

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, SEDE QUITO.

FACULTAD DE INGENIERÍAS.

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA.

Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

TEMA:

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN REACTOR PROTOTIPO QUE
SOPORTE CONDICIONES DE HIDROGENACIÓN PARA CRUDO
PESADO CON UNA CAPACIDAD DE 1 GALÓN POR SEGUNDO
PARA PETROECUADOR”**

AUTORES:

ANDY CERDA AMILKAR PATRICIO

CHECA RAMÍREZ PABLO ANDRÉS

DIRECTOR:

ING. FABIO OBANDO.

QUITO, Marzo 2010.

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.

Nosotros, Andy Cerda Amilkar Patricio y Checa Ramírez Pablo Andrés, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Quito, 22 de marzo de 2010.

Andy Cerda Amilkar Patricio.

Checa Ramírez Pablo Andrés

CERTIFICACIÓN.

Certifico que el presente trabajo previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico ha sido realizado en su totalidad por los señores: Andy Cerda Amilkar Patricio y Checa Ramírez Pablo Andrés.

Quito, Marzo 22 del 2010.

Ing. Fabio Obando.
DIRECTOR DE TESIS

DEDICATORIA.

Dedico el presente trabajo a Dios,
por otorgarme la sabiduría, fortalecer mi corazón, iluminar mi mente
y la salud para lograrlo.

A mis queridos Padres Gonzalo y Anita, por ser mí modelo de superación, por su comprensión y ayuda en momentos buenos y malos, por sus constantes desvelos, por enseñarme a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad, ni fallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia, mi empeño y todo ello con gran dosis de amor y sin pedir nada a cambio.

A mis hermanos Xavier, Santiago y mi hermana Anita, compañeros inseparables en momentos de alegría, tristezas y triunfos, quienes estuvieron muy cerca desinteresada y generosamente me incentivaron para la culminación de mi formación profesional.

A Paola, de manera especial por su paciencia, comprensión, amor, fuerza, y por ser tal y como es.

A todos ellos, muchas gracias de todo corazón.

Pablo Andrés Checa Ramírez

DEDICATORIA.

El presente trabajo va dedicado a Dios por la vida que me ha dado en este maravilloso mundo, que me enriquece con sabiduría cada día,

A mis padres, Carmen Elisa Cerda y Patricio Maximiliano Andy por su incondicional apoyo y confianza frente a todas las adversidades duras que tuvimos que superar juntos, por los años que tuvimos que pasar alejados de nuestro hogar para mi mejor educación y el incansable sacrificio y constancia de enseñarme el valor de la vida y la superación.

Mis hermanas, Andrea y Tamara que son mi compañía diaria y con quienes vivimos nuevos anhelos y el momento de llegar a ser verdaderos profesionales y apoyarnos mutuamente, toda mi familia que en todo momento me enseñan el esfuerzo para llegar a ser mejor cada día.

Y, a todos con quienes he compartido mis mejores momentos de mi niñez y juventud,

De corazón muchísimas gracias por todo y sigamos siempre en el camino de la amistad y de triunfos.

Amilkar Patricio Andy Cerda.

AGRADECIMIENTO.

Nuestros sinceros agradecimientos a las Autoridades Universitarias, a los Señores Catedráticos de la Carrera de Ingeniería Mecánica y de manera muy especial al Ing. Fabio Obando, Director de la presente Tesis, quienes en forma desinteresada y con sus elevados conocimientos, vocación de educadores, contribuyeron a forjar y moldear nuestra formación profesional.

Además nuestra gratitud a las Autoridades y Funcionarios del Instituto de Estudios del Petróleo (IEP) por intermedio del Centro de Transferencia de Tecnología (CTT), de PETROECUADOR, de forma especial al Dr. Edward Jiménez, Ph. D, e Ing. Carlos Jácome, quienes nos colaboraron con orientación y entrega de la información que nos permitió culminar con éxito el presente trabajo de investigación.

Sinceramente

Los Autores

INTRODUCCIÓN.

En el presente proyecto se presentan algunas de las características del proceso de selección, diseño y cálculo del reactor prototipo para hidroprocesamiento.

Con el enfoque creciente para reducir las impurezas del petróleo, el proceso de hidrotratamiento del crudo, se hace cada día más importante en las refinerías. Existen diferentes tecnologías para la remoción de las impurezas tales como el azufre, oxígeno y nitrógeno, sulfuros, aromáticos, etc., y una de las más usadas es el proceso donde se le agrega hidrógeno al petróleo para el rompimiento de las moléculas y enlaces.

La propuesta planteada para el diseño del reactor prototipo es colocar tres camas de catalizador con dos tipos de catalizador para hidroprocesamiento, los cuales serán operados en un reactor de cama fija.

La configuración óptima para el reactor prototipo de hidrotratamiento del petróleo, implica que una vez definidas las entradas y salidas del proceso en el reactor, es seleccionar los posibles equipos o insumos asociados y las especificaciones de los productos deseados.

El simulador INVENTOR 2010 será aplicado para verificar que el diseño del recipiente a presión se encuentre dentro de los parámetros planteados, para ello, dicho software provee la base datos necesaria, como las propiedades físicas, químicas, mecánicas y termodinámicas de los componentes y procesos.

ÍNDICE.

ÍNDICE GENERAL.

CAPÍTULO I.....	1
1 FUNDAMENTO TEÓRICO.....	1
1.1 ESTADO NATURAL DEL PETRÓLEO.	2
1.1.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	2
1.1.2 COMPONENTES DEL PETRÓLEO, DENOMINACIÓN QUÍMICA Y PRODUCTOS.	3
1.1.3 CLASIFICACIÓN DEL PETRÓLEO SEGÚN SU GRAVEDAD API.	3
1.1.4 PROCESODE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO.....	5
1.1.5 PROCESO DE SEPARACIÓN.....	6
1.1.6 PROCESOS DE CONVERSIÓN.	9
1.1.7 PROCESOS DE TRATAMIENTO.	13
1.2 BASES TEÓRICAS DE REACTORES QUÍMICOS.	18
1.2.1 CONCEPTOS GENERALES.....	18
1.2.2 TIPOS DE REACTORES QUÍMICOS.	21
1.3 REACTORES PARA HIDROPROCESAMIENTO DEL PETRÓLEO.	25
1.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS REACTORES PARA HIDROPROCESAMIENTO.	25
1.3.2 REACTORES DE CAMA FIJA (FIXED-BED REACTORS).....	26
1.3.3 REACTORES DE CAMA MOVIL (MOVING –BED REACTORS).....	30
1.3.4 REACTORES DE CAMA EN EBULLICIÓN (EBULLATED-BED REACTORES).	31
1.3.5 SLURRY PHASE REACTORS. (REACTOR PARA FASE SLURRY).	33
1.4 CODIGO ASME.	37
1.4.1 CLASIFICACIÓN DEL CÓDIGO A.S.M.E.	38
1.4.2 SECCIÓN VIII DIVISIÓN 1.....	39
1.4.3 ALCANCE DE LA SECCION VII, DIVISION 1.	40
1.5 RESUMEN DE FÓRMULAS.	41

CAPITULO II	42
2 ANÁLISIS DE PARÁMETROS PARA LA SELECCIÓN Y CÁLCULO DEL REACTOR PARA HIDROPROCESAMIENTO.....	42
2.1 SELECCIÓN DEL TIPO DE EQUIPO PARA HIDROTRATAMIENTO DE CRUDO PESADO (HDT).....	43
2.2 BASES TÉCNICAS PARA EL CÁLCULO DE UN REACTOR PARA HIDROPROCESAMIENTO.....	43
2.3 CAPACIDAD TEÓRICA DEL REACTOR PARA HIDROPROCESAMIENTO.....	44
2.4 REPOSICIÓN DE HIDRÓGENO.	44
2.5 REACCIONES QUÍMICAS Y CATALIZADOR.	45
2.5.1 <i>TERMODINÁMICA Y CINÉTICA</i>	45
2.5.2 <i>PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE HIDROTRATAMIENTO</i>	46
2.5.3 <i>REACCIONES QUÍMICAS PRINCIPALES:</i>	46
2.6 CALIDAD DE ALIMENTACIÓN (CARGA).....	48
2.6.1 <i>CARACTERÍSTICAS DE MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS</i>	49
2.7 PARÁMETROS DE OPERACIÓN.	49
2.7.1 <i>PRESIÓN TOTAL Y PARCIAL DE HIDRÓGENO</i>	50
2.7.2 <i>TEMPERATURA DE REACCIÓN</i>	52
2.7.3 <i>RELACIÓN HIDRÓGENO / CRUDO Y GAS DE RECICLO</i>	55
2.7.4 <i>VELOCIDAD ESPACIAL</i>	58
2.8 EL CATALIZADOR.....	60
2.8.1 <i>SELECCIÓN DE CATALIZADOR Y DISPOSICIÓN EN EL REACTOR.</i>	
61	
2.8.2 <i>TIPO DE CATALIZADORES UTILIZADOS EN HIDROPROCESOS.</i> .	62
2.8.3 <i>TAMAÑO Y FORMA DEL CATALIZADOR</i>	62
2.8.4 <i>CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL CATALIZADOR</i>	64
2.8.5 <i>SELECCIÓN DEL CATALIZADOR</i>	64
2.9 RESUMEN DE FÓRMULAS.	65

CAPITULO III.....	67
3 ANÁLISIS DE PARÁMETROS PARA CÁLCULO, DISEÑO, SELECCIÓN Y SIMULACIÓN DEL REACTOR PROTOTIPO PARA HIDROPROCESAMIENTO.	67
3.1 DEFINICIÓN DE CONCEPTOS.....	68
3.2 BASES PARA EL CÁLCULO.	68
3.3 RECIPIENTE A PRESIÓN.....	68
3.3.1 TIPOS DE RECIPIENTES.	69
3.3.2 PRESIÓN DE OPERACIÓN (P_o).	70
3.3.3 PRESIÓN DE DISEÑO (P).	70
3.4 PRESIÓN DE TRABAJO MÁXIMA PERMISIBLE.	71
3.5 MATERIAL PARA RECIPIENTES A PRESIÓN.....	72
3.5.1 CONSIDERACIONES PARA EL MATERIAL.....	72
3.5.2 SELECCIÓN DE MATERIAL.	73
3.5.3 ESFUERZO DE DISEÑO A LA TENSION (S).	74
3.6 EFICIENCIA DE LAS SOLDADURAS (E).	75
3.7 ESFUERZO DE LAS COSTURAS.	76
3.7.1 ESFUERZO DE LA COSTURA CIRCUNFERENCIAL.....	76
3.7.2 ESFUERZO DE LA COSTURA LONGITUDINAL.....	77
3.7.3 FACTOR DE CORROSIÓN ADMISIBLE.....	77
3.7.4 ESPESOR FINAL PARA EL ESFUERZO CIRCUNFERENCIAL Y LONGITUDINAL.	78
3.8 CABEZAL PARA RECIPIENTES A PRESIÓN.....	78
3.8.1 TIPOS DE CABEZALES.	78
3.8.2 TOMA DE DECISIÓN.	84
3.9 SELECCIÓN DE BRIDAS.	85
3.9.1 BRIDAS DESLIZABLE (SLIP ON) DE 900 LB.	85
3.10 DISEÑO DE TORNILLOS, SUJETADORES Y UNIONES.....	86
3.10.1 NORMAS O ESTÁNDARES Y DEFINICIONES PARA ROSCAS DE TORNILLOS.....	86
3.10.2 TENSION EN JUNTAS ATORNILLADAS.	87
3.10.3 ESPECIFICACIONES DE RESISTENCIA.	88
3.10.4 CARACTERÍSTICAS DE ROSCAS UNIFICADAS.	89

3.10.5	MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA MATERIALES FERROSOS...	90
3.10.6	FACTOR K_f DE REDUCCIÓN A LA FATIGA PARA ELEMENTOS ROSCADOS.	90
3.10.7	FACTOR K_d EFECTOS DE TEMPERATURA.	91
3.10.8	FACTOR k_c DE CONFIABILIDAD.	91
3.10.9	CONSTANTE DE RIGIDEZ k_b DEL PERNO.	92
3.10.10	RIGIDEZ DE LA JUNTA ATORNILLADA K_m .	92
3.10.11	RELACIÓN DE RIGIDEZ C .	92
3.10.12	FACTOR K_e DE REDUCCIÓN POR CONCENTRACIÓN DE ESFUERZO.	92
3.10.13	LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA PARA LA CARGA AXIAL. 93	
3.10.14	LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA DEL PERNO Se .	93
3.10.15	FUERZA TOTAL P DE SEPARACIÓN DE LOS PERNOS.	94
3.10.16	PRECARGA F_i CUANDO EXISTE CARGA A LA FATIGA.	94
3.10.17	CARGA DE PRUEBA F_p .	95
3.10.18	COMPROBACIÓN NUMERO DE PERNOS N (PROCESO INVERSO).	95
3.11	SELECCIÓN DEL EMPAQUE.	96
3.12	PROCESOS DE SOLDADURA.	96
3.12.1	SOLDADURA PARA PLACAS DE ESPESOR MAYORES 9/16 PULGADA.	97
3.13	SIMULACIÓN DE DISEÑO RECIPIENTES A PRESIÓN.	100
3.13.1	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN.	100
3.14	RESUMEN DE FÓRMULAS.	102
	LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA DEL PERNO Se .	103
	SOLDADURA PARA PLACAS DE ESPESOR MAYORES 9/16 PULGADA.	104
CAPITULO IV		105
4 SELECCIÓN, CÁLCULO, DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL REACTOR PROTOTIPO PARA HIDROPROCESAMIENTO.		105
4.1	SELECCIÓN DEL TIPO DE CARGA A ALIMENTAR.	106

4.1.1	<i>ESPECIFICACIONES DE LA CARGA</i>	106
4.1.2	<i>HIDRÓGENO</i>	107
4.2	SELECCIÓN DEL TIPO DE REACTOR PARA HIDROPROCESAMIENTO.....	108
4.2.1	<i>REACTORES DE CAMA FIJA (FIXED-BED REACTORS)</i>	108
4.3	SELECCIÓN DEL CATALIZADOR PARA HIDROPROCESAMIENTO. 109	
4.3.1	<i>CATALIZADOR HR-516 C</i>	110
4.3.2	<i>CATALIZADOR TIPO LD 145</i>	111
4.4	BASES DE CÁLCULO.....	113
4.5	RECIPIENTE A PRESIÓN.....	113
4.5.1	<i>CÁLCULO PRESIÓN DE DISEÑO (P)</i>	113
4.5.2	<i>SELECCIÓN DEL MATERIAL</i>	114
4.6	EFICIENCIA DE LAS SOLDADURAS (E).....	114
4.6.1	<i>FACTOR DE CORROSIÓN ADMISIBLE</i>	115
4.7	CÁLCULO DEL ESPESOR PARA EL CASCO.....	115
4.7.1	<i>SEGÚN EL ESFUERZO DE LA COSTURA CIRCUNFERENCIAL</i> ..	115
4.7.2	<i>PARA EL ESFUERZO DE LA COSTURA LONGITUDINAL</i>	116
4.7.3	<i>COMPARACIÓN DE ESPESORES DEL CASCO</i>	116
4.7.4	<i>ESPESOR FINAL DEL CASCO</i>	117
4.7.5	<i>PRESIÓN DE TRABAJO MÁXIMA PERMISIBLE</i>	118
4.8	CABEZAL DEL REACTOR.....	119
4.8.1	<i>CALCULO DEL ESPESOR DE CABEZA TORIESFÉRICA</i>	119
4.8.2	<i>CABEZAL HEMISFÉRICO</i>	122
4.8.3	<i>CABEZAL ELIPSOIDAL</i>	124
4.8.4	<i>TOMA DE DECISIÓN</i>	126
4.9	SELECCIÓN DE BRIDAS.....	127
4.9.1	<i>BRIDAS DESLIZABLE (SLIP-ON) DE 900 LB</i>	127
4.9.2	<i>BRIDAS DESLIZABLE (SLIP-ON) DE 900 LB</i>	128
4.9.3	<i>SELECCIÓN DE MATERIAL</i>	129
4.10	CÁLCULO DE PERNOS Y NÚMERO DE PERNOS PARA EL CASCO Y CABEZA DEL REACTOR.....	130
4.10.1	<i>ESPECIFICACIONES DE RESISTENCIA</i>	130

4.10.2	CARACTERÍSTICAS DE ROSCAS UNIFICADAS UNC Y UNF.....	130
4.10.3	MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA MATERIALES FERROSOS.	131
4.10.4	FACTOR K_f DE REDUCCIÓN A LA FATIGA PARA ELEMENTOS ROSCADOS.	131
4.10.5	FACTOR K_d EFECTOS DE TEMPERATURA.....	131
4.10.6	FACTOR k_c DE CONFIABILIDAD.....	132
4.10.7	CONSTANTE DE RIGIDEZ k_b DEL PERNO.	132
4.10.8	RIGIDEZ DE LA JUNTA ATORNILLADA K_m	133
4.10.9	RELACIÓN DE RIGIDÉZ C	133
4.10.10	FACTOR K_e DE REDUCCIÓN POR CONCENTRACIÓN DE ESFUERZO.	134
4.10.11	LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA PARA LA CARGA AXIAL. 134	
4.10.12	LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA DEL PERNO (S_e).....	135
4.10.13	FUERZA TOTAL P DE SEPARACIÓN DE LOS PERNOS.	135
4.10.14	PRECARGA (F_i) CUANDO EXISTE CARGA A LA FATIGA.	135
4.10.15	CARGA DE PRUEBA F_p	136
4.10.16	PRECARGA CUANDO EXISTE CARGA A LA FATIGA (F_i).	137
4.10.17	COMPROBACIÓN NUMERO DE PERNOS N (PROCESO INVERSO).	137
4.11	SELECCIÓN DEL EMPAQUE ENTRE BRIDAS.....	139
4.11.1	SELECCIÓN DE MATERIAL DEL EMPAQUE.....	139
4.12	PROCESOS DE SOLDADURA.....	140
4.12.1	REPRESENTACIÓN DEL TIPO DE JUNTA.	140
4.12.2	REPRESENTACIÓN DEL TIPO DE JUNTA ENTRE CASCO-BRIDA Y CABEZAL-BRIDA.....	141
4.13	PARÁMETROS DE OPERACIÓN.	144
4.14	DATOS PARA CÁLCULO.	145
4.14.1	SELECCIÓN DE BOQUILLAS DEL CRUDO PARA EL REACTOR. 145	
4.14.2	SELECCIÓN DE BOQUILLA PARA EL HIDROGENO PARA EL REACTOR.	147

4.15	CÁLCULO DE PERNOS Y NÚMERO DE PERNOS PARA LA LÍNEA DE ENTRADA Y SALIDA DEL CRUDO.....	149
4.15.1	ESPECIFICACIONES DE RESISTENCIA.....	149
4.15.2	CARACTERÍSTICAS DE ROSCAS UNIFICADAS UNC Y UNF.....	149
4.15.3	MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA MATERIALES FERROSOS.	150
4.15.4	FACTOR K_f DE REDUCCIÓN A LA FATIGA PARA ELEMENTOS ROSCADOS.....	150
4.15.5	FACTOR K_d EFECTOS DE TEMPERATURA.....	150
4.15.6	FACTOR k_c DE CONFIABILIDAD.....	151
4.15.7	CONSTANTE DE RIGIDEZ k_b DEL PERNO.....	151
4.15.8	RIGIDEZ DE LA JUNTA ATORNILLADA K_m	152
4.15.9	RELACIÓN DE RIGIDÉZ C	152
4.15.10	FACTOR K_e DE REDUCCIÓN POR CONCENTRACIÓN DE ESFUERZO.....	153
4.15.11	LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA PARA LA CARGA AXIAL. 153	
4.15.12	LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA DEL PERNO (S_e).....	154
4.15.13	FUERZA TOTAL P DE SEPARACIÓN DE LOS PERNOS.....	154
4.15.14	PRECARGA (F_i) CUANDO EXISTE CARGA A LA FATIGA.....	154
4.15.15	CARGA DE PRUEBA F_p	155
4.15.16	PRECARGA CUANDO EXISTE CARGA A LA FATIGA (F_i) PARA DIFERENTES VALORES DE NÚMERO DE PERNOS DE ACUERDO (N)..	156
4.15.17	COMPROBACIÓN NUMERO DE PERNOS N (PROCESO INVERSO).....	156
4.15.18	SELECCIÓN DE MATERIAL DEL EMPAQUE.....	157
4.16	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CON AUTODESK INVENTOR 2010.	159
4.16.1	ANÁLISIS TIPO ESTÁTICO.....	159
4.16.2	RESULTADOS.....	160
4.16.3	COMPORTAMIENTO DEL FACTOR DE SEGURIDAD.....	161
4.16.4	CONCENTRACIÓN DE FUERZA ACUMULADA (VON MISES STRESS). 162	
4.16.5	DEFLEXIONES MÁXIMAS Y MÍNIMAS POR EJES.....	163

CAPITULO V.....	166
5 COSTOS.	166
5.1 MATERIA PRIMA.	167
5.1.1 <i>PLANCHA DE ACERO PARA EL CASCO DEL REACTOR.</i>	167
5.1.2 <i>PLANCHA DE ACERO PARA EXTENSIÓN PARA CABEZA DEL REACTOR.</i>	167
5.1.3 <i>PLANCHA DE ACERO PARA TANQUE PORTA CATALIZADOR....</i>	168
5.1.4 <i>PLANCHA DE ACERO PARA TAPA INTERNA PERFORADA.</i>	168
5.1.5 <i>PLANCHA DE ACERO PARA TAPA INFERIOR TANQUE PORTA CATALIZADOR.</i>	169
5.1.6 <i>PLANCHA DE ACERO PARA DOSIFICADOR INTERNO.</i>	169
5.1.7 <i>PLANCHA DE ACERO PARA DOSIFICADOR PRINCIPAL.....</i>	170
5.1.8 <i>PLANCHA DE ACERO PARA SEPARADOR DE TANQUE PORTA CATALIZADOR.</i>	170
5.1.9 <i>BARRA DE ACERO PARA NEPLO DE FLAUTA.....</i>	171
5.1.10 <i>BARRA DE ACERO PARA NEPLO DE FLAUTA.....</i>	171
5.1.11 <i>COSTO TOTAL MATERIA PRIMA DEL REACTOR.</i>	172
5.2 COSTO DISPOSITIVO, ACCESORIOS Y ELEMENTOS NORMALIZADOS PARA EL REACTOR.	172
5.3 SUELDA.	173
5.3.1 <i>COSTOS SUELDA E 7018.....</i>	173
5.3.2 <i>NOMENCLATURA PARA CÁLCULO DE SUELDA.</i>	173
5.4 COSTOS MECANIZADOS.	177
5.4.1 <i>OXICORTE.</i>	177
5.4.2 <i>COSTO ROLADO.</i>	177
5.5 COSTO DE RADIOGRAFÍAS.	177
5.6 COSTO DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS.	178
5.7 COSTO PINTURA.	178
5.8 COSTO CATALIZADOR.	179
5.8.1 <i>CATALIZADOR NÍQUEL MOLIBDENO.....</i>	179
5.8.2 <i>CATALIZADOR COBALTO MOLIBDENO.....</i>	179
5.8.3 <i>COSTO TOTAL CATALIZADOR.....</i>	180
5.9 COSTO TOTAL DEL REACTOR.....	180

CONCLUSIONES.....	181
RECOMENDACIONES.....	183
BIBLIOGRAFÍA.....	184

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.0 Estado Natural del Petróleo	2
Figura 1.1 Proceso de Destilación Atmosférica del Crudo	8
Figura 1.2 Proceso de Destilación al Vacío del Crudo	9
Figura 1.3 Proceso de Reductora de Viscosidad.....	10
Figura 1.4 Proceso de Craqueamiento Catalítico Fluído	11
Figura 1.5 Proceso de Reformación Catalítica con Regeneración Continua.....	12
Figura 1.6 Proceso de Hidrotratamiento	14
Figura 1.7 Hidrodesulfuradora de Diesel.....	16
Figura 1.8 Unidad de Hydrocracking (ISOMAX).....	17
Figura 1.9 Diferentes Tipos de Reactores para Hidroprocesamiento	26
Figura 1.10 Reactor de Cama Fija con multicamas de Catalizador	28
Figura 1.11 Reactor de Cama en Movimiento	30
Figura 1.12 Ingreso de Carga y Catalizador en Reactores de Cama en Movimiento	31
Figura 1.13 Reactor de Cama en Ebullición	32
Figura 1.14 Principio de Funcionamiento SPRs	34
Figura 2.0 Efectos de la Presión Parcial de Hidrógeno.....	51
Figura 2.1 Efectos de la Temperatura de Reacción en HDS.....	53
Figura 2.2 Corrección Típica de Temperatura durante HDS	54
Figura 2.3 Purificación del Hidrógeno en Hidroprocesamiento	57
Figura 2.4 Efectos del LHSV durante el Hidroprocesamiento	59
Figura 2.5 Corrección Típica de Temperatura en Función de la Carga.....	60
Figura 2.6 Hidrogenación de una Doble Enlace C=C.....	61
Figura 2.7 Formas de las Partículas de Catalizador para Hidroprocesamiento	63
Figura 2.8 Ejemplos de Formas y Tamaños del Catalizador	63
Figura 3.0 Tipos de Recipientes a Presión.....	69
Figura 3.1 Tipos de de Cabezales	78

Figura 3.2 Cabeza Toriesférica	79
Figura 3.3 Cabeza Hemisférica	81
Figura 3.4 Cabeza Elipsoidal	83
Figura 3.5 Brida SLIP-ON	85
Figura 3.6 Nomenclatura de una Rosca de Tornillo	87
Figura 3.7 Junta Atornillada.....	88
Figura 3.8 Junta con Empaquetadura	88
Figura 3.9 Proceso de Soldadura $t \geq 9/16$	97
Figura 3.10 Proceso de Soldadura para Bidas	98
Figura 3.11 Proceso de Soldadura para Accesorios	98
Figura 3.12 Proceso de Soldadura para Partes Internas	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.0 Componentes del Petróleo	3
Tabla 1.1 Metales Contaminantes del Petróleo.....	15
Tabla 2.0 Condiciones de Operación de un Reactor para Hidroprocesamiento	44
Tabla 2.1 Ejemplo de Cálculo del Consumo de Hidrógeno.....	57
Tabla 3.0 Parámetro de Operación.....	68
Tabla 3.1 Propiedades de los Materiales para Alta Temperatura.....	74
Tabla 3.2 Propiedades de los Aceros A-515	74
Tabla 3.3 Tipos de Juntas Soldadas	75
Tabla 3.4 Factor por Corrosión Admisible	77
Tabla 3.5 Tipos de Cabezas	81
Tabla 3.5 Dimensiones Brida SLIP-ON	86
Tabla 3.6 Especificaciones de Resistencia.....	89
Tabla 3.7 Características de Roscas Unificadas UNC y UNF	89
Tabla 3.8 Módulos de Elasticidad.....	90
Tabla 3.9 Factor de Reducción a la Fatiga.....	90
Tabla 3.10 Factor Kf Efectos de Temperatura	91
Tabla 3.11 Factor Kc De Confiabilidad	91
Tabla 3.12 Selección de Empaque	96
Tabla 4.1 Caracterización Crudo Campo CITY Oriente.....	107

ANEXOS.....	186
ANEXOS I	187
<i>PLANOS DE CONJUNTO.....</i>	<i>187</i>
ANEXOS II.....	188
<i>PLANOS DE DESPIECE.....</i>	<i>188</i>
ANEXOS III.....	189
<i>SIMULACIÓN DISEÑO EN INVENTOR 2010.....</i>	<i>189</i>
ANEXOS IV	190
ANEXOS V	191
<i>CÓDIGO ASME SECCIÓN VIII, DIV. 1. PARTE UG.....</i>	<i>191</i>
REQUERIMIENTOS GENERALES PARA TODOS LOS MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN Y MATERIALES.....	191
ANEXOS VI	193
<i>PROPIEDADES DE LOS MATERIALES: ACERO AL CARBONO Y DE BAJO CONTENIDO DE ELEMENTOS DE ALEACIÓN.....</i>	<i>193</i>
ANEXO VII	195
<i>PROPIEDADES DE LOS TUBOS EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO NOMINAL.</i>	<i>195</i>
ANEXOS VIII.....	197
<i>EFICIENCIA DE LA JUNTA SEC. VII, DIV. 1, B PT UW 11.....</i>	<i>197</i>
ANEXOS IX	202
<i>ESFUERZO DE LA COSTURA CIRCUNFERENCIAL.....</i>	<i>202</i>
ANEXO X.....	203
<i>MARGEN POR CORROSIÓN.....</i>	<i>203</i>
ANEXO XI.....	205
<i>TIPOS DE CABEZAS.....</i>	<i>205</i>
ANEXO XII	207
<i>SEC. VII, DIV. 1, APPENDIX 1.3 Y 1.4 (d).....</i>	<i>207</i>
ANEXO XIII.....	209
<i>FACTOR “M”</i>	<i>209</i>
ANEXO XIV	210
<i>ESPECIFICACIONES DE RESISTENCIA.....</i>	<i>210</i>
ANEXOS XV	213

<i>DIÁMETROS Y ROSCAS MÉTRICAS DE PASO FINO Y DE PASO BASTO.</i>	213
ANEXO XVI.....	215
<i>MODULO DE ELASTICIDAD – Y PROPIEDADES DE LOS FERROSOS. ..</i>	215
ANEXOS XVII.....	216
<i>FACTOR K_f DE REDUCCIÓN A LA FATIGA PARA ELEMENTOS</i>	
<i>ROSCADOS.</i>	216
ANEXOS XVIII.....	218
<i>FACTOR K_d EFECTOS DE LA TEMPERATURA.</i>	218
ANEXO XIX.....	220
<i>SEC. VII, DIV. 1, B PT UW-16.1.</i>	220
ANEXO XX.....	231
<i>CARACTERIZACIÓN CRUDO DEL CAMPO CITY ORIENTE.</i>	231
ANEXO XXI.....	232
<i>HOJA TÉCNICA HIDRÓGENO.</i>	232
ANEXO XXII.....	238
<i>PROCESS HEAT INTEGRATION OF A HEAVY CRUDE HYDROTREATMENT</i>	
<i>PLANT, P.2.</i>	238
ANEXO XXIII.....	240
<i>CATALIZADORES PARA HIDROPROCESAMIENTO.</i>	240
ANEXOS XXIV.....	248
<i>PROFORMA MATERIALES PARA CUERPO DEL RECIPIENTE.</i>	248
ANEXOS XXV.....	249
<i>PROFORMA MATERIALES, ACCESORIOS E INSUMOS.</i>	249
ANEXO XXVI.....	250
<i>HOJA TÉCNICA ELECTRODO E-7018</i>	250

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En la actualidad, La Refinería Estatal de Esmeraldas (R.E.E.) perteneciente a PETROINDUSTRIAL filial de PETROECUADOR refina crudos cada vez más pesados, debido a que existen yacimientos de crudos en la Amazonía que van entre 15 y 20 grados API, y crudos livianos de 34 grados API en la Península de Santa Elena.

Estos crudos pesados, debido a que poseen una bajo grado API, hacen que sea más costoso su transporte hacia los centros de refinamiento y consecuentemente dificulta su proceso de refinación; además éstos poseen una gran cantidad de azufre, oxígeno y nitrógeno los mismos que deben ser reducidos en su concentración ya que provocan la desactivación de los catalizadores e intervienen directamente en las emisiones de material particulado provocando la disminución de la vida útil de las tuberías y equipos de procesamiento; así como también actúan directamente en la contaminación ambiental.

A pesar de los esfuerzos que la industria petrolera ha realizado, el impacto ambiental es todavía importante. Aunque es posible considerar que la extracción del petróleo sea algún día libre de contaminación, se ha iniciado de entre los grandes productores una interesante competencia por producir combustibles y aceites “más ecológicos”.

Todos estos factores hacen que sea de importancia operacional y económica la efectiva remoción de azufre, oxígeno y nitrógeno del crudo y el aumento de su calidad mediante el proceso de hidrogenación.

Para cumplir con éste propósito, se plantea el diseño de un Reactor Prototipo para procesos de hidrogenación que soporte la inyección de crudo pesado conjuntamente con hidrógeno de 99.9% de pureza, permitiendo manipular parámetros de presión y temperatura bajo la presencia de un catalizador, los cuáles ayudan a la aceleración del rompimiento de las moléculas (crudo e hidrógeno); como resultado se obtendría un incremento en el grado API del crudo y una mejora en la vida útil de los catalizadores,

así mismo se permitirá la obtención de derivados más limpios de acuerdo a estándares Medio Ambientales Internacionales.

JUSTIFICACIÓN.

Con la hidrogenación se consigue eliminar algunos de los desechos peligrosos y difíciles de remover en otros procesos de refinación, con eso se conseguiría tener un menor impacto ambiental y aplicación de tecnologías más limpias y eficientes.

Este proceso está basado en el uso de hidrógeno puro que reacciona con los compuestos de azufre, oxígeno y nitrógeno presentes en los hidrocarburos, así mismo el azufre procesado se convierte en azufre sólido elemental que tiene una gran importancia en la aplicación industrial.

El reactor prototipo que soportará condiciones de hidrogenación estará constituido por el diseño de un recipiente a presión que soportará variaciones en cuanto a presión y temperatura, bajo un cama de catalizador el cual permitirá conseguir la aceleración en la mezcla crudo e hidrógeno, para ello el crudo ingresará al reactor luego de haber cumplido el proceso de reposo en los tanques de almacenamiento, el desalado del crudo (eliminación de la sal contenida en el crudo), calentamiento en un horno y el proceso de fraccionamiento primario, a una temperatura de alrededor de los 360°C para tener una mayor facilidad al momento de inyectarlo al reactor permitiendo aumentar o disminuir su presión; por otro lado tenemos al hidrógeno que se debe tomar las medidas de seguridad necesarias y reglamentarias para evitar que se volatilice o cause algún tipo de accidente por ser un gas muy inestable.

También ocurren otras reacciones adicionales que permiten complementar el tratamiento de hidrogenación, tales como, la eliminación de nitrogenados, eliminación del excesivo contenido de aromáticos y el de mayor interés que es convertir a las olefinas en compuestos saturados.

Mediante el rompimiento de las moléculas de crudo y su adhesión a las moléculas de hidrógeno se conseguirá eliminar impurezas que limitan las capacidades del catalizador y permitirá a su vez el incremento del grado API del crudo pesado del Oriente Ecuatoriano.

ALCANCE.

El presente proyecto incluye la determinación del tipo de reactor para operar en condiciones de hidrogenación, realización de los cálculos para el dimensionamiento del reactor prototipo para operar con crudo e hidrógeno bajo las condiciones de operación planteadas, la selección del catalizador para hidroprocesamiento, la determinación de los materiales e insumos necesarios para las entradas y salidas en el reactor, bajo el Código ASME¹ Sección VIII, División 1 (Recipientes a Presión), la elaboración de planos de conjuntos y despiece del reactor prototipo y sus partes, análisis de costos del proyecto, simulación del reactor para verificar su óptimo funcionamiento, y la selección de un catalizador para el reactor de hidroprocesamiento, que serán de vital importancia para llevar a cabo el desarrollo del proyecto.

OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL:

- Diseño y Simulación de un reactor prototipo que soporte condiciones de hidrogenación para crudo pesado con una capacidad de 1 Galón por Segundo para PETROECUADOR.

¹ ASME, AMERICAN SOCIETY OF MECHANICALS ENGINEERS, 2001.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Determinar el tipo de reactor y selección del catalizador para hidroprocesamiento que se ajuste a las condiciones óptimas de operación planteadas.
2. Calcular y diseñar las partes constitutivas requeridas para la construcción del reactor prototipo tomando en cuenta los parámetros establecidos por el Código ASME.
3. Determinar la relación crudo/hidrógeno para establecer los dispositivos de entrada y salida de crudo e hidrógeno.
4. Realizar la simulación del reactor prototipo para verificar el factor seguridad y deformaciones bajos las condiciones de operación y diseño establecidos.
5. Elaborar los planos de conjunto y despiece del reactor prototipo.
6. Fijar los costos de materiales e insumos necesarios para la construcción y ensamble del reactor.

HIPÓTESIS.

GENERAL:

Mediante la selección del tipo de reactor para hidroprocesamiento y el correcto diseño del mismo en presencia de un catalizador, y bajos condiciones de presión de operación y temperatura determinadas, se llevará a cabo, la reacción en dónde las moléculas de hidrógeno son adheridas a las moléculas del crudo para formar enlaces simples mejorando su estructura molecular, para con ello, mejorar la calidad del crudo y la

gravedad API para su posterior refinación y obtención de derivados limpios de acuerdo a los requerimientos medios ambientales.

METODOLOGÍA.

El presente proyecto se determina como un estudio de investigación que aplica el Método Lógico Inductivo que está íntimamente complementado con el Método Hipotético Deductivo, por el motivo de que se encuentran varias disciplinas que se relacionan entre sí permitiendo formular nuestras hipótesis para determinar y cumplir con nuestros objetivos y conclusiones particulares.

En un primer plano, se aplica el método Lógico Inductivo, por la razón de que se obtendrán los elementos necesarios para observar, analizar, clasificar y aplicar la formulación de una hipótesis que cumpla con los objetivos y vele por el desarrollo del presente proyecto.

En un segundo plano, se aplica el método Hipotético Deductivo por la razón de detectar un principal problema por medio de la observación, a continuación el planteamiento de una hipótesis, para luego llegar a su comprobación o verificación mediante la experimentación.

Detectar el problema principal: La Refinería Estatal de Esmeraldas recibe todos los crudos provenientes de los diferentes campos petroleros del país, los cuáles por su mezcla se llega a obtener un crudo promedio de 22 °API el cual es considerado para su exportación; su alta viscosidad y su alto contenido de contaminantes provocan un deterioro a la infraestructura de los centros de refinamiento, además este tipo de crudo no permite obtener derivados limpios de acuerdo a las normas internacionales medio ambientales vigentes.

Formulación de una Hipótesis: Para eliminar ciertos tipos de contaminantes se llevan a cabo varios procesos totalmente independientes de acuerdo a cada tipo de

contaminante que se desee eliminar, como por ejemplo, para eliminar el azufre se emplea el proceso denominado Hidrodesulfurización (HDS), para eliminar el nitrógeno su proceso es Hidrodesnitrogenación (HDN), para eliminar metales su proceso es la Hidrodesmetalización (HDM), etc. Para ello se desea considerar todos estos procesos en uno sólo denominado Hidrotratamiento (HDT) el cual opera a una presión de operación de 5,4MPa y una temperatura de 633°K en una relación de crudo e hidrógeno sobre una cama de catalizador para permitir mejorar la calidad del crudo con un incremento del grado API.

Deducción de consecuencias observables: Los crudos que se extraen de los diferentes pozos del Oriente ecuatoriano en la actualidad son de mayor viscosidad y menor gravedad API, formando enlaces más complejos y difíciles de procesar; para ello, se plantea el proceso de hidrotratamiento, el cual nos permite que por medio de la adhesión de hidrógeno al crudo a presiones y temperaturas determinadas convertir los enlaces complejos en enlaces simples los cuáles forman moléculas de hidrógeno/crudo más pequeñas y livianas para su posterior procesamiento.

Experimento: Diseñar un reactor prototipo que soporte condiciones de operación planteadas como presión y temperatura, para llevar a cabo el proceso de hidrotratamiento permitiendo incrementar el grado API del crudo.

RESUMEN.

En el presente proyecto se plantea en cinco capítulos los cuales están estrictamente relacionados; el Primer Capítulo se explica los fundamentos teóricos, sobre los procesos de explotación, y refinación del crudo pesado, así, como una introducción al Código ASME, Sección VIII y División 1. En el Segundo Capítulo se analizan los tipos de reactores que se podrían utilizar según su capacidad de reacción de la mezcla a tratar, la fluido dinámica que maneja, velocidades de procesamiento y comportamiento, variables esenciales como la presión y temperatura para modificar las cadenas de crudo en cadenas más simple y posibles de refinar con mayor optimización, para esto se hace énfasis en el Reactor de Hidrogenación planteado, que mediante estudios y experimentos realizados en este campo demuestran que se puede mejorar la gravedad API, llevando al crudo a estándares comerciales y más ecológicos que son regulados por normas Medio Ambientales internacionales, así también, se mejora la vida útil de los equipos de refinación. El Tercer Capítulo, comprende el diseño y cálculo del cuerpo del reactor prototipo en relación a una escala comercial, seleccionando materiales que soporten las condiciones de operación como la presión y temperatura, sus dispositivos de alimentación y control, para luego realizar una simulación con ayuda del software Autodesk Inventor 2010, que nos ayuda a verificar el factor de seguridad, las deformaciones y comportamiento de cuerpo ante los esfuerzos actuantes, para obtener el óptimo diseño del recipiente. En el Cuarto Capítulo, se especifica el método de cálculo prueba y error utilizado mediante una programación realizada con Microsoft Excel, comparando la mejor opción de diseño de los posibles resultados planteados, para que, mediante la simulación demostrar que el diseño y cálculo efectuado es el óptimo y satisface con los parámetros de operación. El Capítulo Cinco hace referencia a los costos que genera el diseño y construcción del reactor prototipo de acuerdo al mercado nacional e internacional, según la disponibilidad de materia prima y manufactura, a continuación se indica las debidas conclusiones y recomendaciones del presente proyecto; finalmente se concluye con los anexos de planos de conjunto y detalle, y documentación técnica que respalda el desarrollo del proyecto para la fabricación del reactor prototipo.

CAPÍTULO I

1 FUNDAMENTO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN.

La industria de refinación del petróleo transforma los crudos de petróleo en numerosos productos destilados, incluyendo gases licuados del petróleo, nafta, kerosene, combustible para aviación, gasoil, fueloil, lubricantes, asfaltos y productos básicos para la industria petroquímica.

Las actividades de refinación se inician con la recepción y almacenamiento de los crudos en la Refinería e incluyen el manejo de estos fluidos y las operaciones de refinación que concluyen con el almacenamiento de los productos derivados y el embarque de los mismos o transporte hasta los diferentes puntos de consumo.

La industria de refinación del petróleo cuenta con una amplia variedad de procesos, los cuales varían de unas Refinerías a otras en función de su estructura, materias primas utilizadas, productos finales que se desea obtener y especificaciones de los productos.

El incremento de la demanda de productos ligeros, la disminución en el consumo de fuel oil, el incremento en el diferencial de precios entre crudo livianos, pesados y las mayores reservas de crudos pesados en el mundo, han obligado a las refinerías a modificar su estructura productiva a fin de adaptarse a esta situación.

Estos desarrollos tecnológicos han permitido mejorar los rendimientos y calidades de las fracciones livianas obtenidas y ampliar el campo de aplicación; permitiendo además el empleo de residuos como materia prima con un mayor contenido en contaminantes: azufre, metales, asfaltenos, etc.

1.1 ESTADO NATURAL DEL PETRÓLEO.

El petróleo se encuentra relativamente distribuido en todas partes del mundo, almacenado formando grandes yacimientos en el interior de la tierra, a profundidades desde cerca de la superficie hasta 2000 y más metros, y su composición varía mucho de acuerdo a su procedencia. En el interior de la tierra se encuentra formando bolsones y acompañado generalmente por una capa inferior de agua salada y una superior de gas a presión.

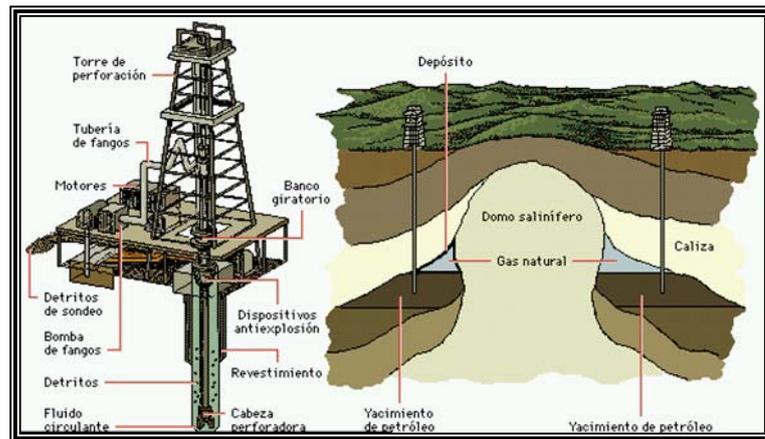


Fig. 1.0 Estado Natural del Petróleo.

El petróleo se extrae por perforación del suelo. A veces de los agujeros abiertos por las sondas, surge el petróleo directamente a causa de la presión interna que reina en la bolsa, pero más tarde se termina la explotación por bombeo.

1.1.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA.

Los crudos varían, de acuerdo a su origen, en su composición química.

El petróleo está formado principalmente por hidrocarburos, que son compuestos de hidrógeno y carbono. Además de hidrocarburos, el petróleo contiene otros compuestos orgánicos, entre los que destacan sulfuros orgánicos, compuestos de nitrógeno y de oxígeno. También hay trazas de compuestos metálicos, tales como sodio (Na), hierro (Fe), níquel (Ni), vanadio (V) o plomo (Pb).

Los petróleos crudos, de acuerdo a sus componentes, se clasifican en tres clases: los de base parafínica, que contienen muy poca cantidad de asfalto, pero producen hidrocarburos sólidos de la serie parafínica con la fórmula general C_nH_{2n+2} ; los de base nafténica, que dejan un residuo pesado oscuro o asfalto y los aromáticos.

1.1.2 COMPONENTES DEL PETRÓLEO, DENOMINACIÓN QUÍMICA Y PRODUCTOS.

En la siguiente tabla 1.0 se muestra solo los hidrocarburos simples que se derivan del proceso de Destilación Atmosférica a presión atmosférica.

Denominación Química	Fórmula	Estado Normal	Punto Aproximado de Ebullición	Productos de Empleo
Metano	CH ₄	Gaseoso	-161°C (-258°F)	Gas natural combustible/
Etano	C ₂ H ₆	Gaseoso	-88°C (-127°C)	Productos petroquímicos
Propano	C ₃ H ₈	Gaseoso	-42°C (-51°F)	GLP/Productos
Butano	C ₄ H ₁₀	Gaseoso	0°C (31°F)	
Pentano	C ₅ H ₁₂	Líquido	36°C (97°F)	Naftas de Alto Grado
Hexano	C ₆ H ₁₄	Líquido	69°C (156°F)	
Heptano	C ₇ H ₁₆	Líquido	98°C (209°F)	Gasolina natural
Octano	C ₈ H ₁₈	Líquido	125°C (258°F)	(sustancia base para combustibles)
Nonano	C ₉ H ₂₀	Líquido	150°C (303°F)	Para motores de Combustión Interna
Decano	C ₁₀ H ₂₂	Líquido	174°C (345°F)	
Undecano-N, Hendecano	C _n H _{2n}	Líquido	195°C (383°F)	Turbinas
Dodecano-N, Dioxilo	C _n H _{2n}	Líquido	215°C (419°F)	Kerosene
Tetradecano-N	C _n H _{2n}	Líquido	252°C (487°F)	Aceites lubricantes
Eicosano-N	C _n H _{2n}	Sólido	258°C (496°F)	Parafinas

Fuente: Los Autores.

Tabla 1.0 Componentes del Petróleo.

1.1.3 CLASIFICACIÓN DEL PETRÓLEO SEGÚN SU GRAVEDAD API¹.

Es una medida de densidad que describe cuán pesado o liviano es el petróleo comparándolo con el agua. Si los grados API son mayores a 10, es más liviano que el agua, y por lo tanto flotaría en ésta. La gravedad API es también usada para comparar densidades de fracciones extraídas del petróleo. Por ejemplo, si una

¹American Petroleum Institute (API), 2010.

fracción de petróleo flota en otra, significa que es más liviana, y por lo tanto su gravedad API es mayor.

Matemáticamente la gravedad API no tiene unidades (ver la fórmula abajo). Sin embargo siempre al número se le coloca la denominación grado API. La gravedad API es medida con un instrumento denominado densímetro. Existe otro método de cálculo que es el siguiente:

La fórmula usada para obtener la gravedad API:

$$Gravedad\ API = \frac{141.5}{Gravedad\ Especifica\ a\ 60^{\circ}F} - 131.5 \quad [Ecuación\ 1.0]$$

Generalmente hablando, un mayor valor de gravedad API en un producto de refinería representa que éste tiene un mayor valor comercial. Esto básicamente debido a la facilidad (operacional y económica) de producir destilados valiosos como gasolina, jet fuel y gasóleo con alimentaciones de crudos livianos y a los altos rendimientos de los mismos. Esta regla es válida hasta los 45 grados API, más allá de este valor las cadenas moleculares son tan cortas que hacen que los productos tengan menor valor comercial.

El Petróleo es clasificado en liviano, mediano, pesado y extra pesado, de acuerdo con su medición de gravedad API:

- Crudo liviano es definido como el que tiene gravedades API mayores a 31,1 °API,
- Crudo mediano es aquel que tiene gravedades API entre 22,3 y 31,1 °API,
- Crudo Pesado es definido como aquel que tiene gravedades API entre 10 y 22,3 °API,

- Crudos extra pesados son aquellos que tienen gravedades API menores a 10 ° API.

1.1.4 PROCESODE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO.

Los procesos de refinación tienen por objeto modificar las características de los distintos productos elaborados, a fin de obtener productos finales que se ajusten a las especificaciones comerciales requeridas.

Los procesos de refinación pueden ser clasificados en cinco categorías:

- Proceso de Separación,
- Proceso de Conversión,
- Proceso de Tratamiento,
- Mezcla y Manejo de Productos,
- Operaciones Auxiliares.

El problema está dado por la eliminación de los compuestos de azufre a través de los siguientes tipos de procesos:

- Tratamientos químicos (adición de alcoholes (aminas) o ácido sulfúrico),
- Tratamiento con hidrógeno (adición de hidrógeno).

Actualmente se emplean con mayor frecuencia los procesos catalíticos en presencia de hidrógeno, dado que admiten lograr una desulfuración más profunda y resultan más necesarios cuanto más pesada es la fracción que se quiere desulfurar.

A continuación se explicará las tres primeras categorías (proceso separación, conversión y tratamiento), debido a su mayor importancia:

1.1.5 PROCESO DE SEPARACIÓN.

Permiten el fraccionamiento de una mezcla en sus diversos componentes sin modificar la estructura molecular, de modo que la suma de los constituyentes sea igual a la mezcla inicial y que el balance volumétrico de la operación resulte equilibrado. El calor o terceros agentes tales como los disolventes, son promotores de estos procesos también denominados de difusión.

Es necesario que se haya realizado el proceso desalado (remoción de la sal contenida en el crudo para evitar un ataque corrosivo), antes de continuar con los siguientes procesos de separación:

1.1.5.1 DESTILACION ATMOSFÉRICA.

La unidad de destilación inicial o atmosférica, tiene por finalidad separar el petróleo crudo en un determinado número de cortes o fracciones clasificadas según las temperaturas de ebullición de los hidrocarburos. Estos cortes de destilación directa son regulados para hacerlos corresponder en forma aproximada con las especificaciones de destilación A.S.T.M², que condiciona su rendimiento respecto al crudo. Previa vaporización en los hornos, los hidrocarburos se clasifican verticalmente de acuerdo a su volatilidad, es decir, según su peso molecular. Para ello se debe considerar que ningún producto de la unidad de destilación atmosférica, admite ser considerado, de manera usual, como producto acabado, a excepción del residuo atmosférico, vendido como fuel pesado;

²American Society for Testing and Materials - (ASTM), "Distillation and Vapor Pressure Measurement in Petroleum Products (Manual 51), Chapter Two, Jan 2008, p. 21.

Por ello resulta necesario utilizar los procesos de transformación y de separación (procesos de conversión) con la finalidad de mejorar la calidad y eliminar el exceso de los crudos pesados con aumento de los gases y de la nafta.

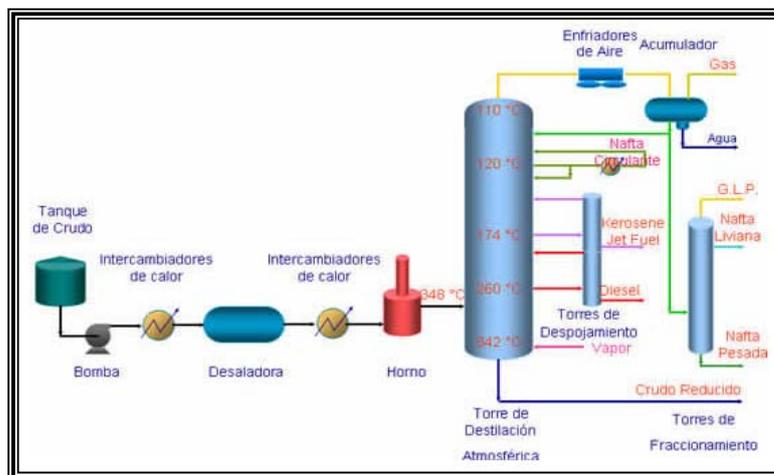
1.1.5.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO PROCESO DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA DE CRUDO.

Una vez que se ha sedimentado el crudo en los tanques de almacenamiento y se ha removido gran parte del agua asociada, el enviado como carga a las unidades de destilación atmosférica donde primeramente es sometido al proceso de desalado, el cual es de vital importancia pues en él se remueve la sal contenida, esto evita la posterior formación de compuestos corrosivos en el sistema de tope de la destilación atmosférica, evitando con ello el ataque corrosivo a los sistemas.

El crudo libre de agua y sal entra al proceso de fraccionamiento primario. Este consiste en la separación por calentamiento a 360°C de los hidrocarburos constituyentes del petróleo que luego son separados en una columna de destilación operada a baja presión ($0,4 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$).

Estas condiciones operacionales dan como resultado la separación de los componentes del crudo de acuerdo a su punto de ebullición, los componentes más livianos o volátiles se separan a menor temperatura y salen por la parte superior de la columna de destilación, en tanto que los productos más pesados se obtienen en las zonas inferiores de ésta.

El orden de salida de los productos de acuerdo a su volatilidad es el siguiente: gas combustible, gas licuado de petróleo, gasolinas, kerosene, diesel y crudo reducido; como se muestra a continuación en la figura 1.1.



Fuente: PETROINDUSTRIAL, Refinería Estatal de Esmeraldas (REE), 2010.

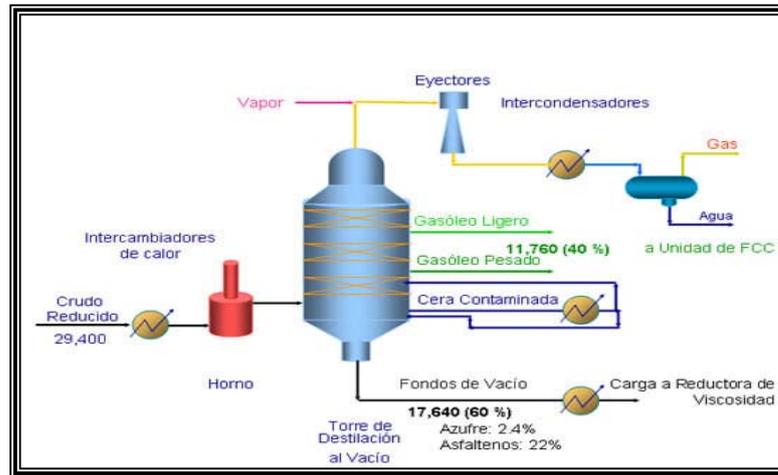
Fig. 1.1 Proceso de Destilación Atmosférica de Crudo.

1.1.5.3 DESTILACIÓN AL VACÍO.

En la figura 1.2 se muestra el principio de funcionamiento de la columna de destilación al vacío.

El crudo reducido proveniente del fondo de las columnas de destilación atmosférica es calentado y fraccionado en columnas de destilación operadas a presión de vacío, de esta manera se logra la separación de los componentes sin que se produzca su descomposición térmica.

Los cortes obtenidos son: gasóleos y fondos de vacío. Los gasóleos son enviados como carga a la unidad de Craqueo Catalítico Fluido para su transformación en productos más valiosos. Parte de los fondos de vacío son enviados a las unidades reductoras de viscosidad para mejorar sus condiciones de fluidez y preparar los combustibles fuel oil; el restante de fondos de vacío corresponde a pitch asfáltico que se utiliza para la preparación de asfaltos empleados en la pavimentación de caminos y carreteras.



Fuente: PETROINDUSTRIAL, Refinería Estatal de Esmeraldas (REE), 2010.

Fig. 1.2 Proceso de Destilación al Vacío de Crudo.

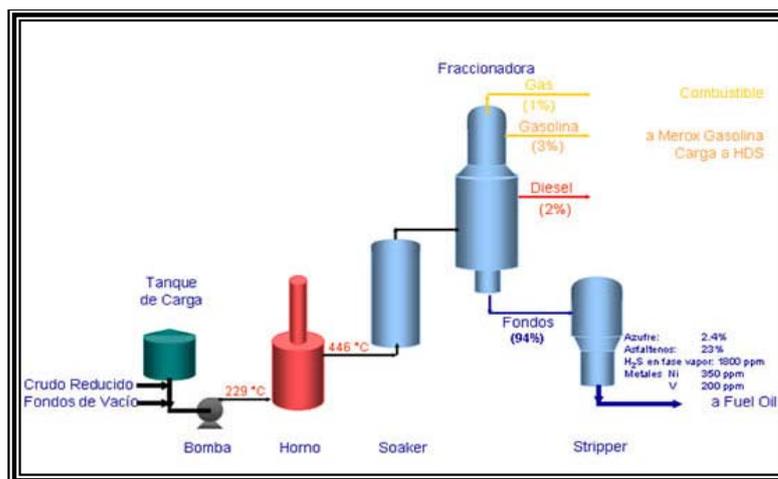
1.1.6 PROCESOS DE CONVERSIÓN.

Las reacciones que se originan durante la etapa de conversión dan lugar a la obtención de moléculas más livianas que las de la carga original; es decir, el peso medio molecular de los productos finales es menor al de las respectivas alimentaciones.

1.1.6.1 REDUCTORAS DE VISCOSIDAD.

La reducción de viscosidad es un proceso térmico (utiliza calor), como agente de rotura de las moléculas³, mediante el cual las moléculas de gran tamaño son divididas y convertidas en moléculas de menor tamaño y viscosidad. La carga a estas unidades está constituida por fondos de vacío, caracterizadas por la alta viscosidad. Los productos a los que se convierte la carga mediante la acción térmica son: gas combustible utilizado como combustible interno de refinería, gasolina que luego de ser tratada es componente de las gasolinas extra y súper; el destilado que forma parte del diesel producido y residuo que constituye la base para la preparación de fuel oil No. 4-6. El proceso de reducción de viscosidad del petróleo se encuentra detallado esquemáticamente en la siguiente figura 1.3

³ La ruptura por efecto térmico lleva el nombre de craqueo.



Fuente: PETROINDUSTRIAL, Refinería Estatal de Esmeraldas (REE), 2010.

Fig. 1.3 Proceso de Reductora de Viscosidad.

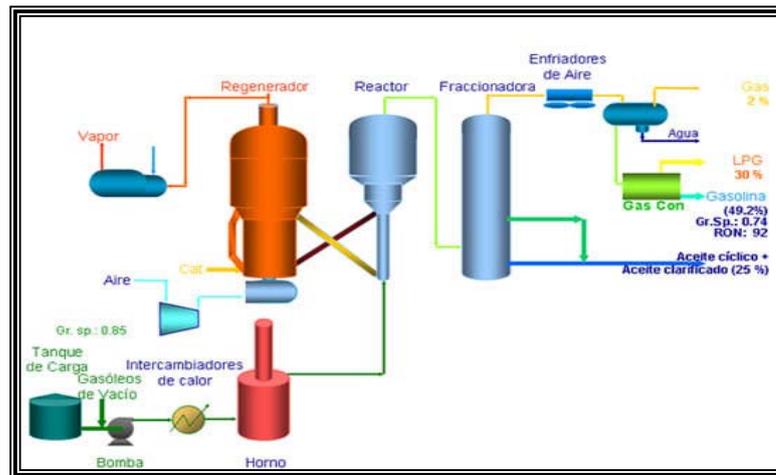
1.1.6.2 CRAQUEO CATALÍTICO FLUÍDO (FCC).

Este proceso convierte fracciones pesadas de crudo como son los gasóleos en fracciones más ligeras y valiosas, la conversión ocurre mediante el uso de altas temperaturas y moderadas presiones en la presencia de catalizador finamente dividido.

En la figura 1.4 se muestra el curso del proceso, la conversión de grandes moléculas en moléculas más pequeñas conlleva la formación de coque sobre la superficie del catalizador, este coque desactiva el catalizador al bloquear los accesos a los sitios ácidos. En orden a regenerar el catalizador, el coque es combustionado con aire en el regenerador de catalizador. Un aspecto importante de este proceso es la facilidad del catalizador de fluir entre la zona de reacción y la de regeneración, comportándose como un fluido al estar mezclado con fase vapor; esta fase en el reactor está formada por los productos vapores de hidrocarburos y vapor de agua, en tanto en el regenerador esta fase la constituye el aire de combustión del carbón. Los vapores de hidrocarburo libres de catalizador, fluyen desde el sistema de reacción hacia la columna de fraccionamiento donde se separan de acuerdo a su rango de ebullición: gas combustible, gasolina, aceite cíclico pesado, aceite cíclico ligero, aceite clarificado y slurry (compuestos acuosos).

La corriente de gas combustible es tratada en la unidad de compresión de gases para separar la fracción pesada que constituye el gas licuado de petróleo, esta corriente posteriormente es tratada para remover los contaminantes.

La gasolina que tiene un alto número de octano (RON = 93) es estabilizada mediante la separación de livianos y luego tratada para la remoción de contaminantes. Las demás fracciones son utilizadas para la preparación de fuel oil No. 4 y No. 6.



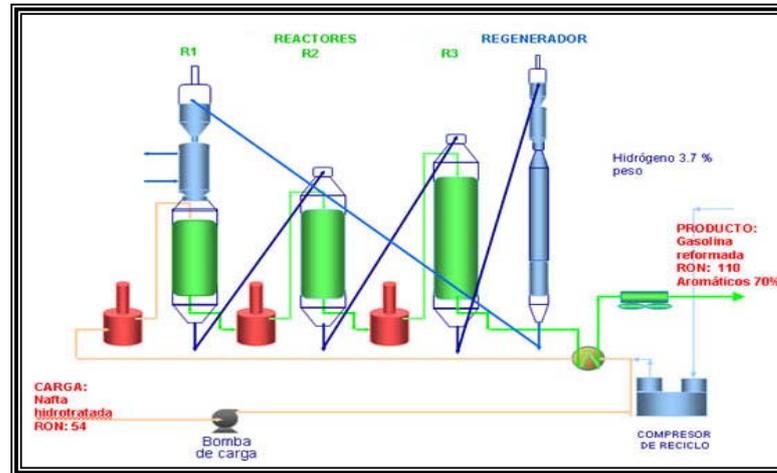
Fuente: PETROINDUSTRIAL, Refinería Estatal de Esmeraldas (REE), 2010.

Fig. 1.4 Proceso de Craqueamiento Catalítico Fluido.

1.1.6.3 REFORMADORA CATALÍTICA CON REGENERACIÓN CONTÍNUA (CCR).

Una vez que a la nafta cruda constituida principalmente por fracciones de parafinas, naftenos y aromáticos de 6 a 11 átomos de carbón, se le han removido los contaminantes hasta niveles que no afecten la operatividad de la unidad de Reformación Catalítica, específicamente el catalizador empleado, la nafta es admitida y sometida al proceso de reformación, cuyo propósito es convertir a las moléculas constituyentes de la nafta cruda en compuestos aromáticos de alto número de octano. Las reacciones de conversión se llevan a cabo en la presencia de temperaturas del orden de 500 °C y presiones del orden de los 3,5 kg/cm², el catalizador es continuamente regenerado al combustionar el carbón que se forma en su superficie y regenerar los sitios ácidos.

Los productos de este proceso son: nafta de alto octano (RON = 100), gas licuado de petróleo e hidrógeno necesario para los procesos de hidrodesulfuración existentes. A continuación se detalla el proceso de reformación catalítica en la figura 1.5.



Fuente: PETROINDUSTRIAL, Refinería Estatal de Esmeraldas (REE), 2010.

Fig. 1.5 Proceso de Reformación Catalítica con Regeneración Continua (CCR).

1.1.6.4 ALQUILACIÓN.

Proceso para la producción de un componente de gasolinas de alto octanaje por síntesis de butilenos con isobutano. El proceso de alquilación es una síntesis química por medio de la cual se une un alcano ramificado al doble enlace de un alqueno, extraído del craking o segunda destilación. Al resultado de la síntesis se le denomina alquilado o gasolina alquilada, producto constituido por componentes isoparafínicos. Su objetivo es producir una fracción cuyas características tanto técnicas (alto octano) como ambientales (bajas presión de vapor y reactividad fotoquímica) la hacen hoy en día, uno de los componentes más importantes de la gasolina reformulada. La alquilación es un proceso catalítico que requiere de un catalizador de naturaleza ácida fuerte, y se utilizan para este propósito ya sea ácido fluorhídrico o ácido sulfúrico.

1.1.6.5 ISOMERIZACIÓN.

Convierte la cadena recta de los hidrocarburos parafínicos en una cadena ramificada. Se hace sin aumentar o disminuir ninguno de sus componentes. Las parafinas, son hidrocarburos constituidos por cadenas de átomos de carbono asociados a hidrógeno, que poseen una gran variedad de estructuras; cuando la cadena de átomos de carbono es lineal, el compuesto se denomina parafina normal, y si la cadena es ramificada, el compuesto es una isoparafina. Las isoparafinas tienen número de octano superior a las parafinas normales, de tal manera que para mejorar la calidad del producto se utiliza un proceso en el que las parafinas normales se convierten en isoparafinas a través de reacciones de isomerización. La práctica es separar por destilación la corriente de nafta en dos cortes, ligero y pesado; el ligero que corresponde a moléculas de cinco y seis átomos de carbono se alimenta al proceso de isomerización, mientras que el pesado, con moléculas de siete a once átomos de carbono, es la carga al proceso de reformación antes descrito. Las reacciones de isomerización son promovidas por catalizador de platino.

