	25.3	0.0571	
Babin (1962)	23.5	0.0651	
Chitester (1984)	28.7	0.0494	
Events: (Martín Salanda & East 2011)			

Tabla 1.2. Valores de las constantes K1	y K2	obtenidos de
---	------	--------------

Fuente: (Martin, Salcedo, & Font, 2011)

De cualquier forma, la velocidad mínima de fluidización determinada por estas correlaciones está sujeta a desviaciones importantes en un orden del 35%, por lo que no es infrecuente la determinación experimental.

1.7.5 Velocidad terminal.

La velocidad terminal es aquella velocidad en la cual una partícula aislada puede ser arrastrada por la corriente del fluido.

Cuando se trabaja a velocidades ligeramente superiores a la terminal, cambia considerablemente el aspecto de un lecho, con una cantidad de burbujas muy grande y una agitación que hace que se proyecten muchas partículas por encima del lecho, siendo difícil la distinción de la frontera entre la superficie del lecho y el espacio superior. El lecho tiene un régimen tan errático que presenta unas fluctuaciones de presión muy grandes con cambios tremendos en la porosidad a lo largo del tiempo.

Para calcular la velocidad terminal, se tiene que usar como tamaño de partícula el inferior de la distribución de tamaños que se utilice. Para una partícula aislada, la velocidad terminal viene dada por la aplicación de un balance de cantidad de movimiento, cuya expresión matemática queda de la manera siguiente:

$$U_t = \sqrt{\frac{4d_p(\rho_p - \rho_g)g}{3\rho C_D}}$$
(1.19)

Donde C_D es un coeficiente de descarga que depende de las características de las partículas y del régimen de circulación del gas. Esta ecuación es equivalente a la ecuación de caída de un sólido en un medio viscoso. La situación es idéntica, ya que, en un caso, el fluido está estacionario y la partícula cae por gravedad, mientras que, en el caso de la velocidad terminal, la partícula no cae por su gravedad por que la mantiene una corriente vertical.

El valor de C_D , en el caso de sedimentación reptante (que ocurre a muy baja velocidad, o que es un fluido altamente viscoso con valores de *Re* muy bajos), venía dado por la ecuación de Stokes. Sin embargo, para el caso de la velocidad terminal (generalmente un gas que sostiene una partícula), el Reynolds es muy superior, y C_D no puede obtenerse de forma teórica, y su estimación está basada en correlaciones experimentales.

Haider y Levenspiel (1989) obtuvieron una correlación experimental para el valor de C_D en función de Φ_s y Re_p :

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \left[1 + 8.171e^{(-4,0566\Phi_s)} Re_p^{0,0964+0.5565\Phi_s} \right] + \frac{73,69 \, e^{(-5,0748\Phi_s)} Re_p}{Re_p + 5,378 \, e^{(6,2122\Phi_s)}} \tag{1.20}$$

1.8 Cracking

Uno de los procesos más importantes en un complejo de refinación es el craqueo de las fracciones de petróleo, el cual se fundamenta en la adición de calor para promover la ruptura de enlaces *C-C* (carbono – carbono) y *C-H* (carbono – hidrógeno) a través de reacciones radicalarias que conllevan la disminución del tamaño molecular de hidrocarburos mayores, obteniéndose un producto cuya constitución química consta de una mezcla de hidrocarburos más ligeros y que son comunes en productos de alto valor comercial, como la gasolina, los gases combustibles (metano, etileno, propileo, etc.) y el gasóleo liviano (Alvarado, Delgado Linares, & Medina, 2015).

El Craqueo o Cracking es un proceso químico por el cual un compuesto normalmente orgánico, se descompone o fracciona en compuestos más simples.

De acuerdo con Egloff (1937) el término craqueo se aplica a la descomposición de los componentes del petróleo que es inducida por temperaturas elevadas (> 350 °C), por lo que los componentes del petróleo de mayor peso molecular se convierten en productos de menor peso molecular. Las reacciones de craqueo implican la ruptura de enlaces C-C y se favorecen termodinámicamente (Speight, 2007 p. 474).

La alimentación de este proceso consiste en residuos de vacío (C_{40}) y/o gasóleos pesados (atmosféricos o de vacío, C_{12} - C_{30}). Existen diferentes variantes del proceso de craqueo: el craqueo térmico (coquificación retardada, coquificación fluidizada, reducción de viscosidad (visbreacking), etc.) y el fluid catalytic cracking (FCC, craqueo catalítico fluidizado).

Indica Wuithier, (1971), los fundamentos y objetivos de estos procesos son similares, la diferencia más notable es que en el primero se promueven las reacciones de ruptura en ausencia de catalizadores, mientras que el segundo emplea catalizadores ácidos.

Esta discrepancia promueve una gran diferencia en cuanto al mecanismo gobernante de las reacciones en cada proceso, siendo radicalario para el craqueo térmico y carbocatiónico para el FCC, efecto que se ve reflejado en la calidad del producto obtenido, específicamente en la gasolina, cuyo índice de octano (sin la adición de aditivos químicos) se encuentra alrededor de 92-95 para el producto obtenido por FCC, mientras que la gasolina obtenida por craqueo térmico presenta un índice de octano de alrededor de 70-75 (Alvarado, Delgado Linares, y Medina, 2001, 294 pp.).

El craqueo térmico depende de un mecanismo de radicales libres para causar ruptura de enlaces de carbono-carbono del hidrocarburo y una reducción en el tamaño molecular, con la formación de olefinas, parafinas, y algunos aromáticos. En el craqueo catalítico, se forman los iones carbonio en una superficie del catalizador, donde se producen rupturas de enlaces, isomerizaciones, intercambios de hidrógeno, olefinas, isoparafinas, isoolefinas, y aromáticos (Ramos Carpio, 1997).

1.8.1 Cracking térmico

Antes de la llegada del proceso de craqueo catalítico, el craqueo térmico era el proceso principal disponible para convertir materias primas de bajo valor en productos más ligeros y con alto valor. Las refinerías utilizan procesos térmicos como la coquización retardada, continua y la visbreaking para el craqueo de hidrocarburos residuales.

29

El cracking térmico está en función de la temperatura y el tiempo. La reacción ocurre cuando los hidrocarburos en ausencia de un catalizador se exponen a altas temperaturas en el rango de (425 °C - 650 °C). El paso inicial en la química del craqueo térmico es la formación de radicales libres. Se forman al romper el enlace C-C. Un radical libre reacciona con un hidrocarburo abstrayendo un átomo de hidrógeno para producir un producto final y un nuevo radical libre por lo tanto es una molécula sin carga con un electrón desapareado. La ruptura produce dos especies sin carga que comparten un par de electrones.

La ecuación química (1.21) muestra la formación de un radical libre cuando una molécula de parafina se rompe térmicamente, de manera que los procesos de craqueo producen rendimientos sustancialmente más altos de olefinas con un átomo de carbono menos que el hidrocarburo original (Sadeghbeigi, 2020).

Los radicales libres son extremadamente reactivos y de corta duración, por lo tanto, se producen dos tipos generales de reacción durante el craqueo térmico:

 La descomposición de moléculas grandes en moléculas pequeñas (reacciones primarias).

Son todas aquellas que son beneficiadas con el aporte de temperatura, son las de mayor interés, asimismo las ecuaciones químicas (1.22) y (1.23) se les conoce como reacciones de temperatura.

$$\begin{array}{c} \mathsf{CH}_3 \ \mathsf{CH}_2 \ \mathsf{CH}_2 \ \mathsf{CH}_2 \ \mathsf{CH}_3 \rightarrow \mathsf{CH}_4 + \mathsf{CH}_3 \ \mathsf{CH} = \mathsf{CH}_2 & (1.22) \\ \\ & \mathsf{Butano} & \mathsf{Metano} & \mathsf{Propileno} \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \mathsf{CH}_3 \ \mathsf{CH}_2 \ \mathsf{CH}_2 \ \mathsf{CH}_2 \ \mathsf{CH}_3 \rightarrow \mathsf{CH}_3 + \mathsf{CH}_2 + \mathsf{CH}_2 = \mathsf{CH}_2 & (1.23) \\ \\ & \mathsf{Butano} & \mathsf{Etano} & \mathsf{Etileno} \end{array}$$

 Reacciones mediante las cuales algunos de los productos primarios interactúan para formar mayor peso molecular (reacciones secundarias).

No es aconsejable que se produzcan algunas de ellas, por ejemplo: la polimerización, isomerización, alquilación, deshidrogenación, condensación, etc., teniendo en cuenta en las ecuaciones químicas (1.24) y (1.25) se van dando productos no deseados.

$$CH_2 = CH_2 + CH_2 = CH_2 \rightarrow CH_3 \quad CH_2 \quad CH = CH_2$$
(1.24)

 $R \cdot CH = CH_2 + R^1 \cdot CH = CH_2 \rightarrow Residuo agrietado + Coque + Otros productos$ (1.25)

La etapa de iniciación en un proceso de craqueo consiste en reacciones endotérmicas que promueven rupturas hemolíticas en las cadenas hidrocarbonadas que constituyen la alimentación del proceso.

Estas reacciones coadyuvan la formación de radicales libres que pueden experimentar escisiones β , claves para la formación de olefinas. Para esquematizar esta secuencia de reacciones, la figura 1.7 muestra el mecanismo simplificado para un proceso de craqueo térmico.



Figura 1.7. Mecanismo de reacción del craqueo térmico. Fuente: (Alvarado, Delgado Linares, & Medina, 2015)

Aunque las β -escisiones son frecuentes en el desarrollo de las reacciones de craqueo, también pueden ocurrir α -escisiones que conducen a la formación de α -olefinas, tal como se muestra en la figura 1.8.



Figura 1.8. Formación de α -olefinas durante el proceso de craqueo térmico Fuente: (Alvarado, Delgado Linares, & Medina, 2015)

Se puede observar que los mecanismos mostrados anteriormente se fundamentan en el craqueo de una molécula hidrocarbonada de cadena abierta; sin embargo, es importante destacar que las reacciones se pueden iniciar a partir de compuestos nafténicos, alquilaromáticos, etc. Por otra parte, se demuestra que a partir del craqueo térmico se pueden generar olefinas, incluyendo el menor representante de esta familia, el etileno.

Condiciones de Operación

Como plantea Speight, (2007) se mencionan algunas operaciones útiles para realizar con mayor eficiencia los procesos térmicos que se encuentran regidos en el craqueo:

Temperatura

- a) Las reacciones de cracking se inician por encima de los 400 °C, en tanto que la temperatura usual de reacción es de los 455 °C – 540 °C.
- b) Los tiempos de reacción que forman el coque, es menor a mayor temperatura.

Tiempo de residencia

- a) El tiempo de residencia se consigue en las cámaras de reacción donde se terminan las reacciones iniciadas en los hornos. Es allí donde se acumula el carbón residual.
- b) El diseño de la Unidad contempla que mediante una alta velocidad del producto caliente en los hornos no se produzca carbón en los tubos del horno de proceso y se produzca en las cámaras.

Carga

- a) Los productos de mayor peso molecular son los que más fácilmente craquean, es decir que necesitan menor cantidad de energía para iniciar las reacciones.
- b) El asfalto está construido por hidrocarburos de alto peso molecular (cadenas superiores a los 150 átomos de carbono).
- c) La estabilidad térmica de los productos disminuye a medida que el peso molecular aumenta.

- d) Las moléculas simétricas son más estables que los isómeros de cadena larga.
- e) Los dobles enlaces son refractarios al craqueo térmico.
- f) A mayor contenido de aromáticos en la carga se obtiene carbón de mejor calidad.
- g) Los metales pesados como son sodio y calcio catalizan las reacciones de craqueo, disminuyendo los tiempos de reacción, por lo cual la formación de carbón se inicia en los hornos y se reduce el factor de servicio.

Las condiciones con baja conversión favorecen un alto rendimiento de componentes de gasolina, con baja producción de gas y coque (residuo sólido y poroso que resulta de la destilación destructiva del carbón), pero la calidad de la gasolina no es alta, mientras que en condiciones más severas dan como resultado una mayor producción de gas y coque en un menor rendimiento de gasolina (pero de mayor calidad).

Con una conversión limitada por ciclo, los residuos más pesados deben reciclarse, pero estos aceites reciclados se vuelven cada vez más refractarios al agrietarse repetidamente, y si no se requieren como reserva de combustóleo (del inglés fuel oil), se pueden coquizar para aumentar el rendimiento de gasolina o refinarlos por medio de hidrógeno.

Ventajas

- a) En la producción de n-parafinas el etano es el producto principal, con mucho etano y propano, y de butano a olefinas de hexadecano, con poca ramificación.
- b) Una de las características significativas de los radicales libres de hidrocarburos es su resistencia a la isomerización, por ejemplo, la migración de un grupo alquilo y, como resultado, el craqueo térmico no produce ningún grado de ramificación en los productos distintos a los ya presentes en la materia prima.

- c) Un aumento de presión inhibe la formación de productos gaseosos de bajo peso molecular y, por lo tanto, promueve la formación de materiales de mayor peso molecular.
- d) La adición de vapor a la alimentación de entrada proporciona varias ventajas, incluido el disipador de calor que ayuda a mantener temperaturas más altas y da como resultado una presión parcial más baja de los hidrocarburos. La presión parcial disminuida ayuda a minimizar las reacciones indeseables.

Desventajas

- a) El carbón residual producido es un producto de bajo valor.
- b) Un alto porcentaje de las olefinas formadas durante las reacciones intermedias se polimerizan y condensan directamente para formar coque.
- c) Los aromáticos alquilados, como los naftenos alquilados, son más propensos a la desalquilación (proceso químico por el cual se elimina el radical alquilo de una molécula) que a la destrucción del anillo. Sin embargo, la destrucción del anillo de los derivados de benceno ocurre por encima de 50 °C, pero los aromáticos condensados pueden sufrir la destrucción del anillo a temperaturas algo más bajas (450 °C).

1.8.2 Cracking Catalítico

De acuerdo con Pines (1981) citado en (Speight, 2007) "el craqueo catalítico es la descomposición térmica de los hidrocarburos de los componentes del petróleo en presencia de un catalizador" (p.475). El craqueo térmico ha sido reemplazado por el craqueo catalítico como proceso para la fabricación de gasolina. De hecho, la gasolina producida por craqueo catalítico es más rica en parafinas ramificadas, cicloparafinas y

aromáticos, todos los cuales sirven para aumentar la calidad de la gasolina. El craqueo catalítico también da como resultado la producción de la cantidad máxima de butenos y butanos (C_4H_8 y C_4H_{10}), en lugar de etileno y etano (C_2H_4 y C_2H_6).

Como expresa Sadeghbeigi, el craqueo o escisión-beta, es una característica clave del craqueo iónico. La escisión-beta es la división del enlace C-C a dos carbonos del átomo de carbono de carga positiva. Se prefiere la escisión-beta porque la energía requerida para romper este enlace es menor que la necesaria para romper el enlace C-C adyacente, el enlace alfa. Además, los hidrocarburos de cadena corta son menos reactivos que los hidrocarburos de cadena larga. La velocidad de las reacciones de craqueo disminuye al disminuir la longitud de la cadena. Con cadenas cortas, no es posible formar iones carbenio estables.

Los productos iniciales de la escisión-beta son una olefina y un nuevo ion carbenio en la ecuación 1.26, el ion carbenio recién formado continuará luego una serie de reacciones en cadena. Los iones pequeños (cuatro o cinco carbonos) pueden transferir la carga positiva a una molécula grande y la molécula grande puede romperse. El craqueo no elimina la carga positiva; permanece hasta que chocan dos iones. Los iones más pequeños son más estables y no se rompen. Sobreviven hasta que transfiere su carga a una gran molécula.

$$R-C^{+}H-CH_{2}-CH_{2}-CH_{2}-CH_{3} \longrightarrow CH_{3}-CH=CH_{2} + C^{+}H_{2}-CH_{2}-CH_{2}-R$$
(1.26)

Debido a que la escisión-beta es mono-molecular y el craqueo es endotérmico, se favorece la velocidad de craqueo por altas temperaturas y no está limitado por el equilibrio.

Según McEvoy (1996), "las arcillas son una familia de sólidos de aluminosilicatos cristalinos, y el tratamiento con ácido desarrolla sitios ácidos al eliminar el aluminio de la estructura. Los sitios ácidos también catalizan la formación de coque, y Houdry (ingeniero químico francés) desarrolló un proceso de lecho fijo que eliminaba continuamente el carbón en el catalizador del reactor para su regeneración por oxidación con aire" (Speight 2007 p. 475).

Aunque el craqueo térmico es un proceso de radicales libres (neutro), el craqueo catalítico es un proceso iónico que involucra iones de carbonio, que son iones de hidrocarburos que tienen una carga positiva en un átomo de carbono. La formación de iones carbonio durante el craqueo catalítico puede ocurrir por:

- 1. Adición de un protón de un catalizador ácido a una olefina.
- Abstracción de un ion hidruro (H⁻) de un hidrocarburo por el catalizador de ácido o por otro ion de carbonio.

Sin embargo, Speight indica que, los iones de carbonio no se forman por escisión de un enlace carbono-carbono. En esencia, el uso de un catalizador permite rutas alternativas para las reacciones de craqueo, normalmente reduciendo la energía libre de activación para la reacción. Los catalizadores ácidos usados por primera vez en el craqueo catalítico eran sólidos amorfos compuestos de aproximadamente 87% de sílice (SiO₂) y 13% de alúmina (Al₂O₃) y se denominaron catalizadores de bajo contenido de alúmina. Sin embargo, este tipo de catalizador ahora está siendo reemplazado por aluminosilicatos cristalinos (zeolitas) o tamices moleculares (Speight, The Chemistry and Technology of Petroleum, 2007).

38

1.8.2.1 Craqueo catalítico en lecho fluidizado

Los reactores de lecho fluidizado se utilizan para reacciones catalizadas por sólidos cuando sus características deseables (transferencia de calor favorable, uniformidad de temperatura, factores de alta efectividad, baja caída de presión y capacidad para agregar/quitar catalizador) superan sus desventajas (arrastre, desgaste, uso, distribuciones no uniformes del tiempo de residencia, imprevisibilidad).

Debido a su complejidad y al gran número de variables que afectan su desempeño, el diseño y la ampliación de los reactores de lecho fluidizado se basan en la experiencia, así como en la comprensión y los modelos mecanicistas (Ilsen Önsan & Kerim Avci, 2016).

Respecto al craqueo térmico en relación con el FCC, Alvarado *et al.*, (2001) formula las preguntas siguientes:

- ¿Porqué se produce gasolina de mayor calidad si se trata también de un proceso de craqueo?
- 2. ¿Qué influencia tiene el catalizador en la calidad del producto obtenido?

Para dar respuesta a tales interrogantes es importante conocer en primera instancia el catalizador empleado en la Unidad FCC, el cual generalmente es zeolita, una sustancia perteneciente a la familia de los aluminosilicatos y que se puede definir como un polímero inorgánico de estructura cristalina con poros uniformes (aproximadamente a ocho angstroms), constituida por átomos de sílice y aluminio que representan el centro de un tetraedro en cuyos vértices se ubican átomos de oxígeno.



Figura 1.9. Estructura tetraédrica de la zeolita. Fuente: (Alvarado, Delgado Linares, & Medina, 2015)

En la figura 1.9 se muestra una estructura tetraédrica, el átomo de sílice presenta un estado de oxidación +4, por lo que un tetraedro conteniendo sílice no presenta carga eléctrica. Por el contrario, el átomo de aluminio presenta un estado de oxidación +3 (no cumple con la regla del octeto), por lo que al formar parte de un tetraedro presentará una carga eléctrica de –1, la cual puede ser balanceada con un catión como el ion amonio, el cual, durante la manufactura de la zeolita, específicamente en la etapa de secado, se vaporiza como amoniaco generándose sitios reactivos de tipo ácido de Brönsted, mostrados en la figura 1.10 (Sadeghbeigi, 2000).



Figura 1.10. Estructura molecular parcial de la zeolita. Fuente: (Alvarado, Delgado Linares, & Medina, 2015)

Para representar esquemáticamente el mecanismo de reacción simplificado del FCC se considerará una parafina de cadena lineal como el octano. Gary y Handwerk (2001), indican que la primera etapa del mecanismo consiste en un "craqueo térmico leve" del hidrocarburo de partida a través del cual se forman olefinas y otros gases combustibles como el metano.

Seguidamente la olefina formada interacciona con el catalizador a través de los sitios activos acídicos, propiciando reacciones de adición electrofílica que conllevan la generación de intermediarios carbocatiónicos medianamente estables (secundarios), los cuales experimentan rearreglos intermoleculares concertados (isomerización) que permiten obtener parafinas ramificadas (Alvarado, Delgado Linares, & Medina, 2015).

Tal como se observa en la figura 1.11 el mecanismo carbocatiónico induce la formación de parafinas ramificadas (de menor tamaño molecular que el hidrocarburo de partida, como el isobutano), las cuales presentan un índice de octano superior al de las parafinas lineales. Esta es la razón por la cual la gasolina obtenida a través del FCC es de mejor calidad que la obtenida a partir del craqueo térmico en cualquiera de sus variantes, y por la que se justifica plenamente el empleo de catalizadores ácidos en el proceso.

Por otra parte, es importante destacar que la olefina de menor envergadura que es posible obtener a partir del FCC es el propileno, debido a la β -escisión experimentada por el carbocatión derivado de la adición electrofílica.

41



Figura 1.11. Mecanismo de reacción del craqueo catalítico Fuente: (Alvarado, Delgado Linares, & Medina, 2015)

Condiciones de operación

El hecho de que el craqueo térmico sea un proceso endotérmico podría llevar a pensar en un aumento indiscriminado de temperatura que conduzca a un aumento de la conversión del proceso; sin embargo, Gary y Handwerk (2001), mencionan que desde el punto de vista industrial se recomienda el empleo de temperaturas entre 470 °C y 580 °C, dependiendo de la variante a la cual se esté haciendo referencia.

La razón de operar en este intervalo de temperatura se fundamenta en que, si bien es cierto que un aumento de temperatura conduce a un craqueo más riguroso de la alimentación, también lo es que el rendimiento en cuanto a la corriente de gas combustible producido aumenta en detrimento del rendimiento en gasolina, considerado el producto de mayor interés comercial desde el punto de vista de la refinación (Alvarado, Delgado Linares, & Medina, 2015).

Por otra parte, Wuithier (1971) comenta que los procesos de craqueo deben operar a presiones cercanas a la atmosférica (coquificación retardada: 2-3 atm, FCC: 1-1.4 atm) de manera que eviten reacciones de polimerización radicalaria, las cuales son importantes a presiones moderadas-altas y temperaturas cercanas a los 600 °C, dependiendo de la estabilidad del radical formado (a mayor estabilidad, menor energía de activación se requerirá para formar dicho intermediario) (Alvarado, Delgado Linares, & Medina, 2015).

Ilsen Önsan y Kerim Avci (2016), mencionan algunas condiciones previas, útiles y en algunos casos requeridas para operar con éxito los procesos catalíticos de lecho fluidizado:

- a) Las partículas deben ser lo suficientemente robustas para resistir colisiones entre sí y superficies fijas sin roturas excesivas. Las formas de las partículas no deben ser extremas (p. Ej., Escamosas o como agujas). Se prefieren las formas de partículas redondeadas y suaves.
- b) El diámetro medio de Sauter (diámetro de una esfera que tiene la misma relación volumen/área superficial de una partícula), no deben ser inferior a 50 μm aproximadamente. Es útil que haya una amplia gama de tamaños alrededor de la media, por ejemplo, de aproximadamente 5 a 150 μm.
- c) Para evitar la "formación de puentes" de partículas, es decir, mantener condiciones de flujo suave, el ancho mínimo del espacio dentro del recipiente contenedor (por ejemplo, entre las superficies de transferencia de calor) nunca debe ser inferior a 20 veces el diámetro medio de partícula, siendo 50 veces mayor. Es preferible dar un margen de seguridad. Pueden ser necesarias relaciones incluso mayores para distribuciones de tamaño de partículas inusualmente amplias o formas de partículas extremas.
- d) Para asegurar la introducción uniforme de gas en el fondo del lecho, el lecho fluidizado debe tener al menos el 30% de la caída de presión necesaria para soportar su peso. Además, el número de puntos de introducción de gas debe ser lo suficientemente grande como para distribuir uniformemente el gas entrante sobre la sección transversal de la columna.
- e) Si hay varias superficies abiertas sumergidas, las partículas deben entrar en contacto con ellas en el exterior, no en el interior, para evitar problemas de estabilidad que provoquen una mala distribución del flujo y el bloqueo de algunos pasajes.

Desde la década de 1940, los lechos fluidizados han proporcionado un medio para llevar a cabo reacciones en fase gaseosa catalizadas por sólidos basadas en algunas características y ventajas significativas en relación con los reactores de flujo continuo de lecho empacado de la competencia. De acuerdo con Ilsen Önsan y Kerim Avci (2016), en su obra Multiphase Catalytic Reactors; mencionan algunas ventajas y desventajas de craqueo catalítico en lecho fluidizado:

Ventajas

- a) La transferencia de calor es aproximadamente un orden de magnitud más favorable entre superficies fijas de transferencia de calor (tubos sumergidos o pared del recipiente) y lechos fluidizados con gas que entre las mismas superficies y lechos empaquetados. Esto es importante para muchas reacciones, exotérmicas y endotérmicas, donde es necesario proporcionar enfriamiento o calentamiento, respectivamente.
- b) Debido a la rápida mezcla interna de partículas en lechos fluidizados con gas, las temperaturas tienden a ser relativamente uniformes (por lo general, no varían en más de 5 °C a 10 °C dentro del propio lecho), lo que ayuda a evitar puntos calientes y explosiones en el caso de reacciones exotérmicas y reacciones secundarias indeseables.
- c) Las partículas de catalizador utilizadas en la mayoría de los procesos donde existe presencia de reactores catalíticos de lecho fluidizado son lo suficientemente pequeñas, por lo general menos de 100 µm de diámetro, que los factores de efectividad del catalizador están cerca de 1. Como resultado, la resistencia de difusión intrapartícula tiende a jugar un papel menor en procesos catalíticos de lecho fluidizado, a diferencia de los reactores de lecho compacto, donde las partículas de catalizador son de un orden de magnitud más grandes.

- d) Las pérdidas de presión en los lechos fluidizados se limitan a las necesarias para soportar el peso del lecho menos la flotabilidad (la fricción de la pared es despreciable). Por lo tanto, las caídas de presión tienden a ser mucho menores que en los procesos de lecho compacto, lo que resulta en ahorros sustanciales en los costos operativos del compresor / soplador.
- e) En los casos en que se produce la desactivación del catalizador por coquización, las partículas de catalizador se pueden retirar y reemplazar fácilmente, o incluso hacer circular a otro recipiente para la regeneración en línea quemando el coque, aprovechando también la recirculación del calor generado por la oxidación del coque.
- f) No existe un límite superior en la escala de reactores de lecho fluidizado que se pueden construir y operar. Por lo tanto, los reactores pueden tener muchos metros de diámetro, donde factores como las variaciones radiales de temperatura tienden a limitar el diámetro del reactor.

Desventajas

 a) Debido a la mezcla axial de las sustancias, tanto las conversiones como la selectividad de los productos intermedios, tienden a ser significativamente menos favorables que para los reactores de lecho empacado de igual volumen de partículas de catalizador que operan a temperaturas y presiones similares.

- b) Se producen más disminuciones en la conversión y la selectividad cuando el gas pasa por alto el contacto con las partículas al viajar como burbujas o slugs en algunos regímenes de flujo.
- c) Las partículas de catalizador tienden a ser arrastradas desde el lecho, lo que requiere equipo de separación de gas-sólido (por ejemplo, ciclones, filtros) y conduce a pérdidas de catalizador. En particular, los "finos" tienden a perderse, ya que estos se arrastran más fácilmente. La pérdida de partículas finas puede causar pérdidas económicas directas, contaminación y cambios en el rendimiento del reactor.
- d) Las partículas de catalizador en movimiento también tienden a sufrir desgaste a medida que interactúan y chocan entre sí y con superficies fijas.
- e) Las partículas de catalizador en movimiento también tienden a causar desgaste de superficies sólidas (tubos de intercambiador de calor, deflectores, tuberías, ciclones, recipientes paredes, etc.).
- f) Los patrones de hidrodinámica, mezcla y contacto en el lecho fluidizado son complejos, con el resultado de que es difícil predecir con precisión el rendimiento de los reactores de lecho fluidizado. La incertidumbre resultante provoca un riesgo no deseado en relación con los reactores de lecho compacto y otros reactores que pueden caracterizarse con mayor precisión y seguridad.
- g) Si necesita una corriente de reposición para reemplazar el catalizador desactivado de forma continua o periódica, la mezcla casi perfecta de las partículas significa

que algunas de las partículas del catalizador reemplazadas se dirigen al reactor después de haber estado presente allí solo durante breves períodos, lo que conduce a una distribución del tiempo de residencia subóptima del catalizador.

En la tabla 1.3 se muestra la comparación entre las diferencias que tiene el Cracking térmico y el Cracking catalítico, de acuerdo a las ventajas de cada uno de ellos.

Cracking Térmico	Cracking Catalítico
Sin catalizador	Uso de catalizador
Mecanismos de reacción de radicales libres	Mecanismos de reacción iónica
Rendimientos moderados de gasolina y otros destilados	Alto rendimiento de gasolina y otros destilados
Rendimientos de gas que dependen de materias primas	Bajo rendimiento de gas
Selectividad de producto de baja a moderada	Alta selectividad de producto
Gasolina de bajo octanaje	Alto número de octanaje
Rendimiento bajo a moderado de olefinas C4	Rendimientos bajos de n-alcanos
Rendimientos de aromáticos bajos a moderados	Alto rendimiento de aromáticos
	Mas flexible en términos de lista de productos
	Cadenas ramificadas y alto rendimiento de olefinas C4

Tabla 1.3. Comparación entre Cracking Térmico y Cracking Catalítico

Fuente: Speight, J. G. (2011).

Capítulo II Proceso de Craqueo Catalítico

La desintegración de gasóleos es uno de los procesos catalíticos más grandes del mundo, desde los puntos de vista: instalada, volumen de producción y consumo de catalizador. Sin embargo, aun en la actualidad, no se conoce el mecanismo real de reacción, problema que, aunado a la inherente desactivación del catalizador debida a la formación de coque durante la desintegración, complica el diseño y el control del sistema (Agilar R., Maya R. y López P. A., 2011).

2.1 Evolución del Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC)

La rápida necesidad de la expansión de la gasolina como combustible para motores que comenzó en 1900 empujó el desarrollo del proceso con el fin de aumentar el rendimiento de la gasolina a partir de los crudos, mediante el craqueo térmico.

El primer éxito comercial del proceso de craqueo térmico (1910) en USA fue el proceso Burton, que fue patentado por el Dr. W. M. Burton de la compañía Standard Oil de Indiana. El proceso Burton era un proceso por lotes que era llevado en destiladores horizontales, a una temperatura cercana a los 400 °C y una presión de 75 - 95 psig.

Eugene Jules Houdry en los años 20s, descubrió que los catalizadores podían regenerarse quemando el carbón acumulado. Este descubrimiento se realizó mientras

experimentaba con catalizadores para extraer azufre del vapor del crudo, conduciéndolo al desarrollo de la primera Unidad exitosa de craqueo catalítico.

En la figura 2.1 se muestra el proceso de la primera unidad de craqueo catalítico la cual fue exitosa a nivel mundial, fue puesta en marcha en la refinería de la Socony-Vacuum, Paulsboro, N.J., el 6 de abril de 1936.



Figura 2.1. Esquema de una Unidad de craqueo catalítico del tipo lecho fijo Houdry. Fuente: (Grace Davison, 1993)

Se puede observar que hay 3 recipientes con catalizador. Esto era debido a que uno de los recipientes se utilizaba en modo de craqueo, mientras que los otros dos se estaban regenerando y purgando. Este proceso evolucionó rápidamente convirtiéndose en el proceso de lecho móvil TCC (Thermofor Catalytic Cracking) que permitió mayor capacidad de procesamiento y mejor distribución del tiempo de contacto.