1.1.7 PROCESOS DE TRATAMIENTO.

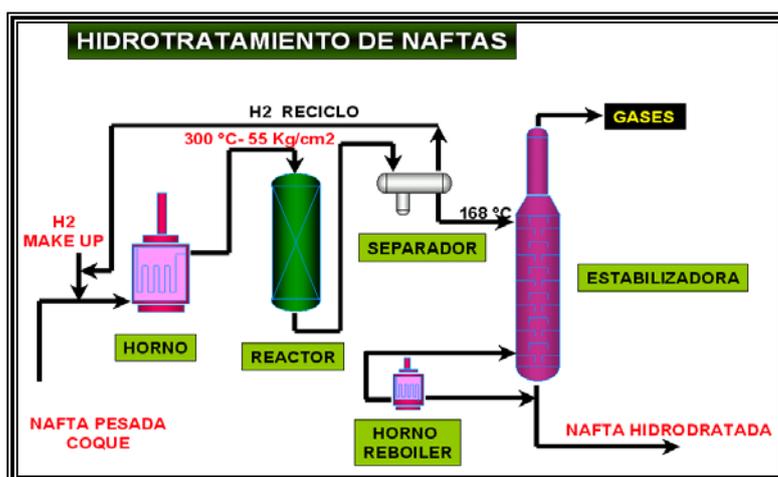
El objetivo principal del hidrotratamiento del crudo es acondicionar la carga a las unidades de Reformación Catalítica e Isomerización. La remoción de metales, junto con la eliminación de azufre, oxígeno y nitrógeno es necesaria debido a que estos son venenos para los catalizadores.

1.1.7.1 HIDROTRATAMIENTO (TRATAMIENTO CON HIDRÓGENO).

Son procesos donde se hace reaccionar hidrógeno con hidrocarburos insaturados (olefinas y aromáticos) transformándolos en saturados (parafínicos y nafténicos). Además el hidrógeno reacciona con compuestos de azufre, nitrógeno y oxígeno transformándolos en ácido sulfhídrico (SH₂), amoníaco (NH₃) y agua (H₂O).

1.1.7.1.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL HIDROTRATAMIENTO.

La figura 1.6 se muestra el proceso de hidrotratamiento del crudo, en dónde la carga está constituida por naftas pesadas de destilación primaria y naftas pesadas de las Unidades de Coque. Luego de ser calentada, la carga pasa por un sistema de reacción donde el hidrocarburo toma contacto con el hidrógeno en presencia de un catalizador. La corriente de salida del sistema de reacción pasa por un separador de alta presión donde se separa el hidrógeno que no reaccionó junto con parte del sulfhídrico y amoníaco formado, luego la corriente pasa a una torre estabilizadora donde se elimina una pequeña cantidad de gases por la parte superior. Por el fondo sale nafta hidrotratada.



Fuente: PETROINDUSTRIAL, Refinería Estatal de Esmeraldas (REE), 2010.

Fig. 1.6 Proceso de Hidrotratamiento.

1.1.7.1.2 REACCIONES DE HIDROTRATAMIENTO.

Las principales reacciones que se llevan a cabo en las Unidades de Hidrotratamiento son:

- Desmetalización (Remoción de Metales del Crudo),
- Saturación de Olefinas,

- Remoción de Azufre,
- Remoción de Nitrógeno.

La remoción de metales es completa cuando la temperatura de reacción supera los 315°C.

1.1.7.1.3 METALES CONTAMINANTES DEL CRUDO.

A continuación se presenta una tabla donde se muestra el origen de los metales que se encuentran en el petróleo para hidrotratamiento:

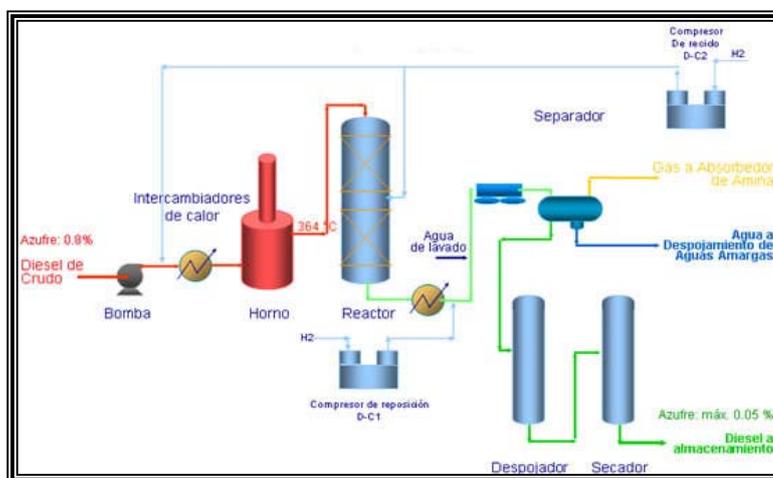
<u>Metal Contaminante</u>	<u>Fuente</u>
Nickel - Vanadio	Cargas con alto punto final
Siliconas- Sílice	Aditivos del crudo-antiespuma de NC
Sodio	OHNa proveniente de tratamientos
Hierro	Productos de corrosión Corrosión de cañerías (Crudos ácidos)
Arsénico - Calcio	En algunos crudos
Plomo	Reproceso de gasolina
Fósforo	Inhibidores de corrosión

Tabla 1.1 Metales Contaminantes del Petróleo.

1.1.7.2 HIDRODESULFURIZACIÓN.

El diesel producido en la destilación atmosférica es de alto contenido de azufre el cual debe ser removido para alcanzar la calidad de diesel Premium y ser consumido en los centros urbanos densamente poblados como el Distrito Metropolitano de Quito. La remoción de azufre se produce al someter al diesel a condiciones de temperatura del orden de los 320 °C y presión de 40 kg/cm², bajo estas condiciones y en la presencia de hidrógeno de alta pureza y catalizador se dan las reacciones de hidrodesulfuración que permiten convertir el azufre contenido en el diesel en H₂S

(ácido sulfhídrico) el cual es separado de la corriente de diesel producto la misma que alcanza un contenido máximo de 500 ppm.



Fuente: PETROINDUSTRIAL, Refinería Estatal de Esmeraldas (REE), 2010.

Fig. 1.7 Hidrodesulfuradora de Diesel.

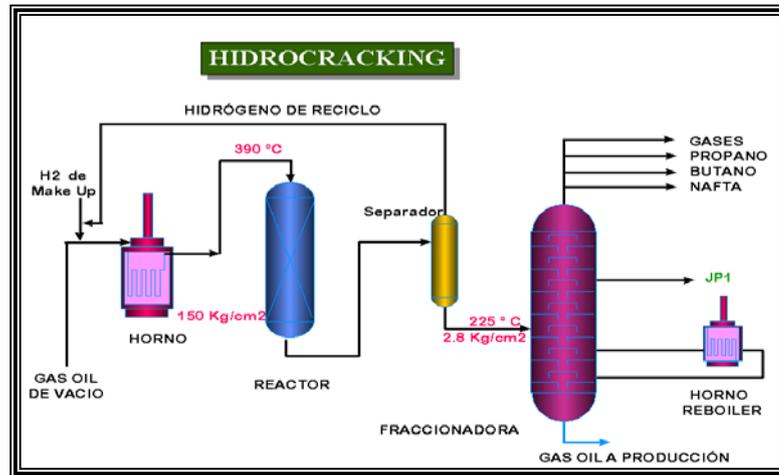
1.1.7.3 HIDROCRACKING (UNIDAD DE HIDROCRACKEO-DENOMINADA ISOMAX).

La unidad de Hidrocracking es un proceso térmico que opera a temperaturas superiores a los 350°C y presiones de 100 a 2000 psi, en la que procesa gas oil liviano de vacío y gas oil pesado produciendo gas residual, propano comercial, butano comercial, nafta, aercombustible JP1 y gas oil comercial. Isomax es un proceso fundamental en la Refinería dado que la alta calidad del gas oil que produce, mejora sustancialmente de los productos.

1.1.7.3.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO HIDROCRACKING.

En la figura 1.8 se especifica el proceso de hidrocracking, donde la carga es calentada y pasa al sistema de reacción que consta de dos reactores en paralelo. En ellos la carga se pone en contacto junto con el hidrogeno con un catalizador específico. En los reactores se obtiene una completa remoción de compuestos de azufre, nitrógeno, oxigenados, olefinas y aromáticos policíclicos, a la vez se produce la ruptura de cadenas de alto peso molecular a hidrocarburos de bajo rango de destilación (naftas,

jet fuel y gas oil). El producto obtenido es enviado a un separador gas-liquido donde se libera el hidrógeno que no reacciona. Los productos de reacción son enviados a una torre fraccionadora donde son separados.



Fuente: PETROINDUSTRIAL, Refinería Estatal de Esmeraldas (REE), 2010.

Fig. 1.8 Unidad de Hidrocracking (ISOMAX).

1.2 BASES TEÓRICAS DE REACTORES QUÍMICOS.

1.2.1 CONCEPTOS GENERALES.

1.2.1.1 DEFINICIÓN DE REACCIÓN QUÍMICA⁴.

Se conoce como reacción química a aquella operación unitaria que tiene por objeto distribuir de forma distinta los átomos de ciertas moléculas (compuestos reaccionantes o reactantes) para formar otras nuevas (productos). El lugar físico donde se llevan a cabo las reacciones químicas se denominan REACTOR QUÍMICO.

Los factores que hay que tener en cuenta a la hora de llevar a cabo o desarrollar una reacción química son:

- Condiciones de presión, temperatura, y composición necesarias para que los materiales entren en estado de reacción,
- Las características termodinámicas y cinéticas de la reacción,
- Las fases (sólido, líquido, gaseoso) que se encuentran presentes en la reacción.

Formas de cambios químicos:

- **Descomposición**, consiste en que una molécula se divide en moléculas más pequeñas, átomos o radicales.
- **Combinación**, ésta se realiza cuando una molécula o átomo se une con otra especie para formar un compuesto nuevo.

⁴ MASTERTON, W., y otros, Química General Superior, McGraw Hill, México, 1993.

- **Isomerización**, en este caso la molécula no efectúa ninguna descomposición externa o adición a otra, es simplemente un cambio de configuración estructural interna.

1.2.1.2 CLASES DE REACCIONES QUÍMICAS⁵.

- **Reacciones Homogéneas:** Cuando se afecta solamente una fase, ya sea gaseosa, sólida, o líquida.
- **Reacciones Heterogéneas:** Cuando se requiere la presencia de al menos dos fases para que tenga lugar la reacción a una velocidad deseada.
- **Reacciones Enzimáticas:** Utilizan catalizadores biológicos (proteínas con alto peso molecular, con centros activos, y que trabajan a bajas temperaturas).
- **Reacciones Catalíticas:** Son aquellas reacciones que requieren de una sustancia adicional (que no aparece en el balance global) para modificar la velocidad de reacción; esta sustancia por su mera presencia provoca la reacción química, reacción que de otro modo no ocurriría.
- **Reacciones No Catalíticas:** Los materiales reactantes no necesitan ninguna sustancia adicional para dar lugar a la reacción química.
- **Reacciones Auto catalíticas:** En esta reacción, uno de los productos formados actúa como catalizador, participando en otra etapa del proceso donde velocidad de reacción es más rápido que en la primera.
- **Reacciones Endotérmicas:** Son aquellas que adsorben calor del exterior.

⁵ MASTERTON, W, Química General Superior. Impresos Roef. S.A. México, 1998.

- **Reacciones Exotérmicas:** Son aquellas que liberan calor hacia el exterior.

1.2.1.3 DEFINICIÓN DE REACTOR QUÍMICO.

Un reactor químico es una unidad procesadora diseñada para que en su interior se lleve a cabo una o varias reacciones químicas. Dicha unidad procesadora está constituida por un recipiente cerrado, el cual cuenta con líneas de entrada y salida para sustancias químicas, y está gobernado por un algoritmo de control⁶.

Los reactores químicos tienen como funciones principales:

- Asegurar el tipo de contacto o modo de fluir de los reactantes en el interior del tanque, para conseguir una mezcla deseada con los materiales reactantes.
- Proporcionar el tiempo suficiente de contacto entre las sustancias y con el catalizador, para conseguir la extensión deseada de la reacción.
- Permitir condiciones de presión, temperatura y composición de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la velocidad deseada, atendiendo a los aspectos termodinámicos y cinéticos de la reacción.

1.2.1.4 ECUACIÓN DE RENDIMIENTO (BALANCE DE MASA Y ENERGÍA)⁷.

Es aquella expresión matemática que relaciona la salida con la entrada en un reactor químico, para diversas cinéticas y diferentes modelos de contacto.

⁶ DENBIGH, K.G., TURNER, J.C.R., "Introducción a la teoría de los reactores químicos". Limusa. México, 1990.

⁷ LEVENSPIEL, Octane, Ingeniería de las Reacciones Químicas, Editorial Reverte, Mayo 2000.

Modelo de Contacto: Está referido a como los materiales circulan a través del reactor y se contactan unos con otros dentro de este, además del tiempo que necesitan para mezclarse, y las condiciones y características de la incorporación de material.

Cinética: Está referido a cuán rápido ocurren las reacciones, el equilibrio dentro del reactor, y la velocidad de la reacción química; estos factores están condicionados por la transferencia (balance) de materia y energía.

El balance de masas está dado por la relación:

$$ENTRA - SALE + GENERA - DESAPARECE = ACUMULA \quad [\text{Ecuación 1.1}]$$

El balance de energía está dado por la relación:

$$ENTRA - SALE \pm GENERA \pm TRANSMITE = ACUMULA \quad [\text{Ecuación 1.2}]$$

1.2.2 TIPOS DE REACTORES QUÍMICOS⁸.

Existen infinitud de tipos de reactores químicos, y cada uno responde a las necesidades de una situación en particular, entre los tipos más importantes, más conocidos, y mayormente utilizados en la industria se puede mencionar los siguientes:

- **REACTOR DISCONTINUO.** Es aquel en donde no entra ni sale material durante la reacción, sino más bien, al inicio del proceso se introduce los materiales, se lleva a las condiciones de presión y temperatura requeridas, y se deja reaccionar por un tiempo preestablecido, luego se descargan los productos de la reacción y los reactantes no convertidos. También es conocido como reactor tipo Batch.

⁸ FROMENT, G.F., BISCHOFF, K.B., Chemical reactor analysis and design. Wiley. New York, 1990.

- **REACTOR CONTINUO:** Mientras tiene lugar la reacción química al interior del reactor, éste se alimenta constantemente de material reactante, y también se retira ininterrumpidamente los productos de la reacción.
- **REACTOR SEMICONTINUO:** Es aquel en el cual inicialmente se carga de material todo el reactor, y a medida que tiene lugar la reacción, se va retirando productos y también incorporando más material de manera casi continua.
- **REACTOR TUBULAR:** En general es cualquier reactor de operación continua, con movimiento constante de uno o todos los reactivos en una dirección espacial seleccionada, y en el cual no se hace ningún intento por inducir al mezclado. Tienen forma de tubos, los reactivos entran por un extremo y salen por el otro.
- **TANQUE CON AGITACIÓN CONTINUA:** Este reactor consiste en un tanque donde hay un flujo continuo de material reaccionante y desde el cual sale continuamente el material que ha reaccionado. La agitación del contenido es esencial, debido a que el flujo interior debe estar en constante circulación y así producir una mezcla uniforme.
- **REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO:** Se utiliza para reacciones donde intervengan un sólido y un fluido (generalmente un gas). En estos reactores la corriente de gas se hace pasar a través de las partículas sólidas, a una velocidad suficiente para suspenderlas, con el movimiento rápido de partículas se obtiene un alto grado de uniformidad en la temperatura evitando la formación de zonas calientes.
- **REACTOR DE LECHO FIJO:** Los reactores de lecho fijo consisten en uno o más tubos empacados con partículas de catalizador, que operan en posición vertical. Las partículas catalíticas pueden variar de tamaño y forma: granulares, cilíndricas, esféricas, etc. En algunos casos, especialmente con

catalizadores metálicos como el platino, no se emplean partículas de metal, sino que éste se presenta en forma de mallas de alambre. El lecho está constituido por un conjunto de capas de este material. Estas mallas catalíticas se emplean en procesos comerciales como por ejemplo para la oxidación de amoníaco y para la oxidación del acetaldehído a ácido acético.

- **REACTOR DE LECHO CON ESCURRIMIENTO:** En estos reactores el catalizador sólido está presente como en el lecho fijo. Los reactivos se hacen pasar en corrientes paralelas o a contracorriente a través del lecho.
- **REACTOR DE LECHO DE CARGA MÓVIL:** Una fase fluida pasa hacia arriba a través de un lecho formado por sólidos. El sólido se alimenta por la parte superior del lecho, se mueve hacia debajo de la columna y se saca por la parte inferior.
- **REACTOR DE BURBUJAS:** Permiten hacer burbujear un reactivo gaseoso a través de un líquido con el que puede reaccionar, porque el líquido contiene un catalizador disuelto, no volátil u otro reactivo. El producto se puede sacar del reactor en la corriente gaseosa.
- **REACTOR CON COMBUSTIBLE EN SUSPENSIÓN:** Son similares a los reactores de burbujeo, pero la fase “líquida” está formada por una suspensión de líquidos y partículas finas del catalizador sólido.
- **REACTOR DE MEZCLA PERFECTA:** En este reactor las propiedades no se modifican ni con el tiempo ni con la posición, ya que suponemos que estamos trabajando en estado de flujo estacionario y la mezcla de reacción es completamente uniforme. El tiempo de mezcla tiene que ser muy pequeño en comparación con el tiempo de permanencia en el reactor. En la práctica se puede llevar a cabo siempre que la mezcla fluida sea poco viscosa y esté bien agitada)

- **REACTORES DE RECIRCULACIÓN:** Pueden ser CON DISPOSITIVO SEPARADOR, cuando se toma parte de la corriente de salida y se llevan directamente a la entrada del reactor. SIN DISPOSITIVO SEPARADOR, cuando en la salida del reactor colocamos un dispositivo separador que hace que se separen reactivos y productos, luego los reactivos se recirculan de nuevo al reactor.
- **REACTORES DE MEMBRANA:** Son aquellos que combinan la reacción y la separación en una sola unidad; la membrana selectivamente remueve una (o más) de las especies reactantes o productos. Estos reactores han sido comúnmente usados para aplicaciones en las cuales los rendimientos de la reacción están limitados por el equilibrio. También han sido propuestos y usados para otras aplicaciones; para incrementar el rendimiento y la selectividad de reacciones enzimáticas y catalíticas influyendo a través de la membrana sobre la concentración de una (o más) especies intermedias, removiéndolas selectivamente (o ayudando a mantenerlas en una concentración baja), evitando la posibilidad de que dichos compuestos envenenen o desactiven el catalizador y para proveer una interfase controlada entre dos o más reactantes.
- **FERMENTADORES:** Este tipo de reactores utilizan hongos, los cuales forman un cultivo, el cual a su vez se transforma en una “sopa” espesa que contiene crecimientos filamentosos. Un ejemplo se encuentra en la fabricación de antibióticos como la penicilina.

También se pueden mencionar los reactores ISOTÉRMICOS, que son aquellos que trabajan u operan a una misma *temperatura constante*; y también los reactores ISOBÁRICOS, que son aquellos que trabajan u operan a una misma *presión constante*.

1.3 REACTORES PARA HIDROPROCESAMIENTO DEL PETRÓLEO.

Debido al incremento de producción de crudos pesados y la demanda mundial de combustibles más limpios, nuevas alternativas deben ser encontradas para satisfacer estos requerimientos.

Por otro lado, la producción de crudos ligeros está decreciendo, y por lo tanto las refinerías en un futuro no muy lejano tendrán que procesar grandes cantidades de crudos pesados con altos contenidos de impurezas.

Durante el hidroprocesamiento, varias reacciones tales como la hidrodesmetalización (HDM), la hidrodesulfurización (HDS) la hidrodesalfanetización (HDAs), y la hidrodesnitrogenización (HDN) ocurren, substancialmente reduciendo esas impurezas.

En el caso de Ecuador el incremento en la producción de crudos pesados, (ejemplo el crudo oriente) ha forzado a PETROECUADOR (Empresa Estatal Petróleos del Ecuador), con su filial PETROINDUSTRIAL a reconfigurar las refinerías para que sean capaces de procesar tales crudos pesados.

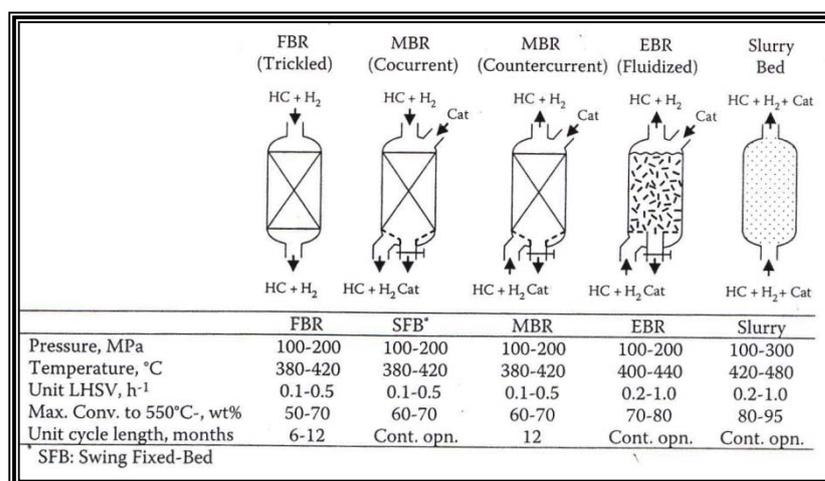
Para ello, se está desarrollando el presente proyecto sobre la aplicación de procesos de hidrotratamiento para convertir los crudos pesados en crudos livianos, cuya principal característica es operar bajo condiciones moderadas y severas.

1.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS REACTORES PARA HIDROPROCESAMIENTO.

El hidroprocesamiento de crudos pesados es muy difícil debido a la complejidad natural de las impurezas tales como azufre, sales, nitrógeno, oxígeno, metales pesados, etc. Los residuos procesados con el hidrotratamiento son fuertemente influenciados por el método de alimentación del crudo e hidrógeno, la cama del catalizador, la selección y diseño adecuado del reactor, y la forma de operación del reactor.

Dependiendo de la naturaleza del crudo a ser tratado por hidrotratamiento es generalmente llevado hacia afuera por los siguientes reactores; cama fija (fixed-bed), cama en movimiento (moving-bed), o cama fluidizado. Algunas veces las combinaciones de diferentes reactores son preferidas.⁹

La siguiente figura 1.9 muestra una representación esquemáticamente de los reactores usados para hidroprocesamiento de crudos pesados.¹⁰



Fuente: ANCHEYTA, J. *Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua*. 2007.

Figura 1.9 Diferentes tipos de reactores usados para hidroprocesamiento de crudos pesados.

Se detallará a continuación los cuatro principales reactores usados para hidroprocesamiento.

1.3.2 REACTORES DE CAMA FIJA (FIXED-BED REACTORS).

Los reactores de cama fija son los sistemas más usados para operaciones comerciales de hidroprocesamiento. La razón es bastante obvia, debido a que este tipo de reactor es fácil y simple para ser operado. Sin embargo la simplicidad de operación es limitada para la hidrodesulfurización HDS de crudos ligeros.

⁹ BIASCA, F.R, y otros, *Upgrading heavy crude and residues to transportation fuels. Technology, economics and outlook*, SFA Pacific, USA, 2003, pg. 7.

¹⁰ FROMENT, G., y BISCHOFF, K., *“Chemical Reactor Analysis and Design”*, 2^{da} Edition, Editorial John Wiley and Sons, USA, 1990.

1.3.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

El principio de funcionamiento del reactor de cama fija, es que el hidrocarburo líquido gotea hacia abajo por la cama del catalizador desde la parte superior a la parte inferior del reactor. El hidrógeno, en su fase gaseosa pasa simultáneamente por la cama del catalizador y se distribuye en todo el reactor.

Individualmente la selección óptima del catalizador se lograría tener una alta actividad de hidrodesulfurización y la tolerancia de bajos contenidos de metales, así como materias primas bajo las 25w.p.p.m., para un ciclo largo de un año. Para materias primas que contienen metales en el rango de 25 a 50 w.p.p.m., y un sistema de doble catalizador es más efectivo. En tal sistema, el primer catalizador se ubica en la parte superior del reactor y se encargará de soportar los metales más pesados, mientras que el segundo catalizador se ubicará en la parte inferior del reactor y será aquel que se encargará de llevar a cabo la actividad de desulfuración.¹¹

Para un sistema de tres catalizadores para el proceso de hidrodesulfurización y hidrodesmetalización, un equilibrado proceso HDM/HDS, es generalmente usado para despojar las materias primas que contienen metales en el rango de 100 a 150 w.p.p.m. para una ciclo promedio de un año. Para sistemas con contenidos de metales que superen este rango, el catalizador para HDM rápidamente se agota.

El sistema llamado Reactor de Cama por Goteo (Trickle-Bed Reactor, TBR), en la cual opera con una fase líquida (petróleo) y otra fase gaseosa (hidrógeno) que fluyen al mismo tiempo hacia abajo por la cama fija sobre las partículas del catalizador mientras la reacción va tomando lugar.¹²

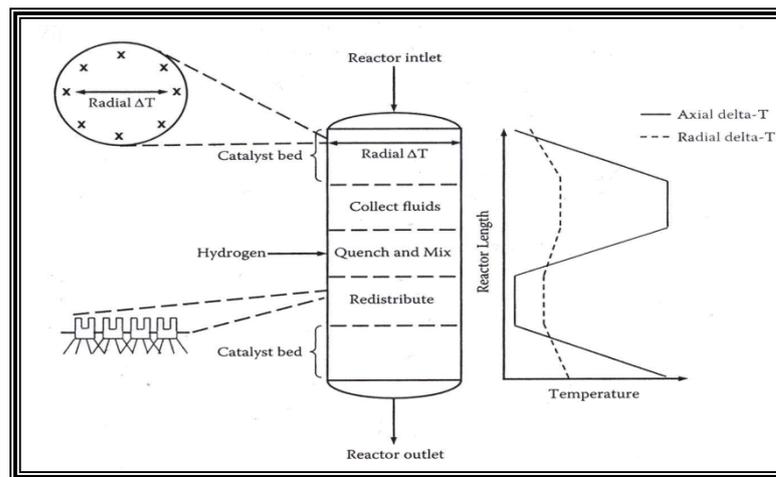
También, el hidrógeno es introducido entre las camas como un enfriador debido a que la reacción es exotérmica. En un reactor con una configuración de multicamas

¹¹KRESSMAN, S. and other, "Recent developments in fixed bed catalytic residue upgrading", CATALYSIS TODAY 43, 203-215, 1998.

¹² ANCHEYTA, J. y RORIGUEZ, M. A., "Modeling of HDS, HDN, HDA in a vacuum gas oil hydrotreater, ENERGY FUELS 18, 789-794, 2004.

con un sistema de enfriamiento con hidrógeno es usualmente empleado para hidrotratamiento en la Unidad FCC¹³ de las refinerías.

En la figura 1.10 se muestra ampliamente un ejemplo usado por este tipo de reactor con tres camas de catalizadores y enfriadores de hidrógeno, los cuales distribuidores de la carga, las zonas de enfriamiento, las camas de catalizador y el soporte del catalizador son claramente indicados.



Fuente: ANCHEYTA, J. *Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua*. 2007.

Figura 1.10 Reactor de Cama Fija con multicamas de catalizador y enfriadores.

El problema es la disponibilidad de los enfriadores de hidrógeno en las refinerías. El hidrógeno también se necesita para guardar la relación hidrógeno – crudo a lo largo del reactor. Los enfriadores de hidrógeno tienen dos funciones principales:

- Controlar la temperatura de reacción,
- Mejorar la distribución del flujo en las camas del reactor.

En la zona de enfriamiento es comúnmente una cámara dónde el efluente de la cama es mezclado con la corriente de reciclaje del hidrógeno.

¹³ Craqueamiento CatalíticoFluido, FCC.

1.3.2.2 PRINCIPALES VENTAJAS DE REACTORES DE CAMA FIJA (FBR).

- Baja caída de presión sobre la cama del catalizador,
- Flujo del líquido se comporta principalmente como flujo de pistón,
- Baja pérdida de catalizador, no desgaste del catalizador.
- Flexibilidad de operación a altas presiones y temperaturas,
- Gran tamaño del reactor,
- Baja inversión y bajos costos de operación,
- Elevada carga del catalizador por unidad de volumen del líquido y bajo relación de disipación de energía.

1.3.2.3 PRINCIPALES DESVENTAJAS DE REACTORES DE CAMA FIJA (FBR).

- Mayor posibilidades de localización del calor en la cama del catalizador,
- Baja eficiencia del catalizador por el gran tamaño de partícula del catalizador,
- Distancia de difusión larga,
- Humedad inapropiada del catalizador con baja relación de flujo de líquidos,
- Corto ciclo de vida del catalizador debido a la impracticabilidad para reaccionar con rapidez a la desactivación del catalizador,
- Puede ser, más difícil la remoción de los contaminantes en parte de la cama como la secuencia de regeneración del catalizador.

El problema del corto ciclo de vida del catalizador, es la principal razón para declinar el uso de los reactores de cama fija cuando son alimentados con cargas altamente contaminantes de metales, éste problema puede ser resuelto por la selección de adecuados catalizadores para este proceso, los cuáles contribuyan fuertemente al incremento del

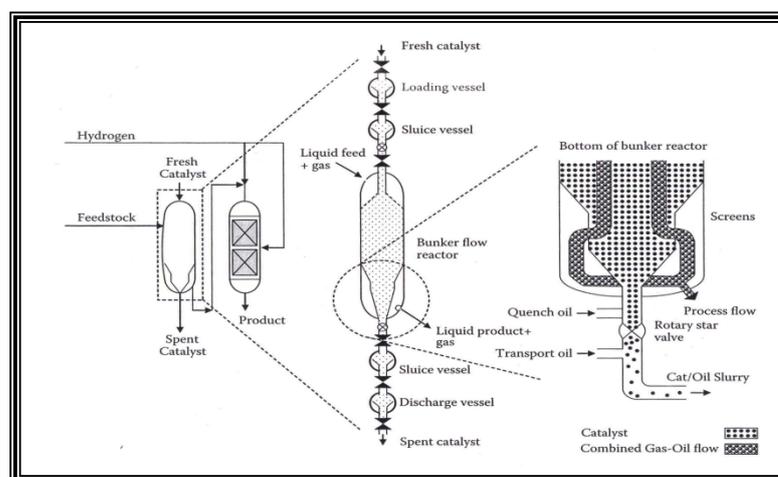
rendimiento de nuevos procesos para la refinación de residuos. (Ancheyta, 2006).¹⁴

1.3.3 REACTORES DE CAMA MOVIL (MOVING -BED REACTORS).

La diferencia con los reactores de cama fija, es que en los reactores de cama en movimiento el catalizador va hacia abajo por las fuerzas gravitacionales.

1.3.3.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

El catalizador activado y refrescado ingresa a la parte superior del reactor, y el catalizador desactivado sale por la parte inferior del reactor, mientras que el crudo va en sentido contrario o en contra corriente del flujo por el reactor. Con este movimiento el sistema de cama móvil, el catalizador puede ser remplazado continuamente o discontinuamente.



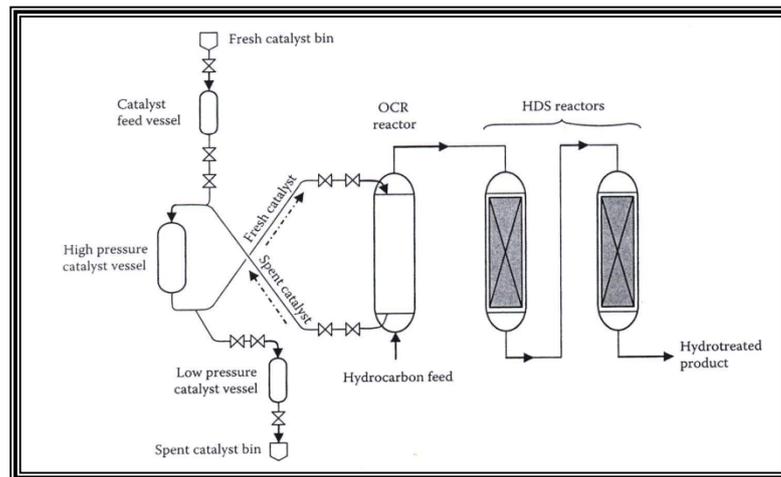
Fuente: ANCHEYTA, J. Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua. 2007.

Figura 1.11 Reactor de Cama en Movimiento.

¹⁴ANCHEYTA, J., BETANCOURT, G., Catalyst Deactivation during Hydroprocessing of heavy crude oil. II. Effect of reaction temperature during time-on-stream, ENERGY FUELS 17, 462-467, 2003.

1.3.3.2 PRINCIPALES VENTAJAS Y DIFERENCIAS ENTRE REACTORES MBR Y FBR.

- Grandes cantidades de catalizador en MBR,
- Cuando usamos más de un reactor, por ejemplo, los MBRs, combinados con los FBRs, esta configuración posibilita el remplazo del sistema de corriente de un catalizador por otro, así incrementa la flexibilidad de la unidad,
- En MBR, la parte superior de la cama móvil consiste de catalizador activado o fresco, y los metales depositados en la parte superior se mueven a la parte de abajo del reactor con el catalizador y son liberados por el inferior.
- La tolerancia metales y otros contaminantes son mucho mejor en MBR que en los FBR.



Fuente: ANCHEYTA, J. *Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua*. 2007.

Figura 1.12 Ingreso de Carga y Catalizador en Reactores de Cama en Movimiento.

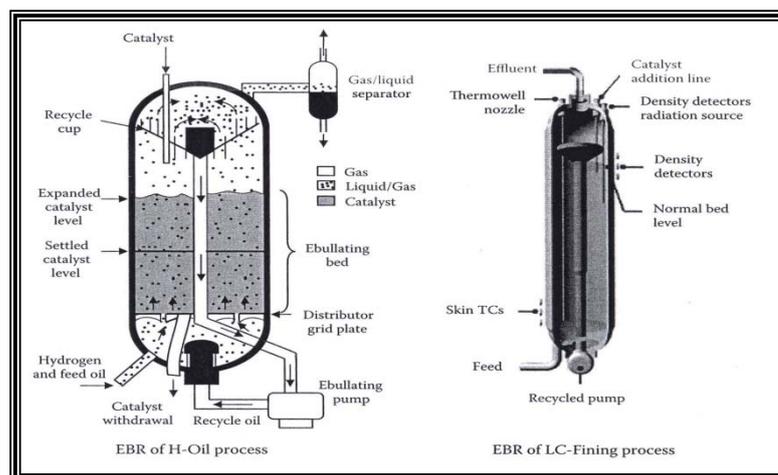
1.3.4 REACTORES DE CAMA EN EBULLICIÓN (EBULLATED-BED REACTORES).

Similar para los MBRs, la problemática de alimentación de crudo con altos contenidos de metales pesados e impurezas, los EBR son usados en procesos tecnológicos para superar algunas deficiencias de los FBRs. Esta tecnología de hidrogenación posee varias características similares (parámetros de proceso y diseño del reactor), pero son

diferenciadas por detalles mecánicos. En la figura 2.3 muestra la tecnología empleada en los EBRs.

1.3.4.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

En los reactores de cama en ebullición, la alimentación del crudo y el hidrógeno son de forma ascendente, aunque el catalizador, ampliando y mezclado en la cama, minimizando la incrustación y consecuentemente reduciendo problemas de goteo de presión. La mezcla del gas (constituyen hidrógeno reciclado) y líquido (alimentación de crudo reciclado) reactantes ingresan al reactor plenamente a la cámara y son bien mezclado por el diseño especial.



Fuente: ANCHEYTA, J. *Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua*. 2007.

Figura 1.13 Reactores de Cama en Ebullición.

El Hidroprocesamiento EBR, es un sistema de tres fases gas, líquido y sólido (catalizador) en los cuales el crudo es separado del catalizador en la parte superior del reactor y recirculado hacia el inferior de la cama y mezclado con el nuevo ingreso de la carga.

La circulación líquida es la que mantiene al reactor esencialmente en condiciones isotérmicas.

1.3.4.2 PRINCIPALES VENTAJAS DE LOS REACTORES DE CAMA MOVIL.

- Mayor flexibilidad de operación,
- Incrementa la relación de reacción debido al uso de partículas de catalizador de tamaño pequeño,
- Buena transferencia de calor,
- Operación netamente isotérmica.

1.3.4.3 PRINCIPALES DESVENTAJAS DE LOS REACTORES DE CAMA MOVIL.

- Relación de consumo de catalizador elevado,
- Formación de sedimentos,
- El diseño de reactores de cama en movimiento, es más difícil que otros reactores, debido a que requiere más información, por ejemplo, datos de materia prima (crudo), propiedades del catalizador, catálisis y química cinética, transferencia de calor del catalizador.

1.3.5 SLURRY PHASE REACTORS. (REACTOR PARA FASE SLURRY).

Un reactor para fase slurry (SPR) puede también ser usado para hidroprocesamiento de crudos con contenidos elevados de metales para obtener productos con bajo punto de ebullición usados en un reactor.

Los SPR son basados en tecnología que combinan las ventajas de las tecnologías de rechazo de carbón en términos de flexibilidad con el alto desempeño peculiar para procesos de adición del hidrógeno¹⁵. Los SPR logran un similar contacto del crudo y catalizador, y pueden operar con bajos grados de remezcla que los EBR. La diferencia de los FBR y EBR con los SPR es que una pequeña cantidad de polvo fino

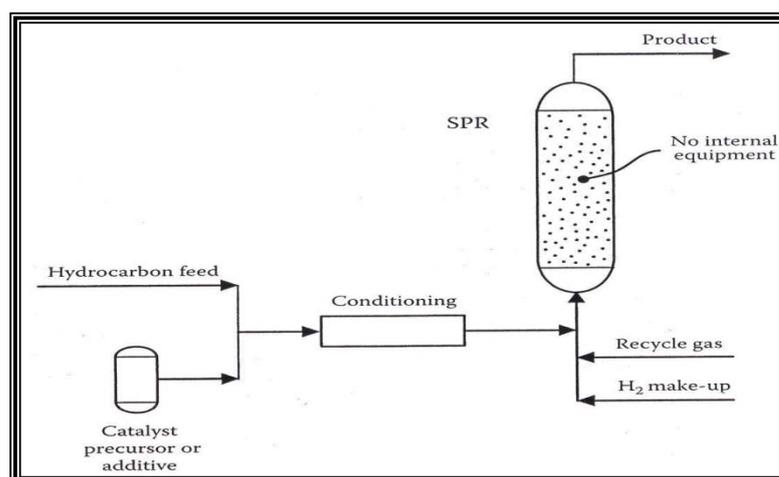
¹⁵PANARITI, N, and MARCHIONNA, M., Petroleum residue upgrading with dispersed catalysts, Catalysts activity and selectivity-Part I, Applied Catalysis A, 204, 203-213, 2000.

es usado (típicamente desde 0.1 a 3.0 wt%), los cuales pueden ser un aditivo o un catalizador (o precursor de catalizador).

1.3.5.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE SPRs.

El catalizador es mezclado con la carga (crudos pesados), y ambos son cargados con hidrógeno hacia arriba en un reactor vacío. El SPR está libre de equipos internos y opera en modo de tres fases. Las partículas de aditivo sólidos son suspendidas en la fase primaria del hidrocarburo líquido, por los cuales el hidrógeno y los gases fluyen rápidamente en forma de burbujas. Desde el crudo y el catalizador fluyen en paralelo, la mezcla es enfocada hacia abajo por un flujo pistón¹⁶.

En un SPR el catalizador fresco es impregnado con el crudo pesado para ingresar en el reactor, y cuando la reacción finaliza, el catalizador gastado sale del SPR junto a las fracciones pesadas de crudo y sigue siendo residuo no convertido en forma benigna. Al interior del reactor, el polvo líquido se mezcla y comporta como una sola fase (fase homogénea) por el pequeño tamaño del catalizador o las partículas del aditivo.



Fuente: SCHULMAN, B.L., *Upgrading Heavy Crudes*, 1991.

Figura 1.14 Principio de funcionamiento SPRs.

¹⁶SPEIGHT, J, *The desulfurization of Heavy Oils and Residua*, 2nd Edition, Marcel Dekker, New York, 2000.

La figura 1.14 muestra una simplificación típica del proceso químico para el catalizador (o aditivo) adicionado a un SPR. Ha sido informado que el polvo sobre todo está en un sitio donde las pequeñas cantidades de coque pudieron depositarse, o guardadas en las paredes, válvulas e intercambiadores de calor, y así mantener una buena operatividad. Es decir, el uso de un catalizador seleccionado dispersa en el interior la carga e inhibe la formación de coque.

1.3.5.2 PRINCIPALES VENTAJAS DE LOS SPR.

- Los SPRs usan catalizador desechables con bajo costo. Así los catalizadores para slurry poseen elevada área superficial y un tamaño de partícula a escala de micrón, el cual significa una elevada utilización de catalizador,
- El catalizador o aditivo usado en SPR tienen un gran número de poros externos en la superficie que los catalizadores extraídos y usados en los FBR, EBR y MBR,
- El catalizador gastado durante el hidropesamiento de los SPRs no son residuos peligrosos y no requieren especial durante el proceso de manejo tales como los recuperados durante los procesos usados FBR, MBR o EBR,
- Buena transferencia de masa externa,
- La operación de la fase homogénea de SPR provee una operación térmica estable (temperatura uniforme) con ninguna posibilidad de fuga de temperatura.

1.3.5.3 PRINCIPALES DESVENTAJAS DE SPRs.

- La calidad del producto es muy pobre, por ejemplo, esencialmente todos los metales de las cargas permanecen no convertidas en la carga,
- El tamaño de las partículas del catalizador deberían ser estrictamente diseñadas para lograr excelentes condiciones de dispersión en order para obtener una elevado nivel de conversión,

- Los SPR han sido cuidadosamente diseñados para mantener una mezcla de tres fases de lechadas de crudos pesados, fino poder del catalizador, e hidrógeno y para promover un efectivo contacto,
- Los SPR se han basado en tecnologías para hidroprocesamiento están aún en demostración en procesos a escala, y el sistema tiene que estar demostrado a grandes escalas para refinerías para considerarse así un alternativa comercial competitiva.

1.4 CODIGO ASME¹⁷.

A finales de los años 1700, sobresale el uso de calderas y la necesidad de proteger al personal de fallas catastróficas. Las calderas para generación de vapor con presiones mayores a la atmosférica. El descuido y la negligencia de los operadores, las fallas de diseño en las válvulas de seguridad, inspecciones inadecuadas producen muchas fallas y explosiones de calderas en los Estados Unidos y Europa.

En junio de 1817, el comité del consejo de Filadelfia expone las explosiones de calderas de barcos. Este comité recomienda que se establezca un Instituto Legislador y se reglamenten las capacidades de presión, Instalación adecuada a la válvula de alivio e inspección mensual.

ASME fue fundada en 1880 por notables ingenieros mecánicos. Este código o estándar internacional fue desarrollado bajo proceso de acreditación en reunión y criterio para conocimiento técnico y para facilitar sistemáticamente un flujo de información desde la investigación hasta la aplicación práctica.

En 1911, debido a la falta de uniformidad para la fabricación de calderas, los fabricantes y usuarios de calderas y recipientes a presión recurrieron al consejo de la A.S.M.E., para corregir esta situación.

En 1914, se editó la sección 1 del código A.S.M.E., uno de los primeros códigos y estándares en U.S. El comité recomienda del código para calderas y recipientes a presión así como el estándar para construcción y código de inspección.

Este código contiene los requerimientos obligatorios, prohibiciones específicas y una guía no obligatoria para las actividades de construcción. El comité reorganizó estas herramientas y técnicas usadas para el diseño y análisis, dividiéndolo por las siguientes secciones:

¹⁷The American Society of Mechanical Engineers, 2001.

1.4.1 CLASIFICACIÓN DEL CÓDIGO A.S.M.E.

Sección I	Calderas de Potencia
Sección II	Especificación de Materiales
Sección III	Requisitos generales para División 1 y División 2
Sección IV	Calderas para Calefacción
Sección V	Pruebas no Destructivas
Sección VI	Reglas y Recomendaciones para el cuidado y operación de Las Calderas de Calefacción
Sección VII	Guía y recomendaciones para el cuidado de Calderas de Potencia
Sección VIII	Recipientes a Presión
Sección IX	Calificación de Soldadura
Sección X	Recipientes a Presión de Plástico reforzado en fibra de Vidrio
Sección XI	Reglas para Inspección en servicio de Plantas Nucleares

La Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos con el propósito de formular reglas y estándares para la construcción de Recipientes a Vapor y otros Recipientes a Presión. Este comité es ahora llamado “The Boiler and Pressure Vessel Committee”¹⁸. El cuál se ha encargado de establecer las reglas generales y necesarias para la construcción de recipientes a presión.

¹⁸ Comité de Calderas y Recipientes a Presión, ASME, 2001.

Debido a que el presente proyecto es un Diseño de Recipiente a Presión, para ello se va a tomar la Sección VIII, la cual se subdivide en las siguientes tres divisiones:

- **División 1:** Esta división de la Sección VIII provee los requerimientos para el diseño, fabricación, inspección, ensayos y certificación de los recipientes sometidos o no a fuego que operan o presiones superiores a los 15 psig.
- **División 2 – Reglas Alternativas:** Este código tiene los requerimientos para la construcción y certificación de recipientes a presión que operen a presiones a más de 15 psig usando métodos de diseño y esfuerzos de diseño superiores a los de la división 1.
- **División 3 – Reglas Alternativas para Recipientes a Elevadas Presiones:** Este Código establece los requisitos aplicables al diseño, fabricación, inspección, ensayos y certificación de aparatos de presión de operación en cualquiera de las presiones internas o externas de más de 10.000 psi.

En nuestro caso se ha tomado la Sección VIII, División 1 debido a que nuestros datos teóricos se encuentran dentro de los requisitos establecidos por esta división, por eso se detalla solamente la División 1:

1.4.2 SECCIÓN VIII DIVISIÓN 1.

Esta división de la sección VIII se establece los requisitos aplicables al diseño, fabricación, inspección, ensayos y certificación de aparatos de presión que operan en cualquiera de las presiones internas o externas de más de 15 psig. Recipientes a presión podrán ser sometidos o no a fuego. Los requisitos específicos se aplican a varias clases de material utilizado en la construcción de recipientes a presión, y también a los métodos de fabricación como la soldadura, forja y soldadura por brazing. Contiene apéndices obligatorios y no obligatorios detallando los criterios de diseño complementarios, el ensayo no destructivo y las normas de aceptación de inspección. Normas relativas a la utilización de la U, UM y UV sellos símbolo del Código también se incluyen.

1.4.3 ALCANCE DE LA SECCION VII, DIVISION 1.

Recipientes que contengan agua, utilicen aire como elemento originador de presión, y que cumplan los siguientes requisitos:

- La presión deberá ser menor a 3000 psi.
- Suministro de calor no mayor de 58,600 W (200,000 BTU/h)
- Temperatura del agua superior a los 99° C (210°F)
- Capacidad de 454.3 lt (120 galones)
- Recipientes sujetos a presión interna o externa menor de 1.0055 Kg./cm² (15psi)

1.4.3.1 SUB-SECCIONES DE LA DIVISION 1.

La Sección VIII, División 1 utiliza tres secciones para el diseño de un recipiente la cual se dividen de la siguiente manera.

- **SUB-SECCIÓN A:** Requisitos Generales.
 - **Parte UG:** Requisitos generales para todos los métodos de construcción y materiales.
- **SUB-SECCIÓN B:** Requisitos que pertenecen a los métodos de fabricación de los recipientes a presión.
 - **Parte UW:** Recipientes a presión fabricados por soldadura,
 - **Parte UF:** Recipientes a presión fabricados por forja,
 - **Parte UB:** Recipientes a presión fabricados por Brazing¹⁹.
- **SUB-SECCIÓN C:** Requisitos relacionados a la clase de materiales.

¹⁹ “Es un proceso de soldadura en el que un metal de relleno o de aleación se calienta a temperatura de fusión superior a los 450°C (840°F) y se distribuirá cerca al montaje de las piezas por acción capilar”.

- **Parte UCS:** Recipientes a presión contruidos por aceros al carbón y de baja aleación,
- **Parte UNF:** Recipientes a presión contruidos con aceros no ferrosos,
- **Parte UHA:** Recipientes a presión contruidos por aceros altamente aleados,
- **Parte UCI:** Recipientes a presión contruidos con hierros fundido,
- **Parte UCL:** Recipientes a presión contruidos con material resistente a la corrosión integral de revestimiento, soldadura de metales con superposición de revestimiento, o con revestimientos aplicados,
- **Parte UCD:** Recipientes a presión contruidos con material de fundición dúctil,
- **Parte UHT:** Recipientes a presión contruidos con aceros ferri ticos con propiedades de tensión mejorada mediante tratamiento térmico,
- **Parte ULW:** Recipientes a presión fabricados por capas,
- **Parte ULT:** Reglas alternativas para Recipientes a presión contruidos por materiales que tienen alta resistencia a los esfuerzos a baja temperatura.

1.5 RESUMEN DE FÓRMULAS.

A continuación se presenta un resumen de las principales fórmulas desarrolladas y explicadas a lo largo del presente capítulo con su respectiva numeración, para realizar el diseño del reactor.

VARIABLE	ECUACIÓN	No. ECUACIÓN
GRAVEDAD API	$G.API = \frac{141.5}{Gravedad Especifica a 60^{\circ}F} - 131.5$	1.0
BALANCE MASA	$ENTRA - SALE + GENERA - DESAPARECE = ACUMULA$	1.1
BALANCE ENERGÍA	$ENTRA - SALE \pm GENERA \pm TRANSMITE = ACUMULA$	1.2

CAPITULO II

2 ANÁLISIS DE PARÁMETROS PARA LA SELECCIÓN Y CÁLCULO DEL REACTOR PARA HIDROPROCESAMIENTO.

INTRODUCCIÓN.

La remoción de azufre, es actualmente practicada en la industria petrolera, para lograr se tiene tres opciones. La Primera opción implica el uso de métodos térmicos tales como las varias técnicas de craqueo dónde la concentración de la mayoría de los azufres al interior en son productos no volátiles, como el coque. Tales procesos son localizados en la sección de conversión de las refinerías. La segunda opción implica el uso de métodos químicos tales como el tratamiento de alcanos (edulcorantes), tales pueden ser localizados en los productos finales de la sección de una refinería. La tercera opción es Hidrodesulfurización, la cual ocurre en la sección de conversión (hidrocraqueo) o finalmente (hidrotratamiento) de la refinería. Estos son los procesos posteriores en donde recibe mayor énfasis en nuestro proyecto con lo relacionado a los procesos de crudos pesados y residuales.

El propósito del hidroprocesamiento del petróleo constituye para mejorar productos existentes del petróleo o el desarrollo de nuevo productos, o incluir nuevos usos, mediante, el diseño del reactor prototipo (recipiente a presión) ayudará a la mezcla del crudo pesado con hidrógeno para mejorar su calidad e incrementar su gravedad API.

Se realiza una clasificación general con una breve descripción de cada uno de los tipos de reactores para hidroprocesamiento de crudos pesados y su principio de funcionamiento.

2.1 SELECCIÓN DEL TIPO DE EQUIPO PARA HIDROTRATAMIENTO DE CRUDO PESADO (HDT).

El objetivo del proceso de "Hidrotratamiento de Crudo Pesado" es producir una carga reformada, hidrotratada y limpia, suficientemente baja en contaminantes tales como azufre, nitrógeno, agua, halógenos, di olefinas, olefinas, arsénico y metales como para no afectar al comportamiento de la sección de reformación catalítica corriente abajo en la unidad Octanizing²⁰ (CCR).

La carga al hidrotratamiento de Crudo, es en este caso, nafta atmosférica proveniente de las dos unidades de destilación atmosférica corriente arriba. Esta nafta contiene niveles de contaminantes que pueden ser perjudiciales al catalizador de reformación y es por tanto necesario hidrotratarla.

Este proceso involucra el tratamiento del crudo en un reactor adiabático sobre un lecho de catalizador bimetálico fijo, dentro de un ambiente de hidrógeno. Una temperatura moderadamente alta en el rango de 300°C es requerida para promover las reacciones químicas. Después del proceso de reacción el crudo es despojado para remover los productos ligeros y productos gaseosos (de los contaminantes) y agua.

2.2 BASES TÉCNICAS PARA EL CÁLCULO DE UN REACTOR PARA HIDROPROCESAMIENTO.

El hidrotratamiento de crudo está diseñado para tratar dos tipos de crudo atmosférico de las dos unidades de destilación de crudo, una carga parafínica y otra nafténica.

²⁰Proceso Químico usado para convertir las naftas de refinería con índices de octanos bajos en productos líquidos de alto octanaje llamado reformados que son componentes de la gasolina de alto octanaje (también conocida como la gasolina).

2.3 CAPACIDAD TEÓRICA DEL REACTOR PARA HIDROPROCESAMIENTO.

La tabla 2.0 presenta las condiciones típicas de un reactor de cama fija (FBR o TBR) bajo condiciones de operación en una planta de hidrotratamiento comercial y piloto. También se observa que la velocidad superficial de la masa y el número de Reynolds tanto para la fase líquida y la fase gaseosa es siempre menor en la reactor piloto que en la reactor comercial²¹. Por esta razón, la baja velocidad del líquido es usada en reactores a escala para coincidir con la Velocidad Espacial por Hora (LHSV) de los reactores comerciales, el cual implica que la transferencia de masa gas-líquido y líquido-sólido es mejor en el reactor comercial; en el Anexo IV se muestra la información bibliografía que se consideró para optar por los siguientes datos.

Comparison of Operating Conditions in Pilot and Commercial HDT Plants		
Characteristics	Pilot Plant	Commercial Plant
Pressure, MPa	5.3	5.3
Temperature, K	613–653	633
LHSV, h ⁻¹	1.0–2.5	2.5
H ₂ -to-oil ratio, ml ml ⁻¹	356.2	356.2
Delta-T, °C	±2	15–20
Catalyst volume	75–150 mL	65.67 m ³
Liquid flow rate	75–375 mL/h	165,625 l/h
Catalytic bed length (L)	15–35 cm	9 m
Reactor inside diameter (D)	2.54 cm	3.048 m
Catalyst particle diameter (d _p), mm	2.3	2.3
L/d _p ratio	93–108	3913
D/d _p ratio	11.0	1325
Superficial liquid mass velocity (u _L), kg/m ² sec	0.036–0.179	5.429
Superficial gas mass velocity (u _G), kg/m ² sec	0.001–0.006	0.1859
Re in liquid phase (Re _L)	0.23–1.36	38.0
Re in gas phase (Re _G)	0.19–0.96	28.4
Pe in liquid phase (Pe _L)	0.02–0.16	0.255
Pe in gas phase (Pe _G)	3.61–5.72	0.112

Fuente: ANCHEYTA, J., *Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua*. 2007.

Tabla 2.0 Condiciones de Operación de un Reactor para Hidroprocesamiento Piloto y Comercial.

2.4 REPOSICIÓN DE HIDRÓGENO.

La reposición de hidrógeno se requiere para mantener la pureza del hidrógeno en el mismo circuito de gas de reciclo. Este hidrógeno es suministrado directamente desde la

²¹ ANCHEYTA, J., SPEIGHT, J., *Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua*, First Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, United States of America, p. 76, 2007.

reformadora catalítica con regeneración continua (CCR). Como la cantidad de reposición de hidrógeno requerida es relativamente baja en comparación al flujo másico total de la carga, los cambios en la composición de hidrógeno debido a los niveles de octano de la reformadora o a la posición en el ciclo de vida tienen poco impacto en el balance de materia global.

2.5 REACCIONES QUÍMICAS Y CATALIZADOR.

2.5.1 TERMODINÁMICA Y CINÉTICA

Para cualquier reacción química, la **termodinámica** dicta la posibilidad de su ocurrencia y la cantidad de productos reactantes no convertidos. Algunas reacciones son completadas 100%, esto es que todos los reactantes son convertidos en productos. Otras están en equilibrio, esto es sólo parte de los reactantes convertidos. La cantidad de productos y de reactantes en el equilibrio depende de las condiciones operativas, la que es dictada por la termodinámica. Note que la termodinámica no menciona el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio o la completación total de la reacción.

La **Cinética** dicta la velocidad de una reacción química (esto es la cantidad de alimentación que desaparece en, digamos, un segundo). La cinética (velocidad de reacción) es dependiente de las condiciones de operación pero también puede ser ampliamente modificada a través del uso catalizadores seleccionados apropiadamente. Una reacción (o una familia de reacciones) es generalmente mejorada por un catalizador específico.

En otras palabras, la termodinámica dicta la composición en el equilibrio final, suponiendo que el tiempo es infinito. La cinética capacita a predecir la composición después de un tiempo finito. Como el tiempo es siempre limitado, cuando las reacciones son concurrentes, la cinética es generalmente predominante.

Un catalizador generalmente consiste de un soporte (óxido de tierra, alúmina, sílice, magnesio, etc.) en el cual (un) metal (es) finalmente dividido es (son) depositado (s).

El metal es siempre responsable de la acción catalítica. A menudo, el soporte, tiene también una acción catalítica enlazada a su naturaleza química, pero principalmente provee el área superficial para que las reacciones tengan lugar.

Un catalizador no es consumido para que las reacciones tengan lugar, pero tampoco puede ser desactivado por las impurezas en la carga o por algunos de los productos laterales de las reacciones químicas involucradas, resultando en depósito en coque en el catalizador.

2.5.2 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE HIDROTRATAMIENTO

2.5.3 REACCIONES QUÍMICAS PRINCIPALES:

Ocurren dos diferentes clases de reacciones químicas:

- Reacciones de refinación,
- Reacciones de hidrogenación.

2.5.3.1 REACCIONES DE REFINACIÓN.

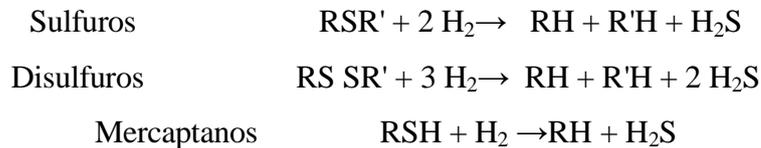
- **DESULFURACIÓN QUÍMICA.**

Permiten la desulfuración de los productos ligeros: gases, naftas, disolventes y kerosene, de una forma más precisa, dichos procesos operan disminuyendo el contenido en azufre o la corrosividad debido a ciertos compuestos sulfurados, sin que en este caso, se produzca una reducción de azufre:

- Sulfuros, disulfuros y mercaptanos reaccionan rápidamente para producir el compuesto correspondiente saturado o aromático desprendiendo H_2S .

- El azufre combinado dentro de los anillos de estructura aromática, como los tiofenos²², es más difícil de eliminar.

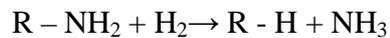
Estas reacciones llevan a la formación de H₂S y al consumo de hidrógeno.



Donde R y R' son radicales alquinos tales como propil C₃ H₇ o butil C₄H₉, S es azufre.

- **DENITRIFICACIÓN**

La tasa de reacción de denitrificación es más baja que la de desulfurización. Ocurre principalmente en el caso de compuestos heterocíclicos que tienen una estructura aromática (piridina por ejemplo), dónde el nitrógeno es desprendido para formar amoníaco.

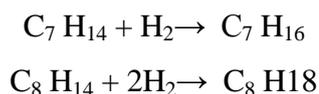


Dónde R son radicales alquinos, NH₂ es grupo funcional del amino. Estas reacciones conducen a la formación de NH₃(amoníaco) y al consumo de hidrógeno.

2.5.3.2 REACCIONES DE HIDROGENACIÓN.

Esto se refiere a la saturación de las olefinas y di olefinas típicamente encontradas en naftas hidrocracadas. La reacción ocurre rápidamente en la porción del tope del lecho catalítico promocionado por un catalizador particular, desprendiendo calor exotérmico y consumiendo hidrógeno.

²²El tiofeno es un hidrocarburo constituido por cuatro átomos de Hidrógeno (H) y uno de Azufre (S) ligados a cuatro átomos de Carbono (C), formando un pentágono que puede considerarse, por tanto, una molécula cíclica, su fórmula química es C₄H₄S.



Las di olefinas y olefinas se convierten en compuestos saturados.

Una hidrogenación mínima de aromáticos ocurre, estimada por lo menos en uno por ciento. Esto es una consecuencia de la alta selectividad del catalizador

Bajo las condiciones de reacción escogidas para este proyecto:

- El grado de hidrogenación de aromáticos es pequeño,
- El grado de hidrocraqueo es casi despreciable.

2.6 CALIDAD DE ALIMENTACIÓN (CARGA).

La calidad de la alimentación debe ser constante. Sin embargo, pequeñas variaciones pueden ser compensadas con el ajuste de las condiciones de operación mientras aún se cumplen con las especificaciones requeridas del producto. La severidad de estas condiciones se incrementa en el caso de un contenido de impurezas en la carga alto o si el punto final de ebullición de la carga es más alto que el valor del diseño. Los compuestos como silicio, arsénico y metales son absorbidos en el catalizador. La absorción ocurre en las capas superiores de los lechos catalíticos y se extiende progresivamente hacia abajo. Para todos los catalizadores afectados por estos compuestos la actividad se reduce dramáticamente²³.

Nota: Adicionalmente, los compuestos insaturados en la carga, cuando son llevados a la temperatura de reacción pueden conducir a problemas de ensuciamiento en el tren de intercambio de calor. Por tanto, se recomienda la inyección de inhibidor de polimerización.

²³ANCHEYTA, J., SPEIGHT, J., Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua, First Edition, CRC Press , Taylor & Francis Group, United States of America, 2007.

2.6.1 CARACTERÍSTICAS DE MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS

El petróleo esta naturalmente a un gran rango de ebullición mezclado con hidrocarburos adquiridos bajo la tierra y el mar que son a menudo clasificados con livianos, medianos, pesados o extra pesados, refiriéndose estos a la gravedad medido a escala por el American Petroleum Institute (API).

El petróleo producido por diferentes campos petroleros se diferencian por su viscosidad y contenidos de azufre. Los crudos más viscosos y de elevado contenido de azufre ($>0.2\text{wt}\%$) son llamados pesados o amargos, considerando que los crudos de bajo contenido de azufre son llamados dulces ($<0.5\text{wt}\%$)²⁴.

El petróleo es una mezcla compleja de hidrocarburos, cuales extendidos desde los alcanos simples para estructuras complejas con pesos moleculares en miles. La composición de crudo clásicamente depende del origen, por ejemplo el crudo Maya (México) 21°API, crudo Oriente (Ecuador) 21°API. Estos crudos son parafínicos, nafténicos o alifáticos en su estado natural. Detalles de las propiedades del crudo Oriente tomados en los diferentes centros o estaciones serán presentados en el capítulo IV.

2.7 PARÁMETROS DE OPERACIÓN²⁵.

Hay cuatro parámetros de operación más importantes en las operaciones de hidrotratamiento:

- Presión Total y Parcial de Hidrógeno,
- Temperatura de Reacción,

²⁴GARY, J. and HANDWERK, G., Petroleum Refining, Technology and Economics, Third Edition, Marcel Dekker, New York, 1994.

²⁵ANCHEYTA, J., SPEIGHT, J., Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua, First Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, United States of America, 2007.

- Relación Hidrógeno/Crudo y Gas de Reciclo,
- Velocidad Espacial.

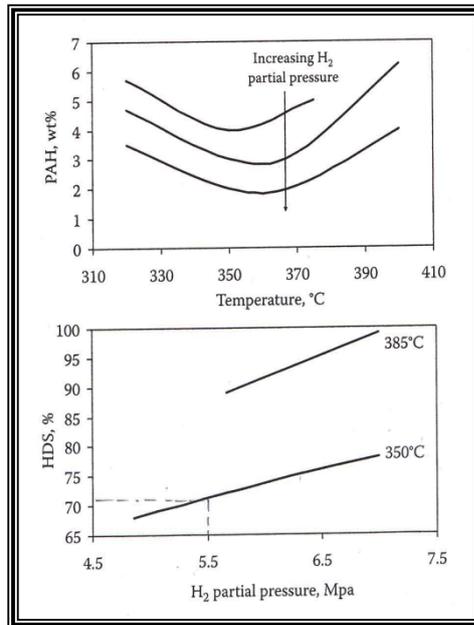
En general, para una materia prima específica y catalizador, el grado de remoción y conversión de impurezas, incrementan severamente la reacción, incrementando la presión, temperatura o relación H₂/Crudo, y disminuyendo la velocidad espacial. A continuación se detallará, los efectos de estas variables en la reacción de hidroprocesamiento y el desempeño global de los reactores para hidroprocesamiento.

2.7.1 PRESIÓN TOTAL Y PARCIAL DE HIDRÓGENO.

El desempeño de cualquier reactor para hidroprocesamiento y procesos son limitados por la presión parcial en la entrada del reactor. La elevada presión parcial de hidrógeno, el mejor desempeño del reactor para hidroprocesamiento son efectos que permiten el incremento de la presión parcial del hidrógeno prolongando la conversión. Esto ha sido confirmado por estudios realizados con modelos compuestos para HDS, HDN, HDA, y para reacciones también con alimentaciones reales (destilados livianos, destilados medios y crudos pesados) a micro escala, plantas piloto y escala real.

Un incremento en esta variable resulta en una disminución de los depósitos de coque sobre el catalizador y las reacciones de hidrotratamiento se ven favorecidas. Un nivel adecuado de la presión parcial de hidrógeno debe mantenerse en cada punto del reactor asegurando suficiente reciclo de hidrógeno a la entrada del reactor.

La figura 2.1 muestra un ejemplo de los efectos de la presión parcial de hidrógeno en la saturación de hidrocarburos poli aromáticos (PAHs) y la remoción de azufre durante el hidrotratamiento de corriente gas/crudo y ciclo de crudo liviano.



Fuente: ANCHEYTA, J. *Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua*. 2007.

Figura 2.0 Efectos de Presión Parcial de H₂ en Remoción de Impurezas.

En ambos casos, el efecto combinado de temperatura de reacción con la presión parcial de H₂ está también presentado. Esto es claramente visto que PAHs reaccionan bien fácilmente, pero su conversión termodinámica es limitada, y cualquier incremento de temperatura no incrementa la presión parcial de H₂ pero reduce los contenidos de PAH en los productos para valores más bajo que 2 wt%.

La presión total de un reactor para hidroprocesamiento es determinada por el diseño y controladas por la presión que es mantenida por el separador de altas presiones (HPS), mientras que la presión parcial del hidrógeno es determinada por la multiplicación de la presión total (por las entradas del reactor) por la pureza del hidrógeno del gas de reciclo. La presión parcial de hidrógeno y otras variables son determinadas por el tipo de materia prima, calidad de la carga, y procesos objetivos (remoción de impurezas de los niveles deseados, conversión, etc.). El alto rendimiento en la operación de la presión parcial de hidrógeno muestra los siguientes beneficios principales:

- Largo ciclo de vida del catalizador,
- Capacidad para procesar materias primas pesadas,

- Elevada capacidad de rendimiento,
- Elevada capacidad de conversión,
- Mejora en la calidad de los destilados,
- Eliminación de purgas de gas²⁶.

Al incrementar la vida del catalizador para logra una gran remoción de impurezas y buena conversión se podría requerir modificaciones significantes en la operación en los reactores de hidroprocesamiento, primariamente por el uso de elevadas presiones, y también por el incremento de la relación de hidrogenación, reducción de la velocidad espacial, y una adecuada selección del catalizador. Las presiones requeridas depender obviamente de la calidad de materia prima y en la calidad del producto propuesto por cada refinería. Por ejemplo, ha sido sugerido que para producir diesel con una cantidad de azufre menos que 30 ppm, se podría requerir elevadas presiones para hidrotratarla, las presiones de operación podrían estar entre 7.6 y 8.3 MPa.

Las elevadas presiones parciales de Hidrógeno, remoción de azufre y otras impurezas son fáciles; sin embargo los reactores pueden llegar a ser muy costosos. También, las altas presiones, incremento de consumo de hidrógeno por unidad, los cuales pueden llegar a ser factores de costos muy significantes para la refinería.

2.7.2 TEMPERATURA DE REACCIÓN.

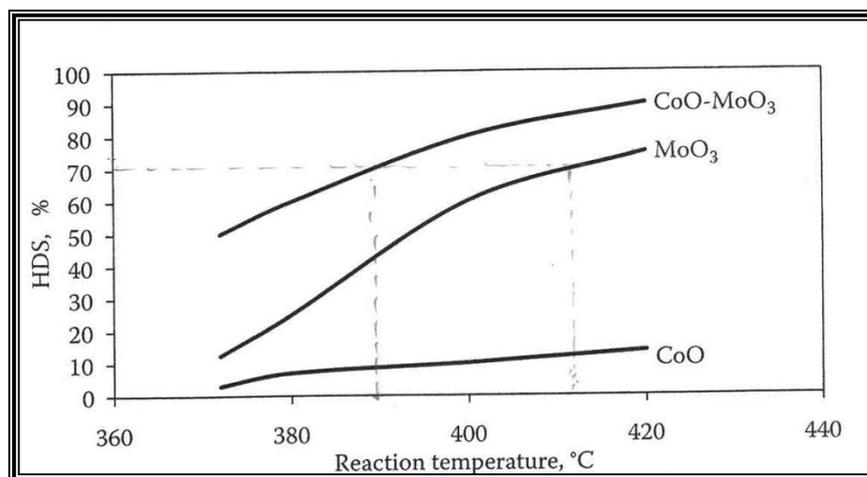
La temperatura de reacción tiene como principales objetivos:

- Las reacciones de hidrotratamiento están favorecidas por un incremento en la temperatura, lo que a su vez, incrementa el depósito de coque en el catalizador.

²⁶ MEHRA, Y., and AL-ABDULAL, A., Hydrogen Purification in Hydroprocessing (HPHSM Technology), Paper presented at the 103rd NPRA Annual Meeting, San Francisco-US, March 13-15.

- Encontrar una temperatura promedio que permita un hidrotratamiento eficiente y una larga vida del catalizador.
- De esta temperatura depende del estado del catalizador, la severidad de la reacción y el caudal de carga.

En combinación con la presión de hidrógeno, la temperatura del reactor generalmente determina el tipo de componentes que pueden ser removidos desde la carga y también establece la vida de trabajo del catalizador. En general, un incremento en la temperatura de reacción incrementará substancialmente la relación de reacción y, consecuentemente, la remoción de impurezas, como se ejemplifica en la figura 2.1 para hidrodesulfurización en la destiladora atmosférica con diferentes catalizadores²⁷.



Fuente: TAKAHASHI, T., *Catalysis Today* 104, 2005, p. 76-85

Figura 2.1 Efectos de la temperatura de reacción en HDS de una Destiladora Atmosférica.

Sin embargo, para temperaturas de craqueo térmico de los hidrocarburos por encima de los 410°C llegarán a ser más destacados, los cuales pueden conducir a la formación de cantidades considerables de hidrocarburo líquidos y gases con bajo peso molecular, y también para la desactivación del catalizador, mucho más rápido que a bajas temperaturas.

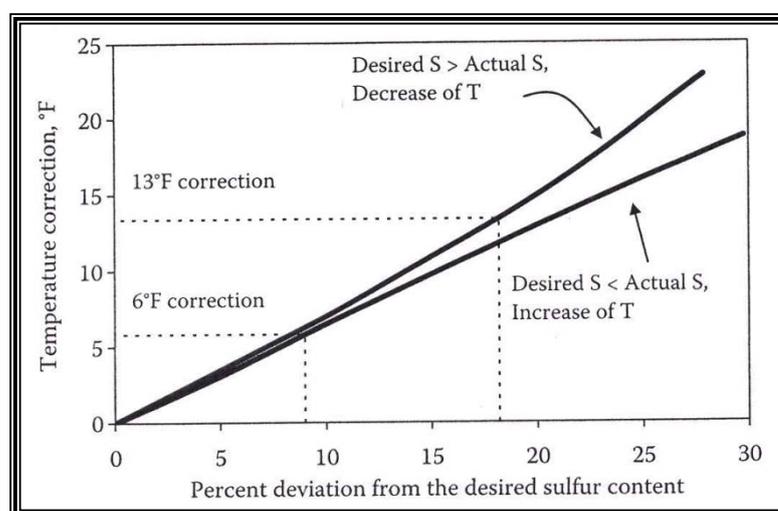
²⁷ TAKAHASHI, T., HIGASHI, H., and KAI, T., Development of a new hydrodemetallization catalyst for deep desulfurization of atmospheric residue and the effect of reaction temperature on catalyst deactivation, *Catalysis Today*, 104, p. 77-102.

Para hidroprocesamiento de residuos, la figura 2.2 muestra la temperatura requerida para lograr incrementar o disminuir la cantidad deseada de azufre del producto. Por ejemplo, si la cantidad de azufre en el producto es de 0.6 wt% y la cantidad de azufre deseada es 0.55 wt% (cantidad a obtener), la temperatura de reacción en el reactor podría ser:

$$\text{Desviación de Temperatura} = \left(\frac{0.6-0.55}{0.55} \right) * 100 = 9.21\%$$

Para la figura 2.2, la desviación de 9.1% corresponde a una temperatura de corrección de 6°F. En el caso, de la cantidad de azufre se más alta que la deseada, la corrección de la temperatura debe incrementarse. Caso contrario, si la cantidad de azufre en el producto es 0.45 wt% y la deseada es 0.55wt%, la corrección de temperatura podría ser:

$$\text{Desviación de Temperatura} = \left(\frac{0.55-0.45}{0.55} \right) * 100\% = 18.2\%$$



Fuente: TAKAHASHI, T., *Catalysis Today* 104, 2005, p. 76-85

Figura 2.2 Corrección típica de Temperatura en función de la cantidad de Azufre en el producto durante el Hidroprocesamiento de los residuos.

Para este caso, la corrección de temperatura es 13°F. Dado que la cantidad de azufre actual es inferior que la deseada, la corrección de temperatura debe disminuir. Desde que la reacción de hidroprocesamiento es en su mayoría es exotérmica, la temperatura del reactor incrementaría a través de los procesos de los lechos de

catalizador. Este incremento de temperatura en el reactor o es lineal, como se muestra en la figura 2.3, debido a que el promedio aritmético de temperatura del reactor, que es, (temperatura de entrada + temperatura de salida)/2, no puede ser más exacta la representación de la temperatura del reactor.

2.7.3 RELACIÓN HIDRÓGENO / CRUDO Y GAS DE RECICLO.

La correcta relación del gas está regida por consideraciones económicas. El reciclo es usado para mantener la presión parcial de hidrógeno y el contacto físico del hidrógeno con el catalizador y el hidrocarburo, para asegurar una adecuada conversión y una correcta remoción de impurezas mientras minimiza los depósitos de carbono. Incrementando la presión parcial del H₂ se reduce la temperatura de arranque del reactor tan bien como la tasa de desactivación del catalizador. Por encima de tasas de gas, el cambio en la presión parcial de hidrógeno será relativamente pequeño. En general, proporciones de gas más elevado que las necesarias incurrirían a un calentamiento extra y relaciones de enfriamiento, las cuales pueden superar otras ventajas.

Incrementando la proporción del gas incrementa la relación hidrógeno a crudo (H₂/Crudo) en el reactor. Esta relación incrementa en la misma manera como la presión parcial de hidrógeno. La relación H₂/Crudo está determinada por:

$$H_2/Crudo = \frac{\text{Total de Gas para el Reactor ,(SCF/día)}}{\text{Total de la Carga para el Reactor ,(Bbl/día)}} = \left[\frac{SCF^{28}}{Bbl^{29}} \right] \quad [\text{Ecuación 2.1}]$$

Además, para una presión parcial de hidrógeno efectiva, la relación de gas es importante para actuar sobre los productos volátiles de los líquidos del reactor, y así afectar la concentración de varios componentes en la fase reactiva del líquido. Similarmente para la presión parcial de H₂, la relación H₂/crudo se debe mantener los

²⁸Un pie cúbico estándar (abreviada como SCF) es una medida de la cantidad de gas, equivalente a un pie cúbico de volumen a 60 °F (15,6 °C) y, o bien 14,696 psi (1 atm o 101,325 kPa) de presión.

²⁹El barril es el nombre de varias unidades de volumen, generalmente en el rango de unos 100-200 litros (22-44 galones)

valores en el diseño, y cualquier reducción de estas por debajo de los valores mínimos de diseño se tendría efectos adversos en la vida del catalizador.

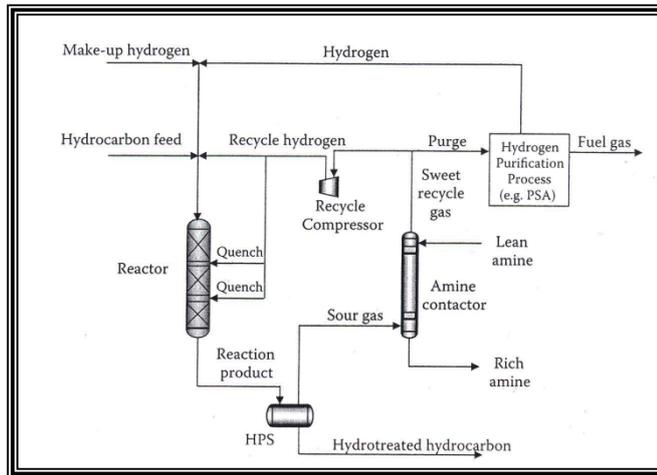
En el caso de los reactores EBR, la excesiva relación de gas afecta la naturaleza de la cama de ebullición, puede resultar un retraso en la alimentación del catalizador en la parte de abajo, e incrementa la concentración de materias pesadas en la fase líquida del reactor por goteo de los productos volátiles, los cuales tienden a incrementar el nivel de conversión pero pueden llevar a la pérdida de líquidos en el reactor o una excesiva concentración de materias muy pesadas.

En la figura 2.3 se presenta todas las corrientes involucradas en el circuito de hidrógeno de una planta de hidroprocesamiento. La corriente del efluente es separada en un separador de alta presión (HPS) en los productos líquidos hidrotratados y un gas rico en H_2 no condensable (78 a 83 mol% más H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , butano, pentano y H_2S). El sulfuro de hidrógeno (H_2S), es formado por HDS o presentado en la carga del reactor, esto es comúnmente separado con un contactor de amina para mejorar la pureza del H_2 , pero los gases ligeros del hidrocarburo están aún presentes en la corriente de gas de reciclo.

Parte de estos gases (10 a 15%) son purgados a un sistema de gas combustible o a un proceso de purificación del H_2 . La otra parte de los gases salen del contactor de amina y son comprimidos y reciclados hacia la parte superior del reactor y son usados como enfriadores (80 a 85 mol% H_2).

Los gases ricos en H_2 separados desde el proceso de purificación son mezclados con una estructura de hidrógeno y otra vez reciclados hacia la parte superior del reactor. Dependiendo sobre la fuente de la estructura del hidrógeno, están típicamente disponibles con una pureza de hidrógeno del 96 al 99.9 mol%³⁰.

³⁰MEHRA, Y., and AL-ABDULAL, A., Hydrogen Purification in Hydroprocessing (HPHSM Technology), Paper presented at the 103rd NPRA Annual Meeting, San Francisco-US, March 13-15.



Fuente: MEHRA, Y., *Hydrogen Purification in Hydroprocessing*, San Francisco-US, 2005.

Figura 2.3 Purificación del H₂ en Hidroprocesamiento.

En la tabla 2.1 se muestra un ejemplo de cálculo, en el cuál compara con valores experimentales obtenidos de una planta piloto a escala. El consumo de hidrógeno durante el hidroprocesamiento depende de las propiedades de la materia prima y de la remoción de impurezas y el nivel de conversión. La carga pesada requiere substancialmente adicionar hidrógeno para alcanzar un nivel fijo de mejoramiento.

Example of Calculation of Hydrogen Consumption			
	Feed	Product	Contribution to H ₂ Consumption, SCF/Bbl
Sulfur, wt%	6.21	2.19	392
Nitrogen, wt%	0.66	0.38	91
Hydrocracking, ^a vol%	—	7.5	188
HDA of polyaromatics, ^b wt%	25.1	11.7	362
Subtotal	—	—	1033
Metals (Ni + V), wppm	696	260	11.86 ^c
Total			1155
Experimental H ₂ consumption			1082
Typical H ₂ Consumptions, SCF/Bbl (Edgar, 1993)			
HDS	95–100 per each 1 wt%		
HDN	300–350 per each 1 wt%		
HDC	25 per each 1 vol%		
HDA	27 per each 1 vol%		
Correction in H ₂ Consumption by Metals, % (Speight, 1999)			
Ni + V, ppm	Correction, %	Ni + V, ppm	Correction, %
0–100	–2	700	12
200	1	800	16
300	2.5	900	21
400	4	1000	28
500	6.5	1100	38
600	9	1200	50

^a Determined as liquid volumetric expansion.
^b As hydrodeasphaltenization.
^c Interpolated from data at the bottom of the table.

Fuente: MEHRA, Y., *Hydrogen Purification in Hydroprocessing*, San Francisco-US, 2005.

Tabla 2.1Ejemplo de Cálculo del Consumo de Hidrógeno.

2.7.4 VELOCIDAD ESPACIAL.

La velocidad espacial es un proceso normalmente variable usado para diferenciar la cantidad de catalizador de la cantidad de carga de crudo y es calculada en base al volumen (liquid hourly, space velocity, or LHSV) o peso base (weight hourly space velocity or WHSV). El LHSV y WSHV son calculados de la siguiente manera:

$$LHSV = \frac{\text{Caudal Volumétrico total de alimentación en el Reactor (m}^3\text{/h)}}{\text{Volumen Total de Catalizador (m}^3\text{)}} = [h^{-1}] \quad \text{[Ecuación 2.2]}$$

$$WSHV = \frac{\text{Velocidad de avance de la Masa Total de Flujo en el Reactor (lb/h)}}{\text{Peso Total del Catalizador (lb)}} = [h^{-1}] \quad \text{[Ecuación 2.3]}$$

El alto rendimiento en la operación de la velocidad espacial se obtiene las siguientes características principales:

- Mientras más baja es esta velocidad, más alta la tasa de reacción,
- Siendo la cantidad de catalizador una constante, la velocidad espacial sólo puede ser cambiada con una acción sobre el flujo de la carga,
- Disminuyendo este flujo, la velocidad espacial decrece, pudiéndose operar a temperaturas más bajas y a la inversa.

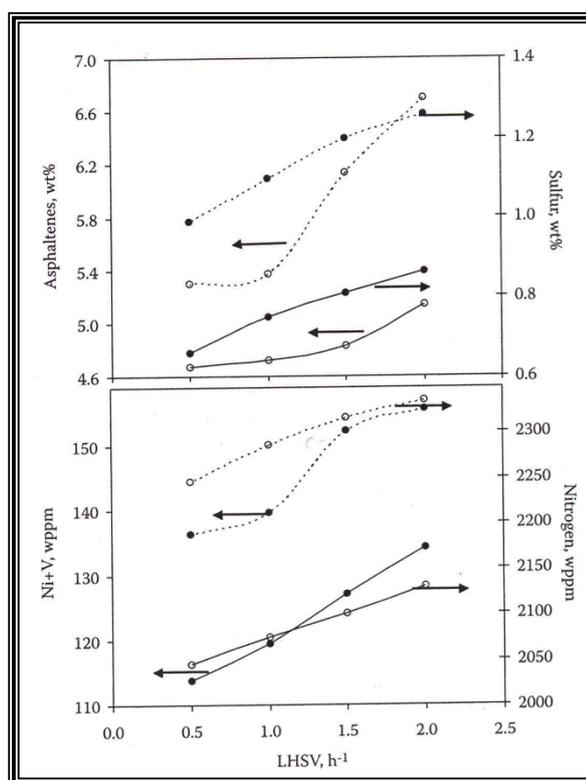
LHSV es comúnmente usado con un proceso variable en operaciones de hidroprocesamiento.

Incrementado la velocidad espacial (elevada relación de carga para dar una cantidad de catalizador) requiere una temperatura elevada en el reactor para mantener la remoción igual de impurezas y niveles de conversión, y un incremento en los resultados de la relación de desactivación, así se está reduciendo la vida del catalizador.

Con un tamaño fijo del reactor, el tiempo de residencia es inversamente proporcional a la relación de la carga y también para la velocidad espacial. Cuando la relación de

carga excede los valores de diseño, la conversión de niveles a menudo deberá haber tenido niveles bajos que los de diseño,

En la figura 2.4 muestra la influencia del LHSV, en el azufre, asfaltenos, nitrógeno y metales (Ni + V) contenidos en los productos obtenidos a dos temperaturas durante el hidroprocesamiento de crudo Maya. Esto se observa en la figura que una disminución del LHSV resulta un contenido disminuido de asfaltenos, azufres, nitrógeno y Ni+V en el producto. Contenidos de azufre y nitrógeno son aproximadamente proporcionales a la velocidad espacial, mientras que los asfaltenos y los metales no siguen totalmente esta proporcionalidad, especialmente a baja velocidad espacial (0.5 a 1.0 h⁻¹). Mientras los azufres y nitrógenos continúan a ser removidos aproximadamente a una relación constante de reacción cuando el LHSV es reducido desde 1.0 a 0.5 h⁻¹, no hay cambios significativos en los metales y la remoción de asfaltenos se reduce con la misma velocidad espacial.

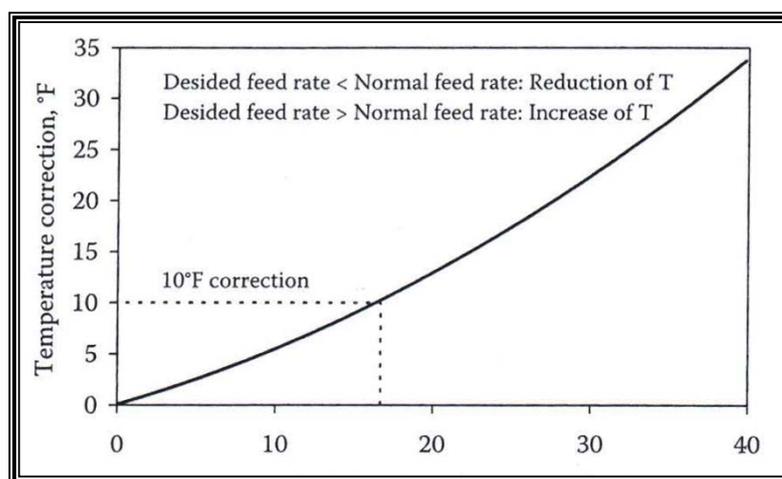


Fuente: ANCHEYTA, J. and other, Hydroprocessing of Maya Heavy Crude Oil in two reaction stages, 2002.

Figura 2.4 Efectos de LHSV en la remoción de impurezas durante el Hidroprocesamiento del crudo Maya a 360 °C y 400°C.

Similar que la temperatura de reacción, hay algunos caracteres basados en experiencias comerciales que nos ayudan a conocer la temperatura requerida cuando un cambio en la relación de carga es observado sin afectar el contenido deseado de azufre en el producto. La figura 2.5 nos muestra un ejemplo de estos caracteres. Principalmente, si la relación de carga es 30000 Bbl/día y cae a 25000 Bbl/día, la corrección de la temperatura en el reactor podría ser:

$$\text{Desviación} = \left(\frac{30000 - 25000}{30000} \right) * 100 = 16.7\%$$



Fuente: ANCHEYTA, J. and other, *Hydroprocessing of Maya Heavy Crude*, 2002.

Figura 2.5 Corrección típica de temperatura en función de la relación de carga.

En la figura 2.5, el 16.7% corresponde a la desviación a 10°F de corrección de temperatura. Desde la relación de carga deseada es más baja que la relación de carga actual, es decir, LHSV (deseada) < a LHSV (actual), la corrección de temperatura debe disminuir.

2.8 EL CATALIZADOR.

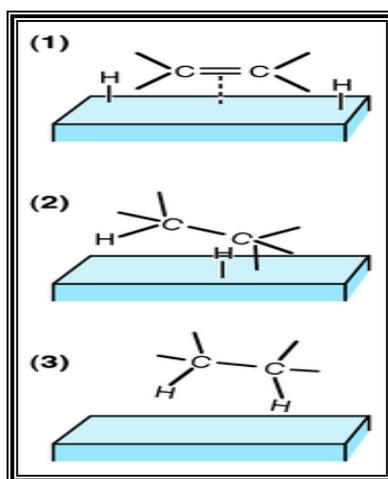
Se lo puede definir en química, a la sustancia que, en un proceso llamado catálisis, modifica la velocidad de una reacción química. La catálisis es el proceso por el cual se aumenta o disminuye la velocidad. Por ejemplo, los que reducen la velocidad de la reacción son denominados “catalizadores negativos” o inhibidores. A su vez, las sustancias que aumentan la actividad de los catalizadores son denominados

catalizadores positivos o promotores, y las que los desactivan son denominados venenos catalíticos.

La “producción” de los productos químicos industriales más importantes implica a la catálisis. En la figura 2.6 se muestra un esquema de hidrogenación de un doble enlace C=C con un catalizador metálico.

Dónde:

1. Los reactantes han sido absorbidos por la superficie del catalizador y el H_2 ha sido desasociada,
2. Un átomo de H_2 para un átomo de carbono. El otro átomo de carbono es atado a la superficies,
3. El segundo átomo de carbono para un átomo de H_2 . La molécula sale a la superficie.



Fuente: SCHMID, Michael, Hydrogenation on Catalyst, 2005.

Figura 2.6 Hidrogenación de un doble enlace C=C.

2.8.1 SELECCIÓN DE CATALIZADOR Y DISPOSICIÓN EN EL REACTOR.

Por diseño se seleccionará dos tipos de catalizadores que serán de gran ayuda para llevar a cabo la ruptura de moléculas crudo e hidrógeno en el reactor prototipo.

El catalizador se instala en tres lechos. Se inyecta gas de enfriamiento rápido (quench) entre los lechos con el fin de controlar la reacción dentro del rango de temperatura definido como óptimo.

2.8.2 TIPO DE CATALIZADORES UTILIZADOS EN HIDROPROCESOS.

A continuación se describen los catalizadores más comunes utilizados en Hidroprocesos y sus características:

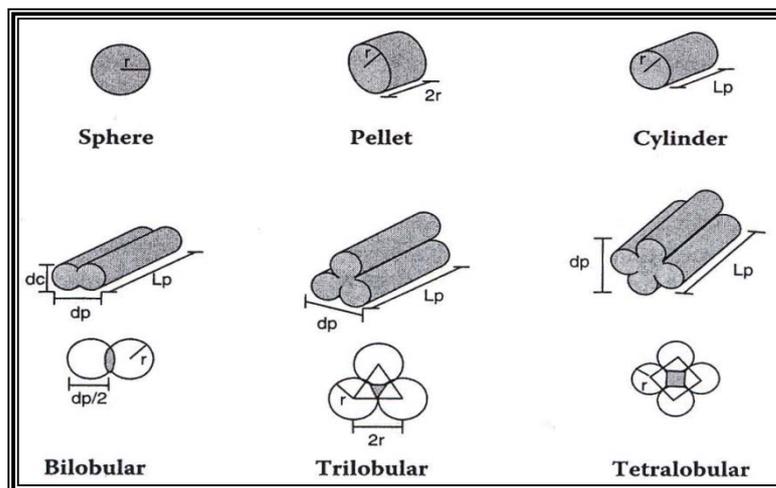
- Cobalto Molibdeno: Buena remoción de Azufre, pobre remoción de Nitrógeno,
- Níquel Molibdeno: Buena remoción de Nitrógeno, pobre remoción de Azufre,
- Níquel - Wolframio: Buena remoción de Azufre, nitrógeno y favorecen el Hidrocracking.

2.8.3 TAMAÑO Y FORMA DEL CATALIZADOR.

El tamaño y forma del catalizador y por lo tanto son parámetros importantes en la preparación del catalizador durante el hidroprocesamiento comercial. Para lograr un buen desempeño del catalizador, es importante coincidir el tamaño y forma del catalizador con las propiedades de la carga a alimentar, los procesos tecnológicos y el tipo de reactor.

En el caso de cargas pesadas, se debe tener especial atención la forma y tamaño del catalizador visto de otro lado, la difusión de los problemas encontrados durante el hidroprocesamiento en las grandes moléculas contenidas en esta carga, Esto es conocido como una reacción de difusión controlada, la relación de difusión es más pequeña que la relación de reacción³¹.

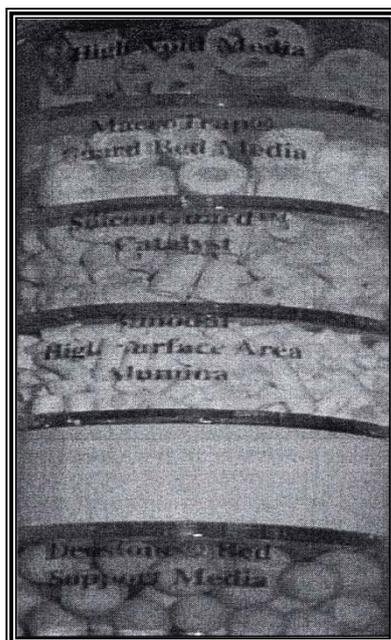
³¹MACIAS, M.J., and ANCHEYTA, J., Simulation of an isothermal hydro desulfurization small reactor with different catalyst particle shapes, Catalysis Today 98, 243-250, 2004.



Fuente: ANCHEYTA, J. and other, Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua, 2007.

Figura 2.7 Formas de las Partículas de Catalizador para Hidroprocesamiento.

En la figura 2.7 son mostradas algunas de las formas de estas partículas, la cuáles pueden ser adecuadas para hidroprocesamiento de crudos pesados. El uso de materiales con diferentes tamaños y formas para reducir los problemas tales como la operación a elevadas temperaturas de las unidades de hidroprocesamiento de residuos, dan como resultado una corta vida del catalizador y formación de coque (materiales carbonosos) sobre la cama del catalizador, es ilustrado en la figura 2.8.



Fuente: AXENS, 2010.

Figura 2.8 Ejemplo de formas y tamaños del soporte y catalizador en una Cama Catalítica.

2.8.4 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL CATALIZADOR

Las principales características de un catalizador además de sus propiedades físicas (forma, tamaño, porosidad, etc.) y mecánicas son:

- **La actividad** que expresa la habilidad del catalizador para incrementar la velocidad de las reacciones involucradas. Se mide por la temperatura a la cual el catalizador debe ser operado para producir una nafta hidrotratada, para una carga, presión y nivel de contaminantes dados.
- **La selectividad** expresa la capacidad del catalizador para favorecer las reacciones deseables sobre las no deseables.
- **La estabilidad** caracteriza el cambio con el tiempo del rendimiento del catalizador (esto es la actividad, selectividad) cuando las condiciones de operación y carga son estables. Es principalmente el depósito de coque que afecta la estabilidad, a través de la disminución del área superficial. Trazas de metal en la carga también afecta la estabilidad en forma adversa.

La estabilidad es generalmente medida por la cantidad total de carga tratada por unidad de peso de catalizador (esto es m³ de carga por kg de catalizador) sobre el ciclo del catalizador.

- **La Regeneración** esto es el número de regeneraciones que el catalizador puede soportar sin perder los niveles aceptables de actividad, o hasta llegar bastante abajo en la duración de los tiempos de operación de los ciclo entre las regeneración satisfactoria.

2.8.5 SELECCIÓN DEL CATALIZADOR.

Mediante una elección de catalizadores se puede orientar la hidrogenación y así eliminar selectivamente determinados compuestos en presencia de otros que no son

alterados. Para ello en el capítulo IV se detallará el proceso de selección del catalizador y sus características.

Existen comercialmente catalizadores optimizados en precio, es decir, dado que el costo de los materiales varían se la siguiente escala: Co<Ni>Mo<W; para una catalizador óptimo, en actividad, es posible utilizar más o menos de un determinado material de manera de obtener un menor precio compatible con el máximo mencionado.

Los catalizadores son instalados en el interior del reactor al estado de óxidos y luego son reducidos al estado sulfuroso mediante tratamiento con hidrógeno y con cargas sulfuradas, a temperaturas que pueden variar de 200° a 400°C.

La vida útil de los catalizadores varía de acuerdo al tipo de carga tratada y de las condiciones operativas. Habitualmente se los regenera en el curso de su vida útil mediante la utilización del aire y vapor de agua a temperatura que varía entre 400° y 500°C. Un catalizador industrial puede ser regenerado entre 5 y 30 veces en promedio para el tratamiento de cargas livianas e intermedias. Para cargas pesadas los sería muchos menos.

Se estima para el tratamiento de Kerosene y Gas Oil un período de 2 años como mínimo entre regeneraciones y una vida útil mayor de 5 años³².

2.9 RESUMEN DE FÓRMULAS.

A continuación se presenta un resumen de las principales fórmulas desarrolladas y explicadas a lo largo del presente capítulo con su respectiva numeración, para realizar el diseño del reactor prototipo de acuerdo a los variables de operación

³² BERCOVICH, Saúl y otros, “Diseño de un Reactor de Hidrogenación”, Ponencia presentada en el Congreso de ARPEL XXIV, Buenos Aires – Argentina, Mayo y Junio de 1976.

VARIABLE	ECUACION	No. ECUACION
RELACION H ₂ /Crudo	$H_2/Crudo = \frac{\text{Total de Gas para el Reactor, (SCF/día)}}{\text{Total de la Carga para el Reactor, (Bbl/día)}} = \left[\frac{SCF^{33}}{Bbl^{34}} \right]$	2.1
Velocidad Espacial Líquido Hora	$LSHV = \frac{\text{Caudal Volumétrico total de alimentación en el Reactor (m}^3\text{/h)}}{\text{Volumen Total de Catalizador (m}^3\text{)}} \\ = [h^{-1}]$	2.2
Velocidad Espacial Peso Hora	$WSHV \\ = \frac{\text{Velocidad de avance de la Masa Total de Flujo en el Reactor (lb/h)}}{\text{Peso Total del Catalizador (lb)}} \\ = [h^{-1}]$	2.3

³³Un pie cúbico estándar (abreviada como SCF) es una medida de la cantidad de gas, equivalente a un pie cúbico de volumen a 60 °F (15,6 °C) y, o bien 14,696 psi (1 atm o 101,325 kPa) de presión.

³⁴El barril es el nombre de varias unidades de volumen, generalmente en el rango de unos 100-200 litros (22-44 galones).

CAPITULO III

3 ANÁLISIS DE PARÁMETROS PARA CÁLCULO, DISEÑO, SELECCIÓN Y SIMULACIÓN DEL REACTOR PROTOTIPO PARA HIDROPROCESAMIENTO.

INTRODUCCION.

Se describe los parámetros de diseño, cálculo, selección y simulación del reactor prototipo.

Se indica una base teórica sobre recipientes a presión con sus cabezales, y la selección del proceso de soldadura bajo el Código ASME, Sección VIII y División 1, el diseño de tornillo o sujetadores, y la selección de las bridas bajo la Norma ANSI B 16.5.

Se dará una breve introducción sobre el proceso de simulación mediante la aplicación del Software INVENTOR 2010.

3.1 DEFINICIÓN DE CONCEPTOS.

3.2 BASES PARA EL CÁLCULO.

Los cálculos se realizan con el conocimiento de los siguientes parámetros³⁵ determinados en el capítulo II, en donde menciona que las variables de presión de operación y temperatura de reacción son las óptimas, tomadas en base a experimentos realizados por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), y la variable del diámetro interior es propuesta por los autores debido a un escalamiento del 10% de un reactor comercial ($\varnothing_{int} = 3.048\text{m}$) a un reactor prototipo que incluye un diseño personalizado para poder realizar pruebas de hidrogenación:

CARACTERÍSTICAS	REACTOR PROTOTIPO
Presión de Operación	5.3 MPa
Temperatura de Reacción	360°C
Diámetro Interior	12 plg

Fuente: Los Autores

Tabla 3.0 Parámetros (Presión, Temperatura y Diámetro Interior).

3.3 RECIPIENTE A PRESIÓN.

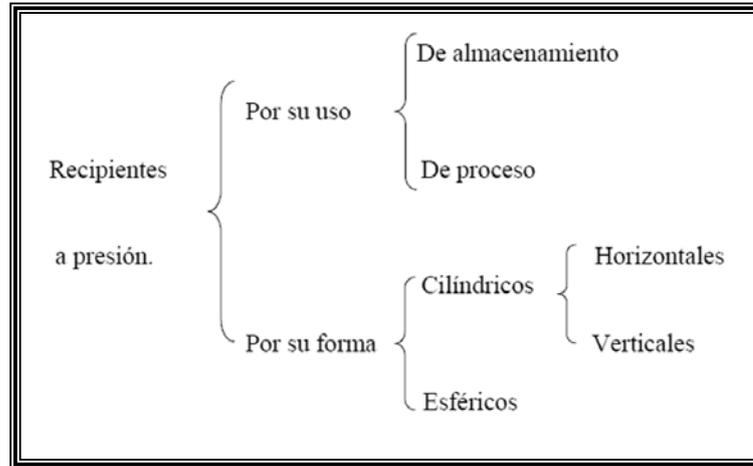
Se considera como un recipiente a presión cualquier vasija cerrada que sea capaz de almacenar un fluido a presión manométrica, ya sea presión interna o vacío, independientemente de su forma y dimensiones.

Los recipientes cilíndricos a que nos referimos en este tomo, son calculados como cilindros de pared delgada.

³⁵ ANCHEYTA, J. and SPEIGHT, J., Hydroprocessing of Heavy Oil and Residua, First Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, United States of America, p. 76, 2007.

3.3.1 TIPOS DE RECIPIENTES³⁶.

Los diferentes tipos de recipientes a presión que existen, se clasifican de la siguiente manera:



Fuente: Los Autores

Figura 3.0 Tipos de Recipientes a Presión.

3.3.1.1 POR SU USO:

Por su uso los podemos dividir en recipientes de almacenamiento y en recipientes de 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, etc.

3.3.1.2 POR SU FORMA:

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 para incrementar o decrecer la temperatura de los fluidos según el caso.

³⁶LEON, Juan, Diseño y Cálculo de Recipientes a Presión, INGLESA, p. 12, 2001

Los recipientes esféricos se utilizan generalmente como tanques de almacenamiento, y se recomiendan para almacenar grandes volúmenes a altas presiones.

Puesto que la forma esférica es la forma “**natural**” que toman los cuerpos al ser sometidos a presión interna, ésta sería la forma más económica para almacenar fluidos a presión, sin embargo, la fabricación de este tipo de recipientes es mucho más cara en comparación con los recipientes cilíndricos.

3.3.2 PRESIÓN DE OPERACIÓN (P_o).

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

3.3.3 PRESIÓN DE DISEÑO (P)³⁷.

Es el valor que debe utilizarse en las ecuaciones para el cálculo de las partes constitutivas de los recipientes sometidos a presión, dicho valor será el siguiente:

$$\textit{Si } P_o > 300 \textit{ Psi}$$

$$\textit{Si } P_o \leq 300 \textit{ Psi}$$

$$P = 1.1 * P_o$$

$$P = P_o + 30 \textit{ Psi}$$

Dónde:

P = es la presión de diseño, y

P_o = es la presión de operación.

Al determinar la presión de diseño (**P**), debe tomarse en consideración la presión hidrostática debida a la columna del fluido que estemos manejando, si éste es líquido sobre todo en recipientes cilíndricos verticales.

³⁷LEON, Juan, Diseño y Cálculo de Recipientes a Presión, INGLESA, p. 10, 2001

3.4 PRESIÓN DE TRABAJO MÁXIMA PERMISIBLE³⁸.

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

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

Es una práctica común, seguida por los usuarios, diseñadores y fabricantes de recipientes a presión, limitar la presión de trabajo máxima permisible por la resistencia del cuerpo o las tapas, y no por elementos componentes pequeños tales como bridas, boquillas, etc.

El término “**Máxima presión de trabajo permisible nuevo y frío**” es usado frecuentemente. Esto significa: La presión máxima permisible, cuando se encuentra en las siguientes condiciones:

- El recipiente no está corroído (**nuevo**).
- La temperatura no afecta a la resistencia a la tensión del material (**temperatura ambiente**) (**frío**).
- Tampoco se consideran los efectos producidos por la acción del viento, presión hidrostática, etc.

El valor de la presión de trabajo máxima permisible, se obtiene despejando “**p**” de las ecuaciones que determinan los espesores del cuerpo y las tapas, y usando como “**t**” el espesor **real** del equipo y su valor será el que resulte menor.

³⁸LEON, Juan, Diseño y Cálculo de Recipientes a Presión, INGLESA, p. 159, 2001.

3.5 MATERIAL PARA RECIPIENTES A PRESIÓN.

3.5.1 CONSIDERACIONES PARA EL MATERIAL.

En la etapa de diseño de recipientes a presión, la selección de los materiales de construcción es de relevante importancia, para lo cual, necesitamos definir una secuencia lógica en la selección de éstos.

3.5.1.1 PROPIEDADES QUE DEBEN TENER LOS MATERIALES.

Para satisfacer las condiciones de servicio los requisitos necesarios de los materiales de acuerdo a las propiedades se detallaran a continuación (ver Anexo VI).

3.5.1.2 PROPIEDADES MECÁNICAS.

Al considerar las propiedades mecánicas del material, es deseable que tenga buena resistencia a la tensión, alto punto de cedencia, por ciento de alargamiento alto y mínima reducción de área, con estas propiedades principalmente, se establecen los esfuerzos de diseño para el material en cuestión.

3.5.1.3 SOLDABILIDAD.

Los materiales usados para fabricar recipientes a presión, deben tener buenas propiedades de soldabilidad, dado que la mayoría de sus componentes son de construcción soldada. Para el caso en que se tengan que soldar materiales diferentes entre sí, estos deberán ser compatibles en lo que a soldabilidad se refiere. Un material, cuantos más elementos de aleación contenga, mayores precauciones deberán tomarse durante los procedimientos de soldadura, de tal manera que se conserven las características que proporcionan los elementos de aleación.

3.5.2 SELECCIÓN DE MATERIAL.

3.5.2.1 PLACA PARA RECIPIENTES A PRESIÓN³⁹.

Las placas que se detallan continuación están diseñadas para soportar la presión en recipientes y calderas, de acuerdo a las normas ASME, Sección II y VIII.

SA-285 Grado C, esta placa de mediana resistencia, es ideal para recipientes estacionarios, acumuladores, calentadores y calderas. Disponible hasta un grosor de 2plg, tienen excelente rolado y facilidad de soldado.

SA-387 Grado 11, placa aleada de cromo y molibdeno, diseñada específicamente para servicios de muy elevada temperatura.

SA-387 Grado 22, similar a la placa A-387 Grado 11, pero con mayor contenido de aleación de cromo y molibdeno. Sirve también para ambientes de temperatura muy elevada.

SA-36, este acero al acarbono es usado en todo tipo de construcciones estructurales. Producto de la más avanzada de ingeniería, es fabricado con un punto mínimo de cedencia de 36.000 Psi. Más resistentes que la placa A-283, la placa de acero A-36 es ampliamente recomendable par diseñar y construir estructuras y equipos menos pesado.

SA-515 Grado 70, más resistente que la placa A-285 para medias y altas temperaturas, gran facilidad de soldado siguiendo las técnicas apropiadas. Las placas A-515 tiene una estructura de grano fino. Puede venir tanto con un tratamiento normalizado o rolado. Disponible en rollo o en placa.

³⁹ASME, Normas, Sección II, Tabla 1A, 2001.

3.5.2.2 SELECCIÓN DE MATERIAL SEGÚN CONDICIONES DE OPERACIÓN Y DISPONIBILIDAD.

De acuerdo a la norma ASTM-515 y 515-M (ver Anexo VI) se obtiene las propiedades de los materiales seleccionados para medianas y altas temperaturas.

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES ACERO AL CARBONO Y DE BAJO CONTENIDO DE ELEMENTOS DE ALEACION*				
Forma	Composición nominal	Especificación		APLICACION
		Número	Grado	
Placa	C	SA-283	C	Calidad estructural. Para recipientes a presión puede usarse con limitaciones; ver nota 1
	C	SA-285	C	Calderas para servicio estacionario y otros recipientes a presión
	C - Si	SA-515	55	Principalmente para servicio a temperaturas media y alta
	C - Si	SA-515	60	- " -
	C - Si	SA-515	65	- " -
	C - Si	SA-515	70	- " -
	C - Si	SA-516	55	Para servicio a temperaturas moderada y baja
	C - Si	SA-516	60	- " -
	C - Mn - Si	SA-516	65	- " -
	C - Mn - Si	SA-516	70	- " -

Fuente: MEGYESY, Eugene, Manual de Recipientes a Presión, 2009.

Tabla 3.1. Propiedades de los materiales para alta temperatura.

3.5.3 ESFUERZO DE DISEÑO A LA TENSIÓN (S).

Es el valor máximo al que podemos someter un material, que forma parte de un recipiente a presión, en condiciones normales de operación. Su valor es aproximadamente el **25%** del esfuerzo último a la tensión del material en cuestión⁴⁰.

MATERIAL	GRADO (resistencia a la tensión 1000lb/plg ²)	S= Psi(T no > a 800°F)
ASTM A-515	55	10200
ASTM A-515	60	10800
ASTM A-515	65	11400
ASTM A-515	70	12000

Fuente: Los Autores.

Tabla 3.2. Propiedades de los materiales SA-515.

⁴⁰ LEON, Juan, Diseño y Cálculo de Recipientes a Presión, INGLESA, p. 159, 2001.

3.6 EFICIENCIA DE LAS SOLDADURAS (E).

Se puede definir la eficiencia de las soldaduras, como el grado de confiabilidad que se puede tener de ellas.

Según el Código ASME Sección VIII, División 1, sub sección B, parte UW (ver Anexo VIII) se tiene:

Según UW-11 (a), todas las juntas radiografiadas en la totalidad de su longitud se empleará un factor $E=1$,

Según UW-11 (b), radiografía por puntos (spot) a la inspección y control de calidad por zonas, cuando la longitud del spot debe ser de 6 pulgadas por cada incremento de soldadura de 50 pies o fracción. Para este tipo de radiografía el factor $E=0.85$.

Según UW-11(c), sin evaluación de radiografía, por lo que el factor $E=0.7$.

Sus valores están dados en la figura 3.3, en la cual se muestran los tipos de unión más comúnmente usados en la fabricación de recipientes a presión.

TIPOS DE JUNTAS SOLDADAS					
TIPOS NORMA UW-12		EFICIENCIA DE LA JUNTA, E			
		a. Radiografiada total- mente	b. Examinada por zonas	c. No Examinada	
1		Juntas a tope hechas por doble cordón de soldadura o por otro medio con el que se obtenga la misma calidad de metal de soldadura depositada sobre las superficies interior y exterior de la pieza. Si se emplea placa de respaldo, debe quitarse ésta después de terminar la soldadura.	1.00	0.85	0.70
2	 En juntas circunferenciales únicamente	Junta a tope de un solo cordón con tira de respaldo que queda en su lugar después de soldar	0.90	0.80	0.65
3		Junta a tope de un solo cordón sin tira de respaldo	—	—	0.60
4		Junta a traslape de doble filete completo	—	—	0.55
5		Junta a traslape de un solo filete completo con soldaduras de tapón	—	—	0.50
6		Junta a traslape de un solo filete completo sin soldaduras de tapón	—	—	0.45

Fuente: MEGYESY, Eugene, Manual de Recipientes a Presión, 2009.

Tabla 3.3 Tipos de Juntas Soldadas.

3.7 ESFUERZO DE LAS COSTURAS.

Rige solamente cuando la eficiencia de la junta circunferencial es menor que la mitad de la eficiencia de la junta longitudinal, o cuando además de la presión interna, hay cargas adicionales (carga de viento, reacción de las silletas), que producen flexión o tensión longitudinales. La razón de esto es que el esfuerzo que se origina en la costura circunferencial es igual a la mitad del que se origina en la costura longitudinal⁴¹.

3.7.1 ESFUERZO DE LA COSTURA CIRCUNFERENCIAL.

En la norma UG-27 (c) (2) (ver Anexo IX) se muestra la fórmula para el cálculo del espesor según el esfuerzo longitudinal para recipientes a presión en función del radio interior:

$$t = \frac{P \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0.4 \cdot P} \quad [\text{Ecuación 3.1}]$$

La presión máxima de trabajo para el esfuerzo circunferencial está expresada de la siguiente manera:

$$P = \frac{2 \cdot S \cdot E \cdot t}{R - 0.4 \cdot t} \quad [\text{Ecuación 3.2}]$$

Dónde:

P = Presión de diseño o presión máxima de trabajo permitida, [PSI],

S = Valor del esfuerzo del material, [PSI],

E = Eficiencia de la junta,

R = Radio interior, [pulgadas],

t = Espesor de la pared, [pulgadas],

⁴¹ MEGYESY, Eugene, Manual de Recipientes a Presión, Décima Edición, Editorial Limusa, México D.F., p. 15, 2009.

3.7.2 ESFUERZO DE LA COSTURA LONGITUDINAL.

En la norma UG-27 (c) (1) (ver Anexo IX) se muestra la fórmula para el cálculo del espesor según el esfuerzo circunferencial en función del radio interior:

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} \quad [\text{Ecuación 3.3}]$$

La presión máxima de trabajo para el esfuerzo longitudinal está expresada de la siguiente manera:

$$P = \frac{S \cdot E \cdot t}{R + 0.6 \cdot t} \quad [\text{Ecuación 3.4}]$$

3.7.3 FACTOR DE CORROSIÓN ADMISIBLE.

Las normas no prescriben la magnitud del margen por corrosión excepto para recipientes con espesor mínimo requerido menor de 0.25 pulg que han de utilizarse para servicio de vapor de agua, agua o aire comprimido, para los cuales indica un margen por corrosión no menor de la sexta parte de placa calculado. No es necesario que la suma del espesor calculado más el margen por corrosión exceda de ¼ pulg⁴².

Para otros recipientes en los que sea predecible el desgaste por corrosión, la vida esperada del recipiente será la que determine el margen y si el efecto de la corrosión es indeterminado, el margen lo definirá el diseñador. Un desgaste por corrosión de 5 milésimas de pulgada por año (1/16 de pulg en 12 años) generalmente es satisfactorio para recipientes y tuberías (ver Anexo X).

FACTOR DE CORROSION ADMISIBLE			
C.A.=	1/16	0,0625	Corrosión Admisible (UG-25) pag 191
	1/8	0,1250	
	1/4	0,2500	

Fuente: Los Autores.

Tabla 3.4. Factor por Corrosión Admisible.

⁴² MEGYESY, Eugene, Manual de Recipientes a Presión, Décima Edición, Editorial Limusa, México D.F., p. 15, 2009.

3.7.4 ESPESOR FINAL PARA EL ESFUERZO CIRCUNFERENCIAL Y LONGITUDINAL.

Para determinar el espesor requerido t_{final} , de un casco, se obtiene sumando el espesor t del esfuerzo de la costura circunferencial o longitudinal más el factor de corrosión admisible C.A.

$$t_{final} = t + C.A. \quad \text{[Ecuación 3.5]}$$

Dónde:

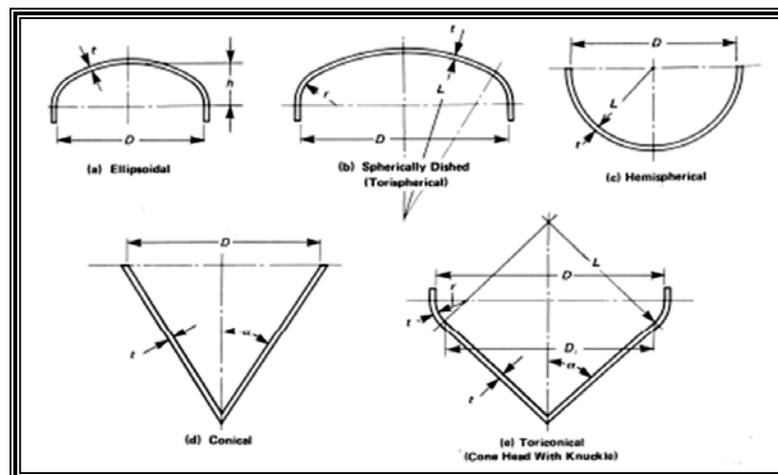
C.A. = Corrosión Admisible.

3.8 CABEZAL PARA RECIPIENTES A PRESIÓN.

Para la selección y diseño de los cabezales es importante tener una cuenta los procesos de fabricación dentro o fuera del país, para así determinar el tipo de cabezal más conveniente bajo la Código ASME y costos. Para ello, en la parte UG del Código ASME, Sección VIII y División 1 se detalla las fórmulas de cálculo.

3.8.1 TIPOS DE CABEZALES.

Como se muestra en la figura 3.1, existen varios tipos de tapas:



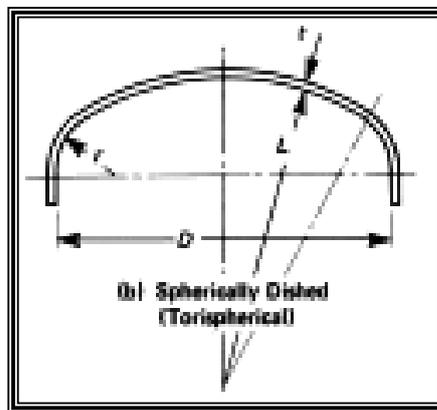
Fuente: CODIGO ASME, SEC. VII, DIV. 1, APPENDIX 1.

Figura 3.1. Tipos de Cabezales.

Por diseño se ha seleccionado tres tipos de cabezales como la toriesférica, semiesférica y elipsoidal para el cálculo del espesor de cada una y luego tomar una decisión de acuerdo al costo o método de fabricación.

3.8.1.1 CABEZA TORIESFÉRICA.

Son las que mayor aceptación tienen en la industria, debido a su bajo costo y a que soportan altas presiones manométricas, su característica principal es que el radio de abombado es aproximadamente igual al diámetro. Se pueden fabricar en Diámetros desde 0.3 hasta 6 metros.



Fuente: CODIGO ASME, SEC. VII, DIV. 1, APPENDIX 1.

Figura: 3.2. Cabezal Toriesférico.

Dónde:

L = D = Diámetro interior del casco (12 pulg),

r = Radio de rebordeo mínimo (3pulg),

D = Diámetro interior.

De acuerdo al Código ASME parte UG-32 (e) como se indica en el Anexo XI, para el cálculo del espesor en función del radio interior es decir cuando $L/r = 16\frac{2}{3}$ se emplea la siguiente fórmula:

$$t = \frac{0.885 * P * L}{S * E - 0.1 * P} \quad \text{[Ecuación 3.6]}$$

La presión máxima de trabajo para el cabezal toriesférico está expresada de la siguiente manera:

$$P = \frac{S * E * t}{0.885 * L + 0.1 * t} \quad \text{[Ecuación 3.7]}$$

Cuando el espesor exceda de 0,356 R o P exceda de 0,665 SE, es decir cuando $L/r < 16\frac{2}{3}$ se aplicará las fórmulas dadas en el Apéndice 1.3 y 1.4 (d) como se muestra en el Anexo XII.

$$t = \frac{P * L * M}{2 * S * E - 0.2 * P} \quad \text{[Ecuación 3.8]}$$

La presión máxima de trabajo para el cabezal toriesférico está expresada de la siguiente manera:

$$P = \frac{2 * S * E * t}{L * M + 0.2 * t} \quad \text{[Ecuación 3.9]}$$

En el Anexo XIII se muestran los valores del Factor “M” de acuerdo a la relación L/r para su elección de acuerdo a tablas.

Si se desea calcular el factor “M” su fórmula se expresa de la siguiente manera:

$$M = \frac{1}{4} * \left(3 + \sqrt{\frac{L}{r}} \right) \quad \text{[Ecuación 3.10]}$$

Para determinar el espeso requerido $t_{final (tapa)}$, del cabezal toriesférico, se obtiene sumando el espesor t más el factor de corrosión admisible C.A.

$$t_{final (tapa)} = t + C. A. \quad \text{[Ecuación 3.5]}$$

Dónde:

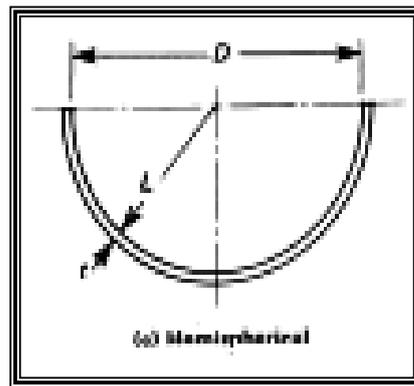
P = Presión de diseño o presión máxima de trabajo permitida, [PSI],

S = Valor del esfuerzo del material, [PSI],

E = Eficiencia de la junta,
R = Radio interior, [pulgadas],
t = Espesor de la pared, [pulgadas],
M = Factor de proporción $[L / r]$
L = Radio interior del cabezal [pulgadas],
C.A. = Corrosión Admisible.

3.8.1.2 CABEZA HEMISFÉRICO.

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.



Fuente: CODIGO ASME, SEC. VII, DIV. 1, APPENDIX 1.

Figura: 3.3. Cabezal Hemisférico.

Dónde:

L = D = Diámetro interior del casco (12 pulg),
t = Espesor del cabezal,
D = Diámetro interior.

En la figura 3.3 se observa la configuración de un cabezal Hemisférico, en dónde el esfuerzo longitudinal es igual al esfuerzo circunferencial. Según UG-32(f) del Anexo XI se tiene la siguiente fórmula para el cálculo del espesor:

$$t = \frac{P \cdot R}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P} \quad \text{[Ecuación 3.11]}$$

La presión máxima de trabajo para el cabezal hemisférico está expresada de la siguiente manera:

$$P = \frac{2*S*E*t}{R+0.2*t} \quad [\text{Ecuación 3.12}]$$

Para determinar el espeso requerido $t_{final (tapa)}$, del cabezal hemisférico, se obtiene sumando el espesor t más el factor de corrosión admisible C.A.

$$t_{final (tapa)} = t + C.A. \quad [\text{Ecuación 3.5''}]$$

Dónde:

P = Presión de diseño o presión máxima de trabajo permitida, [PSI],

S = Valor del esfuerzo del material, [PSI],

E = Eficiencia de la junta,

R = Radio interior, [pulgadas],

t = Espesor de la pared, [pulgadas],

L = Radio interior del cabezal [pulgadas],

C.A. = Corrosión Admisible.

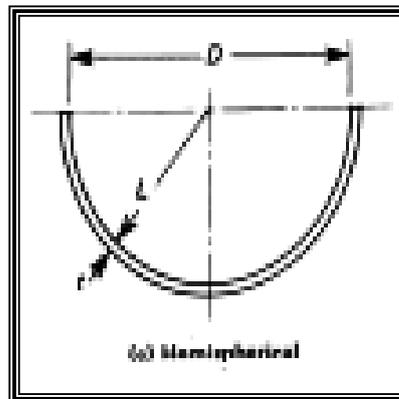
Cuando el espesor de pared exceda de $0.356 * R$ o P exceda de $0.665 * S * E$, se aplicará las fórmulas dadas en el Apéndice 1-3 del Código ASME⁴³.

3.8.1.3 CABEZAL ELIPSOIDAL.

Son empleadas cuando el espesor calculado de una tapa toriesférica es relativamente alto, ya que las tapas semielípticas soportan mayores presiones que las toriesféricas.

⁴³ MEGYESY, Eugene, Manual de Recipientes a Presión, Décima Edición, Editorial Limusa, México D.F., p. 15, 2009.

El proceso de fabricación de estas tapas es el troquelado, su silueta describe una elipse relación 2:1, como se muestra en la figura 3.4.



Fuente: CODIGO ASME, SEC. VII, DIV. 1, APPENDIX 1.

Figura: 3.4. Cabezal Elipsoidal.

Dónde:

L = D = Diámetro interior del casco (12 pulg),

t = Espesor del cabezal,

D = Diámetro interior.

La configuración de un cabezal Elipsoidal según UG-32(d) del Anexo XI se tiene la siguiente fórmula para el cálculo del espesor:

$$t = \frac{P \cdot D}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P} \quad [\text{Ecuación 3.13}]$$

La presión máxima de trabajo para el cabezal elipsoidal está expresada de la siguiente manera:

$$P = \frac{2 \cdot S \cdot E \cdot t}{D + 0.2 \cdot t} \quad [\text{Ecuación 3.14}]$$

Para determinar el espeso requerido $t_{final (tapa)}$, del cabezal elipsoidal, se obtiene sumando el espesor t más el factor de corrosión admisible $C.A.$

$$t_{final (tapa)} = t + C.A. \quad [\text{Ecuación 3.5''}]$$

Dónde:

P = Presión de diseño o presión máxima de trabajo permitida, [PSI],

S = Valor del esfuerzo del material, [PSI],

D = Diámetro Interior, [pulgadas],

E = Eficiencia de la junta,

R = Radio interior, [pulgadas],

t = Espesor de la pared, [pulgadas],

M = Factor de proporción [L / r]

L = Radio interior del cabezal [pulgadas],

C.A. = Corrosión Admisible.

Cuando los cabezales elipsoidales cuya relación del eje mayor al eje menor sea diferente de 2:1 se aplicará las fórmulas dadas en el Apéndice 1-4 (c) del Código ASME⁴⁴.

3.8.2 TOMA DE DECISIÓN.

Luego del diseño y cálculo de cada uno de los cabezales se debe tomar una decisión de acuerdo a la disponibilidad en el mercado, costos, proceso de fabricación, inspección de soldadura, etc.

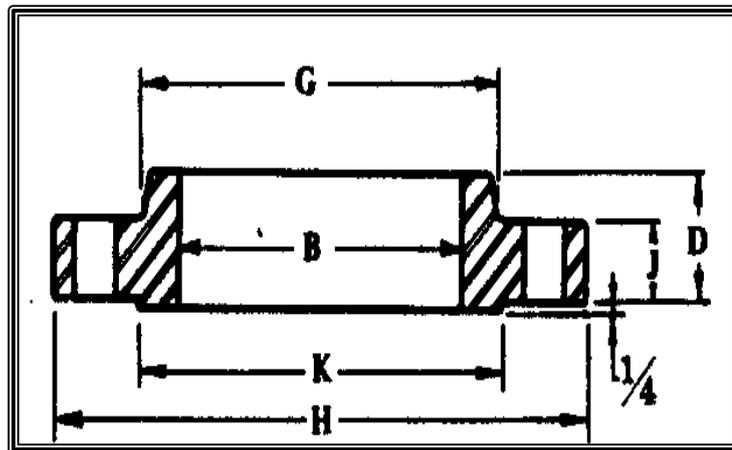
⁴⁴ MEGYESY, Eugene, Manual de Recipientes a Presión, Décima Edición, Editorial Limusa, México D.F., p. 15, 2009.

3.9 SELECCIÓN DE BRIDAS.

Para la selección de bridas se debe tomar en cuenta que éstas son reguladas por la norma ANSI⁴⁵ B16.5.

3.9.1 BRIDAS DESLIZABLE (SLIP ON) DE 900 LB.

Estas bridas se prefieren sobre las de cuello soldable, debido a su costo más bajo, a la menor precisión requerida al cortar los tubos a la medida, a la mayor facilidad de alineamiento en el ensamble ya que su costo de instalación final es menor que las bridas de cuello soldable. Como se muestra en la figura 3.



Fuente: MEGYESY, Eugene, Manual de Recipientes a Presión, 2009.

Figura: 3.5. Brida SLIP ON.

Cuando se manejan fluidos tóxicos, altamente explosivos, muy corrosivos o aquellos que al existir fugas provocarían gran riesgo, debemos usar bridas de este tipo. También es recomendable usarlas en tuberías que trabajan a muy altas presiones.

De acuerdo a la norma ANSI B16.5 se debe tener la siguiente consideración.

- Material de uso común para bridas, acero forjado SA-105, aunque también se encuentran en acero aleado y metales no ferrosos.

⁴⁵ ANSI, American National Standards Institute (Instituto Nacional Estadounidense de Estandarización)

A continuación en la tabla 3.5 se muestra los datos de la brida SLIP ON de 900 Lb en función del tamaño nominal del tubo y de acuerdo a la temperatura de operación del reactor tomadas del anexo XIV.

Diámetro Perforación	B	1/2	plg	12,8800	mm
Longitud en la Campana	D	4 5/8		117,4750	
Diámetro Campana en la base	G	16 1/2		419,1000	
Diá. Ext en la Brida	H	24		609,6000	
Espesor de la Brida	J	3 1/8		79,3750	
Diá. Ext cara elevada	K	15		381,0000	
Espesor de la Brida + 1/4	C (formula)	3 3/8		85,7250	
Círculos de los pernos	Cpernos	21		533,4000	
Número pernos NORMA	Npn	20			

Fuente: Los Autores.

Tabla 3.5'. Dimensiones Brida SLIP ON.

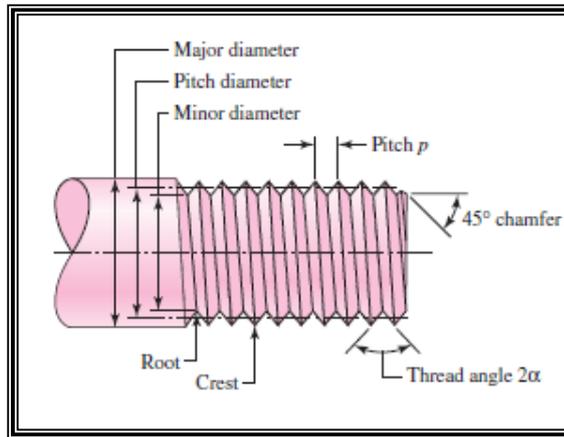
3.10 DISEÑO DE TORNILLOS, SUJETADORES Y UNIONES⁴⁶.

Los métodos más comunes para sujetar o unir piezas incluyendo el uso de elementos como pernos, tuercas, tornillos de maquinaria, tornillos opresores, remaches, retenes de resortes, dispositivos de aseguramiento y chavetas o cuñas.

3.10.1 NORMAS O ESTÁNDARES Y DEFINICIONES PARA ROSCAS DE TORNILLOS.

La terminología usada para las roscas de tornillos ilustrada en la figura 3.6 se explica de la siguiente forma:

⁴⁶ SHIGLEY, Joseph., Mechanical Engineering Design, Eight Edition, Mc Graw Hill, p. 396-405, 2008.



Fuente: SHIGLEY, J., Diseño en Ingeniería Mecánica, 2008.

Figura: 3.6. Nomenclatura de una rosca de tornillo.

- El paso (p) es la distancia que hay entre dos hilos adyacentes, medida paralelamente al eje de la rosca, y es el recíproco del número de hilos por pulgada, N .
- Obviamente, el diámetro mayor (d) es el diámetro de mayor tamaño de la rosca.
- El diámetro menor (d_r), es el diámetro de menor tamaño de la rosca.
- El avance (l) no indicado es la distancia que se desplaza una tuerca, paralelamente al eje de la rosca de un tornillo, cuando se le da una vuelta. En el caso de una rosca simple (o de un filete) como de la figura mostrada, el avance es igual al paso, mientras, que un tornillo de rosca doble el avance es igual a dos veces el paso, y uno de rosca triple el avances igual a tres veces el paso, etc.

3.10.2 TENSIÓN EN JUNTAS ATORNILLADAS.

Cuando se desea que una conexión pueda desensamblarse sin destruirla y que sea lo suficientemente fuerte para resistir cargas externas de tensión y de cortante, o una combinación de ambas, entonces la junta de perno sencilla con rondanas o arandelas templadas es una buena solución. Sin embargo, cuando las cargas principales son de tipo cortante se recomienda el uso de remaches ya que éstos llenan por completo sus agujeros y, por consiguiente, ayudan a lograr una distribución uniforme de cargas

entre los sujetadores de una junta remachada. En las juntas atornilladas se tiene un espacio libre entre el tornillo y su agujero.

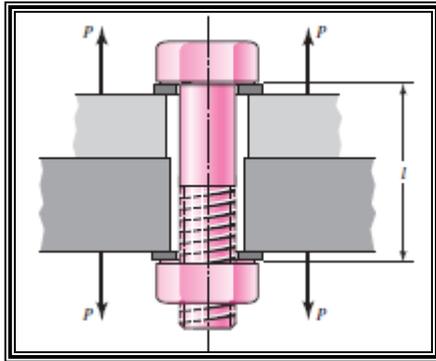


Figura: 3.7
Junta Atornillada.