En los años 40's se incorporaron los catalizadores ácidos compuestos por Al-Si o Mg-Si, tiempo después fueron sustituidos por zeolitas amorfas; para los años 50's las zeolitas marcaron un importante cambio para el proceso, ya que estas actúan como tamices moleculares y sus sitios activos se encuentran en poros de tamaño controlado, favoreciendo una mayor selectividad en la desintegración, y a su vez disminuyendo la formación de coque.

Estas zeolitas fueron incrustadas en una matriz de alúmina formando el catalizador que revolucionó el proceso FCC, la invención de la "zeolita ultraestable Y" (USY) por Grace Davison en 1964, la aparición de estos catalizadores produjo un rápido cambio en los sistemas de desintegración, ya que hubo una disminución en el tiempo para llevar a cabo la reacción.

Posteriormente se conoció que las zeolitas USY sin tierras raras (nombre común de los elementos químicos del grupo de los lantánidos, además del escandio e itrio), mejoran el octanaje de la gasolina craqueada lo que permitió el primer éxito del catalizador mejorando el octanaje en 1975. Más aun, las USY y las zeolitas ultraestables tratadas con tierras raras (REUSY o ReY), se sabe que mejoran la selectividad de coque.

Las reacciones de desintegración de gasóleos se caracterizan por ser moderadamente endotérmicas, por el contrario, las reacciones de generación de

51

catalizador son altamente exotérmicas, la cual consiste en la combustión del coque adsorbido a la superficie catalítica.

Esta cualidad forma parte del reactor FCC como un proceso autónomo e interactivo, porque la energía necesaria para llevar a cabo la desintegración se obtiene a partir de la energía liberada de las reacciones de regeneración, por lo tanto, la Unidad FCC es adiabática ya que existe intercambio de energía a través del catalizador entre el reactor y el regenerador.

Hoy en día, el proceso FCC no ha tenido ninguna modificación, por esta razón se

sigue modelando al regenerador como un Reactor Continuo de Tanque Agitado (RCTA),

ya que en la fase burbuja puede seguir patrones de RCTA o como de Flujo Pistón (RFP).

En la tabla 2.1 se muestra como ha mejorado el proceso de Crackeo Catalítico con el paso de los años.

Tabla 2.1. Evolución del craqueo catalítico pre-invención del proceso de craqueo catalítico en
lecho fluidizado

Año	Acontecimiento
1915	Almer M. Mcafee de Gulf Refining Co. Descubrió que un catalizador de cloruro de aluminio Fridel-Crafts podría romper catalíticamente crudo pesado. Sin embargo, el alto costo de catalizador impidió el uso generalizado del proceso Mcfee.
1922	El ingeniero mecánico francés Eugene Jules Houdry y un farmacéutico francés llamado E.A Prodhomme estableció un laboratorio para desarrollar un proceso catalítico para la conversión de lignito a gasolina. La planta de demostración en 1929 mostró que el proceso no es económico. Houdry había encontrado que la Tierra de Fuller; una arcilla que contiene aluminosilicatos (Al ₂ SiO ₆) podría convertir aceite de lignito a gasolina.
1930	The Vacuum Oil Company invito a Houdry a trasladar su laboratorio a Paulsboro, Nueva Jersey.

1931	The Vacuum Oil Company se fusionó con Standard Oil de Nueva York (Socony) para formar Socony-Vacuum Oil Company.
1933	La pequeña Unidad de Houdry procesaba 200 BPD de petróleo debido a la depresión económica de los años treinta; Socony-Vacuum no pudo apoyar el trabajo de Houdry y le otorgo permiso para buscar ayuda en otro lugar. Sun Oil Company se unió al desarrollo del proceso de Houdry.
1936	Socony-Vacuum convirtió un viejo craqueador térmico para romper catalíticamente 2,000 BDP de petróleo mediante el proceso de Houdry. El uso de arcillas naturales como catalizador mejoró enormemente la eficiencia de craqueo.
1937	Sun Oil comenzó a operar la Unidad de Houdry procesando 12,000 BDP. El proceso de Houdry utiliza reactores de lecho fijo y fue una operación semi-batch. Casi el 50% de los productos craqueados eran gasolina.
1938	Con los éxitos comerciales del proceso de Houdry, Standard Oil of New Jersey reanudó la investigación del proceso de craqueo catalítico en lecho fluidizado como parte del consorcio que incluía cinco compañías petroleras (Standard Oil de Nueva Jersey, Standard Oil de Indiana, Anglo-Iranian Oil, Texas Oil y Dutch Shell), dos compañías de ingeniería de construcción (MW Kellogg y Universal Oil Products) y una empresa química alemana (IG Farben). Este consorcio se llamaba catalizador Research Associates (CRA), y su objetivo era desarrollar un proceso de craqueo catalítico que no afectara las patentes de Houdry.
1938-40	En 1938, Socony-Vacuum tenía ocho Unidades adicionales en construcción y en 1940 había 14 Unidades Houdry en operación procesando 140,000 BPD de petróleo. El siguiente paso fue desarrollar un proceso continuo, en lugar de la operación semi-batch de Houdry. Por lo tanto, llegó el advenimiento de un proceso de lecho móvil conocido como Thermofor Catalytic Cracking (TCC) que usó un elevador de cangilones para mover el catalizador del horno regenerador al reactor.

Fuente: (Sadeghbeigi, 2020)

2.2 Importancia de la Unidad FCC en la Refinación

Existe un gran número de arreglos de proceso en una refinería que se compone de varias Unidades de procesamiento que convierten el crudo en productos utilizables como gasolina, diésel, keroseno y combustibles para calefacción. En la figura 2.2 se

muestra el proceso típico que se ubica la Unidad FCC.



Figura 2.2. Dibujo esquemático de una refinería. Fuente: (Sadeghbeigi, 2020)

	Gas Combustible LPG
	Gasolina
>	Gas Combustible
	Gasolina
	Queroseno Diésel
>	Gas Combustible
	LPG Gasolina
>	Gasolina
	Aceite de Calefacción
esidual	Combustóleo

La torre atmosférica es la primera Unidad en este proceso de refinación. Aquí, el crudo se destila en varios productos intermedios como nafta, queroseno, diésel y gasóleo. La porción más pesada del petróleo, que no se puede destilar en la torre atmosférica, se calienta y se envía a la torre de vacío donde se divide en gasóleo y residuos.

Los fondos de la torre de vacío (residuo) se pueden enviar para su posterior procesamiento en Unidades como el coquizador retardado, la Unidad de desasfaltado, visbreaker (proceso en el cual consiste en transformar el residuo pesado de una torre de destilación de petróleo en productos más ligeros, mediante la disminución de la viscosidad), craqueo de residuos, o se vende como fuel oil o asfalto de carreteras.

2.2.1 Características de la carga

La carga del proceso FCC es comúnmente denominada gasóleo el cual es un corte de petróleo que ebulle entre 326.85 °C y 546.85 °C. Las propiedades de la carga del proceso FCC dependen íntimamente tanto del origen del crudo del cual provienen como del proceso de refinación previo.

En cuanto al origen del crudo, en México se obtienen alrededor de 17 variedades de crudos de los cuales se preparan 3 de ellos para exportación: Olmeca que es superligero con 39 °API y 0.8% de azufre en peso, Istmo que es ligero con 33 °API y 1.3% de azufre, y Maya que es pesado con 22 °API y 3.3% de azufre (Hernández Barajas, Simulación Dinámica del Proceso FCC: Una Propuesta Cinética Basada en Distribuciones de Probabilidad, 2003).

55
La alimentación de gasóleo para el craqueo catalítico convencional proviene principalmente de la columna atmosférica, la torre de vacío y el coquizador retardado. Además, varios refinadores mezclan algunos residuos atmosféricos o de vacío en sus materias primas para procesarlos en la Unidad de FCC. La mezcla de gasóleos (materia prima) está representada por Gasóleo Pesado Primario (GOPP), Gasóleo Ligero de Vacío (GOLV), Gasóleo Pesado de Vacío (GOVP), Gasóleo Pesado de Coquizadora (GOPC). La carga a la Unidad FCC puede ser completamente hidrotratada, parcialmente hidrotratada (mezcla de carga hidrotratada con otra no hidrotratada) o carga 100% virgen (sin hidrotratamiento alguno).

La viabilidad de usar una u otra depende de:

- Normas ambientales
- Del diseño de los convertidores catalíticos
- De la infraestructura de la refinería aguas debajo de la planta FCC

La carga es convertida en el reactor de la Unidad FCC a varios productos. Estos productos se dirigen a un procesamiento adicional y separación en el fraccionador principal y otros equipos, aguas debajo de la Unidad FCC. Por ejemplo: la gasolina craqueada y los productos livianos son procesados después en la Planta de gas, también llamada Unidad de recuperación de vapor o simplemente Planta de Gas.

En la industria de la refinación, la clasificación de los hidrocarburos se agrupa en parafinas, olefinas, naftenos y aromáticos, mejor conocida por sus iniciales como PONA.

A continuación, Hernández Barajas (2003) enlista las principales propiedades de la clasificación PONA:

- Parafinas o alcanos: son hidrocarburos de cadena lineal o ramificada con fórmula C_nH_{2n+2}. La alimentación FCC es predominantemente parafínica (del 50 al 65% en peso de la alimentación). Las alimentaciones parafínicas son fáciles de desintegrar produciendo mayores rendimientos cuya mayor proporción es gasolina.
- Olefinas o alquenos: son hidrocarburos insaturados de fórmula C_nH_{2n}, de naturaleza inestable y que pueden reaccionar consigo mismos o con otros componentes como el oxígeno y el bromo en solución. Las olefinas no existen naturalmente, sino que aparecen como resultado del preprocesamiento de la carga. Estos procesos incluyen la desintegración térmica y otras operaciones de desintegración catalítica. Las olefinas producen compuestos indeseables como el coque. Se encuentra en baja proporción (5% en peso de la carga).
- Naftenos o cicloalcanos: son compuestos saturados y cíclicos que poseen la misma fórmula de las olefinas, pero con características diferentes y son deseables porque producen gasolina de alto octano. La gasolina proveniente de naftenos es más pesada y con más aromáticos que aquélla proveniente de parafinas.
- Aromáticos: de fórmula CnH2n-6, son parecidos a los naftenos, pero con un anillo insaturado estable. Los aromáticos contienen al menos un anillo bencénico y son indeseables porque la mayoría no se desintegran. En comparación con las parafinas, los aromáticos producen poca gasolina con menos ganancia del volumen de los productos y gasolina de alto octano.

2.2.2 Contribución de la Unidad FCC al pool de gasolina

La gasolina, es una mezcla de hidrocarburos parafínicos, isoparafínicos, olefínicos, nafténicos y aromáticos, que principalmente contienen moléculas con cadenas de C_5-C_{12} , las cuales tienen un intervalo de ebullición de 36 °C y 226 °C (Félix Flores, 2006).

La gasolina es el producto más importante de la desintegración catalítica y su calidad, medida en números de octano, depende de las condiciones de operación, la calidad de la carga al reactor y del tipo de catalizador usado.

De acuerdo con Hernández Barajas (2003), el octanaje o número de octano es una medida de la calidad y capacidad antidetonante de las gasolinas para evitar las detonaciones y explosiones en las máquinas de combustión interna, de tal manera que se canalice esta energía en la generación de energía útil para el motor. Se realizan dos pruebas estandarizadas para determinar el número de octano. En ellas obtenemos dos parámetros diferentes:

- El número de octano de investigación, RON (Research Octane Number), se obtiene mediante una corrida de prueba a 600 rpm y una temperatura de entrada del aire de 51 °C.
- El número de octano del motor, MON (Motor Octane Number). se realiza a condiciones más severas de 900 rpm y 148 °C.

Para propósitos de comercialización y distribución se utiliza el número de octano comercial que consiste en el promedio aritmético de los dos anteriores.

La escala para el número de octano es arbitraria y consiste en considerar para el iso-octano un índice de octano de 100, indicando con esto su poca detonancia; mientras que al n-heptano fue otorgado un índice de octano de 0, al identificarlo como altamente detonante. Antes de la década de los 70's, la industria de la refinación obtenía principalmente el incremento de octano a través de la incorporación de un aditivo antidetonante a base de plomo (tetraetilo de plomo, TEP). Sin embargo, estudios

58

realizados esa misma década demostraron el impacto negativo en la salud a causa del plomo.

La prohibición del uso intensivo de plomo en las gasolinas demandó la búsqueda de nuevos aditivos que permitiesen sustituir el incremento de octano logrado con el TEP. Estos nuevos aditivos son compuestos oxigenados denominados éteres. Los más utilizados son el éter metil terbutílico, MTBE con 110 octanos; y el éter metil teramílico, TAME con 108 octanos. En México se comercializan dos tipos de gasolinas, la Pemex Magna con un número de octano de 87 y la Pemex Premium con un número de octano de 92.

Las gasolinas se pueden clasificar de acuerdo con su origen y procesamiento en:

- Gasolina de destilación primaria, la cual es originalmente de un bajo octanaje por lo que es enviada a hidrotratamiento y reformación.
- Gasolina hidrodesulfurada, es aquella gasolina que es sometida a algún proceso de hidrotratamiento para la eliminación de azufre y nitrógeno.
- Gasolina reformada, proveniente del proceso de reformación catalítica que se encarga de elevar sustancialmente el octanaje de las gasolinas primarias desde 60 hasta 100 octanos.
- Gasolina catalítica, que es el resultado del proceso de desintegración catalítica en lecho fluidizado, esto es, el proceso FCC.

Los productos del proceso FCC más pesados son conocidos como aceites cíclicos, Hernández Barajas (2003) menciona algunos de ellos:

- Aceite cíclico ligero (ACL); se usa como especie de licuefacción en aceite caliente y diésel; es útil en invierno como combustible cuando su valor es mayor que el de la gasolina, por lo tanto, las refinerías aumentan su producción.
- Aceite cíclico pesado (ACP); es una de las corrientes de la columna principal que ebulle entre el ACL y el aceite decantado, se usa para transferir calor a la alimentación o al rehervidor del desbutanizador, y es procesado en el hidrotratador o mezclado con el aceite decantado.
- Aceite decantado, llamado también aceite clarificado, fondos o residuo del proceso FCC, es el más pesado y barato de los productos FCC, se mezcla comúnmente con el aceite No. 6 que es un combustóleo para motores y calefacción, y se vende como carbón negro o se recicla para su desintegración.

Por otra parte, el coque es un conjunto de componentes de C, H y trazas de N y S es necesario en la operación del proceso FCC puesto que su combustión compensa la pérdida de calor en el Riser. Hernández Barajas (2003) puntualiza diferentes tipos de coque dependiendo de su origen:

- Coque catalítico. Producido de la desintegración de la carga del proceso FCC a productos más ligeros.
- Coque contaminante. Producido por la presencia de metales como él níquel y vanadio, depositados en el catalizador.
- Coque en la alimentación. Proveniente de la carga.
- Coque de circulación. Es un coque rico en hidrógeno y proviene del reactoragotador.

A nivel internacional, la desintegración catalítica provee casi la mitad de las gasolinas que ya están listas para salir a la venta, estas están compuestas por varios

tipos de gasolinas o naftas que provienen de diferentes plantas de la refinería, básicamente, éstas son:

Ventajas	Desventajas				
Buen octano	Alto azufre, alto contenido de gomas				
Muy buen octano	Alta concentración de benceno y de aromáticos				
Bajo benceno	Alta presión de vapor				
Aporta propiedades oxigenantes	Octano demasiado alto				
Aporta propiedades oxigenantes	Octano medianamente alto				
Aporta volumen de gasolina terminada	Presión de vapor muy alta				
	Ventajas Buen octano Muy buen octano Bajo benceno Aporta propiedades oxigenantes Aporta propiedades oxigenantes Aporta volumen de gasolina terminada				

Todas ellas forman lo que se llama un "pool" de gasolinas, es decir, se puede interpretar como un "abanico" de diferentes gasolinas, que al mezclarse dan las gasolinas finales. ¿Por qué se usan todas éstas?, respondiendo a la pregunta: porque cada una de ellas por sí sola no cumple con las especificaciones finales de la gasolina que se ocupa en los motores. El propósito es mezclarlas en la proporción correcta para que al final se cumplan todas las especificaciones.

Los productos de alto valor comercial obtenidos de la Unidad FCC son:

- Gas combustible.
- Propano Propileno.
- Butano Butileno.
- Nafta ligera.

- Nafta pesada (en algunos casos).
- Aceite cíclico ligero.
- Residuo catalítico.

2.2.3 Química del proceso

Un proceso químico, es una secuencia de pasos u operaciones químicas y/o físicas ordenadas para transformar un reactivo o materia prima en un producto final, por tal motivo, se enlistan algunos puntos a cerca de la química del proceso a continuación:

- En el instante en que el catalizador circulante se pone en contacto con la carga, el craqueo de las moléculas se lleva a cabo en un período de 2 segundos.
- La carga se dispersa con vapor y la reacción ocurre en fase vapor entre 490 °C y 535 °C.
- Si no se detienen las reacciones de craqueo, éstas seguirán su curso hasta que todo el hidrocarburo se convirtiera en carbón, por ello para parar la reacción, se hace la separación del catalizador y del hidrocarburo por medio de ciclones.
- El catalizador gastado debe agotarse con vapor para desprender el hidrocarburo impregnado en él.
- El catalizador agotado pasa al regenerador, donde se inyecta un gran flujo controlado de aire que quema el carbón monitoreando la temperatura entre 650 °C y 700 °C.
- Los gases de combustión del carbón son separados del catalizador por medio de ciclones primarios y secundarios, luego son enviados a un recuperador de calor (caldereta) o directamente a la chimenea.
- El catalizador regenerado sale del regenerador para ponerse en contacto con más carga y con ello se cierra el ciclo del convertidor catalítico.

 El catalizador circulante hace numerosos ciclos de reacción, separación, agotamiento y regeneración, por lo cual sufre de desactivación y atrición. Ello implica extraer cierta cantidad por día con su respectiva reposición de catalizador fresco.

Las reacciones de desintegración involucran la ruptura de los enlaces C-C ver en la tabla 2.3, y son termodinámicamente favorecidas a altas temperaturas debido a su naturaleza endotérmica. Los productos primarios de la desintegración de gasóleos son parafinas y olefinas en el intervalo de ebullición de la gasolina (C₅-C₁₂), n-butano, butenos y propileno.

Las parafinas y olefinas contenidas en la gasolina se desintegran posteriormente dependiendo de la conversión que se alcance durante la reacción. Los butenos se consideran productos primarios inestables y el propileno y el n-butano se denominan productos primarios estables (Hernández Barajas, Simulación Dinámica del Proceso FCC: Una Propuesta Cinética Basada en Distribuciones de Probabilidad, 2003).

Descripción	Reacción
Desintegración de parafinas a olefinas y parafinas ligera	$C_{10}H22 \rightarrow C_3H_6 + C_7H_{16}$
Desintegración de olefinas a olefinas ligeras	$C_{10}H_{22} \rightarrow C_3H_6 + C7H_{16}$
Desintegración de naftenos a olefinas	$ciclo-C_{10}H_{20}\rightarrow C_6H_{12}+C_4H_8$
Isomerización de olefinas normales a iso-olefinas	i -C ₄ H ₈ \rightarrow trans-2-C ₄ H ₈
Isomerización de parafinas a iso-parafinas	n - $C_4H_{10} \rightarrow iso$ - C_4H_{10}
Transferencia de hidrógeno	Nafteno + olefina \rightarrow Aromático + Parafina
Transferencia del grupo alquilo	$C_6H_4(CH_3)_2 + C_6H_6 \rightarrow 2C_6H_5CH_3$
Ciclización de olefinas a naftenos	$C_7H_{14} \rightarrow CH_3$ -ciclo- C_6H_{11}
Deshidrogenación	$n\text{-}C_8H_{18} \rightarrow C_8H_{16} + H_2$

Tabla 2.3. Se presentan las principales reacciones que ocurren en la desintegración catalítica

Dealquilación Condensación Formación del coque iso- $C_3H_7 - C_6H_5 \rightarrow C_6H_6 + C_3H_6$ Ar-CH=CH₂ + R₁CH=CHR₂ \rightarrow Ar-Ar + 2H+ C₂H₂n \rightarrow coque + gas

Fuente: (Félix Flores, 2006)

2.3 Descripción del Proceso FCC

El proceso de desintegración catalítica fluidizada (FCC), sigue desempeñando un papel clave en una refinería integrada como el proceso de conversión principal, en el cual el gasóleo es alimentado a un reactor, se somete a una ruptura molecular con la ayuda de un catalizador sólido. Es decir, cuando ocurre la ruptura molecular se obtiene un subproducto llamado coque el cual se deposita en los sitios activos del catalizador disminuyendo su actividad.

Por otra parte, tiene como objetivo restaurar la actividad del catalizador sobre todo para separar los gases de reacción en la parte superior del reactor y fluye a la sección de regeneración, en esta sección el coque que se coloca en la superficie del catalizador se elimina por medio de la combustión en presencia del aire. El catalizador es regenerado y recirculado hacia el reactor, la energía que ha absorbido en él es utilizada para vaporizar la alimentación y llevar las reacciones de desintegración en el Riser.

Existen diferentes configuraciones en las Unidades FCC. Las configuraciones actuales más importantes son fabricadas por UOP, Kellogg, Exxon y ESSO. Cada configuración presenta variaciones en aspectos mecánicos, hidrodinámicos y de diseño. Estas características permiten clasificar a las Unidades FCC en dos tipos de acuerdo con el arreglo de los equipos y accesorios: la Unidad aglomerada (stacked unit) y la Unidad disgregada (side by side unit), ver figura 2.3. En particular, una de las Unidades FCC más

utilizadas del tipo de Unidades aglomeradas es la Unidad Orthoflow de Kellogg ver figura 2.4 (Hernández Barajas, Simulación Dinámica del Proceso FCC: Una Propuesta Cinética Basada en Distribuciones de Probabilidad, 2003).



Figura 2.3. Ejemplo de diseño de una Unidad FCC Side By Side. Fuente: (Sadeghbeigi, 2020)

De acuerdo con Sadeghbeigi (2020), los equipos principales que componen a nivel industrial, es decir, las etapas requeridas del funcionamiento de la Unidad FCC se describen en la figura 2.4.



Figura 2.4. Ejemplo de convertidor catalítico y accesorios de Orthoflow de Kellogg Company Fuente:(Austin, 1988)

2.3.1 Sistema de reacción

El reactor-regenerador es el corazón del proceso FCC, por lo cual las reacciones se llevan a cabo totalmente en el Riser, tiene como finalidad el contacto eficaz de la alimentación por lo cual el catalizador regenerado es fundamental para lograr las reacciones de craqueo deseado ver figura 2.5. Por otra parte, las boquillas se utilizan para atomizar la alimentación con ayuda de vapor de dispersión para que las gotas de aceite pequeñas aumenten la disponibilidad de alimentación en los sitios activos del catalizador.



Figura 2.5. Sección de Alimentación de Unidad FCC. Fuente: (Sadeghbeigi, 2020)

Esta atomización se obtiene con la ayuda del vapor de agua promoviendo que el hidrocarburo llegue a los sitios activos del catalizador, en las reacciones que se llevan a cabo en el Riser y anteriormente el equipo que se conocía como reactor tiene en la actualidad dos funciones: proporciona espacio para la separación del catalizador y los productos del proceso FCC a través de separadores tipo ciclón, y sirven para la sección de agotamiento. La alimentación entra en la base del Riser poniéndose en contacto con el catalizador regenerado, la relación en peso catalizador/aceite (C/A) se encuentra normalmente en un intervalo de 4:1 a 10:1 (Sadeghbeigi, 2020).

Las reacciones de craqueo comienzan cuando la alimentación es vaporizada por el catalizador regenerado caliente que, a su vez el volumen de expansión de los vapores es la principal fuerza impulsora que se utiliza para llevar el catalizador por el tubo ascendente.

El catalizador regenerado proporciona el calor necesario para vaporizar la alimentación de gasóleo, compensando la pérdida de calor interna que tiene lugar en el tubo ascendente, debido al calor endotérmico que genera la reacción, la temperatura del catalizador tiene una variación entre 677 °C - 732 °C y la temperatura de craqueo o del reactor está en un rango de 496 °C - 565 °C.

El Riser se compone de un tubo vertical que tiene un diámetro de 0.61 m a 2.14 m y de largo 23 m a 37 m. El Riser ideal simula a un reactor de flujo pistón (PFR), donde el catalizador y el vapor viajan a través del tubo, además cuenta con 0.10 m – 0.13 m de recubrimiento interno (refractario) para el aislamiento y asimismo pueda prevenir la abrasión. Generalmente están diseñados para una velocidad de salida de vapor de 12 m/s – 18 m/s, los tiempos de residencia promedio del hidrocarburo y del catalizador son aproximadamente de 2 seg. a 3 seg.

68

2.3.2 Sistema de separación de sólidos

Después de salir del Riser, la mezcla entra al separador de catalizador que está constituido por un recipiente que aloja a los ciclones como se muestra en la figura 2.6, la mayoría de las Unidades FCC emplean algún dispositivo de separación inercial conectado en el extremo del Riser para separar la mayor parte del catalizador de los vapores.



Figura 2.6. Típico sistema de ciclones (cortesía de RMS Engineering, Inc.). Fuente: (Sadeghbeigi, 2020)

En algunas ocasiones, el tubo elevador está conectado directamente a un sistema de ciclones. El terminó ciclones *"corte en bruto"* generalmente se refiere a este tipo de disposición y en estos sistemas separan entre un 75% - 99% del catalizador de vapores.

Sino es así, el tiempo de contacto de los vapores con el catalizador en la carcasa del reactor permitirá un degrado catalítico que no selecciona algunos de los productos deseables. Al prolongar el tiempo de residencia también promueve el craqueo térmico de los productos deseables, en estas reacciones de recraqueo pueden ser extensas si la temperatura del reactor supera los 510 °C, la mayoría de las refinarías han modificado sus dispositivos de terminación de Riser para minimizar las reacciones.

Actualmente las Unidades FCC emplean ciclones de simple o doble etapa, los ciclones recogen y devuelven el catalizador a la zona de agotamiento a través de los *"diplegs"* ver figura 2.7. Los vapores del producto salen de los ciclones superiores y fluyen hacia la torre fraccionadora.



Figura 2.7. Vista esquemática de ciclones. Fuente: (Sadeghbeigi, 2020)

2.3.3 Sistema de agotamiento

Al ingresar el catalizador gastado a la columna de agotamiento, tiene hidrocarburos que adsorben en la superficie del catalizador y en los poros de éste. El vapor de arrastre se utiliza principalmente para la eliminación de hidrocarburos arrastrados entre las partículas del catalizador, aunque no contribuye a la desorción de los hidrocarburos que han llenado los poros del catalizador.

Sin embargo, las reacciones del craqueo continúan ocurriendo dentro del decapante por lo tanto son impulsadas por la temperatura del reactor y el tiempo de residencia del catalizador que permiten la conversión de los hidrocarburos adsorbidos en productos *"limpios y ligeros"*. La columna de agotamiento cede contacto entre el catalizador que desciende y el vapor que fluye ascendente, la mayoría de los equipos utilizan bandejas de cobertizo, deflectores de disco/rosquilla ver figura 2.8.



Figura 2.8. Agotador de Catalizador. Fuente: (Sadeghbeigi, 2020)

El diseño del separador de catalizador proporciona una eficiencia de contacto íntimo entre el catalizador y el vapor, los separadores de reactores se diseñan básicamente para una velocidad superficial de vapor aproximadamente de 0.23 m/s aunado a esto, si la tasa de flujo másico del catalizador es demasiado alta, el catalizador que cae tiende a arrastrar vapor, asimismo reduciendo la eficacia. Una tasa de vapor de arrastre está en el rango de 2.5 kg por 1,000 kg de catalizador en circulación.

Es importante minimizar la cantidad de vapores de hidrocarburos transportados al regenerador. Por otro lado, no todos los vapores de hidrocarburos pueden trasladarse a los poros de la sección de agotamiento, por lo que puede afectar al proceso de la manera siguiente:

- a) *Pérdida de producto líquido*; los hidrocarburos arrastrados se queman en el regenerador previniendo la recuperación como producto líquido.
- b) Pérdida de rendimiento; la elevación de temperatura dentro del regenerador causa exceso de hidrocarburos que llegan a un límite de temperatura y asimismo reduce la velocidad del flujo de alimentación.
- c) Pérdida de actividad del catalizador, la presencia de vapor combinada con altas temperaturas en el regenerador reduce la actividad del catalizador por esa razón la estructura cristalina se destruye.

El flujo de catalizador gastado al regenerador, a menudo se regula mediante una válvula deslizante o de tapón, ver figura 2.9, esta válvula mantiene el nivel deseado de catalizador adecuado en el separador para evitar la inversión del gas de combustión en el reactor.



Válvula corredera Válvula tapón Figura 2.9. Válvula de corredera típica y una válvula de tapón típica. Fuente: (Sadeghbeigi, 2020)

2.3.4 Sistema de regeneración del catalizador

Las principales funciones que tiene un regenerador es restaurar la actividad del catalizador, proporcionar calor para las reacciones de craqueo y asimismo entrega el catalizador fluidizado al Riser.

En el regenerador están presentes dos fases: fase densa y fase diluida, se encuentra la mayor concentración de catalizador y se localiza en la entrada del distribuidor de aire que a su vez proporciona la velocidad y presión suficiente para mantener el lecho de catalizador en un estado fluido como se puede apreciar en la figura 2.10.



Figura 2.10. Sistema de regeneración. Fuente: (Sadeghbeigi, 2020)

Una vez que se comprime el aire de combustión, entra al fondo del regenerador por medio del sistema de distribución de aire que genera una mezcla eficaz con el catalizador gastado. Siendo así el catalizador regenerado que contiene de 2.5% a 3.3% en peso de coque, sale por medio de las boquillas para evitar aglomeraciones y baja a través de la válvula de catalizador regenerado hacia la base del Riser en donde se repite el ciclo. El aire proporciona oxígeno para la combustión de coque, así mismo, es suministrado por uno o más sopladores de aire, esto genera suficiente velocidad y presión de aire para mantener el lecho de catalizador en un estado fluidizado. En las Unidades FCC, el oxígeno se utiliza para complementar el aire de combustión, el aire/oxigeno ingresa al regenerador a través de un sistema de distribución, ver figura 2.11 ubicado cerca del fondo del regenerador. El distribuidor de aire a menudo está diseñado para una caída de presión de 7 kPa a 15 kPa para asegurar un flujo de aire adecuado a través de todas las boquillas.



Figura 2.11. Diseños de distribuidores de aire (cortesía de RMS Engineering Inc.) Fuente: (Sadeghbeigi, 2020)

El catalizador gastado entra en el regenerador, normalmente contiene entre 0.5% y 1.5% en peso de coque por lo tanto los componentes que están integrados son: carbono, hidrogeno, trazas de azufre y moléculas de nitrógeno orgánico en el cual se llevan a cabo las reacciones de combustión como se muestran en la tabla 2.4.

	Reacción		Kcal / kg C,H ₂ o S	BTU / Lb C,H ₂ o S
C + 1/2 O ₂	>	CO	2,200	3,968
CO + 1/2 O ₂		CO ₂	5,600	10,100
C + O ₂		CO ₂	7,820	14,100
H ₂ +1/2 O ₂		H ₂ O	28,900	52,125
S + O _x		SO ₂	2,209	3,983
N + O _x	>	NO _x		

Tabla 2.4. Calor de combustión de reacciones dentro del regenerador.

Fuente: (Sadeghbeigi, 2020)

El catalizador se puede regenerar en un rango de temperaturas y composición de los gases de combustión con limitaciones, a continuación, se mencionan los modos de regeneración:

- a) Combustión parcial; el reactivo en exceso es el carbono al generar este proceso se obtiene menos energía y la producción de coque va en aumento lo que significa que las reacciones que convierten el CO, CO₂ se reduce y esto mejora la temperatura dentro del regenerador.
- b) Combustión total; genera más energía y el coque decrece y el reactivo en exceso es el oxígeno de esta manera hay mayor cantidad de carbono y genera una mayor combustión.