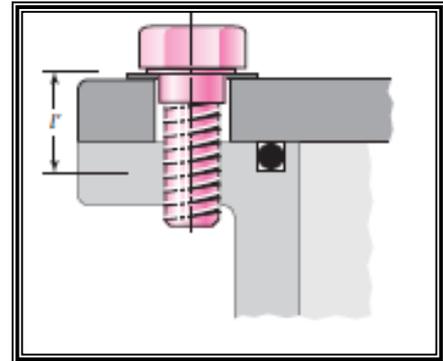


Figura: 3.8
Junta con Empaquetadura.

En la figura 3.7 se ilustra una parte de la junta atornillada (obsérvese el espacio libre entre el perno y su agujero de alojamiento), El sujetador utilizado en esta aplicación ha sido precargado a un valor de tensión F_i , y luego se le aplicaron cargas P y P_i , siendo última de tipo cortante. El efecto de precarga es hacer trabajar las piezas en compresión para que haya mayor resistencia a la carga de tensión externa y originar fricción entre ellas, a fin de resistir a la carga cortante. Mientras en la figura 3.8 se indica una junta con empaquetadura, dónde los elementos están en contacto metálico directo.

3.10.3 ESPECIFICACIONES DE RESISTENCIA.

La tabla 3.6 presenta los grados y especificaciones de la mayor parte de los sujetadores roscados actualmente en uso. Los grados SAE 1 y 2 solo deben ser utilizados para conexiones sin carga o poco importantes, debido a su contenido de carbono que es demasiado bajo, y la ductilidad muy alta para el caso de uniones con carga pesada.

Esta misma tabla muestra cómo se identifica los grados de los pernos mediante marcas en las partes superior o laterales de la cabeza para las distintas normas SAE, ASTM y Métrica ver Anexo XIV.

SAE Grade No.	Size Range Inclusive, in	Minimum Proof Strength,* kpsi	Minimum Tensile Strength,* kpsi	Minimum Yield Strength,* kpsi	Material	Head Marking
1	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	33	60	36	Low or medium carbon	
2	$\frac{1}{4}$ - $\frac{3}{4}$	55	74	57	Low or medium carbon	
	$\frac{5}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	33	60	36		
4	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	65	115	100	Medium carbon, cold-drawn	
5	$\frac{1}{4}$ -1	85	120	92	Medium carbon, Q&T	
	$1\frac{1}{2}$ - $1\frac{1}{2}$	74	105	81		
5.2	$\frac{1}{4}$ -1	85	120	92	Low-carbon martensite, Q&T	
7	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	105	133	115	Medium-carbon alloy, Q&T	
8	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	120	150	130	Medium-carbon alloy, Q&T	
8.2	$\frac{1}{4}$ -1	120	150	130	Low-carbon martensite, Q&T	

*Minimum strengths are strengths exceeded by 99 percent of fasteners.

Fuente: SHIGLEY, J., Diseño en Ingeniería Mecánica, 2008.

Tabla 3.6. Especificaciones de Resistencia.

3.10.4 CARACTERÍSTICAS DE ROSCAS UNIFICADAS.

En la tabla 3.7 serán útiles para la especificación y diseño de piezas roscadas UNC y UNF. Debe notarse que el tamaño de rosca se especifica por el paso p , en las medidas métricas, y por el número de hilos por pulgada, N , en las medidas del sistema unificado (ver Anexo XV).

DESIGNACION DE TAMAÑO	DIAMETRO MAYOR NOMINAL	SERIE BASTA-UNC			SERIE FINA UNF		
		HILOS POR PLG	AREA DE ESFUERZO A LA TENSION At	AREA AL DIAMETRO MENOR Ar	HILOS POR PLG	AREA DE ESFUERZO A LA TENSION At	AREA AL DIAMETRO MENOR Ar
	Pulg	N	Pulg. ²	Pulg. ²	N	Pulg. ²	Pulg. ²
1/4	0,2500	20	0,0318	0,0269	28	0,0364	0,0326
5/16	0,3125	18	0,0524	0,0454	24	0,0580	0,0524
3/8	0,3750	16	0,0775	0,0678	24	0,0878	0,0809
7/16	0,4375	14	0,1063	0,0933	20	0,1187	0,1090
1/2	0,5000	13	0,1419	0,1257	20	0,1599	0,1486
9/16	0,5625	12	0,1820	1,1620	18	0,2030	0,1890
5/8	0,6250	11	0,2260	0,2020	18	0,2560	0,2400
3/4	0,7500	10	0,3340	0,3020	16	0,3730	0,3510
7/8	0,8750	9	0,4620	0,4190	14	0,5090	0,4800
1	1,0000	8	0,6060	0,5510	12	0,6630	0,6250
1 1/4	1,2500	7	0,9690	0,8900	12	1,0730	1,0240
1 1/2	1,5000	6	1,4050	1,2940	12	1,3150	1,2600

Fuente: SHIGLEY, J., Diseño en Ingeniería Mecánica, 2008.

Tabla 3.7. Características de las Roscas Unificadas UNC y UNF.

3.10.5 MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA MATERIALES FERROSOS.

Un modulo elástico es un tipo de constante elástica que relaciona una medida relacionada con la tensión y una medida relacionada con la deformación.

El módulo de elasticidad (ver Anexo XVI) para los aceros al carbono se muestra en la tabla 3.8. Los materiales elásticos isótropos quedan caracterizados por un módulo elástico y un coeficiente elástico (o razón entre dos deformaciones).

Es decir, conocido el valor de uno de los módulos elásticos y del coeficiente de Poisson se pueden determinar los otros módulos elásticos. Los materiales ortótropos o anisótropos requieren un número de constantes elásticas mayor.

Material	Millones de lb/pulg ² , para temperatura F. de										
	70	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Aceros al carbono con C ≤ 0,30%	29,50	28,80	28,30	27,70	27,30	26,70	25,50	24,20	22,40	20,40	18,00
Aceros al carbono con C < 0,3%	29,30	28,60	28,10	27,50	27,10	26,50	25,30	24,00	22,30	20,20	17,50
Aceros con alto contenido de elementos de	28,30	27,60	27,00	26,50	25,80	25,30	24,80	24,10	23,50	22,80	22,10

Fuente: Los Autores.

Tabla 3.8 Módulos de Elasticidad.

3.10.6 FACTOR K_f DE REDUCCIÓN A LA FATIGA PARA ELEMENTOS ROSCADOS.

En la tabla 3.9 se indica los valores medios de factores de reducción de resistencia a la fatiga, correspondiente al entalle (o filete) bajo la cabeza del perno y al principio de la rosca, en la espiga del perno. Deber notarse que esos valores ya está corregido por sensibilidad a las ranuras (ver Anexo XVII).

Grado SAE	Grado Metrico	Roscas laminadas	Roscas Cortadas	Filetes
0 a 2	3,6 a 5,8	2,20	2,80	2,10
4 a 8	6,6 a 10,9	3,00	3,80	2,30

Fuente: Los Autores.

Tabla 3.9 Factor de Reducción a la Fatiga.

3.10.7 FACTOR K_d EFECTOS DE TEMPERATURA.

En la tabla 3.10 se indica el factor K_d , en donde la temperatura cambia todas las propiedades mecánicas de un material, y que la existencia de un esfuerzo estático o medio induce asimismo flujo plástico en el material. También se verifica probablemente que no hay límite de fatiga para los materiales que operan a altas temperaturas.

(Kd) EFECTOS DE LA TEMPERATURA		
K d =	1	T ≤ 450°C (840°F)
	1 - 5,8(10)⁻³ (T-450)	450°C < T ≤ 550°C
	1 - 3,2(10)⁻³ (T-840)	840°F < T ≤ 1020°F

Fuente: Los Autores.

Tabla 3.10 Factor K_f Efectos de la Temperatura.

El factor K_d es para recordar al diseñador que deben considerarse los efectos térmicos o de temperatura (ver Anexo XVIII).

3.10.8 FACTOR k_c DE CONFIABILIDAD.

La tabla 3.11 presenta las variables estandarizadas Z_r , correspondiente a las diversas confiabilidades que se requieren en el diseño junto con el respectivo factor de confiabilidad K_c (Ver Anexo XIX).

Confiabilidad R	Variable Estandarizada Z_r	Factor de confiabilidad k_c
0,5	0	1,000
0,9	1,288	0,897
0,95	1,645	0,868
0,99	2,326	0,814
0,999	3,091	0,753
0,9999	3,719	0,702
0,99999	4,265	0,659
0,999999	4,753	0,620
0,9999999	5,199	0,584
0,99999999	5,612	0,551
0,999999999	5,997	0,520

Fuente: Los Autores.

Tabla 3.11 Factor K_c Factor de Confiabilidad.

3.10.9 CONSTANTE DE RIGIDEZ k_b DEL PERNO.

Es la relación de la fuerza aplicada al elemento a la deformación total producida por dicha fuerza. La deformación total de una barra en tensión o compresión simples es:

$$K_b = \frac{A \cdot E}{l} \quad [\text{Ecuación 3.15}]$$

Dónde:

A = Área transversal basada en el diámetro mayor o nominal,

E = Módulo de Elasticidad,

l = Agarre del espesor total de las piezas que han de sujetarse.

3.10.10 RIGIDEZ DE LA JUNTA ATORNILLADA K_m .

La constante de rigidez de la junta atornillada está dada por el diámetro de la cara de arandela que es aproximadamente igual al ancho entre caras planas de la parte hexagonal, que generalmente es 50% mayor que el diámetro del perno.

$$K_m = \frac{\pi \cdot E \cdot d}{2 \cdot \ln \left[5 \cdot \left(\frac{l + 0.5 \cdot d}{l + 2.5 \cdot d} \right) \right]} \quad [\text{Ecuación 3.16}]$$

3.10.11 RELACIÓN DE RIGIDEZ C .

La constante de rigidez está dada por la siguiente fórmula.

$$C = \frac{K_b}{K_b + K_m} \quad [\text{Ecuación 3.17}]$$

3.10.12 FACTOR K_e DE REDUCCIÓN POR CONCENTRACIÓN DE ESFUERZO.

Se debe considerar cuando las partes han de hacerse de materiales frágiles o cuando estarán sometidas a cargas de fatiga. Sin embargo, aun en estas condiciones se encuentra que algunos materiales no son muy sensibles a la existencia de

discontinuidades y, por lo tanto, no se tienen que usar los valores totales de los factores de concentración de esfuerzos teóricos. Para estos materiales es conveniente utilizar un valor reducido de K_e .

$$K_e = \frac{1}{K_f} \quad \text{[Ecuación 3.18]}$$

3.10.13 LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA PARA LA CARGA AXIAL.

La tabla 3.12 es una tabulación de la resistencia última a la compresión y el valor correspondiente del límite de fatiga axial para una serie extensa de pruebas.

Cuando se realiza un análisis de regresión en estos datos se determina la intercepción y en 19.2 kpsi y una pendiente de 0.314. El coeficiente de correlación es 0.944. Esto da como resultado la ecuación:

$$S'_e = 19.2 + 0.314 * S_{ut} \quad \text{[Ecuación 3.19]}$$

3.10.14 LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA DEL PERNO S_e .

En el anexo XIX se indica las condiciones que afectan al límite de fatiga. Para tener en cuenta las más importantes de estas condiciones se emplea una diversidad de factores de modificación de los cuáles cada uno corresponde a un solo efecto. Con base en lo anterior se tiene:

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S'_e \quad \text{[Ecuación 3.20]}$$

Dónde:

Se = Límite de resistencia a la fatiga del elemento mecánico,

S'e = Límite de resistencia a la fatiga de la muestra de viga rotatoria,

ka = Factor de superficie,

kb = Factor de tamaño,

kc = Factor de confiabilidad,

kd = Factor de Temperatura,

ke = Factor de modificación por concentración del esfuerzo,

kf = Factor de efectos diversos.

3.10.15 FUERZA TOTAL P DE SEPARACIÓN DE LOS PERNOS.

La fuerza de separación de los pernos en las bridas se obtiene de la siguiente manera:

$$P_{(fuerza\ sep)} = P_{interna} * P_{casco} \quad [\text{Ecuación 3.21}]$$

3.10.16 PRECARGA F_i CUANDO EXISTE CARGA A LA FATIGA.

La mayor parte de las veces el tipo de carga de fatiga encontrado en el análisis de uniones de perno es tal que la carga aplicada exteriormente fluctúa entre cero y un valor máximo P . Un valor de seguridad puede obtenerse multiplicando la carga exterior P por un factor n . Por consiguiente, la precarga apropiada cuando se tiene carga de fatiga está dada por:

$$F_i = A_t * S_{ut} - \frac{C_n * P}{2 * N} * \left(\frac{S_{ut}}{S_e} + 1 \right) \quad [\text{Ecuación 3.22}]$$

Dónde:

Fi = Precarga cuando existe carga a la fatiga,

At = Área transversal,

Sut = Esfuerzo último,

C = Relación de rigidez,

n = Factor de seguridad asumido,

P = Fuerza de separación,

N = Factor de seguridad para comprobación,

Sut = Esfuerzo último,

Se = Límite de resistencia a la fatiga.

3.10.17 CARGA DE PRUEBA F_p .

Algunas veces si un perno es sometido solo a carga estática no falla durante el apriete es porque existe una muy alta probabilidad de que nunca se rompa.

Por esta razón se sugiere que la precarga esté dentro del intervalo:

$$0.6 * F_p \leq F_i \leq 0.9 * F_p \quad \text{[Ecuación 3.23]}$$

Dónde F_p es la carga de prueba y S_p es la resistencia a la prueba obtenida de la ecuación:

$$F_p = A_t * S_p \quad \text{[Ecuación 3.24]}$$

3.10.18 COMPROBACIÓN NUMERO DE PERNOS N (PROCESO INVERSO).

En la siguiente ecuación se indica el uso de los pernos que satisfagan el requisito de la fatiga.

$$N = \frac{P_{(per\ metro)}}{B_{(espacio\ entre\ pernos)} * \phi_{nominal\ del\ perno}} \quad \text{[Ecuación 3.25]}$$

$$P = \pi * \phi_{exterior} \quad \text{[Ecuación 3.26]}$$

A fin de obtener una presión de empaque razonablemente uniforme, los sujetadores (pernos) no deben ser espaciados a más de 10 diámetros del perno. Para ello se expresa en el siguiente intervalo.

$$4 \leq B \leq 10 \quad \text{[Ecuación 3.27]}$$

3.11 SELECCIÓN DEL EMPAQUE.

En la tabla 3.12, de acuerdo a la presión y temperatura de operación, y tamaño nominal del tubo se debe seleccionar el empaque.

NUMEROS DE LOS ANILLOS											
Tamaño nominal del tubo		1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4
Clase de presión, lb./pulg. ²	150	...	...	R15	R17	R19	R22	R25	R29	R33	R36
	300, 400, 600	R11	R13	R16	R18	R20	R23	R26	R31	R34	R37
	900	...	...	...	...	...	...	...	R31	...	R37
	1500	R12	R14	R16	R18	R20	R24	R27	R35	...	R39
	2500	R13	R16	R18	R21	R23	R26	R28	R32	...	R38
Tamaño nominal del tubo		5	6	8	10	12	14	16	18	20	24
Clase de presión, lb./pulg. ²	150	R40	R43	R48	R52	R56	R59	R64	R68	R72	R76
	300, 400, 600	R41	R45	R49	R53	R57	R61	R65	R69	R73	R77
	900	R41	R45	R49	R53	R57	R62	R66	R70	R74	R78
	1500	R44	R46	R50	R54	R58	R63	R67	R71	R75	R79
	2500	R42	R47	R51	R55	R60	...	...	...	...	...

Fuente: MEGYESY, Eugene, Manual de Recipientes a Presión, 2009.

Tabla 3.12 Selección de Empaque.

3.12 PROCESOS DE SOLDADURA.

Antes de aplicar cualquier soldadura, en recipientes a presión, debemos preparar un **Procedimiento de Soldadura** para cada caso en particular, el cual nos indica la preparación, diámetro del electrodo, etc., para cada tipo y espesor de material. Debemos también hacer pruebas a los soldadores para asegurarnos que la soldadura será aplicada por personal debidamente calificado. Estas pruebas y procedimientos deberán apegarse estrictamente a las recomendaciones hechas por el **Código A.S.M.E., Sección IX "Welding and Brazing Qualifications."**

El material de aporte, de la soldadura, deberá ser compatible con el material base a soldar. Los electrodos más comúnmente utilizados para soldar recipientes a presión de acero al carbón, son el **6010** y el **7018**.

Debemos tratar de evitar los cruces de dos o más cordones de soldadura. La distancia mínima entre dos cordones paralelos será de **5** veces el espesor de la placa, sin embargo, cuando sea inevitable el cruce de dos cordones, el **Código A.S.M.E.,**

Sección VIII División 1, nos recomienda radiografiar una distancia mínima de **102** milímetros a cada lado de la intersección.

Se recomienda no aplicar soldadura a un recipiente a presión después de haber sido relevado de esfuerzos.

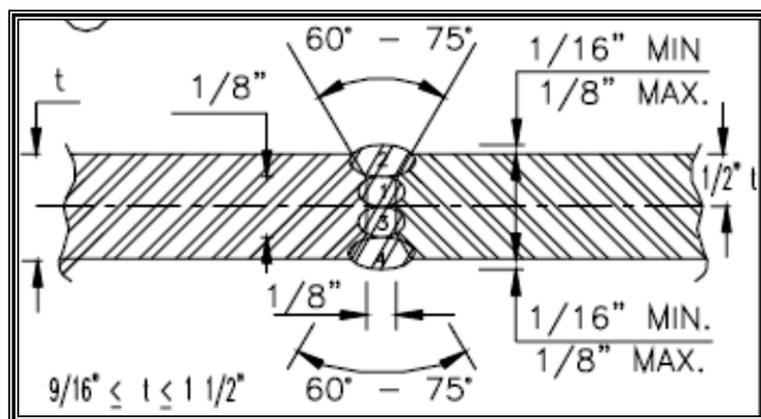
Los procedimientos de soldadura se encuentra determinados por el Código ASME, Sección VIII, División 1, Sub sección B, parte UW-16. En dónde se indica el proceso de suelda en función del espesor de la placa (ver Anexo XIX).

3.12.1 SOLDADURA PARA PLACAS DE ESPESOR MAYORES $\frac{9}{16}$ PULGADA⁴⁷.

El siguiente proceso de soldadura se seguirá para espesores de placa que se encuentren entre los valores comprendidos:

$$\frac{9}{16} \leq t \leq 1\frac{1}{2} \text{ (pulgadas)} \quad \text{[Ecuación 3.28]}$$

Si cumplen este principal requisito se procederá emplear el siguiente proceso de soldadura que se detalla a continuación en la figura 3.9.



Fuente: LEON, Juan, Diseño y Cálculo de Recipientes a Presión, 2001.

Figura: 3.9 Proceso de soldadura $t \geq \frac{9}{16}$.

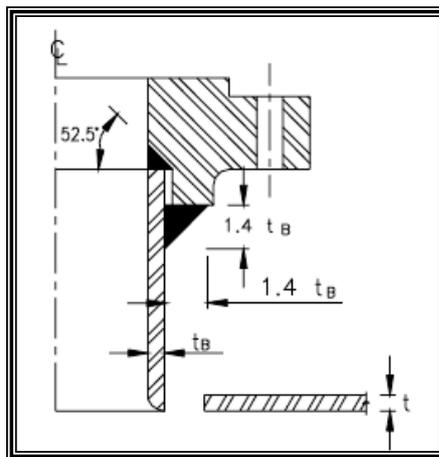
⁴⁷ LEON, Juan, Diseño y Cálculo de Recipientes a Presión, INGLESA, p. 159, 2001.

Como recomendación se debe realizar:

- Eliminar la escoria y otras impurezas antes de proceder a realizar el cordón.
- Usar electrodo de 1/8 de pulgada como máximo.

3.12.1.1 SOLDADURA PARA BRIDAS.

El proceso de soldadura para bridas será el siguiente:

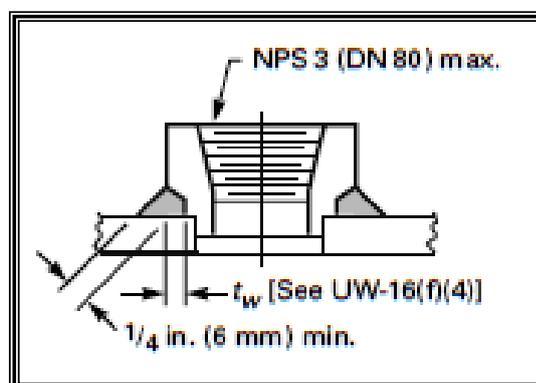


Fuente: LEON, Juan, Diseño y Cálculo de Recipientes a Presión, 2001.

Figura: 3.10 Proceso de soldadura para Bidas.

3.12.1.2 SOLDADURA PARA ACCESORIOS ROSCADOS Y SOLDADOS.

El proceso de soldadura para accesorios será el siguiente:

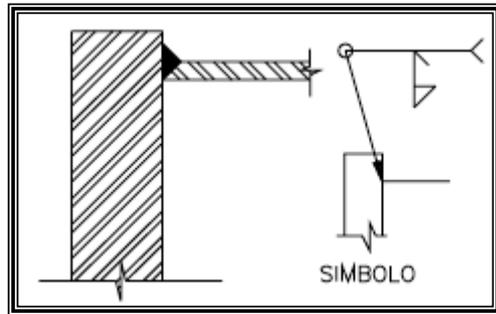


Fuente: MEGYESY, Eugene, Manual de Recipientes a Presión, 2009.

Figura: 3.11 Proceso de soldadura para Accesorios.

3.12.1.3 SOLDADURA PARA PARTES INTERNAS.

En la figura 3.12 se muestra el proceso de soldadura para partes internas del reactor será el siguiente proceso:



Fuente: ASME, SEC. VII, DIV. 1, B PT UW-16.1

Figura: 3.12 Proceso de soldadura para Partes Internas.

3.13 SIMULACIÓN DE DISEÑO RECIPIENTES A PRESIÓN.

La simulación de recipientes a presión es una herramienta útil y esencial que permite al ingeniero estudiar su comportamiento y conocer, si bajo los posibles escenarios de operación, el diseño provisto garantiza un desempeño óptimo. Predecir el desempeño de recipientes a presión puede ser útil, por ejemplo, para la localización de posibles lugares de falla durante distintas etapas en la operatoria de un proceso industrial, como también para la optimización del diseño.

Un medio agresivo puede ir deteriorando el recipiente, con la consecuente disminución de su espesor; siendo relevante la medición del mismo utilizando técnicas apropiadas. Los resultados obtenidos, a través de la implementación del modelo computacional, se encuentran en una satisfactoria aproximación con los resultados surgidos de la aplicación de la teoría clásica, conforme a la degradación que se ocasiona en el tiempo y a los esfuerzos a los que está sometido el recipiente.

3.13.1 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN.

SOFTWARE INVENTOR 2010.

- La inspección, detección y diagnóstico de las grandes estructuras tales como recipientes a presión, calderas de vapor, compresores etc., resultan necesarias para facilitar el posterior pronóstico de fallas. Una alternativa para efectuar un análisis del comportamiento de tales estructuras, y específicamente de los recipientes a presión es la implementación de un modelo computacional que represente a la estructura real.
- Mediante una adecuada inspección, se puede garantizar la calidad de estos recipientes durante su explotación. Además la inspección es una herramienta que permite el diagnóstico y pronóstico de fallas debido a que facilita la detección de defectos en el período de formación, cuando es realizada de forma periódica. Por otra parte permite efectuar el seguimiento de defectos

que ya han sido detectados, prolongando así la vida útil y contribuyendo a evitar la ocurrencia de accidentes.

- Estas estructuras se fabrican con materiales que en las condiciones de servicio, poseen tenacidad suficiente, por lo tanto las fallas en las mismas sólo pueden producirse a tensiones por encima del límite de fluencia del material. Sin embargo, dichas fallas pueden ocurrir y de hecho han ocurrido, dado que tan complejas estructuras casi siempre contienen regiones donde las tensiones exceden a las de fluencia y en éstas pueden existir grietas introducidas durante la fabricación o el servicio.
- La simulación de este tipo de recipiente, permite visualizar el mapa de tensiones, pudiendo detectar las zonas donde las mismas superen a las admisibles, siendo de utilidad al momento de la inspección para la detección de posibles lugares de falla.
- Esta simulación también permite optimizar el diseño y conocer el espesor límite en las zonas más solicitadas, de manera de poder pronosticar el margen de seguridad en una determinada etapa de servicio.
- En este trabajo se efectúa un análisis, utilizando un software basado en el método de los elementos finitos, de las tensiones que se originan en el reactor prototipo los que se verificaron analíticamente siguiendo la normativa internacional American Society Mechanical Engineers (ASME) VIII División 1.

3.14 RESUMEN DE FÓRMULAS.

A continuación se presenta un resumen de las principales fórmulas desarrolladas y explicadas a lo largo del presente capítulo con su respectiva numeración, para realizar el diseño del reactor prototipo de acuerdo a las variables de operación antes detalladas.

VARIABLE	ECUACIÓN	No. ECUACIÓN
ESFUERZO A LA COSTURA CIRCUNFERENCIAL	$t = \frac{P * R}{2 * S * E + 0.4 * P}$	3.1
PRESIÓN MÁXIMA DE TRABAJO PARA LA COSTURA CIRCUNFERENCIAL	$P = \frac{2 * S * E * t}{R - 0.4 * t}$	3.2
ESFUERZO A LA COSTURA LONGITUDINAL	$t = \frac{P * R}{S * E - 0.6 * P}$	3.3
PRESIÓN MÁXIMA DE TRABAJO PARA LA COSTURA LONGITUDINAL	$P = \frac{S * E * t}{R + 0.6 * t}$	3.4
ESPESOR FINAL PARA EL CASCO	$t_{final} = t + C.A.$	3.5
ESPESOR PARA CABEZA TORIESFERICA PARA $L/r = 16\frac{2}{3}$	$t = \frac{0.885 * P * L}{S * E - 0.1 * P}$	3.6
PRESIÓN MÁXIMA DE TRABAJO PARA CABEZA TORIESFERICA	$P = \frac{S * E * t}{0.885 * L + 0.1 * t}$	3.7
ESPESOR PARA CABEZA TORIESFERICA PARA $L/r < 16\frac{2}{3}$	$t = \frac{P * L * M}{2 * S * E - 0.2 * P}$	3.8
PRESIÓN MÁXIMA DE TRABAJO PARA CABEZA TORIESFERICA	$P = \frac{2 * S * E * t}{L * M + 0.2 * t}$	3.9
FACTOR M EN FUNCIÓN L/r	$M = \frac{1}{4} * \left(3 + \sqrt{\frac{L}{r}} \right)$	3.10
ESPESOR FINAL CABEZA TORIESFERICA	$t_{final} (tapa) = t + C.A.$	3.5'

ESPESOR CABEZAL HEMISFÉRICO	$t = \frac{P * R}{2 * S * E - 0.2 * P}$	3.11
PRESIÓN MÁXIMA DE TRABAJO PARA CABEZA HEMISFÉRICA	$P = \frac{2 * S * E * t}{L * M + 0.2 * t}$	3.12
ESPESOR FINAL CABEZA HEMISFÉRICA	$t_{final} (tapa) = t + C.A.$	3.5''
ESPESOR CABEZAL ELIPSOIDAL	$t = \frac{P * D}{2 * S * E - 0.2 * P}$	3.13
PRESIÓN MÁXIMA DE TRABAJO PARA CABEZA ELIPSOIDAL	$P = \frac{2 * S * E * t}{D + 0.2 * t}$	3.14
ESPESOR FINAL CABEZA ELIPSOIDAL	$t_{final} (tapa) = t + C.A.$	3.5'''
CONSTANTE DE RIGIDEZ k_b DEL PERNO	$K_b = \frac{A * E}{l}$	3.15
RIGIDEZ DE LA JUNTA ATORNILLADA K_m .	$K_m = \frac{\pi * E * d}{2 * \ln \left[5 * \left(\frac{l+0.5*d}{l+2.5*d} \right) \right]}$	3.16
RELACIÓN DE RIGIDEZ C	$C = \frac{K_b}{K_b + K_m}$	3.17
FACTOR K_e DE REDUCCIÓN POR CONCENTRACIÓN DE ESFUERZO.	$K_e = \frac{1}{K_f}$	3.18
LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA PARA LA CARGA AXIAL.	$S'_e = 19.2 + 0.314 * S_{ut}$	3.19
LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA DEL PERNO S_e .	$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S'_e$	3.20
FUERZA TOTAL P DE SEPARACIÓN DE LOS PERNOS.	$P_{(fuerza\ sep)} = P_{interna} * P_{casco}$	3.21
PRECARGA F_i CUANDO EXISTE CARGA A LA FATIGA.	$F_i = A_t * S_{ut} - \frac{C_n * P}{2 * N} * \left(\frac{S_{ut}}{S_e} + 1 \right)$	3.22

CARGA DE PRUEBA F_p .	$0.6 * F_p \leq F_i \leq 0.9 * F_p$	3.23
CARGA DE PRUEBA	$F_p = A_t * S_p$	3.24
COMPROBACIÓN NUMERO DE PERNOS N (PROCESO INVERSO)	$N = \frac{P_{(perimetro)}}{B_{(espacio\ entre\ pernos)} * \phi_{nominal\ del\ perno}}$	3.25
PERÍMETRO RECIPIENTES	$P = \pi * \phi_{exterior}$	3.26
INTERVALO PARA DISTANCIA ENTRE SUJETADORES	$4 \leq B \leq 10$	3.27
SOLDADURA PARA PLACAS DE ESPESOR MAYORES $\frac{9}{16}$ PULGADA.	$\frac{9}{16} \leq t \leq 1\frac{1}{2}$ (pulgadas)	3.28

CAPITULO IV

4 SELECCIÓN, CÁLCULO, DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL REACTOR PROTOTIPO PARA HIDROPROCESAMIENTO.

INTRODUCCIÓN.

En el desarrollo del presente capítulo se describirá la selección del tipo de reactor para hidrogenación de acuerdo a las condiciones planteadas de operación, la selección del tipo de catalizador detallando sus características que se acoplen al tipo de procesos que se desea emplear, el diseño y cálculo del recipiente a presión será la parte fundamental de este capítulo con sus cabezales y procesos de soldadura de acuerdo a lo estipulado en el Código ASME Sección VIII, División 1, también se seleccionará las bridas que este acorde al diseño del cuerpo del recipiente, y se detallará los tipos de sujetadores que se emplearán para ensamblar todo el recipiente con sus partes constitutivas.

Para el proceso del diseño del reactor prototipo se desarrollará una programación de hojas electrónica con la ayuda de EXCEL, para facilitar el método de prueba – error durante el cálculo.

Del mismo modo se incluirá la información necesaria sobre a detalle del proceso de simulación mediante la aplicación del Software INVENTOR 2010 para la comprobación del factor de seguridad y los desplazamientos que se presentarán en la simulación del recipientes bajo condiciones reales de operación.

4.1 SELECCIÓN DEL TIPO DE CARGA A ALIMENTAR.

4.1.1 ESPECIFICACIONES DE LA CARGA.

La selección adecuada del método de procesamiento de crudos pesados y residuos, es necesario definir la materia prima lo más detallada posible. Sin embargo, la composición química de los crudos pesados y residuos es más compleja que los crudos livianos, y hay que precisar la constitución química y física, por que estas no son bien entendidas.

Con el incremento de las materias primas pesadas disponibles para procesamiento, y la producción altamente requerida para su transportación de combustibles ha sido lograda por cualquier residuo mejorado o procesamiento de crudo adicional.

Sin embargo, el desarrollo para el mejoramiento de las tecnologías para esta carga pesada con baja gravedad API puede llegar a ser importante en las refinerías. Por lo tanto, el crecimiento del uso de crudos pesados (menos que 20°API) en las refinerías, las materias primas presentan únicamente dificultades relacionadas a la presencia de una alta viscosidad a temperatura de operación.

Tomando, en cuenta un crudo promedio producido por los yacimientos del oriente ecuatoriano (ver Anexo XX), y que son transportados a los tanques de reposo de la Refinería Estatal de Esmeraldas tienen la siguiente caracterización que se muestran en la tabla 4.1.

En el reactor prototipo se alimentan los reactivos en dos fases, una gaseosa (hidrógeno) y otra líquida (crudo), la primera luego de pasar por el pre distribuidor cae sobre un plato perforado donde existe un nivel de líquido. El fluido se escurre por los agujeros distribuidos en paso triangular a una velocidad variable, fluyendo sobre una capa de cerámico y luego sobre el catalizador, axialmente de arriba abajo.

PARÁMETROS	UNIDADES	NORMAS	ESTACION CITY ORIENTE
API OBSERVADO	API	D-1298	21,5/78°F
API 60°F			20,5
API SECO			20,51
GRAVEDAD ESPECIFICA	G/E		0,9309
AGUA LIBRE	%	D-96/88	0,1
EMULSION			0
SEDIMENTOS			0
PARAFINA			0,4
BSW			0,1
SOLIDOS POR EXTRACCION		D-473	0,024
BSW POR DESTILACION		D-4006	0,12
BSW TOTAL	0,144		
AZUFRE	% EN PESO	D-3240	1,778
VISCOSIDAD A 80°F	cSt	D-445	228,55
VISCOSIDAD A 104°F			168,56
VISCOSIDAD A 120°F			122,4

Fuente: PETROPRODUCCIÓN, 2007.

Tabla 4.1 Caracterización Crudo del Campo CITY Oriente.

4.1.2 HIDRÓGENO.

4.1.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL Y PROPIEDADES QUÍMICAS.

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, inflamable y no tóxico a temperatura y presión atmosférica. Arde en el aire con una llama de un azul pálido, casi invisible. Es el gas más liviano aproximadamente una quinceava parte del peso del aire y constituye el 90% del universo conocido.

4.1.2.2 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.

El hidrógeno se obtiene de la reformación de vapor de hidrocarburos, recuperado de procesos electrolíticos, o por la oxidación parcial de carbón o hidrocarburos. De éstas, la más común es la reformación de vapor de hidrocarburos. En tanto, el hidrógeno líquido es producido por licuefacción a 253 ° C y es trasladado en su estado líquido, para reducir los costos de transporte

4.1.2.3 HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD.

En el Anexo XXI, se detalla la hoja de datos de seguridad del hidrógeno.

4.2 SELECCIÓN DEL TIPO DE REACTOR PARA HIDROPROCESAMIENTO.

De los cuatro tipos de reactores estudiados en el Capítulo I, se ha determinado que el reactor de cama fija es el óptimo para operar bajos las condiciones y parámetros establecidos.

4.2.1 REACTORES DE CAMA FIJA (FIXED-BED REACTORS).

Los reactores de cama fija son los sistemas más usados para operaciones comerciales de hidrogenación. La razón es bastante obvia, debido a que este tipo de reactor es fácil y simple para ser operado.

4.2.1.1 CARACTERÍSTICAS REACTORES DE CAMA FIJA.

Su principio de funcionamiento básicamente, es que el hidrocarburo líquido gotea hacia abajo por la cama del catalizador desde la parte superior a la parte inferior del reactor. El hidrógeno, en su fase gaseosa pasa simultáneamente por la cama del catalizador y se distribuye en todo el reactor.

La característica principal del Hidrógeno es romper los enlaces del crudo y adherirse a él para mejorar sus moléculas; la otra característica del hidrógeno es introducirlo entre las camas como un enfriador debido a que la reacción es exotérmica. En un reactor con una configuración de multicamas con un sistema de enfriamiento con

hidrógeno es usualmente empleado para hidrotratamiento en la Unidad FCC⁴⁸ de las refinerías.

4.2.1.2 PRINCIPALES VENTAJAS DE REACTORES DE CAMA FIJA (FBR).

- Baja caída de presión sobre la cama del catalizador,
- Flujo del líquido se comporta principalmente como flujo de pistón,
- Baja pérdida de catalizador, no desgaste del catalizador.
- Flexibilidad de operación a altas presiones y temperaturas,
- Gran tamaño del reactor,
- Baja inversión y bajos costos de operación,
- Elevada carga del catalizador por unidad de volumen del líquido y bajo relación de disipación de energía.

4.3 SELECCIÓN DEL CATALIZADOR PARA HIDROPROCESAMIENTO.

En la industria existen varios tipos de catalizadores para diferente aplicación; la mejor selección del tipo de catalizador es aquel que nos ayudará a minimizar el consumo de hidrógeno, los costos del catalizador y maximice el tipo de vida del catalizador⁴⁹.

Para ello, se ha seleccionado dos tipos de catalizador que estarán en relación dos a uno, es decir, dos porciones del un en referencia al otro (ver Anexo XXII)⁵⁰.

⁴⁸ Craqueamiento CatalíticoFluído, FCC.

⁴⁹ VERRUSCHI, Marisol, Optimización de la distribución de catalizadores en hidrotratamiento de destilados medios, Venezuela, 2008.

⁵⁰ MUNOZ, J., ANCHEYTA, J., and other, "Process heat integration of a heavy crude hydro treatment plant", Catalysis Today, p.205, 2005.

4.3.1 CATALIZADOR HR-516 C

El catalizador HR 516 se instala en la parte intermedia del reactor. El catalizador de hidrotratamiento HR-516 es un catalizador bimetálico consistente de cobalto y molibdeno en un soporte de alúmina.

4.3.1.1 LAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL CATALIZADOR HR 516.

- Soporte de alúmina de alta pureza teniendo una fuerte resistencia a la atrición.
- Alta estabilidad y selectividad hacia las reacciones de hidrotratamiento deseables.
- Fácil de regenerar.

La asociación de las cualidades arriba descritas, da las siguientes ventajas:

- Hidrotratamiento eficiente
- Mínima pérdida de rendimientos
- Larga vida del catalizador.

4.3.1.2 PROPIEDADES CATALIZADOR TIPO HR 516.

Proveedor: Procatalyse
Función: Hidroprocesamiento de crudos.
Cantidad: 0.027 m³

4.3.1.3 DESCRIPCIÓN Y COMPOSICIÓN QUÍMICA.

Alúmina cilíndrica extrudada de muy alta pureza cargada con óxidos de cobalto y molibdeno.

Tamaño de partícula: diámetro 1.2 mm, largo 1.6 mm.

Composición típica: Co 25 % peso

Mo 12.9 % peso

Pérdidas por ignición a 500 ° C: 0.5% peso

4.3.1.4 PROPIEDADES FÍSICAS (TÍPICAS).

Área superficial	:	248 m ² /g
Densidad másica, cargado golpe	:	0.67 g/cm ³
Densidad másica, cargado denso	:	760 kg/m ³
Volumen de poro	:	0.51 cm ³ /g
Resistencia a la compresión másica	:	1.1 MPa
Duración de ciclo estimado	:	2 años
Vida estimada	:	6 años

4.3.1.5 BOLAS DE ALÚMINA.

Diámetro de bola	¼"	¾"
Cantidad (m ³)	2.40	4.89

4.3.2 CATALIZADOR TIPO LD 145.

Una capa de guarda de catalizador LD 145 es puesta en el tope del lecho superior e inferior para la hidrogenación de los insaturados de la carga y prevenir la formación de coque. Este tipo de catalizador bimetálico está compuesto níquel y molibdeno.

4.3.2.1 PROPIEDADES CATALIZADOR TIPO LD 145.

Proveedor: Procatalyse
Función: Hidrogenación selectiva de cortes de pirólisis insaturados en el tope del primer lecho del reactor
Cantidad: 0.055 m³

4.3.2.2 DESCRIPCIÓN Y COMPOSICIÓN QUÍMICA.

Diámetro de tamaño de partícula 2-4 mm.
Composición típica: Ni 2.9 % peso
MO 10.7% peso

4.3.2.3 PROPIEDADES FÍSICAS.

Área superficial : 175 m²/g
Densidad másica : 800 kg/m³
Volumen de poro : 0.45 cm³/g
Duración de ciclo estimado : 2 años
Vida estimada : 6 años

Los catalizadores seleccionados corresponden a la empresa francesa Procatalyse de AXENS como se muestra en el Anexo XXIII.

4.4 BASES DE CÁLCULO.

Los cálculos se realizan con el conocimiento de los siguientes parámetros⁵¹ determinados en el capítulo II, en dónde menciona que las variables de presión de operación y temperatura de reacción son las óptimas, tomadas en base a experimentos.

DATOS.				
Po(Presión de Operación)=	5,3000	Mpa		
	768,6998	PSI		
To (temperatura de operación)=	633,0000	K		
	679,7300	°F	359,8500	°C
Diámetro Interior(Dato Planteado)=	12,0000	plg	304,8	mm
Radio Interior=	6,0000	plg	152,4	mm

4.5 RECIPIENTE A PRESIÓN.

4.5.1 CÁLCULO PRESIÓN DE DISEÑO (P).

La presión de diseño tiene que ser mayor a la presión de operación. Este requisito se satisface utilizando una presión de diseño de 30 lb/plg o 10% más que la presión de operación. Según Código ASME, Sección VII División 1 la fórmula de cálculo se expresa de la siguiente manera.

$$\text{Si } P_o > 300 \text{ Psi}$$

$$\text{Si } P_o \leq 300 \text{ Psi}$$

$$P = 1.1 * P_o$$

$$P = P_o + 30 \text{ Psi}$$

Dónde:

P es la presión de diseño, y

Po es la presión de operación.

⁵¹ ANCHEYTA, J. and SPEIGHT, J., Hydroprocessing of Heavy Oil and Residua, First Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, United States of America, p. 76, 2007.

Tenemos la presión de diseño:

P(Presión de Diseño)=	845,5698 Psi
------------------------------	---------------------

4.5.2 SELECCIÓN DEL MATERIAL.

Según condiciones de operación, propiedades del material y disponibilidad del material según el mercado interno se tiene:

SA-515.- Más resistente que la placa A-285 para medias y altas temperaturas. Gran facilidad de soldado siguiendo las técnicas apropiadas. Las placas A-515 tienen estructura de grano fino. Puede venir tanto con tratamiento normalizado o rolado. Disponible en rollo o en placa.

Luego de verificar las propiedades del material, se ha seleccionado el acero SA-515 para el casco, cabezal y partes internas del reactor con los siguientes datos según su grado de resistencia a la tensión:

MATERIAL	GRADO (resistencia a la tensión 1000lb/plg ²)	Psi(T no > a 800°F)
ASTM A-515	55	10200
ASTM A-515	60	10800
ASTM A-515	65	11400
ASTM A-515	70	12000

4.6 EFICIENCIA DE LAS SOLDADURAS (E).

Se puede definir la eficiencia de las soldaduras, como el grado de confiabilidad que se puede tener de ellas, para el diseño se seleccionó:

E=	1	Eficiencia de las juntas examinada por zonas.(según UW-12(b))
-----------	----------	--

De la tabla 3.3 se representa el tipo de junta y la limitación.

TIPOS DE JUNTAS SOLDADAS				
TIPOS NORMA UW-12	EFICIENCIA DE LA JUNTA, E Cuando la junta es:	a. Cuando la junta es:		
		b. Radiogra- fiada total- mente	c. Examinada por zonas	No Examinada
 <p>Juntas a tope hechas por doble cordón de soldadura o por otro medio con el que se obtenga la misma calidad de metal de soldadura depositada sobre las superficies interior y exterior de la pieza. Si se emplea placa de respaldo, debe quitarse esta después de terminar la soldadura.</p>	1.00	0.85	0.70	
LIMITACIONES AL APLICAR LOS DISTINTOS TIPOS DE SOLDADURA	NOTAS			
PARA EL TIPO I NINGUNA				

4.6.1 FACTOR DE CORROSIÓN ADMISIBLE.

Para el cálculo del espesor del casco es necesario sumarle un factor de corrosión debido al desgaste por corrosión del material que puede sufrir por trabajar bajo condiciones extremas o en medios ácidos.

Se ha seleccionado un factor de corrosión de 1/16 por año que es satisfactorio para recipientes y tuberías.

FACTOR DE CORROSION ADMISIBLE			
C.A.=	1/16	0,0625	Corrosión Admisible (UG-25)
	1/8	0,1250	
	1/4	0,2500	

4.7 CÁLCULO DEL ESPESOR PARA EL CASCO.

4.7.1 SEGÚN EL ESFUERZO DE LA COSTURA CIRCUNFERENCIAL.

Con el cálculo de la presión de diseño, la selección del material y eficiencia de junta se procede a calcular el espesor de placa del casco cilíndrico del reactor.

De la ecuación 3.1 según el esfuerzo circunferencial se tiene:

ESFUERZO DE LA COSTURA LONGITUDINAL (CON COSTURA)
$t = \frac{P * Ri}{S * E - 0.6 * P}$

4.7.2 PARA EL ESFUERZO DE LA COSTURA LONGITUDINAL.

De la ecuación 3.3 según el esfuerzo longitudinal se tiene:

ESFUERZO DE LA COSTURA CIRCUNFERENCIAL (CON COSTURA)
$t = \frac{P * Ri}{2 * S * E + 0.4 * P}$

t: Espesor de pared requerido , pulg.
 P: presión interna, lb/pulg² man.
 Ri: Radio interior de la tubería, pulg.
 S: Esfuerzo permisible a la temperatura de diseño. psig.
 E: factor de eficiencia de la soldadura.
 C.A: Tolerancia, grosor adicional (corrosión, erosión , manufactura MT)

4.7.3 COMPARACIÓN DE ESPESORES DEL CASCO.

El cálculo de espesores para el casco según el esfuerzo de la costura circunferencial y longitudinal, para los aceros SA-515 grado 55, 60, 65 y 70 se tiene:

CALCULO ESPESOR DE PLACA					
esfuerzo de la costura longitudinal t=	0,5234	pulg	(A 515 GR 55)	0,2446	esfuerzo de la costura circunferencial t=
	13,2951	mm		6,2139	
	0,4929	pulg	(A 515 GR 60)	0,2313	
	12,5201	mm		5,8740	
	0,4658	pulg	(A 515 GR 65)	0,2193	
	11,8304	mm		5,5693	
	0,4414	pulg	(A 515 GR 70)	0,2085	
	11,2128	mm		5,2948	

De éste cálculo del espesor es necesario indicar que:

NOTA:	A mayor esfuerzo permisible a la tensión = menor espesor (t). A menor esfuerzo permisible a la tensión = mayor espesor (t).
--------------	--

Por métodos de comprobación el espesor según el esfuerzo de la costura circunferencial debe ser igual a la mitad del que se origina por la costura longitudinal. En el presente diseño, como se muestra en la tabla anterior queda verificado lo antes mencionado.

4.7.4 ESPESOR FINAL DEL CASCO.

Para obtener, el espesor final del casco de la costura longitudinal se debe sumar al espesor un factor por corrosión, dónde se tiene:

ESPEJOR FINAL (t_{final}) = ESPEJOR (t) + FACTOR C.A.			
t_{final} (casco)=	0,5859	plg	(A 515 GR 55)
	14,8826	mm	
	0,5554	plg	(A 515 GR 60)
	14,1076	mm	
	0,5283	plg	(A 515 GR 65)
	13,4179	mm	
0,5039	plg	(A 515 GR 70)	
12,8003	mm		

Luego de proceder a realizar el anterior cálculo, se determina lo siguiente:

Espesor final sumado factor de corrosion admisible	Plancha acero A-515 gr 70 para el cuerpo del recipiente con un espesor normalizado de 16 mm
---	--

4.7.5 PRESIÓN DE TRABAJO MÁXIMA PERMISIBLE.

4.7.5.1 SEGÚN EL ESFUERZO DE LA COSTURA CIRCUNFERENCIAL.

Dónde la presión máxima permisible es la máxima presión que se puede someter un recipiente, en condiciones de operación.

De la ecuación 3.2 según el esfuerzo circunferencial se tiene:

ESFUERZO DE LA COSTURA LONGITUDINAL
$P_{max} = \frac{S * E * t}{Ri + 0.6 * t}$

4.7.5.2 SEGÚN EL ESFUERZO DE LA COSTURA LONGITUDINAL.

De la ecuación 3.4 según el esfuerzo longitudinal se tiene:

ESFUERZO DE LA COSTURA CIRCUNFERENCIAL
$P_{max} = \frac{2 * S * E * t}{Ri - 0.4 * t}$

4.7.5.3 COMPARACIÓN DE PRESIONES MÁXIMAS PARA EL CASCO.

El cálculo de presión máxima permisible para el casco según el esfuerzo de la costura circunferencial y longitudinal, para los aceros SA-515 grado 55, 60, 65 y 70 se tiene:

PRESION MAXIMA DE TRABAJO (Pmax)					
esfuerzo de la costura longitudinal	940,9466	PSI	(A 515 GR 55)	2073,1396	esfuerzo de la costura circunferencial
	947,1434	PSI	(A 515 GR 60)	2076,3824	
	953,3418	PSI	(A 515 GR 65)	2080,6837	
	959,5414	PSI	(A 515 GR 70)	2085,8729	

4.8 CABEZAL DEL REACTOR.

Se han seleccionado tres tipos de tapas para la cabeza del espesor, para luego tomar una decisión de acuerdo al costo o método de fabricación.

4.8.1 CALCULO DEL ESPESOR DE CABEZA TORIESFÉRICA.

Son las que mayor aceptación tienen en la industria, debido a su bajo costo y a que soportan altas presiones manométricas, su característica principal es que el radio de abombado es aproximadamente igual al diámetro.

Se pueden fabricar en diámetros desde 0.3 hasta 6 metros.

Para el cálculo del espesor en función del radio interior es decir cuando $L/r = 16\frac{2}{3}$ se emplea la ecuación 3.6 y cuando $L/r < 16\frac{2}{3}$ se aplicará la ecuación 3.8.

A continuación se muestran los valores del Factor “M” de acuerdo a la relación L/r para su elección de acuerdo a tablas. Si se desea calcular el factor “M” su fórmula se expresa en la ecuación 3.10.

TAPAS TORIESFERICAS	
$t = \frac{0.885 * P * L}{S * E - 0.1 * P} \quad \text{sí } \frac{L}{r} = 16 \frac{2}{3}$	
$t = \frac{P * L * M}{2 * S * E - 0.2 * P} \quad \text{sí } \frac{L}{r} < 16 \frac{2}{3}$	
$M = \frac{1}{4} * \left(3 + \sqrt{\frac{L}{r}} \right)$	
$\frac{L}{r}$ (para cálculo factor M en tablas)	

Dónde:

t = espesor de placa plg
P = presión de diseño PSI (lb/plg2)
S = esfuerzo máximo permisible a la tensión PSI
E = factor eficiencia de soldadura en la junta
Ri = radio interior plg
L = radio interior del casquete (D=L)
r = radio de rebordo (nudillo) mínimo
M = factor dependiendo de la proporción de la cabeza (L/r)
D= Diámetro interior plg

Hay que tener en cuenta que las cabezas para recipientes de diámetros pequeños y mediano, las cabezas elipsoidales son las mas usadas, mientras que los de gran diámetro se fabrican generalmente con cabezas hermiféricas o bridas abombadas. Las cabezas pueden ser sin costura o soldadas.

4.8.1.1 RELACIÓN L/r .

Cuando la relación L/r para su cálculo se tiene:

DATOS (D.int = L y r dato empresas) TENEMOS:			
L (L=D.int)=	12,0000	plg	Dato según empresas que barolan
r=	3		

4.8.1.2 SELECCIÓN DE M Y L/r EN TABLAS.

SELECCIÓN (M Y L/r) SEGÚN FORMULAS																																																																											
$\frac{L}{r}$ (para cálculo factor M en tablas)	4,0000	M = (según tablas)	1,2500																																																																								
<p style="text-align: center;">TABLE 1-4.2 VALUES OF FACTOR M (Use Nearest Value of L/r; Interpolation Unnecessary)</p> <table border="1"> <tr> <td>L/r</td> <td>1.0</td> <td>1.25</td> <td>1.50</td> <td>1.75</td> <td>2.00</td> <td>2.25</td> <td>2.50</td> <td>2.75</td> <td>3.00</td> <td>3.25</td> <td>3.50</td> </tr> <tr> <td>M</td> <td>1.00</td> <td>1.03</td> <td>1.06</td> <td>1.08</td> <td>1.10</td> <td>1.13</td> <td>1.15</td> <td>1.17</td> <td>1.18</td> <td>1.20</td> <td>1.22</td> </tr> <tr> <td>L/r</td> <td>4.0</td> <td>4.5</td> <td>5.0</td> <td>5.5</td> <td>6.0</td> <td>6.5</td> <td>7.0</td> <td>7.5</td> <td>8.0</td> <td>8.5</td> <td>9.0</td> </tr> <tr> <td>M</td> <td>1.25</td> <td>1.28</td> <td>1.31</td> <td>1.34</td> <td>1.36</td> <td>1.39</td> <td>1.41</td> <td>1.44</td> <td>1.46</td> <td>1.48</td> <td>1.50</td> </tr> <tr> <td>L/r</td> <td>9.5</td> <td>10.00</td> <td>10.5</td> <td>11.0</td> <td>11.5</td> <td>12.0</td> <td>13.0</td> <td>14.0</td> <td>15.0</td> <td>16.0</td> <td>16²/₃¹</td> </tr> <tr> <td>M</td> <td>1.52</td> <td>1.54</td> <td>1.56</td> <td>1.58</td> <td>1.60</td> <td>1.62</td> <td>1.65</td> <td>1.69</td> <td>1.72</td> <td>1.75</td> <td>1.77</td> </tr> </table> <p>NOTE: (1) Maximum ratio allowed by UG-32(i) when L equals the outside diameter of the skirt of the head.</p>				L/r	1.0	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	L/r	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	M	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	L/r	9.5	10.00	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16 ² / ₃ ¹	M	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77
L/r	1.0	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50																																																																
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22																																																																
L/r	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0																																																																
M	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50																																																																
L/r	9.5	10.00	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16 ² / ₃ ¹																																																																
M	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77																																																																
$M = \frac{1}{4} * \left(3 + \sqrt{\frac{L}{r}} \right)$	1,2500	M =	1,2500																																																																								
$\frac{L}{r}$ (para cálculo factor M en tablas)	4	$< 16 \frac{2}{3}$ ó 16.6667 $> 16 \frac{2}{3}$ ó 16.6667	entonces se aplica la fórmula $t = \frac{P * L * M}{2 * S * E - 0.2 * P}$ $t = \frac{0.885 * P * L}{S * E - 0.1 * P}$																																																																								

4.8.1.3 CALCULO DEL ESPESOR DEL CABEZAL.

Para el cálculo del espesor de la cabeza toriesférica para el acero SA-515 grado 55, 60, 65 y 70 se tiene:

ESPESOR DE LA TAPA TORIESFERICA.			
$t_{tapa} =$	0,6269	plg	(A 515 GR 55)
	15,9243	mm	
	0,5918	plg	(A 515 GR 60)
	15,0326	mm	
	0,5605	plg	(A 515 GR 65)
	14,2355	mm	
	0,5322	plg	(A 515 GR 70)
	13,5187	mm	

4.8.1.4 ESPESOR FINAL CABEZA TORIESFÉRICA.

Para determinar el espeso requerido t_{final} (t_{tapa}), del cabezal toriesférico, se obtiene sumando el espesor t más el factor de corrosión admisible C.A. como se muestra en la ecuación 3.5' se tiene:

ESPESOR FINAL (t_{final}) = ESPESOR (t) + FACTOR C.A.			
$t_{final} =$	0,6894	plg	(A 515 GR 55)
	17,5118	mm	
	0,6543	plg	(A 515 GR 60)
	16,6201	mm	
	0,6230	plg	(A 515 GR 65)
	15,8230	mm	
	0,5947	plg	(A 515 GR 70)
	15,1062	mm	

Luego de proceder a realizar el cálculo anterior, se determina lo siguiente:

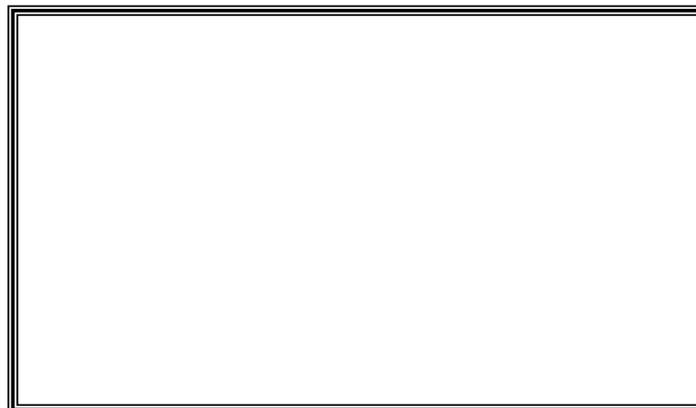
Espesor final tapa TORIESFERICA +factor C.A.	Plancha acero A-515 gr 70 para LA CABEZAS con un espesor normalizado de 16 mm
---	--

4.8.2 CABEZAL HEMISFÉRICO.

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.

4.8.2.1 CALCULO DE ESPESOR CABEZAL HEMISFÉRICO.

Cuando el espesor de pared exceda de $0,356 \cdot R$ o P exceda de $0,665 \cdot S \cdot E$, se aplicará las fórmulas dadas en el apéndice 1-3 de la Código ASME.



Para el cálculo del espesor de la cabeza hemisférica para el acero SA-515 grado 55, 60, 65 y 70 se tiene de la ecuación 3.11:

ESPESOR DE LA TAPA SEMIESFERICA				COMPROBACION DE LA TAPA		
$t_{\text{tapa}} =$	0,2508	plg	(A 515 GR 55)	< (menor)	(0,356*R) 2,136 plg	CORRECTO NO ES NECESARIO APLICAR EL APENDICE 1-3 DE LA NORMA
	6,3697	mm				
	0,2367	plg	(A 515 GR 60)			
	6,0130	mm				
	0,2242	plg	(A 515 GR 65)			
5,6942	mm					
0,2129	plg	(A 515 GR 70)				
5,4075	mm					

4.8.2.2 ESPESOR FINAL CABEZA HEMISFÉRICA.

Para determinar el espeso requerido $t_{\text{final}} (t_{\text{tapa}})$, del cabezal toriesférico, se obtiene sumando el espesor t más el factor de corrosión admisible C.A. como se muestra en la ecuación 3.5'' se tiene:

ESPESOR FINAL (t_{final}) = ESPESOR (t) + FACTOR C.A.			
$t_{\text{final}} =$	0,3133	plg	(A 515 GR 55)
	7,9572	mm	
	0,2992	plg	(A 515 GR 60)
	7,6005	mm	
	0,2867	plg	(A 515 GR 65)
	7,2817	mm	
0,2754	plg	(A 515 GR 70)	
6,9950	mm		

Luego de proceder a realizar el cálculo anterior, el espesor del cabezal hemisférico, se determina lo siguiente:

Espesor final tapa semiesferica +factor C.A.	Plancha acero A-515 gr 70 para LA CABEZA con un espesor normalizado de 1/4 plg o 6,35 mm
---	---

4.8.3 CABEZAL ELIPSOIDAL.

Son empleadas cuando el espesor calculado de una tapa toriesférica es relativamente alto, ya que las tapas semielípticas soportan mayores presiones que las toriesféricas. El proceso de fabricación de estas tapas es el troquelado, su silueta describe una elipse relación 2:1, como se muestra en la figura 3.4.

4.8.3.1 CALCULO ESPESOR CABEZAL ELIPSOIDAL.

La configuración de un cabezal Elipsoidal según UG-32(d) del Anexo XI se tiene:



Para el cálculo del espesor de la cabeza elipsoidal para el acero SA-515 grado 55, 60, 65 y 70 se tiene de la ecuación 3.13:

ESPESOR DE LA TAPA SEMIESFERICA			
$t_{\text{tapa}} =$	0,5016	plg	(A 515 GR 55)
	12,7394	mm	
	0,4735	plg	(A 515 GR 60)
	12,0261	mm	
	0,4484	plg	(A 515 GR 65)
	11,3884	mm	
	0,4258	plg	(A 515 GR 70)
	10,8149	mm	

4.8.3.2 ESPESOR FINAL CABEZA ELIPSOIDAL.

Para determinar el espeso requerido t_{final} (tapa), del cabezal elipsoidal, se obtiene sumando el espesor t más el factor de corrosión admisible C.A. como se muestra en la ecuación 3.5''' se tiene:

ESPESOR FINAL (t_{final}) = ESPESOR (t) + FACTOR C.A.			
$t_{final} =$	0,5641	plg	(A 515 GR 55)
	14,3269	mm	
	0,5360	plg	(A 515 GR 60)
	13,6136	mm	
	0,5109	plg	(A 515 GR 65)
	12,9759	mm	
	0,4883	plg	(A 515 GR 70)
	12,4024	mm	

4.8.3.3 CALCULO DE r Y R CABEZAL ELIPSOIDAL.

Para la construcción del cabezal elipsoidal es necesario calcular r y D , donde r es el radio interior de rebordo y R es el radio interior del cabezal.

CALCULO DE r y R DE ACUERO ASME UG-32(d)			
Radio del nudillo (r)=	0,17*D	2,04	plg
		51,816	mm
Radio Esférico (R)	0,90*D	10,8	plg
		274,32	mm

Luego de proceder a realizar el cálculo anterior, el espesor del cabezal elipsoidal, se determina lo siguiente:

<p>Espesor final tapa semiesferica +factor C.A.</p>	<p>Plancha acero A-515 gr 70 para LA CABEZA con un espesor normalizado de 1/2plg o 12,7mm</p>
--	--

4.8.4 TOMA DE DECISIÓN.

Luego del diseño y cálculo de cada uno de los cabezales se debe tomó la decisión de seleccionar un cabezal toriesférico debido a la disponibilidad en el mercado; por el proceso de fabricación que es un solo cuerpo a diferencia de la cabeza hemisférica que toca conformarla diviendola de 5 a 8 segmentos para soldarlos, en cambio la cabeza elipsoidal por lo contrario no hay en el país; por inspección de soldadura se selecciona la cabeza toriesférica debido a que no tiene cordones de soldadura caso contrario de la cabeza hemisférica.

4.9 SELECCIÓN DE BRIDAS.

Mediante tablas de acuerdo a la presión de diseño según norma ANSI B 16.5, para la unión del cabezal con el casco se emplearán cuatro bridas en las que deben unir el casco con una brida y el cabezal con otra brida para la parte superior, de igual manera para la parte inferior.

Para seleccionar las bridas debemos determinar nuestra presión de diseño para poder elegir la brida correcta para ese tipo de presión, por lo que tenemos:

P(Presión de Diseño)=	845,5698	PSI
BRIDAS DE 900 LB POR PRESION DE DISEÑO =		
845,5698 PSI		

4.9.1 BRIDAS DESLIZABLE (SLIP-ON) DE 900 LB.

La brida a seleccionar se empleará para ensamblar el casco con la brida y el cabezal con la brida, de acuerdo al Anexo XIV se tiene:

BRIDAS DE 900 lb										NORMA ANSI B 16.5									
1. Todas las dimensiones están en pulgadas. 2. Material de uso común, acero forjado SA 105. Se obtienen también en acero inoxidable, acero aleado y metales no ferrosos. 3. La cara elevada de 1/4 pulg está incluida en las dimensiones C, D y J. 4. Las longitudes de los pernos o espárragos no incluyen la altura de la corona. 5. Los barrenos para los pernos son 1/8 pulg mayores que los diámetros de los mismos. 6. Las bridas van barrenadas a las dimensiones que se indican excepto que se especifique otra cosa. 7. Las bridas para los tubos de los tamaños 26, 28 y 30 no están cubiertas por la norma ANSI B 16.5.																			
VER LA PAGINA OPUESTA PARA LA DIMENSION K Y LOS DATOS RELATIVOS A LOS PERNOS																			
Tamaño nominal del tubo	Diámetro de la perforación		Longitud en la campana		Diámetro de la campana en el punto de soldadura	Diámetro de la campana en la base	Diámetro exterior de la brida	Espesor de la brida	Diámetro exterior de la cara elevada		No. de barrenos	Diámetro de los pernos	Círculo de los pernos	Longitud de los pernos		Diámetro exterior	Longitud	Diámetro de la perforación	Tamaño nominal del tubo
	A	B	C	D	E	G	H	J	K	L				M	N				
1/2		.88	2 1/4	1 1/4	.84	1 1/2	4 3/4	3/8	1 1/2	1 1/2	4	3/4	3 1/4	4 1/4	4 1/4				1/2
3/4		1.09	2 1/2	1 1/2	1.05	1 3/4	5 1/4	1	1 1/2	1 1/2	4	3/4	3 1/4	4 1/4	4 1/4				3/4
1		1.36	2 3/4	1 3/4	1.32	2 1/4	5 3/4	1 1/4	2	2	4	3/4	4	5	5	2 1/4			1
1 1/2		1.70	3 1/4	1 3/4	1.66	2 3/4	6 1/4	1 1/4	2 1/4	2 1/4	4	3/4	4 1/4	5	5	2 1/4	9		1 1/2
2		2.44	4	2 1/4	2.38	3 1/4	7	1 1/2	3 1/4	3 1/4	4	1	4 1/4	5 1/4	5 1/4	2 1/4			2
2 1/2		2.94	4 1/4	2 1/2	2.88	4 1/4	8 1/4	1 3/4	4 1/4	4 1/4	4	1	4 1/4	5 1/4	5 1/4	2 1/4			2 1/2
3		3.57	4 3/4	2 3/4	3.50	5	9 1/4	1 3/4	5 1/4	5 1/4	4	1 1/4	4 1/4	5 1/4	5 1/4	2 1/4			3
4		4.57	4 3/4	2 3/4	4.50	6 1/4	11 1/4	1 3/4	6 1/4	6 1/4	4	1 1/4	4 1/4	5 1/4	5 1/4	2 1/4	12		4
5		5.66	5	3 1/4	5.56	7 1/4	13 1/4	2	7 1/4	7 1/4	4	1 1/4	4 1/4	5 1/4	5 1/4	2 1/4			5
6		6.72	5 1/4	3 1/4	6.63	8 1/4	15	2 1/4	8 1/4	8 1/4	4	1 1/4	4 1/4	5 1/4	5 1/4	2 1/4			6
8		8.72	6 1/4	4	8.63	11 1/4	18 1/4	2 1/2	10 1/4	10 1/4	4	1 1/4	4 1/4	5 1/4	5 1/4	2 1/4			8
10		10.88	7 1/4	4 1/4	10.75	14 1/4	21 1/4	2 3/4	12 1/4	12 1/4	4	1 1/4	4 1/4	5 1/4	5 1/4	2 1/4			10
12		12.88	7 3/4	4 3/4	12.75	16 1/4	24 1/4	3	14 1/4	14 1/4	4	1 1/4	4 1/4	5 1/4	5 1/4	2 1/4			12
14		14.94	8 1/4	5 1/4	14.80	17 1/4	27 1/4	3 1/4	16 1/4	16 1/4	4	1 1/4	4 1/4	5 1/4	5 1/4	2 1/4			14
16		16.16	8 3/4	5 1/4	16.00	20	27 3/4	3 1/2	18 1/4	18 1/4	4	1 1/4	4 1/4	5 1/4	5 1/4	2 1/4			16
18		18.18	9	6	18.00	22 1/4	31	4	20 1/4	20 1/4	4	1 1/4	4 1/4	5 1/4	5 1/4	2 1/4			18
20		20.20	9 1/4	6 1/4	20.00	24 1/4	33 1/4	4 1/4	22 1/4	22 1/4	4	1 1/4	4 1/4	5 1/4	5 1/4	2 1/4			20
24		24.25	11 1/4	8	24.00	29 1/4	41	5 1/4	27 1/4	27 1/4	4	1 1/4	4 1/4	5 1/4	5 1/4	2 1/4			24
26		26.25	11 1/4	11 1/4	26 1/4	30 3/4	42 3/4	5 1/2	29 1/4	29 1/4	4	1 1/4	4 1/4	5 1/4	5 1/4	2 1/4			26
28		28.25	11 1/4	11 1/4	28 1/4	32 1/4	46	5 3/4	31 1/4	31 1/4	4	1 1/4	4 1/4	5 1/4	5 1/4	2 1/4			28
30		30.25	12 1/4	12 1/4	30 1/4	35	48 1/4	5 3/4	33 1/4	33 1/4	4	1 1/4	4 1/4	5 1/4	5 1/4	2 1/4			30

En resumen se tiene:



4.9.2 BRIDAS DESLIZABLE (SLIP-ON) DE 900 LB.

La brida a seleccionar se empleará para ensamblar la tubería con la línea principal de entrada y salida del crudo en el reactor de acuerdo al Anexo XIV se tiene:

BRIDAS DE 900 lb										NORMA ANSI B 16.5									
1. Todas las dimensiones están en pulgadas.										2. Material de uso común, acero forjado SA 105. Se obtienen también en acero inoxidable, acero aleado y metales no ferrosos.									
3. La cara elevada de 1/4 pulg está incluida en las dimensiones C, D y J.										4. Las longitudes de los pernos o espárragos no incluyen la altura de la corona.									
5. Los barrenos para los pernos son 1/8 pulg mayores que los diámetros de los mismos.										6. Las bridas van barrenadas a las dimensiones que se indican excepto que se especifique otra cosa.									
7. Las bridas para los tubos de los tamaños 26, 28 y 30 no están cubiertas por la norma ANSI B 16.5.										VER LA PAGINA OPUESTA PARA LA DIMENSION K Y LOS DATOS RELATIVOS A LOS PERNOS									
Tamaño nominal del tubo	Diámetro de la perforación		Longitud en la campana		Diámetro de la campana en el punto de soldadura	Diámetro de la campana en la base	Diámetro exterior de la brida	Espesor de la brida	Diámetro exterior de la cara elevada	No. de barrenos	Diámetro de los pernos	Circulo de los pernos	Longitud de los pernos		Diámetro exterior	Longitud	Diámetro de la perforación	Tamaño nominal del tubo	
	A	B	C	D	E	G	H	J					K	L					M	N
1/4	.88	2 3/8	1 1/4	.84	1 1/2	4 3/8	3/8	1 3/8	4	3/8	3 1/4	4 1/4	4 1/4					1/2	
3/4	1.09	2 3/8	1 3/8	1.05	1 3/8	5 1/8	1	1 1/2	4	3/8	3 3/4	4 1/2	4 1/2					3/4	
1	1.36	2 3/8	1 3/8	1.32	2 1/4	5 3/8	1 1/8	1 1/2	4	3/8	4	5	5	2 1/4				1	
1 1/4	1.70	2 3/8	1 3/8	1.66	2 1/2	6 1/4	1 1/8	1 1/2	4	3/8	4 3/8	5	5	2 1/2	9			1 1/4	
1 1/2	1.95	3 1/4	1 3/8	1.90	2 3/8	7	1 1/4	1 1/2	4	1	4 5/8	5 1/2	5 1/2	2 3/8				1 1/2	
2	2.44	4	2 1/4	2.38	4 1/8	8 1/2	1 1/2	1 1/2	4	3/8	6 1/2	8	8	3 1/8				2	
2 1/2	2.94	4 1/8	2 1/2	2.88	4 3/8	9 3/8	1 3/8	1 1/2	4	1	7 1/8	9	9	3 1/4				2 1/2	
3	3.44	4 3/4	2 3/4	3.38	5 1/8	10 1/2	1 3/8	1 1/2	4	1	7 3/8	10	10	3 1/2				3	
4	4.57	4 3/4	2 3/4	4.50	6 1/4	11 1/2	1 3/8	1 1/2	4	1 1/8	9 1/4	11	11	3 3/4	12			4	
5	5.66	5	3 1/8	5.56	7 1/2	13 1/4	2	1 1/2	8	1 3/8	11	13	13	4 1/4				5	
6	6.72	5 1/2	3 1/8	6.63	8 1/4	15	2 1/8	2 1/4	8 1/2	1 3/8	12 1/2	15	15	4 1/2				6	
8	8.72	6 3/4	4	8.63	11 3/8	18 1/2	2 1/2	2 1/4	10 1/2	1 3/8	15 1/2	18 1/2	18 1/2	5 1/4				8	
10	10.88	7 1/4	4 1/4	10.75	14 1/2	21 1/2	2 3/8	2 3/8	12 1/2	1 3/8	18 1/2	21 1/2	21 1/2	5 3/4				10	
12	12.88	7 3/4	4 1/2	12.75	16 1/2	24	3 1/8	3 1/8	15	20	21	24	24	6 1/4				12	
14	14.14	8 3/8	5 1/8	14.00	17 3/8	25 1/4	3 3/8	3 3/8	16 1/2	20	22	25 1/4	25 1/4	6 3/4				14	
16	16.16	8 1/2	5 1/4	16.00	20	27 3/4	3 3/4	3 3/4	18 1/2	20	24 1/4	27 3/4	27 3/4	7 1/4				16	
18	18.18	9	6	18.00	22 1/4	31	4	4	21	20	27	31	31	7 3/4	12-20			18	
20	20.20	9 3/4	6 3/8	20.00	24 1/2	33 3/4	4 1/4	4 1/4	23	20	29 1/2	33 3/4	33 3/4	8 1/4				20	
24	24.23	11 1/2	8	24.00	29 1/4	41	5 1/2	5 1/2	27 1/4	20	35 1/2	41	41	9 1/4				24	
26	26.25	11 1/4	11 1/4	26 3/4	30 1/2	42 3/4	5 1/2	5 1/2	29 1/2	20	37 1/2	42 3/4	42 3/4	10 1/4				26	
28	28.25	11 3/4	11 3/4	28 1/4	32 3/4	46	5 3/8	5 3/8	31 1/2	20	40 1/4	46	46	10 3/4				28	
30	30.25	12 1/4	12 1/4	30 3/4	35	48 1/2	5 3/4	5 3/4	33 1/2	20	42 3/4	48 1/2	48 1/2	11 1/4				30	

En resumen se tiene:



4.9.3 SELECCIÓN DE MATERIAL.

Material de uso común para bridas, acero forjado SA-105, aunque también se encuentran en acero aleado y metales no ferrosos.

A continuación se tiene las propiedades del material para las brida.

BRIDAS		
MATERIAL	GRADO (resistencia a la tensión 1000lb/plg ²)	Esfuerzo max. Permissible en Psi(T no > a 800°F)
ASTM SA-105	70	12000

4.10 CÁLCULO DE PERNOS Y NÚMERO DE PERNOS PARA EL CASCO Y CABEZA DEL REACTOR.

4.10.1 ESPECIFICACIONES DE RESISTENCIA.

La tabla 3.6 presenta los grados y especificaciones de la mayor parte de los sujetadores roscados actualmente en uso, de donde tenemos:

ESPECIFICACIONES Y MARCAS DE IDENTIFICACION PARA PERNOS, TORNILLOS Y ESPARRAGOS (TIPO DE PERNOS)							
GRADO SAE	GRADO ASTM	GRADO METRICO	DIAMETRO NOMINAL (1/4 a 1 1/2)	RESISTENCIA A LA PRUEBA Sp	RESISTENCIA A LA TENSION Sut	RESISTENCIA DE FLUENCIA Sy	MARCA DE GRADO
			pulg.	kpsi	kpsi	kpsi	
7g	A325 TIPO 2	10,9	3/4	105	133	115	Y

4.10.2 CARACTERÍSTICAS DE ROSCAS UNIFICADAS UNC Y UNF.

En la tabla 3.7 será útil para la especificación y diseño de piezas roscadas UNC y UNF de acuerdo al Anexo XV.

CARACTERÍSTICAS DE ROSCAS UNIFICADAS UNC Y UNF							
DESIGNACION DE TAMAÑO	DIAMETRO MAYOR NOMINAL	SERIE BASTA-UNC			SERIE FINA UNF		
		HILOS POR PLG	AREA DE ESFUERZO A LA TENSION At	AREA AL DIAMETRO MENOR Ar	HILOS POR PLG	AREA DE ESFUERZO A LA TENSION At	AREA AL DIAMETRO MENOR Ar
		N	Pulg. ²	Pulg. ²	N	Pulg. ²	Pulg. ²
1/4	0,2500	20	0,0318	0,0269	28	0,0364	0,0326
5/16	0,3125	18	0,0524	0,0454	24	0,0580	0,0524
3/8	0,3750	16	0,0775	0,0678	24	0,0878	0,0809
7/16	0,4375	14	0,1063	0,0933	20	0,1187	0,1090
1/2	0,5000	13	0,1419	0,1257	20	0,1599	0,1486
9/16	0,5625	12	0,1820	1,1620	18	0,2030	0,1890
5/8	0,6250	11	0,2260	0,2020	18	0,2560	0,2400
3/4	0,7500	10	0,3340	0,3020	16	0,3730	0,3510
7/8	0,8750	9	0,4620	0,4190	14	0,5090	0,4800
1	1,0000	8	0,6060	0,5510	12	0,6630	0,6250
1 1/4	1,2500	7	0,9690	0,8900	12	1,0730	1,0240
1 1/2	1,5000	6	1,4050	1,2940	12	1,3150	1,2600

4.10.3 MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA MATERIALES FERROSOS.

El módulo de elasticidad (ver Anexo XVI) para los aceros al carbono se muestra en la tabla 3.8. Los materiales elásticos isotrópicos quedan caracterizados por un módulo elástico y un coeficiente elástico (o razón entre dos deformaciones), de ahí tenemos:

(E) MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA MATERIALES FERROSOS.											
Material	Millones de lb/pulg ² , para temperatura F. de										
	70	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Aceros al carbono con C ≤ 0,30%	29,50	28,80	28,30	27,70	27,30	26,70	25,50	24,20	22,40	20,40	18,00
Aceros al carbono con C < 0,3%	29,30	28,60	28,10	27,50	27,10	26,50	25,30	24,00	22,30	20,20	17,90
Aceros con alto contenido de elementos de	28,30	27,60	27,00	26,50	25,80	25,30	24,80	24,10	23,50	22,80	22,10

4.10.4 FACTOR K_f DE REDUCCIÓN A LA FATIGA PARA ELEMENTOS ROSCADOS.

En la tabla 3.9 se indica los valores medios de factores de reducción de resistencia a la fatiga, correspondiente al entalle (o filete) bajo la cabeza del perno y al principio de la rosca, en la espiga del perno, como se muestra en el Anexo XVII.

(Kf) FACTOR DE REDUCCION DE RESISTENCIA A LA FATIGA, PARA ELEMENTOS ROSCADOS.				
Grado SAE	Grado Metrico	Roscas laminadas	Roscas Cortadas	Filetes
0 a 2	3,6 a 5,8	2,20	2,80	2,10
4 a 8	6,6 a 10,9	3,00	3,80	2,30

4.10.5 FACTOR K_d EFECTOS DE TEMPERATURA.

En la tabla 3.10 se indica el factor K_d , en donde la temperatura cambia todas las propiedades mecánicas de un material, y que la existencia de un esfuerzo estático o medio induce asimismo flujo plástico en el material.

(Kd) EFECTOS DE LA TEMPERATURA		
K d =	1	T ≤ 450°C (840°F)
	1 - 5,8(10) ⁻³ (T-450)	450°C < T ≤ 550°C
	1 - 3,2(10) ⁻³ (T-840)	840°F < T ≤ 1020°F

4.10.6 FACTOR k_c DE CONFIABILIDAD.

La tabla 3.11 presenta las variables estandarizadas Z_r , correspondiente a las diversas confiabilidades que se requieren en el diseño junto con el respectivo factor de confiabilidad K_c (Ver Anexo XIX).

FACTORES DE CONFIABILIDAD k_c , CORRESPONDIENTE A UNA DESVIACION ESTADAR DE 8% DEL LIMITE FATIGA		
Confiabilidad R	Variable Estandarizada Z_r	Factor de confiabilidad k_c
0,5	0	1,000
0,9	1,288	0,897
0,95	1,645	0,868
0,99	2,326	0,814
0,999	3,091	0,753
0,9999	3,719	0,702
0,99999	4,265	0,659
0,999999	4,753	0,620
0,9999999	5,199	0,584
0,99999999	5,612	0,551
0,999999999	5,997	0,520

4.10.7 CONSTANTE DE RIGIDEZ k_b DEL PERNO.

Es la relación de la fuerza aplicada al elemento a la deformación total producida por dicha fuerza como se muestra en la ecuación 3.15.



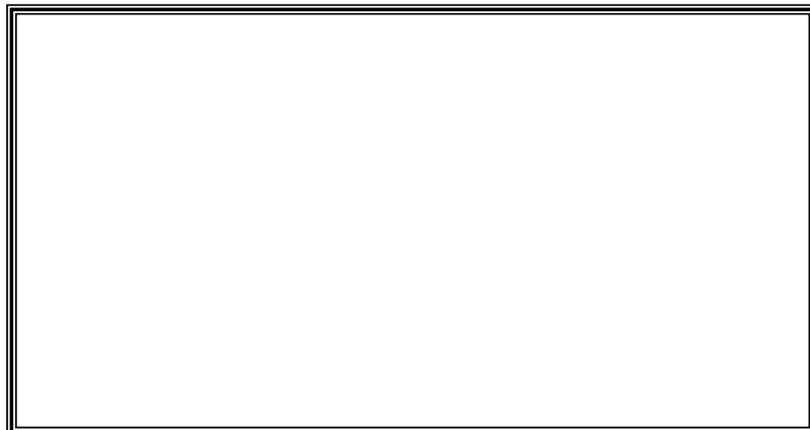
4.10.8 RIGIDEZ DE LA JUNTA ATORNILLADA K_m .

La constante de rigidez de la junta atornillada está dada por el diámetro de la cara de arandela que es aproximadamente igual al ancho entre caras planas de la parte hexagonal, que generalmente es 50% mayor que el diámetro del perno, tomada de la ecuación 3.16.



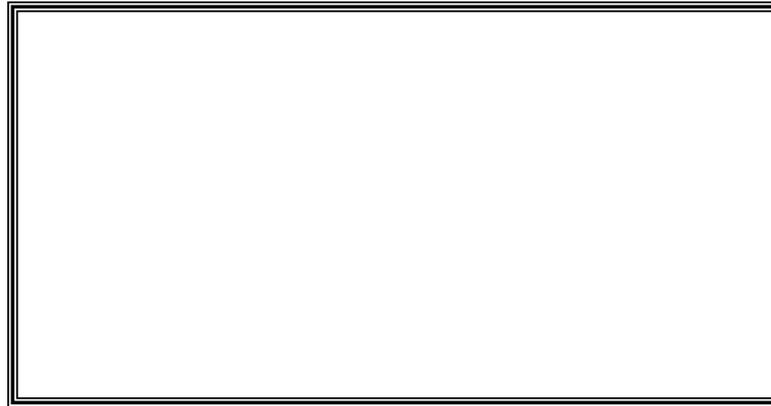
4.10.9 RELACIÓN DE RIGIDÉZ C.

La constante de rigidez está dada por la siguiente fórmula tomada de la ecuación 3.17.



4.10.10 FACTOR K_e DE REDUCCIÓN POR CONCENTRACIÓN DE ESFUERZO.

Se debe considerar cuando las partes han de hacerse de materiales frágiles o cuando estarán sometidas a cargas de fatiga. Para el cálculo del factor de reducción por concentración de esfuerzo de la ecuación 3.18 se tiene.



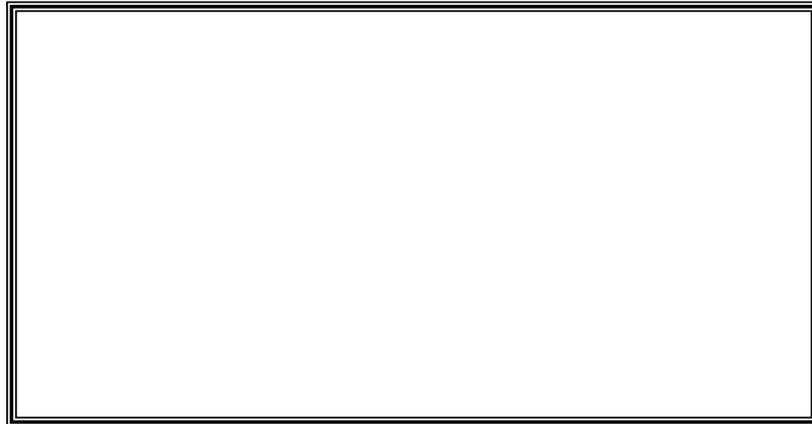
4.10.11 LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA PARA LA CARGA AXIAL.

La tabla 3.12 es una tabulación de la resistencia última a la compresión y el valor correspondiente del límite de fatiga axial para una serie extensa de pruebas, con la ecuación 3.19 se tiene.



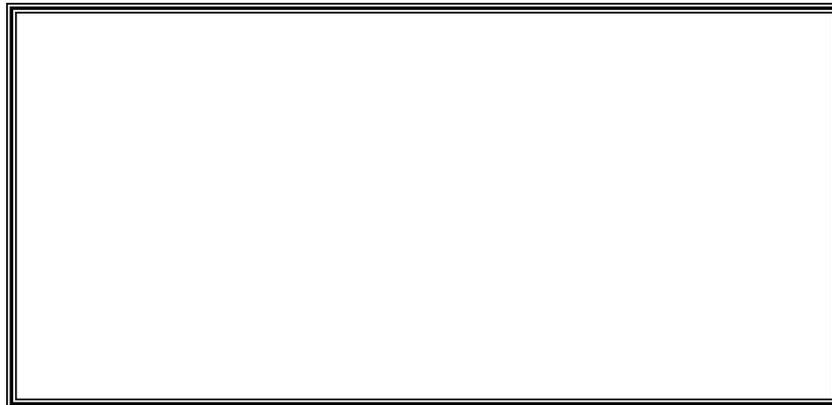
4.10.12 LÍMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA DEL PERNO (S_e).

En el anexo XIX se indica las condiciones que afectan al límite de fatiga. Con base en lo anterior se tiene la ecuación 3.20.



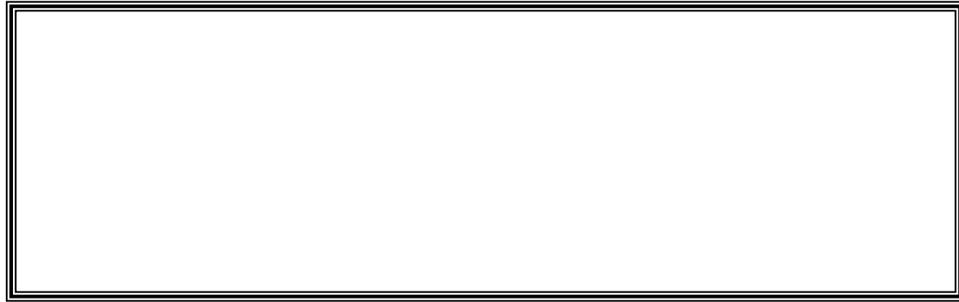
4.10.13 FUERZA TOTAL P DE SEPARACIÓN DE LOS PERNOS.

La fuerza de separación de los pernos en las bridas se obtiene en la ecuación 3.21.



4.10.14 PRECARGA (F_i) CUANDO EXISTE CARGA A LA FATIGA.

Por consiguiente, la precarga apropiada cuando se tiene carga de fatiga está dada por la ecuación 3.22.



Para el cálculo de la precarga del perno se necesita estimar un factor de seguridad, en este caso se ha seleccionado:

FACTOR DE SEGURIDAD SELECCIONADO	
n =	5

4.10.15 CARGA DE PRUEBA F_p .

Algunas veces si un perno es sometido solo a carga estática no falla durante el apriete es porque existe una muy alta probabilidad de que nunca se rompa.

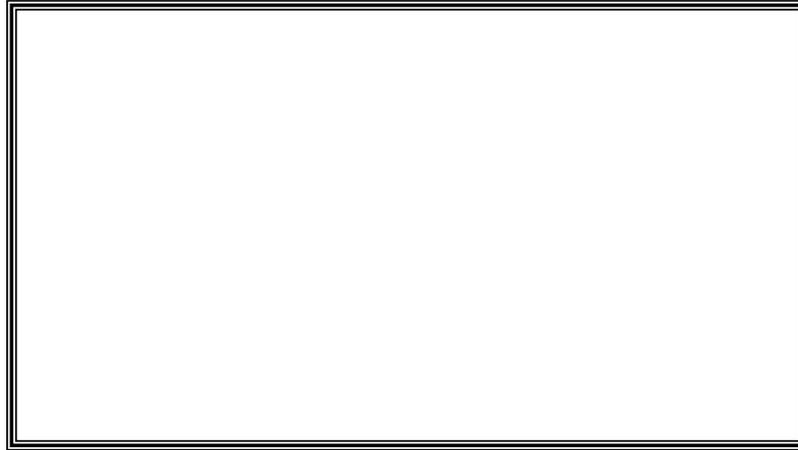
Por esta razón se sugiere que la precarga esté dentro del intervalo:

$$0.6 * F_p \leq F_i \leq 0.9 * F_p \quad \text{[Ecuación 3.23]}$$

Dónde F_p es la carga de prueba y S_p es la resistencia a la prueba obtenida de la ecuación:

$$F_p = A_t * S_p \quad \text{[Ecuación 3.24]}$$

Para ello, tenemos:



4.10.16 PRECARGA CUANDO EXISTE CARGA A LA FATIGA (Fi).

Para esta comprobación se ha seleccionado treinta (30) pernos como máximo que debería contener la brida para su óptima sujeción.

Fi (PRECARGA CUANDO EXISTE CARGA A LA FATIGA) PARA DIFERENTES VALORES DE NUMERO DE PERNOS DE ACUERDO (N)																													
N	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Fi=	21.4534	0.5108	11.4218	18.0895	27.4215	25.5991	27.9515	25.7815	21.2459	32.4438	33.4419	34.2866	35.0205	35.6380	36.1870	36.6714	37.1020	37.4872	37.8340	38.1477	38.4228	38.6663	38.9200	39.1516	39.3543	39.5420	39.7163	39.8785	40.0300

COMPROBACION POR FALLA ESTATICA CON Fi (PRECARGA) CONSTANTE S (0,9*Fg)																													
N	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
m=	1.9004	2.9405	3.9308	4.9010	5.8812	6.8614	7.8416	8.8218	9.8021	10.7823	11.7625	12.7427	13.7229	14.7031	15.6833	16.6635	17.6437	18.6239	19.6041	20.5843	21.5645	22.5447	23.5249	24.5051	25.4853	26.4655	27.4458	28.4260	29.4062

En conclusión se determina un número de pernos igual a diez (10) como máximo gracias a la comprobación de la precarga cuando existe carga a la fatiga, en cambio en la segunda gráfica tenemos que los pernos no fallan por carga estática.

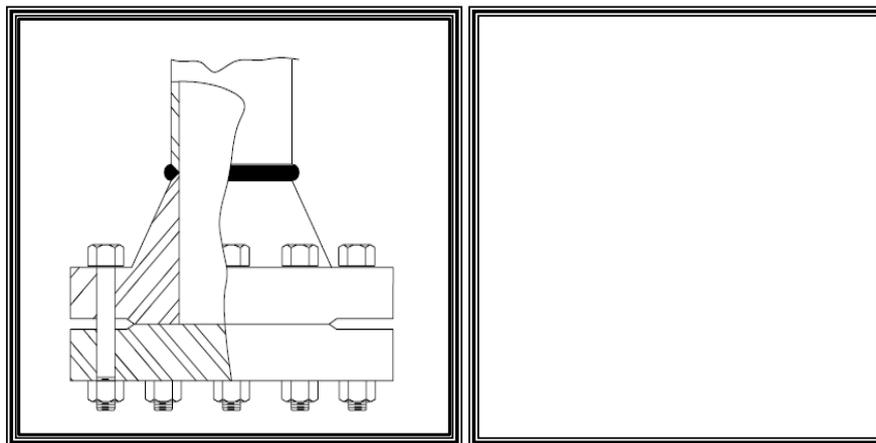
4.10.17 COMPROBACIÓN NUMERO DE PERNOS N (PROCESO INVERSO).

En las siguientes ecuaciones 3.25 y 3.26 se indican el uso de los pernos que satisfagan el requisito de la fatiga.



B(espacio pernos) COMPROBACION POR METODO INVERSO																													
N	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
B(espacio pernos)	43.9824	29.3216	21.9912	17.5920	14.6608	12.5664	10.9956	9.7776	8.7968	7.9968	7.3328	6.7968	6.3832	5.9840	5.6072	5.2512	4.9184	4.6080	4.3200	4.0528	3.8064	3.5808	3.3760	3.1912	3.0264	2.8816	2.7568	2.6512	2.5632

Con este método se realiza la comprobación de los espacios entre perno y perno, donde se señala que para existir un correcto sellado se debe considerar que el espacio entre pernos no debe superar diez (10) veces el diámetro del perno.



Por consiguiente, en la tabla anterior tenemos que al seleccionar nueve (9) pernos tenemos un sellado de casi diez (10) veces el diámetro del perno como máximo y si seleccionamos veinte y un (21) pernos tenemos un apriete de cuatro (4) veces el diámetro del perno. En conclusión, con la selección de diez (10) pernos de $\frac{3}{4}$ de

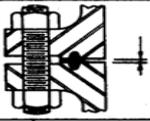
pulgada, comprobamos que es óptimo nuestro sellado dónde tenemos un 8.7965 casi nueve (9) veces el espacio comprendido de entre cada perno.

4.11 SELECCIÓN DEL EMPAQUE ENTRE BRIDAS.

En la tabla 3.12, de acuerdo a la presión y temperatura de operación, y tamaño nominal del tubo se debe seleccionar el empaque.

4.11.1 SELECCIÓN DE MATERIAL DEL EMPAQUE.

SELECCIÓN DEL EMPAQUE-MODULO DE ELASTICIDAD		
	kpsi	Mpa
Emp. Asbesto Comprimido =	70	480
Emp. Cobre-Asbesto=	13,5x10 ³	93x10 ³

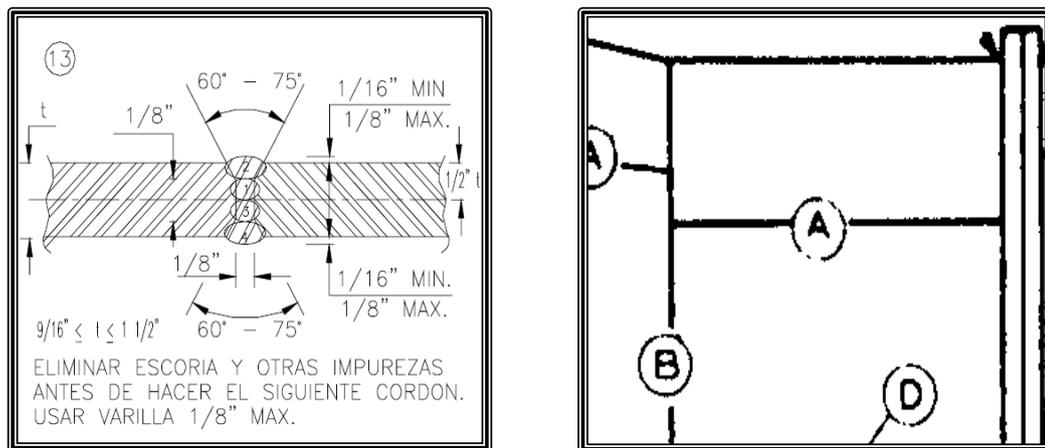
SELECCIÓN DEL EMPAQUE SEGÚN MEGYESY									
BRIDAS PARA JUNTAS DE ANILLO									
									
DISTANCIA APROXIMADA ENTRE BRIDAS									
Tamaño nominal del tubo	Presión nominal de trabajo, lb/pulg ²								
	150	300	400	600	900	1500	2500		
Distancia, en pulgadas									
1/2	1/8	1/8	1/8	1/8	—	—	3/32		
3/4	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32
1	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32
1 1/4	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	1/4
1 1/2	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	1/4
2	3/32	3/32	3/16	3/16	3/16	1/8	1/8	1/8	1/4
2 1/2	3/32	3/32	3/16	3/16	3/16	1/8	1/8	1/8	1/4
3	3/32	3/32	3/16	3/16	3/16	1/8	1/8	1/8	1/4
3 1/2	3/32	3/32	3/16	3/16	3/16	1/8	1/8	1/8	1/4
4	3/32	3/32	3/16	3/16	3/16	1/8	1/8	1/8	1/4
5	3/32	3/32	3/16	3/16	3/16	1/8	1/8	1/8	1/4
6	3/32	3/32	3/16	3/16	3/16	1/8	1/8	1/8	1/4
8	3/32	3/32	3/16	3/16	3/16	1/8	1/8	1/8	1/4
10	3/32	3/32	3/16	3/16	3/16	1/8	1/8	1/8	1/4
12	3/32	3/32	3/16	3/16	3/16	1/8	1/8	1/8	1/4
14	1/8	3/32	3/16	3/16	3/16	1/8	1/8	1/8	—
16	1/8	3/32	3/16	3/16	3/16	1/8	1/8	1/8	—
18	1/8	3/32	3/16	3/16	3/16	1/8	1/8	1/8	—
20	1/8	3/32	3/16	3/16	3/16	1/8	1/8	1/8	—
22	—	1/4	1/4	3/16	—	—	—	—	—
24	1/8	1/4	1/4	3/16	3/32	3/32	3/16	—	—

NUMEROS DE LOS ANILLOS											
Tamaño nominal del tubo		1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4
Clase de presión, lb/pulg ²	150	...	...	R15	R17	R19	R22	R25	R29	R33	R36
	300, 400, 600	R11	R13	R16	R18	R20	R23	R26	R31	R34	R37
	900	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	1500	R12	R14	R16	R18	R20	R24	R27	R35	...	R39
	2500	R13	R16	R18	R21	R23	R26	R28	R32	...	R38
Tamaño nominal del tubo		5	6	8	10	12	14	16	18	20	24
Clase de presión, lb/pulg ²	150	R40	R43	R48	R52	R56	R59	R64	R68	R72	R76
	300, 400, 600	R41	R45	R49	R53	R57	R61	R65	R69	R73	R77
	900	R41	R45	R49	R53	R57	R62	R66	R70	R74	R78
	1500	R44	R46	R50	R54	R58	R63	R67	R71	R75	R79
	2500	R42	R47	R51	R55	R60	...	...	...	...	...

4.12 PROCESOS DE SOLDADURA.

4.12.1 REPRESENTACIÓN DEL TIPO DE JUNTA.

El siguiente proceso de soldadura se seguirá para el casco y para cabezal-extensión del cabezal, para cuando los espesores de placa que se encuentren entre los valores comprendidos en la ecuación 3.28.



Debido a que nuestros espesores de placa para el casco es de $1/2$ pulgada tenemos.

Plancha acero A-515 gr 70 para el cuerpo del recipiente con un espesor normalizado de 16 mm

ESPESOR DE PLACA DETALLE(A) PARA COSTURA LONGITUDINAL					
9/16	≤	t	≤	1 1/2	
0,5625	≤	0,590551181	≤	1,5	plg
14,2875	≤	15	≤	38,1	mm

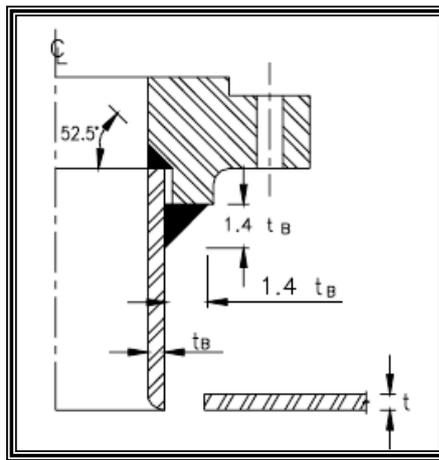
El tipo de electrodo seleccionado es el E7018 distribuido por AGA.

El material de aporte, de la soldadura, deberá ser compatible con el material base a soldar. Los electrodos más comúnmente utilizados para soldar recipientes a presión de acero al carbón, son el 6010 y el 7018.

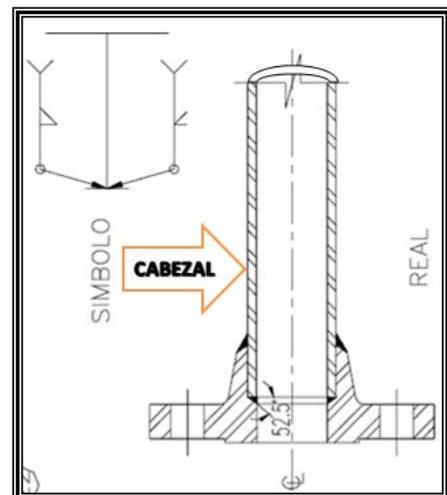
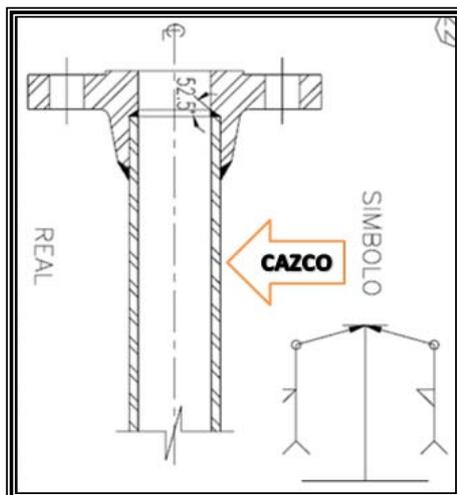
4.12.2 REPRESENTACIÓN DEL TIPO DE JUNTA ENTRE CASCO-BRIDA Y CABEZAL-BRIDA.

4.12.2.1 SOLDADURA PARA BRIDAS.

El proceso de soldadura para bridas, entre casco-brida, cabezal-brida y cabezal-brida de la entrada y salida de la carga, será el siguiente:



4.12.2.2 SOLDADURA ENTRE CASCO-BRIDA Y CABEZAL-BRIDA.



En razón de que el cálculo del espesor del casco y cabezal es de casi ½ pulgada tenemos:

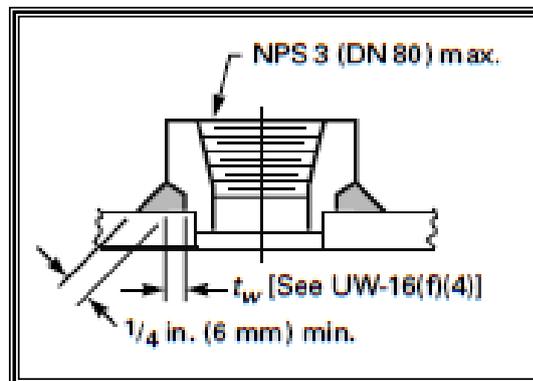
Plancha acero A-515 gr 70 para el cuerpo del recipiente con un espesor normalizado de 16 mm

El tipo de electrodo seleccionado es el E7018 distribuido por AGA.

El material de aporte, de la soldadura, deberá ser compatible con el material base a soldar. Los electrodos más comúnmente utilizados para soldar recipientes a presión de acero al carbón, son el 6010 y el 7018.

4.12.2.3 SOLDADURA PARA ACCESORIOS ROSCADOS Y SOLDADOS.

El proceso de soldadura para accesorios aplicado para los acoples de los ingresos del hidrógeno será el siguiente:

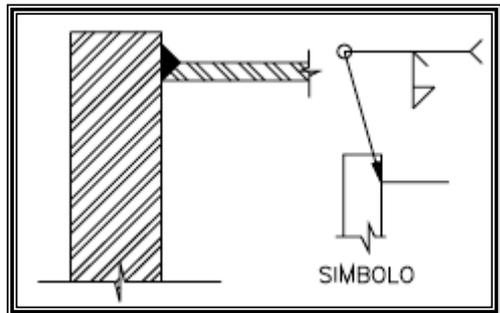


El tipo de electrodo seleccionado es el E7018 distribuido por AGA.

El material de aporte, de la soldadura, deberá ser compatible con el material base a soldar. Los electrodos más comúnmente utilizados para soldar recipientes a presión de acero al carbón, son el 6010 y el 7018.

4.12.2.4 SOLDADURA PARA PARTES INTERNAS.

En la figura 3.12 se muestra el proceso de soldadura para partes internas del reactor será el siguiente proceso aplicado en las partes internas del reactor tales como, distribuidor interno, tapa perforada interna, y tapa inferior del tanque interno.



El tipo de electrodo seleccionado es el E7018 distribuido por AGA.

El material de aporte, de la soldadura, deberá ser compatible con el material base a soldar. Los electrodos más comúnmente utilizados para soldar recipientes a presión de acero al carbón, son el 6010 y el 7018.

4.13 PARÁMETROS DE OPERACIÓN⁵².

Hay cuatro parámetros de operación más importantes en las operaciones de hidrotratamiento:

- Presión Total y Parcial de Hidrógeno,
- Temperatura de Reacción,
- Relación Hidrógeno/Crudo y Gas de Reciclo,
- Velocidad Espacial.

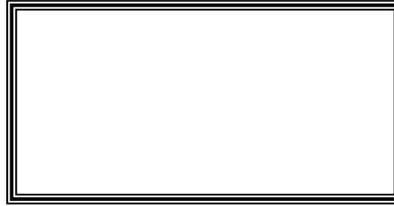
DATOS.				
Po(Presión de Operación)=	5,3000	Mpa		
	768,6998	PSI		
To (temperatura de operación)=	633,0000	K		
	679,7300	°F	359,8500	°C
Diámetro Interior(Dato Planteado)=	12,0000	plg	304,8	mm
Radio Interior=	6,0000	plg	152,4	mm

Para el cálculo de los parámetros de de operación se ha realizado un escalamiento del 10% de un reactor comercial para tomar estos datos en el reactor prototipo que incluye un diseño personalizado para poder realizar pruebas de hidrogenación planteadas.

CALCULO DE CAUDAL DE ACUERDO A LAS CARACTERISTICAS DEL CATALIZADOR Y VOLUMEN DEL REACTOR PARA SELECCIÓN DE BOQUILLAS								
	ØInterior (pulg)	ØInterior (m)	Volumen catalizador (m3)	Longitud cama reactor (m)	LHSV (1/h)	Flujo Volumetrico (m ³ /h)	Relacion H2/Crudo	TIEMPO ESPACIAL (hora)
Reactor Piloto	1,0000	0,0254	0,0002	0,3500	2,5000	0,0004	356,2000	0,4000
Reactor Prototipo (Propuesto)	12,0000	0,3048	0,082	1,1496		7,6726		
Reactor Comercial	120,0000	3,0480	33,2000	9,0000		83,0000		

Para llevar a cabo este escalamiento se empleó la ecuación de interpolación lineal.

⁵²ANCHEYTA, J., SPEIGHT, J., Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua, First Edition, CRC Press , Taylor & Francis Group, United States of America, 2007.



4.14 DATOS PARA CÁLCULO.

4.14.1 SELECCIÓN DE BOQUILLAS DEL CRUDO PARA EL REACTOR.

4.14.1.1 SELECCIÓN DE MATERIAL PARA BOQUILLA DEL CRUDO.

De acuerdo a la norma ASTM (ver Anexo VII) se obtiene las propiedades de los materiales seleccionados para medianas y altas temperaturas. Donde obtenemos los siguientes datos.

TUBO PARA ALTA TEMPERATURA		
MATERIAL	GRADO (resistencia a la tensión 1000lb/plg ²)	Psi(T no > a 800°F)
SA-106 gr B	B (60,0)	10800

4.14.1.2 DATOS OBTENIDOS BOQUILLA PARA EL CRUDO.

DATOS OBTENIDOS BOQUILLA PARA EL CRUDO				
FLUJO CRUDO (m ³ /h)	VELOCIDAD ENTRADA CRUDO (m/h)	VELOCIDAD ENTRADA CRUDO (m/s)	AREA BOQUILLA CRUDO (m ²)	AREA FLUJO BOQUILLA CRUDO (plg ²)
0,0215	2,8739	0,0008	0,0075	11,6172

Con el dato del área de flujo de la boquilla del crudo se procede a seleccionar el tipo de tubería para la entrada y salida del crudo en el reactor, (ver Anexo VII) donde tenemos las propiedades de los tubos en función del diámetro nominal:

SELECCIÓN DE BOQUILLA PARA EL CRUDO					
TUBERÍA 4 plg (seleccionada de acuerdo al área de flujo calculada = 11,6172)	Número de Cédula	Diá. Exterior (plg)	Diá. Interior (plg)	tn= Espesor de pared (plg)	Area Transversal o Flujo(plg2)
	40	4,5000	3,8760	0,3120	11,8000
	80	4,5000	3,8260	0,3370	11,5000

4.14.1.3 CÁLCULO ESPESOR REQUERIDO DE LA BOQUILLA PARA CRUDO.

Con la ecuación se procede a realizar la comprobación de la boquilla de acuerdo a la tubería seleccionada para el crudo.

En este caso se ha seleccionado una tubería de 4 pulgadas de cédula 40 y 80 para proceder a la comprobación como se muestra en la siguiente tabla.

4 (Cont.)	40	40S	Est.	4.500	4.090	.205	9.39	5.71	1.178	1.071	13.15
	...	...	...	4.500	4.026	.237	10.79	5.51	1.178	1.055	12.73
	...	...	...	4.500	4.000	.250	11.35	5.45	1.178	1.049	12.57
	...	...	...	4.500	3.958	.271	12.24	5.35	1.178	1.038	12.31
	...	...	...	4.500	3.938	.281	12.67	5.27	1.178	1.031	12.17
	...	...	...	4.500	3.900	.300	13.42	5.19	1.178	1.023	11.96
	...	...	...	4.500	3.876	.312	14.00	5.12	1.178	1.013	11.80
	80	80S	Ref.	4.500	3.826	.337	14.98	4.98	1.178	1.002	11.50
	...	...	...	4.500	3.750	.375	16.52	4.78	1.178	.982	11.04
	...	...	...	4.500	3.624	.438	19.00	4.47	1.178	.949	10.32
	120	...	...	4.500	3.500	.500	21.36	4.16	1.178	.916	9.62



4.14.2 SELECCIÓN DE BOQUILLA PARA EL HIDROGENO PARA EL REACTOR.

4.14.2.1 DATOS OBTENIDOS BOQUILLA PARA EL CRUDO.

DATOS OBTENIDOS BOQUILLA PARA EL HIDROGENO							
NUMERO DE TUBOS PARA INGRESO H2	FLUJO TOTAL HIDROGENO (m3/h)	FLUJO PARCIAL HIDROGENO (m3/h)	VELOCIDAD ENTRADA HIDROGENO (m/h)	VELOCIDAD ENTRADA HIDROGENO (m/s)	AREA FLUJO BOQUILLA H2(m2)	AREA FLUJO BOQUILLA HIDROGENO (plg2)	
1	7,6511	7,6511	16493,9927	4,5817	0,0005	0,719	DATO PROPUESTO PROPUESTO POR SELECCIÓN DE TUBERÍA DE 1 PLG ANEXO VII
2		3,8255	8246,9964	2,2908			
3		2,5504	5497,9976	1,5272			
4		1,9128	4123,4982	1,1454			
5		1,5302	3298,7985	0,9163			
6		1,2752	2748,9988	0,7636			

Para obtener el valor del flujo total del hidrógeno, se divide el flujo volumétrico total de entrada al reactor para la relación $H_2/crudo$, es decir, que de 356.2 partes del flujo total solamente una representa el flujo del crudo y la diferencia pertenece al total de hidrógeno.

Con el dato del área de flujo parcial de hidrógeno se procede a seleccionar el tipo de tubería para la entrada del mismo al reactor, asumiendo un tipo de tubería debido a que la velocidad de entrada del hidrógeno debe ser muy pequeña para ello se procese a asumir el número de tubos o ingresos para llevar a cabo el proceso de hidrogenación, en el Anexo VII se muestra los datos de tubería donde tenemos las propiedades de los tubos en función del diámetro nominal:

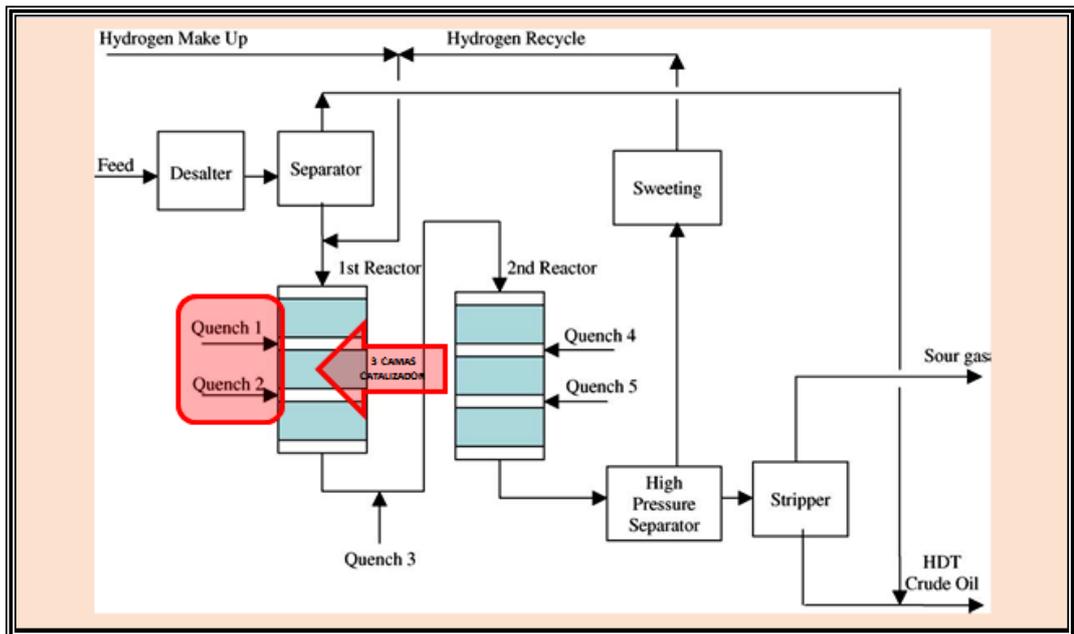
1	...	10S	...	1.315	1.097	.109	1.404	.4090	.344	.2672	.9448
	40	40S	Est.	1.315	1.049	.133	1.678	.3740	.344	.2740	.8640
	80	80S	Ref.	1.315	.957	.179	2.171	.3112	.344	.2520	.7190
	...	...	...	1.315	.877	.219	2.561	.2614	.344	.2290	.6040
	160	...	...	1.315	.815	.250	2.850	.2261	.344	.2134	.5217
	...	...	Doble Ref.	1.315	.599	.358	3.659	.1221	.344	.1570	.2818

SELECCIÓN DE BOQUILLA PARA EL HIDROGENO					
TUBERÍA 1 plg (seleccionada de acuerdo al área de flujo propuesta= 0,719)	Número de Cédula	Diá. Exterior (plg)	Diá. Interior (plg)	tn= Espesor de pared (plg)	Area Transversal o Flujo(plg2)
	80	1,3150	0,9570	0,1790	0,7190

Con la ecuación se procede a realizar la comprobación de la boquilla de acuerdo a la tubería seleccionada para el hidrógeno.



Por diseño se selecciona 6 tubos de 1 plg de acuerdo al esquema propuesto en el paper escrito por Ancheyta (ver Anexo en el que se propone 3 camas de catalizadores con sus debidos enfriadores).



4.15 CÁLCULO DE PERNOS Y NÚMERO DE PERNOS PARA LA LÍNEA DE ENTRADA Y SALIDA DEL CRUDO.

4.15.1 ESPECIFICACIONES DE RESISTENCIA.

La tabla 3.6 presenta los grados y especificaciones de la mayor parte de los sujetadores roscados actualmente en uso, de donde tenemos:

ESPECIFICACIONES Y MARCAS DE IDENTIFICACION PARA PERNOS, TORNILLOS Y ESPARRAGOS								
GRADO	SAE	GRADO ASTM	GRADO METRICO	DIAMETRO NOMINAL (1/4 a 1 1/2)	RESISTENCIA A LA PRUEBA Sp	RESISTENCIA A LA TENSION Sut	RESISTENCIA DE FLUENCIA Sy	MARCA DE GRADO
				pulg.	kpsi	kpsi	kpsi	
7g		A325 TIPO 2	10,9	5/16	55	74	57	Y

4.15.2 CARACTERÍSTICAS DE ROSCAS UNIFICADAS UNC Y UNF.

En la tabla 3.7 será útil para la especificación y diseño de piezas roscadas UNC y UNF de acuerdo al Anexo XV.

CARACTERÍSTICAS DE ROSCAS UNIFICADAS UNC Y UNF							
DESIGNACION DE TAMAÑO	DIAMETRO MAYOR NOMINAL	SERIE BASTA-UNC			SERIE FINA UNF		
		HILOS POR PLG	AREA DE ESFUERZO A LA TENSION At	AREA AL DIAMETRO MENOR Ar	HILOS POR PLG	AREA DE ESFUERZO A LA TENSION At	AREA AL DIAMETRO MENOR Ar
	Pulg	N	Pulg. ²	Pulg. ²	N	Pulg. ²	Pulg. ²
1/4	0,2500	20	0,0318	0,0269	28	0,0364	0,0326
5/16	0,3125	18	0,0524	0,0454	24	0,0580	0,0524
3/8	0,3750	16	0,0775	0,0678	24	0,0878	0,0809
7/16	0,4375	14	0,1063	0,0933	20	0,1187	0,1090
1/2	0,5000	13	0,1419	0,1257	20	0,1599	0,1486
9/16	0,5625	12	0,1820	1,1620	18	0,2030	0,1890
5/8	0,6250	11	0,2260	0,2020	18	0,2560	0,2400
3/4	0,7500	10	0,3340	0,3020	16	0,3730	0,3510
7/8	0,8750	9	0,4620	0,4190	14	0,5090	0,4800
1	1,0000	8	0,6060	0,5510	12	0,6630	0,6250
1 1/4	1,2500	7	0,9690	0,8900	12	1,0730	1,0240
1 1/2	1,5000	6	1,4050	1,2940	12	1,3150	1,2600

4.15.3 MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA MATERIALES FERROSOS.

El módulo de elasticidad (ver Anexo XVI) para los aceros al carbono se muestra en la tabla 3.8. Los materiales elásticos isotrópicos quedan caracterizados por un módulo elástico y un coeficiente elástico (o razón entre dos deformaciones), de ahí tenemos:

(E) MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA MATERIALES FERROSOS.											
Material	Millones de lb/pulg ² , para temperatura F. de										
	70	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Aceros al carbono con C ≤ 0,30%	29,50	28,80	28,30	27,70	27,30	26,70	25,50	24,20	22,40	20,40	18,00
Aceros al carbono con C < 0,3%	29,30	28,60	28,10	27,50	27,10	26,50	25,30	24,00	22,30	20,20	17,90
Aceros con alto contenido de elementos de	28,30	27,60	27,00	26,50	25,80	25,30	24,80	24,10	23,50	22,80	22,10

4.15.4 FACTOR K_f DE REDUCCIÓN A LA FATIGA PARA ELEMENTOS ROSCADOS.

En la tabla 3.9 se indica los valores medios de factores de reducción de resistencia a la fatiga, correspondiente al entalle (o filete) bajo la cabeza del perno y al principio de la rosca, en la espiga del perno, como se muestra en el Anexo XVII.

(Kf) FACTOR DE REDUCCION DE RESISTENCIA A LA FATIGA, PARA ELEMENTOS ROSCADOS.				
Grado SAE	Grado Metrico	Roscas laminadas	Roscas Cortadas	Filetes
0 a 2	3,6 a 5,8	2,20	2,80	2,10
4 a 8	6,6 a 10,9	3,00	3,80	2,30

4.15.5 FACTOR K_d EFECTOS DE TEMPERATURA.

En la tabla 3.10 se indica el factor K_d , en donde la temperatura cambia todas las propiedades mecánicas de un material, y que la existencia de un esfuerzo estático o medio induce asimismo flujo plástico en el material.

(Kd) EFECTOS DE LA TEMPERATURA		
K d =	1	T ≤ 450°C (840°F)
	1 - 5,8(10) ⁻³ (T-450)	450°C < T ≤ 550°C
	1 - 3,2(10) ⁻³ (T-840)	840°F < T ≤ 1020°F

4.15.6 FACTOR k_c DE CONFIABILIDAD.

La tabla 3.11 presenta las variables estandarizadas Z_r , correspondiente a las diversas confiabilidades que se requieren en el diseño junto con el respectivo factor de confiabilidad K_c (Ver Anexo XIX).

FACTORES DE CONFIABILIDAD k_c , CORRESPONDIENTE A UNA DESVIACION ESTADAR DE 8% DEL LIMITE FATIGA		
Confiabilidad R	Variable Estandarizada Z_r	Factor de confiabilidad k_c
0,5	0	1,000
0,9	1,288	0,897
0,95	1,645	0,868
0,99	2,326	0,814
0,999	3,091	0,753
0,9999	3,719	0,702
0,99999	4,265	0,659
0,999999	4,753	0,620
0,9999999	5,199	0,584
0,99999999	5,612	0,551
0,999999999	5,997	0,520

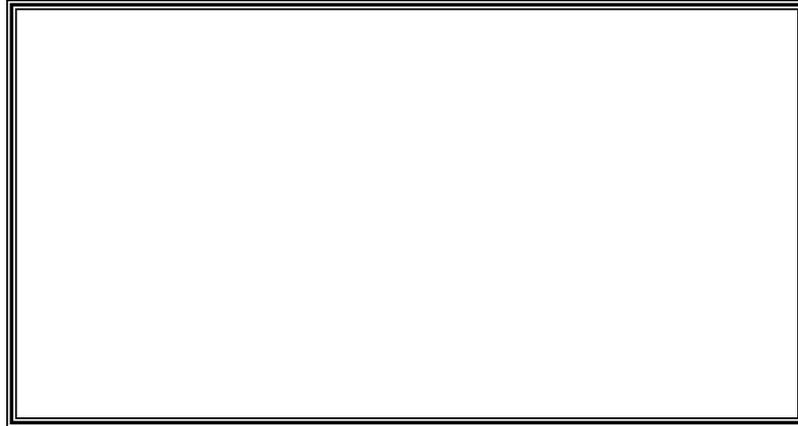
4.15.7 CONSTANTE DE RIGIDEZ k_b DEL PERNO.

Es la relación de la fuerza aplicada al elemento a la deformación total producida por dicha fuerza como se muestra en la ecuación 3.15.



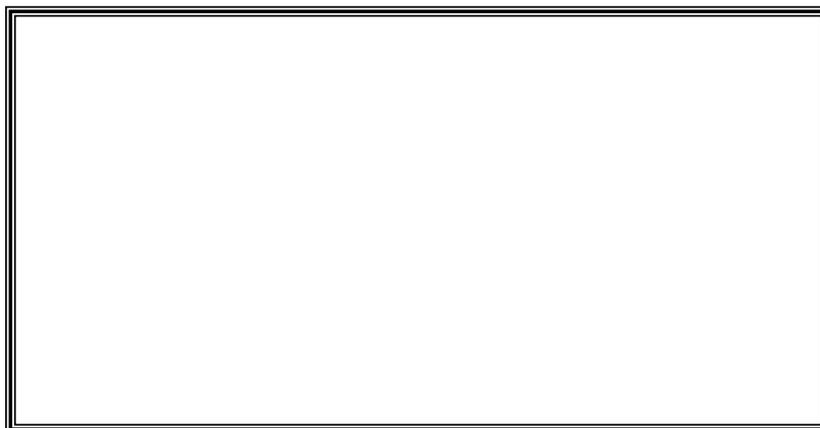
4.15.8 RIGIDEZ DE LA JUNTA ATORNILLADA K_m .

La constante de rigidez de la junta atornillada está dada por el diámetro de la cara de arandela que es aproximadamente igual al ancho entre caras planas de la parte hexagonal, que generalmente es 50% mayor que el diámetro del perno, tomada de la ecuación 3.16.



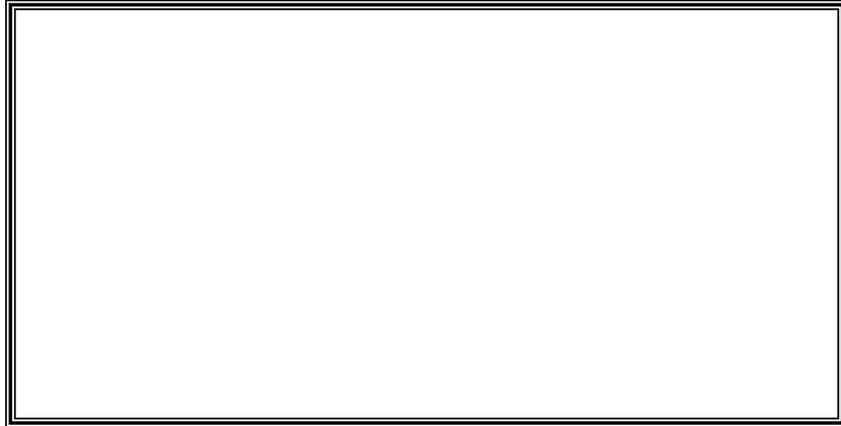
4.15.9 RELACIÓN DE RIGIDÉZ C.

La constante de rigidez está dada por la siguiente fórmula tomada de la ecuación 3.17.



4.15.10 FACTOR K_e DE REDUCCIÓN POR CONCENTRACIÓN DE ESFUERZO.

Se debe considerar cuando las partes han de hacerse de materiales frágiles o cuando estarán sometidas a cargas de fatiga. Para el cálculo del factor de reducción por concentración de esfuerzo de la ecuación 3.18 se tiene.



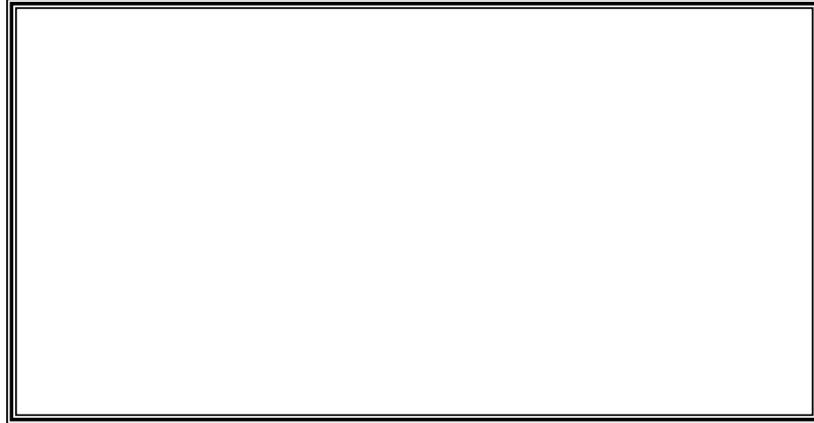
4.15.11 LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA PARA LA CARGA AXIAL.

La tabla 3.12 es una tabulación de la resistencia última a la compresión y el valor correspondiente del límite de fatiga axial para una serie extensa de pruebas, con la ecuación 3.19 se tiene.



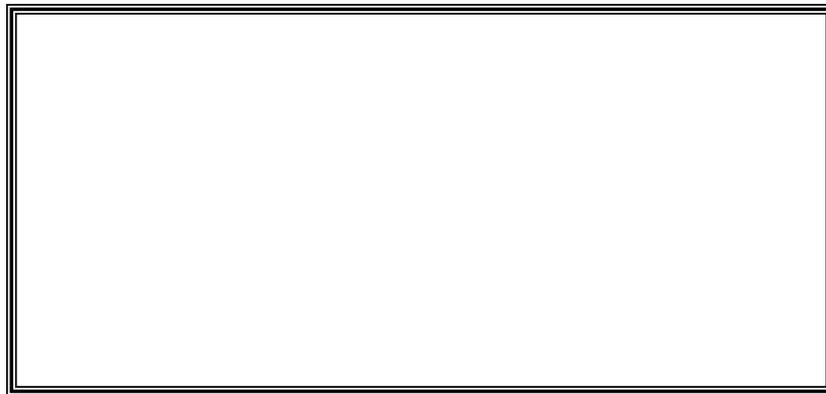
4.15.12 LÍMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA DEL PERNO (S_e).

En el anexo XIX se indica las condiciones que afectan al límite de fatiga. Con base en lo anterior se tiene la ecuación 3.20.



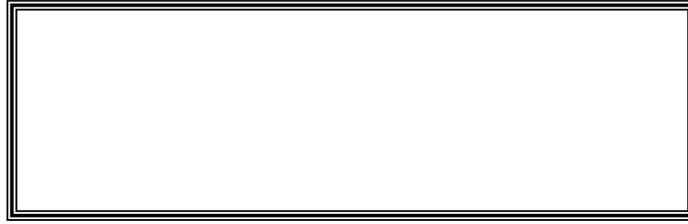
4.15.13 FUERZA TOTAL P DE SEPARACIÓN DE LOS PERNOS.

La fuerza de separación de los pernos en las bridas se obtiene en la ecuación 3.21.



4.15.14 PRECARGA (F_i) CUANDO EXISTE CARGA A LA FATIGA.

Por consiguiente, la precarga apropiada cuando se tiene carga de fatiga está dada por la ecuación 3.22.



Para el cálculo de la precarga del perno se necesita estimar un factor de seguridad, en este caso se ha seleccionado:

FACTOR DE SEGURIDAD SELECCIONADO	
n =	5

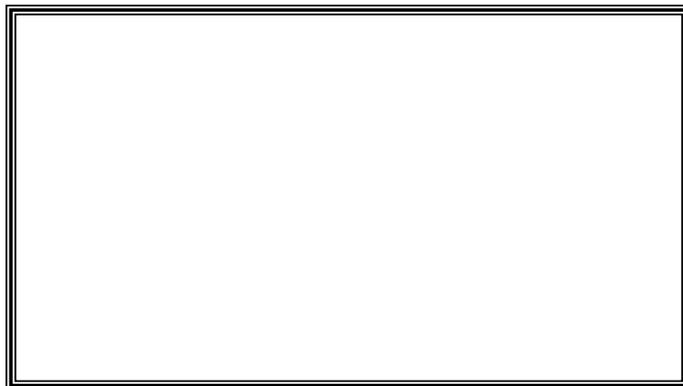
4.15.15 CARGA DE PRUEBA F_p .

Algunas veces si un perno es sometido solo a carga estática no falla durante el apriete es porque existe una muy alta probabilidad de que nunca se rompa. Por esta razón se sugiere que la precarga esté dentro del intervalo:

$$0.6 * F_p \leq F_i \leq 0.9 * F_p \quad \text{[Ecuación 3.23]}$$

Dónde F_p es la carga de prueba y S_p es la resistencia a la prueba obtenida de la ecuación:

$$F_p = A_t * S_p \quad \text{[Ecuación 3.24]}$$



4.15.16 PRECARGA CUANDO EXISTE CARGA A LA FATIGA (Fi) PARA DIFERENTES VALORES DE NÚMERO DE PERNOS DE ACUERDO (N).

Para esta comprobación se ha seleccionado treinta (30) pernos como máximo que debería contener la brida para su óptima sujeción.

Fi (PRECARGA CUANDO EXISTE CARGA A LA FATIGA) PARA DIFERENTES VALORES DE NUMERO DE PERNOS DE ACUERDO (N)																													
N	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Fi=	18,3411	1,052	1,788	2,191	2,474	2,673	2,829	2,940	3,039	3,116	3,176	3,226	3,274	3,315	3,350	3,381	3,409	3,435	3,457	3,476	3,492	3,508	3,520	3,540	3,551	3,561	3,573	3,587	3,594

COMPROBACION POR FALLA ESTATICA CON Fi (PRECARGA) CONSTANTE $\leq (0,975p)$																													
N	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
n=	1,613	2,179	2,902	3,626	4,358	5,079	5,800	6,521	7,253	7,985	8,707	9,432	10,158	10,884	11,610	12,337	13,063	13,789	14,516	15,232	15,958	16,684	17,411	18,140	18,869	19,590	20,317	21,043	21,768

En conclusión se determina un número de pernos igual a seis (6) como máximo gracias a la comprobación de la precarga cuando existe carga a la fatiga, en cambio en la segunda gráfica tenemos que los pernos no fallan por carga estática.

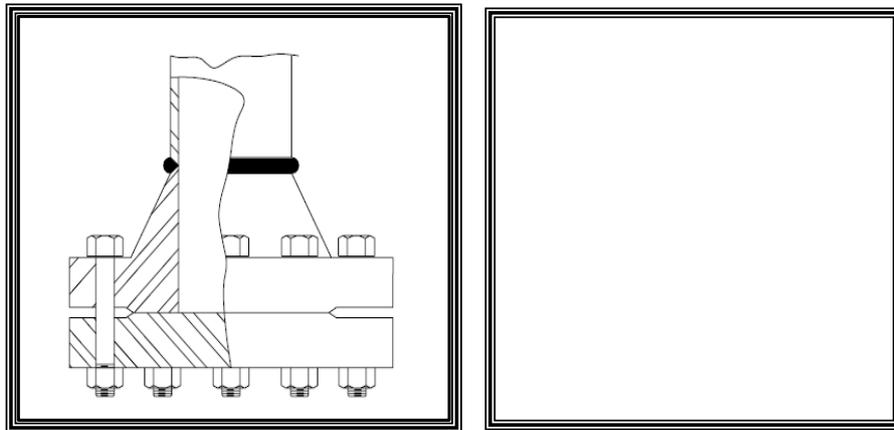
4.15.17 COMPROBACIÓN NUMERO DE PERNOS N (PROCESO INVERSO).