En el proceso de regeneración se clasifican por baja, media y alta temperatura. En la etapa de baja temperatura esta alrededor de 640 °C, por lo tanto, es parcial, el carbono en el catalizador regenerado es alto y por lo tanto el aumento del aire produce postcombustión al estar estos componentes O₂, CO, CO₂, los gases de combustión en niveles significativos. La regeneración a baja temperatura era el modo de funcionamiento más utilizado en la implementación temprana del proceso del craqueo catalítico.

A manera resumen la tabla 2.5 describe las características de la regeneración que

indica la combustión parcial como completa.

Regenerador de región operativa	Combustión Parcial	Combustión Completa
Temperatura baja nominalmente (640 °C)	Estable (pequeña postcombustión); O ₂ , CO y compañía en el gas de combustión	No alcanzable
Temperatura intermedia nominalmente (690 °C)	Estable (con promotor de combustión), tiende a tener alto contenido de carbono en el catalizador regenerado	Estable con promotor de combustión
Temperatura alta nominalmente (730 °C)	Operación estable	Operación estable

Tabla 2.5. Características de regeneración

Fuente: (Sadeghbeigi, 2020)

Existen ventajas e inconvenientes involucrados con la combustión completa en comparación con la combustión parcial:

Ventajas

- a) Energía eficiente.
- b) Balances de calor con bajo rendimiento de coque mínimo.
- c) Mejor rendimiento con el catalizador limpio, amigable con el medio ambiente.

Desventaja

Rango estrecho de rendimientos de coque, a menos que se incorpore a un sistema de eliminación de calor mayor a la postcombustión, particularmente con un sistema de distribución de aire o catalizador gastado desigual.

La elección de combustión parcial o completa depende de la calidad de la alimentación limpia de la carga FCC, por lo tanto, el manejo de la combustión completa es la opción. Con residuos y de baja calidad la opción requerida es la combustión parcial.

El craqueo catalítico ha tenido diferentes configuraciones y ha sufrido diferentes modificaciones a través del tiempo, en la tabla 2.6 se muestra a modo de resumen la evolución del proceso.

Año	Acontecimiento
1940	M.W Kellogg diseñó y construyó una gran planta piloto en la refinería de Standard Oil Baton Rouge, Louisiana.
1941	Se construyó una pequeña Unidad de demostración de TCC en la refinería Paulsboro de Socony-Vacumm.
1942	La primera Unidad comercial FCC (Modelo I de diseño de flujo ascendente) comenzó procesando 12,000 BDP en la refinería de Standard of New Jersey Baton Rouge, Lousiana.
1943	La primera Unidad de FCC de diseño de flujo descendente fue puesta en línea. La primera Unidad TCC de 10,000 BPD comenzó a operar en Magnolia Oil Company en Beaumont, TX (una filial de la refinería Paulsboro de Socony-Vacuum.
1945	Al final de la segunda guerra mundial, la capacidad de procesamiento de las Unidades TCC en funcionamiento era de unos 300,000 BPD.
1947	Se construyó la primera Unidad FCC apilada. UOP. M.W. Kellogg presentó la Unidad FCC modelo III.

Tabla 2.6 Evolución del craqueo catalítico pre-invención del proceso de craqueo catalítico en lecho fluidizado

1948	La división Davison de W.R. Grace y Co. Desarrolló un catalizador microesferoidal.
1951	M.W Kellogg presentó el diseño Orthoflow.
1952	Exxon presento el modelo IV.
1954	Se introdujeron catalizadores con alto contenido de alúmina (Al ₂ O ₂).
Mediados 50's	UOP presenta un diseño de lado a lado (Side by Side).
1961	Kellogg y Phillips desarrollaron y pusieron el primer craqueador de resina en la refinería de Borger, Texas.
1963	La primera Unidad FCC Modelo I se cerró después de 22 años de funcionamiento.
1964	Mobil Oil desarrolló un catalizador FCC zeolita ultraestable Y (USY) y ultraestable Y de intercambio de tierras raras (ReY). Ultima Unidad TCC completada.
1972	Amoco Oil inventó la regeneración a alta temperatura.
1974	Mobil Oil presentó promotora de CO.
1975	El petróleo de Phillips desarrollo antimonio para la pasivación de níquel.
1981	TOTAL, inventó la regeneración en dos etapas para el procesamiento de residuos.
1983	Mobil informó del primer uso comercial del aditivo ZSM-5 que ofrece la flexibilidad no sólo en la mejora del octanaje, sino de los rendimientos de las olefinas en la Unidad FCC.
1985	Mobil comenzó a instalar sistemas de ciclones cerrados es sus Unidades FCC.
1994	Coastal Corporation realizó pruebas comerciales de tiempo de residencia ultracorto, craqueo selectivo (MSCC).
1996	ABB Lummus Global adquirió las tecnologías de Texaco FCC.

Fuente: (Sadeghbeigi, 2020)

Capítulo III Diseño Mecánico

La mecánica se define como la ciencia que describe y predice las condiciones de reposo o movimiento de los cuerpos bajo la acción de las fuerzas (Beer, Jhonston, Mazurek, & Eisenberg, 2010). Se divide en tres partes: mecánica de cuerpos rígidos, mecánica de cuerpos deformables y mecánica de fluidos.

La mecánica de cuerpos rígidos se subdivide en estática y dinámica; que estudia los cuerpos en reposo y los cuerpos en movimiento respectivamente. En esta parte los cuerpos son perfectamente rígidos, sin embargo, las estructuras y las máquinas reales nunca lo son y se deforman bajo las cargas a las que están sometidas. Aquí es donde entra la mecánica de cuerpos deformables, ya que estas deformaciones casi siempre son pequeñas y no afectan de manera apreciable las condiciones de equilibrio o de movimiento de la estructura en consideración.

La mecánica de fluidos se subdivide en el estudio de los fluidos incompresibles y el de los fluidos compresibles. La hidráulica es una subdivisión importante en el estudio de los fluidos incompresibles y trata problemas relativos a los líquidos.

La mecánica es la base de la mayoría de las ciencias de la ingeniería, sin embargo, no tiene carácter empírico, no se basa en la experiencia u observación, por lo tanto, es una ciencia aplicada ya que explica y predice los fenómenos físicos. Cuando se habla de un cuerpo se puede considerar como una partícula, sin embargo, esto no siempre es posible, puesto que se toma en consideración el tamaño del cuerpo y también el hecho de que las fuerzas actúan sobre distintas partículas, es por ello, que un cuerpo debe tratarse como la combinación de varias partículas, por lo tanto, tiene distintos puntos de aplicación.

Beer, *et al.* (2010) define el cuerpo rígido como aquel que no se deforma, sin embargo, las máquinas y estructuras nunca son absolutamente rígidas y se deforman bajo la acción de las cargas que actúan sobre ellas. A pesar de ello, por lo general esas deformaciones son pequeñas y no afectan las condiciones de equilibrio o de movimiento de la estructura en consideración. No obstante, tales deformaciones son importantes en lo concerniente a la resistencia a la falla de las estructuras y están consideradas en el estudio de la mecánica de materiales.

3.1 Mecánica de materiales

De acuerdo con Hibbeler (2011), la mecánica de materiales es una rama de la mecánica que estudia los efectos internos del esfuerzo y la deformación en un cuerpo sólido que está sometido a una carga externa. El esfuerzo se encuentra asociado con la resistencia del material del que está hecho el cuerpo, mientras que la deformación es una medida de la elongación (cambio en tamaño y forma) que experimente este.

Las fuerzas que actúan sobre los cuerpos rígidos se pueden dividir en dos grupos: carga externa y carga interna.

81

Carga externa

Según Beer, et al. (2010) las fuerzas externas representan la acción que ejercen otros cuerpos sobre el cuerpo rígido en consideración. De acuerdo con Hibbeler (2011), un cuerpo puede estar sometido a dos tipos de cargas externas ver figura 3.1 como se menciona a continuación:

 Las fuerzas de superficie son causadas por el contacto directo de un cuerpo con la superficie de otro. Estas fuerzas están distribuidas sobre el área de contacto entre los cuerpos. Si esta área es pequeña, entonces la fuerza de superficie se puede idealizar como una sola *fuerza concentrada*. Si la carga de la superficie se aplica a lo largo de una área estrecha o línea, la carga puede idealizarse como una carga *linealmente distribuida, w(s)*.

La fuerza resultante F_R de w(s) es equivalente al área bajo la curva de la carga distribuida, y esta resultante actúa a través del centroide *C* (o centro geométrico) de dicha área.

 Las fuerzas de un cuerpo se desarrollan cuando un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro cuerpo sin contacto físico directo entre estos (efectos causados por la gravitación de la Tierra o por su campo electromagnético).



Figura 3.1. Carga externa de un cuerpo. Fuente: (Hibbeler, 2011)

Carga Interna

Las fuerzas internas son aquellas que mantienen unidas las partículas que conforman al cuerpo rígido. Si éste está constituido en su estructura por varias partes, las fuerzas que mantienen unidas a dichas partes también se definen como fuerzas internas.

El equilibrio de un cuerpo requiere un balance de fuerzas para impedir que el cuerpo se traslade o tenga movimiento acelerado a lo largo de una trayectoria recta o curva, y un balance de momentos para impedir que el cuerpo gire. Estas condiciones se pueden expresar mediante dos ecuaciones vectoriales de la manera siguiente:

$$\sum F = 0 \tag{3.1}$$

$$\sum M_o = 0 \tag{3.2}$$

Aquí ΣF representa la sumatoria de todas las fuerzas sobre el cuerpo y ΣM_o es la sumatoria de todos los momentos de todas las fuerzas respecto a cualquier punto *O* ya sea sobre o fuera del cuerpo. En la mecánica de materiales, la estática se usa principalmente para determinar las cargas resultantes que actúan dentro de un cuerpo.

La aplicación exitosa de las ecuaciones de equilibrio requiere la especificación completa de todas las fuerzas conocidas y desconocidas que actúan sobre el cuerpo, por lo que Hibbeler (2011), menciona que la mejor manera de tomar en cuenta todas esas fuerzas es dibujar el diagrama de cuerpo libre del cuerpo.

La carga interna en un cuerpo consiste en una fuerza normal, una fuerza cortante, un momento flexionante y un momento de torsión. Representan las resultantes de las distribuciones de esfuerzo normal y cortante que actúan sobre la sección transversal ver figura 3.2.



Figura 3.2. Carga interna de un cuerpo. Fuente: (Hibbeler, 2011)

Fuerza normal (N), esta fuerza actúa perpendicularmente al área, se desarrolla siempre que las cargas externas tienden a empujar o jalar sobre los dos segmentos del cuerpo.

Esfuerzo cortante (V), el esfuerzo cortante se encuentra en el plano del área y se desarrolla cuando las cargas externas tienden a ocasionar que los dos segmentos del cuerpo se deslicen uno sobre el otro.

Momento de torsión o torque (T), este efecto se desarrolla cuando las cargas externas tienden a torcer un segmento del cuerpo con respecto al otro alrededor de un eje perpendicular al área.

Momento flexionante (M), es causado por las cargas externas que tienden a flexionar el cuerpo respecto a un eje que se encuentra dentro del plano del área.

Esfuerzo

Para poder definir esfuerzo, Hibbeler (2011) plantea dos hipótesis respecto a las propiedades del material de la manera siguiente:

- Se considera que el material es continuo, esto es, que consiste en una distribución uniforme de materia que no contiene huecos, en vez de estar compuesto de un número finito de moléculas o átomos distintos.
- 2. El material debe ser cohesivo, es decir, que todas sus partes están unidas entre sí, en vez de tener fracturas, grietas o separaciones.

Esfuerzo normal (\sigma), se define como la intensidad de fuerza, o fuerza por área unitaria, queda representado mediante la ecuación siguiente:

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{3.3}$$

Donde:

F = Fuerza, (N) A = Área, (m²)

Esfuerzo cortante o de *cizallamiento (V)*, se define como la intensidad de fuerza o fuerza por área unitaria es producido por fuerzas que actúan paralelamente al plano que las resiste, mientras que los de tensión o compresión lo son por fuerzas normales al plano sobre el que actúan.

La demostración concerniente al esfuerzo normal uniforme permite deducir que también existe esfuerzo cortante uniforme si la fuerza de corte resultante pasa por el centroide de la sección sometida a corte. Si ocurre así, se puede representar mediante la ecuación siguiente:

$$V = \frac{P}{A}$$
(3.4)

Donde:

P = Fuerza cortante, (N)

 $A = \text{Área}, (\text{m}^2)$

Para garantizar la seguridad, es necesario escoger un *esfuerzo permisible* que limite la carga aplicada a un valor que sea menor al que el miembro pueda soportar plenamente, de esta manera se puede definir como la carga máxima que puede soportar un elemento.

Una manera de especificar la carga permisible para el diseño o análisis de un miembro es usar un número llamado factor de seguridad. El *factor de seguridad* (*FS*) es la razón de la carga de falla, F_{falla} , dividida entre la carga permisible, F_{perm} . La F_{falla} se determina por medio de ensayos experimentales del material y el factor de seguridad se selecciona con base en la experiencia. El factor de seguridad se puede expresar de la manera siguiente:

$$FS = \frac{F_{falla}}{F_{permisible}}$$
(3.5)

La deformación unitaria es el cociente del alargamiento (deformacion total) δ y la longitud total *L* en la que se ha producido, queda representado mediante la ecuación siguiente:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \tag{3.6}$$

Donde:

- δ = Longitud calibrada de la probeta, (pulg)
- L = Longitud calibrada original, (pulg)

Para suponer que la deformación es constante Pytel y Singer (1994) mencionan que se debe cumplir con las consideraciones siguientes:

- 1. El elemento sometido a tensión debe tener una sección transversal o recta constante.
- 2. El material debe ser homogéneo.
- 3. La fuerza o carga debe ser axial, es decir, producir un esfuerzo uniforme.

Si graficamos los valores correspondientes de σ y ϵ , con los esfuerzos como ordenadas y las deformaciones unitarias como abscisas, la curva resultante se llama diagrama convencional de esfuerzo-deformación unitaria. Este diagrama es muy importante en la ingeniería ya que proporciona los medios para obtener datos sobre la resistencia a tensión o/a compresión de un material sin considerar el tamaño o forma geométrica del material (Hibbeler, 2011).

De acuerdo con Hibbeler et al (2011), los diagramas de esfuerzo-deformación real y convencional son diferentes, la mayor parte del diseño en ingeniería se lleva a cabo dentro de la zona elástica, ya que la distorsión del material en general no es severa dentro de este intervalo. Siempre que el material sea "rígido", como son la mayoría de los metales, la deformación unitaria hasta el límite de elasticidad permanecerá pequeña y el error en el uso de los valores nominales de σ y de ϵ será muy pequeño (alrededor de 0.1%) comparado con sus valores verdaderos, a modo de ejemplo se muestra en la figura 3.3 un diagrama esfuerzo-deformación para el acero bajo en carbono.



Figura 3.3. Diagrama esfuerzo-deformación para el acero bajo en carbono. Fuente: (Hibbeler, 2011)

La elasticidad es la propiedad que hace que un cuerpo que ha sido deformado regrese a su forma original después de que se han removido las fuerzas deformadoras, así mismo, el *comportamiento elástico* ocurre cuando las deformaciones unitarias en el modelo están dentro de la región ligeramente sombreada de color naranja que se muestra en la figura 3.4. Se puede ver que la curva es en realidad una línea recta a través de toda esta región, así que el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria. En otras palabras, se dice que el material es linealmente elástico.

El límite superior del esfuerzo en esta relación lineal se llama límite de proporcionalidad, σ_{lp} . Si el esfuerzo excede un poco el límite de proporcionalidad, el material puede todavía responder elásticamente; sin embargo, la curva tiende a aplanarse causando un incremento mayor de la deformación unitaria con el correspondiente incremento del esfuerzo. Esto continúa hasta que el esfuerzo llega al límite elástico.





Un ligero aumento en el esfuerzo más allá del límite elástico provocará un colapso del material y causará que se deforme permanentemente. Este comportamiento se llama fluencia, y está indicado por la región naranja oscura de la curva, figura 3.4. El esfuerzo que origina la fluencia se llama *esfuerzo de fluencia* o *punto de fluencia*, σ_Y , y la deformación que ocurre se llama *deformación plástica*.

El endurecimiento por deformación sucede cuando la fluencia ha terminado, resultando una curva que se eleva continuamente, pero se va aplanando hasta llegar a un esfuerzo máximo, llamado esfuerzo último, σ_u . La elevación en la curva de esta manera se llama endurecimiento por deformación, y se identifica en la figura 3.4 como la región verde clara. A lo largo de la prueba, y mientras el espécimen se está alargando, el área de su sección transversal disminuirá. Esta disminución de área es bastante uniforme en toda la longitud calibrada del espécimen, incluso hasta la deformación unitaria que corresponde al *esfuerzo último*.

Formación del cuello o estricción. En el esfuerzo último, el área de la sección transversal comienza a disminuir en una zona localizada de la probeta, en lugar de hacerlo en toda su longitud. Este fenómeno es causado por planos de deslizamiento que se forman dentro del material y las deformaciones producidas son causadas por esfuerzos cortantes.

Como resultado, tiende a desarrollarse un "cuello" en esta zona a medida que el espécimen (probeta) se alarga cada vez más, en el inciso (a) de la figura 3.5. Puesto que el área de la sección transversal en esta zona está decreciendo continuamente, el área más pequeña puede soportar sólo una carga siempre decreciente. De aquí que el

diagrama de esfuerzo-deformación unitaria tienda a curvarse hacia abajo hasta que la probeta se rompe en el punto del esfuerzo de fractura, σ_f ver en el inciso (b) de la figura 3.5. Esta región de la curva debida a la formación del cuello está representada con color verde oscuro en la figura 3.4.



Figura 3.5. Representación de estricción. Fuente: (Hibbeler, 2011)

Para un material cuya curva "esfuerzo-deformación" es similar a la de la figura 3.4, la relación es lineal (proporcional) para valores bajos de deformación. Esta relación lineal, entre el alargamiento y la fuerza axial que lo produce se le conoce como Ley de Hooke la cual establece que "el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación unitaria." La ley de Hooke puede expresarse matemáticamente como:

$$\sigma = E\epsilon \tag{3.7}$$

Donde:

- σ = Esfuerzo unitario, (N/m²)
- E = Módulo de elasticidad, (N/m²)
- ϵ = Deformación unitaria, (m/m)

El parámetro que caracteriza el comportamiento elástico de un material se conoce como *módulo de Young* o *módulo de elasticidad* y se representa con la letra *E.*
Para materiales utilizados en recipientes sujetos a presión, el valor de *E* se encuentra en el ASME Sección II Parte D, Tabla TM-1 (Anexo B). Por ejemplo: para un acero al carbono con valor de C \leq 0.30%, a 70°F: *E* = 29,400,000 psi.

El coeficiente (o relación) de Poisson es un parámetro característico de cada material que indica la relación entre la deformación que sufre el material en sentido longitudinal y perpendicular a la dirección de una fuerza aplicada. "Siempre que un cuerpo se somete a la acción de una fuerza, se deformará en la dirección de la fuerza" (Fitzgerald, 2007, pág. 21).

Las deformaciones laterales que se producen tienen una relación constante con las deformaciones axiales. Mientras que el material se mantenga dentro del rango elástico de esfuerzos, esta relación es constante y se expresa de la manera siguiente:

$$\mu = \frac{deformación \, lateral}{deformación \, axial} \tag{3.8}$$

El coeficiente de Poisson está comprendido entre 0.0 y 0.5. Para el acero al carbono μ es aproximadamente de 0.25.

Esfuerzo cortante

Este tipo de esfuerzo se producen en un cuerpo cuando las cargas aplicadas tienden a cortar o deslizar una parte de este con respecto a otra. Se presenta en elementos como: pernos, remaches, anclas de equipos, en vigas y elementos sometidos a torsión, flechas, boquillas de recipientes, etc.



Figura 3.6. Ejemplo de esfuerzo cortante. Fuente: (Fitzgerald, 2007)

Las fuerzas que resisten la carga aplicada "P" ver figura 3.6 actúan sobre el área "abcd". Las fuerzas actúan en el plano paralelo a la carga aplicada. El esfuerzo cortante (promedio) es igual a la carga aplicada dividida entre el área sobre la cual actúa.

Esfuerzo permisible a compresión ASME VIII-1 párrafo UG-23(b)

En la figura 3.7 se observa el esfuerzo máximo permisible a compresión para el diseño de secciones cilíndricas, sujetos a cargas que generan compresión longitudinal, por lo cual debe ser el menor de los valores siguientes:

- 1. El esfuerzo máximo permisible a tensión indicado en el ASME Sección II, Parte D.
- El valor "B", calculado como establece el párrafo UG-23(b) del ASME Sección VIII División 1.



Figura 3.7. Diagrama esfuerzo permisible de acuerdo con el Código ASME Sección VIII División 1, Subsección II.

Torsión

Las cargas que tiende a torcer un elemento estructural alrededor de su eje longitudinal, se le llama momento torsionante, torque o simplemente par, por lo que se puede observar en la figura 3.8.



Figura 3.8. Ejemplo de Torsión. Fuente: (Fitzgerald, 2007)

El esfuerzo producido se puede calcular mediante la fórmula:

$$\tau = \frac{Tc}{J} \tag{3.9}$$

Donde:

- τ = Esfuerzo cortante en la flecha, el cual ocurre en la superficie exterior, (Pa)
- T = Par de torsión interno resultante que actúa en la sección transversal, (N*m)
- J = Momento polar de inercia del área de la sección transversal, (m⁴)
- c = Radio exterior de la flecha, (m)

Módulo de Tenacidad u_t

Esta cantidad representa el área total dentro del diagrama de esfuerzodeformación, ver figura 3.9, y por consiguiente indica la densidad de la energía de deformación unitaria del material precisamente antes de que se rompa. Esta propiedad resulta importante cuando se diseñan miembros que pueden sobrecargarse accidentalmente. Los materiales con un módulo de tenacidad elevado se distorsionarán mucho debido a una sobrecarga; sin embargo, pueden ser preferibles a aquellos con un valor bajo, puesto que los materiales que tienen un u_t bajo pueden fracturarse de manera repentina sin indicio alguno de una falla próxima.



Figura 3.9. Módulo de elasticidad. Fuente: (Hibbeler, 2011)

3.2 Tipos y clasificación de recipientes

Recipientes a Presión

Dentro de la industria del petróleo y gas existen numerosos tipos de procesos relacionados con el uso de fluidos diversos, por lo que es fundamental el poder almacenarlos para disponer de aquellos cuando se requiera. Muchos de los fluidos que se requieren para algún proceso especifico tienen características físicas específicas, las cuales se deben contemplar cuando se les desea almacenar, por lo que cada fluido requiere un recipiente calculado y seleccionado con respecto a dichas características.

En la figura 3.10 se muestran los diferentes tipos de recipientes a presión y se pueden clasificar de la manera siguiente:



Figura 3.10. Clasificación de recipientes a presión. Fuente: (Fitzgerald, 2007)

Tipos de Recipientes

Por su Uso

- Los recipientes se dividen para almacenamiento y proceso, los primeros nos sirven únicamente para almacenar fluidos a presión, y de acuerdo con su servicio son conocidos como tanques de almacenamiento, tanques de día, tanques acumuladores, etc.
- Los recipientes a presión de proceso tienen múltiples y muy variados usos, entre ellos podemos citar los cambiadores de calor, reactores, torres fraccionadoras, torres de destilación, rectificadores, separador 1ra y 2da etapa, de balance, etc.

Por su Forma

 Los recipientes a presión pueden ser cilíndricos o esféricos, los primeros pueden ser horizontales o verticales, y pueden tener, en algunos casos, chaquetas de enfriamiento o calentamiento, esto para incrementar o decrecer la temperatura de los fluidos según el caso. Los recipientes esféricos se utilizan generalmente como tanques de almacenamiento, y se recomiendan para almacenar grandes volúmenes de fluidos principalmente: gas natural, butano, isobutileno, hidrógeno, amoniaco, entre otros.

Presión de Operación (PO)

Es identificada como la presión de trabajo y es la presión manométrica a la cual estará sometido un equipo en condiciones de operación normal.

Presión de Trabajo Máxima Permisible (Maximum Allowable Working Pressure MAWP).

Es la presión máxima a la que se puede someter un recipiente, en condiciones de operación, suponiendo que él está:

- 1. En condiciones después de haber sido corroído.
- 2. Bajo los efectos de la temperatura de diseño.
- 3. En la posición normal de operación.
- Bajo los efectos de otras cargas, tales como fuerza debida al viento, presión hidrostática, etc., cuyos efectos se deben agregar a las ocasionadas por la presión interna.

Componentes principales

A continuación, se mencionan los componentes principales de algunos tipos de Recipientes a Presión:

Recipientes cilíndricos Horizontales

- a) Cuerpo Cilíndrico o Envolvente.
- b) Tapas.

- c) Boquillas.
- d) Refuerzos de Boquillas.
- e) Registros Hombre.
- f) Anillos Atiezadores o de refuerzo.
- g) Soportes o Silletas.
- h) Orejas de izaje para traslado o montaje.

Recipientes cilíndricos Verticales

- a) Cuerpo Cilíndrico o Envolvente.
- b) Tapas.
- c) Boquillas.
- d) Refuerzos de Boquillas.
- e) Registros Hombre.
- f) Anillos Atiezadores o de refuerzo.
- g) Faldón.
- h) Placa Base.
- i) Orejas de izaje para traslado o montaje

Recipientes esféricos

- a) Tapa Superior.
- b) Tapa Inferior.
- c) Anillo Superior.
- d) Anillo Central.
- e) Anillo Inferior.

- f) Boquillas.
- g) Estructura Soporte.

3.3 Materiales de construcción

Los materiales de construcción de los recipientes generalmente se especifican en las Hojas de Datos de la Ingeniería Básica o son definidos por la Especialidad de Proceso. Frecuentemente, en las Hojas de Datos el material está especificado como "CS" o "SS"; (Carbon – Steel ó Steel – Steel) (Carbón – Acero ó Acero – Acero). En estos casos es necesario definir la Especificación ASME o ASTM.

Para partes estructurales (soportes, grapas, escaleras, etc.) la Especificación puede ser ASTM (A-36). Los aceros SA-515 y SA-516, en las instalaciones industriales de Petróleos Mexicanos son los más utilizados para recipientes sujetos a presión.

Los aceros al carbono son los más económicos para la fabricación de recipientes, cuando no se utilizan con fluidos corrosivos (azufre, hidrógeno, etc.). Los aceros llamados de baja aleación son básicamente aceros al carbono con elementos adicionales como el cromo o níquel. Los aceros con un contenido de cromo igual o mayor al 11% y menor de 30%, son llamados aceros inoxidables. Los aceros inoxidables tienen resistencia a los ambientes corrosivos, a la oxidación a altas temperaturas y resistencia al impacto a baja temperatura.

Basado en los componentes, los aceros inoxidables comúnmente utilizados para recipientes a presión pueden dividirse en las categorías siguientes:

Austeníticos

- a) Resistentes a la corrosión, aún a 1500 °F.
- b) Los más utilizados con los de las series 304 y 316.
- c) Conocidos como 18% 8% (18% Cr, 8% Ni).

Martensíticos

- a) 11% a 16% de Cromo.
- b) El tipo 410 es utilizado para platos de torres de proceso.

Ferríticos

- a) 16% al 30% de cromo.
- b) Los tipos 405 (12Cr) y 410 son utilizado como recubrimiento (cladding).
- c) También es utilizado para platos de torres de proceso.

Aceros al carbono con recubrimiento

Para reducir el costo de los recipientes a presión que manejan fluidos corrosivos, se utiliza un acero al carbono como metal base (el que soporta los esfuerzos), con un recubrimiento interior. En general, hasta un espesor de 9.5 mm (3/8 pulg) es más económico utilizar placa sólida de acero inoxidable. Para espesores mayores, es recomendable utilizar placa base de acero al carbono con un recubrimiento interior resistente a la corrosión. El espesor del recubrimiento varía de 2 mm a 3 mm (5/64 pulg a 1/8 pulg).

Los métodos más comunes para unir el acero con carbono al recubrimiento son: unión integral (integral cladding), recubrimiento con soldadura (weld overlay) y lámina soldada (strip or sheet lining):

Placa integral (integral cladding). La unión es continua y evita la posibilidad de que cualquier substancia corrosiva se incruste entre la placa base y el recubrimiento.

Depósito de soldadura (weld overlay). Consiste en depositar una capa soldadura en la placa de acero al carbono Este método es más caro que el de integral cladding o strip lining.

Lámina soldada (sheet or strip lining). El recubrimiento es unido a la placa base por puntos de soldadura (spot welds), normalmente en paso cuadrado de 23.28 mm (11/12 pulg).

3.4 Normatividad

La Normalización es el proceso mediante el cual se regulan las actividades desempeñadas por los sectores tanto privado como público, en materia de salud, medio ambiente, seguridad al usuario, información comercial, prácticas de comercio industrial y laboral a través del cual se establecen la terminología, la clasificación, las directrices, las especificaciones, los atributos, las características, los métodos de prueba o las prescripciones aplicables a un producto, proceso o servicio.

Los principios básicos en el proceso de normalización son: representatividad, consenso, consulta pública, modificación y actualización.

102

La actividad normalizadora se entiende como la consolidación del conocimiento que es recabado a través de consultas realizadas entre expertos de una rama o actividad productiva. Es un documento mediante el cual los sectores interesados (entre los cuales están, fabricantes, usuarios y gobierno) acuerdan las características técnicas deseables en un producto, proceso o servicio.

Este proceso se lleva a cabo mediante Comités de Normalización para la elaboración, expedición y difusión a nivel nacional, de las normas que pueden ser de tres tipos principalmente:

Normas Oficiales Mexicanas

Regulación técnica de **observancia obligatoria** expedida por las Autoridades Normalizadoras competentes cuyo fin esencial es el fomento de la calidad para el desarrollo económico y la protección de los objetivos legítimos de interés público.

Para los efectos de las Normas Oficiales Mexicanas, se consideran como objetivos legítimos de interés público:

- I. La protección y promoción de la salud.
- II. Protección a la integridad física, a la salud, y a la vida de los trabajadores en los centros de trabajo.
- III. Producción orgánica, de organismos genéticamente modificados, sanidad e inocuidad agroalimentaria.
- IV. Seguridad alimentaria.
- V. Seguridad nacional.

VI. Obras y servicios públicos.

- VII. Seguridad vial.
- VIII. Cualquier otra necesidad publica, en términos de las disposiciones legales aplicables.

Asimismo, se considera como un objetivo legítimo de interés público el cumplimiento con aquellos señalados en los acuerdos y tratados internacionales suscritos por el Estado Mexicano.

Normas Mexicanas

Las Normas Mexicanas **son de observancia voluntaria**, salvo en los casos en que los particulares manifiesten que sus productos, procesos o servicios son conformes con las mismas y sin perjuicio de que las dependencias requieran en una Norma Oficial Mexicana su observancia para fines determinados, su campo de aplicación puede ser nacional, regional o local.

Toman como base las Normas Internaciones, salvo que las mismas sean ineficaces o inadecuadas para alcanzar los objetivos deseados y ello esté debidamente justificado, por lo tanto, deben de estar basadas en el consenso de los sectores interesados que participen en el Comité y someterse a consulta pública por un periodo de cuando menos 60 días naturales antes de su expedición, mediante aviso publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) que contenga un extracto de la misma.

Normas de Referencia de Pemex

Antes de la reforma energética constitucional del año de 2013, Pemex como entidad de la Administración Pública Federal, en el artículo 67 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (LFMN) le facultó a Pemex para constituir su Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios (CNPMOS), para la elaboración de Normas de Referencia (NRF) y con ellas adquirir, arrendar o contratar bienes o servicios, cuando las Normas Mexicanas o Internacionales no cubra los requerimientos de las mismas, o bien las especificaciones contenidas en dichas Normas se consideren inaplicables u obsoletas.

La reforma energética de 2013, en el Artículo 25 Constitucional establece la transformación de Pemex y CFE en Empresas Productivas del Estado, cuyo objeto será la creación de valor económico e incrementar los ingresos de la Nación, con sentido de equidad y responsabilidad social y ambiental, Pemex y la CFE se mantienen como empresas 100% mexicanas y 100% del Estado, cuya organización, administración, organización y estructura corporativa serán acordes con las mejores prácticas internacionales (Diario Oficial de la Federación, 2020, 01 de julio).

Pemex al transformarse en una Empresa Productiva del Estado, dicho artículo 67 de la LFMN, ya no le aplica, porque deja de ser una entidad de la Administración Pública Federal, lo que en su momento generó y hasta la fecha, una laguna al saber si las Normas de Referencia utilizadas en los proyectos industriales de Pemex siguen siendo aplicables, más aún con la publicación gradual a partir del 2014 en el DOF de la declaratoria de cancelación de las NRF's. Al interior de Petróleos Mexicanos en sus distintas áreas de ingeniería y/o equipos de proyectos, así como al exterior en firmas de ingeniería que son contratadas para el desarrollo de la ingeniería en los proyectos de inversión vinculados a la cadena de valor, se tiene distintas opiniones al respecto en relación con la aplicabilidad de las NRF's, predominando el que ya no son aplicables a los proyectos industriales porque ya están canceladas.

De lo anterior, se desprende en términos generales lo siguiente:

- Que el Artículo 67 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, no es aplicable a Pemex, toda vez que la naturaleza Jurídica de Pemex es la de una Empresa Productiva del Estado, y no la de una dependencia o entidad de la Administración Pública Federal.
- II. Se considera que, si las especificaciones técnicas contenidas en las NRF se ajustan a los requerimientos de los bienes o servicios que Pemex o sus Empresas Productivas Subsidiarias requieran contratar, no existe impedimento legal alguno para su utilización en aquellos procesos de contratación, a efecto de que el proveedor o contratista deba observarlos.

Las Normas de Referencia (*NRF*), por lo anterior se pueden seguir utilizando como están, pero por el periodo de tiempo que ha pasado desde su declaratoria de cancelación en el DOF a la fecha, son Normas que no se han actualizado y que en sus referencias normativas ya quedaron obsoletas, por tanto, para rescatar mucho de los requerimientos técnicos vertidos en las NRF's que aun pudiesen ser aplicables, una opción válida en Ingeniería de Proyectos es realizar una Especificación Técnica Particular para un proyecto, considerando los requerimientos y alcance de acuerdo con la decisión y experiencia del especialista del equipo de proyecto, es ahí donde puede tenerse la oportunidad de actualizar toda Referencia Normativa que a lo largo de casi 10 años haya sufrido actualizaciones.

El 1 de julio de 2020 se publica en el Diario Oficial de la Federación la nueva Ley de Infraestructura de la Calidad y se abroga la ley Federal sobre Metrología y Normalización, dicha Ley tiene como finalidad lo siguiente:

- Promover la concurrencia de los sectores público, social y privado en la elaboración y observancia de las Normas Oficiales Mexicanas y los Estándares.
- II. Establecer mecanismos de coordinación y colaboración en materia de normalización, Evaluación de la Conformidad y metrología entre las Autoridades Normalizadoras, el Centro Nacional de Metrología, los Institutos Designados de Metrología, los organismos de acreditación y organismos de evaluación de la conformidad, las entidades locales y municipales, así como los sectores social y privado.
- III. Propiciar la innovación tecnológica en los bienes, productos, procesos y servicios para mejorar la calidad de vida de las personas en todo el territorio nacional.
- IV. Impulsar la creación de mayor infraestructura física y digital para el adecuado desarrollo de las actividades de Evaluación de la Conformidad.
- V. En materia de metrología, establecer y mantener el Sistema General de Unidades de Medida, crear los Institutos Designados de Metrología, y establecer lo referente a la metrología científica, metrología legal y la metrología aplicada o industria.

VI. Fomentar y difundir las actividades de normalización, estandarización, acreditación,
Evaluación de la Conformidad y metrología (Ley de Infraestructura de la Calidad,
2020, 01 de julio).

En la actualidad se están elaborando Estándares Técnicos con base al capítulo II Procedimiento de Elaboración de los Estándares de acuerdo con la Ley de Infraestructura de la Calidad, presentando la propuesta de Estándar al Comité Técnico de Estandarización correspondiente para su análisis, revisión y deliberación, en cuyo momento, se considerará como un anteproyecto de Estándar, cabe destacar que la Ley de Infraestructura de la Calidad solo contempla Normas Oficiales Mexicanas, Estándares y Normas Internacionales.

Las *NRF* han sido el medio para solicitar el cumplimiento de normatividad internacional ISO, IEC, así como estándares extranjeros (API, ASME, ASTM, AWS, NEMA, etc.), además los requisitos particulares de Pemex, que pueden ser aplicados en la mayoría de los proyectos, alguno de los requerimientos de las *NRF*, son muy especiales para Pemex y están por arriba de los requerimientos de Normas Internacionales o Extranjeras.

Normas Internacionales

Es un documento normativo que emite un organismo internacional relacionado con la materia, reconocido por el gobierno mexicano en los términos del derecho internacional. Es por lo que emite un organismo o dependencia de normalización pública o privada reconocido oficialmente por un país.

Códigos y Estándares Extranjeros

Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI)

Su objetivo es crear uniformidad para las mercancías y los procesos de la industria. El cumplimiento de las normas ANSI ayuda a las empresas a ser compatibles desde el punto de vista internacional y, por lo tanto, facilita el comercio internacional.

Entre sus roles de liderazgo en todas las principales organizaciones de acreditación y estándares globales y regionales, ANSI es el único representante de EE. UU. ante la Organización Internacional de Normalización (ISO) y, a través del Comité Nacional de EE. UU. (USNC), ante la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). ANSI promueve el uso de las Normas de EE. UU. a nivel internacional, defiende las políticas y las posiciones técnicas de EE. UU. en las organizaciones de Normas Internacionales y regionales, y alienta la adopción de Normas Internacionales como Normas Nacionales cuando satisfacen las necesidades de la comunidad de usuarios. El Instituto también representa los intereses estadounidenses en los diálogos con mercados clave como China, Europa e India (ANSI, 2022).

American Society for Testing and Materials (ASTM International)

Las normas de ASTM son las herramientas para la satisfacción del cliente y la competitividad de las empresas en una amplia gama de mercados. ASTM proporciona servicios a una amplia gama de industrias, por ejemplo: metales, construcción, petróleo, productos de consumo y muchas más. La Sociedad Estadounidense para Pruebas y

Materiales se formó en 1898, fundada por Charles B. Dudley, Ph.D., un químico del Ferrocarril de Pensilvania. En 2001, cambio su nombre a ASTM International.

Las normas de ASTM International se usan en investigaciones y proyectos de desarrollo, sistemas de calidad, comprobación y aceptación de productos y transacciones comerciales por todo el mundo. Son unos de los componentes integrales de las estrategias comerciales competitivas de hoy en día (Astm.org, 2022).

Instituto Americano del Petróleo (API)

El API se formó en 1919 como una Organización que establece estándares y es líder mundial en convocar a expertos en la materia en todos los segmentos para establecer, mantener y distribuir estándares de consenso para la industria del petróleo y el gas.

Los estándares mejoran la seguridad de las operaciones de la industria, aseguran la calidad, ayudan a mantener los costos bajos, reducen el desperdicio y minimizan la confusión. Ayudan a acelerar la aceptación, llevan los productos al mercado más rápidamente y evitan tener que reinventar la rueda cada vez que se fabrica un producto (Api.org, 2022).

3.5 Normatividad Técnica para el Diseño de Recipientes a Presión

Los recipientes a presión, en muchos casos, son el núcleo productivo de incontables industrias a nivel mundial, por lo tanto, destaca su importancia y relevancia en el área del diseño mecánico. Para asegurar un buen funcionamiento y prevenir las fallas catastróficas de los equipos, a nivel internacional se han creado y adoptado

normativas para establecer los procedimientos y requisitos mínimos para su diseño, fabricación, inspección, montaje y modificación.

Normalmente la elección del Código de Diseño recae sobre los hombros del promotor o dueño del recipiente, pero al momento de diseñar, los ingenieros deben conocer las diferencias básicas entre los códigos principales usados en el mundo, para que esto fundamente las bases de criterio profesional de ingenieros especializados a esta área de estudio (Arredondo, 2019).

3.5.1 Código ASME Sección VIII División 1

El Código ASME Sección VIII Div. 1, define como Recipiente a Presión, cualquier contenedor cerrado capaz de almacenar un fluido a Presión Manométrica, sea esta interna o externa. Esta Presión puede ser obtenida desde una fuente interna o externa, o por la aplicación de calor desde una fuente directa o indirecta, o cualquier combinación de ellas.

- Recipientes que contengan agua bajo presión, incluyendo aquellos que contengan aire, la compresión de los cuales sirva únicamente como amortiguador que excedan:
 - Una Presión de Diseño mayor a 21.09 kg/cm² (300 psi).
 - Una temperatura de Diseño mayor a 98.89 °C (210 °F).
- 2. Tanques de agua caliente calentados por vapor u otros medios indirectos que excedan:
 - Una entrada de calor de 1135.65 kw (200,000 BTU's/hr).
 - Una temperatura del agua de 98.89 °C (210 °F).

- Una capacidad nominal de 454.25 Lt (120 Galones).
- 3. Recipientes que tengan un Diámetro Interior, Ancho, Altura o Sección Transversal mayor a 6 pulgadas sin limitación en longitud o Presión.
- Recipientes que tengan una Presión de Operación (presión manométrica a la que funciona un equipo en condiciones normales) interna o externa mayor a 15 psi. sin limitación en medidas.
- Recipientes que tengan una Presión de Diseño (presión máxima que puede soportar el equipo) que no exceda los 210.92 kg/cm² (3,000 psi).

La Sección VIII – División 1 está compuesta por tres subsecciones y apéndices obligatorios y no obligatorios. Las subsecciones son las siguientes:

A – General

Parte UG – Requerimientos generales.

B – Métodos de fabricación

Parte UW – Re	cipientes soldados.
---------------	---------------------

Parte UF - Recipientes forjados.

Parte UB – Recipientes fabricados por soldadura fuerte (*brazing*), donde el material de aporte es diferente al material de las piezas a unir, y tiene una temperatura de fusión inferior.

C – Materiales

Parte UCS –	Aceros al	carbono	y de	baja	aleación.
-------------	-----------	---------	------	------	-----------

- Parte UNF Materiales no ferrosos.
- Parte UHA Aceros de alta aleación.
- Parte UHT Aceros Ferríticos con propiedades mecánicas mejoradas por tratamiento térmico.

La Subsección A establece los requerimientos generales para todos los recipientes a presión, la Subsección B fija las exigencias específicas relacionadas con los distintos métodos de fabricación y la Subsección C indica los requerimientos aplicables a los distintos tipos de materiales que se pueden utilizar en la construcción de recipientes.

Los principios de diseño y construcción de la División 1 se aplican a recipientes con una presión de hasta 200 kg/cm²; para presiones superiores es necesario complementar esas especificaciones con reglas de diseño para alta presión.

Diseño general de recipientes

De acuerdo con Megyesy (1992), la presión de operación es la que se requiere en el proceso que forma parte el recipiente, a la cual trabaja normalmente éste.

La presión de diseño es la que se emplea para diseñar el recipiente. Según Megyesy (1992), recomienda utilizar una presión de diseño de 30 lb/pulg² o 10% más que la presión de trabajo, la que sea mayor.

Si el recipiente se encuentra sometido a desgaste por corrosión, bajo efecto de otras cargas, en posición normal de trabajo y a una temperatura determinada, entonces la presión interna (*Pa*) a la que está sujeto el elemento más débil del recipiente, corresponde al esfuerzo máximo admisible.

Cargas

Según lo establecido en el apartado UG-22, las cargas a considerar en el diseño de recipientes son:

- a) Presión interna o externa.
- b) Peso del recipiente y su contenido (en operación y ensayo, por ejemplo, el agua usada en la prueba hidrostática).
- c) Otras cargas estáticas: peso de equipos (motores, bombas, otros recipientes, tuberías, etc.).
- d) Cargas dinámicas debidas a variaciones de presión, temperatura, equipos, etc.
- e) Fuerza de naturaleza: viento, nieve, hielo, sismos.
- f) Variaciones térmicas.
- g) Presiones anormales, provocadas por errores de operación.

Diseño de cuerpos y cabezales bajo presión interna

Sección cilíndrica



Figura 3.11. Sección cilíndrica (UG-27-c1) Fuente: (ASME, 2019)

Esfuerzo tangencial (recipientes cilíndricos): El espesor requerido en función de la presión interior y la presión admisible en función del espesor se pueden calcular a partir del valor del radio interno R o externo R_0 ver en la figura 3.11 y en la ecuación (3.11).

$$P = \frac{SEt}{R + 0.6t} = \frac{SEt}{R_0 - 0.4t}$$
(3.11)

- *S* = Tensión máxima admisible, (psi)
- E = Eficiencia de la junta de las soldaduras E = 1
- t = Espesor del cuerpo cilíndrico, (pulg)
- R = Radio interior, (pulg)
- $R_0 =$ Radio exterior, (pulg)
- P = Presión interior de diseño (psig)

Tensión longitudinal: El espesor requerido en función de la presión interior y la presión admisible en función del espesor pueden calcularse a partir del valor del radio interno R o externo R₀:

$$t_r = \frac{PR}{2SE + 0.4P} = \frac{PR_0}{2SE + 1.4P}$$
(3.12)

Donde:

- *S* = Tensión máxima admisible, (psi)
- E = Eficiencia de la junta de las soldaduras E = 1
- t_r = Espesor mínimo requerido para el cuerpo, (pulg)
- R = Radio interior, (pulg)
- $R_0 =$ Radio exterior, (pulg)
- P = Presión interior de diseño (psig)

$$P = \frac{2SEt}{R+0.4t} = \frac{2SEt}{R_0 - 1.4t}$$
(3.13)

- S = Tensión máxima admisible, (psi)
- E = Eficiencia de la junta de las soldaduras E = 1
- t = Espesor del cuerpo cilíndrico, (pulg)
- R = Radio interior, (pulg)
- P = Presión interior de diseño (psig)

Esfera

Las esferas de grandes volúmenes de gas a presión y los brazos cruzados, entre las patas son para resistir cargas horizontales de viento y sismo ver figura 3.12.



Figura 3.12. Esfera (UG-27-d) Fuente: (ASME, 2019)

$$t_r = \frac{PR}{2SE - 0.2P} \tag{3.14}$$

- S = Tensión máxima admisible, (psi)
- E = Eficiencia de la junta de las soldaduras E = 1
- t_r = Espesor mínimo requerido para el cuerpo, (pulg)
- R = Radio interior, (pulg)
- P = Presión interior de diseño (psig)

$$P = \frac{2SEt}{R+0.2t} \tag{3.15}$$

Donde:

- S = Tensión máxima admisible, (psi)
- E = Eficiencia de la junta de las soldaduras E = 1
- t = Espesor del cuerpo cilíndrico, (pulg)
- R = Radio interior, (pulg)
- *P* = Presión interior de diseño (psig)

Tapa semielíptica, lado cóncavo

Son empleadas cuando el espesor calculado de una tapa toriesférica es relativamente alto, ya que las tapas semielípticas soportan mayores presiones, su silueta describe una elipse relación 2:1, su costo es alto y se fabrican hasta un diámetro máximo de 3 m, para su forma esquemática ver en la figura 3.13.



Figura 3.13. Tapa semielíptica (UG-32-c) Fuente: (ASME, 2019)

$$t_r = \frac{PD}{2SE - 0.2P} \tag{3.16}$$

- S = Tensión máxima admisible, (psi)
- E = Eficiencia de la junta de las soldaduras E = 1
- t_r = Espesor mínimo requerido para el cuerpo, (pulg)
- D = Diámetro interior, (pulg)
- P = Presión interior de diseño (psig)

$$P = \frac{2SEt}{D+0.2t} \tag{3.17}$$

Donde:

- S = Tensión máxima admisible, (psi)
- E = Eficiencia de la junta de las soldaduras E = 1
- t_r = Espesor mínimo requerido para el cuerpo, (pulg)
- D = Diámetro interior, (pulg)
- P = Presión interior de diseño, (psig)

Si:

$$\frac{t}{L} \ge 0.002 \ y \ \frac{D}{h} = 4$$

Donde:

- S = Tensión máxima admisible, (psi)
- E = Eficiencia de la junta de las soldaduras, E = 1
- t_r = Espesor mínimo requerido para el cuerpo, (pulg)
- t = Espesor del cuerpo cilíndrico, (pulg)
- D = Diámetro longitudinal del eje mayor, (pulg)
- h = Mitad de la longitud del eje menor del cabezal (internamente), (pulg)
- L = Longitud, (pulg)

Tapa hemisférica, lado cóncavo

Utilizadas exclusivamente para soportar presiones críticas, como su nombre lo indica, su silueta describe una media circunferencia perfecta, su costo es alto y no hay límite dimensional para su fabricación, para ver su forma esquemática ver figura 3.14.



Figura 3.14. Tapa Hemisférica (UG-32-e) Fuente: (ASME, 2019)

$$t_r = \frac{PL}{2SE - 0.2P} \tag{3.18}$$

- *S* = Tensión máxima admisible, (psi)
- E = Eficiencia de la junta de las soldaduras, E= 1
- t_r = Espesor mínimo requerido para el cuerpo, (pulg)
- P = Presión interior de diseño, (psig)
- *D* = Diámetro longitudinal del eje mayor, (pulg)

$$P = \frac{2SEt}{L+0.2t} \tag{3.19}$$

Donde:

- S = Tensión máxima admisible, (psi)
- E = Eficiencia de la junta de las soldaduras, E = 1
- P = Espesor mínimo requerido para el cuerpo, (psi)
- t = Espesor del cuerpo cilíndrico, (pulg)
- D = Diámetro longitudinal del eje mayor, (pulg)
- *L* = Radio de conformado (crown radius), (pulg)

Tapa toriesférica, lado cóncavo

Tapas torisfericas hechas de materiales que tienen una resistencia a la tracción mínima especificada superior 70.000 psi (500 MPa), deberán diseñarse utilizando un valor de S igual a 20.000 psi (150 MPa) a temperatura ambiente, ver figura 3.13 del esquema de la tapa.



Figura 3.15. Tapa Toriesférica (UG-32-d) Fuente: (ASME, 2019)

$$t_r = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P} \tag{3.20}$$

- *L* = Radio interior esférica o corona, (pulg)
- E = Eficiencia de la junta de las soldaduras
- t_r = Espesor mínimo requerido para el cuerpo
- S = Tensión máxima admisible, (psi)
- P = Presión interior de diseño (psig)

$$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$$
(3.21)

- S = Tensión máxima admisible, (psi)
- E = Eficiencia de la junta de las soldaduras E = 1
- t = Espesor del cuerpo cilíndrico, (pulg)
- L = Radio interior esférica o corona, (pulg)
- P = Presión interior de diseño (psig)

Transición cónica

Se utilizan generalmente en fondos donde pudiese haber acumulación de sólidos y como transiciones en cambios de diámetro de recipientes cilíndricos. Su uso es muy común en torres fraccionadoras o de destilación, no hay límites en cuanto a dimensiones y su única limitación consiste en que el ángulo de vértice no deberá de ser calculado como tapa plana, ver figura 3.16 del esquema de la etapa.



Figura 3.16. Transición Cónica (UG-32-d) Fuente: (ASME, 2019)

$$t_r = \frac{PD}{2\cos\alpha(SE - 0.6P)} \tag{3.22}$$

- S = Tensión máxima admisible, (psi)
- E = Eficiencia de la junta de las soldaduras, E = 1
- t_r = Espesor mínimo requerido para el cuerpo, (pulg)
- α = Mitad del ángulo del cono
- P = Presión interior de diseño (psig)
- D = Diámetro longitudinal del eje mayor, (pulg)

$$P = \frac{2SEt \cos\alpha}{D + 1.2t \cos\alpha} \tag{3.23}$$

Donde:

- S = Tensión máxima admisible, (psi)
- E = Eficiencia de la junta de las soldaduras E = 1
- t = Espesor del cuerpo cilíndrico, (pulg)
- D = Diámetro longitudinal del eje mayor, (pulg)
- *L* = Radio de conformado (crown radius), (pulg)
- α = Mitad del ángulo del cono

Diseño de cuerpos y cabezales bajo presión externa

Los recipientes cilíndricos diseñados bajo la Sección VIII - División 1 del Código ASME, pueden o no contener soportes (ej.: anillos de refuerzo). Todos los tramos entre soportes deben ser verificados la inestabilidad por compresión.





La figura 3.17 y la figura 3.18 muestran algunos tipos de líneas de soportes, por

ejemplo:

- a) Línea circunferencial a un tercio de la profundidad de un cabezal.
- b) Anillo de refuerzo.
- c) Recipiente encamisado.
- d) Uniones cono-cilindro y toricónico-cilindro. Estas uniones son líneas de soportes si el momento de inercia que ellas generan cumplen con lo indicado en el punto 1-8 del Código.

En general, el diámetro externo D₀ es un dato prefijado en las condiciones generales de diseño, por lo que el proyectista puede definir con mayor libertad el espesor t y la longitud entre soportes L, mediante el agregado de anillos de refuerzo.

Se debe encontrar un punto de equilibrio entre el costo de material (volumen de cilindro más refuerzos) y el costo de fabricación de las mencionadas partes constitutivas del recipiente



Figura 3.18. Tipos de soportes sometidos a presión externa. Fuente: (ASME, 2019)

3.5.2 Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad

El Manual de Diseño de Obras Civiles, incorpora los conocimientos tecnológicos y experiencia de un intenso trabajo de ingenieros y especialistas de la Comisión Federal

de Electricidad, y de investigadores mexicanos de universidades y centros de investigación, derivados del diseño, ejecución y operación de las obras que se realizan.

Durante mucho tiempo, el Manual ha sido objeto de revisiones totales y parciales, hasta llegar a ser un documento de referencia indispensable para muchas de las obras de ingeniería que se construyen en el país y en Latinoamérica. El total de capítulos del Manual constituyen una obra de dimensiones incalculables para la ingeniería mexicana, ya que refleja lo mejor de sus experiencias y conocimientos. Su amplio contenido de vanguardia lo han convertido además en un texto complementario en universidades y centros educativos de las áreas de ingeniería (López López, et al. 2020).

Diseño por sismo

La República Mexicana está ubicada en la confluencia de varias placas tectónicas, que originan continuamente sismos de magnitud importante que afectan a todas las construcciones que se ubican en la proximidad en los epicentros y a cientos kilómetros de distancia de ellos. Para que las estructuras resistan adecuadamente los efectos de los temblores, es indispensable realizar un diseño racional de ellas, considerando todas las fuentes que pueden dar origen a sismos fuertes, la distancia a la que se ubican, el tipo de estructura, su importancia y materiales empleados, y las condiciones locales del suelo en que cimientan.

El manual de diseño por sismo incorpora los criterios modernos para tomar en cuenta las características particulares de cada tipo de estructuración, su amortiguamiento y ductilidad (Mena Hernández & Pérez Rocha, 2015).

- a) Reducir la pérdida de vidas humanas y la afectación a la población por la ocurrencia de sismo fuertes.
- b) Establecer niveles de seguridad estructural para la República Mexicana.
- c) Fijar los requisitos mínimos para que las obras civiles sean capaces de resistir sismos medianos con poco o nulo, sismos fuertes sin daño estructural, y sismos severos con daños sin llegar al colapso.

Cargas por sismo

Para los recipientes a presión, el cálculo de cortante y momento, se debe realizar en diferentes elevaciones, para calcular el esfuerzo en cada elevación y disminuir el espesor requerido de placa para el uso esquemático ver figura 3.19.



Figura 3.19. Recipiente a presión por carga de sismo. Fuente: (Mena Hernández & Pérez Rocha, 2015)
Fórmulas para el cálculo del cortante (Fs) y Momento en la base (Ms):

$$Fs = C Wo \tag{3.24}$$

Donde:

C = Factor sismo de diseño Manual de Obras Civiles – Comisión Federal de Electricidad (MDOC-CFE)

Wo = Peso de operación, (kg)

$$Ms = \frac{2\ C\ Wo\ H}{3} \tag{3.25}$$

Donde:

H =Altura, (m)

Consideraciones generales para sismo

Existe una gran variedad y disparidad en las características que presentan las estructuras que se encuentran en un complejo industrial. Existen estructuras con características similares a los edificios, sin embargo, en su mayoría presentan configuraciones y geometrías totalmente distintas. Estas últimas, se caracterizan por carecer de conexiones estructurales entre sus miembros produciendo un nivel de amortiguamiento más rápido en comparación con el que se supone, se puede presentar en edificios.

Es necesario que en el diseño sísmico de estructuras tipo industrial se tenga una visión clara de los principios básicos que rigen su respuesta sísmica y de los criterios de diseño en que se basan los procedimientos establecidos en estas recomendaciones. En casos específicos, pueden ser favorable adoptar criterios más conservadores que pueden tener beneficios económicos globales a largo plazo. Debido a la complejidad de las estructuras y sus componentes, resulta difícil cubrir todas las posibles variaciones en su respuesta sísmica (Mena Hernández & Pérez Rocha, 2015).

Diseño por viento

Los desastres por fenómenos meteorológicos siguen siendo eventos que dejan daños y numerosas pérdidas en todo el mundo. Por su ubicación geográfica, México se encuentra entre dos cuencas oceánicas ciclógenas, por lo que su territorio es muy propenso a sufrir los embates de los huracanes en sus costas del Caribe, Golfo de México y del Pacifico; más aún, es aparente por los efectos de tornados. Por lo anterior, las tormentas que han sido consideradas para el viento son las que generan los vientos sinópticos, los ciclones tropicales y los tornados (López López, et al. 2020).

Por otro lado, el crecimiento de las poblaciones cercanas a regiones expuestas a vientos fuertes aumenta su vulnerabilidad y por lo tanto el riesgo de acrecentar la magnitud de los desastres ocasionados por vientos intensos.

Alan G. Davenport, uno de los investigadores más reconocidos en la ingeniería de viento, es el precursor del establecimiento de metodologías para evaluar los efectos del viento sobre las estructuras, dando origen a lo que se conoce como la "Cadena de Viento de Davenport", la cual enlaza cinco elementos fundamentales:

- a) Variaciones del clima y viento.
- b) Exposición.
- c) Geometría de las construcciones.
- d) Efectos de resonancia.
- e) Criterios de diseño.

Cargas por viento

En México, las cargas por viento se manejan para realizar el estudio y el cálculo cortante y momento, se debe realizar en diferentes elevaciones, para calcular el esfuerzo en cada elevación y disminuir el espesor requerido de placa para el uso esquemático ver figura 3.20.



Figura 3.20. Recipiente a presión por carga de viento. Fuente: (López López, et al. 2020)

Fórmulas para el cálculo del cortante (Fv) y Momento en la base (Ms):

$$Fv = Pv \ Def \ H \tag{3.26}$$

Donde:

 $Pv = 0.0025 V_v^2$ Vv =Velocidad del viento, (mph) Def =Diámetro ext. + aislamiento + accesorios

$$Ms = \frac{Pv \, Def \, H^2}{2} \tag{3.27}$$

Donde:

H = Altura, (m)

Cargas por sismo

Diseño por esfuerzos combinados

Por lo general no están sometidos a un solo tipo de esfuerzo sino más bien a la interacción de varios esfuerzos de manera simultánea. El esfuerzo combinado se refiere a la combinación de esfuerzo axial, de flexión, cortante por flexión y cortante por torsión, para mayor referencia, ver figura 3.21.



Figura 3.21. Cargas de pared de los recipientes. Fuente: (Mena Hernández & Pérez Rocha, 2015)

En la figura 3.22 se muestra los esfuerzos (combinados) en recipientes con faldón

para sismo.





Del lado donde actúa la carga de sismo (A)

$$SA = +\frac{M}{\pi R^2 t} + \frac{PR}{2t} - \frac{W}{\pi Dt}$$
(3.28)

Del otro lado donde actúa la carga de sismo (B)

$$SB = -\frac{M}{\pi R^2 t} + \frac{PR}{2t} - \frac{W}{\pi Dt}$$
(3.29)

En la figura 3.23, se muestra los esfuerzos (combinados) en recipientes con faldón para viento.



Figura 3.23. Cargas combinadas que ejecutan en el recipiente. Fuente: (López López, et al. 2020)

Del lado donde actúa la carga de viento (A)

$$SA = +\frac{M}{\pi R^2 t} + \frac{PR}{2t} - \frac{W}{\pi Dt}$$
(3.30)

Del otro lado donde actúa la carga de viento (B)

$$SB = -\frac{M}{\pi R^2 t} + \frac{PR}{2t} - \frac{W}{\pi Dt}$$
(3.31)

Capitulo IV Cálculos

En este capítulo, se aplicarán las metodologías para realizar los cálculos correspondientes a los parámetros hidrodinámicos y el diseño mecánico del Riser.

Si bien existen varias Normas para el diseño de recipientes a presión, elaboradas por países de reconocida capacidad técnica en la materia, el documento más utilizado en la industria del petróleo y gas es la Sección VIII Div. 1 "Pressure Vessels" del Código ASME (American Society of Mechanical Engineers). Este Código cubre el diseño, selección de materiales, fabricación, inspección, pruebas, criterios de aprobación y la documentación resultante de las distintas etapas a cumplir (Admin, 2006), por lo anterior, para realizar el cálculo del espesor de la placa comercial del Riser de la Unidad de Desintegración Catalítica de Lecho fluidizado, en este trabajo de Tesis se ocupará la metodología del Código ASME Sección VIII División 1.