En las siguientes ecuaciones 3.25 y 3.26 se indican el uso de los pernos que satisfagan el requisito de la fatiga.





Con este método se realiza la comprobación de los espacios entre perno y perno, donde se señala que para existir un correcto sellado se debe considerar que el espacio entre pernos no debe superar diez (10) veces el diámetro del perno; en la parte anterior se hizo una selección de seis pernos y verificando con esta tabla se observa que con seis pernos no existe un correcto sellado, por lo que se seleccionará diez (10) pernos.

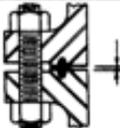


Por consiguiente, en la tabla anterior tenemos que al seleccionar diez (10) pernos tenemos un sellado óptimo de casi diez (10) veces el diámetro del perno como máximo y si seleccionamos veinte y tres (23) pernos tenemos un sellado mínimo de casi cuatro (4) veces el diámetro del perno. En conclusión, con la selección de diez (10) pernos de 5/16 de pulgada, comprobamos que es óptimo nuestro sellado dónde tenemos un 9,2991 casi un diez (10) veces el espacio comprendido de entre cada perno.

4.15.18SELECCIÓN DE MATERIAL DEL EMPAQUE.

SELECCIÓN DEL EMPAQUE-MODULO DE ELASTICIDAD		
	kpsi	Mpa
Emp. Asbesto Comprimido =	70	480
Emp. Cobre-Asbesto=	13,5x10 ³	93x10 ³

En la tabla a continuación se presenta la selección del empaque entre las bridas para obtener un sellado óptimo entre ellas, ésta selección está en función de la presión de operación y el diámetro nominal del tubo de ingreso y salida.

SELECCIÓN DEL EMPAQUE SEGÚN MEGYESY											
BRIDAS PARA JUNTAS DE ANILLO											
											
		DISTANCIA APROXIMADA ENTRE BRIDAS									
Tamaño nominal del tubo	Presión nominal de trabajo, lb/pulg ²										
	150	300	400	600	900	1500	2500				
Distancia, en pulgadas											
1/2	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
3/4	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
1	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
1 1/4	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
1 1/2	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
2	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
2 1/2	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
3	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
4	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
5	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
6	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
10	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
12	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
14	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
16	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
18	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
20	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
22	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
24	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8			
NUMEROS DE LOS ANILLOS											
Tamaño nominal del tubo		1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4
Clase de presión, lb/pulg ²	150	R15	R17	R19	R22	R25	R29	R33	R36
	300, 400, 600	R11	R13	R16	R18	R20	R23	R26	R31	R34	R37
	900	R31	...	R37
	1500	R12	R14	R16	R18	R20	R24	R27	R35	...	R39
	2500	R13	R16	R18	R21	R23	R26	R28	R32	...	R38
Tamaño nominal del tubo		5	6	8	10	12	14	16	18	20	24
Clase de presión, lb/pulg ²	150	R40	R43	R48	R52	R56	R59	R64	R68	R72	R76
	300, 400, 600	R41	R45	R49	R53	R57	R61	R65	R69	R73	R77
	900	R41	R45	R49	R53	R57	R62	R66	R70	R74	R78
	1500	R44	R46	R50	R54	R58	R63	R67	R71	R75	R79
	2500	R42	R47	R51	R55	R60

4.16 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CON AUTODESK INVENTOR 2010.

Mediante la simulación podemos observar el comportamiento de la resistencia del material A 515 grado 70 del casco y cabezal, las bridas de sujeción y la suelda con electrodo E7018 que conforman el cuerpo principal del reactor. Donde se podrá verificar el factor de seguridad, concentración de fuerzas acumuladas (von misses stress) y las deflexiones en los tres ejes x, y, z, resultados que están basados al reporte que genera la simulación del programa inventor 2010.

Para estos nos ayudamos con una gama de colores que nos especifican las dimensiones de los resultados desde un máximo a un mínimo. A continuación detallamos datos y resultados de la simulación (Datos tomados del Anexo III).

4.16.1 ANÁLISIS TIPO ESTÁTICO

4.16.1.1 DATOS FÍSICOS:

Masa: 235.318 lb

Área: 12099.9 plg²

Volumen: 6428.68 plg³

Centro de Gravedad: x=0.0000113845 in, y=0.0133801 in, z = -28.4916 in

4.16.1.2 MATERIALES.

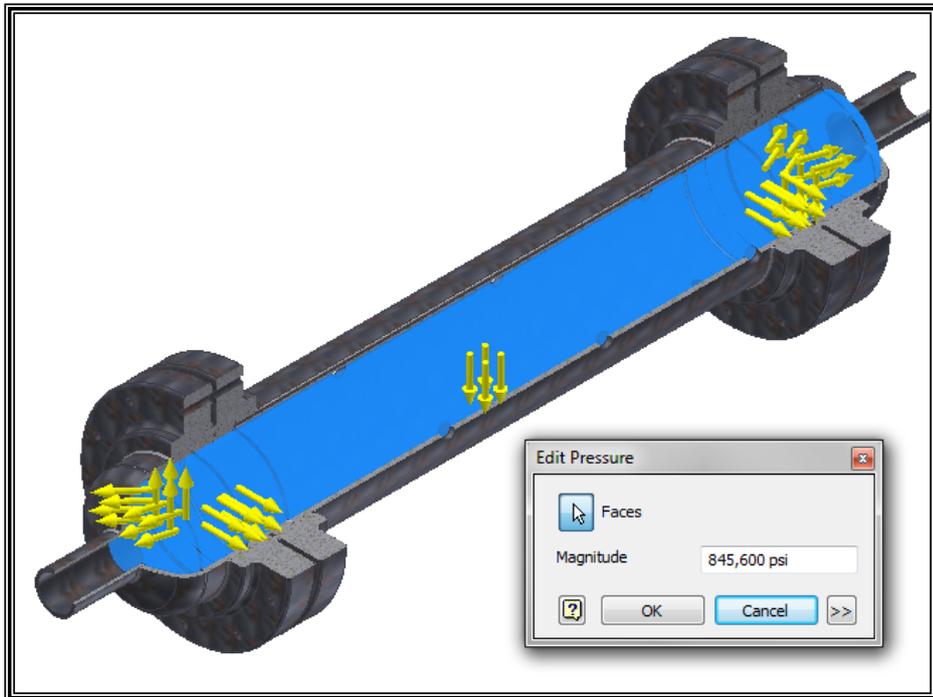
Suelda: E 7018

Bridas: SA 105

Casco y Cabezal: A515 Grado 70.

4.16.2 RESULTADOS.

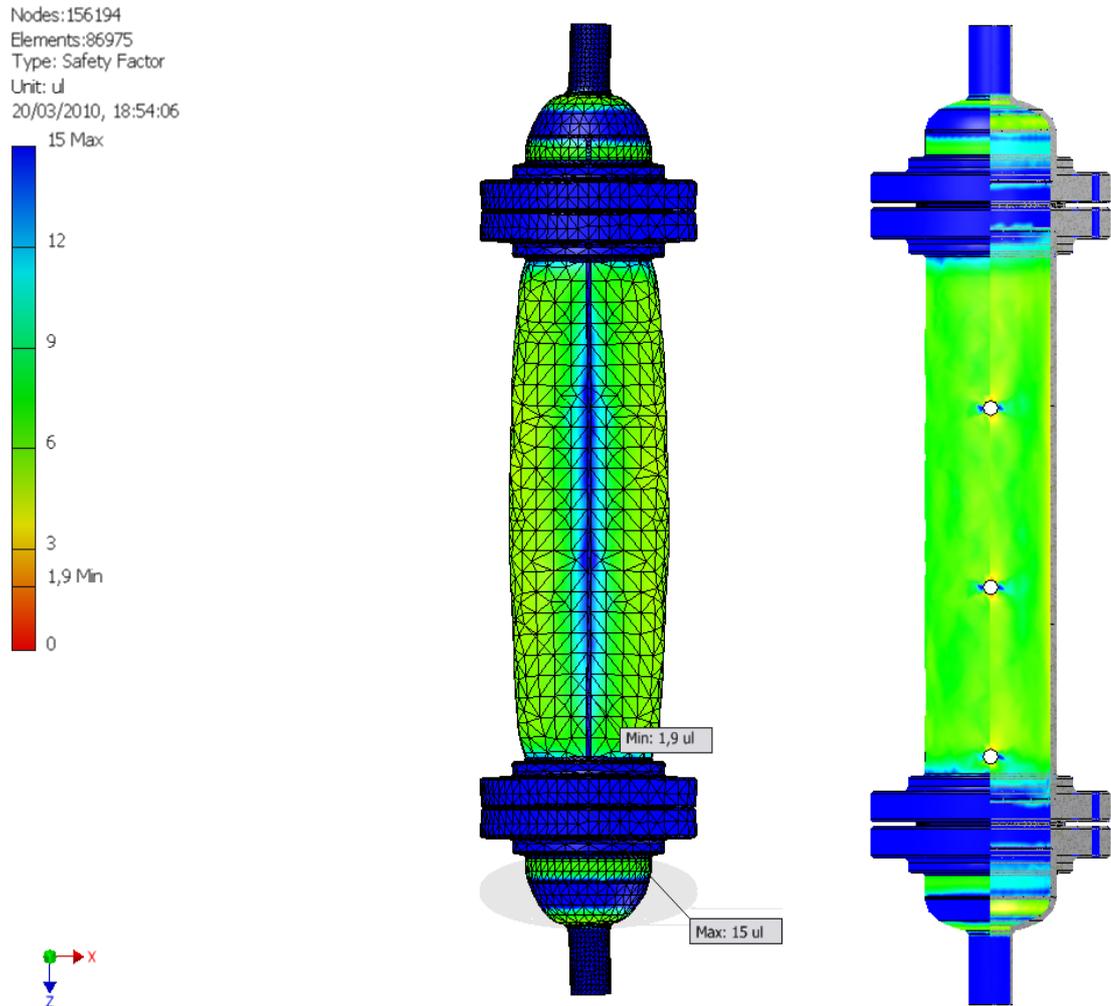
Nombre	Mínimo	Máximo
Presión	845.6 psi	
Deflexiones	0 in	0,00493483 in
Factor de Seguridad	1,89716 ul	15 ul
Deflexión X	-0,00461864 in	0,00483388 in
Deflexión Y	-0,00388183 in	0,00130673 in
Deflexión Z	-0,00302821 in	0,00302444 in
Von Misses Stress	0 ksi	23.7 ksi



4.16.3 COMPORTAMIENTO DEL FACTOR DE SEGURIDAD.

Máximo valor de factor de seguridad: 15

Mínimo valor de factor de seguridad: 1.9



4.16.3.1 ANÁLISIS:

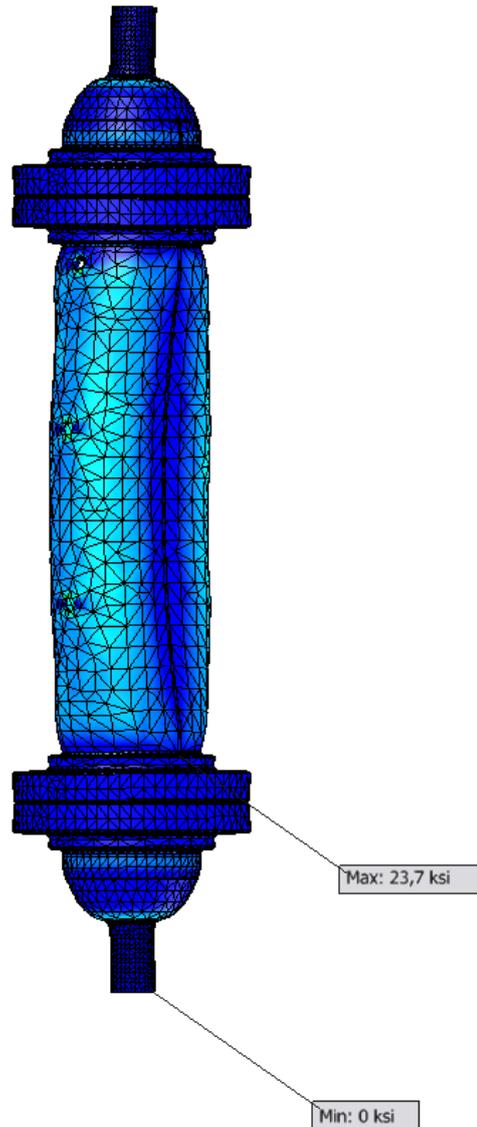
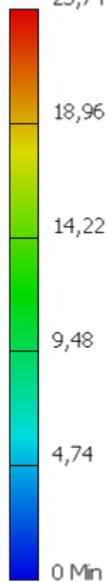
Mediante la apreciación de los resultados de la simulación se determina que el casco tiene un factor de seguridad mínimo de 1,9 debido a que se encuentran las perforación para los nepllos de acople de las flautas de alimentación de hidrogeno, en general casco esta con un factor de seguridad apreciable a 5 que satisface a la presión de operación. Por otra parte están las bridas con un factor de seguridad de 15, que están estimas para una clase (900 psi) normalizado, por ello el factor de seguridad elevado.

4.16.4 CONCENTRACIÓN DE FUERZA ACUMULADA (VON MISSES STRESS).

Máximo valor: 23.7 ksi

Mínimo valor: 0 ksi

Nodes:156189
Elements:86970
Type: Von Mises Stress
Unit: ksi
20/03/2010, 21:02:40
23,7 Max



4.16.4.1 ANÁLISIS.

Mediante la apreciación de los resultados de la simulación se determina que el casco tiene la mayor concentración de esfuerzos con un valor máximo de 23,7 ksi que actúa en la unión interna de la suelda longitudinal y la suelda circunferencial en la brida, y un valor de 0 ksi en los elementos que no actúan los esfuerzos.

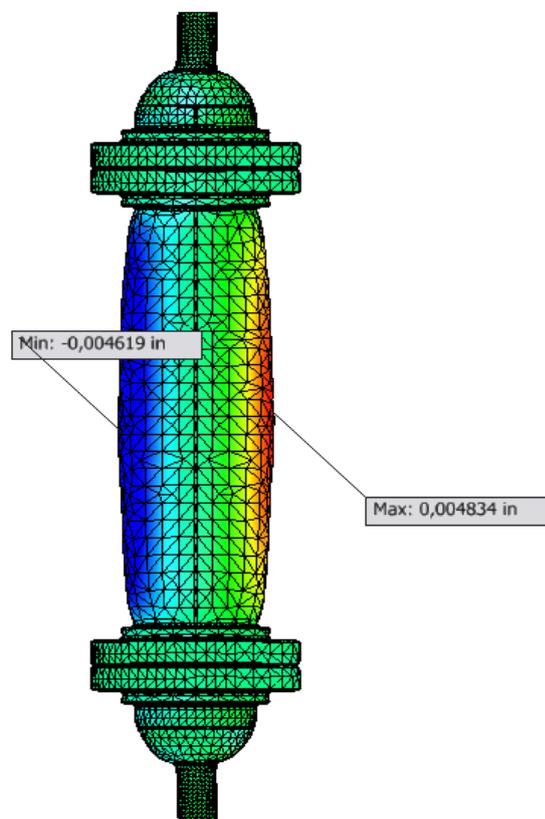
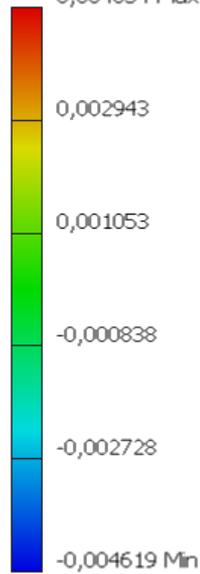
4.16.5 DEFLEXIONES MÁXIMAS Y MÍNIMAS POR EJES.

4.16.5.1 DEFLEXIÓN EJE X.

Máxima: 0.004834 plg

Mínima: -0.004619 plg

Nodes:156189
Elements:86970
Type: X Displacement
Unit: in
20/03/2010, 21:21:38
0,004834 Max



4.16.5.1.1 ANÁLISIS.

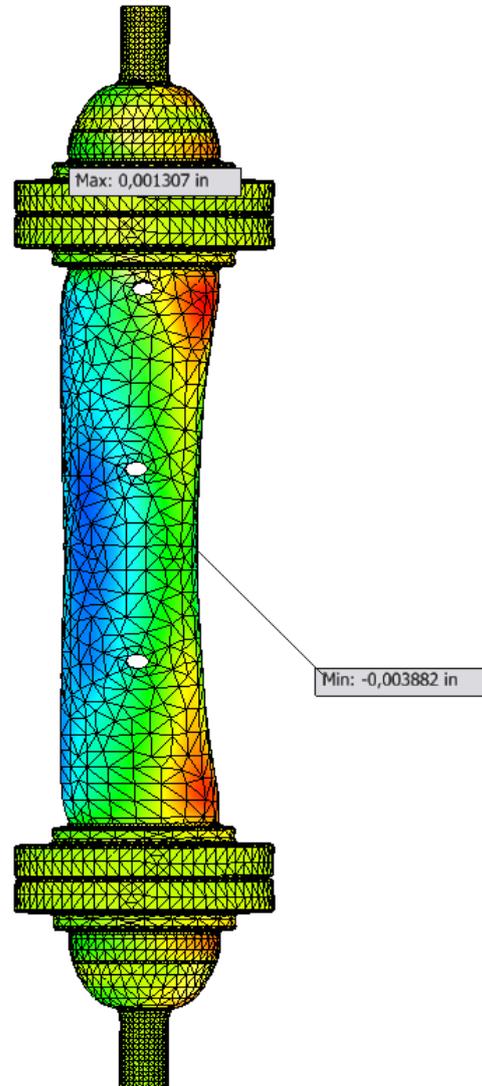
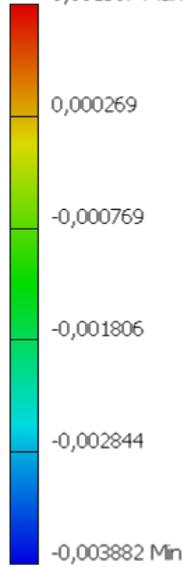
Las deflexiones en el eje x muestran como la presión afecta directamente al casco del reactor deformándolo alrededor del eje z siendo el mayor valor en el centro del tanque ya que están alejadas del las bridas que son su soporte principal.

4.16.5.2 DEFLEXIÓN EJE Y.

Máxima: 0.001307 plg

Mínima: -0.003882 plg

Nodes:156189
Elements:86970
Type: Y Displacement
Unit: in
20/03/2010, 21:41:26
0,001307 Max



4.16.5.2.1 ANÁLISIS.

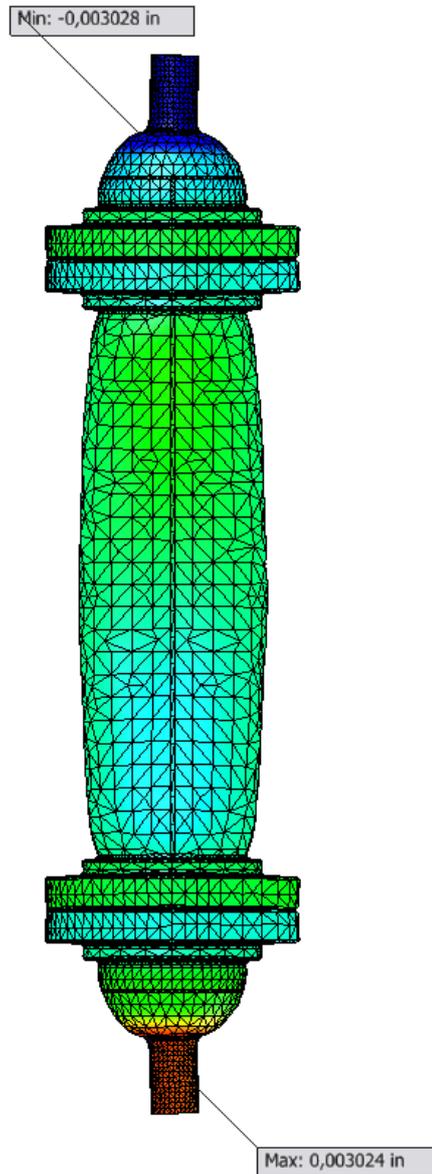
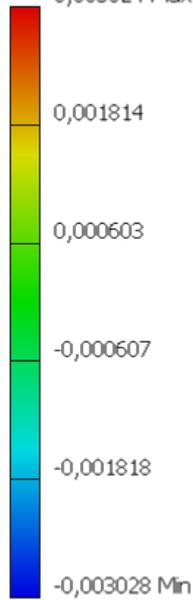
Las deflexiones en el eje Y muestran como la presión afecta al casco, deformándolo alrededor del eje z siendo el mayor valor en el extremo cerca de la brida, y un valor negativo a lo largo de la costura de la solda longitudinal del tanque por la diferencia de resistencia a la tracción que presenta la misma.

4.16.5.3 DEFLEXIÓN EJE Z.

Máxima: 0.003028 plg

Mínima: -0.003024 plg

Nodes:156189
Elements:86970
Type: Z Displacement
Unit: in
20/03/2010, 21:53:24
0,003024 Max



4.16.5.3.1 ANÁLISIS.

Las deflexiones en el eje z muestran cómo cambia la longitud del tanque con mayor valor en las cabezas que es donde la presión trata de empujar y separar las bridas.

CAPITULO V

5 COSTOS.

En este capítulo se calculan los costos de fabricación del reactor prototipo para hidrotreamiento, en algunos rubros posteriormente mencionados ya están incluido el costo por mano de obra e insumos, el cual será mencionado en el precio promedio general, según el tipo de fabricación a realizar, que serán sustentadas por proformas de empresas calificadas con el estampe ASME en el Ecuador dedicadas a la elaboración específica de recipientes sometidos a presión, y empresas afines a los tipos de construcción.

A continuación se detalla los precios establecidos por proformas de empresas a marzo del 2010.

COSTOS DE FABRICACIÓN.

ITEM	COSTO	PRECIO	UNIDAD
1	COSTO ACERO A-515 GRADO 70	\$ 1,34	kg
2	COSTO ACERO SA 105	\$ 1,45	kg
3	COSTO SOLDADURA E 7018	\$ 50,00	kg
4	COSTO RADIOGRAFIA	\$ 45,00	c/radiog
5	COSTO OXICORTE PLANCHA e =1/4 plg	\$ 6,35	m
6	COSTO OXICORTE PLANCHA e =15 mm	\$ 6,30	m
7	COSTOS PRUEBAS HIDROSTATICAS	\$ 600,00	m ³
8	COSTOS SAND BLASTING	\$ 6,00	m ²
9	COSTO PINTURA SIGMA ZINC 158	\$ 120,00	gal
10	COSTO MANO DE OBRA PINTURA	\$ 8,00	m ²
11	Esparrago completo (tuercas y arandelas) 3/4 -10 UNC x 8 3/4 grado 7	\$ 4,00	c/u
12	Esparrago completo (tuercas y arandelas) 3/8-16 UNC x5 1/4 grado 7	\$ 2,50	c/u
13	Perno allen 1/4-28 UNFx1/2	\$ 0,50	c/u
14	Manometro Wyka 800 PSI (1/4 NPT)	\$ 150,00	c/u
15	Empaques Espirometalicos clase 600 d= 12 plg.	\$ 35,00	c/u
16	Empaques Espirometalicos clase 600 d= 4 plg.	\$ 20,00	c/u
17	Brida Slipon clase 900 ANSI B 16.5 d= 12 plg	\$ 250,00	c/u
18	Brida Slipon clase 900 ANSI B 16.5 d= 4 plg	\$ 90,00	c/u

5.1 MATERIA PRIMA.

5.1.1 PLANCHA DE ACERO PARA EL CASCO DEL REACTOR.

Material Utilizado: A-515 Grado 70

Dimensiones: Ø12 x 57 plg

Espesor: 15 mm

Cantidad: 1

Densidad: 7861 kg/m³.

Peso A-515 = volumen x densidad acero

Costo Plancha A-515 Grd. 70: **1,34 US\$/kg** (Precio a marzo 17 del 2010)

DENOMINACION		Diametro	Longitud	Espesor	Perimetro	Volumen	Densidad	Peso
CASCO					(m)	(m ³)	(kg/m ³)	(kg)
	plg	12,00	57,00	0,59	0,96	0,02	7861,00	163,47
	mm	304,80	1447,80	15,00				
	m	0,30	1,45	0,015				
PRECIO PLANCHA A-515 =		Cantidad X Peso X US\$/kg						
PRECIO PLANCHA A-515 =		\$ 219,05						

5.1.2 PLANCHA DE ACERO PARA EXTENSIÓN PARA CABEZA DEL REACTOR.

Material Utilizado: A-515 Grado 70

Dimensiones: Ø12 x 5 plg.

Espesor: 15 mm.

Cantidad: 2

Densidad: 7861 kg/m³.

Peso A-515 = volumen x densidad acero

Costo Plancha A-515 Grd. 70: **\$1,34 US/kg** (Precio a marzo 17 del 2010).

DENOMINACION		Diametro	Longitud	Espesor	Perimetro	Volumen	Densidad	Peso
Extensión Cabeza					(m)	(m ³)	(kg/m ³)	(kg)
	plg	12,00	5,00	0,59	0,96	0,0018	7861,00	14,34
	mm	304,80	127,00	15,00				
	m	0,30	0,13	0,015				
PRECIO PLANCHA A-515 =		Cantidad X Peso X US\$/kg						
PRECIO PLANCHA A-515 =		\$ 38,43						

5.1.3 PLANCHA DE ACERO PARA TANQUE PORTA CATALIZADOR.

Material Utilizado: A-515 Grado 70

Dimensiones: Ø11,5 x 13 plg.

Espesor: ¼ plg.

Cantidad: 3

Densidad: 7861 kg/m³.

Peso A-515 = volumen x densidad acero

Costo Plancha A-515 Grd. 70: **\$1,34 USD/kg** (Precio a marzo 17 del 2010)

DENOMINACION		Diametro	Longitud	Espesor	Perimetro	Volumen	Densidad	Peso
Tanque Porta catalizador					(m)	(m ³)	(kg/m ³)	(kg)
	plg	11,50	13,00	0,25	0,92	0,0019	7861,00	15,13
	mm	292,10	330,20	6,35				
m	0,29	0,33	0,006					
PRECIO PLANCHA A-515 =		Cantidad X Peso X US\$/kg						
PRECIO PLANCHA A-515 =		\$ 60,80						

5.1.4 PLANCHA DE ACERO PARA TAPA INTERNA PERFORADA.

Material Utilizado: A-515 Grado 70

Dimensiones: Ø11,5 x ¼ plg.

Dimensiones brutas: 12 x 12 plg

Espesor: ¼ plg.

Cantidad: 3

Densidad: 7861 kg/m³.

Peso A-515 = volumen x densidad acero

Costo Plancha A-515 Grd. 70: **\$1,34 USD/kg** (Precio a marzo 17 del 2010).

DENOMINACION		Ancho	Longitud	Espesor	Volumen	Densidad	Peso
Tapa Interna Perforada					(m ³)	(kg/m ³)	(kg)
	plg	12,00	12,00	0,25	0,00059	7861,00	4,64
	mm	304,80	304,80	6,35			
m	0,30	0,30	0,006				
PRECIO PLANCHA A-515 =		Cantidad X Peso X US\$/kg					
PRECIO PLANCHA A-515 =		\$ 18,64					

5.1.5 PLANCHA DE ACERO PARA TAPA INFERIOR TANQUE PORTA CATALIZADOR.

Material Utilizado: A-515 Grado 70

Dimensiones: Ø11.25 x ¼ plg.

Dimensiones brutas: 11,5 x 11,5 plg

Espesor: ¼ plg.

Cantidad: 3

Densidad: 7861 kg/m³.

Peso A-515 = volumen x densidad acero

Costo Plancha A-515 Grd. 70: **\$1,34 USD/kg** (Precio a marzo 17 del 2010).

DENOMINACION	Ancho	Longitud	Espesor	Volumen	Densidad	Peso
Tapa Inferior Tanque porta catalizador				(m ³)	(kg/m ³)	(kg)
	plg	11,50	11,50	0,00054	7861,00	4,26
	mm	292,10	292,10			
m	0,29	0,29	0,006			
PRECIO PLANCHA A-515 =		Cantidad X Peso X US\$/kg				
PRECIO PLANCHA A-515 =		\$ 17,12				

5.1.6 PLANCHA DE ACERO PARA DOSIFICADOR INTERNO.

Material Utilizado: A-515 Grado 70

Dimensiones: Ø11,5 x ¼ plg.

Dimensiones brutas: 12 x 12 plg

Espesor: ¼ plg.

Cantidad: 3

Densidad: 7861 kg/m³.

Peso A-515 = volumen x densidad acero

Costo Plancha A-515 Grd. 70: **\$1,34 USD/kg** (Precio a marzo 17 del 2010).

DENOMINACION	Ancho	Longitud	Espesor	Volumen	Densidad	Peso
Dosificador Interno				(m ³)	(kg/m ³)	(kg)
	plg	12,00	12,00	0,00059	7861,00	4,64
	mm	304,80	304,80			
m	0,30	0,30				
PRECIO PLANCHA A-515 =		Cantidad X Peso X US\$/kg				
PRECIO PLANCHA A-515 =		\$ 18,64				

5.1.7 PLANCHA DE ACERO PARA DOSIFICADOR PRINCIPAL.

Material Utilizado: A-515 Grado 70

Dimensiones brutas: 12,5 x 12,5 plg

Espesor: ¼ plg.

Cantidad: 3

Densidad: 7861 kg/m³.

Peso A-515 = volumen x densidad acero

Costo Plancha A-515 Grd. 70: **\$1,34 USD/kg** (Precio a marzo 17 del 2010).

DENOMINACION	Ancho	Longitud	Espesor	Volumen	Densidad	Peso
Dosificador Interno Principal				(m ³)	(kg/m ³)	(kg)
	plg	12,50	12,50	0,00064	7861,00	5,03
	mm	317,50	317,50			
m	0,32	0,32				
PRECIO PLANCHA A-515 =		Cantidad X Peso X US\$/kg				
PRECIO PLANCHA A-515 =		\$ 20,23				

5.1.8 PLANCHA DE ACERO PARA SEPARADOR DE TANQUE PORTA CATALIZADOR.

Material Utilizado: A-515 Grado 70

Dimensiones brutas: 1,5 x 44 plg

Espesor: 3/8 plg.

Cantidad: 3

Densidad: 7861 kg/m³.

Peso A-515 = volumen x densidad acero

Costo Plancha A-515 Grd. 70: **1,34 US\$/kg** (Precio a marzo 17 del 2010).

DENOMINACION	Ancho	Longitud	Espesor	Volumen	Densidad	Peso
SEPARADOR TANQUE PORTA CATALIZADOR				(m ³)	(kg/m ³)	(kg)
	plg	1,50	44,00	0,00041	7861,00	3,19
	mm	38,10	1117,60			
	m	0,04	1,12				0,010
PRECIO PLANCHA A-515 =		Cantidad X Peso X US\$/kg				
PRECIO PLANCHA A-515 =		\$ 12,82				

Del material sobrante de los separadores se fabricaran los 3 soportes bases.

5.1.9 BARRA DE ACERO PARA NEPLO DE FLAUTA.

Material Utilizado: SA-105

Dimensiones brutas: Ø 2,25 x 2,25 plg

Cantidad: 6

Densidad: 7861 kg/m³.

Peso SA-105= volumen x densidad acero

Costo Plancha A-515 Grd. 70: **1,45 US\$/kg** (Precio a marzo 17 del 2010)

DENOMINACION	Diámetro	Longitud	Volumen	Densidad	Peso	
NEPLO PARA FLAUTA			(m ³)	(kg/m ³)	(kg)	
	plg	2,25	2,25	0,00015	7861,00	1,15
	mm	57,15	57,15			
	m	0,06	0,06			
PRECIO PLANCHA A-515 =		Cantidad X Peso X US\$/kg				
PRECIO PLANCHA A-515 =		\$ 10,03				

5.1.10 BARRA DE ACERO PARA NEPLO DE FLAUTA.

Material Utilizado: SA-105

Dimensiones brutas: Ø 2 x 3 plg.

Cantidad: 6

Densidad: 7861 kg/m³.

Peso SA-105= volumen x densidad acero

Costo Plancha A-515 Grd. 70: **1,45 US\$/kg** (Precio a marzo 17 del 2010).

DENOMINACION		Diámetro	Longitud	Volumen	Densidad	Peso
FLAUTA DISTRIBUIDORA				(m ³)	(kg/m ³)	(kg)
	plg	2,25	3,00	0,00020	7861,00	1,54
	mm	57,15	76,20			
m	0,06	0,08				
PRECIO PLANCHA A-515 =		Cantidad X Peso X US\$/kg				
PRECIO PLANCHA A-515 =		\$ 13,37				

5.1.11 COSTO TOTAL MATERIA PRIMA DEL REACTOR.

COSTOS MATERIA PRIMA		
DENOMINACION	MATERIAL	PRECIO
Casco	A-515 Grd.70	\$ 219,05
Extensión Cabeza		\$ 38,43
Tanque Porta catalizador		\$ 60,80
Tapa Interna Perforada		\$ 18,64
Tapa Inferior Tanque porta catalizador		\$ 17,12
Dosificador Interno		\$ 18,64
Dosificador Interno Principal		\$ 20,23
Separador tanque Porta Catalizador		\$ 12,82
Neplo Para Flauta		SA-105	$ 10,03
Flauta distribuidora	\$ 13,37	
TOTAL MATERIA PRIMA		\$ 429,13

5.2 COSTO DISPOSITIVO, ACCESORIOS Y ELEMENTOS NORMALIZADOS PARA EL REACTOR.

DISPOSITIVOS, ACCESORIOS Y ELEMENTOS NORMALIZADOS PARA EL REACTOR			
ELEMENTOS/ACCESORIOS	CANT.	PRECIO U.	SUB. TOTAL
Esparrago completo (tuercas y arandelas) 3/4 -10 UNC x 8 3/4 grado 7	20	4	\$ 80,00
Esparrago completo (tuercas y arandelas) 3/8-16 UNC x5 1/4 grado 7	20	2,5	\$ 50,00
Perno allen 1/4-28 UNFx1/2	36	0,5	\$ 18,00
Manometro Wyka 800 PSI (1/4 NPT)	1	150	\$ 150,00
Empaques Espirometalicos clase 600 d= 12 plg.	2	35	\$ 70,00
Empaques Espirometalicos clase 600 d= 4 plg.	2	20	\$ 40,00
Brida Slipon clase 900 ANSI B 16.5 d= 12 plg	4	250	\$ 1.000,00
Brida Slipon clase 900 ANSI B 16.5 d= 4 plg	4	90	\$ 360,00
Costo CAP Toriesferica d= 12 plg ASME brida clase 900 (cabeza reactor)	2	400	\$ 800,00
		Total sin IVA	\$ 2.568,00
		IVA 12%	\$ 308,16
		TOTAL	\$ 2.876,16

5.3 SUELDA.

5.3.1 COSTOS SUELDA E 7018.

Precio: 50 US\$/kg

ELECTRODO	Corriente, A				
	150	200	250	300	400
E 6010; E 7014	1,50	1,80	2,25	2,92	4,05
E 6011; E 6012; E 6013	1,12	1,50	2,02	2,47	3,37
E 7018	1,57	2,02	2,70	3,15	4,50
E 7024	1,57	2,25	2,92	3,60	4,95
E 7028	1,57	2,47	3,37	4,27	6,30
VELOCIDAD					

En el Anexo XXVI, se indican las propiedades de los electrodos.

5.3.2 NOMENCLATURA PARA CÁLCULO DE SUELDA.

n = Numero de soldadores

D = Velocidad de deposición

E = Costo de la energía eléctrica

U = Tensión de trabajo utilizada

I = Intensidad de corriente utilizada

M = Costo del material de aporte

C = Costo de la mano de obra directa

A = Costos indirectos

B = Factor operativo utilizado

J = Eficiencia de deposición

L = Longitud total a soldar

d = Densidad del material

5.3.2.1 FÓRMULAS UTILIZADAS PARA EL COSTO DE SOLDADURA.

1. Costo energía x kg. de metal depositado = $\frac{(E*U*I)}{(1000*D)}$ [Ec.5.1]
2. Costo electrodo x kg. de metal depositado = M * J [Ec. 5.2]
3. Costo MO x kg. de metal depositado = $\frac{C}{(D*B)}$ [Ec. 5.3]
4. Costo x kg. de metal depositado = [Ec5.1 + Ec. 5.2 + Ec. 5.3] [Ec. 5.4]
5. Peso material aportado x metro de junta =
Área sección suelda * densidad [Ec. 5.5]
6. Costo por metro de junta = [Ec. 5.4 * Ec.5.5]
7. Peso total material a aportar = [Ec. 5.5 * longitud de suelda]
8. Peso electrodos a comprar =
Peso total material a aportar * Eficiencia de deposición.
9. Costo total suelda = $\frac{\text{Costo x kg.de metal depositado}}{\text{Peso total material a aportar}}$

5.3.2.2 LONGITUD LINEAL PROMEDIO SUELDA.

SUELDA DE ELEMENTOS	longitud (m)	N.- pasadas	Longitud Acumulado (m)
Casco	1,45	1	1,71
Extensión Cabeza	0,13	2	
Tanque Porta catalizador	0,33	3	10,35
Tapa Interna Perforada (perímetro)	0,92	3	
Tapa Inferior Tanque (perímetro)	0,92	3	
Dosificador Interno (perímetro)	0,92	3	
Neplo Para Flauta (perímetro)	0,18	6	
Suelda casco brida (perímetro)	0,96	2	6,4
Suelda Brida cabeza (perímetro)	0,96	2	
suelda extension cabeza (perímetro)	0,96	4	
Suelda entrada crudo cabeza (perímetro)	0,32	2	
		TOTAL	18,46

5.3.2.3 COSTO SOLDADURA POR CONJUNTOS.

SOLDADURA CASCO Y EXTENSION			
n	Numero de soldadores	1	
D	Velocidad de deposición	1,57	kg/hr
E	Costo de la energía eléctrica	0,09	\$/kw h
U	Tensión de trabajo utilizada	120	v
I	Intensidad de corriente utilizada	150	A
M	Costo del material de aporte	50	\$/kg
C	Costo de la m/o directa	2,13	\$/hr
A	Costos indirectos	0	\$/hr
B	Factor operativo utilizado	30%	%
J	Eficiencia de deposición	65%	%
L	Longitud total a soldar	1,71	m
d	Densidad del material	7200	Kg/m ³

AREA SECCION DE SUELDA			
A=	266,08	mm ²	0,000266083
e =	15	mm	
e ₁ =	3,175	mm	1/8
b =	3,175	mm	1/8
a =	60	grad	

Tipo Sección Suelda

$$\text{Area sección suelda} = \left(e * b \right) + 2 \left(\frac{e - e_1}{2} * \left(\frac{e - e_1}{2} * \frac{1}{\tan \alpha} \right) \right)$$

Costo energía x kg. de metal depositado	1,03	\$/kg
Costo electrodo x kg. de metal depositado	32,5	\$/kg
Costo m/o x kg. de metal depositado	4,52	\$/kg
Costo x kg. de metal depositado	38,05	\$/kg
Peso material aportado x metro de junta= (Area x	1,92	kg/m
Costo x metro de junta	72,90	\$/m
Peso total de material a aportar	3,28	kg
Peso de electrodos a comprar	5,04	kg
COSTO SOLDADURA CASCO Y EXTENSION	124,7	US\$

SOLDADURA BRIDAS CON CASCO Y CABEZAL			
n	Numero de soldadores	1	
D	Velocidad de deposición	1,57	kg/hr
E	Costo de la energía eléctrica	0,09	\$/kw h
U	Tensión de trabajo utilizada	120	v
I	Intensidad de corriente utilizada	150	A
M	Costo del material de aporte	50	\$/kg
C	Costo de la m/o directa	2,13	\$/hr
A	Costos indirectos	0	\$/hr
B	Factor operativo utilizado	30%	%
J	Eficiencia de deposición	65%	%
L	Longitud total a soldar	6,4	m
d	Densidad del material	7200	Kg/m ³

AREA SECCION DE SUELDA			
Area Sección	80,65	mm ²	0,000080645
e1 =	6,35	mm	1/4
e2=	6,35	mm	1/4

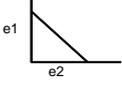
Tipo Sección Suelda

$$\text{Area} = (e1 * e2) / 2$$

Costo energía x kg. de metal depositado	1,03	\$/kg
Costo electrodo x kg. de metal depositado	32,5	\$/kg
Costo m/o x kg. de metal depositado	4,52	\$/kg
Costo x kg. de metal depositado	38,05	\$/kg
Peso material aportado x metro de junta	0,58	kg/m
Costo x metro de junta	22,10	\$/m
Peso total de material a aportar	3,72	kg
Peso de electrodos a comprar	5,72	kg
SOLDADURA BRIDA CON CASCO Y CABEZAL	141,4	US\$

SOLDADURA BRIDAS CON CASCO Y CABEZAL			
n	Numero de soldadores	1	
D	Velocidad de deposición	1,12	kg/hr
E	Costo de la energía eléctrica	0,09	\$/kw h
U	Tensión de trabajo utilizada	120	v
I	Intensidad de corriente utilizada	150	A
M	Costo del material de aporte	50	\$/kg
C	Costo de la m'o directa	2,13	\$/hr
A	Costos indirectos	0	\$/hr
B	Factor operativo utilizado	30%	%
J	Eficiencia de deposición	65%	%
L	Longitud total a soldar	10,35	m
d	Densidad del material	7200	Kg/m ³

AREA SECCION DE SUELDA				
Area Sección	80,65	mm ²	0,000080645	m ²
e1 =	6,35	mm	1/4	plg
e2 =	6,35	mm	1/4	plg



Tipo Sección Suelta
Area= (e1*e2)/2

Costo energía x kg. de metal depositado	1,45	\$/kg
Costo electrodo x kg. de metal depositado	32,5	\$/kg
Costo m/o x kg. de metal depositado	6,34	\$/kg
Costo x kg. de metal depositado	40,29	\$/kg
Peso material aportado x metro de junta	0,58	kg/m
Costo x metro de junta	23,39	\$/m
Peso total de material a aportar	6,01	kg
Peso de electrodos a comprar	9,25	kg
SOLDADURA BRIDA CON CASCO Y CABEZAL	242,1	US\$

COSTO TOTAL SOLDADURA		
COSTO SOLDADURA CASCO Y EXTESION	124,7	US\$
SOLDADURA BRIDA CON CASCO Y CABEZAL	141,4	US\$
SOLDADURA TAPAS, ACCESORIOS	242,1	US\$
TOTAL	508,2	US\$

5.4 COSTOS MECANIZADOS.

5.4.1 OXICORTE.

DESCRIPCION A CORTAR	CANT.	LONG. UNI.	LONG (m)
Longitud del casco reactor	1	4,41	4,41
Longitud cabezas reactor	2	2,16	4,32
TOTAL LONGITUD A CORTAR			8,73
PRECIO OXICORTE (e= 15mm) =		LONGITUD X US\$/m	
PRECIO OXICORTE(e = 15mm) =		\$ 55,00	
DESCRIPCION A CORTAR	CANT.	LONG. UNI.	LONG (m)
Longitud tanque porta catalizador	3	2,49	7,47
Longitud tapa interna perforada	3	0,92	2,76
Longitud Tapa Inferior tanque	3	0,92	2,76
Longitud dosificador interno	3	0,92	2,76
Longitud dosificador principal	3	1	3
Separador tanque porta catalizador	3	2,31	6,93
TOTAL LONGITUD A CORTAR			25,68
PRECIO OXICORTE (e = 1/4 plg) =		LONGITUD X US\$/m	
PRECIO OXICORTE (e = 1/4plg.) =		\$ 161,78	
PRECIO TOTAL OXICORTE		COSTO e=15mm + COSTO e=1/4 plg.	
PRECIO TOTAL OXICORTE		\$ 216,78	

5.4.2 COSTO ROLADO.

Costo rolado	= costo rolado/kg * peso del casco
Costo rolado	= \$0,35 USD/kg (incluye mano de obra e insumos)
Peso del casco	= 163,47 kg
Peso casco extensión	= 14,34 kg + 14,34 (dos piezas)
Costo Rolado Casco y Extensión	= peso (casco + extensión) * costo rolado/kg
Costo Rolado Casco y Extensión	= 192,15 kg * 0,35 \$/kg
Costo Rolado Casco y Extensión	= \$67,25 USD.

5.5 COSTO DE RADIOGRAFÍAS.

La radiografía se realiza a lo largo de todo el cordón de la suelda por la exigencia a no tener fugas, roturas y porosidades debe ser con una eficiencia de junta E=1.

Costo de la radiografía = US \$45,00/m (Incluye mano de obra e insumos)

Longitud total de suelda en el reactor: 18,46 m

Costo Total Radiografía = Costo de la radiografía * Longitud total de suelda

Costo Total Radiografía = \$ 830,70 USD.

5.6 COSTO DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS.

El precio de la prueba hidrostática son \$600 USD/m³, Para el cálculo se utiliza el volumen total del casco del reactor en donde se encuentran los tanque porta catalizadores.

$$\text{Volumen del casco} = \frac{\phi^2 * \pi}{4} * l$$

Datos	Plg.	m
Diámetro	12	0,30
Longitud	57	1,45

$$\text{Volumen del casco} = \frac{0,308^2 * \pi}{4} * 1,45$$

Volumen del casco = 0,11 m³.

Costo de prueba hidrostática = precio prueba hidrostática * volumen de reactor

Costo de prueba hidrostática = $\frac{\$600}{kg} * 0,11m^3$

Costo de prueba hidrostática = \$63,83 USD.

5.7 COSTO PINTURA.

Superficie a pintar = 2m²

Costo Preparacion superficial (Sand Blasting) = \$6 USD/m² * superficie

Costo Preparacion superficial (Sand Blasting) = \$6 USD/m² * 2 m²

Costo Sand Blasting = \$12 USD

Costo Mano de Obra = \$8 USD/m² * superficie (Incluye equipo de pintura)

Costo Mano de Obra = \$8 USD/m² * 2 m²

Costo Mano de Obra = \$16 USD

Costo Galón pintura Sigma Zinc 158 = \$ 120 USD
 Costo Total Pintura = Costo Sand Blasting + Costo Mano de Obra + Pintura Sigma Z158
 Costo Total Pintura = \$12 USD + \$16 USD + \$120 USD
Costo Total Pintura = \$ 148 USD.

5.8 COSTO CATALIZADOR.

5.8.1 CATALIZADOR NÍQUEL MOLIBDENO.

Precio catalizador = \$7,7 USD/kg
 Densidad = 800 kg/m³
 Volumen = 0,055 m³ (cama 1 + cama 3)
 Peso del catalizador = densidad * volumen = 800 kg/m³ * 0,055 m³
 Peso del catalizador = 44,36 kg.
 Costo catalizador = \$7,7 USD/kg * peso catalizador
 Costo catalizador = \$7,7 USD/kg * 44,36 kg
Costo catalizador = \$342,41 USD

5.8.2 CATALIZADOR COBALTO MOLIBDENO.

Precio catalizador = \$8 USD/kg
 Densidad = 760 kg/m³
 Volumen = 0,027 m³
 Peso del catalizador = densidad * volumen = 760 kg/m³ * 0,027 m³
 Peso del catalizador = 21 kg.
 Costo catalizador = \$8 USD/kg * peso catalizador
 Costo catalizador = \$7,7 USD/kg * 21 kg
Costo catalizador = \$168,58 USD

Costo total catalizador = Costo C. Níquel Molibdeno + Costo C. Cobalto Molibdeno.

Costo total catalizador = \$342,41 USD + \$168,58 USD

5.8.3 COSTO TOTAL CATALIZADOR.

Costo total catalizador = \$ 510,89 USD.

Nota: Los precios mencionados están establecidos por la empresa PROCATALYSE DE AXENS, mediante consulta telefónica, a la fecha diciembre del 2009, que son solo con fines académicos, debido a que las ventas se realizan directamente en el país de Francia, por lo que se debe asumir costos de importación y transporte extra al valor mencionado.

5.9 COSTO TOTAL DEL REACTOR.

DESCRIPCIÓN	PRECIO
MATERIA PRIMA TOTAL (A 515 GRADO 70 - SA 105)	\$ 429,13
DISPOSITIVOS, ACCESORIOS Y ELEMENTOS NORMALIZADOS	\$ 2.876,16
COSTO TOTAL OXICORTE (e =15, e=6,35)	\$ 216,78
COSTO TOTAL SOLDADURA (E 7018)	\$ 508,18
COSTO ROLADO	\$ 67,25
COSTO RADIOGRAFÍAS	\$ 830,00
COSTO PRUEBA HIDROSTÁTICA	\$ 63,83
COSTO PINTURA	\$ 148,00
COSTO CATALIZADORES (Co-Mo Y Ni-Mo)	\$ 510,89
SUB TOTAL CONSTRUCCIÓN	\$ 5.650,23
COSTO DE DISEÑO 30%	\$ 1.695,07
UTILIDAD 30%	\$ 1.695,07
ADMINISTRATIVOS 10%	\$ 565,02
SUB TOTAL	\$ 9.605,39
IVA 12%	\$ 1.152,65
PRECIO TOTAL VENTA	\$ 10.758,04

NOTA: El costo total no incluye montaje, obra civil, y transporte, porque no se ha establecido el lugar físico del laboratorio donde se realizará las pruebas experimentales.

CONCLUSIONES.

- En conclusión, se determinó que el óptimo diseño del reactor para realizar el hidroprocesamiento es la selección de un reactor continuo por la razón, que se obtiene una mayor distribución del fluido al interior del reactor.
- Con la segmentación de tres camas de catalizadores, permitirán acelerar la reacción para obtener la rotura de las cadenas complejas de crudo en cadenas más simple, para ello se empleo dos tipos de catalizadores Co- Mo y Ni-Mo, y la inyección de hidrógeno en cada sección de las camas de los catalizadores, actúan como enfriadores del sistema interno donde se lleva a cabo la reacción y así, se lograría eliminar impurezas como azufre, nitrógeno y oxígeno, como también mejorar la gravedad API de crudo pesado.
- Al realizar, el cálculo y diseño de las partes constitutivas se determinó que se debe cumplir parámetros de seguridad y estándares de construcción para soportar las condiciones de operación planteadas como la temperatura y la presión que afectan el comportamiento de los materiales, ya que se necesita de aceros especiales como el A-515 grado 70 y SA 105, que recomienda el código ASME para la fabricación de recipiente a presión.
- Al terminal la selección del catalizador y calcular el volumen de los catalizadores, se determinó que el flujo volumétrico es igual a $7.67 \text{ m}^3/\text{h}$ o en su equivalencia 0.57 gl/s .
- Al estudiar la bibliografía referente a la hidrogenación de crudos pesados se determinó que la relación crudo hidrogeno tiene un valor constante para que se realice la reacción química, que se encuentra comprendida en la relación de 356 partes de hidrogeno a una parte de crudo, ya que, no se puede sobresaturar o disminuir la mezcla, por la razón que no se logrará dar una reacción acorde a los resultados esperados que es lograr mejorar la gravedad API del crudo.

- Mediante, la simulación con ayuda del Software Inventor 2010, se verificó que el diseño y cálculo realizado cumplen con las condiciones de operación planteadas, por medio de la observación del factor de seguridad, la concentración de fuerzas y las deflexiones máximas y mínimas en el cuerpo del reactor prototipo a diseñar.
- Al determinar, la disponibilidad de materiales e insumos para la posible construcción del reactor con empresas nacionales e internacionales, se concluyó, que la construcción se puede desarrollar en el país, con importación de algunos elementos normalizados por el Código ASME, que por su procedencia y confiabilidad elevan los costos de fabricación.

RECOMENDACIONES.

- Es recomendable que para la construcción del reactor y sus partes internas se consideren desmontables, de tal manera que la mayor parte de sus elementos sean factibles para su limpieza y mantenimiento.
- Se recomienda, conocer el comportamiento del petróleo, los catalizadores y el hidrógeno para tener un nivel de conocimiento y seguridad industrial al momento de operar bajo los parámetros de presión y temperatura.
- Desarrollar un software de control que automatice totalmente las variables del proceso y que vele por el óptimo desempeño del reactor prototipo bajo estrictas condiciones de seguridad.
- Se recomienda tener la bibliografía suficientemente y actualizada para entender y comparar con otros métodos referentes al hidroprocesamiento.
- Para complementar al diseño del reactor prototipo se recomienda, trabajar con un grupo homogéneo de profesionales de distintas áreas y especialidades.
- Es necesario tener un conocimiento alto sobre la composición del petróleo, así como también el proceso de explotación y refinación del crudo, y la comercialización de sus derivados.
- Se recomienda realizar un balance de energía y masa basados en datos experimentales para determinar el calor y energía necesaria para llevar a cabo el proceso de hidrogenación, así como también, conocer los costos operacionales reales y capacidades para implementar en una escala comercial de producción

BIBLIOGRAFÍA.

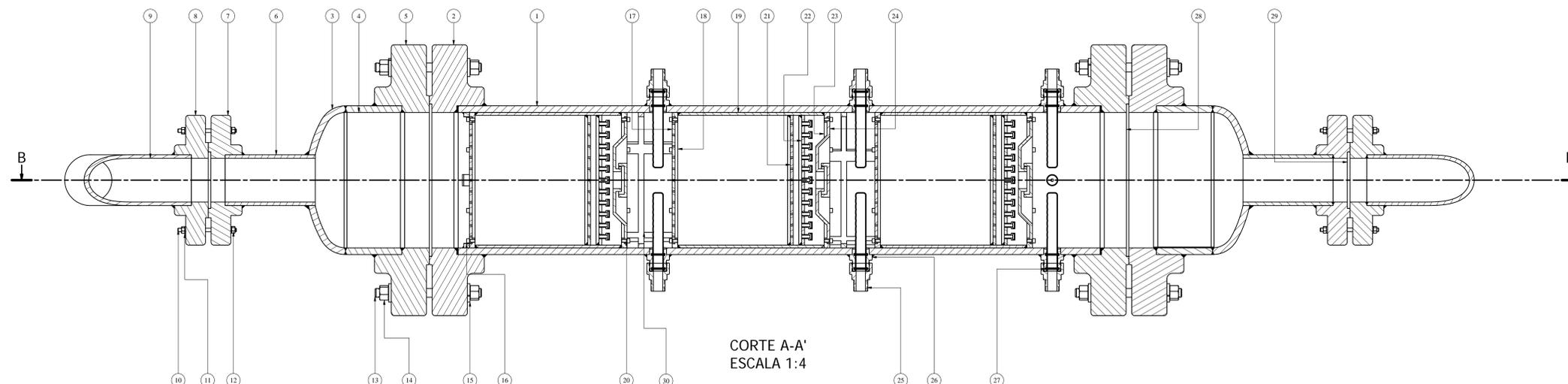
- ASTM, American Society for Testing and Materials, “*Distillation and Vapor Pressure Measurement in Petroleum Products (Manual 51)*”, Chapter Two, Jan 2008, p. 21.
- ANCHEYTA, J. y RORIGUEZ, M. A., “*Modeling of HDS, HDN, HDA in a vacuum gas oil hydrotreater*”, ENERGY FUELS 18, 789-794, 2004.
- ANCHEYTA, J., BETANCOURT, G., *Catalyst Deactivation during Hydroprocessing of heavy crude oil. II. Effect of reaction temperature during time-on-stream*, ENERGY FUELS 17, 462-467, 2003.
- ANCHEYTA, J., SPEIGHT, J., *Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua*, First Edition, CRC Press , Taylor & Francis Group, United States of America, 2007.
- ANSI, *American National Standards Institute* (Instituto Nacional Estadounidense de Estandarización).
- ASME, *American Society of Mechanical Engineers*, (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos), Sección II, Tabla 1A, 2001.
- ASME, *American Society of Mechanical Engineers*, (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos), Sección VIII, División 1, 2001.
- BERCOVICH, Saúl y otros, “*Diseño de un Reactor de Hidrogenación*”, Ponencia presentada en el Congreso de ARPEL XXIV, Buenos Aires – Argentina, Mayo y Junio de 1976.
- BIASCA, F.R, y otros, *Upgrading heavy crude and residues to transportation fuels. Technology, economics and outlook*, SFA Pacific, USA, 2003, pg. 7.
- ASME, *Comité de Calderas y Recipientes a Presión*, 2001.
- DENBIGH, K.G., TURNER, J.C.R, “*Introducción a la teoría de los reactores químicos*”. Limusa. México, 1990.
- FROMENT, G., y BISCHOFF, K., “*Chemical Reactor Analysis and Design*”, 2^{da} Edition, Editorial John Wiley and Sons, USA, 1990.
- GARY, J. and HANDWERK, G., *Petroleum Refining, Technology and Economics*, Third Edition, Marcel Dekker, New York, 1994.

- KRESSMAN, S. and other, “Recent developments in fixed bed catalytic residue upgrading”, CATALYSIS TODAY 43, 203-215, 1998.
- LEÓN, Juan, *Diseño y Cálculo de Recipientes a Presión*, INGLESA, p. 10, 2001
- LEVENSPIEL, Octane, *Ingeniería de las Reacciones Químicas*, Editorial Reverte, Mayo 2000.
- MACIAS, M.J., and ANCHEYTA, J., *Simulation of an isothermal hydro desulfurization small reactor with different catalyst particle shapes*, Catalysis Today 98, 243-250, 2004.
- MARKS; *Manual del Ingeniero Mecánico*, 3ª Edición, Colombia, Mc Graw Hill, 1996.
- MASTERTON, W, *Química General Superior*. Impresos Roef. S.A. México, 1998.
- MASTERTON, W., y otros, *Química General Superior*, McGraw Hill, México, 1993.
- MEGYESY, Eugene, *Manual de Recipientes a Presión*, Décima Edición, Editorial Limusa, México D.F., p. 15, 2009.
- MEHRA, Y., and AL-ABDULAL, A., *Hydrogen Purification in Hydroprocessing (HPHSM Technology)*, Paper presented at the 103rd NPRA Annual Meeting, San Francisco-US, March 13-15.
- MUNOZ, J., ANCHEYTA, J., and other, “Process heat integration of a heavy crude hydro treatment plant”, Catalysis Today, p.205, 2005.
- PANARITI, N, and MARCHIONNA, M., *Petroleum residue upgrading with dispersed catalysts, Catalysts activity and selectivity-Part I*, Applied Catalysis A, 204, 203-213, 2000.
- SPEIGHT, J, *The desulfurization of Heavy Oils and Residua*, 2nd Edition, Marcel Dekker, New York, 2000.
- TAKAHASHI, T., HIGASHI, H., and KAI, T., *Development of a new hydrodemetallization catalyst for deep desulfurization of atmospheric residue and the effect of reaction temperature on catalyst deactivation*, Catalysis Today, 104, p. 77-102.
- VERRUSCHI, Marisol, *Optimización de la distribución de catalizadores en hidrotratamiento de destilados medios*, Venezuela, 2008.

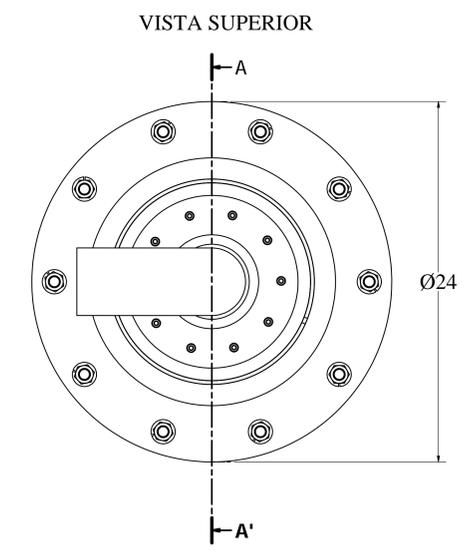
ANEXOS.

ANEXOS I

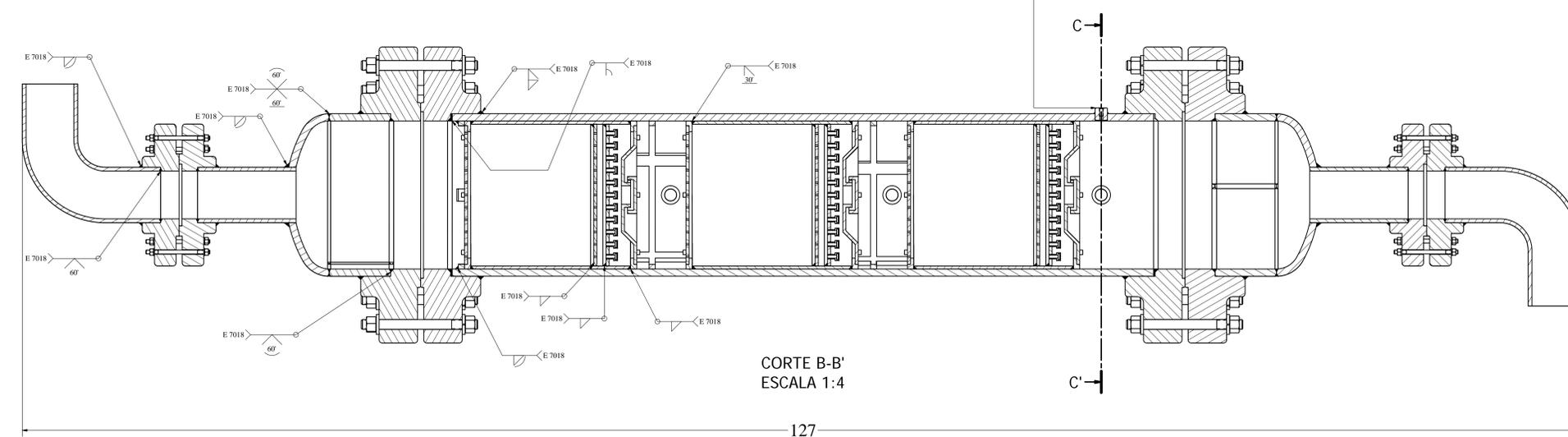
PLANOS DE CONJUNTO.