4.1 Cálculo de parámetros hidrodinámicos

Cálculo de Velocidad Mínima de fluidización

De acuerdo con Rhodes (2008), el catalizador de craqueo catalítico se encuentra en el grupo A según la clasificación de Geldart para las partículas, ya que la diferencia de densidades entre la partícula y el fluido es de 1,344.878 $\frac{kg}{m^3}$ y considerando un diámetro de 0.071 mm. Dicho esto podemos determinar la velocidad de mínima fluidización de la manera siguiente:

Igualando a cero la ecuación (1.10) obtenemos lo siguiente:

$$150\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon_{mf}^3\Phi_{mf}^2}\frac{\mu_g U_{mf}}{d_p^2} + 1.75\frac{1}{\varepsilon_{mf}^3}\frac{\rho_g U_{mf}^2}{d_p \Phi_{mf}} - (P_P - P_g)g = 0$$
(4.1)

Considerando las correlaciones de Wen y Yu (1966) se puede sustituir la ecuación (1.17) y (1.18) en (4.2) obteniendo lo siguiente:

$$U_{mf}^{2} \frac{K_{1}\rho}{d_{p}} + U_{mf} \frac{K_{2}\mu_{g}}{d_{p}^{2}} - g(P_{P} - P_{g}) = 0$$
(4.2)

Al sustituir los valores y resolviendo la ecuación cuadrática obtenemos:

$$U_{mf}^{2} \frac{24.51 * 5.122 kg/m^{3}}{7.1x10^{-5} m} + U_{mf} \frac{1,651.96 * 1.67x10^{-5} kg/m * s}{(7.1x10^{-5} m)^{2}}$$
$$- 9.81 \frac{m}{s^{2}} (1,350 \ kg/m^{3} - 5.122 \ kg/m^{3}) = 0$$

Dando como resultado la velocidad mínima de fluidización de $U_{mf} = 0.0024 \frac{m}{s}$

Cálculo de Velocidad Terminal

La velocidad terminal es la velocidad máxima que alcanza el catalizador a través de un fluido. La velocidad terminal se puede calcular de acuerdo con lo siguiente:

$$\begin{split} d_p &= 7.1 x 10^{-5} \ m & \text{Diámetro de la partícula} \\ \rho_g &= 5.122 \ \frac{kg}{m^3} & \text{Densidad del fluido (vapor - sobrecalentado)} \\ \rho_p &= 1,350 \ \frac{kg}{m^3} & \text{Densidad del catalizador (Zeolita)} \\ D &= 2 \ m & \text{Diámetro del Reactor (Riser)} \\ L &= 20.07 \ m & \text{Longitud del Reactor (Riser)} \\ Q &= 31.52 \ \frac{m^3}{s} & \text{Flujo de vapor - sobrecalentado} \\ P &= 1.5 \ \frac{kg}{cm^2} & \text{Presión de operación} \\ t &= 2 \ seg. & \text{Tiempo de Residencia} \\ T &= 512 \ ^{\circ}C & \text{Temperatura} \\ \mu_g &= 1.67 x 10^{-5} \ \frac{kg}{m*s} & \text{Viscosidad del fluido (vapor - sobrecalentado)} \end{split}$$

Para determinar el gasto de vapor en el Riser se ocupa la ecuación siguiente:

$$Q = \frac{\pi * (r)^2 * (L)}{t} = \frac{\pi (1 m)^2 (20.07 m)}{2 \text{ seg}} = 31.52 \frac{m^3}{s}$$
(4.3)

Teniendo este dato, podemos determinar la velocidad media de fluidización mediante la ecuación de continuidad:

$$Vel = \frac{Q}{A} = \frac{31.52 \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi}{4} * (2m)^2} = 10.03 \frac{m}{s}$$
(4.4)

Lo siguiente es aplicar la ecuación (1.13) para determinar el número de Reynolds

$$Re = \frac{Vel * d_p * \rho_g}{\mu_g}$$

Sustituyendo obtenemos:

$$Re = \frac{(10.03 \ \frac{m}{s})(7.1x10^{-5} \ m)(5.122 \ \frac{kg}{m^3})}{1.67x10^{-5} \ \frac{kg}{m \ s}} = 218.41$$
(4.5)

Por último, para determinar la velocidad terminal, se calcula el coeficiente de descarga que está en función del número de Reynolds y la esfericidad. Esta última se consideró el valor de la unidad de acuerdo con diversos autores (por ejemplo: Martín *et al* (2011), Heider y Levenspiel (1989)) ya que la partícula es tan pequeña que es permitido hacer esta consideración. Entonces retomando la ecuación (1.20)

$$C_{d} = \frac{24}{Re_{p}} \left[1 + 8.171e^{(-4,0566\Phi_{s})} Re_{p}^{0,0964+0.5565\Phi_{s}} \right] + \frac{73,69 e^{(-5,0748\Phi_{s})} Re_{p}}{Re_{p} + 5,378 e^{(6,2122\Phi_{s})}}$$

y considerando $\Phi_s = 1$ se obtiene lo siguiente:

$$C_{d} = \frac{24}{218.41} \left[1 + 8.171e^{(-4.0566*1)} * 218.41^{0.0964 + 0.5565*1} \right] + \frac{73.69 e^{(-5.0748*1)} * 218.41}{218.41 + 5.378 e^{(6.2122*1)}}$$
(4.6)
$$C_{d} = 0.664$$

Retomando la ecuación (1.19):

$$U_t = \sqrt{\frac{4d_p(\rho_p - \rho_g)g}{3\rho C_D}}$$

sustituyendo se obtiene lo siguiente:

$$U_t = \sqrt{\frac{4 * 7.1 \times 10^{-5} \text{m} * \left(1,350 \frac{kg}{m^3} - 5.122 \frac{kg}{m^3}\right) * 9.81 \frac{m}{s^2}}{3 * 5.122 \frac{kg}{m^3} * 0.664}} = 0.60 \frac{m}{s}}$$
(4.7)

Por lo tanto, se puede decir que la velocidad terminal es aproximadamente 250 veces mayor que la velocidad mínima de fluidización.

La velocidad de mínima fluidización ocurre cuando se rompe el estado estacionario y comienza la transición al estado fluidizado, esta velocidad está en función de las propiedades del fluido, así como de la partícula. Aunado a esto la velocidad terminal es la velocidad a la cual la partícula es desalojada del reactor. Teniendo en cuenta estos dos términos, la velocidad terminal aproximadamente es 250 veces mayor que la mínima de fluidización, debido a que su aceleración aumenta durante su trayecto en el Riser.

4.2 Cálculo del Diseño Mecánico del Riser

Para realizar el diseño mecánico del Riser, se utilizarán algunos datos que el Licenciador determina con base a su tecnología, es decir, que son de la responsabilidad del Licenciador calcularlos y especificarlos en las Hojas de Datos, el diseñador con base a dicha Hoja de Datos debe realizar el diseño mecánico, un ejemplo de ello es la temperatura de diseño de la parte inferior del Riser, la cual es de 343 °C, con base a lo

anterior, el Licenciador ha seleccionado el material y realizado el cálculo del espesor del refractario que logra abatir la temperatura hasta 150 °C.

En este sentido, la temperatura de diseño que se utilizará para realizar el diseño mecánico de la parte inferior es de 150 °C, así mismo, hay requerimientos en las Bases de Diseño que se deben tomar en cuenta, una de ellas y que es muy importante es: "el diseño del Riser se debe realizar utilizando dos tipos de material, SA-516-70 para la sección inferior y SA-387-12 para la sección superior", con la finalidad de obtener un diseño lo más económico posible del Riser y que cumpla con los requerimientos técnicos de diseño (hojas de datos, especificaciones técnicas, bases de diseño y Normatividad técnica).

Finalmente, en la sección superior del Riser además de contar con un material especial ya que soporta altas temperaturas (temperatura de diseño 552 °C), debe tener un recubrimiento (CLAD) de acero inoxidable, con la finalidad de proteger al material de contra la corrosión y abrasión que puedan estar presentes en la operación, todas estas consideraciones son requerimientos que determina el Licenciador en su ingeniería básica, la cual entrega para desarrollar las ingenierías Básica Extendida y Detalle.

Dado que a lo largo del Riser está sujeto a diferentes temperaturas y presiones, y considerando el requerimiento (bases de diseño) de utilizar dos materiales, se consideró realizar el cálculo del diseño en dos secciones (inferior y superior), por lo tanto, para cada sección se indicarán sus datos técnicos que serán utilizados para realizar el cálculo del espesor del cuerpo del Riser de acuerdo con la metodología del Código ASME, Sección VIII Div.1.

4.2.1 Datos de diseño para el Riser (sección inferior)

Para que el diseño y fabricación del recipiente a presión (Riser) se lleve a cabo, el dueño debe informar los requisitos mínimos, así como capacidad volumétrica, temperaturas y presiones a las cuales será sometido el recipiente y cualquier otra característica que deba ser considerada para el buen funcionamiento de éste, a continuación, en la tabla 4.1 se listan los datos de diseño para la sección inferior.

Diámetro interior de la sección cilíndrica		$D_i =$	2,000 mm	78.74 pulg
Radio interior (corroído) de la sección cilíndrica		$R_i =$	1,000 mm	39.37 pulg
Radio interior de la sección cilíndrica		$R_{iC} =$	1,003 mm	39.49 pulg
Longitud (de la línea de tangencia superior a la brida ciega de la parte inferior)		L =	20,070 mm	790.16 pulg
Longitud de la sección inferior		$L_{inf} =$	10,035 mm	395.0787 pulg
Presión de diseño (interior)		$P_i =$	4.94 $\frac{kg}{cm^2}$	70.26 psig
Presión de diseño (por presión externa) ¹		$P_e =$	$1.05 \frac{kg}{cm^2}$	15.00 psi
Temperatura de diseño		$T_d =$	100 °C	212 ºF
Corrosión permisible		t =	3 mm	0.1181 pulg
Material de construcción del recipiente			SA-516-70	
Esfuerzo de cedencia (a temperatura de diseño)			$S_d =$	20,000 psi
Esfuerzo permisible a temperatura de prueba (212 °F)			$S_a =$	20,000 psi
Módulo de elasticidad (a temperatura de diseño)			$E_e = 28,800,000 \text{ psi}$	
Eficiencia de juntas (soldaduras) sección cilíndrica			E =	1
Fluido manejado: vapor	Densidad relativa		$\rho_{fluido} =$	0.46
Espesor mínimo (ASME VIII-1 pár. UG-16)		$t_{min} =$	1.6 mm	0.0625 pulg
Rango (working pressure, class) de la brida ciega hacia el fondo (ASME B16.5)			$w_{ ho} =$	150

Tabla 4.1. Datos de diseño de la sección inferior del Riser

Nota:

4.2.1.1 Cálculo del espesor por presión interna

Como primer paso se requiere el cálculo del diámetro interior corroído, esto quiere decir que, la parte interior del recipiente, al tener la probabilidad de estar en contacto con el fluido, está expuesto a sufrir la perdida de espesor por efecto de la corrosión y en el caso del movimiento de solidos en suspensión (catalizador), por erosión o abrasión mecánica.

Para realizar el cálculo del diámetro interior corroído se ocupa la ecuación siguiente:

Diámetro corroído:

$$D_c = D_i + 2t \tag{4.8}$$

Donde:

 D_c = Diámetro corroído, (pulg)

 $D_i = \text{Diámetro interno, (pulg)}$

t = Tolerancia a la corrosión, (pulg)

Sustituyendo en la ecuación (4.8) queda de la manera siguiente:

^{1.-} El valor 15 psi como presión externa (en este caso, la atmosférica) es de acuerdo con el Código ASME Sección VIII, División. 1 en el apartado UG-28 (f).

$$D_c = D_i + 2t = 78.74 pulg + 2(0.1181 pulg) = 78.9762 pulg$$

Radio interior corroído de la sección cilíndrica:

$$R_c = \frac{D_c}{2} \tag{4.9}$$

Donde:

 R_c = Radio interior corroído, (pulg)

 D_c = Diámetro corroído, (pulg)

Sustituyendo en la ecuación (4.9), tenemos:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = \frac{78.9762 \, pulg}{2} = 39.4881 \, pulg$$

4.2.1.2 Cálculo del espesor sección cilíndrica (ASME, Sección VIII, División 1, Párrafo UG-27. c.1)

Cuando otras fuerzas no son factores importantes, el recipiente se debe diseñar solo para resistir la deformación circunferencial. Cuando actúan otras cargas, la combinación de estas puede ser la que rija, y se podrá requerir una placa de mayor espesor que el necesario (Megyesy, 1992). Con base al Código ASME se determina mediante la formula siguiente:

$$t_{SC} = \frac{P R_C}{S_a E - 0.6 P} + C \tag{4.10}$$

Donde:

- t_{SC} = Espesor de sección cilíndrica, (pulg)
- P = Presión interna de diseño, (psig)
- R_c = Radio interior corroído, (pulg)
- S_a = Esfuerzo permisible del material, (psi) ver en Anexo 3
- Eficiencia de la soldadura E=1

(Radiografiado total), *E*=1

- P = Presión interna de diseño, (psig)
- C = Tolerancia a la corrosión, (pulg)

Sustituyendo en la ecuación (4.10) obtenemos:

$$t_{SC} = \frac{(70.26 \, psig) \, (39.4881 \, pulg)}{(20,000 \, psi)(1) - 0.6 \, (70.26 \, psig)} + 0.1181 \, pulg$$

$$t_{SC} = 0.2571 \, pulg$$

El espesor $t_{sc} = 0.2571$ pulg es el mínimo necesario, sin embargo, se debe seleccionar el espesor comercial de la placa y éste debe ser el inmediato superior al espesor calculado, por lo tanto, el espesor comercial es 5/16 pulg (0.3125 pulg); éste espesor se debe revisar por presión externa sobre todo a la condición de vacío total, donde la presión atmosférica de 15 psi (presión externa) será la que actúe sobre la pared cilíndrica de la sección inferior del Riser y esto determinará si requiere anillos de refuerzo, es importante señalar que entre mayor cantidad de anillos será indicador para que el diseñador tome la decisión de incrementar el espesor de la placa que conformara

el cuerpo de la sección inferior del Riser, por lo anterior, el espesor $t_{com} = 5/16$ pulg (0.3125 pulg) se debe tomar como un espesor preliminar.

4.2.1.3 Revisión de espesores por Presión externa (FV)

Sección inferior del Riser (UG-28.c del ASME Sección VIII, División 1)

Para la revisión del espesor por presión externa se debe proceder de la manera siguiente:

a) Se calcula el espesor *t*_c corroído.

Espesor corroído del cuerpo del Riser:

$$t_c = t_{com} - t \tag{4.11}$$

Donde:

 t_c = Espesor corroído del cuerpo, (pulg)

 t_{com} = Espesor comercial del cuerpo, (pulg)

t= Tolerancia a la corrosión del cuerpo, (pulg)

Sustituyendo la ecuación (4.11) obtenemos:

$$t_c = 0.3125 \ pulg - 0.1181 \ pulg = 0.1944 \ pulg$$

De acuerdo con el espesor obtenido en estado corroído se calcula el diámetro exterior:

$$D_o = D_c + 2t_c \tag{4.12}$$

Donde:

 D_o = Diámetro exterior, (pulg)

 D_c = Diámetro corroído, (pulg)

 t_c = Espesor corroído, (pulg)

Sustituyendo la ecuación (4.12) obtenemos:

 $D_o = 78.9762 \, pulg + 2(0.1944 \, pulg) = 79.3650 \, pulg$

Con el diámetro exterior obtenido "Do", se procede a calcular las relaciones siguientes:

a) Determinar
$$\frac{L_{inf}}{D_o} y \frac{D_o}{t_c}$$

Donde:Donde: L_{inf} = Longitud de la sección inferior, (pulg) D_o = Diámetro exterior, (pulg) D_o = Diámetro exterior, (pulg) t_c = Espesor corroído, (pulg) $\frac{L_{inf}}{D_o} = \frac{395.0787 \ pulg}{79.3650 \ pulg} = 4.9779$ $\frac{D_o}{t_c} = \frac{79.3650 \ pulg}{0.1944 \ pulg} = 408.2561$

b) Se determina el factor *A*, utilizando la relación $\frac{D_o}{t_c}$ = 408.2561 para identificar la sección de los valores tabulados en la Tabla G de la Subparte 3 del Código ASME Sección II, Parte D, (Anexo 5), y utilizando el valor de la relación $\frac{L_{inf}}{D_o}$ = 4.9779 que debe coincidir entre los valores de la columna *L/D*_o, en caso de no encontrar dicho valor, se debe realizar una interpolación utilizando los valores próximos, donde el valor de 4.9779 debe estar entre el rango como se muestra en la tabla siguiente*:*



Extracto del anexo 5. "Determinación del factor A"

Para la obtención del valor interpolado se realizará con la ecuación siguiente:

$$A = A_1 + \frac{A_2 - A_1}{\frac{L_2}{D_{o2}} - \frac{L_1}{D_{o1}}} \left(\frac{L_{inf}}{D_o} - \frac{L_1}{D_{o1}} \right)$$
(4.13)

Donde:

- A = Factor A, (adimensional)
- A_1 = Factor A del anexo 5, (adimensional)
- A_2 = Factor A del anexo 5, (adimensional)
- $\frac{L_{inf}}{D_o}$ = Valor calculado, (adimensional)
- $\frac{L_1}{D_{o1}}$ = Valor del anexo 5, (adimensional)
- $\frac{L_2}{D_{02}}$ = Valor del anexo 5, (adimensional)

Sustituyendo los valores en la ecuación (4.13), obtenemos:

$$A = 0.000393 + \frac{0.0000257 - 0.0000393}{(6-4)}(4.9779 - 4) = 0.0000326$$

De acuerdo con el valor interpolado de 4.9779, le corresponde el valor al factor A de:

A = 0.0000326

Obteniendo el valor de A se podrá utilizar en la ecuación del inciso (c) cálculo de presión externa máxima permisible P_a para determinar si el material soportará la presión externa (presión atmosférica 15 psi) a condición de vacío total.

c) Cálculo de la presión externa máxima permisible P_a

$$P_a = \frac{2AE}{3\left(\frac{D_o}{t_c}\right)} \tag{4.14}$$

Donde:

- P_a = Presión externa máxima permisible, (psi)
- *A* = Factor A, (adimensional)
- E = Módulo de elasticidad, (psi)
- D_o = Diámetro exterior, (pulg)
- t_c = Espesor corroído, (pulg)

Sustituyendo los valores en la ecuación (4.14), se tiene lo siguiente:

$$P_a = \frac{2AE}{3\left(\frac{D_0}{t_c}\right)} = \frac{2\ (0.0000326)(28,800,000\ psi)}{3\left(\frac{79.3650\ pulg}{0.1944\ pulg}\right)} = 1.53\ psi$$

Si el valor obtenido de P_a es menor que la presión externa (presión atmosférica de 15 psi) a la cual está sometido el recipiente, esto quiere decir que por la longitud de 395.0787 pulg y a la condición de vacío total el recipiente colapsaría (coloquialmente se chuparía), por lo anterior, se debe repetir el procedimiento agregando anillos de refuerzo para disminuir el valor de L_{inf} en la relación L_{inf}/D_o , asimismo, el factor A tiende a ser mayor, para la obtención del valor interpolado de B para poder aplicar la ecuación (4.18) y así incrementar P_a la presión externa máxima permisible. En este caso $P_a = 1.53 psi <$ $P_e = 15.00 psi$, por lo tanto, no pasa la revisión por presión externa y se debe realizar de nuevo el cálculo anterior considerando anillos de refuerzo.

4.2.1.4 Revisión del espesor por presión externa con anillos de refuerzo (FV=15 psi), (UG-28.c ASME Sección VIII, División 1)

Para la revisión del espesor por presión externa con anillos de refuerzo, a diferencia del procedimiento anterior, se debe calcular la distancia entre anillos tomando en cuenta la cantidad de éstos que el diseñador haya decidido considerar para el diseño, cabe resaltar que la experiencia del diseñador al determinar la cantidad de anillos ayuda a obtener el resultado esperado en los primeros intentos de cálculo.

En forma general, la cantidad de anillos de refuerzo es de forma arbitraria en el primer intento de cálculo, es importante resaltar que dependiendo del resultado, se debe interpretar dicha cantidad que se requieren para que el espesor de la placa del cuerpo inferior del Riser, soporte la presión externa de 15 psi (presión atmosférica) a condición de vacío total, tomando en consideración la longitud de 395.0787 pulg que corresponde a la sección inferior, por tanto, un exceso de anillos de refuerzo quiere decir que el

espesor comercial de la placa puede estar quedando limitada y la revisión no pase, y con base a las buenas prácticas de ingeniería, se debe decidir incrementar el espesor comercial de la placa para que pase la revisión por presión externa.

Por otra parte, se debe realizar la determinación del valor B que está en función del factor A y con ello se procede al cálculo de la presión máxima permisible Pa, con base a lo anterior tenemos lo siguiente:

a) Definir L_s considerando la cantidad de 9 anillos de refuerzo:

$$L_s = \frac{L_{inf}}{N_o A + 1} \tag{4.15}$$

Donde:

 L_s = Longitud entre anillos, (pulg)

 L_{inf} = Longitud de la sección inferior, (pulg)

 $N_o A$ = Cantidad de anillos, (adimensional)

Sustituyendo en la ecuación (4.15), se obtiene el valor de:

$$L_s = \frac{395.0787 \, pulg}{9+1} = 39.5079 \, pulg.$$

Con la longitud entre anillos de refuerzo L_s = 39.5079 pulg, y retomando los valores previamente calculados del Diámetro exterior D_o = 79.3650 pulg y el espesor corroído t_c = 0.1944 pulg en el numeral 4.2.1.3 se procede a obtener las relaciones $\frac{L_s}{D_o}$ y

 $\frac{D_o}{t_c}$

b) Determinar relaciones
$$\frac{L_s}{D_o}$$
 y $\frac{D_o}{t_c}$

Donde:

Donde:

 L_s = Longitud entre anillos, (pulg) D_o = Diámetro exterior, (pulg) D_o = Diámetro exterior, (pulg) t_c = Espesor corroído, (pulg) L_c = 39,5079 mula D_c 79,3650 mula

$$\frac{L_s}{D_o} = \frac{39.5079 \ pulg}{79.3650 \ pulg} = 0.4978$$

$$\frac{D_o}{t_c} = \frac{79.3650 \ pulg}{0.1944 \ pulg} = 408.2561$$

c) Se determina el factor *A*, utilizando la relación $\frac{D_o}{t_c}$ = 408.2561 para identificar la sección de los valores tabulados en la Tabla G de la Subparte 3 del Código ASME Sección II, Parte D, Anexo 5, y utilizando el valor de la relación $\frac{L_{inf}}{D_o}$ = 0.4978 que debe coincidir entre los valores de la columna *L/D*_o, en caso de no encontrar dicho valor, se debe realizar una interpolación utilizando los valores próximos, donde el valor de 0.4978 debe estar entre el rango como se muestra en la tabla siguiente:



Extracto del anexo 5. "Determinación del factor A"

Para la obtención del valor interpolado se realizará con la ecuación siguiente:

$$A = A_1 + \frac{A_2 - A_1}{\frac{L_2}{D_{o2}} - \frac{L_1}{D_{o1}}} \left(\frac{L_s}{D_o} - \frac{L_1}{D_{o1}} \right)$$
(4.16)

Donde:

- A = Factor A, (adimensional)
- $A_{1} = \text{Factor A del anexo 5, (adimensional)}$ $A_{2} = \text{Factor A del anexo 5, (adimensional)}$ $\frac{L_{s}}{D_{o}} = \text{Valor calculado, (adimensional)}$
- $\frac{L_1}{D_{o1}}$ = Valor del anexo 5, (adimensional)
- $\frac{L_2}{D_{o2}}$ = Valor del anexo 5, (adimensional)

Sustituyendo los valores en la ecuación (4.16), obtenemos:

$$A = 0.000429 + \frac{0.000280 - 0.000429}{0.6 - 0.4} (0.4978 - 0.4) = 0.000356$$

De acuerdo con el valor interpolado de 0.4978, le corresponde el valor al factor A de:

A = 0.000356

Obteniendo el valor del factor A, se debe determinar el valor de B.

d) Para determinar el valor *B*, que depende de la temperatura de diseño de la sección inferior del Riser de 343 °C, es importante mencionar que el Licenciador ha calculado el espesor y seleccionado el material del refractario que logra abatir la

temperatura de diseño a 150 °C (302 °F), por lo tanto, utilizando ésta temperatura para identificar la sección de los valores tabulados en la tabla CS-2 correspondiente al material SA-516-70 del código ASME (Anexo 6), y utilizando el valor de A= 0.000356 que debe coincidir entre los valores de la columna A, en caso de no encontrar dicho valor, se debe realizar una interpolación utilizando los valores próximos, donde el valor de 0.000356 debe estar entre el rango como se muestra en la tabla siguiente:



Extracto del anexo 6. "Determinación del valor B"

Para la obtención del valor interpolado se realizará con la siguiente ecuación:

$$B = B_1 + \frac{B_2 - B_1}{A_2 - A_1} (A - A_1)$$
(4.17)

Donde:

- B = Valor de B a calcular, (psi)
- B_1 = Valor de B inferior, anexo 6, (psi)
- B_2 = Valor de B superior, anexo 6, (psi)
- A = Valor calculado, (adimensional)

- A_1 = Valor de A inferior, anexo 6, (adimensional)
- A_2 = Valor de A superior, anexo 6, (adimensional)

Sustituyendo los valores en la ecuación (4.17), obtenemos:

$$B = 250 \, psi + \frac{11,300 \, psi - 250 \, psi}{(0.000783 - 0.0000176)} (0.000356 - 0.0000176) = 5,136 \, psi$$

De acuerdo con el valor interpolado de A= 0.000356, el valor de B es:

$$B = 5,136 \, psi$$

Obteniendo el valor de B se podrá utilizar en la ecuación del inciso (e) cálculo de presión externa máxima permisible P_a para determinar si el material soportará la presión externa (presión atmosférica 15 psi) a condición de vacío total.

e) Cálculo de la presión externa máxima permisible P_a considerando 9 anillos de refuerzo

$$P_a = \frac{4B}{3\left(\frac{D_o}{t_C}\right)} \tag{4.18}$$

Donde:

- P_a = Presión externa máxima permisible, (psi)
- B = Valor B, (psi)
- D_o = Diámetro exterior, (pulg)
- t_c = Espesor corroído, (pulg)

Sustituyendo los valores en la ecuación (4.18), se tiene lo siguiente:

$$P_a = \frac{4 \ (5,136 \ psi)}{3 \ \left(\frac{79.3650 \ pulg}{0.1944 \ pulg}\right)} = 16.77 \ psi$$

Como ya se ha explicado en el numeral anterior, la presión externa máxima permisible P_a debe ser mayor a la presión externa (atmosférica de 15 psi), en este caso $P_a = 16.77 \ psi > P_e = 15.00 \ psi$, por lo tanto, con 9 anillos de refuerzo el espesor comercial de la placa de 5/16 pulg del cuerpo de la sección inferior del Riser aprueba la revisión por presión externa a condición de vacío total, de esta manera el espesor comercial es el adecuado técnicamente para la fabricación de la sección inferior del Riser.

Si bien el espesor comercial resultante de 5/16 pulg para el cuerpo de la sección inferior del Riser es técnicamente adecuado, las buenas prácticas de ingeniería, indican que con base a la cantidad de anillos de refuerzo, se debe analizar para decidir y replantear un cambio en el espesor de la placa, por lo anterior, se observa que con 9 anillos de refuerzo la presión externa máxima permisible esta aproximadamente 12% arriba de la presión externa, indicativo que nos permite decidir incrementar el espesor comercial de la placa, cabe resaltar que la experiencia en el diseño de recipientes a presión es obtener un espesor suficiente que solo requiera de 1 a 3 o quizá máximo 4 anillos de refuerzo.

Con base a lo anterior, se selecciona el espesor comercial de 1/2 pulg (0.500 pulg) para la placa que se utilizará para fabricar el cuerpo de la sección inferior del Riser, y se considerara 1 anillo de refuerzo, con estos datos se realizó nuevamente la revisión por presión externa de acuerdo con los numerales 4.2.1.3 y 4.2.1.4, obteniendo lo siguiente:

Longitud entre anillos L_s= 197.5393 pulg, en este caso el anillo de refuerzo está localizado en la parte central de la longitud total de la sección inferior del Riser, el espesor corroído t_c = 0.3819 pulg, el diámetro exterior D_o = 79.7402 pulg, con los datos anteriores se obtuvieron las relaciones $\frac{L_s}{D_o} = 2.4772$ y $\frac{D_o}{t_c} = 208.7986$ para obtener el factor de A = 0.000175, por lo tanto, el valor de B = 2,594 psi.

Con los datos anteriores, se sustituyó en la ecuación del inciso (e) del numeral 4.2.1.4 para obtener la presión externa máxima permisible, obteniendo $P_a = 16.56$ psi, como ya se explicó en los numerales anteriores, la presión externa máxima permisible P_a debe ser mayor a la presión externa (atmosférica de 15 psi), en este caso, $P_a = 16.56 \ psi > P_e = 15.00 \ psi$, por lo tanto, con 1 anillo de refuerzo el espesor comercial de 1/2 pulg de la placa del cuerpo de la sección inferior del Riser aprueba la revisión por presión externa a condición de vacío total, concluyendo y como parte del objetivo de ésta Tesis, *el espesor comercial de la placa para la fabricación de la sección inferior del Riser es de 1/2 pulgada.*

4.2.1.5 Diseño del anillo de refuerzo

Con base a las mejores prácticas de ingeniería, se utilizará la misma placa de espesor comercial de 1/2 pulg que se calculó para el cuerpo cilíndrico de la sección inferior del Riser, así mismo, se usará la relación de $h = 5t_{com}$ (las buenas prácticas de ingeniería indican que la altura "*h*" no debe ser mayor a $6t_{com}$ y no ser $1t_{com}$) para determinar la altura del anillo de refuerzo, por lo anterior, tenemos que el espesor del anillo de refuerzo es 1/2 pulg y aplicando dicha relación tenemos una altura de 2.5 pulg, la sección transversal del anillo de refuerzo se muestra en la figura siguiente:



4.2.1.6 Cálculo de momento de inercia

Para el diseño del anillo de refuerzo, se necesita obtener el momento de inercia mediante la ecuación siguiente:

$$l_s = \left[D_o^2 L_s \left(t_c + \frac{A_s}{L_s} \right) A \right] / 14$$
(4.19)

Donde:

- l_s = Momento de inercia, (pulg⁴)
- $A_s = \text{ Årea de sección transversal, (pulg²)}$
- A = Factor A
- L_s = Longitud de la sección donde se ubicará el anillo de refuerzo, (pulg)
- t_c = Espesor corroído, (pulg)

Sustituyendo la ecuación (4.19) obtenemos:

$$l_s = \frac{(79.7402 \, pulg)^2 (193.54 \, pulg) \left(0.3819 \, pulg + \frac{1.25 \, pulg^2}{193.54 \, pulg}\right) 0.000180}{14}$$

$$l_s = 6.14 \, pulg^4$$

Al realizar el cálculo de momento de inercia, se obtuvo un valor de $6.14 pulg^4$, por lo tanto, este valor debe ser mayor al momento de inercia teórico requerido para determinar que el diseño del anillo de refuerzo es el adecuado.

4.2.1.7 Cálculo de momento de inercia teórico requerido

Para obtener el momento de inercia teórico requerido se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$l_R = \frac{b \ x \ h^3}{12} \tag{4.20}$$

Donde:

- l_R = Momento de inercia teórico requerido, (pulg⁴)
- b = Espesor del anillo de refuerzo, (pulg)
- h = Altura del anillo, (pulg)

Sustituyendo la ecuación (4.20) obtenemos:

$$l_R = \frac{b x h^3}{12} = \frac{(0.5 \, pulg)(2.5 \, pulg)^3}{12} = 0.65 \, pulg^4$$

De acuerdo con las buenas prácticas de ingeniería, el diseño del anillo de refuerzo cumple y se considera adecuado dado que el momento de inercia ($l_s = 6.14 \ pulg^4 > l_R = 0.65 \ pulg^4$) es mayor al momento de inercia teórico requerido.

4.2.2 Datos de diseño para el Riser (sección superior)

Diámetro interior de la sección cilíndrica		$D_i =$	2,000 mm	78.74 pulg	
Radio interior de la sección cilíndrica		$R_i =$	1,000 mm	39.37 pulg	
Radio interior de la sección cilíndrica		$R_{iC} =$	1,003 mm	39.49 pulg	
Longitud (de la línea de tangencia superior a la brida ciega de la parte inferior)		L =	20,070 mm	790.16 pulg	
Longitud de la sección superior		$L_{sup} =$	10,035 mm	395.0787 pulg	
Presión de diseño (interior)		$P_i =$	$4.94 \frac{kg}{cm^2}$	70.26 psig	
Presión de diseño (por presión externa) ¹		$P_e =$	$3.52 \frac{kg}{cm^2}$	50.07 psi	
Temperatura de diseño		$T_d =$	552 °C	1,025.6 °F	
Material de construcción del recipiente				SA-387-12	
Esfuerzo de cedencia (a temperatura de diseño)			$S_d =$	4,500 psi	
Esfuerzo permisible a temperatura de prueba (1,025.6 °F)			$S_a =$	4,500 psi	
Módulo de elasticidad (a temperatura de diseño)			$E_e = 23,0$	$E_e = 23,000,000 \text{ psi}$	
Eficiencia de juntas (soldaduras) sección cilíndrica			E =	1	
Fluido manejado: vapor Densidad relativa			$\rho_{fluido} =$	0.46	
Recubrimiento interior: M	SA-240-304				
Espesor del recubrimiento interior		$t_{min} =$	1.6 mm	0.0625 pulg	

Tabla 4.2. Datos de diseño de la sección superior del Riser

Nota:

1.- La presión externa de 50.07 psi, a la cual está sometida la sección superior del cuerpo del Riser, corresponde a la presión del separador de la unidad FCC.

4.2.2.1 Calculo del espesor por presión interna

Como primer paso se requiere el cálculo del diámetro interior corroído, ya que la parte interior del recipiente, al estar en contacto con el fluido, está expuesto a sufrir la perdida de espesor por efecto de la corrosión, con base a la ingeniería básica del

Para realizar el cálculo del diámetro interior corroído se ocupa la ecuación siguiente:

Diámetro corroído:

$$D_c = D_i + 2t \tag{4.21}$$

Donde:

 D_c = Diámetro corroído, (pulg)

 D_i = Diámetro interno, (pulg)

t = Tolerancia a la corrosión, (pulg)

Sustituyendo en la ecuación (4.21) queda de la manera siguiente:

 $D_c = D_i + 2t = 78.74 pulg + 2(0 pulg) = 78.74 pulg$

Radio interior corroído de la sección cilíndrica:

$$R_c = \frac{D_c}{2} \tag{4.22}$$

Donde:

- R_c = Radio interior corroído, (pulg)
- D_c = Diámetro corroído, (pulg)

Sustituyendo en la ecuación (4.22), tenemos:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = \frac{78.74 \, pulg}{2} = 39.37 \, pulg$$

4.2.2.2 Cálculo del espesor de la sección cilíndrica (ASME, Sección VIII, División 1, Párrafo UG-27. c.1)

Cuando otras fuerzas no son factores importantes el recipiente se debe diseñar solo para resistir la deformación circunferencial. Cuando actúan otras cargas, la combinación de estas puede ser la que rija, y se podrá requerir una placa de mayor espesor que el necesario (Megyesy, 1992). Con base al Código ASME se determina mediante la formula siguiente:

$$t_{SC} = \frac{P R c}{S_a E - 0.6 P} + C \tag{4.23}$$

Donde:

 t_{SC} = Espesor de sección cilíndrica, (pulg)

P = Presión interna de diseño, (psig)

Rc = Radio interior corroído, (pulg)

$$S_a$$
 = Esfuerzo permisible del material, (psi) ver en Anexo 3

Eficiencia de la soldadura
$$E=1$$

(Radiografiado total), *E*=1

- P = Presión interna de diseño, (psig)
- C = Tolerancia a la corrosión, en este caso en particular = 0 pulg

Sustituyendo en la ecuación (4.23) obtenemos:

$$t_{SC} = \frac{(70.26 \, psig) \, (39.37 \, pulg)}{(4,500 \, psi)(1) - 0.6 \, (70.26 \, psig)} + 0 = 0.6205 \, pulg$$

El espesor $t_{sc} = 0.6205$ pulg es el mínimo necesario, sin embargo, se debe seleccionar el espesor comercial de la placa y éste debe ser el inmediato superior al espesor calculado, por lo tanto, el espesor comercial es 5/8 de pulg (0.625 pulg); éste espesor se debe revisar por presión externa, sobre todo a la condición de vacío total, a diferencia de la sección inferior del Riser (presión externa igual a la atmosférica), la sección superior está sometida a 50.07 psi que corresponde a la presión del separador de la unidad FCC, en otras palabras, es la presión a la cual está sometida externamente la pared cilíndrica de la sección superior del Riser que se encuentra dentro del separador (recipiente a presión) y determinará si requiere anillos de refuerzo o no.

Es importante señalar que entre mayor cantidad de anillos será indicador para que el diseñador tome la decisión de incrementar el espesor de la placa que conformara el cuerpo de la sección superior Riser, por lo anterior, el espesor $t_{com} = 5/8$ de pulg (0.625 pulg) se debe tomar como un espesor preliminar.

4.2.2.3 Cálculo del espesor de la tapa superior semielíptica 2:1 (ASME, Sección VIII, División 1. Párrafo UG-32.c)

De acuerdo con las características del Riser, la tapa seleccionada es semielíptica y se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$t_{S} = \frac{P D_{i}}{2 S_{a} E - 0.2 P} + C \tag{4.24}$$

Donde:

- t_s = Espesor de tapa superior, (pulg)
- P = Presión interna de diseño, (psig)
- D_i = Diámetro interior, (pulg)
- S_a = Esfuerzo permisible del material, (psi) ver en Anexo 4
- Eficiencia de la soldadura E = 1
 - (Radiografiado total) E = 1
- P = Presión interna de diseño, (psig)
- C = Tolerancia a la corrosión, en este caso en particular = 0 pulg

Sustituyendo en la ecuación (4.24):

$$t_{S} = \frac{(70.26 \, psig) \, (78.74 \, pulg)}{2(4,500 \, psi)(1) - 0.2 \, (70.26 \, psig)} + 0 = 0.6156 \, pulg$$

El espesor t_s=0.6156 pulg es el mínimo necesario, sin embargo, se debe seleccionar el espesor comercial de la placa y éste debe ser el inmediato superior al
espesor calculado, por lo tanto, el espesor comercial es 5/8 de pulg (0.625 pulg), este espesor se debe revisar por presión externa de 50.07 psi a la condición de vacío total.

4.2.2.4 Revisión de espesores de la sección cilíndrica por Presión externa (FV)

Sección cilíndrica de la sección superior del Riser (UG-28.c del ASME Sección VIII, División 1)

Para la revisión del espesor por presión externa se debe proceder de la manera siguiente:

Altura de la tapa semielíptica

Para realizar el cálculo de la altura de la tapa se ocupa la ecuación siguiente:

$$h = \frac{D_i}{4} \tag{4.25}$$

Donde:

h = Altura de la tapa semielíptica, (pulg)

 D_i = Diámetro interior, (pulg)

Sustituyendo en la ecuación (4.23) queda de la manera siguiente:

$$h = \frac{78.74 \ pulg}{4} = 19.68 \ pulg$$

Longitud

Para realizar el cálculo de la longitud del cuerpo de la parte superior del Riser considerando la altura de la tapa semielíptica, se obtendrá una nueva longitud de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$L_N = L_{sup} + 1 x \left(\frac{h}{3}\right) \tag{4.26}$$

Donde:

 L_N = Longitud total (cuerpo y tapa) de la sección superior, (pulg)

 L_{sup} = Longitud del cuerpo la sección superior, (pulg)

h = Altura de la tapa semielíptica, (pulg)

Sustituyendo en la ecuación (4.26) queda de la manera siguiente:

$$L_N = 395.0787 \, pulg + 1\left(\frac{19.68 \, pulg}{3}\right) = 401.64 \, pulg$$

Dado que la sección superior del Riser lleva recubrimiento (CLAD) de acero inoxidable SA-240-304 y como se explicó en el numeral 4.2.2.1, la tolerancia a la corrosión es igual a cero.

Para la revisión del espesor por presión externa se debe proceder de la manera siguiente:

b) Se calcula el espesor *t*_c corroído.

Espesor corroído del cuerpo del Riser:

$$t_c = t_{com} - t \tag{4.27}$$

Donde:

 t_c = Espesor corroído del cuerpo, (pulg)

 t_{com} = Espesor comercial del cuerpo, (pulg)

t= Tolerancia a la corrosión, (pulg)

Sustituyendo la ecuación (4.27) obtenemos:

$$t_c = 0.625 \, pulg - 0 \, pulg = 0.625 \, pulg$$

Para realizar el cálculo del diámetro exterior:

$$D_o = D_c + 2t_c \tag{4.28}$$

Donde:

 D_o = Diámetro exterior corroído, (pulg)

 D_c = Diámetro corroído, (pulg)

 t_c = Espesor corroído, (pulg)

Sustituyendo la ecuación (4.28) obtenemos:

$$D_o = 78.74 \, pulg + 2(0.625 \, pulg) = 80 \, pulg$$

Con el diámetro exterior obtenido "D_o", se procede a calcular las relaciones siguientes:

a) Determinar relaciones $\frac{L_N}{D_o}$ y $\frac{D_o}{t_c}$

Donde:

Donde:

 L_N = Longitud total de la sección superior, (pulg) D_o = Diámetro exterior, (pulg)

 D_o = Diámetro exterior, (pulg) t_c = Espesor corroído, (pulg)

$$\frac{L_N}{D_o} = \frac{401.64 \ pulg}{80 \ pulg} = 5.0205 \qquad \qquad \frac{D_o}{t_c} = \frac{80 \ pulg}{0.625 \ pulg} = 128$$

b) Se determina el factor *A*, utilizando la relación $\frac{D_o}{t_c} = 128$ para identificar la sección de los valores tabulados en la Tabla G de la Subparte 3 del Código ASME Sección II, Parte D, (Anexo 5), y utilizando el valor de la relación $\frac{L_N}{D_o} = 5.0205$ que debe coincidir entre los valores de la columna *L/D*_o, en caso de no encontrar dicho valor, se debe realizar una interpolación utilizando los valores próximos, donde el valor de 5.0205 debe estar entre el rango como se muestra en la tabla siguiente:



Extracto del anexo 5. "Determinación del factor A"

Para la obtención del valor interpolado se realizará con la ecuación siguiente:

$$A = A_1 + \frac{A_2 - A_1}{\frac{L_2}{D_{o2}} - \frac{L_1}{D_{o1}}} \left(\frac{L_N}{D_o} - \frac{L_1}{D_{o1}} \right)$$
(4.29)

Donde:

- A = Factor A, (adimensional)
- A_1 = Factor A inferior, anexo 5, (adimensional)
- A_2 = Factor A superior, anexo 5, (adimensional)
- $\frac{L_N}{D_o}$ = Valor calculado, (adimensional)
- $\frac{L_1}{D_{o1}}$ = Valor inferior del anexo 5, (adimensional)
- $\frac{L_2}{D_{02}}$ = Valor superior del anexo 5, (adimensional)

Sustituyendo los valores en la ecuación (4.29), obtenemos:

$$A = 0.0000220 + \frac{0.0000141 - 0.0000220}{(6-4)} (5.0205 - 4) = 0.0000179$$

De acuerdo con el valor interpolado de 5.0205, le corresponde el valor al factor A de:

A = 0.0000179

Obteniendo el valor de A se podrá utilizar en la ecuación del inciso (c) cálculo de presión externa máxima permisible P_a para determinar si el material soportará la presión externa (presión del separador de 50.07 psi) a condición de vacío total.

c) Cálculo de la presión externa máxima permisible Pa

$$P_a = \frac{2AE}{3\left(\frac{D_o}{t_c}\right)} \tag{4.30}$$

Donde:

 P_a = Presión externa máxima permisible, (psi)

A = Factor A, (adimensional)

E = Módulo de elasticidad, (psi)

 D_o = Diámetro exterior, (pulg)

 t_c = Espesor corroído, (pulg)

Sustituyendo en la ecuación (4.30), se obtiene el valor de:

$$P_a = \frac{2 \ (0.0000179 \)(23,000,000 \ psi)}{3 \left(\frac{80 \ pulg}{0.625 \ pulg}\right)} = 2.14 \ psi$$

Se realizó el cálculo por presión externa obteniendo como resultado $P_a = 2.14 psi$ la cual es menor que la presión externa P_e (presión del separador de 50.07 psi) a la cual está sometido el recipiente, esto quiere decir que por la longitud de 401.64 pulg y a la condición de vacío total el recipiente colapsaría (coloquialmente se chuparía), por lo anterior, se debe repetir el procedimiento agregando anillos de refuerzo para disminuir el valor de L_N en la relación L_N/D_o . En este caso $P_a = 2.14 psi < P_e = 50.07psi$, por lo tanto, no pasa la revisión por presión externa y se debe realizar de nuevo el cálculo anterior considerando anillos de refuerzo.

Para realizar la revisión por presión externa considerando anillos de refuerzo, se parte del mismo espesor de placa de 5/8 de pulg (0.625 pulg) y aplicando la experiencia obtenida para el diseño de la sección inferior del Riser, se determinó que la cantidad de anillos de refuerzo será 1, con estos datos se realizó nuevamente la revisión por presión externa de acuerdo con el numeral 4.2.1.4, obteniendo lo siguiente:

Longitud entre anillos es Ls= 200.82 pulg, en este caso el anillo de refuerzo está localizado en la parte central de la longitud total (considerando la altura de la tapa) de la sección superior del Riser, el espesor corroído (que en este caso particular coincide con el espesor comercial) t_c = 0.625 pulg, el diámetro exterior D_o = 80 pulg, con los datos anteriores se obtuvieron las relaciones $\frac{L_s}{D_o}$ = 2.5102 y $\frac{D_o}{t_c}$ = 128 para obtener el factor de A = 0.000398. Para determinar el factor *B*, que depende de la temperatura de diseño de 552 °C (1,025.6 °F) y utilizando la tabla para el material SA-387-12 (1Cr-1/2Mo)" NFN-6

del código ASME (Anexo 7) "Determinación del factor B, por lo tanto, el valor de B = 5,112 psi.

Con los datos anteriores, se sustituyó en la ecuación del inciso (e) del numeral 4.2.1.4 para obtener la presión externa máxima permisible, obteniendo $P_a = 53.25$ psi, como ya se explicó en el numeral anterior, la presión externa máxima permisible P_a debe ser mayor a la presión externa (presión del separador de 50.07 psi), en este caso, $P_a = 53.25 \ psi > P_e = 50.07 \ psi$, por lo tanto, con 1 anillo de refuerzo el espesor comercial de 5/8 de pulg de la placa del cuerpo de la sección superior del Riser aprueba la revisión por presión externa a condición de vacío total, concluyendo y como parte del objetivo de ésta Tesis, *el espesor comercial de la placa para la fabricación de la sección superior del Riser es de 5/8 de pulgada.*

4.2.2.5 Diseño del anillo de refuerzo

Con base a las mejores prácticas de ingeniería, se utilizará la misma placa de espesor comercial de 5/8 de pulg que se calculó para el cuerpo cilíndrico de la sección superior del Riser, así mismo, se usará la relación de $h = 4t_{com}$ (las buenas prácticas de ingeniería indican que la altura "*h*" no debe ser mayor a $6t_{com}$ y no ser $1t_{com}$) para determinar la altura del anillo de refuerzo, por lo anterior, tenemos que el espesor del anillo de refuerzo es 5/8 de pulg y aplicando dicha relación tenemos una altura de 2.5 pulg, la sección transversal del anillo de refuerzo se muestra en la figura siguiente:



Cabe señalar que en el diseño del anillo de refuerzo para la sección inferior del Riser, se utilizó una relación de 5t_{com}; en el diseño de la sección superior se decidió (como diseñadores) que fuese de 4t_{com} con la finalidad de obtener la misma altura para los dos anillos de refuerzo del cuerpo del Riser, cumpliendo con los requerimientos técnicos y las buenas prácticas de ingeniería.

4.2.2.6 Cálculo del momento de inercia

Para el diseño del anillo de refuerzo, se necesita obtener el momento de inercia mediante la ecuación siguiente:

$$l_s = \left[D_o^2 L_s \left(t_c + \frac{A_s}{L_s} \right) A \right] / 14$$
(4.31)

Donde:

- l_s = Momento de inercia, (pulg⁴)
- $A_s = \text{ Årea de sección transversal, (pulg²)}$
- A = Factor A
- L_s = Longitud de la sección donde se ubicará el anillo de refuerzo, (pulg)

 t_c = Espesor corroído, (pulg)

Sustituyendo la ecuación (4.31) obtenemos:

$$ls = \frac{(80.00 \ pulg)^2 (200.82 \ pulg) \left(0.625 \ pulg + \frac{1.56 \ pulg^2}{200.82 \ pulg}\right) 0.000398}{14}$$

$$l_s = 23.12 \ pulg^4$$

Al realizar el cálculo de momento de inercia, se obtuvo un valor de $23.12pulg^4$, por lo tanto, este valor debe ser mayor al momento de inercia teórico requerido para determinar que el diseño de anillo de refuerzo es el adecuado.

4.2.2.7 Cálculo de momento de inercia teórico requerido

Para obtener el momento de inercia teórico requerido se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$l_R = \frac{b x h^3}{12}$$
(4.32)

Donde:

- l_R = Momento de inercia teórico requerido, (pulg⁴)
- *b* = Espesor del anillo de refuerzo, (pulg)
- h = Altura del anillo, (pulg)

Sustituyendo la ecuación (4.32) obtenemos:

$$l_R = \frac{b \ x \ h^3}{12} = \frac{(0.625 \ pulg)(2.5 \ pulg)^3}{12} = 0.81 \ pulg^4$$

De acuerdo con las buenas prácticas de ingeniería, el diseño del anillo de refuerzo cumple y se considera adecuado dado que el momento de inercia ($l_s = 23.12 \ pulg^4 > l_B = 0.81 \ pulg^4$) es mayor al momento de inercia teórico requerido.

4.2.3 Diseño obtenido del Riser de la Unidad FCC

Con lo desarrollado en los numerales 4.2.1 y 4.2.2, se calcularon los espesores comerciales de las placas del cuerpo cilíndrico de la sección inferior y superior que conforman el Riser, contará con dos anillos de refuerzo con sus respectivos diseños; constructivamente los espesores comerciales de las placas de 1/2 pulg y 5/8 de pulg facilitan el proceso de fabricación del Riser ya que la diferencia de espesores permite perfectamente el proceso y cumplimiento de los procedimientos de soldadura.

Cabe señalar que el diseño obtenido del Riser, cumple con los requerimientos de las Hojas de Datos (condiciones de diseño y operación), bases de diseño (utilizar dos tipos de materiales para cada sección del Riser, entre otros requerimientos normativos) y la metodología de cálculo empleada con base al Código ASME sección VIII, Div 1, por lo anterior, se da cumplimiento al objetivo general de la Tesis, a continuación, se muestra en la figura 4.1 el dibujo del diseño mecánico del Riser:



ŚΝ			

DATOS	S DE DISEÑO
SECCIÓN INFERI	OR DEL CUERPO DEL RISER
MPERATURA MÁX/MÍNIMO	291/281 °C
RESIÓN DE OPERACIÓN MÁX/MÍNIMA	4.6/4.0 kg/cm²
RESIÓN DE DISEÑO	4.94 kg/cm ²
MENSIONES (DI/T-T)	2,000 mm /10,035 mm
MPERATURA DE DISEÑO	343 °C (CON REFRACTARIO CONSIDERAR 150 °C)
STAMPADO ASME	REQUERIDO
DRROSIÓN PERMISIBLE	3.00 mm (0.118 PULGADA)
ÓDIGO DE DISEÑO	ASME SECCIÓN VIII, DIVISIÓN 1
SPESOR COMERCIAL DE LA PLACA	0.5 PULGADA
PO DE TAPA	NO REQUERIDO
ATERIAL DEL CUERPO DEL RISER	SA-516 Gr. 70
PO DE REFRACTARIO	POR LICENCIADOR

DATOS	S DE DISEÑO
SECCIÓN SUP	ERIOR DEL CUERPO DEL RISER
TEMPERATURA MÁX/MÍNIMO	537/520 °C
PRESIÓN DE OPERACIÓN MÁX/MÍNIMA	4.6/4.0 kg/cm²
PRESIÓN DE DISEÑO	4.94 kg/cm²
DIMENSIONES (DI/T-T)	2,000 mm /10,035 mm
TEMPERATURA DE DISEÑO	552 °C
ESTAMPADO ASME	REQUERIDO
CORROSIÓN PERMISIBLE	0 mm (0 PULGADA)
CÓDIGO DE DISEÑO	ASME SECCIÓN VIII, DIVISIÓN 1
ESPESOR COMERCIAL DE LA PLACA	0.625 PULGADA
TIPO DE TAPA	SEMIELÍPTICA DE ACUERDO CON ASME
MATERIAL DEL CUERPO DEL RISER	SA-387 Gr. 12
RECUBRIMIENTO INTERIOR (CLAD)	SA-240-304



O 66, EJÉRCI A, 09230, CIU	TO DE ORIENTE INDECO DAD DE MÉXICO, CDMX		DE LECHO FLUIDIZADO							
AL:	EMPRESA: FES ZARAGOZA	TÍTULO: DISEI	ÑO DEL RISE	R DE LA UNIDAD FCC						
		PROYECTO: F-507682	ESCALA:INDICADA	NÚMERO DE DOCUMENTO:	REV.					
		DISCIPLINA: MECÁNICO	PÁGINA: 1 DE 1	FCC-MC-001	0					

Resultados

Para determinar el comportamiento de las partículas y el fenómeno de fluidización, según Geldart, ya que de acuerdo con el diámetro de partícula y la diferencia de densidades entre el fluido (vapor sobrecalentado) y el sólido (Zeolita), el catalizador se encuentra en el Grupo A, como se muestra en la siguiente figura I:



Figura I. Clasificación de tipos de partícula según al esquema propuesto por Geldart por peso y tamaño (1972, 1973). Retomando la figura 1.5 se observa que, de acuerdo con la diferencia de densidades y el diámetro; la partícula se encuentra en el grupo A. Fuente: (Rhodes, 2008)

A partir de aquí, se desconoce K (constante cinética), por lo tanto, se utilizaron las correlaciones de la tabla 1.2 según Wen y Yu (1966). De acuerdo con las propiedades del fluido y del catalizador, mediante la ecuación de Ergun (4.2) se determinó que la

Velocidad *Mínima de fluidización es:* $U_{mf} = 0.0024 \frac{m}{s}$. En este punto de transición es cuando las partículas dejan de estar en reposo y comienzan a suspenderse.

De acuerdo con Sadeghbeigi (2020), el tiempo de residencia en el Riser es de 2 - 8 segundos. Según Gary y Handwerk (2001), la temperatura de operación se encuentra entre 470 °C y 580 °C. Teniendo en cuenta estos parámetros podemos determinar la velocidad de operación a partir de la ecuación de continuidad (4.4), el valor de la **velocidad de operación es:** $V = 10.03 \frac{m}{s}$. Según *Kunii y Levenspiel (1991)*, el fenómeno presente es transporte neumático como se muestra en el inciso (h) de la figura 1.3 del capítulo I y estas características se encuentra en la figura II siguiente:



Figura II. De acuerdo con la velocidad de operación y el diámetro de la partícula dentro del Riser, el régimen de fluidización que se presenta es el transporte neumático. Fuente: (Kunii & Levenspiel, 1991)

La velocidad terminal es cuando la partícula llega al final de su recorrido para ser despojada del tubo elevador, se dice que alcanzó su velocidad máxima. Este valor va ligado con el coeficiente de descarga (ecuación 4.6), y aplicando la ecuación 4.7 se obtuvo el valor para la **velocidad terminal** $U_t = 0.60 \frac{m}{s}$.

Para determinar el espesor comercial de la placa del Riser de la Unidad FCC, es primordial conocer las presiones y temperaturas a las que estará sujeto el recipiente a presión a diseñar.

En la industria del petróleo se manejan diferentes dimensiones para el diseño de los equipos mediante las consideraciones del cliente, así como del fabricante. Para el diseño del Riser de la Unidad FCC se consideró un diámetro de 2 m y una altura de 20.07 m y según Thabang, W. et al, (2022), a partir de aquí se pueden determinar los parámetros de diseño como se muestran en la tabla 4.1 y 4.2.

En la sección inferior del Riser, se consideró un refractario de acuerdo a datos del Licenciador, el cual logra bajar la temperatura de diseño de 343 °C a 150 °C, temperatura que está en contacto con la placa del cuerpo del recipiente, con lo cual, al realizar el diseño se utilizó como temperatura de diseño la de 150 °C, esto para lograr una selección de material que no deba tener características tan especiales por alta temperatura y por seguridad, incorporando recubrimiento térmico para que la temperatura no represente riesgo al personal y así conservar la energía térmica en el Riser.

En la sección superior se consideró un recubrimiento (CLAD) de acero inoxidable SA-240-304 de acuerdo con la ingeniería básica del Licenciador, el cual considera una temperatura de diseño de (552 °C); este recubrimiento tiene como finalidad proteger al

178

material contra corrosión y desgaste. Por lo anterior, la tolerancia a la corrosión se consideró igual a cero, ya que con este recubrimiento no habrá un desgaste que afecte directamente al material.

El material con el que se diseñó la sección inferior fue con SA-516-70, este material, de acuerdo con el código ASME, cuenta con las características técnicas que cubren los requerimientos de diseño, operación y normatividad técnica aplicable, cabe resaltar que al hacer la investigación un parámetro a cuidar en las condiciones de diseño y operación es propiamente la temperatura de diseño.

A diferencia de la sección inferior, el material con el que se diseñó la sección superior fue con SA-387-12, este material cuenta con las propiedades necesarias y cumple los requerimientos de diseño, operación y normatividad técnica aplicable. Para la selección de este material el parámetro importante que se consideró fue la temperatura de diseño.

Con las dos temperaturas de diseño que se utilizaron para realizar el cálculo de los espesores comerciales de las placas del cuerpo inferior y superior del Riser, nos permite concluir en lo siguiente: entre mayor temperatura se someta al material de la placa del cuerpo del Riser, la gama de materiales va siendo más pequeña y en consecuencia las características mecánicas se vuelven más especiales, dando como resultado de los materiales con un alto costo. En principio, el diseño mecánico debe lograr un equilibrio entre cumplimiento en el diseño y normatividad técnica al costo más bajo posible para el proyecto. Al realizar la revisión del espesor por presión externa, logramos identificar un fenómeno que es el colapso a condición de vacío total, si bien el primer espesor pasa por presión interna, puede darse ya sea en las pruebas o en la operación alguna condensación que pueda generar un grado de vacío, por lo tanto, es importante realizar la revisión por presión externa y en este caso fue la que determinó que con un anillo de refuerzo en cada sección inferior y superior del Riser el espesor comercial cumple con este requerimiento para evitar el riesgo de este fenómeno.

Al realizar varias veces para la sección inferior del Riser el cálculo de revisión del espesor por presión externa, considerando anillos de refuerzo, logramos identificar la contribución de los mismos al hacer como tal el refuerzo que necesita el diseño, para que el recipiente no colapse a condición de vacío total, pero fue más importante con la experiencia técnica de los ingenieros de Petróleos Mexicanos Noé Galo Ramírez Hernández y Antonio Córdova López, percatarnos que se debe analizar el resultado de la presión externa máxima permisible P_a en relación a la cantidad de anillos de refuerzo requeridos, ya que se interpretó que el espesor estaba limitado por requerir demasiado refuerzo, y en efecto, con un espesor comercial de 5/16 pulg se requerían 9 anillos y con el de 1/2 pulg solo 1 anillo de refuerzo.

Conclusiones

En este trabajo de Tesis, se realizó el Cálculo del Espesor comercial de la Placa del Cuerpo del Riser de la Unidad de Desintegración Catalítica de Lecho Fluidizado mediante el código ASME Sección VIII División I.

Durante la investigación analizamos las secciones principales de la unidad FCC como son el Riser, el separador y el regenerador. A partir de este equipo se obtienen productos que contribuyen en gran medida al pool de gasolina. Comúnmente en la industria del petróleo, la Unidad FCC es conocida como reactor, sin embargo, cabe destacar que el reactor es el Riser ya que es donde se lleva a cabo la reacción química. La unidad de craqueo cumple con un rol de gran importancia en la industria del petróleo, ya que se puede considerar como el corazón de una refinería.

La fluidización es un fenómeno que juega un rol muy importante en este tipo de Unidades, ya que permite que un sólido adquiera atributos similares a los de un líquido cuando es alimentado mediante un fluido (en este caso gas). Las reacciones de desintegración catalítica se encuentran constituidas por un gran número de especies químicas, por lo que se agrupan en un conjunto de pseudocomponentes (conocidos en inglés como lumps). Para determinar estos modelos se requiere de experimentación bajo licenciadores de renombre. Además, poseen programas con algoritmos específicos para determinar estos parámetros. En este trabajo se logró determinar los parámetros hidrodinámicos de acuerdo con las correlaciones de Wen y Yu, las cuales fueron fundamentales para identificar el fenómeno y tipo de fluidización presente en el Riser. En este caso podemos decir que el fenómeno presente en el Riser es fluidización de transporte neumático de partículas.

El conocimiento y la aplicación de Normas y Códigos ayudan a los profesionistas en las ramas de ingeniería para su desempeño técnico y toma de decisiones, por tal motivo como ingenieros químicos debemos tener el conocimiento y estar actualizados constantemente en materia de Normatividad.

En este trabajo de Tesis las Normas y Códigos nos permiten desarrollar el diseño, cálculo, selección de materiales, especificación, fabricación y pruebas de recipientes a presión para garantizar una operación segura y confiable, así mismo la comprensión del fundamento normativo que tuvo que migrar Pemex como una entidad Paraestatal y que hoy en día como Empresa Productiva del Estado, la cual debe dar cumplimiento a la Normatividad Técnica, con base a la nueva Ley de Infraestructura de la Calidad.

El diseño de recipientes a presión requiere de la ciencia de distintas licenciaturas las cuales en el campo laboral desarrollan las disciplinas de ingeniería, por ejemplo: la ingeniería química (disciplinas: proceso, sistemas, seguridad, instrumentación y control, corrosión), ingeniería mecánica (disciplinas: mecánico estático, dinámico y tuberías), ingeniería civil (disciplinas: acero, concreto y geotecnia), entre otras. La ingeniería química se encarga del estudio, desarrollo, diseño y operación de procesos industriales que producen cambios físicos y químicos de la materia, así como determinar los parámetros cinéticos y termodinámicos de los equipos de proceso.

La aplicación del código ASME Sección VIII División 1 para el cálculo del espesor de la placa del Riser implica considerar factores, por ejemplo: condiciones de diseño, las propiedades mecánicas de los materiales de construcción, la tolerancia a la corrosión, la revisión por presión externa a condición de vacío, entre otros; este cálculo se realiza con el propósito de garantizar la integridad estructural durante la operación y/o pruebas, logrando la seguridad operativa del Riser, y por consiguiente la confiabilidad operativa de la Unidad de Desintegración Catalítica de Lecho Fluidizado de la Refinería.

Finalmente, esto puede contribuir en gran medida a obtener equipos de forma más económica que cumplan con la normatividad técnica aplicable y con los requerimientos técnicos del proyecto.