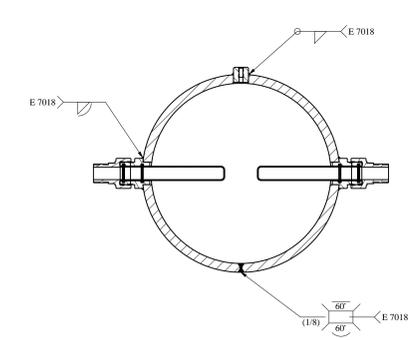
CORTE A-A'
ESCALA 1:4



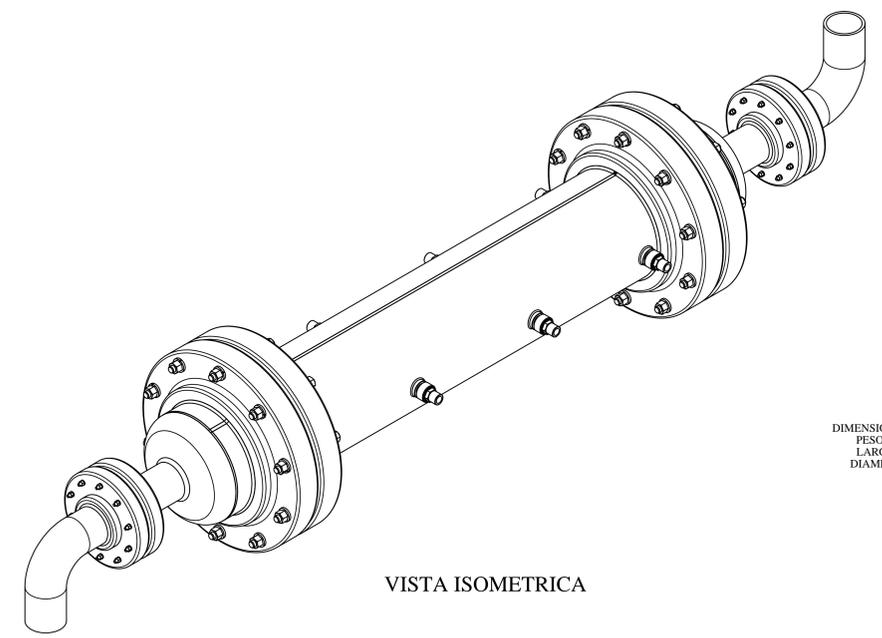
VISTA SUPERIOR



CORTE B-B'
ESCALA 1:4



CORTE C-C'
ESCALA 1:4



VISTA ISOMETRICA

DIMENSIONES BRUTAS:
PESO: 280 libm.
LARGO: 127 plg
DIAMETRO: 24 plg

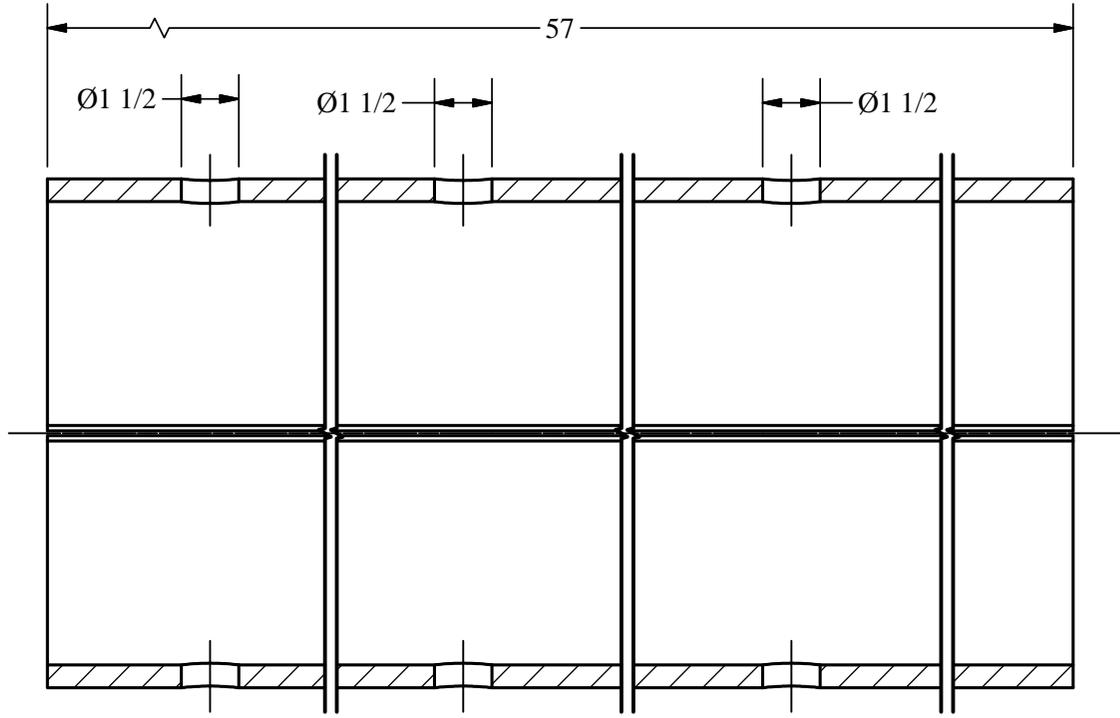
31	Nepilo Manometro	1	Ø1/4 x 1	A-315		NPT 1/4
30	Separador porta catalizador	2	Ø1/2 x 3	A-315		GRABADO 70
29	OP Ring Brida cubierta	2	10-275-025	SAE AMS 2107	SAE AS 508	
28	OP Ring Brida casco/cubierta	2	10-275-113*	SAE AMS 2107	SAE AS 508	
27	OP Ring Brida distribuidora	2	10-275-0894*	SAE AMS 2107	SAE AS 508	
26	Nepilo entrada de hidrogeno	6	Ø2 x 2	A-315		GRABADO 30
25	Placa distribuidora de hidrogeno	6	Ø1/2 x 8 x 1/4	A-315		GRABADO 70
24	Coletores de hidrogeno	2	Ø1/4 x 1/4 x 1/4	A-315		GRABADO 70
23	Brida superior porta catalizador	3	Ø1/2 x 1/2	SA-105	ANSI B 16.5	
22	Distribuidor de flujo interno	3	Ø1/4 x 1/4	A-315		GRABADO 70
21	Faja interna perforada	3	Ø1/4 x 1/4	A-315		GRABADO 70
20	Placa codo	36	1/4-3/8 UNCSA 1/2	A307SAE 1	ANSI B18.3	
19	Franje porta catalizador	3	Ø1/2 x 1/2	A-315		GRABADO 70
18	Brida inferior porta catalizador	3	Ø1/2 x 1/2	SA-105	ANSI B 16.5	
17	Faja inferior porta catalizador	3	Ø1/4 x 1/4	A-315		GRABADO 70
16	Base Topo	3	Ø1/2 x 1/2	A-315		GRABADO 70
15	Arandela	40	1/4 x 1/4	A325SAE 7	ANSI B18.3	
14	Tuerca	40	Ø1/2	A325SAE 7	ANSI B18.3	
13	Esparrago	20	1/4-10 UNCSA 3/4	A325SAE 7	ANSI B18.3	
12	Tuerca	40	5/16 x 1/8	A325SAE 7	ANSI B18.3	
11	Arandela	40	5/16	A325SAE 7	ANSI B18.3	
10	Esparrago	20	5/16-18 UNCSA 1/4	A325SAE 7	ANSI B18.3	
9	Codo	2	Ø1/4 WCPED 40	A-315	ANSI B 16.5	
8	Brida codo	2	Ø1/4 x 1/4	SA-105	ANSI B 16.5	
7	Brida subeta	2	Ø1/2 x 1/2 x 3	A-315	ANSI B 16.5	GRABADO 70
6	Tablita codo	2	Ø1/2 x 2 x 1/2-40	A-315	ANSI B16.10	GRABADO 70
5	Brida para cuberal	2	Ø2 1/4 x 7/8	SA-105	ANSI B 16.5	
4	Casco cuberal	2	Ø1/4 x 1/4 x 5	A-315		GRABADO 70
3	Cuberal	2	Ø1/4 x 1/4 x 1/4	A-315		GRABADO 70
2	Brida para Casco	2	Ø2 1/4 x 7/8	A-315	ANSI B 16.5	GRABADO 70
1	Casco	1	Ø1/2 x 2 1/2	A-315		GRABADO 70

Ref. Delineación: Mecanica
 CARRERA DE INGENIERIA MECANICA
 TITULO: REACTOR PROTOTIPO QUE SORTE CONDICIONES DE HIDROGENACION
 ESCALA: 1:4
 Código: 10-687-809-001
 I Dis: Andy A. - Chesca A. 15-03-2010
 Dis: Andy A. - Chesca A. 15-03-2010
 Rev: Ing. Fabio Obando 15-03-2010
 TOL. GRAF.: ±0.05

ANEXOS II

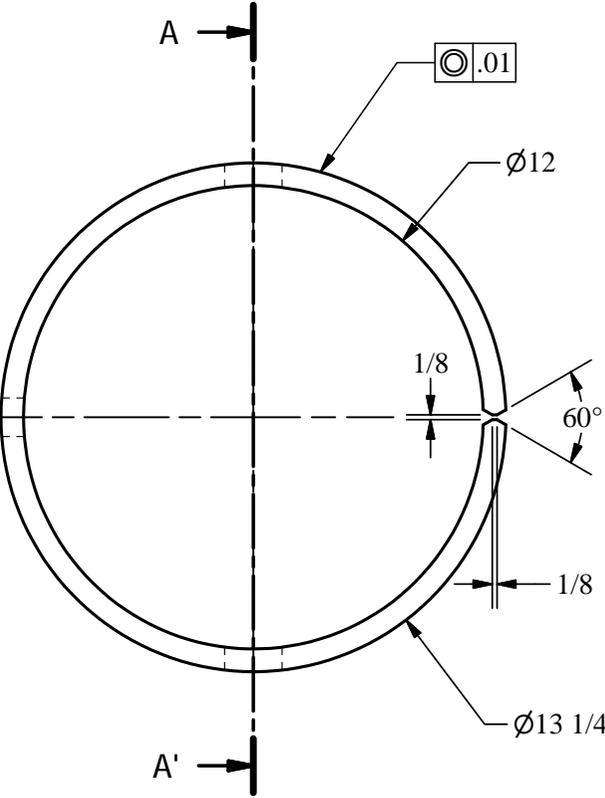
PLANOS DE DESPIECE.

N6



CORTE A-A'
ESCALA 1:5

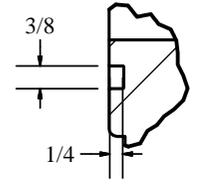
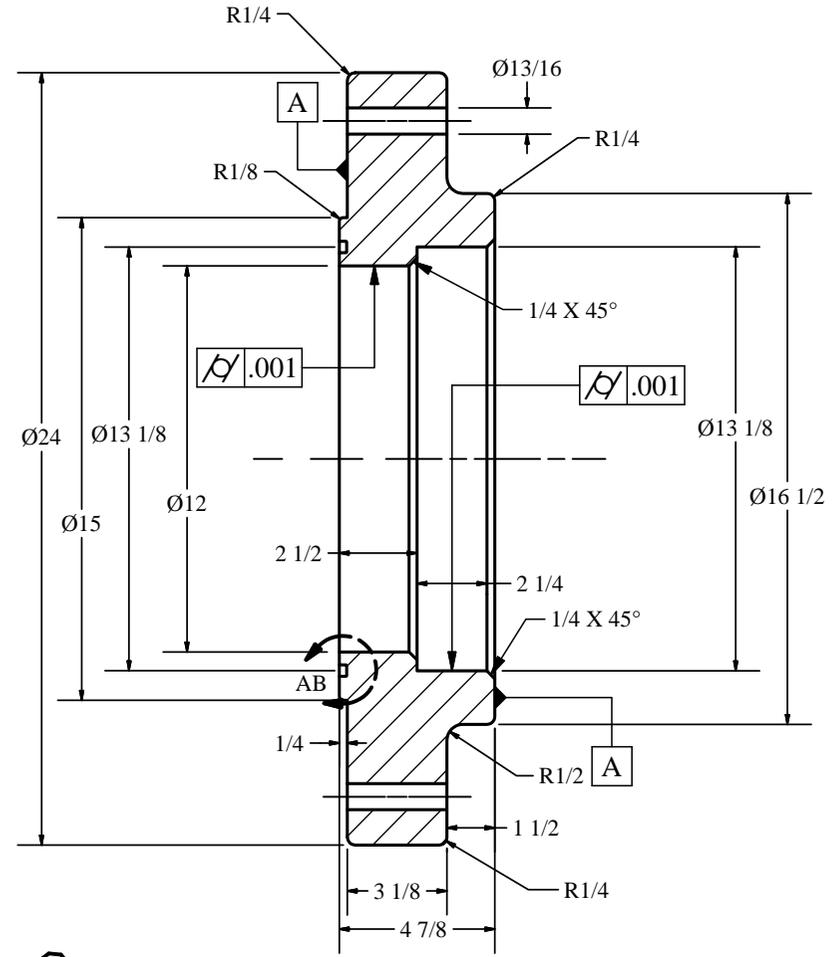
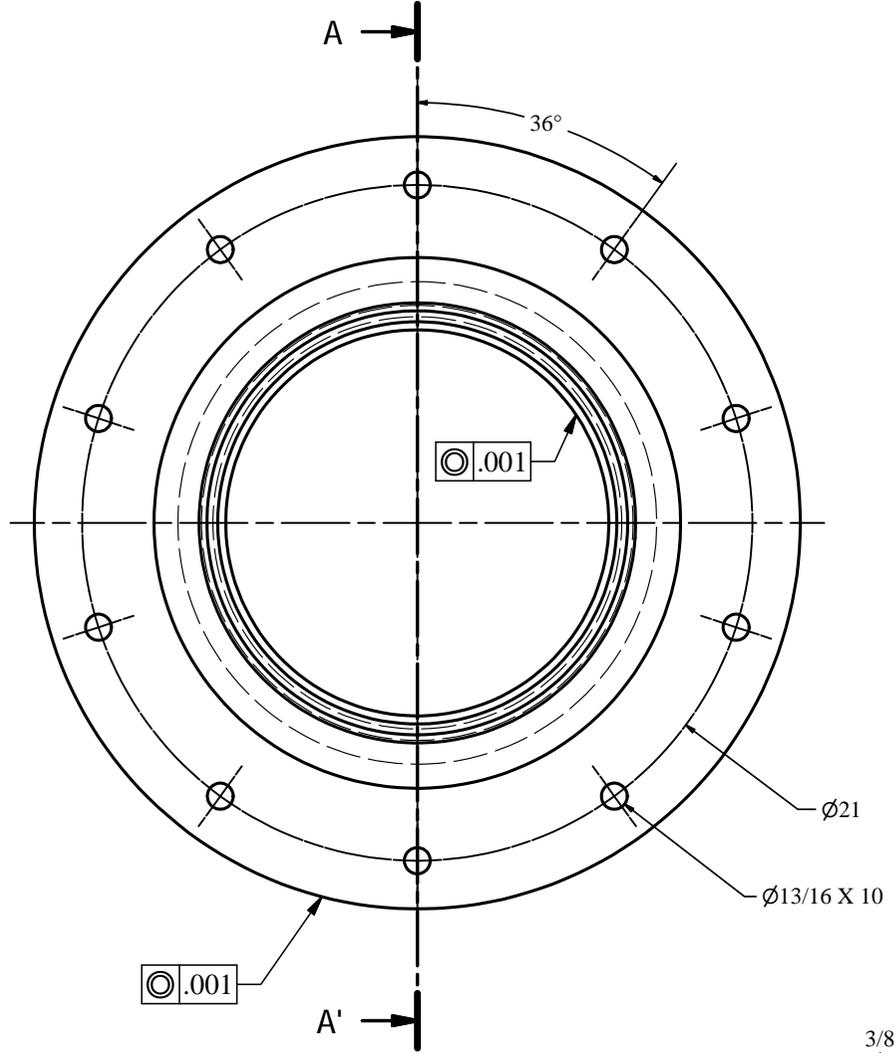
DIMENSIONES EN PULGADAS



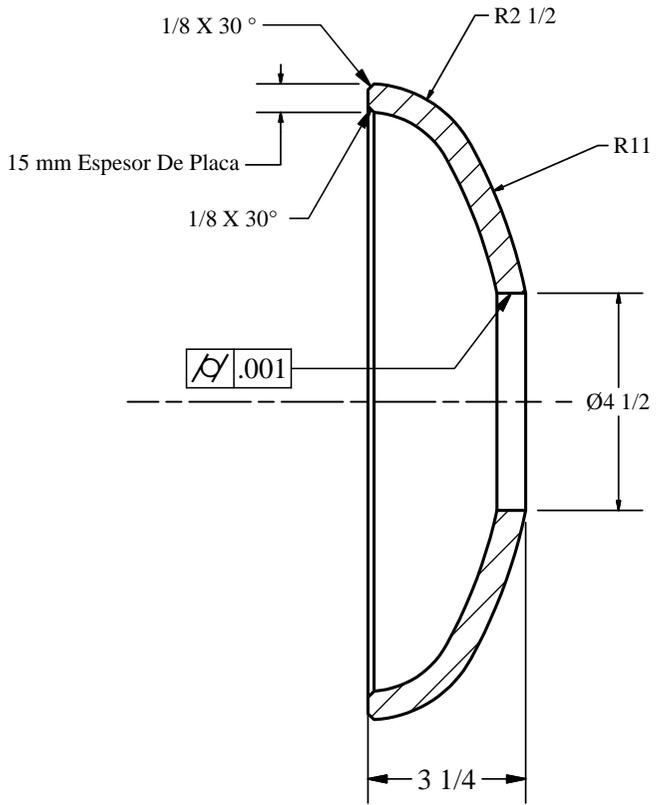
TRATAMIENTO TERMICO:		N.A.	
RECURRIMIENTO:		Pintura Sigma Zinc 158	
TITULO:		CASCO REACTOR	
CARRERA DE INGENIERIA MECANICA		ESCALA 1:5	
MATERIAL:		ACERO A515 Grado 70	
DIM. BRUTAS:		(Ø13.2 x 57) plg	
Dib:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Dis:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Rev:	Ing. Fabio Obando	15-03-2010	
Código:	10-687-809-002		TOL. GRAL. +/- 0.05

N6

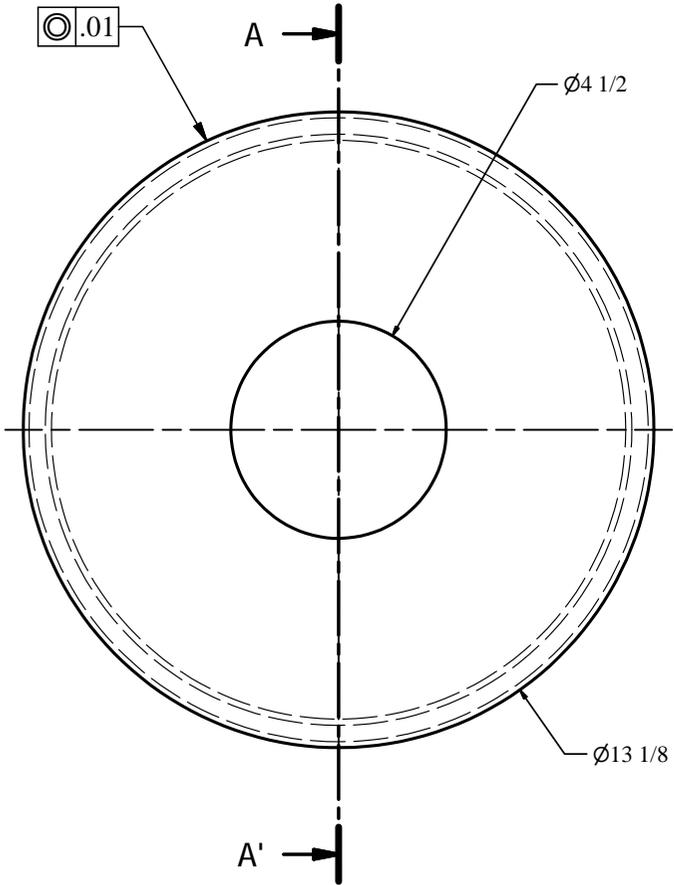
DIMENSIONES EN PULGADAS



TRATAMIENTO TERMICO:		N.A.	
RECURRIMIENTO:		Sigma Zinc 158	
TITULO:		BRIDA PARA CASCO Y CABEZAL	
CARRERA DE INGENIERIA MECANICA		UPS	
ESCALA		1:6	
Codigo:		10-687-809-003	
MATERIAL:		ACERO SA 105	
DIM. BRUTAS:		(Ø24 x 4 7/8) plg	
Dib:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Dis:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Rev:	Ing. Fabio Obando.	15-03-2010	
TOL. GRAL.:		+/- 0.05	

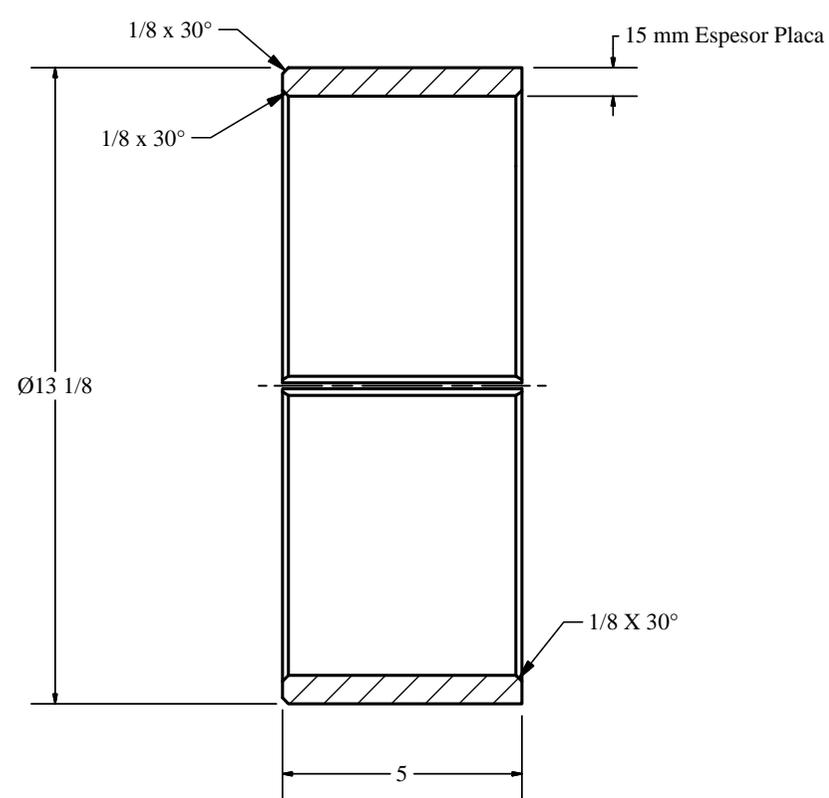
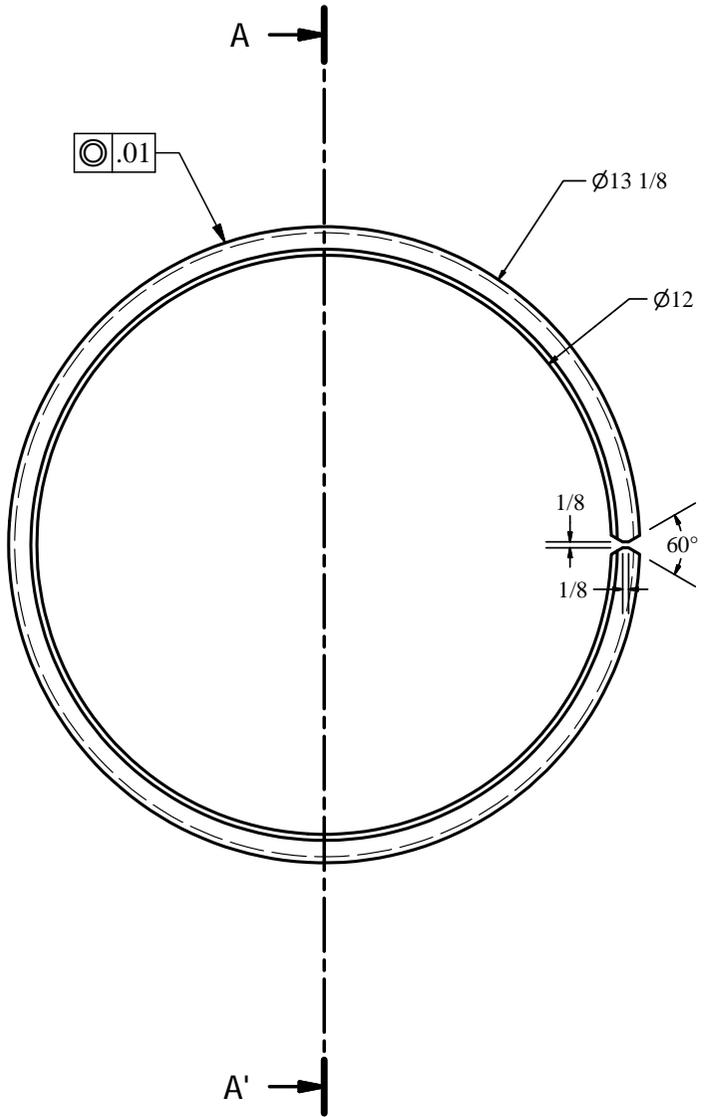


CORTE A-A'
ESCALA 1:4



TRATAMIENTO TERMICO:		N.A.	
RECURRIMIENTO:		Pintura Sigma Zinc 158	
TITULO:		CARRERA DE INGENIERIA MECANIA	
TITULO:		CABEZAL REACTOR	
ESCALA		UPS	
1:4		1:4	
Código:		10-687-809-004	
MATERIAL:		ACERO A515 Grado 70	
DIMS. BRUTAS:		(Ø13 1/8 x 3 1/4)plg	
Dis:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Rev:	Ing. Fabio Obando	15-03-2010	
Dis:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Rev:	Ing. Fabio Obando	15-03-2010	
TOL. GRAL.:	+/- 0.05		

Dimensiones en pulgadas



CORTE A-A'
ESCALA 1:4

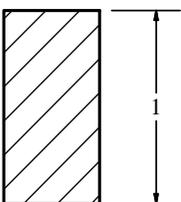
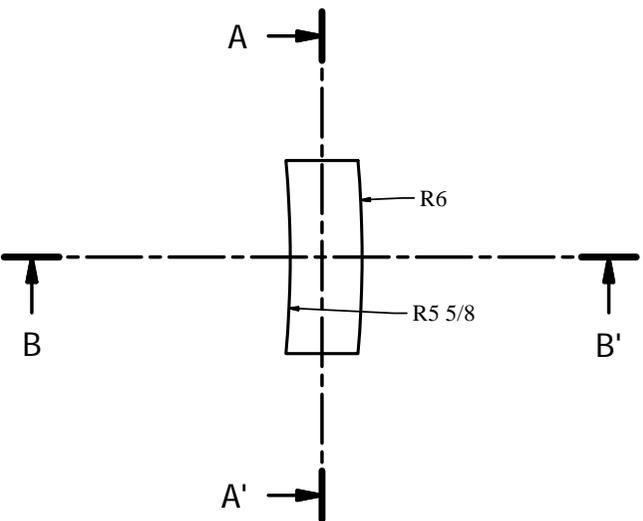
TRATAMIENTO TERMICO:		N.A.	
RECURRIMIENTO:		Pintura Sigma Zinc 158	
CARRERA DE INGENIERIA MECANICA		UPS	
TITULO:		ESCALA	
UNION CABEZAL		1:4	
MATERIAL:		ACERO A515 Grado 70	
DIMENS. BRUTAS:		$(\varnothing 13 \frac{1}{8} \times 5)$ plg	
Dib:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Dis:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Rev:	Ing. Fabio Obando	15-03-2010	
Codigo:		10-687-809-005	
TOL. GRAL.:		+/- 0.05	

N6

DIMENSIONES EN PULGADAS

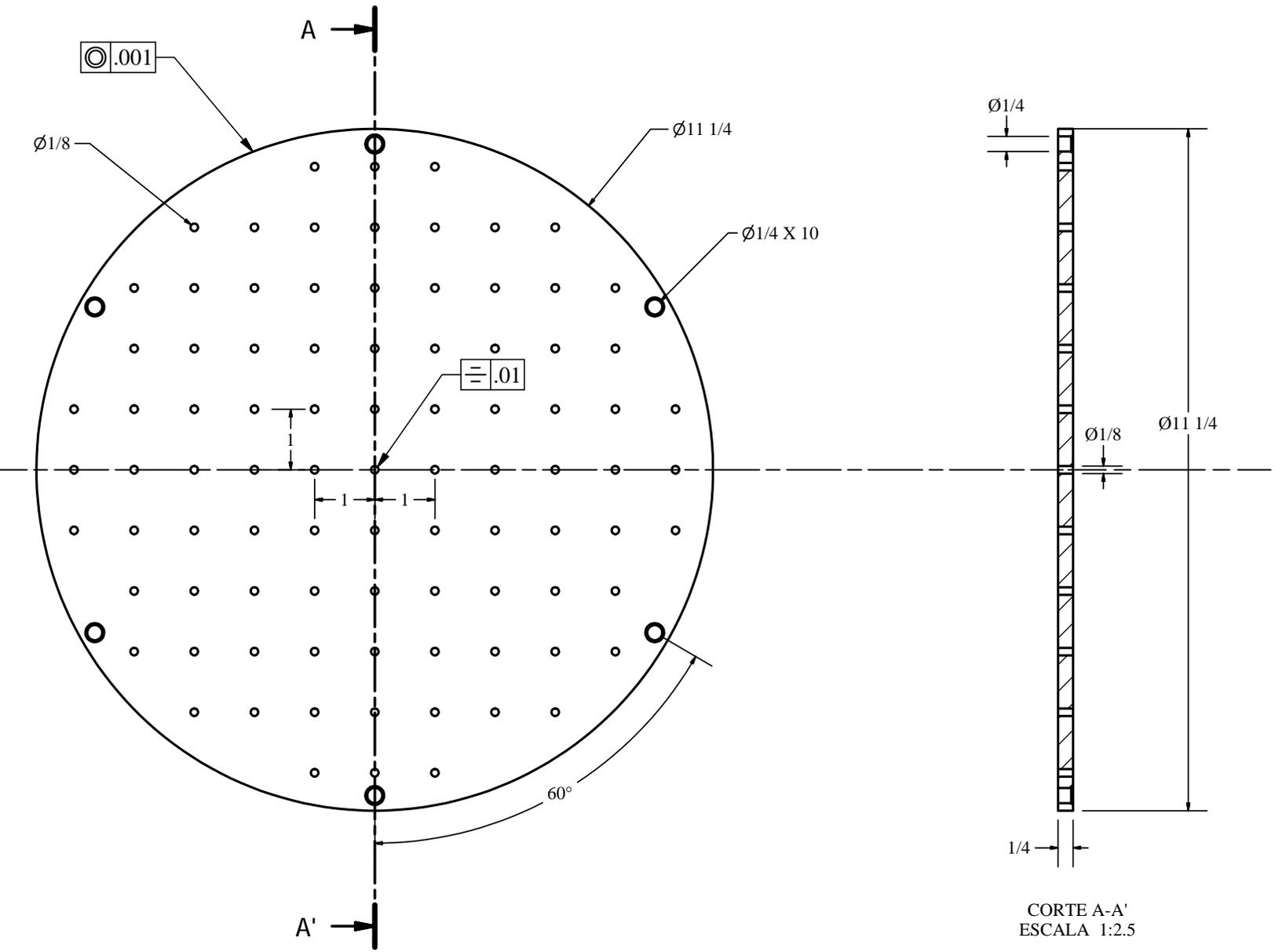


CORTE B-B'



CORTE A-A'

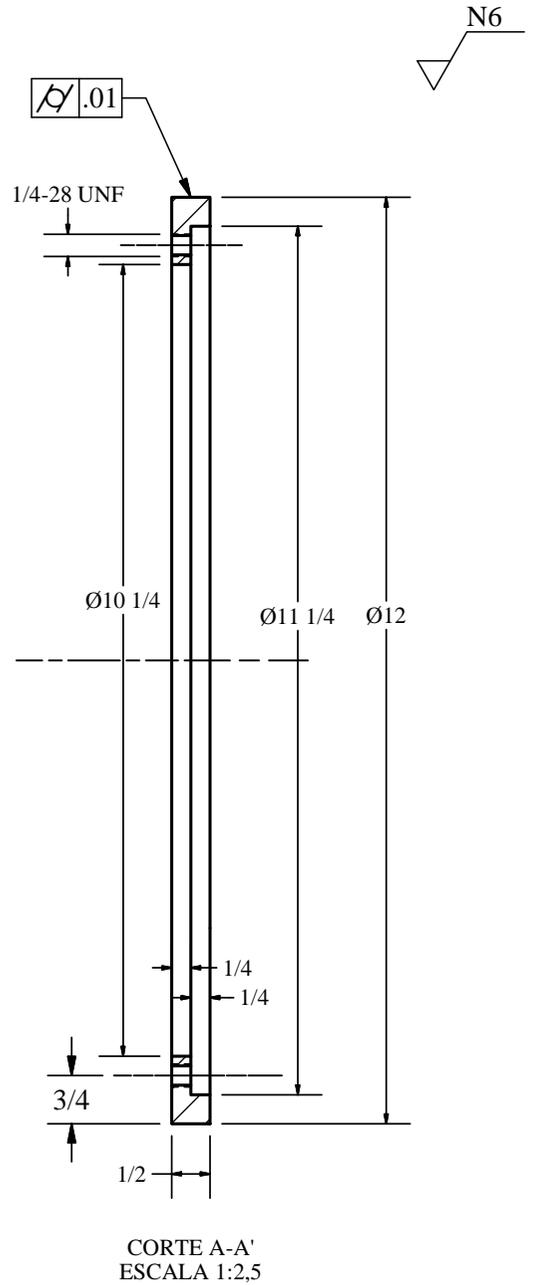
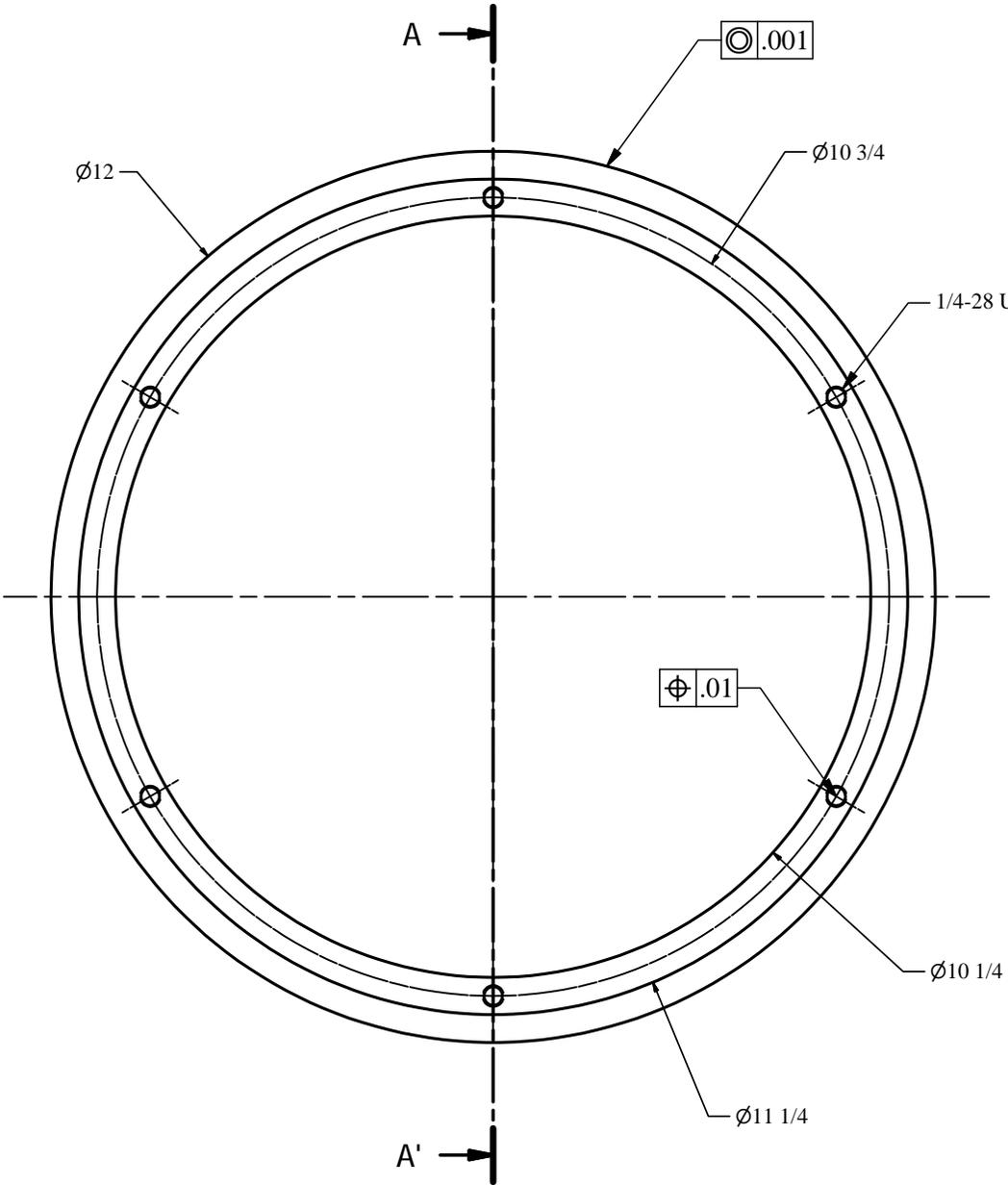
TRATAMIENTO TERMICO:		N.A.	
RECURRIMIENTO:		Pintura Sigma Zinc 158	
TITULO:		ESCALA	
CARRERA DE INGENIERIA MECANIA		UPS	
TOPE BASE PARA TANQUE PORTA CATALIZADOR		1:1	
MATERIAL:		DIMS. BRUTAS:	
ACERO A515 Grado 70		(Ø12 x 1/2)plg	
Dis:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Rev:	Ing. Fabio Obando	15-03-2010	
Código:	10.687-809-007	TOL. GRAL:	+/- 0.05



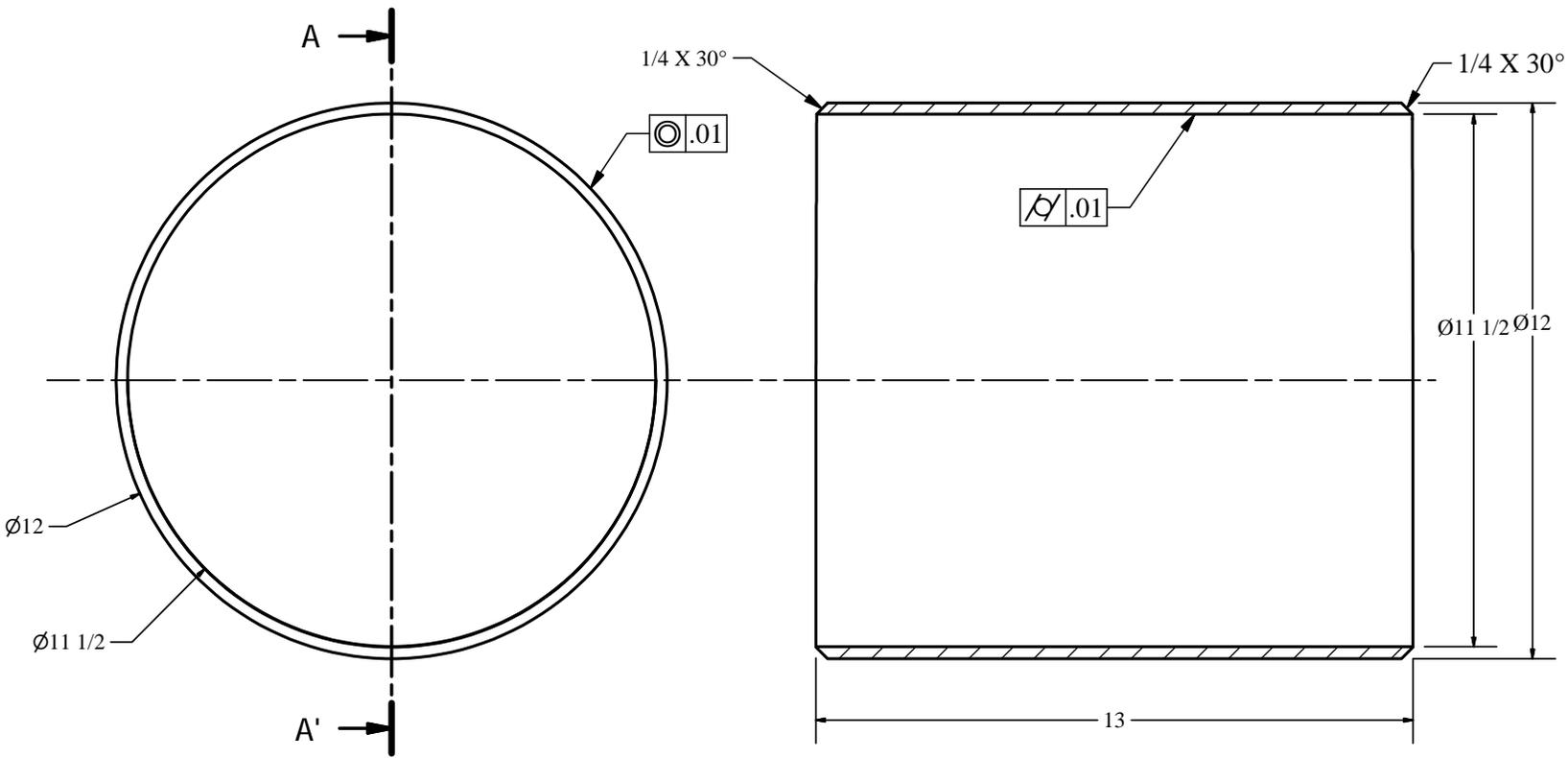
CORTE A-A'
ESCALA 1:2.5

TRATAMIENTO TERMICO:		N.A.	
RECUBRIMIENTO:		N.A.	
CARRERA DE INGENIERIA MECANICA		UPS	
TITULO:		ESCALA	
TAPA INFERIOR TANQUE PORTA CATALIZADOR		1:2.5	
MATERIAL:		DIMES. BRUTAS:	
ACERO A515 Grado 70		(Ø11 1/4 x 1/4)plg	
Dib:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Dis:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Rev:	Ing. Fabio Obando.	15-03-2010	
Codigo:		TOL. GRAL:	
10-687-809-008		+/- 0.02	

TRATAMIENTO TERMICO:		N.A.	
RECUBRIMIENTO:		N.A.	
CARRERA DE INGENIERIA MECANICA			
TITULO:		ESCALA	
BRIDA INFERIOR Y SUPERIOR TANQUE PORTA CATALIZADOR		1:2.5	
		UPS	
MATERIAL:		DIMES. BRUTAS:	
ACERO A515 Grado 70		(Ø12 x 1/2)plg	
Idb:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Dis:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Rev:	Ing. Fabio Obando	15-03-2010	
Código:	10-687-809-009		TOL. GRAL. +/- 0.02

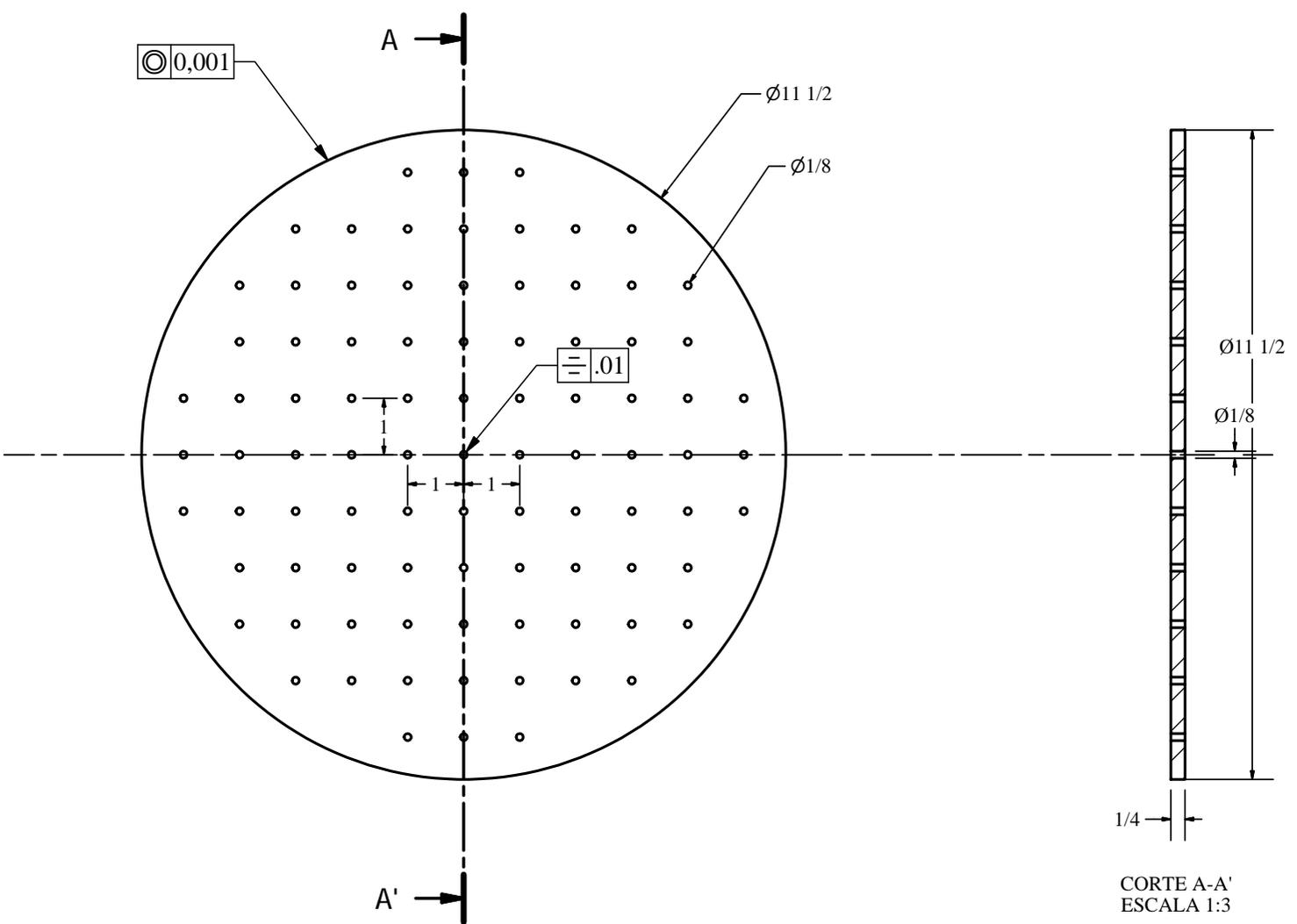


N6



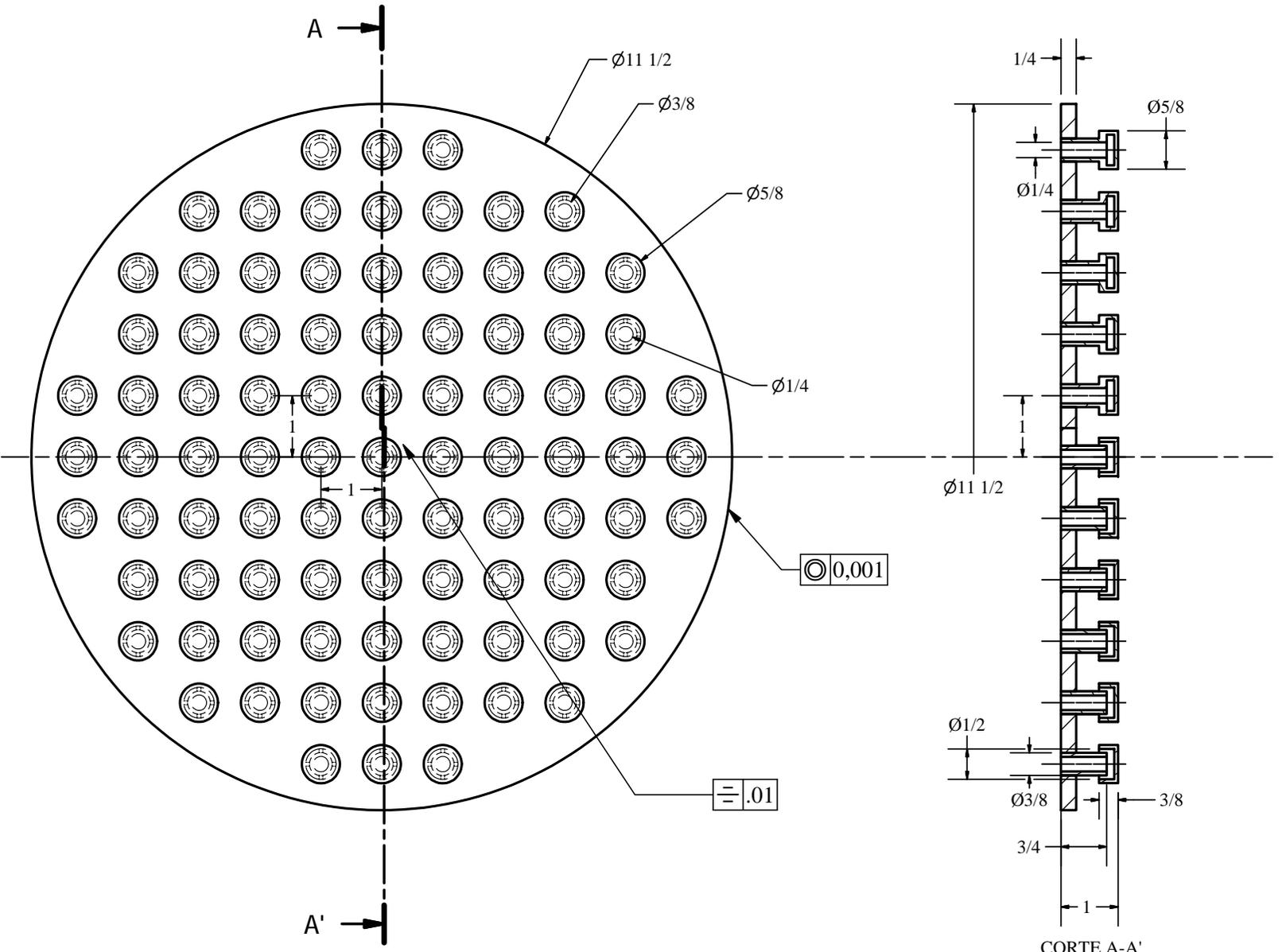
CORTE A-A'
ESCALA 1:4

TRATAMIENTO TERMICO:		N.A.	
RECURRIMIENTO:		Pintura Sigma Zinc 158	
TITULO:		TANQUE PORTA CATALIZADOR	
CARRERA DE INGENIERIA MECANIA		UPS	
ESCALA		1:4	
MATERIAL:	ACERO A515 Grado 70	DIMS. BRUTAS:	(Ø12 x 13)plg
Dib:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Dis:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Rev:	Ing. Favio Obando	15-03-2010	
Código:	10-687-809-010	TOL. GRAL:	+/- 0.02



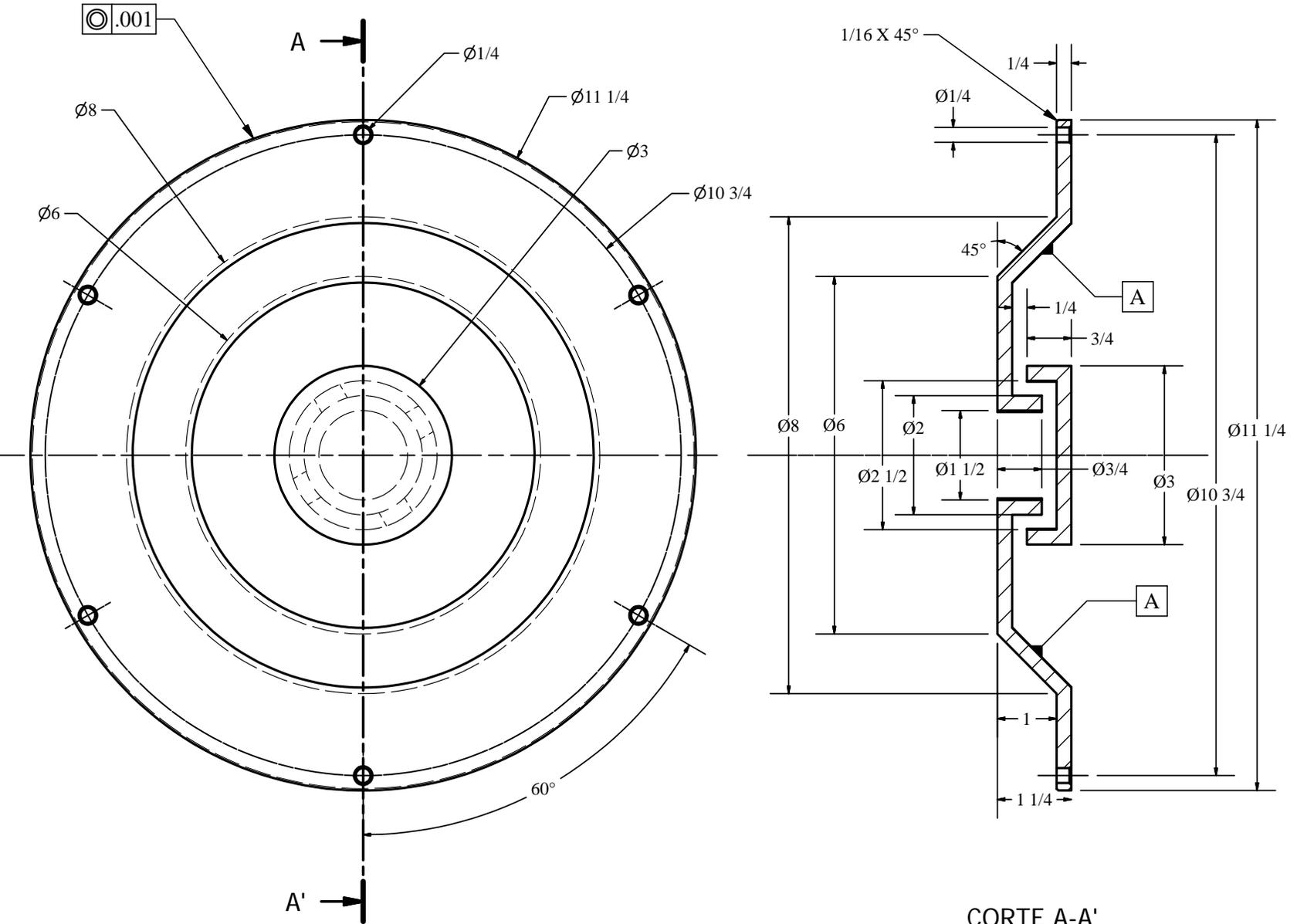
CORTE A-A'
ESCALA 1:3

TRATAMIENTO TERMICO:		N.A.	
RECURRIMIENTO:		N.A.	
TITULO:		ESCALA	
CARRERA DE INGENIERIA MECANICA		UPS	
TAPA INTERNA PERFORADA		1:3	
MATERIAL:		DIMES. BRUTAS:	
ACERO A515 Grado 70		(Ø11 1/4 x 1/4)plg	
Dib:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Dis:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Rev:	Ing. Favio Obando	15-03-2010	
Codigo:		TOL. GRAL:	
10-687-809-011		+/- 0.02	



CORTE A-A'
ESCALA 1 / 2,5

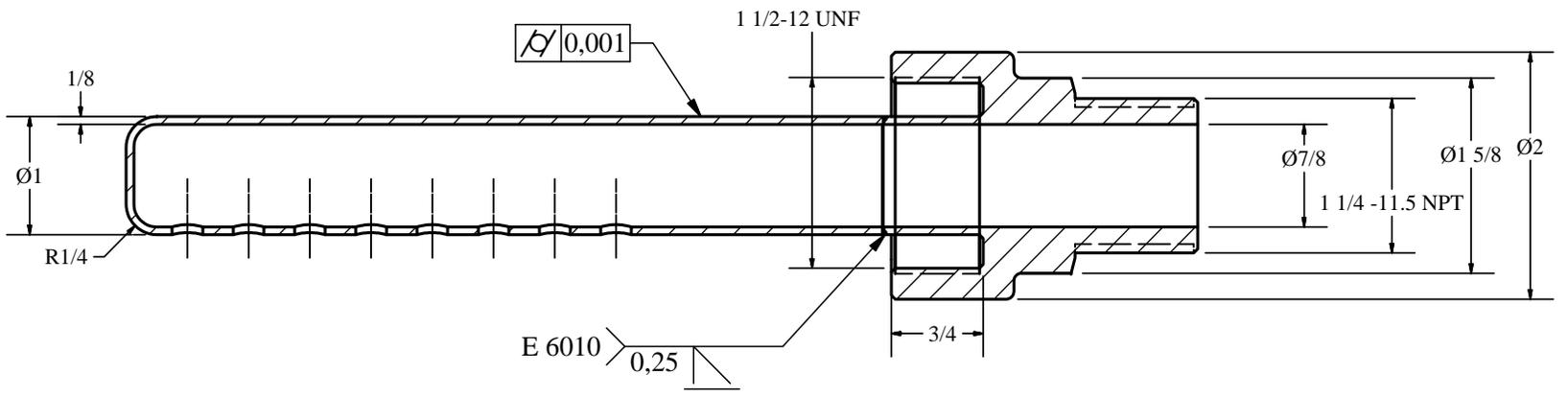
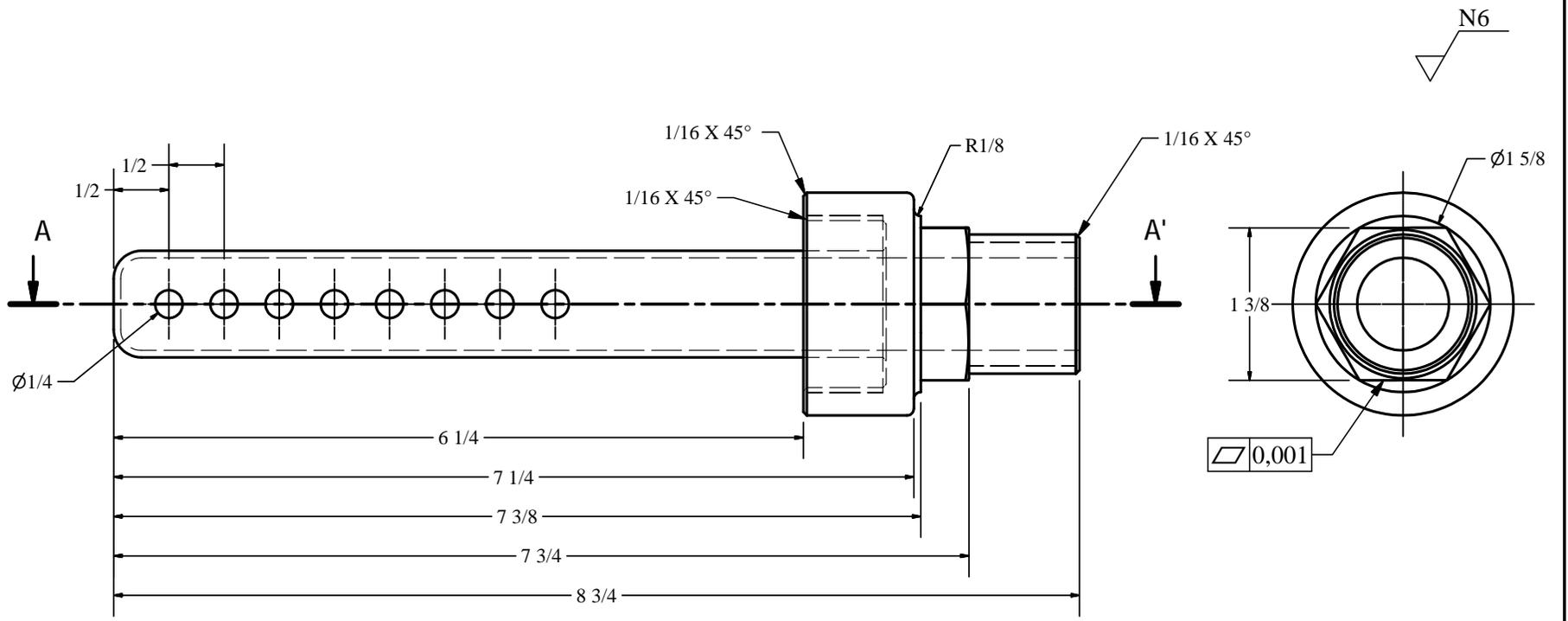
TRATAMIENTO TERMICO:		N.A.	
RECUBRIMIENTO:		N.A.	
CARRERA DE INGENIERIA MECANICA			
TITULO:		UPS	
DISTRIBUIDOR DE FLUJO INTERNO		ESCALA 1:2.5	
MATERIAL:		ACERO A515 Grado 70	
DIMES. BRUTAS:		(Ø11 1/2 x 1)plg	
Idb:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Dis:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Rev:	Ing. Fabio Obando	15-03-2010	
Código:	10-687-809-012		
TOL. GRAL.:	+/- 0.02		



CORTE A-A'
ESCALA 1:2.5

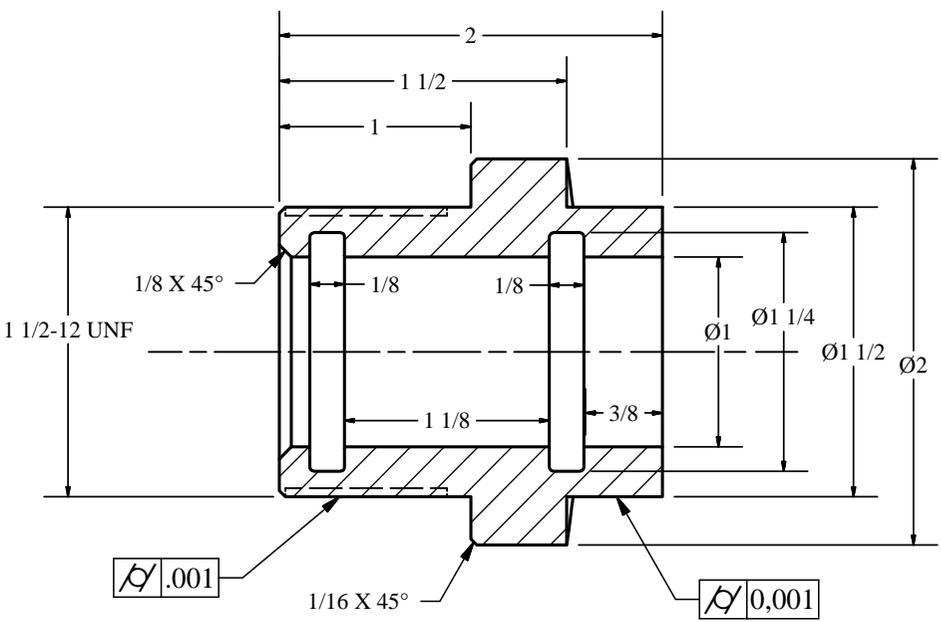
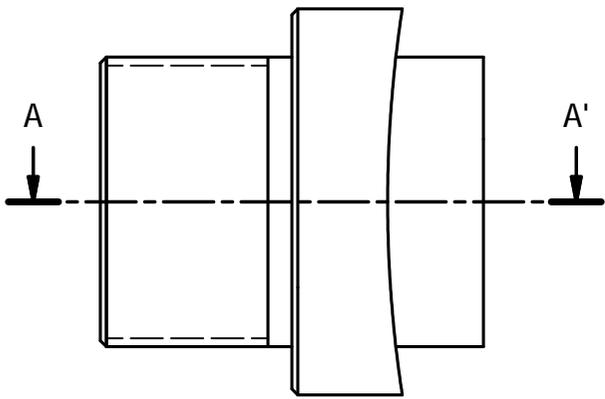
TRATAMIENTO TERMICO:		N.A.	
RECURRIMIENTO:		N.A.	
CARRERA DE INGENIERIA MECANICA			
TITULO:		ESCALA	
COLECTOR MEZCLADOR DE LIQUIDOS		1:2.5	
MATERIAL:		DIM. BRUTAS:	
ACERO A515 Grado 70		(Ø11 1/4x 1 1/4)plg	
Dib:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Dis:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Rev:	Ing. Fabio Obando	15-03-2010	
Codigo:		TOL. GRAL:	
10-687-809-013		+/- 0.02	

TRATAMIENTO TERMICO:		N.A.	
RECUBRIMIENTO:		N.A.	
CARRERA DE INGENIERIA MECANICA			
TITULO:		ESCALA	
FLAUTA DISTRIBUIDORA DE HIDROGENO		1:1.5	
Dib:		Andy A. - Checa A.	
Dis:		Andy A. - Checa A.	
Rev:		Ing. Fabio Obando	
Codigo:		15-03-2010	
10-687-809-014		TOL. GRAL: +/- 0.02	
MATERIAL:		DIM. BRUTAS:	
ACERO A515 Grado 70		(Ø2 x 8 3/4)plg	



CORTE A-A'
ESCALA 1 : 1.5

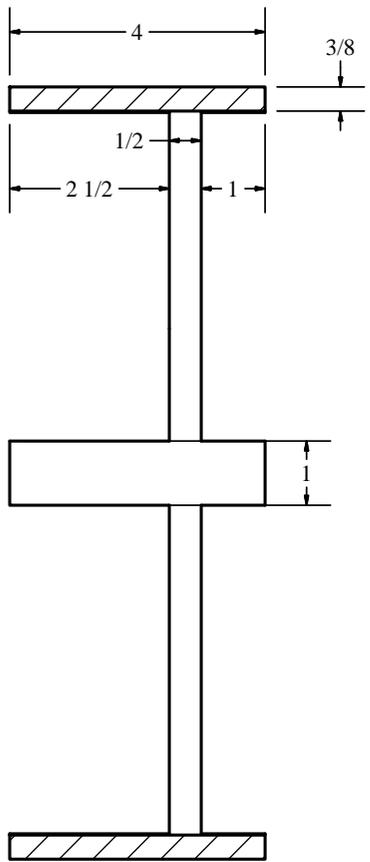
N6



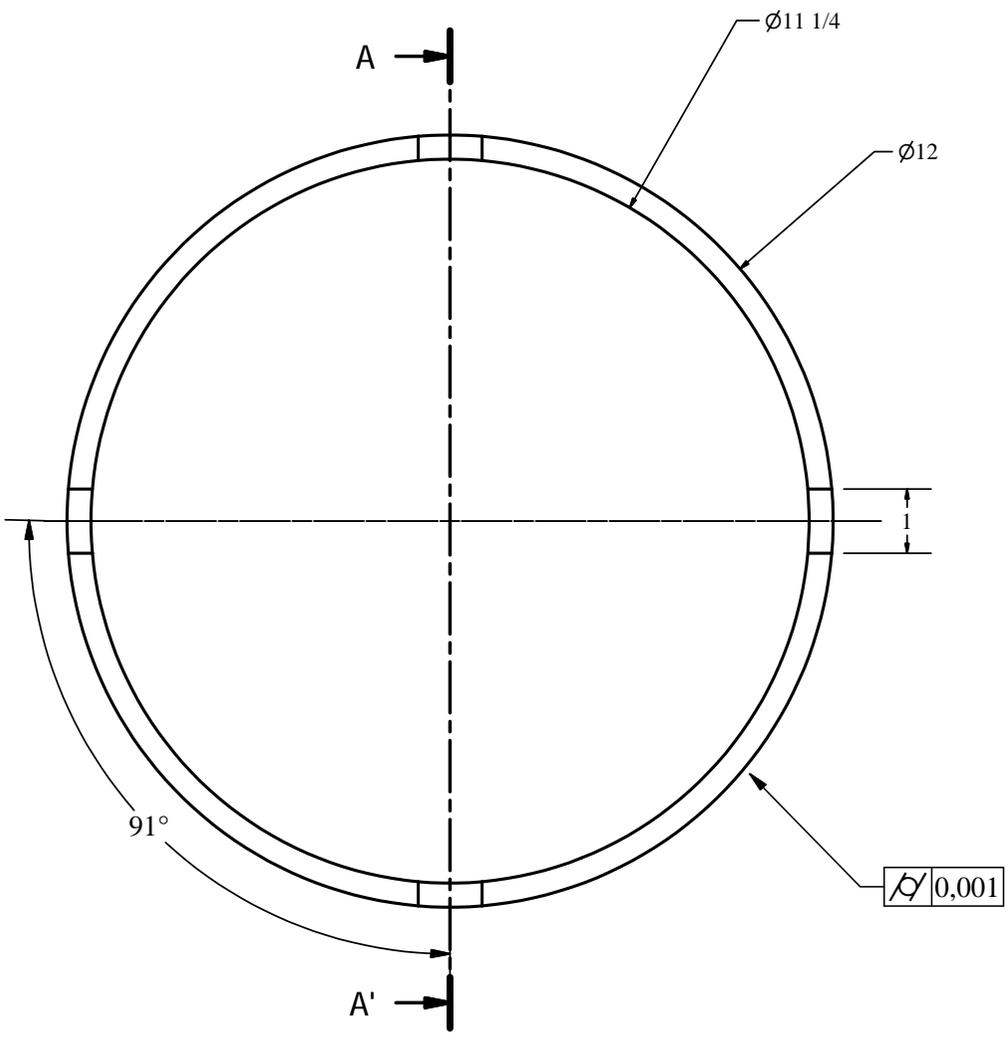
CORTE A-A'
ESCALA 1:1

TRATAMIENTO TERMICO:		N.A.	
RECURRIMIENTO:		N.A.	
CARRERA DE INGENIERIA MECANICA			
TITULO:		ESCALA	
NEPLO PARA CASCO Y FLAUTA		1:1	
		UPS	
MATERIAL:		ACERO A515 Grado 70	
DIM. BRUTAS:		(Ø2 x 2)plg	
Dib:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Dis:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Rev:	Ing. Fabio Obando	15-03-2010	
Código:	10-687-809-015		
TOL. GRAL.:	+/- 0.02		

N6



CORTE A-A'
ESCALA 1:3



TRATAMIENTO TERMICO:		N.A.	
RECUBRIMIENTO:		N.A.	
TITULO:		ESCALA	
SEPARADOR PORTA CATALIZADOR		1:3	
CARRERA DE INGENIERIA MECANICA		UPS	
MATERIAL:		DIMS. BRUTAS:	
ACERO A515 Grado 70		(Ø12 x 4)plg	
Dib:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Dis:	Andy A. - Checa A.	15-03-2010	
Rev:	Ing. Fabio Obando	15-03-2010	
Código:	10-687-809-016	TOL. GRAL:	+/- 0.05

ANEXOS III

SIMULACIÓN DISEÑO EN INVENTOR 2010.