Anexos

Anexo 1 Hoja de datos de Riser

PEN		UNIDAD DE	UNIDAD DE DESINTEGRACIÓN CATALITICA DE LECHO FLUIDIZADO RISER					HOJAS DE DATOS REACTORES			
CLIENTE:	FES ZARAGOZA										
PLANTA:	UNIDAD FCC					No. DE UNI	DADES:	UNA			
LOCALIZACIÓ	N: Av. Guelato 66, Ejérci	o de Oriente Indec	o II Issste, Iztapala	pa, 09230, Ciudad	de México	POSICIÓN:	VE	RTICAL			
PROYECTO N	o: F-507682					HOJA:	1 DE:	1			
	SECCIÓN SUPERIOR	DEL CUERPO DEI	L RISER		1		77.				
	Líquido:	Flujo	: m ³ /h	Densidad rel.:	- X	x +					
Tipo de Fiuldo	Vapor o Gas: VAPOR SOBRECA	LENTADO Flujo	: 114,000 m ³ /h	Densidad rel.: 0.46		/					
-	Operación normal: 530 °C		Máxima: 537	°C			. \				
Temperatura			Diseño: 552	°C							
D	Operación normal: 4.2 kg	/cm² man.	Máxima: 4.6	kg/cm ² man.			╘╍╴╇┑╠╴				
Presion			Diseño: 4.94	kg/cm ² man.				Ť			
D'	Longitud: croquis m	n Dia	ámetro int: croqu	is mm							
Dimensiones		(Cap. Total:	mm							
NP	Normal: m	n	Máximo:	mm			- U76-				
INIVEI			Mínimo:	mm		-		<mark>19</mark>			
A1-	Alto Nivel: m	n E	Bajo Nivel:	mm	1			₽/ =			
Alarmas		Nive	el de paro:	mm		14	7₩∥	l			
	Cuerpo: SA-387-12		Cabezas: SA-3	87-12			∖ []				
Materiales			Internos:			i Lil i		f	f f		
	Cuerpo:		Cabezas:	mm				9			
Tol. Corrosión		Malla se	paradora: NO		((u			9			
Aislamiento	Espesor mm	Material:			-			e			
Recubrimiento	interior Espesor: 1.6	mm Mate	vial SA-2	40-304	-			+			
ricoublimento		iiiii wato			4	11	1	1	jo		
	SECCIÓN INFERIOR		RISER		4				bei 020		
		EL OOLIN O DEL	·	Donaidad rol :	4	$ \setminus = $	$\Lambda/1$		8n		
Tipo de Fluido			. <u>m /n</u>	Densidad rel		N I		20			
	Operación Normali 291	LENTADO FIUJO	. 114,000 m²/n	Densidad rei.: 0.40	2	II/AL i		6,9	ció		
	Operación Normai. 201 -C		Diseño: 291	-0 	-				Sec		
Temperatura	On Normal (matal): 45 %		Máximo: 50	- <u>-</u>	-				0,0		
	Op. Normai (metal): 45 °C		Diseño: 150	*C Nata: 7	-		J				
		, 2	Diseno: 150		-	\gg		1	2		
Presión	Operación normal: 4.2 kg	'cm" man.	Naxima: 4.0	kg/cm ⁻ man.	- /		//				
	Leasting promition and	- Di	Diserio. 4.94	kg/cm ⁻ man.	- />	5/11 I	11	Ī	5		
Dimensiones	Longitud. Croquis III		ametro int. Croqu	15 mm	- \(\)						
	Newsel		Jap. Total:	mm	- ~						
Nivel	Normai: m	n	Maximo:	mm	-	i i					
	Alte Mitsel		iviinimo:	mm	-			50			
Alarmas	Aito Nivei: M	11 t			4			5,6			
	CA 007 10	Nive	ei ue paro:	mm 07.10	4						
Materiales	Guerpo: SA-387-12		Gabezas: SA-3	07-12	4				irio		
	0		niternos:		4			Ļ	02(
Tol. Corrosión	Cuerpo:		Cabezas:	mm			-				
		Malla se	eparadora: NO		-		1	8	, l ši		
Aislamiento	Espesor mm	Material:					1	<u> </u>	e G		
Recubrimiento	interior Espesor: 152	mm Mate	erial: SA-2	40-304			1		S		
								00			
	NOT	45				* I++					
(1) Dimensione	es en mm (croquis)				4	AV		0			
(2) La tapa sup	erior debe ser semielíptica 2:1. La tapa inferio	es brida ciega como s	e muestra en el croqu	s	4			06			
(3) El equipo de	ebe diseñarse tambien para la condición de pr	sión externa de 3.52 k	g/cm2		4				↓ ↓		
(4) El equipo de	ebe diseñarse también para la condición de va	cio total			4		<u> </u>				
(5) El equipo re	equiere tratamiento térmico después de la sold	adura (PWHT).			4	, H	1				
(6) Se requiere	estampado ASME				1						
(7) Con refracta	ario considerar 150 °C				1						
(8) El logotipo d	de PEMEX es propiedad de Petroleos Mexicar	os y se utilizá en esta	Tesis ya que el preser	te diseño es							
similar a los	equipos instalados en sus refinerías										
Revisión	0	1	2	3							
Fecha	28/10/223										
Elaborado por	STR / EAL						LLLVACION				
Aprobado por	NGRH				1						

Anexo 2 Esfuerzos permisibles del material SA-516-70 (acero al carbono)

ASME BPVC.II.D.C-2019

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade	Alloy Desig./ UNS No.	Class/ Condition/ Temper	Size/Thickness, in.	P-No.	Group No.
1	Camban at al	Chast	CA 414		1/02704			1	1
1	Carbon steel	Sheet	SA-414	E D	KU2/04			1	1
2	Carbon steel	Plate	SA-662	В	K02203			1	1
3	Carbon steel	Plate	SA-537		K12437	1	$2^{-1}/_{2} < t \le 4$	1	2
4	Carbon steel	Wid. pipe	SA-691	CMSH-70	K12437		$2^{2}/_{2} < t \leq 4$	1	2
5	Carbon steel	Plate, bar	SA/CSA-G40.21	44W			$t \leq 8$	1	1
6	Carbon steel	Plate, bar	SA/CSA-G40.21	50W			<i>t</i> ≤ 6	1	1
7	Carbon steel	Plate	SA/AS 1548	PT460N		Normalized	≤6	1	1
8	Carbon steel	Plate	SA/AS 1548	PT460NR		Norm. rld.	≤6	1	1
9	Carbon steel	Forgings	SA/EN 10222-2	P280GH		NT or QT	$1.4 < t \leq 6.3$	1	1
10	Carbon steel	Plate	SA/EN 10028-2	P295GH			$2^{1}/_{4} < t \le 4$	1	1
11	Carbon steel	Plate	SA/EN 10028-2	P295GH			≤2 ¹ / ₄	1	1
12	Carbon steel	Forgings	SA/EN 10222-2	P280GH		Normalized	$t \leq 1.4$	1	1
13	Carbon steel	Plate	SA/GB 713	Q345R			$6 < t \leq 8$	1	2
14	Carbon steel	Plate	SA/EN 10028-2	P355GH			$6 < t \le 10$	1	2
15	Carbon steel	Plate	SA/GB 713	Q345R			$4 < t \leq 6$	1	2
16	Carbon steel	Plate	SA/EN 10028-2	P355GH			$4 < t \leq 6$	1	2
17	Carbon steel	Plate	SA-455		K03300		$0.58 < t \le \frac{3}{4}$	1	2
18	Carbon steel	Bar	SA-675	70				1	2
19	Carbon steel	Forgings	SA-105		K03504			1	2
20	Carbon steel	Forgings	SA-181		K03502	70		1	2
21	Carbon steel	Castings	SA-216	WCB	103002			1	2
22	Carbon steel	Forgings	SA-266	2	, K03506			1	2
23	Carbon steel	Forgings	SA-266	4	K03017			1	2
24	Carbon steel	Forgings	SA-350	LF2	K03011	1		1	2
25	Carbon steel	Forgings	SA-350	LF2	K03011	2		1	2
26	Carbon steel	Forgings	SA-508	1	K13502			1	2
27	Carbon steel	Forgings	SA-508	1A	K13502			1	2
28	Carbon steel	Forgings	SA-541	1	K03506			1	2
29	Carbon steel	Forgings	SA-541	1A	K03020			1	2
30	Carbon steel	Cast nine	SA-660	WCB	103003			1	2
31	Carbon steel	Forgings	SA-765	II	K03047			1	2
32	Carbon steel	Plate	SA-515	70	K03101			1	2
33	Carbon steel	Plate	SA-516	70	K02700			1	2
34	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CB70	K03101			1	2
35	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CC70	K02700			1	2
36	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	B70	K03101			1	2
37	Carbon steel	Wld. nine	SA-672	C70	K02700			1	2
38	Carbon steel	Plate	SA/JIS G3118	SGV480				1	2
39	Carbon steel	Smls. pipe	SA-106	С	K03501			1	2
40	Carbon steel	Wld. tube	SA-178	D				1	2
41	Carbon steel	Wld. tube	SA-178	D				1	2
42	Carbon steel	Wld. tube	SA-178	D				1	2
43	Carbon steel	Smls. tube	SA-210	С	K03501			1	2
44	Carbon steel	Castings	SA-216	WCC	J02503			1	2
45	Carbon steel	Smls, & wld, fittings	SA-234	WPC	K03501			1	2
46	Carbon steel	Castings	SA-352	LCC	J02505			1	2
47	Carbon steel	Castings	SA-487	16		А		1	2
48	Carbon steel	Plate	SA-537		K12437	3	$4 < t \leq 6$	1	3

Anexo 2 Esfuerzos permisibles del material SA-516-70 (acero al carbono) (continuación)

ASME BPVC II D.C-2019

	Min.	Min.	Applic	ability and Max. Tem	perature Li	mits		
	Tensile	Yield		(NP = Not Perm	itted)		External	
Line	Strength.	Strength.		(SPT = Supports	Only)		Pressure	
No.	ksi	ksi	I	III	VIII-1	XII	Chart No.	Notes
1	65	38	NP	NP	900	650	CS-2	G10 T1
2	65	40	NP	NP	700	650	CS-2	T1
2	65	10	ND	700	650	650		T1
4	65	45	ND	700	ND	ND	CS-2 CS-2	C_{26} T1 W10 W12
5	65	45	650	700 ND	650	650	CS 2	C19
5	05		030		050	650	CS-2	G10
0	05		650	NP	050	650	C3-2	610
7	66.5		1000	NP	1000	NP	CS-2	G10, G18, S1, T1
8	66.5		1000	NP	1000	NP	CS-2	G10, G18, S1, T1
9	66.5	37	1000	NP	1000	NP	CS-2	G10, S1, T2
10	66.5	37.5	850	NP	1000	NP	CS-2	G10, S1, T1
11	66.5		850	NP	1000	650	CS-2	G10, G18, S1, T1
12	66.5	40.5	1000	NP	1000	NP	CS-2	G10, S1, T2
13	68	38.5	800	NP	800	NP	CS-2	T1
14	68	40.5	850	NP	1000	NP	CS-2	G10. S1. T1
15	69.5	41.5	800	NP	800	NP	CS-2	T1
16	69.5	43	850	NP	1000	NP	CS-2	G10 S1 T1
17	70	35	NP	400 (Cl 3 only)	650	650	CS-2	
18	70	35	850	650 (Cl - 3 only)	1000	650	CS-2	 610 615 622 \$1 T2
10	70	55	050	000 (ci, 5 0iiiy)	1000	050	63 2	010, 013, 022, 31, 12
19	70	36	1000	700	1000	650	CS-2	G10, S1, T2
20	70	36	1000	700	1000	650	CS-2	G10, S1, T2
21	70	36	1000	700	1000	650	CS-2	G1, G10, G17, S1, T2
22	70	36	1000	700	1000	650	CS-2	G10, S1, T2
23	70	36	NP	NP	1000	650	CS-2	G10, T2
24	70	36	850	700	1000	650	CS-2	G10, T2
25	70	36	850	700	1000	650	CS-2	G10, T2
26	70	36	NP	700	1000	650	CS-2	G10, T2
27	70	36	NP	700	1000	650	CS-2	G10, T2
28	70	36	NP	700	1000	650	CS-2	G10. T2
29	70	36	NP	700	1000	650	CS-2	G10. T2
30	70	36	1000	700	NP	NP	CS-2	G1 G10 G17 S1 T2
31	70	36	NP	NP	1000	650	CS-2	G10, T2
32	70	38	1000	700	1000	650	<u>CS-2</u>	G10 S1 T2
33	70	38	850	700	1000	650	CS-2	C_{10} , S_{1} , T_{2}
34	70	38	ND	700	ND	ND	CS-2	S5 W10 W12
25	70	20	ND	700	ND	ND	CS 2	S5, W10, W12
35	70	30	INF	700	NF.	INF	03-2	50, W10, W12
36	70	38	NP	700	NP	NP	CS-2	S5, W10, W12
37	70	38	NP	700	NP	NP	CS-2	S6, W10, W12
38	70	38	850	NP	NP	NP	CS-2	G10, S1, T2
39	70	40	1000	700	1000	650	CS-2	G10, S1, T1
40	70	40	1000	NP	NP	NP	CS-2	G10, S1, T1, W13
41	70	40	1000	NP	NP	NP	CS-2	G4, G10, S1, T4
42	70	40	1000	NP	NP	NP	CS-2	G3, G10, S1, T2
43	70	40	1000	NP	1000	650	CS-2	G10, S1, T1
44	70	40	1000	700	1000	650	CS-2	G1. G10. G17. S1. T1
45	70	40	800	700	800	650	CS-2	G10. T1. W14
46	70	40	NP	700	NP	NP	CS-2	G17 T1
47	70	40	NP	700	NP	NP	CS-2	ary it
4.9	70	40	NP	NÞ	700	650	CS_2	 623 W11
70	• 70	υF	141	141	700	030	63-2	020, WII

Anexo 2 Esfuerzos permisibles del material SA-516-70 (acero al carbono) (continuación)

ASME BPVC II D C 2019

Line	ne Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temperature, °F, Not Exceeding													
No.	100	150	200	250	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900
1	18.6	18.6	18.6		18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	16.9	13.9	11.4	8.7	5.9
2	18.6	18.6	18.6		18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	16.9				
3	18.6		18.6		18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	16.9				
4	18.6		18.6		18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	16.9				
5	18.6		18.6		18.6	18.6	18.6	18.6	18.6					
6	18.6		18.6		18.6	18.6	18.6	18.6	18.6					
7	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	16.0	120	11 /	07	50
· ·	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	16.9	13.9	11.4	0.7	5.9
8	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	10.9	13.9	11.4	δ./ 0.2	5.9
9	19.1		19,1		19,1	19,1	19.1	18,8	18.1	17.5	14.8	12.0	9.3	6./ E 0
10	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	18.5	16.7	13.9	11.4	8./ 0.7	5.9
11	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	10.7	13.9	11.4	δ./ 0.2	5.9
12	19.1		19.1		19.1	19.1	19.1	19.1	19.1	19.1	14.8	12.0	9.3	6.7
13	19.5		19.5		19.5	19.5	19.5	19.5	19.0	18.3	14.8	12.0		
14	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	18.3	14.8	12.0	9.3	6.7
15	19.9		19.9		19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	18.3	14.8	12.0		
16	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	18.3	14.8	12.0	9.3	6.7
17	20.0	20.0	20.0		20.0	19.9	19.0	17.9	17.3					
18	20.0	20.0	20.0		20.0	19.9	19.0	17.9	17.3	16.7	14.8	12.0	<i>9.3</i>	6.7
10	20.0	20.0	20.0		20.0	20.0	10.6	19.4	17.9	172	110	120	0.2	67
20	20.0	20.0	20.0		20.0	20.0	19.6	18 /	17.0	17.2	14.0	12.0	0.3	6.7
20	20.0	20.0	20.0		20.0	20.0	19.0	18.4	17.0	17.2	14.0	12.0	0.2	6.7
21	20.0	20,0	20,0		20.0	20.0	19.0	10.4	17.0	17.2	14.0	12.0	0.2	67
22	20.0	20.0	20.0		20.0	20.0	19.0	10.4	17.0	17.2	14.0	12.0	9.5	67
23	20.0	20.0	20.0		20.0	20.0	19.0	10.4	17.0	17.2	14.0	12.0	9.5	0.7
24	20.0	20.0	20.0		20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	<i>9.3</i>	6.7
25	20.0	20.0	20.0		20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	<i>9.3</i>	6.7
26	20.0	20.0	20.0		20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
27	20.0	20.0	20.0		20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
28	20.0	20.0	20.0		20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
29	20.0	20,0	20,0		20.0	20.0	19.6	18,4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
30	20.0		20.0		20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
31	20.0	20.0	20.0		20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
22	20.0	20.0	20.0		20.0	20.0	20.0	10.4	10.0	10.1	110	12.0	0.0	
32	20.0	20.0	20.0		20.0	20.0	20.0	19.4	18.8	18.1	14.8	12.0	9.3	6.7
33	20.0	20.0	20.0		20.0	20.0	20.0	19.4	18.8	18.1	14.8	12.0	9.3	6.7
34	20.0		20.0		20.0	20.0	20.0	19.4	18.8	18.1				
35	20.0		20.0		20.0	20.0	20.0	19.4	18.8	18.1				
36	20.0		20.0		20.0	20.0	20.0	19.4	18.8	18.1				
37	20.0		20.0		20.0	20.0	20.0	19.4	18.8	18.1				
38	20.0	20.0	20.0		20.0	20.0	20.0	19.4	18.8	18.1	14.8	12.0	<i>9.3</i>	
20	20.0		20.0		20.0	20.0	20.0	20.0	10.0	102	110	120	0.2	67
39	20.0		20,0		20,0	20,0	20,0	20,0	17,0	10.5	14.0	12.0	9.5	6.7
40	20.0		20.0		20.0	20.0	20.0	20.0	19.0	10.5	14.0	12.0	9.5	0.7 E 7
41	20.0		20,0		20.0	20.0	20.0	20.0	19.0	10,5	14.0	12,0	9.3 7.0	5.7
42	20.0		20.0		20.0	20.0	20.0	20.0	10.8	10.0	12.0	10.2	/.9	5.7
43	20.0		20.0		20.0	20.0	20.0	20.0	19'9	10.3	14.ŏ	12.0	9.3	6.7
44	20.0	20.0	20.0		20.0	20.0	20.0	20.0	19.8	18.3	14.8	12.0	9.3	6.7
45	20.0		20.0		20.0	20.0	20.0	20.0	19.8	18.3	14.8	12.0		
46	20.0		20.0		20.0	20.0	20.0	20.0	19.8	18.3				
47	20.0		19.9		18.8	18.1	17.9	17.9	17.9	17.9				
48	20.0	20.0	20.0		19.7	19.5	18.9	18.0	17.6	17.2				

Anexo 3 Esfuerzos permisibles del material SA-387-12 (1Cr-1/2Mo)

ASME BPVC.II.D.C-2019

Line					Alloy Desig./ UNS	Class/ Condition/	Size/Thickness,		Group
No.	Nominal Composition	Product Form	Spec No	Type/Grade	No.	Temper	ın.	P-No.	No.
1	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Plate	SA-387	12	K11757	1		4	1
2	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Wld. pipe	SA-691	1CR	K11757			4	1
3	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Cast pipe	SA-426	CP12	J11562			4	1
4	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Forgings	SA-182	F12	K11562	1		4	1
5	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Smls. tube	SA-213	T12	K11562			4	1
6	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Smls. & wld. fittings	SA-234	WP12	K12062	1		4	1
7	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Wld. tube	SA-250	T12	K11562			4	1
8	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Wld. tube	SA-250	T12S1	K11562			4	1
9	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Smls. pipe	SA-335	P12	K11562			4	1
10	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Forged pipe	SA-369	FP12	K11562			4	1
11	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Forgings	SA/EN 10222-2	13CrMo4-5		NT or QT	$10 < t \leq 20$	4	1
12	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Plate	SA/EN 10028-2	13CrMo4-5			$6 < t \leq 10$	4	1
13	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Plate	SA/EN 10028-2	13CrMo4-5			$4 < t \leq 6$	4	1
14	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Plate	SA/GB 713	15CrMoR		NT	$4 < t \leq 6$	4	1
15	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Forgings	SA/EN 10222-2	13CrMo4–5		NT or QT	$4 < t \leq 10$	4	1
16	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Plate	SA/EN 10028-2	13CrMo4-5			$2.5 < t \leq 4$	4	1
17	$1Cr - \frac{1}{2}Mo$	Forgings	SA/EN 10222-2	13CrMo4–5		NT or QT	$2.8 < t \leq 4$	4	1
18	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Smls, tube	SA/EN 10216-2	13CrMo4–5			$1^{5}/_{8} < t \leq 2^{1}/_{2}$	4	1
19	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Forgings	SA/EN 10222-2	13CrMo4-5		NT	$1.4 < t \leq 2.8$	4	1
20	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Smls. tube	SA/EN 10216-2	13CrMo4-5			$t \le 1^{5}/_{8}$	4	1
21	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Forgings	SA/EN 10222-2	13CrMo4-5		NT	$t \leq 1.4$	4	1
22	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Plate	SA-387	12	K11757	2		4	1
23	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Wld. pipe	SA-691	1CR	K11757			4	1
24	$1Cr - \frac{1}{2}Mo$	Plate	SA/GB 713	15CrMoR		NT	$2.5 < t \le 4$	4	1
25	$1Cr - \frac{1}{2}Mo$	Plate	SA/EN 10028-2	13CrMo4-5			$\frac{5}{8} < t \le 2.5$	4	1
26	$1Cr - \frac{1}{2}Mo$	Plate	SA/GB 713	15CrMoR		NT	$0.25 \le t \le 2.5$	4	1
27	$1Cr - \frac{1}{2}Mo$	Plate	SA/EN 10028-2	13CrMo4–5			$t \leq \frac{5}{8}$	4	1
28	1Cr- ¹ / ₂ Mo	Forgings	SA-182	F12	K11564	2		4	1
29	$1Cr - \frac{1}{2}Mo$	Forgings	SA-336	F12	K11564			4	1
30	1Cr-V	Smls. tube	SA-213	T17	K12047			10B	1
31	1 ¹ / ₄ Cr- ¹ / ₂ Mo	Castings	SA-217	WC6	J12072			4	1
32	1 ¹ / ₄ Cr- ¹ / ₂ Mo	Cast pipe	SA-426	CP11	J12072			4	1
33	$1^{1}/_{4}Cr - \frac{1}{2}Mo$	Bar	SA-739	B11	K11797			4	1
34	1 ¹ / ₄ Cr– ¹ / ₂ Mo–Si	Forgings	SA-182	F11	K11597	1		4	1
35	$1^{1}/_{4}Cr - \frac{1}{2}Mo - Si$	Smls. tube	SA-213	T11	K11597			4	1
36	1 ¹ / ₄ Cr- ¹ / ₂ Mo-Si	Smls. & wld. fittings	SA-234	WP11		1		4	1
37	1 ¹ / ₄ Cr- ¹ / ₂ Mo-Si	Wld. tube	SA-250	T11	K11597			4	1
38	1 ¹ / ₄ Cr- ¹ / ₂ Mo-Si	Wld. tube	SA-250	T11S1	K11597			4	1
39	1 ¹ / ₄ Cr- ¹ / ₂ Mo-Si	Smls. pipe	SA-335	P11	K11597			4	1
40	1 ¹ / ₄ Cr- ¹ / ₂ Mo-Si	Forgings	SA-336	F11	K11597	1		4	1
41	1 ¹ / ₄ Cr– ¹ / ₂ Mo–Si	Forged pipe	SA-369	FP11	K11597			4	1
42	1 ¹ / ₄ Cr- ¹ / ₂ Mo-Si	Plate	SA-387	11	K11789	1		4	1
43	1 ¹ / ₄ Cr- ¹ / ₂ Mo-Si	Wld. pipe	SA-691	1 ¹ / ₄ CR	K11789			4	1
44	1 ¹ / ₄ Cr- ¹ / ₂ Mo-Si	Wld. pipe	SA-691	1 ¹ / ₄ CR	K11789			4	1

Anexo 3 Esfuerzos permisibles del material SA-387-12 (1Cr-1/2Mo) (continuación)

ASME BPVC.II.D.C-2019

	Min. Tensile	Min. Yield	Applic	ability and Max. Tem (NP = Not Permi	perature Li itted)	mits	External	
Line	Strength,	Strength,		(SPT = Supports	Only)		Pressure	
No.	ksi	ksi	I	III	VIII-1	XII	Chart No.	Notes
1	55	33	1200	700	1200	NP	CS-2	S4, T5
2	55	33	NP	700	NP	NP	CS-2	G26, W10, W12
3	60	30	NP	700	NP	NP	CS-2	G17
4	60	32	1200	NP	1200	NP	CS-2	Т5
5	60	32	1200	700	1200	NP	CS-2	S4. T5
6	60	32	1200	700	1200	NP	CS-2	S4, T5, W14
7	60	32	1200	NP	NP	NP	CS-2	G3, S4, T5
8	60	32	1200	NP	NP	NP	CS-2	S4. T5. W13
9	60	32	1200	700	1200	NP	CS-2	S4. T5
10	60	32	1200	700	1200	NP	CS-2	S4, T5
10	00	52	1200	,	1200		00 1	51, 15
11	61	35	1200	NP	1200	NP	CS-2	S4, T5
12	61	35,5	1200	NP	1200	NP	CS-2	S4, T5
13	62.5	37	1200	NP	1200	NP	CS-2	S4, T5
14	64	32.5	1200	NP	NP	NP	CS-2	S4, T5
15	64	38.5	1200	NP	1200	NP	CS-2	S4, T5
16	64	39	1200	NP	1200	NP	CS-2	S4, T5
17	64	40	1200	NP	1200	NP	CS-2	S4, T5
18	64	40.5	1200	NP	1200	NP	CS-2	Т5
19	64	41.5	1200	NP	1200	NP	CS-2	S4. T5
20	64	42	1200	NP	1200	NP	CS-2	Τ5
21	64	43	1200	NP	1200	NP	CS-2	S4, T5
22	65	40	1200	700	1200	NP	CS-2	S4. T5
23	65	40	NP	700	NP	NP	CS-2	G26. W10. W12
24	65.5	40	1200	NP	NP	NP	CS-2	S4 T5
25	65.5	42	1200	NP	1200	NP	CS-2	S4. T5
26	65.5	43	1200	NP	NP	NP	CS-2	S4. T5
27	65.5	43 5	1200	NP	1200	NP	CS-2	S4 T5
27	0010	1515	1200	111	1200			51, 15
28	70	40	1200	700	1200	NP	CS-2	S4, T4
29	70	40	1200	700	1200	NP	CS-2	S4, T4
30	60	30	NP	NP	650	650	CS-2	
31	70	40	1100	700	1100	NP	CS-2	G1, G17, T4
32	70	40	NP	700	NP	NP	CS-2	G17
33	70	45	NP	700	1200	NP	CS-3	T4
34	60	30	1200	NP	1200	NP	CS-2	S4. T5
35	60	30	1200	700	1200	NP	CS-2	S4. T5
36	60	30	1200	700	1200	NP	CS-2	S4, T5, W14
37	60	30	1200	NP	NP	NP	CS-2	G3 S4 T5
38	60	30	1200	NP	NP	NP	CS-2	S4 T5 W13
30	60	30	1200	700	1200	NP	CS-2	S4 T5
40	60	30	1200	ND	ND	ND	CS_2	S4 T5
41	60	30	1200	700	1200	NP	CS-2	S4, T5
40	60	35	1200	700	1200	ND	<u>(S-2</u>	S4 T4
42	60	35	ND	200 (C) 2 anim	1200 ND	ND	CS 2	эт, іт С27 W10 W12
43 11	60	35	ND	700 (CL 3 UIIIY)	ND	ND	CS_2	G27, W10, W12 G26 W10 W12
44	. 00	55	INF	700	INF	INE	63-2	020, 1110, 1112

Anexo 3 Esfuerzos permisibles del material SA-387-12 (1Cr-1/2Mo) (continuación)

ASME BPVC.II.D.C-2019

Line		Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temperature, °F, Not Exceeding												
No.	100	150	200	250	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900
1	15.7		15.4		15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	14.7
2	15.7		15.4		15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1				
3	17.1		16.8		16.5	16.2	15.7	15.2	15.0	14.8				
4	17.1	17.1	16.8		16.5	16.5	16.5	16.3	16.0	15.8	15.5	15.3	14.9	14.5
5	17.1		16.8		16.5	16.5	16.5	16.3	16.0	15.8	15.5	15.3	14.9	14.5
6	17.1		16.8		16.5	16.5	16.5	16.3	16.0	15.8	15.5	15.3	14.9	14.5
7	14.5	14.5	14.3		14.0	14.0	14.0	13.8	13.6	13.4	13.2	13.0	12.7	12.3
8	17.1	17.1	16.8		16.5	16.5	16.5	16.3	16.0	15.8	15.5	15.3	14.9	14.5
9	17.1		16.8		16.5	16.5	16.5	16.3	16.0	15.8	15.5	15.3	14.9	14.5
10	17.1		16.8		16.5	16.5	16.5	16.3	16.0	15.8	15.5	15.3	14.9	14.5
11	17.4		17.2		16.7	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.3	15.8
12	17.4	17.2	17.1	16.9	16.8	16.8	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.5	16.1
13	17.8	17.7	17.5	17.3	17.2	17.2	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.0	16.7
14	18.2		17.9		17.6	17.6	17.1	16.6	16.4	16.1	15.9	15.5	15.2	14.8
15	18.2		18.0		17.5	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	17.3	16.9
16	18.2	18.1	17.9	17.7	17.6	17.6	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.4	17.1
17	18.2		18.0		17.5	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	17.3	16.9
18	18.2		18.2		18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	17.7	17.0
19	18.2		18.0		17.5	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	17.3	16.9
20	18.2		18.2		18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	17.7	17.0
21	18.2		18.0		17.5	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	17.3	16.9
22	18.6	18.6	18.2		17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.4
23	18.6		18.2		17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9				
24	18.6		18.3		18.0	18.0	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.7	17.1
25	18.6	18.5	18.3	18.1	18.0	18.0	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.8	17.5
26	18.6		18.3		18.0	18.0	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.7	17.1
27	18.6	18.5	18.3	18.1	18.0	18.0	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.8	17.5
28	20.0		19.6		19.2	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2	19.1	18.6	18.0
29	20.0	20.0	19.6		19.2	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2	19.1	18.6	18.0
30	17.1	17.1	17.1		17.1	16.8	16.2	15.7	15.4					
31	20.0		20.0		20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	19.7	19.2	18.7	13.7
32	20.0		20.0		20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0				
33	20.0	20.0	20.0		20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	19.4	13.7
34	17.1		17.1		17.1	16.8	16.2	15.7	15.4	15.1	14.8	14.4	14.0	13.6
35	17.1		17.1		17.1	16.8	16.2	15.7	15.4	15.1	14.8	14.4	14.0	13.6
36	17.1		17.1		17.1	16.8	16.2	15.7	15.4	15.1	14.8	14.4	14.0	13.6
37	14.5		14.5		14.5	14.3	13.8	13.3	13.1	12.8	12.6	12.2	11.9	11.6
38	17.1		17.1		17.1	16.8	16.2	15.7	15.4	15.1	14.8	14.4	14.0	13.6
39	17.1		17.1		17.1	16.8	16.2	15.7	15.4	15.1	14.8	14.4	14.0	13.6
40	17.1		17.1		17.1	16.8	16.2	15.7	15.4	15.1	14.8	14.4	14.0	13.6
41	17.1		17.1		17.1	16.8	16.2	15.7	15.4	15.1	14.8	14.4	14.0	13.6
42	17.1		17.1		17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	16.8	16.4	13.7
43	17.1		17.1		17.1									
44	17.1		17.1		17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1				

Anexo 3 Esfuerzos permisibles del material SA-387-12 (1Cr-1/2Mo) (continuación)

ASME BPVC.II.D.C-2019

Line		Ma	iximum A	llowable	Stress, ks	si (Multip	ly by 100	0 to Obta	ain psi), f	or Metal	Temperat	ure, °F, N	lot Excee	ding	
No.	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650
1	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
2															
3															
4	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
5	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
6	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
7	9.6	6.1	3.8	2.4	1.5	0.94									
8	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
9	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
10	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
11	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
12	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
13	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
10	11.0			210	110										
14	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
15	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
16	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
17	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
18	11.3	7.2	4.5	2.8	1.9	1.2									
19	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
20	11.3	7.2	4.5	2.8	1.9	1.2									
21	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
22	113	72	45	28	18	11									
23				2.0											
24	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
25	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
26	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
27	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1									
20	112	72	15	20	10	11									
20	11.5	7.2	4.5	2.0	1.0	1.1									
29	11.5	1.2	4.5	2.0	1.0	1.1									
50															
31	9.3	6.3	4.2	2.8											
32															
33	9.3	6.3	4.2	2.8	1.9	1.2									
34	9.3	6.3	4.2	2.8	1.9	1.2									
35	9.3	6.3	4.2	2.8	1.9	1.2									
36	9.3	6.3	4.2	2.8	1.9	1.2									
37	79	51	36	21	16	10									
38	03	63	1.0 1.2	2.7	1.0	1.0									
30	93	63	4.2	2.0	19	1.2									
40	93	63	4.2	2.0	1.7	1.2									
40	9.5	63	т.2 Л. 2	2.0 2.8	1.7	1.2									
71	2.5	0.0	7.4	2.0	1.7	1.4									
42	9.3	6.3	4.2	2.8	1.9	1.2									
43															
44	I														

ANEXOS

Anexo 4 Módulo de elasticidad

ASME BPVC.II.D.C-2019

	1500	:	:	:	:	:	:	:	:	:	18.1	:	18.6	:		:	:	:	:	:											
	1400	:	:	:	:	17.7	18.9	19.4	20.5	:	19.2	:	19.1	:		1	ł	:	:	:											
	1300	:	:	:	:	19.2	20.5	21.1	22.0	:	20.3	:	19.6	:		:	÷	i	:	:											
ų	1200	:	15.4	:	15.3	20.4	21.8	22.5	23.3	16.5	21.2	:	20.1	:		:	ł	:	÷	:											
e. °F. 0	1100	18.0	17.9	:	17.8	21.5	23.0	23.7	24.4	19.2	22.0	:	20.6	:		;	;	;	:	:											
neratur	1000	20.4	20.2	:	20.1	22.4	23.9	24.7	25.4	21.5	22.8	:	21.1	22.9		:	:	:	:	:											
r Tem	900	22.5	22.3	:	22.2	23.2	24.8	25.6	26.2	23.2	23.5	;	21.6	23.5	24.4	23.7	24.5	23.7	24.5	24.2											
⁵ nsi. fo	800	24.2	24.0	:	23.9	23.9	25.6	26.3	26.9	24.5	24.1	25.1	22.1	24.1	25.0	24.3	25.1	24.3	25.1	24.9											
10, x 10	700	25.5	25.3	19.2	25.3	24.6	26.2	27.0	27.5	25.5	24.8	25.5	22.6	24.7	25.7	24.9	25.8	24.9	25.8	25.5											
e Giver	600	26.5	26.4	19.9	26.3	25.1	26.9	27.7	28.1	26.2	25.3	26.0	23.1	25.4	263	25.5	26.4	25.5	26.4	26.1		1/4Ni	¹ / ₂ Ni				-Cr-V	³ /4Cr	/ ₂ Mo	-'/ ₂ Mo	CIN IT .
= Valu	500	27.3	27.1	20.5	27.0	25.7	27.4	28.3	28.6	26.8	25.9	26.4	23.6	26.0	692	26.1	27.0	26.1	27.0	26.7	·sloe	-1/2Mo-	-1/2Mo-	- ¹ / ₂ Ni-V	2	,	i–¹/₂Mo	i–1Mo–	- //2Cr-	Ni-1Cr-	-1 OC 114
ticity E	400	27.9	27.7	21.2	27.6	26.2	28.0	28.8	29.2	27.3	26.4	27.0	24.1	26.6	27.5	2.6.7	27.6	26.7	27.6	27.3	naca ct	Mn-	Mn	Mn	Mn		N4∕°	2/4N	IN:	1^{4}_{4}	5
of Elast	300	28.3	28.1	21.9	28.0	26.7	28.5	29.4	29.7	27.9	27.0	27.5	24.6	27.2	28.1	27.2	28.2	27.2	28.2	27.9	tebueta	111011601									
adulus	200	28.8	28.6	22.5	28.5	27.1	29.0	29.9	30.3	28.4	27.5	28.2	25.1	27.8	28.7	27.8	28.8	27.8	28.8	28.5	pue m										
M	70	29.4	29.2	23.4	29.0	27.8	29.6	30.6	31.0	29.2	28.3	29.0	25.8	28.6	29.4	28.5	29.5	28.5	29.5	29.2	unabdz	מתוות									
	-100	30.3	30.1	24.5	30.0	28.6	30.5	31.4	31.9	30.2	29.2	30.2	26.6	29.7	303	29.4	30.4	29.4	30.4	30.2	slom_n	(10111-11.				els:					
	-200	30.8	30.6	:	30.5	29.0	30.9	31.9	32.4	30.7	29.7	;	27.1	30.3	30.9	29.9	31.0	29.9	31.0	30.6	a carbo					g Ni ste					
	-325	31.4	31.2	:	31.1	29.6	31.6	32.6	33.0	31.2	30.3	:	27.8	31.1	315	30.5	31.6	30.5	31.6	31.0	llowin					llowin					
	Materials	Carbon steels with $C \le 0.30\%$	Carbon steels with $C > 0.30\%$	Ductile cast iron	Material Group A [Note (1)]	Material Group B [Note (2)]	Material Group C [Note (3)]	Material Group D [Note (4)]	Material Group E [Note (5)]	Material Group F [Note [6]]	Material Group G [Note [7]]	Material Group H [Note (8)]	Material Group I [Note [9]]	Material Group J [Note (10)]	S13800 [Note (11)]	S15500 [Note [12]]	S45000 [Note (13)]	S17400 [Note [14]]	S17700 [Note (15)]	S66286 [Note (16)]	NOTES: (1) Matarial Groun A concists of the fr	$C^{-1}/_{4}Mo$	C- ¹ / ₂ Mo	Mn- ¹ / ₄ Mo	Mn- ¹ / ₂ Mo	(2) Material Group B consists of the fo	³ / ₄ Cr- ¹ / ₂ Ni-Cu	$^{3/4}$ Cr $^{-3/4}$ Ni–Cu–Al	[*] / ₂ Ni- [*] / ₂ Cr- [*] / ₄ Mo-V	1/2Ni-1/2Mo-V	2/ VI: T/ UN T VI VI

	Table Moduli of Elasticity <i>E</i> of Ferrous Mate	TM-1 rials for Given Temperatures (Cont'd)
LON	FES (CONT ^T D): 2 ¹ ₂ Ni 2 ³ ₄ Ni–1 ¹ / ₂ Cr– ¹ ₂ Mo–V 3 ³ / ₂ Ni	3 ¹ / ₂ Ni-1 ³ /4Cr ⁻¹ / ₂ Mo-V 4Ni-1 ¹ / ₂ Cr ⁻¹ / ₂ Mo-V 7Ni
(3)	Material Group C consists of the following l_{2} -2Cr steels: $l_{2}c_{1}-l_{3}Mo-V$ $l_{2}c_{1}-l_{4}Mo-Si$ $l_{2}c_{1}-l_{4}Mo-Si$ $l_{2}c_{1}-l_{5}Mo$ $1Cr^{-}l_{5}Mo$ $1Cr^{-}l_{2}Mo$	1Cr-1/2Mo-V 1/4Cr-1/2Mo 1/4Cr-1/2Mo-Si 1/4Cr-1/2Mo-Ti 2Cr-1/2Mo-Ti
(4)	Material Group D consists of the following $2^{1}\!/_{4}\text{-}3\text{Cr}$ steels: $2^{1}\!/_{4}\text{Cr}\text{-}1\text{Mo}$ 3Cr-1Mo	3Cr-1Mo- ¹ / ₄ V-Cb-Ca 3Cr-1Mo- ¹ / ₄ V-Ti-B
(2)	Material Group E consists of the following 5–9Cr steels: 5Gr ^{-1/2} Mo–Si 5Cr ^{-1/2} Mo–Si 5Cr ^{-1/2} Mo–Ti	7Cr ⁻¹ / ₂ Mo 9Cr–Mo, including variations thereof
(9)	Material Group F consists of the following chromium steels: 12Cr-Al 13Cr	15Cr 17Cr
(2)	Material Group G consists of the following austenitic steels: 16Cr–12Ni–2Mo 16Cr–12Ni–2Mo–N 18Cr–3Ni–13Mn 18Cr–8Ni–N 18Cr–8Ni–N 18Cr–8Ni–N	18Cr-10Ni-Ti 18Cr-13Ni-3Mo 18Cr-18Ni-2Si 21Cr-6Ni-9Mn 22Cr-13Ni-5Mn 23Cr-12Ni
	18Cr–80i.5e 18Cr–10Ni–Cb	25Cr-20Ni
(8)	Material Group H consists of the following duplex (austenitic-ferritic) stainle 18Cr-5Ni-3Mo 22Cr-2Ni-Mo-N	ss steels: 25Cr–6Ni–Mo–N 25Cr–6.SNi–3Mo–N
	22Cr-5Ni-3Mo-N 23Cr-4Ni-Mo-Cu-N 24Cr-10Ni-4Mo-N 25Cr-5Ni-3Mo-2Cu	25Cr-7Ni-3Mo-W-Cu-N 25Cr-7Ni-4Mo-N 25Cr-7.5Ni-3.5Mo-N-Cu-W 29Cr-6.5Ni-2Mo-N
(6)	Material Group I consists of the following high-silicon austenitic steels: 14Cr–16Ni–6Si–Cu–Mo 17.5Cr–17.5Ni–5.3Si	18Cr-8Ni-4Si-N 18Cr-20Ni-5.5Si

Anexo 4 Módulo de elasticidad (continuación)

ASME BPVC II D.C-2019

						Ta	bular Value	s for	-igur	e G				
$D_o/t L/D$	o A	D_o/t	T/D	• A	D_o/t	Γ/D	<i>•</i> A	D_o/t	L/D_o	Υ	$D_o/t L/D_o A$		$D_o/t L/D$	• A
4 2.2	0.959 -01	8	5.0	0.184 -01	20	3.0	0.446 -02	30	30.0	0.122 -02	60 0.074 0.954 -	-01	100 0.20	0.831-02
2.6	0.884		7.0	0.179		3.4	0.388		50.0	0.122	0.10 0.556		0.4	0.364
3.0	0.839		10.0	0.176		4.0	0.342				0.14 0.323		0.5	0.283
4.0	0.783		20.0	0.174		5.0	0.308	40	0.12	0.864 -01	0.2 0.193		0.8	0.170
5.0	0.759		50.0	0.174		7.0	0.287		0.2	0.385	0.4 0.812 -	-02	1.0	0.134
7.0	0.739					10.0	0.280		0.3	0.222	0.6 0.510		2.0	0.641 -03
10.0	0.729	10	יב י	5 0 964 - 01		40.0	0.275		0 4	0155	0.8 0.371		4.0	0.305
30.0	0.720	-	20	0.720		50.0	0.275		0.6	0.958 -02	1.0 0.291		6.0	0.195
50.0	0.720		10	0.463					0.80	0.691	2.0 0.138		8.0	0.142
			1 7	0.371	75	0.7	0877-01		10	0 539	3.0 0.886 -	-03	10.0	0.124
5 1.4	0.929 -01		2.0	0.201	Ì	0.3	0.484		1.2	0.441	4.0 0.645		14.0	0.114
1.6	0.802		2.4	0.165		0.5	0.250		2.0	0.252	6.0 0.409		25.0	0.110
2.0	0.658		3.0	0.139		0.8	0.143		4.0	0.117	7.0 0.364		50.0	0.110
2.4	0.586		4.0	0.124		1.0	0.111		5.0	0.912 -03	8.0 0.341			
3.0	0.532		5.0	0.118		1.2	0.902 -02		6.0	0.804	10.0 0.322		125 0.0	5 0.480 -01
4.0	0.494		7.0	0.114		2.0	0.508		7.0	0.756	14.0 0.310		0.0	5 0.344
5.0	0.478		10.0	0.112		3.0	0.323		8.0	0.731	40.0 0.306		0.0	3 0.210
7.0	0.465		16.0	0.111		3.4	0.278		10.0	0.708	50.0 0.306		0.10	0.148
10.0	0.459		50.0	0.111		4.0	0.235		16.0	0.692			0.1	4 0.917 -02
30.0	0.454					4.4	0.219		40.0	0.688	80 0.054 0.990 -	-01	0.2	0.578
50.0	0.453	15	0.3	4 0.968 -01		5.0	0.204		50.0	0.688	0.07 0.608		0.4	0.257
			0.4	0.770		6.0	0.191				0.09 0.391		0.6	0.165
6 1.2	0.837 -01		0.6	0.453		7.0	0.186	50	0.08	3 0.930 -01	0.10 0.328		0.8	0.121
1.6	0.584		1.0	0.244		10.0	0.180		0.1	0.782	0.14 0.196		1.0	0.955 -03
2.0	0.469		1.2	0.197		30.0	0.176		0.2	0.263	0.20 0.120		2.0	0.459
2.4	0.411		2.0	0.109		50.0	0.176		0.3	0.154	0.24 0.950 -	-02	4.0	0.220
3.0	0.369		2.4	0.890 -02					0.4	0.108	0.4 0.516		6.0	0.141
4.0	0.341		3.0	0.691	30	0.1	5 0.904 -01		0.6	0.677 -02	0.6 0.328		0.0	0.904 -04
5.0	0.329		4.0	0.573		0.2	0.635		0.8	0.490	0.8 0.239		10.0	0.837
7.0	0.320		5.0	0.534		0.3	0.357		1.0	0.384	1.0 0.188		12.0	0.770
10.0	0.316		6.0	0.516		0.4	0.246		2.0	0.181	2.0 0.895 -	-03	14.0	0.740
30.0	0.312		10.0	0.497		0.6	0.150		4.0	0.842 -03	4.0 0.424		20.0	0.713
50.0	0.312		40.0	0.490		0.8	0.108		5.0	0.652	6.6 0.241		40.0	0.704
			50.0	0.490		1.0	0.838 -02		6.0	0.548	8.0 0.205		50.0	0.704
8 0.7	4 0.968 -01					1.2	0.683		7.0	0.502	10.0 0.186			
0.8	0.875	20	0.7	4 0.982 -01		2.0	0.388		8.0	0.478	14.0 0.176		150 0.0	5 0.338 -01
1.0	0.660		0.4	0.477		3.0	0.246		10.0	0.458	30.0 0.172		0.0	5 0.244
1.6	0.372		0.6	0.286		4.0	0.177		12.0	0.449	50.0 0.172		0.0	3 0.151
2.0	0.285		0.8	0.203		4.4	0.161		16.0	0.444			0.10	0.108
2.4	0.242		1.0	0.156		5.0	0.147		40.0	0.440	100 0.05 0.741 -	-01	0.1	2 0.833 -02
3.0	0.212		1.2	0.127		6.0	0.136	_	50.0	0.440	0.07 0.398		0.1.0	5 0.569

ASME BPVC II D.C-2019

Anexo 5 Determinación del factor A

Anexo 5 Determinación del factor A (continuación)

				Tabulaı	ו או r Values fo	ole נ ר Fig	ure G	(Cont'd)						
$D_o/t L/D_o$	Α	$D_o/t L/D_o A$	1	$D_o/t L/D_o$	A	D_o/t	L/D_o	Α	D_o/t	L/D_o	Α	D_o/t	L/D_o	Α
150 0.6	0.125 -02	200 12.0 0.338 -04	+	300 0.05	0.923 -02	400	0.4	0.429 -03	500	12.0 0	.880 -05	800	0.6	0.980 -04
1.0	0.726 -03	14.0 0.309		0.06	0.690		0.6	0.280					0.8	0.728
2.0	0.349	16.0 0.295		30.0	8 0.452		0.8	0.207	600	0.05 0	270-02		1.0	0.580
4.0	0.168	20.0 0.283		0.10	0.334		1.0	0.165		0.06 0	208		2.0	0.286
6.0	0.108	40.0 0.275		0.12	0.264		2.0	0.808 -04		0.08 0	.142		4.0	0.140
8.0	0.787 -04	50.0 0.275		0.2	0.143		4.0	0.393		0.10 0	108		5.0	0.112
10.0	0.619			0.4	0.666 -03		6.0	0.257		0.12 0	868 -03		5.6	0.992 -05
12.0	0.553	250 0.05 0.129 -01		0.6	0.433		8.0	0.189		0.16 0	624			
16.0	0.510	0.06 0.955 -02		0.8	0.321		10,0	0.148		0.2 0	486			
20.0	0.498	0.08 0.617		1.0	0.254		14.0	0.102		0.4 0	231			
40.0	0.489	0.10 0.452		2.0	0.124		16.0	0.882 -05		0.6 0	.151	1000	1000	00 0110
50.0	0.489	0.14 0.293		4.0	0.602 -04					0.8 0	.112	TUUU	50.0	0.113 -02
		0.2 0.191		6.0	0.393	500	0.05	0.370 -02		1.0 0	894 -04		00.0	0.722 0.723
200 0.05	0.196 -01	0.4 0.881 -03		8.0	0.287		0.06	0.284		2.0 0	439		0.00	0 54.1
0.06	0.143	0.6 0.572		10.0	0.225		0.08	0.192		4.0 0	216		0.0	0.388
0.08	0.909 -02	0.8 0.422		14.0	0.156		0,10	0.145		6,0 0	141		710	0000
0.10	0.659	1.0 0.335		16.0	0.142		0.12	0.116		8.0 0	104		01-0	0.201
0.14	0.421	2.0 0.163		20.0	0.130		0.16	0.830 -03		8.4 0	.988 -05		7.0	0 106
0.2	0.272	4.0 0.789 -04		40.0	0.123		0.2	0.645					+ C	0.506 -04
0.3	0.171	6.0 0.513		50.0	0.122		0.4	0.305	800	0.05 0	165 -02		10	0.414
0.5	0.976 -03	8.0 0.377					0.6	0.199		0.06 0	.129		2.0	0.204
0.8	0.592	10.0 0.293		400 0.05	0.549 -02		0.8	0.148		0.08 0	892 -03		0.1	0.101
1.0	0.469	12.0 0.238		0.06	0.417		1.0	0.118		0.10 0	.682		4.7	0.957 -05
2.0	0.227	14.0 0.210		30.0	8 0.278		2.0	0.579 -04		0.12 0	551		1	
4.0	0.110	16.0 0.196		0.10	0.208		4.0	0.282		0.16 0	398			
6.0	0.711 -04	20.0 0.184		0.12	0.166		6.0	0.185		0.2 0	312			
8.0	0.520	40.0 0.176		0.16	0.118		8.0	0.137		0.4 0	.149			
10.0	0.403	500 0176		5	00 1 100		0.0	1010						

ASME BPVC II D.C-2019

Anexo 6 Determinación del valor B, material SA-516-70 (acero al carbono)

Temp., *F	А	B, psi	Temp., °F	Α	B, psi
300	0.176 -04	0.250 +03	700	0.564 -03	0.680 +04
	0.783 -03	0.113 +05		0.100 -02	0.800
	0.800	0.114		0.300	0.101 +05
	0.900	0.118		0.100 -01	0.121
	0.100 -02	0.123		0.264	0.138
	0.200	0.150		0.100 +00	0.138
	0.300	0.162			
	0.400	0.168	800	0.223 -04	0.250 +03
	0.500	0.172		0.505 -03	0.571 + 04
	0.250 -01	0.176		0.100 -02	0.710
	0.100 +00	0.176		0.150	0.795
				0.200	0.840
500	0.194 -04	0.250 +03		0.300	0.890
	0.675 -03	0.900 + 04		0.319 -01	0.124 +05
	0.900	0.965		0.100 + 00	0.124
	0.100 -02	0.100 +05			
	0.250	0.120	900	0 237 -04	0.250 ±03
	0,300	0.124	,00	0.428 - 03	0.449 +04
	0.800	0.142		0.420 - 03	0,449 +04
	0.100 -01	0.146		0.150	0.680
	0.150	0.155		0.200	0.000
	0.200	0.161		0.200	0.733
	0.280	0.169		0.300	0.920
	0.100 +00	0.169		0.000 -01	0.111 +05
				0.300 = 01	0.111 ± 0.00
				0.100 +00	0.111

Anexo 7 Determinación del factor B, material SA-387-12 (1Cr-1/2Mo)

	Ta	Table abular Values	NFN-6 for <mark>Figure</mark>	NFN-6	
Temp., °F	А	B, psi	Temp., °F	А	B, psi
100	0.100 -04	0.161 +03	800	0.100 -02	0.116
	0.879 -03	0.146 +05		0.200	0.123
	0.100 -02	0.149		0.400	0.129
	0.100 - 01	0.199		0.100 -01	0.135
	0.150	0.203		0.500	0.144
400	0.100 -04	0.146 +03	1100	0.100 -04	0.124 +03
	0.847 -03	0.129 +05		0.786 -03	0.101 +05
	0.100 -02	0.131		0.100 -02	0.104
	0.300	0.144		0.200	0.110
	0.100 -01	0.158		0.400	0.116
	0.400	0.168		0.100 -01	0.120
				0.200	0.123
600	0.100 -04	0.142 +03		0.600	0.126
	0.820 -03	0.121 +05			
	0.100 -02	0.124	1200	0.100 -04	0.116 +03
	0.500	0.140		0.839 -03	0.994 +04
	0.100 -01	0.145		0.100 +00	0.994
	0.300	0.150			
	0.100 +00	0.155	1300	0.100 -04	0.112 +03
				0.493 -03	0.567 +04
800	0.100 -04	0.129 +03		0.100 +00	0.567
	0,851 -03	0,114 +05			

ASME BPVC.II.D.C-2019

	Ta	Table abular Values	e NFN-7 for <mark>Figure</mark>	• NFN-7	
Temp., °F	А	B, psi	Temp., °F	А	B, psi
100	0.100 -04	0.140 +03	400	0.100 -04	0.132 +03
	0.825 -03	0.121 +05		0.745 -03	0.104 +05
	0.100 -02	0.124		0.100 -02	0,106
	0.200	0.133		0.400	0,116
	0.600	0.151		0.100 -01	0.123
	0.100 - 01	0.160		0.400	0.134
	0.200	0.173			
	0.250	0.178	700	0.100 -04	0.125 +03
				0.722 -03	0.953 +04
200	0.100 -04	0.143 +03		0.100 -02	0.967
	0.777 -03	0.113 +05		0.200	0,100 +05
	0.100 -02	0.116		0.800	0.108
	0.400	0.133		0.200 -01	0.113
	0.100 -01	0.144		0.600	0.120
	0.400	0.157			

Referencias Bibliográficas

Admin. (15 de Junio de 2006). Especificaciones para el diseño y fabricación de recipientes a presión. Obtenido de Estrucplan : https://estrucplan.com.ar/especificaciones-para-eldiseno-y-fabricacion-de-recipientes-a-presion-parte-1/#:~:text=Tolerancia%20por%20corrosi%C3%B3n%3A%20Las%20superficies,por%20e rosi%C3%B3n%20%C3%B3%20abrasi%C3%B3n%20mec%C3%A1nica

- Aguilar López, R., Maya Yescas, R., y López Pérez, P. A. (2011). *Ingeniería de Reactores Químicos Catalíticos.* Alemania: Editorial Academica Española.
- Alvarado, J. G., Delgado Linares, J. G., y Medina, H. R. (8 de septiembre de 2015). *Rol de la Química Orgánica en los procesos de conversión de hidrocarburos.* Obtenido de http://www.scielo.org.mx: http://dx.doi.org/10.1016/j.eq.2015.08.001
- ANSI. (09 de 04 de 2022). American National Standards Institute ANSI. Obtenido de ANSI home: https://www.ansi.org/
- API. (13 de Enero de 2022). *Institute, American Petroleum*. Obtenido de https://www.api.org/products-and-services/individual-certificationprograms/certifications/api510
- Api.org. (09 de 04 de 2022). *Estandares*. Obtenido de Api.org: https://www.api.org/productsand-services/es/standards
- Arbel, A., Huang, Z., Rinard, I. H., y Shinnar, R. (1995a). Dynamic and Control of Fluidized Catalytic Crackers. 1. Modeling of the Current Generation of FCC s.: Industrial Engineering Chemistry Research 34, 1228.
- Arbel, A., Rinard, I. H., y Shinar, R. (1995b). *Dynamics and Control of Fluidized Catalytic Crackers. 2.* Multiple Steady States and Instabilities.: Industrial Engineering Chemistry Research. 34, 3014.
- Arredondo, L. A. (19 de Enero de 2019). Normas Internacionales de Diseño de Recipientes a Presión: Comparación de Procedimientos para Determinación de Espesor Mínimo Requerido. Obtenido de https://www.uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/103
- ASME, T. A. (2019). VIII Rules For Construction Of Pressure Vessels. New York, USA.
- Astm.org. (09 de 04 de 2022). *Detailed overview Overview About Us*. Obtenido de Astm.org: https://www.astm.org/about/overview/detailed-overview.html
- Austin, G. T. (1988). Manual de Procesos Químicos en la Industria. U.S.A: McGraw-Hill.
- Barreira, V. M. (2007). Estudio Hidrodinámico de un lecho fluidizado. En M. Rhodes, Introduction to Particle Technology (págs. 18-). John Wiley y Sons.
- Beer, F. P., Jhonston, E. R., Mazurek, D. F., y Eisenberg, E. R. (2010). *Mecanica Vectorial para Ingenieros.* México: McGraw Hill.
- Blanding, F. H. (1953.). *Reaction rates in Catalytic Cracking of petroleum.* Industrial y Engineering Chemistry Research. 45(6): 1186 -1197.

- Caldwell, G., y Dearwater, J. (1991). Model Predictive Control Applied to FCC Units. Preprints of CPC IV. Fourth International Conference on Chemical Process Control. Feb. 17-22. 1991. South Padre Island, Texas. South Padre Island, Texas.
- Conesa, J. A. (2010). Reactores de lecho fluidizado. En J. A. Conesa, *Diseño de reactores heterogéneos* (pág. 148). Universidad de Alicante.

Davidson, J. F., y Harrison, D. (1963). *Fluidised Particles*. Cambridge University Press.

- Delgado Linares, J. G., Delgado Linares, G. A., y Mercado Ojeda, R. A. (2009). *Balances de masa y energía simplificados, aplicados a un proceso de craqueo catalítico de petróleo.* Educación química, 20(4), 456-460: Recuperado en 10 de junio de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttextypid=S0187-893X2009000400010ylng=esytlng=es
- Diario Oficial de la Federación. (2020, 01 de julio). *Ley de Infraestructura de la Calidad.* CDMX. Obtenido de https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lical.htm
- Ergun, S. (1952). *Fluid Flow Through Packed Columns.* Chemical Engineering Progress, 48 84 94.
- Félix Flores, M. G. (2006). Simulación del Proceso FCC: Caracterización de las Corrientes de Alimentación y Productos del Riser a Través de la Función de Distribución Gamma. Celaya Guanajuato: [Tesis de Doctorado, Instituto Tecnológico de Celaya: Departamento de Ingeniería Química].

Fitzgerald, R. W. (2007). *Mecánica de Materiales*. México: Alfaomega.

- Froment, G. y. (1990). Chemical reactor analysis and design. New York: John Wiley y Sons.
- García Rosas, M. (2016). Estudio del efecto del tipo de carga al proceso de desintegración catalítica fluidizada a nivel micro-reacción (Tesis). Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional; Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas Departamento de Ingeniería Química Petrolera.
- Gary, J. H. (2007). *Petroleum Refining Technology and Economics 5th edicion .* New York USA: CRC Press Taylor y Francis Group.
- Geldart, D. (1973). Types of Gas Fluidization. Powder Technology, 7 285 292.
- Gibilaro, L. (2001). *Fluidization Dynamics*. Butterworth-Heinemann.
- Grace Davison. (1993). *Guia para Craqueo Catalítico Fluidizado.* Baltimore, Maryland: W. R. Grace y Co.-Conn.
- Harmsen, J. (2019). Industrial Process Scale-Up . Amsterdam: Elservier.
- Hernández Barajas , J. R. (2003). *Simulación Dinámica del Proceso FCC: Una Propuesta Cinética Basada en Distribuciones de Probabilidad.* Celaya Guanajuato: [Tesis de Doctorado, Instituto Tecnológico de Celaya: Departamento de Ingeniería Química].
- Hernández Barajas, J. R. (2003). *Simulación Dinámica del Proceso FCC: Una Propuesta Cinética Basada en Distribuciones de Probabilidad.* Celaya Guanajuato: [Tesis de Doctorado, Instituto Tecnológico de Celaya: Departamento de Ingeniería Química].

Hibbeler, R. C. (2011). Mecánica de Materiales. México: Pearson.
- Ilsen Önsan, Z., y Kerim Avci, A. (2016). *Multiphase Catalytic Reactors; Theory, Design, Manufacturing, and Applications*. Canada: Wiley.
- Jacob, S. M., Gross, B., y Weekman, V. W. (1976). *A lumping and reaction scheme for catalytic cracking.* A.I.Ch.E. Journal 22, 701-713.
- Kunii, D., y Levenspiel, O. (1991). *Fluidization Engineering*. Boston London: Butterworth Heinemann.
- Larocca, M., Ng, S., y de Lasa, H. (1990). *Fast Catalytic Cracking of Heavy Gas Oils: Modeling coke deactivation.* Ind. Eng. Chem. Res, 29, 171-180.
- Lee, B. I., Chen, Y. W., Huang, T. N., y Pan, W. Y. (1989). *Four-Lump Kinetic Model for Fluid Catalytic Cracking Process.* The Canadian Journal of Chemical Engineering. 67, 615.
- Levenspiel, O. (2015). Ingeniería de las Reacciones Químicas. España: Reverte.
- Malay, P., Milene, B. J., y Rohani, S. (1999). *The Modified Dynamic Model of a Riser Type Fluid Catalytic Cracking Unit.* The Canadian Journal of Chemical Engineering. 77, 169.
- Martín, I., Salcedo, R., y Font, R. (2011). Mecánica de fluidos Tema 4. Transporte, Cantidad, Movimiento sólido-fluido. En D. Kunii, y O. Levenspiel, *Fluidization Engineering*. Butterworth.
- Megyesy, E. F. (1992). Manual de Recipientes a Presión. México : Limusa.
- Mena Hernández, U., y Pérez Rocha, L. E. (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles "Diseño por Sismo".* México: Comisión Federal de Electricidad.
- Nace, D. M., Voltz, S. E., y Weekman, V. W. (1971). Application of a Kinetic Model for Catalytic Cracking. Effects of Charge Stocks. Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development. 10, 530.
- Nava, D. (24 de 04 de 2020). Producción de petróleo en México de marzo, la más alta en 18 meses. *El Financiero*, págs. https://www.elfinanciero.com.mx/economia/produccion-de-petroleo-en-mexico-de-marzo-la-mas-alta-en-18-meses.
- Pytel, A., y Singer, F. L. (1994). Resistencia de Materiales. México: Harla.
- Ramos Carpio, M. (1997). *Refino de Petroleo, Gas Natural y Petroquimica.* Fundación Fomento Innovación Industrial.
- Rhodes, M. (2008). Introduction to Particle Technology. Great Britain : John Wiley y Sons.
- Sadeghbeigi, R. (2020). Fluid Catalytic Cracking Handbook 3rd Edition An Expert Guide to the Practical Operation, Design, and Optimization of FCC Units. https://doi.org/10.1016/C2010-0-67291-9. Obtenido de https://doi.org/10.1016/C2010-0-67291-9
- Sadeghbeigi, R. (2020). Fluid Catalytic Cracking Handbook An Expert Guide to the Practical Operation, Design, and Optimization of FCC Units. United States: Elsevier.
- Sadeghbeigi, R. (2020). Fluid Catalytic Cracking Handbook An Expert Guide to the Practical Operation, Design, and Optimization of FCC Units. United States: Elsevier.
- Sadeghbeigi, R. (2020). Fluid Catalytic Cracking Handbook An Expert Guide to the Practical Operation, Design, and Optimization of FCC Units. Oxford : Elsevier.

- Speight, J. G. (2006). *The Chemistry and Technology of Petroleum.* Broken Sound Parkway New York: Taylor y Francis Group.
- Speight, J. G. (2007). *The Chemistry and Technology of Petroleum*. United States Of America : CRC Press.
- Speight, J. G. (2011). The Refinery of the Future. United Kingdom: Elsevier.
- Stewart, M. (2013). Pressure Vessels Field Manual. 225 Wyman Street, Waltham: Elsevier.
- Thabang, S. W., Raj Patel, I. M., Mujtaba, y Yakubu M., J. (2022). A Review of Modelling of the FCC Unit–Part I: The Riser. Suiza: University of Bradford.
- Villaseñor Krause, A. (2019). *Curso de Proceso de Refinación: Sesión 3.* Ciudad de México : PEMEX; Gerencia de Desarrollo de Proyectos Dirección Corporativa de Planeación, Coordinación y Desempeño.
- Weekman, V. W. (1968). A Model of Catalytic Cracking Conversion in Fixed, Moving, and Fluid-Bed Reactor. Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development. 7, 90.
- Weekman, V. W. (1969). *Kinetics and Dynamics of Catalytic Cracking Selectivity in Fixed-Bed Reactors.* Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development. 8, 385.
- Yen, L. C. (1987). *Kinetic Modelling of Fluid Catalytic Cracking.* Texas: Presented at the AIChE. Spring Nat. Meet., abril 2-6, Houston.