ANALISIS DE ESFUERZOS

Autodesk®

Analyzed File:	SIMULACION REACTOR1.iam
Autodesk Inventor Version:	2010 (Build 140223002, 223)
Creation Date:	20/03/2010, 20:02
Simulation Author:	Amilkar Andy- Andres Checa
Summary:	

Project Info

Summary

Author MECANICOS

Project

Part Number	SIMULACION REACTOR1
Designer	MECANICOS
Cost	\$ 0,00
Date Created	11/03/2010

Status

Design Status WorkInProgress

Physical

Mass	235,318 lbmass
Area	12099,9 in ²
Volume	6428,68 in ³
Center of Gravity	x=0,0000113845 in y=0,0133801 in z=-28,4916 in

SIMULACION REACTOR1

General objective and settings:

Design Objective	Single Point
Simulation Type	Static Analysis
Last Modification Date	20/03/2010, 17:13
Detect and Eliminate Rigid Body Modes	No

Advanced settings:

Avg. Element Size (fraction of model diameter)	0,1
Min. Element Size (fraction of avg. size)	0,2
Grading Factor	1,5
Max. Turn Angle	60 deg
Create Curved Mesh Elements	No

Ignore Small Geometry	No
-----------------------	----

☐ Material(s)

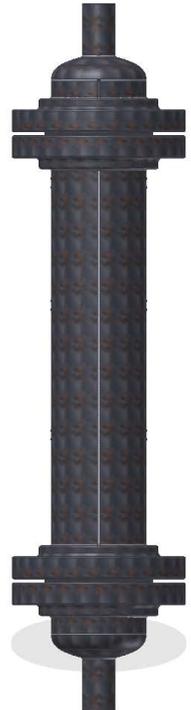
Name	Welded Steel Mild	
General	Mass Density	0,28396 lbmass/in ³
	Yield Strength	76000 psi
	Ultimate Tensile Strength	81000 psi
Stress	Young's Modulus	31930,3 ksi
	Poisson's Ratio	0,275 ul
	Shear Modulus	12521,7 ksi
Stress Thermal	Expansion Coefficient	0,00000000216 ul/f
	Thermal Conductivity	104,879 btu/(ft hr f)
	Specific Heat	0,35613 btu/(lbmass f)
Part Name(s)	SIMULACION REACTOR1.iam casco soldado.iam cabeza y extension soldados.iam extension cabeza reactor soldado.iam cabeza y extension soldados.iam extension cabeza reactor soldado.iam	
Name	Steel	
General	Mass Density	0,283599 lbmass/in ³
	Yield Strength	38000 psi
	Ultimate Tensile Strength	70000 psi
Stress	Young's Modulus	24200 ksi
	Poisson's Ratio	0,3 ul
	Shear Modulus	9307,69 ksi
Stress Thermal	Expansion Coefficient	0,00000000216 ul/f
	Thermal Conductivity	104,879 btu/(ft hr f)
	Specific Heat	0,35613 btu/(lbmass f)
Part Name(s)	casco reactor.ipt brida casco cabeza.ipt brida casco cabeza.ipt brida cabeza.ipt brida cabeza.ipt extension cabeza reactor.ipt cabeza reactor.ipt extension cabeza reactor.ipt cabeza reactor.ipt tuberia boquilla crudo.ipt tuberia boquilla crudo.ipt	

☐ Operating conditions

☐ Pressure:1

Load Type	Pressure
Magnitude	845,600 psi

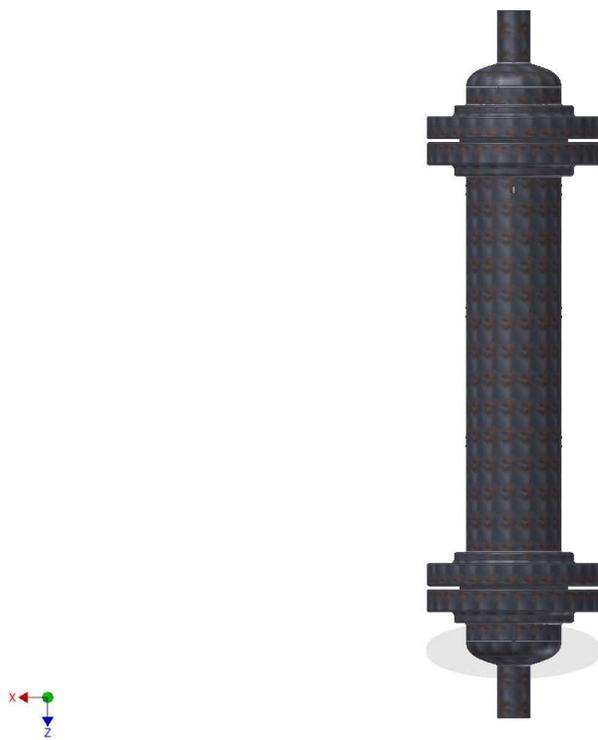
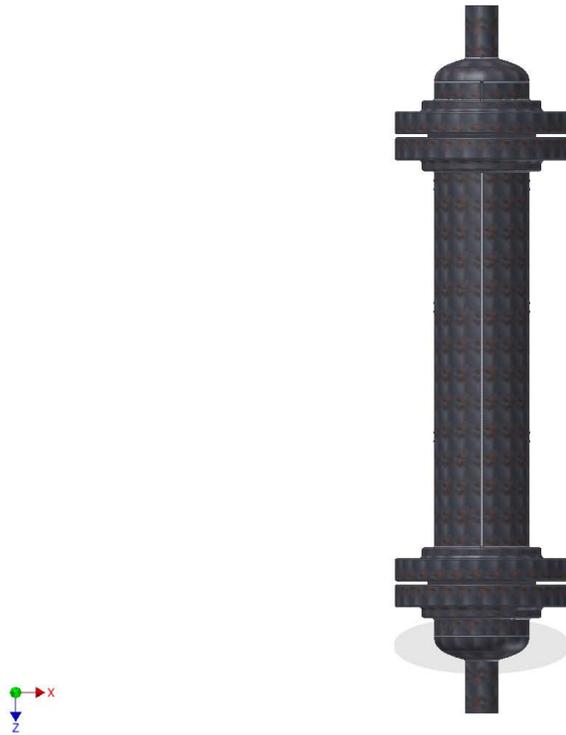
☐ Selected Face(s)



Fixed Constraint: 1

Constraint Type	Fixed Constraint
-----------------	------------------

Selected Face(s)



▣ **Results**

▣ **Reaction Force and Moment on Constraints**

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed	18538,5	-1,74501 lbf force	8459,15 lbf force	8459,15 lbf force ft

Constraint:1	lbforce	18538,5 lbforce	ft	-1,24655 lbforce ft
		3,64415 lbforce		0,499676 lbforce ft

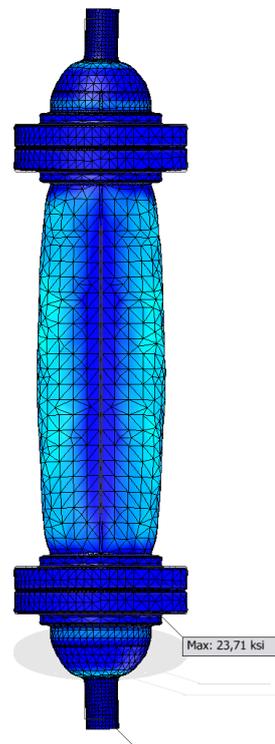
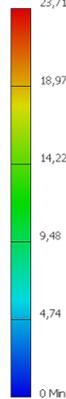
Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	6427,82 in ³	
Mass	1822,94 lbmass	
Von Mises Stress	0,000987807 ksi	23,6901 ksi
Displacement	0 in	0,00493483 in
Safety Factor	1,89716 ul	15 ul
Stress XX	-7,65283 ksi	23,8148 ksi
Stress XY	-5,57669 ksi	5,58593 ksi
Stress XZ	-7,14564 ksi	7,28185 ksi
Stress YY	-10,3728 ksi	21,5873 ksi
Stress YZ	-6,70175 ksi	6,47473 ksi
Stress ZZ	-6,41619 ksi	18,7092 ksi
X Displacement	-0,00461864 in	0,00483388 in
Y Displacement	-0,00388183 in	0,00130673 in
Z Displacement	-0,00302821 in	0,00302444 in

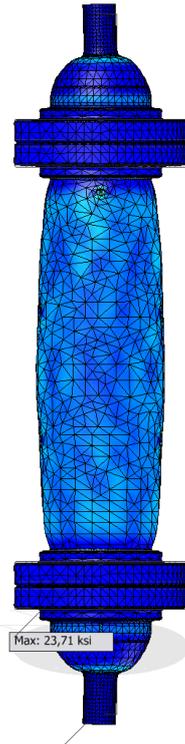
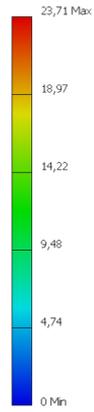
Figures

Von Mises Stress

Elements: 86975
 Type: Von Mises Stress
 Unit: ksi
 20/03/2010, 20:02:49
 23,71 Max

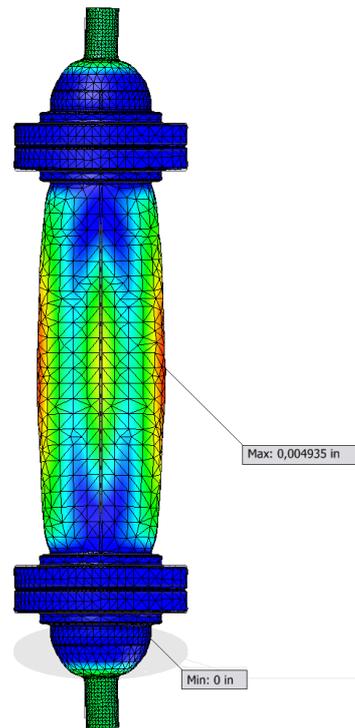
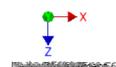
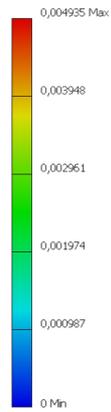


Elements: 86975
Type: Von Mises Stress
Unit: ksi
20/03/2010, 20:02:49

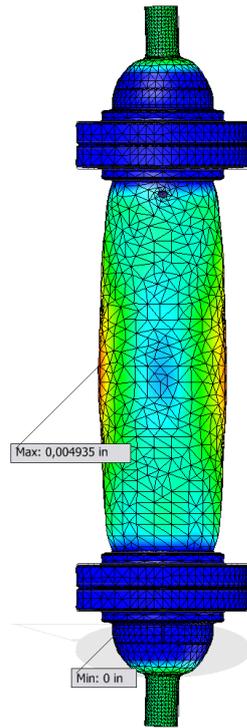
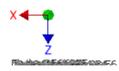
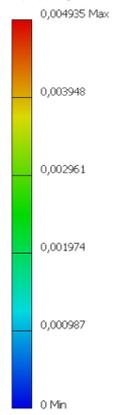


Displacement

Elements: 86975
Type: Displacement
Unit: in
20/03/2010, 20:03:56

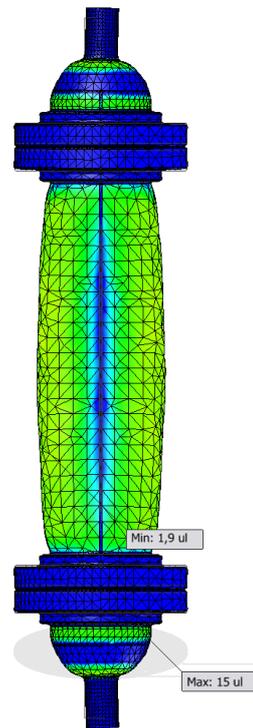
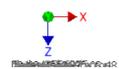
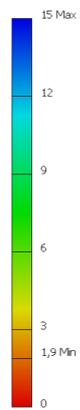


Elements:86975
Type: Displacement
Unit: in
20/03/2010, 20:03:56

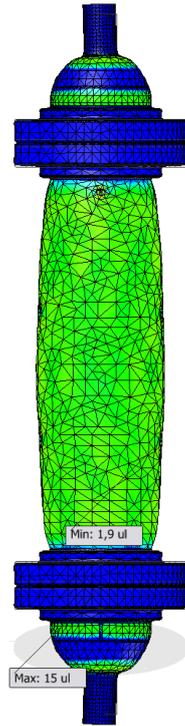
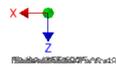
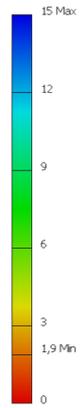


Safety Factor

Elements:86975
Type: Safety Factor
Unit: ul
20/03/2010, 20:03:48

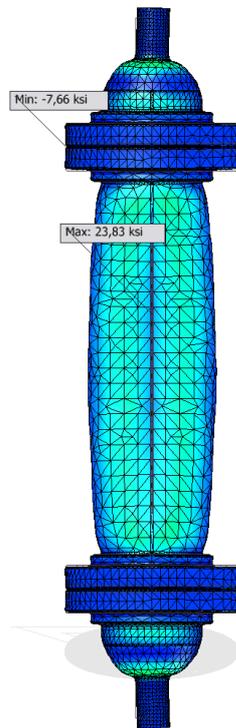
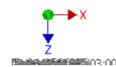


Elements:86975
Type: Safety Factor
Unit: ul
20/03/2010, 20:03:48

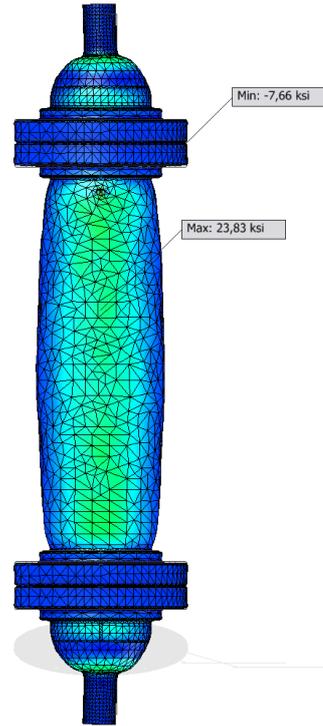
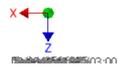
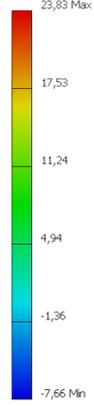


Stress XX

Elements:86975
Type: Stress XX
Unit: ksi
20/03/2010, 20:03:00

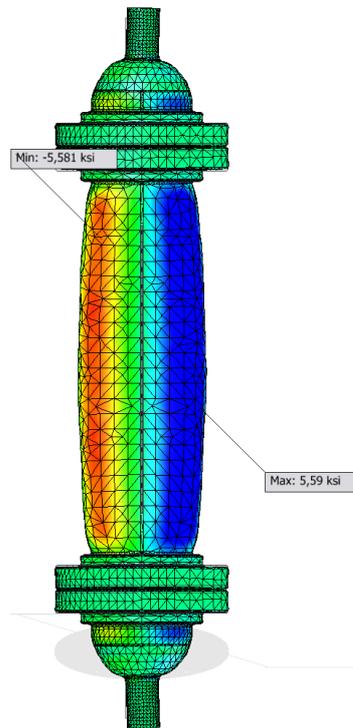
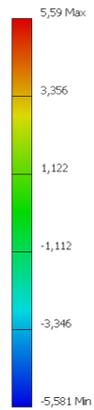


Elements: 86975
Type: Stress XX
Unit: ksi
20/03/2010, 20:03:00

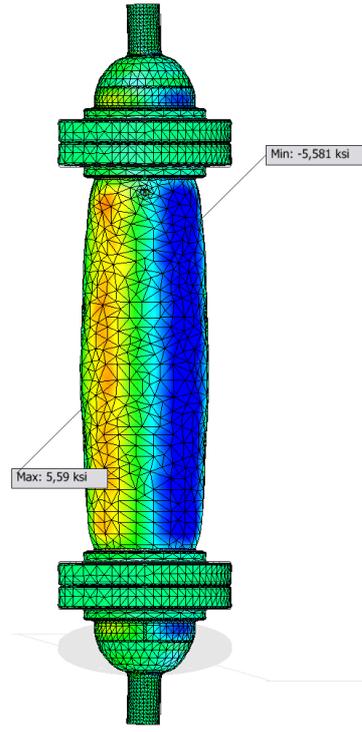
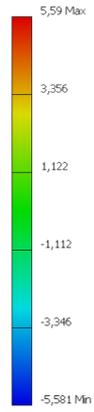


Stress XY

Elements: 86975
Type: Stress XY
Unit: ksi
20/03/2010, 20:03:08

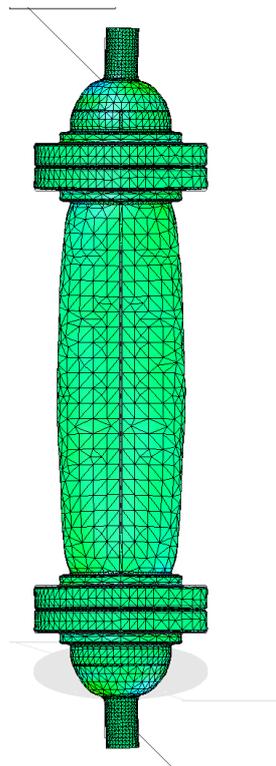
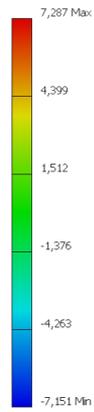


Elements: 86975
Type: Stress XY
Unit: ksi
20/03/2010, 20:03:08

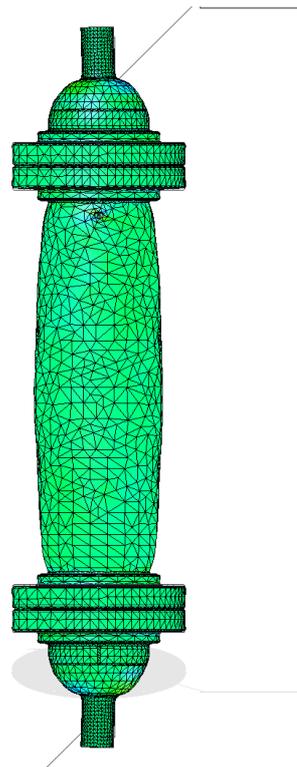
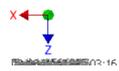
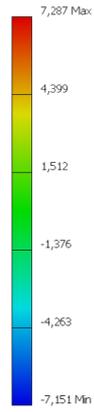


Stress XZ

Elements: 86975
Type: Stress XZ
Unit: ksi
20/03/2010, 20:03:16

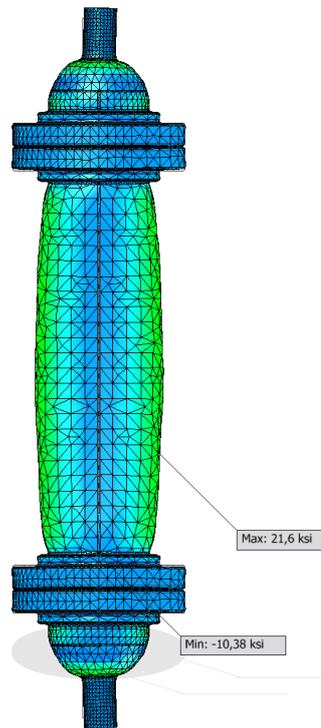
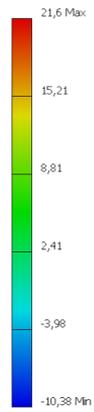


Elements: 86975
Type: Stress XZ
Unit: ksi
20/03/2010, 20:03:16

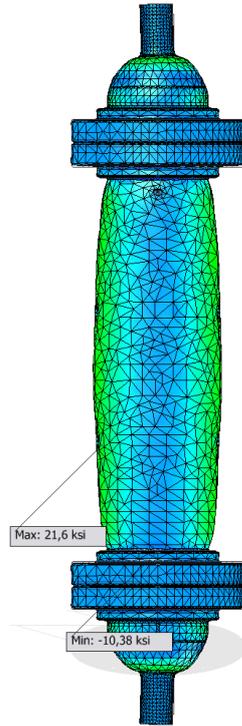
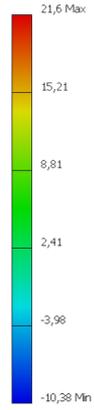


Stress YY

Elements: 86975
Type: Stress YY
Unit: ksi
20/03/2010, 20:03:24

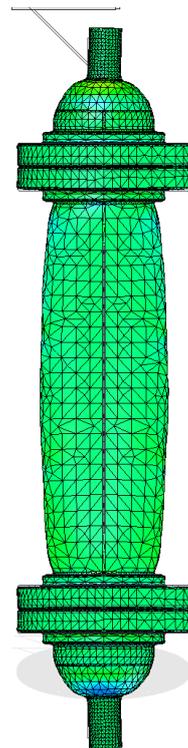
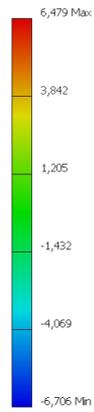


Elements:86975
Type: Stress YY
Unit: ksi
20/03/2010, 20:03:24

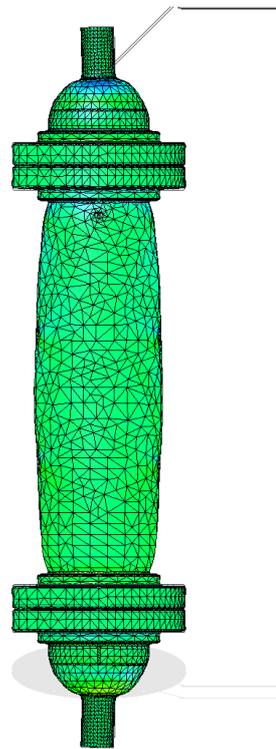
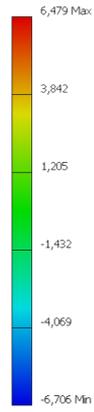


Stress YZ

Elements:86975
Type: Stress YZ
Unit: ksi
20/03/2010, 20:03:32

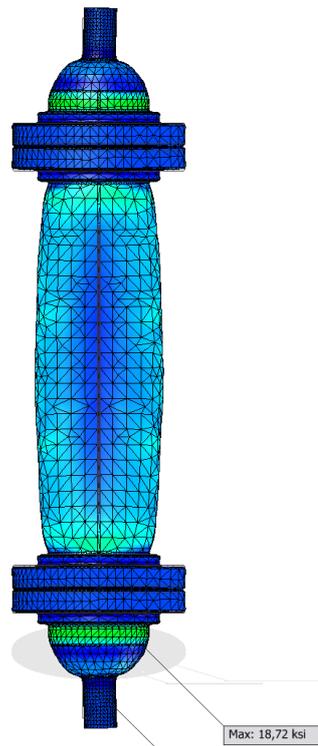
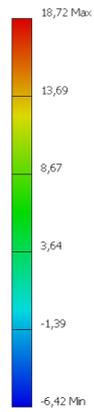


Elements:86975
Type: Stress YZ
Unit: ksi
20/03/2010, 20:03:32

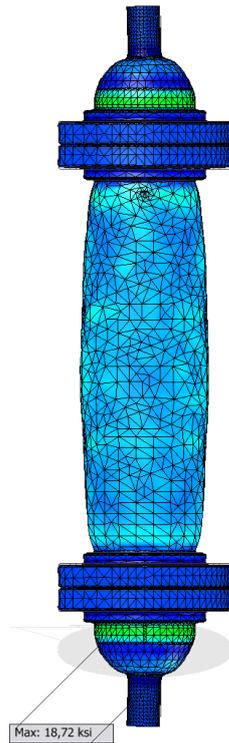
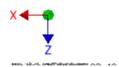
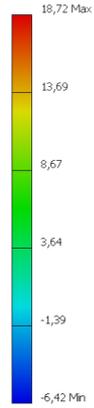


Stress ZZ

Elements:86975
Type: Stress ZZ
Unit: ksi
20/03/2010, 20:03:40

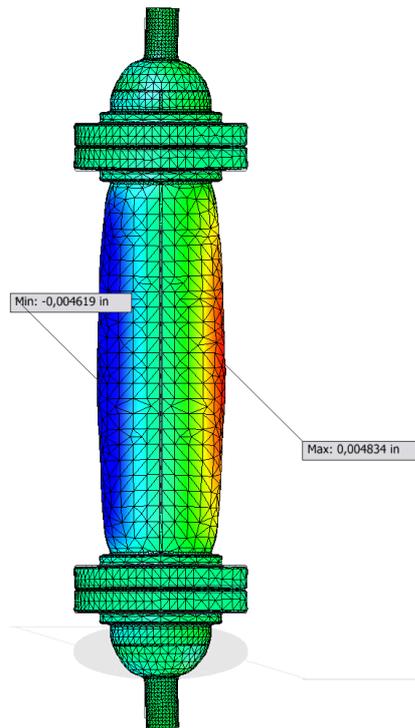
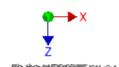
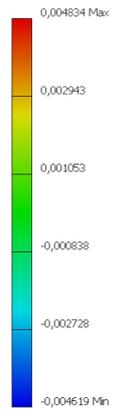


Elements:86975
Type: Stress ZZ
Unit: ksi
20/03/2010, 20:03:40

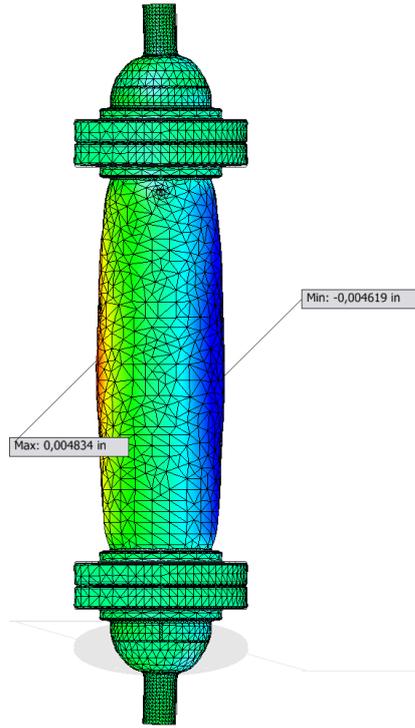


X Displacement

Elements:86975
Type: X Displacement
Unit: in
20/03/2010, 20:04:04

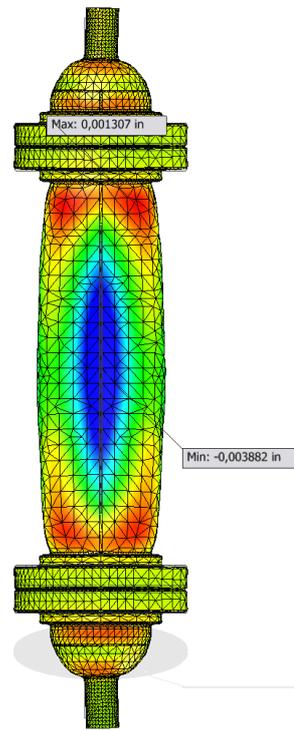


Elements:86975
Type: X Displacement
Unit: in
20/03/2010, 20:04:04
0,004834 Max
0,002943
0,001053
-0,000838
-0,002728
-0,004619 Min

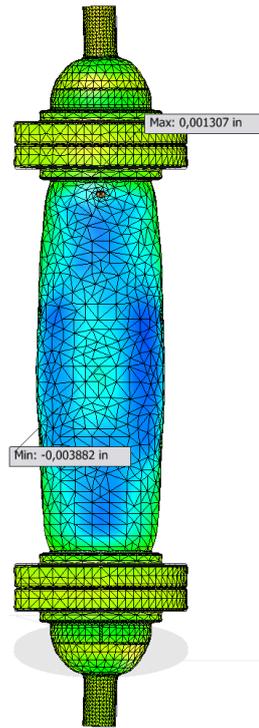


Y Displacement

Elements:86975
Type: Y Displacement
Unit: in
20/03/2010, 20:04:13
0,001307 Max
0,000269
-0,000769
-0,001806
-0,002844
-0,003882 Min

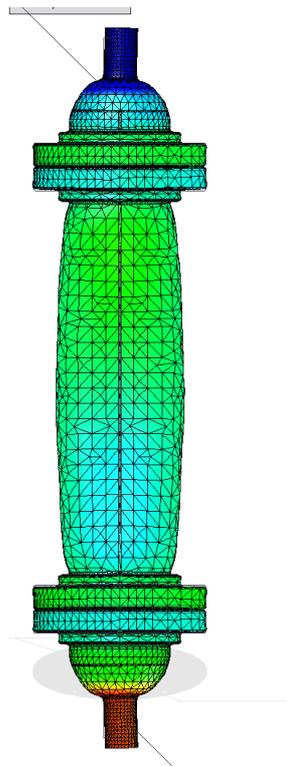


Elements:86975
Type: Y Displacement
Unit: in
20/03/2010, 20:04:13
0,001307 Max
0,000269
-0,000769
-0,001806
-0,002844
-0,003882 Min

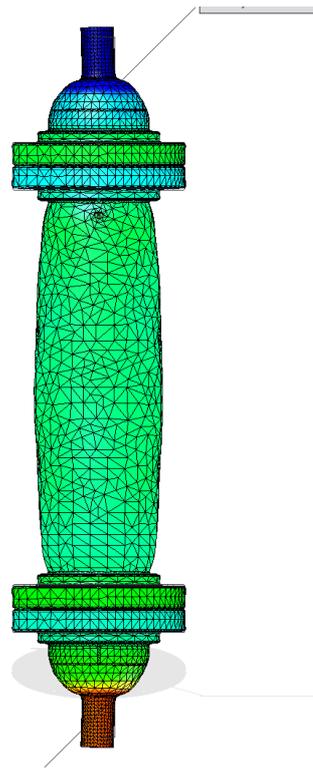
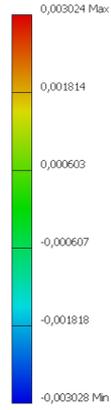


Z Displacement

Elements:86975
Type: Z Displacement
Unit: in
20/03/2010, 20:04:20
0,003024 Max
0,001814
0,000603
-0,000607
-0,001818
-0,003028 Min



Elements:86975
Type: Z Displacement
Unit: in
20/03/2010, 20:04:20



D:\Mis documentos Amilkar\simulacion reactor\SIMULACION REACTOR1.iam

**COMPARACIÓN DE CONDICIONES DE OPERACIÓN ENTRE UNA
PLANTA PILOTO Y COMERCIAL.**

ANCHEYTA, J., Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua, p. 76, 2007.

TABLE 5.1
Comparison of Operating Conditions in Pilot and Commercial
HDT Plants

Characteristics	Pilot Plant	Commercial Plant
Pressure, MPa	5.3	5.3
Temperature, K	613–653	633
LHSV, h ⁻¹	1.0–2.5	2.5
H ₂ -to-oil ratio, ml ml ⁻¹	356.2	356.2
Delta-T, °C	±2	15–20
Catalyst volume	75–150 mL	65.67 m ³
Liquid flow rate	75–375 mL/h	165,625 l/h
Catalytic bed length (<i>L</i>)	15–35 cm	9 m
Reactor inside diameter (<i>D</i>)	2.54 cm	3.048 m
Catalyst particle diameter (<i>d_p</i>), mm	2.3	2.3
<i>Ld_p</i> ratio	93–108	3913
<i>D/d_p</i> ratio	11.0	1325
Superficial liquid mass velocity (<i>u_L</i>), kg/m ² sec	0.036–0.179	5.429
Superficial gas mass velocity (<i>u_G</i>), kg/m ² sec	0.001–0.006	0.1859
<i>Re</i> in liquid phase (<i>Re_L</i>)	0.23–1.36	38.0
<i>Re</i> in gas phase (<i>Re_G</i>)	0.19–0.96	28.4
<i>Pe</i> in liquid phase (<i>Pe_L</i>)	0.02–0.16	0.255
<i>Pe</i> in gas phase (<i>Pe_G</i>)	3.61–5.72	0.112

Source: Ancheyta et al., *Energy Fuels*, 16: 1059–1067, 2002a. (With permission.)

Table 5.1 presents typical TBR conditions observed during operation of pilot and commercial hydrotreating plants. It is observed that superficial mass velocities and Reynolds numbers for both liquid and gas phases are always smaller in pilot reactors than in commercial reactors. For these reasons, low liquid velocities are used in small-scale reactors to match the liquid hourly space-velocity (LHSV) of commercial plants, which implies that gas–liquid and liquid–solid mass transfers are much better in commercial scale reactors. In addition, because of the lower resistance to liquid flow at the wall, the linear velocity next to the wall is greater than that found at the center of the reactor. This variation in linear velocity causes an increase in axial dispersion. The extent of this axial dispersion effect depends mainly on the bed length and conversion (Ancheyta et al., 2002a).

When processing naphtha, the main undesirable impurity is sulfur, and sulfur compounds are very easy to remove. That is the reason why only a hydrodesulfurization catalyst is loaded to an FBR. However, when processing straight-run gas oil (SRGO), the so-called refractory sulfur compounds are present (4,6-dimethylDBT and 4(or 6)-methylDBT), making deep hydrodesulfurization for ultra-low-sulfur diesel (ULSD) production hard to achieve. In addition, most of the time SRGO is blended with light cycle oil (LCO) from fluid catalytic cracking (FCC) units, and both are fed to the hydrotreater. These oil streams also contain

ANEXOS V

CÓDIGO ASME SECCIÓN VIII, DIV. 1. PARTE UG.

REQUERIMIENTOS GENERALES PARA TODOS LOS MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN Y MATERIALES.

PART UG GENERAL REQUIREMENTS FOR ALL METHODS OF CONSTRUCTION AND ALL MATERIALS

UG-1 SCOPE

The requirements of Part UG are applicable to all pressure vessels and vessel parts and shall be used in conjunction with the specific requirements in Subsections B and C and the Mandatory Appendices that pertain to the method of fabrication and the material used.

MATERIALS

UG-4 GENERAL

(a) Material subject to stress due to pressure shall conform to one of the specifications given in Section II and shall be limited to those that are permitted in the applicable Part of Subsection C, except as otherwise permitted in UG-9, UG-10, UG-11, UG-15, and the Mandatory Appendices. Material may be identified as meeting more than one material specification and/or grade provided the material meets all requirements of the identified material specification(s) and/or grade(s) [see UG-23(a)].

(b) Material for nonpressure parts, such as skirts, supports, baffles, lugs, clips, and extended heat transfer surfaces, need not conform to the specifications for the material to which they are attached or to a material specification permitted in this Division, but if attached to the vessel by welding shall be of weldable quality [see UW-5(b)]. The allowable stress values for material not identified in accordance with UG-93 shall not exceed 80% of the maximum allowable stress value permitted for similar material in Subsection C.

(c) Material covered by specifications in Section II is not restricted as to the method of production unless so stated in the specification, and so long as the product complies with the requirements of the specification. (See UG-85.)

(d) Materials other than those allowed by this Division may not be used, unless data thereon are submitted to and approved by the Boiler and Pressure Vessel Committee in accordance with Appendix 5 in Section II, Part D.

(e) Materials outside the limits of size and/or thickness given in the title or scope clause of the specifications given in Section II, and permitted by the applicable part of Subsection C, may be used if the material is in compliance with the other requirements of the specification,¹ and no size or thickness limitation is given in the stress tables. In those specifications in which chemical composition or mechanical properties vary with size or thickness, materials outside the range shall be required to conform to the composition and mechanical properties shown for the nearest specified range.

(f) It is recommended that the user or his designated agent assure himself that materials used for the construction of the vessels will be suitable for the intended service with respect to retention of satisfactory mechanical properties, and resistance to corrosion, erosion, oxidation, and other deterioration during their intended service life. See also informative and nonmandatory guidance regarding metallurgical phenomena in Appendix 6 of Section II, Part D.

UG-5 PLATE²

Plate used in the construction of pressure parts of pressure vessels shall conform to one of the speci-

¹ In some instances the limitations of the scope clause in the material specifications are based on a very realistic maximum. It is recommended that the designer and/or fabricator confer with the material manufacturer or supplier before proceeding, thus assuring himself that except for size or thickness, all requirements of the material specification will be met and so certified.

² The term "plate" for the purpose of this usage includes sheet and strip also.

fications in Section II for which allowable stress values are given in the tables referenced in UG-23, except as otherwise provided in UG-4, UG-10, UG-11, and UG-15.

UG-6 FORGINGS

Forged material may be used in pressure vessel construction provided the material has been worked sufficiently to remove the coarse ingot structure. Specifications and maximum allowable stress values for acceptable forging materials are given in the tables referenced in UG-23. (See Part UF for forged vessels.)

UG-7 CASTINGS

Cast material may be used in the construction of pressure vessels and vessel parts. Specifications and maximum allowable stress values for acceptable casting materials are given in the tables referenced in UG-23. These allowable stress values shall be multiplied by the applicable casting quality factor given in UG-24 for all materials except cast iron.

UG-8 PIPE AND TUBES

(a) Pipe and tubes of seamless or welded³ construction conforming to one of the specifications given in Section II may be used for shells and other parts of pressure vessels. Allowable stress values for the materials used in pipe and tubes are given in the tables referenced in UG-23.

(b) Integrally finned tubes may be made from tubes that conform in every respect with one of the specifications given in Section II. These tubes may be used under the following conditions.

(1) The tubes, after finning, shall have a temper or condition which conforms to one of those provided in the governing specifications, or, when specified, they may be furnished in the "as-fabricated condition" where the finned portions of the tube are in the cold worked temper (as-finned) resulting from the finning operation, and the unfinned portions in the temper of the tube prior to finning.

(2) The maximum allowable stress value for the finned tube shall be that given in the tables referenced

in UG-23 for the tube before finning except as permitted in (3) below.

(3) The maximum allowable stress value for a temper or condition that has a higher stress value than that of the tube before finning may be used provided that qualifying mechanical property tests demonstrate that such a temper or condition is obtained and conforms to one of those provided in the governing specifications in Section II, and provided that allowable stress values have been established in the tables referenced in UG-23 for the tube material used. The qualifying mechanical property tests shall be made on specimens of finned tube from which the fins have been removed by machining. The frequency of tests shall be as required in the unfinned tube specification.

(4) The maximum allowable internal or external working pressure of the tube shall be based on the root diameter and the minimum wall of the finned section, or the outside diameter and wall of the unfinned section together with appropriate stress values, whichever results in the lower maximum allowable working pressure. Alternatively, the maximum allowable external pressure for tubes with integral fins may be established under the rules of Appendix 23.

(5) In addition to the tests required by the governing specifications, each tube after finning shall be subjected to one of the following tests:

(a) an internal pneumatic test of not less than 250 psi (1720 kPa) for 5 sec without evidence of leakage. The test method shall permit easy visual detection of any leakage such as immersion of the tube under water or a pressure differential method.⁴

(b) an individual tube hydrostatic test in accordance with UG-99 which permits complete examination of the tube for leakage.

UG-9 WELDING MATERIALS

Welding materials used for production shall comply with the requirements of this Division, those of Section IX, and the applicable qualified welding procedure specification. When the welding materials comply with one of the specifications in Section II, Part C, the marking or tagging of the material, containers, or packages as required by the applicable Section II specification may be accepted for identification in lieu of a Certified Test Report or a Certificate of Compliance. When the welding materials do not comply with one of the specifications of Section II, the marking or

³Pipe and tubing fabricated by fusion welding, with filler metal added, may not be used in Code construction unless it is fabricated in accordance with Code rules as a pressure part.

⁴The pressure differential method is described in "Materials Research Standards," Vol. 1, No. 7, July 1961, published by ASTM.

ANEXOS VI

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES: ACERO AL CARBONO Y DE BAJO CONTENIDO DE ELEMENTOS DE ALEACIÓN. MEGYESY, EUGENE, MANUAL DE RECIPIENTES A PRESIÓN, 2009.

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES (Continuación)							
Forma	Especificación		Número P	Resistencia a la tensión 1000 lb/pulg ²	Punto de cedencia, 1000 lb/pulg ²		Ver notas
	Número	Grado					
PLACA	SA-283	C	1	55.0	30.0		1
	SA-285	C	1	55.0	30.0		2,6
	SA-515	55	1	55.0	30.0		3
	SA-515	60	1	60.0	32.0		3
	SA-515	65	1	65.0	35.0		3
	SA-515	70	1	70.0	38.0		3
	SA-516	55	1	55.0	30.0		3,8
	SA-516	60	1	60.0	32.0		3,8
	SA-516	65	1	65.0	35.0		3,8
	SA-516	70	1	70.0	38.0		3,8
BRIDAS Y ACCESORIOS	SA-105		1	70.0	36.0		2,3
	SA-181	I	1	60.0	30.0		2,3
	SA-350	LF1 1,2	1	60.0 70.0	30.0 36.0		--
Tubo sin costura	SA-53	B	1	60.0	35.0		2,3,4,7
	SA-106	B	1	60.0	35.0		3
TORNILLERÍA	SA-193	B7		125.0	105.0	DIAM > 2 1/2 pulg y ≤ 4 pulg	--
	SA-194	2H		55.0	--		--
	SA-307	B		55.0			5

MODULO DE ELASTICIDAD PARA MATERIALES FERROSOS

Material	Millones de lb/pulg ² , para temperatura F, de										
	70	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Aceros al carbono con C ≤ 0.30%	29.5	28.8	28.3	27.7	27.3	26.7	25.5	24.2	22.4	20.4	18.0
Aceros al carbono con C < 0.30%	29.3	28.6	28.1	27.5	27.1	26.5	25.3	24.0	22.3	20.2	17.9
Aceros con alto contenido de elementos de aleación	28.3	27.6	27.0	26.5	25.8	25.3	24.8	24.1	23.5	22.8	22.1

Los valores en las Gráficas de Presión Externa son sólo para calcular dicha presión.

ANEXO VII

PROPIEDADES DE LOS TUBOS EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO NOMINAL.

MEGYESY, EUGENE, MANUAL DE RECIPIENTES A PRESIÓN, 2009.

PROPIEDADES DE LOS TUBOS Los números de cédula y las designaciones de peso están de acuerdo con la Norma ANSI B36.10 para tubos de acero al carbono y aceros aleados, y la Norma ANSI B36.19 para tubos de acero inoxidable.											
Tam. nominal del tubo	No. de Cédula		Designación del peso	Diám. exterior, pulg.	Diám. interior, pulg.	Espesor de pared, pulg.	Peso por pie, lb	Peso de agua por pie de tubo, lb	Superficie exterior por pie, pies ²	Superficie interior por pie, pies ²	Area transversal, pulg ²
	Aceros al carbono y aleados	Aceros inoxidables									
1/8	...	10S	...	.405	.307	.049	.186	.0320	.106	.0804	.0740
	40	40S	Est.	.405	.269	.068	.244	.0246	.106	.0705	.0568
	80	80S	Ref.	.405	.215	.095	.314	.0157	.106	.0563	.0364
1/4	...	10S	...	.540	.410	.065	.330	.0570	.141	.1073	.1320
	40	40S	Est.	.540	.364	.088	.424	.0451	.141	.0955	.1041
	80	80S	Ref.	.540	.302	.119	.535	.0310	.141	.0794	.0716
3/8	...	10S	...	.675	.545	.065	.423	.1010	.177	.1427	.2333
	40	40S	Est.	.675	.493	.091	.567	.0827	.177	.1295	.1910
	80	80S	Ref.	.675	.423	.126	.738	.0609	.177	.1106	.1405
1/2	...	10S	...	.840	.670	.083	.671	.1550	.220	.1764	.3568
	40	40S	Est.	.840	.622	.109	.850	.1316	.220	.1637	.3040
	80	80S	Ref.	.840	.546	.147	1.087	.1013	.220	.1433	.2340
	160	...	...	.840	.466	.187	1.310	.0740	.220	.1220	.1706
	...	...	Doble Ref.	.840	.252	.294	1.714	.0216	.220	.0660	.0499
3/4	...	10S	...	1.050	.834	.083	.857	.2660	.275	.2314	.6138
	40	40S	Est.	1.050	.824	.113	1.130	.2301	.275	.2168	.5330
	80	80S	Ref.	1.050	.742	.154	1.473	.1875	.275	.1948	.4330
	...	...	...	1.050	.675	.188	1.727	.1514	.275	.1759	.3570
	160	...	Doble Ref.	1.050	.614	.218	1.940	.1280	.275	.1607	.2961
...	...	...	1.050	.434	.308	2.440	.0633	.275	.1137	.1479	
1	...	10S	...	1.315	1.097	.109	1.404	.4090	.344	.2872	.9448
	40	40S	Est.	1.315	1.049	.133	1.678	.3740	.344	.2740	.8640
	80	80S	Ref.	1.315	.957	.179	2.171	.3112	.344	.2520	.7190
	...	...	...	1.315	.877	.219	2.561	.2614	.344	.2290	.6040
	160	...	Doble Ref.	1.315	.815	.250	2.850	.2261	.344	.2134	.5217
...	...	...	1.315	.599	.358	3.659	.1221	.344	.1570	.2818	
1 1/4	...	10S	...	1.660	1.442	.109	1.806	.7080	.434	.3775	1.633
	40	40S	Est.	1.660	1.380	.140	2.272	.6471	.434	.3620	1.495
	80	80S	Ref.	1.660	1.278	.191	2.996	.5553	.434	.3356	1.283
	160	...	...	1.660	1.160	.250	3.764	.4575	.434	.3029	1.057
	...	...	Doble Ref.	1.660	.896	.382	5.214	.2732	.434	.2331	.6305
1 1/2	...	10S	...	1.900	1.682	.109	2.085	.9630	.497	.4403	2.221
	40	40S	Est.	1.900	1.610	.145	2.717	.8820	.497	.4213	2.036
	80	80S	Ref.	1.900	1.500	.200	3.631	.7648	.497	.3927	1.767
	160	...	...	1.900	1.337	.281	4.862	.6082	.497	.3519	1.405
	...	...	Doble Ref.	1.900	1.100	.400	6.408	.4117	.497	.2903	.950
2	...	10S	...	2.375	2.157	.109	2.638	1.583	.622	.5647	3.654
	40	40S	Est.	2.375	2.067	.154	3.652	1.452	.622	.5401	3.355
	...	...	...	2.375	2.041	.167	3.938	1.420	.622	.5360	3.280

PROPIEDADES DE LOS TUBOS (cont.)											
Tam. nominal del tubo	No. de cédula		Designación del peso	Diám. ext., pulg	Diám. int., pulg	Espesor de pared pulg	Peso por pie, lb	Peso de agua por pie de tubo, lb	Superficie exterior por pie, pies ²	Superficie interior por pie, pies ²	Area transversal, pulg ²
	Aceros al carbono y aleados	Aceros inoxidables									
4 (Cont.)	...	...	...	4.500	4.090	.205	9.39	5.71	1.178	1.071	13.15
	40	40S	Est.	4.500	4.026	.237	10.79	5.51	1.178	1.055	12.73
	...	...	...	4.500	4.000	.250	11.35	5.45	1.178	1.049	12.57
	...	...	...	4.500	3.958	.271	12.24	5.35	1.178	1.038	12.31
	...	...	...	4.500	3.938	.281	12.67	5.27	1.178	1.031	12.17
	...	...	...	4.500	3.900	.300	13.42	5.19	1.178	1.023	11.96
	...	...	...	4.500	3.876	.312	14.00	5.12	1.178	1.013	11.80
	80	80S	Ref.	4.500	3.826	.337	14.98	4.98	1.178	1.002	11.50
	...	...	...	4.500	3.750	.375	16.52	4.78	1.178	.982	11.04
	120	...	...	4.500	3.624	.438	19.00	4.47	1.178	.949	10.32
	...	...	...	4.500	3.500	.500	21.36	4.16	1.178	.916	9.62
	160	...	...	4.500	3.438	.531	22.60	4.02	1.178	.900	9.28
	...	...	Doble Ref.	4.500	3.152	.674	27.54	3.38	1.178	.826	7.80
	5	...	10S	...	5.563	5.295	.134	7.770	9.54	1.456	1.386	22.02
40		40S	Est.	5.563	5.047	.258	14.62	8.66	1.456	1.321	20.01
...		...	...	5.563	4.859	.352	19.59	8.06	1.456	1.272	18.60
80		80S	Ref.	5.563	4.813	.375	20.78	7.87	1.456	1.260	18.19
...		...	...	5.563	4.688	.437	23.95	7.47	1.456	1.227	17.26
120		...	...	5.563	4.563	.500	27.10	7.08	1.456	1.195	16.35
160		...	...	5.563	4.313	.625	32.96	6.32	1.456	1.129	14.61
...		...	Doble Ref.	5.563	4.063	.750	38.55	5.62	1.456	1.064	12.97
6	...	10S	...	6.625	6.357	.134	9.29	13.70	1.735	1.660	31.75
	...	...	...	6.625	6.287	.169	11.56	13.45	1.735	1.650	31.00
	...	...	...	6.625	6.265	.180	12.50	13.38	1.735	1.640	30.81
	...	...	...	6.625	6.249	.188	12.93	13.31	1.735	1.639	30.70
	...	...	...	6.625	6.187	.219	15.02	13.05	1.735	1.620	30.10
	...	...	...	6.625	6.125	.250	17.02	12.80	1.735	1.606	29.50
	...	...	...	6.625	6.071	.277	18.86	12.55	1.735	1.591	28.95
	40	40S	Est.	6.625	6.065	.280	18.97	12.51	1.735	1.587	28.99
	...	...	...	6.625	5.875	.375	25.10	11.75	1.735	1.540	27.10
	80	80S	Ref.	6.625	5.761	.432	28.57	11.29	1.735	1.510	26.07
	...	...	...	6.625	5.625	.500	32.79	10.85	1.735	1.475	24.85
	120	...	...	6.625	5.501	.562	36.40	10.30	1.735	1.470	23.77
	160	...	...	6.625	5.189	.718	45.30	9.16	1.735	1.359	21.15
	...	...	Doble Ref.	6.625	4.897	.864	53.16	8.14	1.735	1.280	18.83
8	...	10S	...	8.625	8.329	.148	13.40	23.6	2.26	2.180	54.5
	...	...	...	8.625	8.309	.158	14.26	23.6	2.26	2.178	54.3
	...	...	...	8.625	8.295	.165	14.91	23.5	2.26	2.175	54.1
	...	...	...	8.625	8.249	.188	16.90	23.2	2.26	2.161	53.5
	...	...	...	8.625	8.219	.203	18.30	23.1	2.26	2.152	53.1
	...	...	...	8.625	8.187	.219	19.64	22.9	2.26	2.148	52.7

ANEXOS VIII

EFICIENCIA DE LA JUNTA SEC. VII, DIV. 1, B PT UW 11.

UW-5

PART UW — WELDED VESSELS

UW-11

and F316L; SA-351 CF3, CF3A, CF3M, CF8, CF8A, and CF8M.

(e) Materials joined by the inertia and continuous drive friction welding processes shall be limited to materials assigned P-Numbers in Section IX and shall not include rimmed or semikilled steel.

DESIGN

UW-8 GENERAL

The rules in the following paragraphs apply specifically to the design of pressure vessels and vessel parts that are fabricated by welding and shall be used in conjunction with the general requirements for *Design* in Subsection A, and with the specific requirements for *Design* in Subsection C that pertain to the class of material used.

UW-9 DESIGN OF WELDED JOINTS

(a) *Permissible Types.* The types of welded joints permitted in arc and gas welding processes are listed in Table UW-12, together with the limiting plate thickness permitted for each type. Butt type joints only are permitted with pressure welding processes [see UW-27(b)].

(b) *Welding Grooves.* The dimensions and shape of the edges to be joined shall be such as to permit complete fusion and complete joint penetration. Qualification of the welding procedure, as required in UW-28, is acceptable as proof that the welding groove is satisfactory.

(c) *Tapered Transitions.* A tapered transition having a length not less than three times the offset between the adjacent surfaces of abutting sections, as shown in Fig. UW-9, shall be provided at joints between sections that differ in thickness by more than one-fourth of the thickness of the thinner section, or by more than $\frac{1}{8}$ in. (3.2 mm), whichever is less. The transition may be formed by any process that will provide a uniform taper. When the transition is formed by removing material from the thicker section, the minimum thickness of that section, after the material is removed, shall not be less than that required by UG-23(c). When the transition is formed by adding additional weld metal beyond what would otherwise be the edge of the weld, such additional weld metal buildup shall be subject to the requirements of UW-42. The butt weld may be partly or entirely in the tapered section or adjacent to it. This paragraph also applies when there is a reduction in thickness within a spherical shell or cylindrical shell

course and to a taper at a Category A joint within a formed head. Provisions for tapers at circumferential, butt welded joints connecting formed heads to main shells are contained in UW-13.

(d) Except when the longitudinal joints are radiographed 4 in. each side of each circumferential welded intersection, vessels made up of two or more courses shall have the centers of the welded longitudinal joints of adjacent courses staggered or separated by a distance of at least five times the thickness of the thicker plate.

(e) *Lap Joints.* For lapped joints, the surface overlap shall be not less than four times the thickness of the inner plate except as otherwise provided for heads in UW-13.

(f) *Welded Joints Subject to Bending Stresses.* Except where specific details are permitted in other paragraphs, fillet welds shall be added where necessary to reduce stress concentration. Corner joints, with fillet welds only, shall not be used unless the plates forming the corner are properly supported independently of such welds. (See UW-18.)

(g) *Minimum Weld Sizes.* Sizing of fillet and partial penetration welds shall take into consideration the loading conditions in UG-22 but shall not be less than the minimum sizes specified elsewhere in this Division.

UW-10 POSTWELD HEAT TREATMENT

Pressure vessels and pressure vessel parts shall be postweld heat treated as prescribed in UW-40 when postweld heat treatment is required in the applicable part of Subsection C.

UW-11 RADIOGRAPHIC AND ULTRASONIC EXAMINATION

(a) *Full Radiography.* The following welded joints shall be examined radiographically for their full length in the manner prescribed in UW-51:

(1) all butt welds in the shell and heads of vessels used to contain lethal substances [see UW-2(a)];

(2) all butt welds in vessels in which the nominal thickness [see (g) below] at the welded joint exceeds $1\frac{1}{2}$ in. (38 mm), or exceeds the lesser thicknesses prescribed in UCS-57, UNF-57, UHA-33, UCL-35, or UCL-36 for the materials covered therein, or as otherwise prescribed in UHT-57, ULW-51, ULW-52(d), ULW-54, or ULT-57; however, except as required by UHT-57(a), Categories B and C butt welds in nozzles and communicating chambers that neither exceed NPS

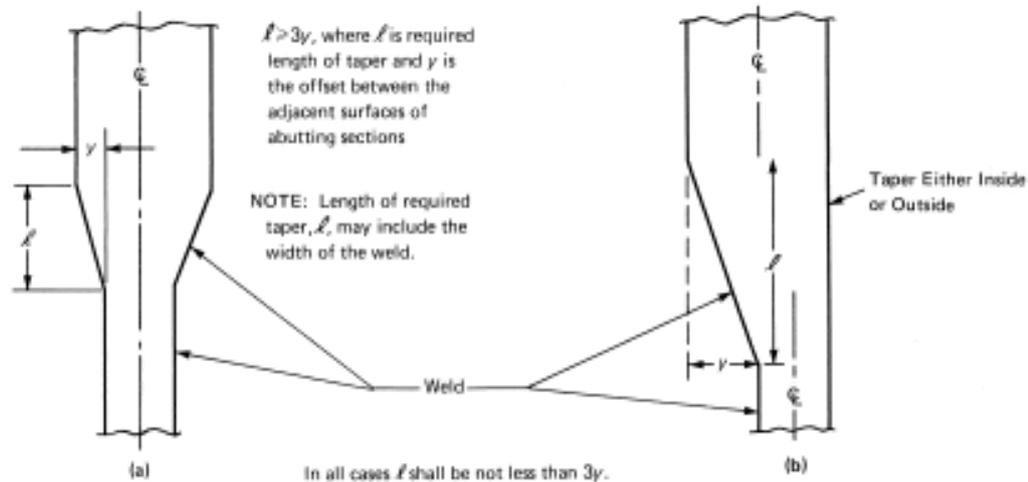


FIG. UW-9 BUTT WELDING OF PLATES OF UNEQUAL THICKNESS

10 nor $1\frac{1}{8}$ in. (29 mm) wall thickness do not require any radiographic examination;

(3) all butt welds in the shell and heads of unfired steam boilers having design pressures exceeding 50 psi (345 kPa) [see UW-2(c)];

(4) all butt welds in nozzles, communicating chambers, etc., attached to vessel sections or heads that are required to be fully radiographed under (1) or (3) above; however, except as required by UHT-57(a), Categories B and C butt welds in nozzles and communicating chambers that neither exceed NPS 10 (DN 250) nor $1\frac{1}{8}$ in. (29 mm) wall thickness do not require any radiographic examination;

(5) all Category A and D butt welds in vessel sections and heads where the design of the joint or part is based on a joint efficiency permitted by UW-12(a), in which case:

(a) Category A and B welds connecting the vessel sections or heads shall be of Type No. (1) or Type No. (2) of Table UW-12;

(b) Category B or C butt welds [but not including those in nozzles or communicating chambers except as required in (2) above] which intersect the Category A butt welds in vessel sections or heads or connect seamless vessel sections or heads shall, as a minimum, meet the requirements for spot radiography in accordance with UW-52. Spot radiographs required by this paragraph shall not be used to satisfy the spot radiography rules as applied to any other weld increment.

(6) all butt welds joined by electrogas welding with any single pass greater than $1\frac{1}{2}$ in. (38 mm) and all butt welds joined by electroslag welding;

(7) ultrasonic examination in accordance with UW-53 may be substituted for radiography for the final closure seam of a pressure vessel if the construction of the vessel does not permit interpretable radiographs in accordance with Code requirements. The absence of suitable radiographic equipment shall not be justification for such substitution.

(8) exemptions from radiographic examination for certain welds in nozzles and communicating chambers as described in (2), (4), and (5) above take precedence over the radiographic requirements of Subsection C of this Division.

(b) *Spot Radiography.* Except as required in (a)(5)(b) above, butt welded joints made in accordance with Type No. (1) or (2) of Table UW-12 which are not required to be fully radiographed by (a) above, may be examined by spot radiography. Spot radiography shall be in accordance with UW-52. If spot radiography is specified for the entire vessel, radiographic examination is not required of Category B and C butt welds in nozzles and communicating chambers that exceed neither NPS 10 nor $1\frac{1}{8}$ in. (29 mm) wall thickness.

NOTE: This requirement specifies spot radiography for butt welds of Type No. (1) or No. (2) that are used in a vessel, but does not preclude the use of fillet and/or corner welds permitted by other

paragraphs, such as for nozzle and manhole attachments, welded stays, flat heads, etc., which need not be spot radiographed.

(c) *No Radiography.* Except as required in (a) above, no radiographic examination of welded joints is required when the vessel or vessel part is designed for external pressure only, or when the joint design complies with UW-12(c).

(d) Electroslag welds in ferritic materials with any single pass greater than $1\frac{1}{2}$ in. (38 mm) and electroslag welds in ferritic materials shall be ultrasonically examined throughout their entire length in accordance with the requirements of Appendix 12. This ultrasonic examination shall be done following the grain refining (austenitizing) heat treatment or postweld heat treatment.

(e) In addition to the requirements in (a) and (b) above, all welds made by the electron beam process shall be ultrasonically examined for their entire length in accordance with the requirements of Appendix 12.

(f) When radiography is required for a welded joint in accordance with (a) and (b) above, and the weld is made by the inertia and continuous drive friction welding processes, the welded joints shall also be ultrasonically examined for their entire length in accordance with Appendix 12.

(g) For radiographic and ultrasonic examination of butt welds, the definition of nominal thickness at the welded joint under consideration shall be the nominal thickness of the thinner of the two parts joined. Nominal thickness is defined in 3-2.

UW-12 JOINT EFFICIENCIES

Table UW-12 gives the joint efficiencies E to be used in the formulas of this Division for joints completed by an arc or gas welding process. Except as required by UW-11(a)(5), a joint efficiency depends only on the type of joint and on the degree of examination of the joint and does not depend on the degree of examination of any other joint. The User or his designated agent [see U-2(a)] shall establish the type of joint and the degree of examination when the rules of this Division do not mandate specific requirements. Rules for determining the applicability of the efficiencies are found in the various paragraphs covering design formulas [for example, see UG-24(a) and UG-27]. For further guidance, see Appendix L.

(a) A value of E not greater than that given in column (a) of Table UW-12 shall be used in the design calculations for fully radiographed butt joints [see UW-11(a)], except that when the requirements of UW-11(a)(5) are not met, a value of E not greater than that given in column (b) of Table UW-12 shall be used.

(b) A value of E not greater than that given in column (b) of Table UW-12 shall be used in the design calculations for spot radiographed butt welded joints [see UW-11(b)].

(c) A value of E not greater than that given in column (c) of Table UW-12 shall be used in the design calculations for welded joints that are neither fully radiographed nor spot radiographed [see UW-11(c)].

(d) Seamless vessel sections or heads shall be considered equivalent to welded parts of the same geometry in which all Category A welds are Type No. 1. For calculations involving circumferential stress in seamless vessel sections or for thickness of seamless heads, $E = 1.0$ when the spot radiography requirements of UW-11(a)(5)(b) are met. $E = 0.85$ when the spot radiography requirements of UW-11(a)(5)(b) are not met, or when the Category A or B welds connecting seamless vessel sections or heads are Type No. 3, 4, 5, or 6 of Table UW-12.

(e) Welded pipe or tubing shall be treated in the same manner as seamless, but with allowable tensile stress taken from the welded product values of the stress tables, and the requirements of UW-12(d) applied.

(f) A value of E not greater than 0.80 may be used in the formulas of this Division for joints completed by any of the pressure welding processes given in UW-27(a), except for electric resistance welding, provided the welding process used is permitted by the rules in the applicable parts of Subsection C for the material being welded. The quality of such welds used in vessels or parts of vessels shall be proved as follows: Test specimens shall be representative of the production welding on each vessel. They may be removed from the shell itself or from a prolongation of the shell including the longitudinal joint, or, in the case of vessels not containing a longitudinal joint, from a test late of the same material and thickness as the vessel and welded in accordance with the same procedure. One reduced-section tension test and two side-bend tests shall be made in accordance with, and shall meet the requirements of QW-150 and QW-160, Section IX.

UW-13 ATTACHMENT DETAILS

(a) Definitions

t_h = nominal thickness of head, in. (mm)

t_p = minimum distance from outside surface of flat head to edge of weld preparation measured as shown in Fig. UW-13.2, in. (mm)

t_s = nominal thickness of shell, in. (mm)

(See UG-27, UG-28, UG-32, UG-34, and other paragraphs for additional definitions.)

TABLE UW-12
MAXIMUM ALLOWABLE JOINT EFFICIENCIES^{1,2} FOR ARC AND GAS WELDED JOINTS

Type No.	Joint Description	Limitations	Joint Category	Degree of Radiographic Examination		
				(a) Full ³	(b) Spot ³	(c) None
(1)	Butt joints as attained by double welding or by other means which will obtain the same quality of deposited weld metal on the inside and outside weld surfaces to agree with the requirements of UW-55. Welds using metal backing strips which remain in place are excluded.	None	A, B, C, & D	1.00	0.85	0.70
(2)	Single-welded butt joint with backing strip other than those included under (1)	(a) None except as in (b) below (b) Circumferential butt joints with one plate offset; see UW-23(b)(4) and Fig. UW-23.1, sketch (k)	A, B, C, & D A, B, & C	0.90 0.70	0.80 0.80	0.65 0.65
(3)	Single-welded butt joint without use of backing strip	Circumferential butt joints only; not over 24 in. (610 mm) thick and not over 24 in. (610 mm) outside diameter	A, B, & C	NA	NA	0.60
(4)	Double full fillet lap joint	(a) Longitudinal joints not over 24 in. (610 mm) thick (b) Circumferential joints not over 24 in. (610 mm) thick	A B & C*	NA NA	NA NA	0.55 0.55
(5)	Single full fillet lap joints with plug welds conforming to UW-17	(a) Circumferential joints* for attachment of heads not over 24 in. (610 mm) outside diameter to shells not over 1/2 in. (13 mm) thick (b) Circumferential joints for the attachment to shells of jackets not over 24 in. (610 mm) in nominal thickness where the distance from the center of the plug weld to the edge of the plate is not less than 1 1/2 times the diameter of the hole for the plug.	B C	NA NA	NA NA	0.50 0.50

(continued)

TABLE UW-12
 MAXIMUM ALLOWABLE JOINT EFFICIENCIES^{1,5} FOR ARC AND GAS WELDED JOINTS (CONT'D)

Type No.	Joint Description	Limitations	Joint Category	Degree of Radiographic Examination		
				(a) Full ²	(b) Spot ³	(c) None
(e)	Single full fillet lap joints without plug welds	(a) For the attachment of heads convex to pressure to shells not over $\frac{3}{8}$ in. (16 mm) required thickness, only with use of fillet weld on inside of shell; or (b) For attachment of heads having pressure on either side, to shells not over 24 in. (610 mm) inside diameter and not over $\frac{3}{4}$ in. (6 mm) required thickness with fillet weld on outside of head flange only	A & B	NA	NA	0.45
			A & B	NA	NA	0.45

NOTES:

- (1) The single factor shown for each combination of joint category and degree of radiographic examination replaces both the stress reduction factor and the joint efficiency factor considerations previously used in this Division.
- (2) See UW-12(a) and UW-91.
- (3) See UW-12(b) and UW-92.
- (4) Joints attaching hemispherical heads to shells are excluded.
- (5) $E = 1.0$ for butt joints in compression.
- (6) For Type No. 4 Category C joint, limitation not applicable for bolted flange connections.

ANEXOS IX

ESFUERZO DE LA COSTURA CIRCUNFERENCIAL.

SEC. VII, DIV. 1, B PT U-G 27

UG-25

PART UG — GENERAL REQUIREMENTS

UG-27

(e) *Telltale Holes.* Telltale holes may be used to provide some positive indication when the thickness has been reduced to a dangerous degree. Telltale holes shall not be used in vessels which are to contain lethal substances [see UW-2(a)], except as permitted by ULW-76 for vent holes in layered construction. When telltale holes are provided, they shall have a diameter of $\frac{1}{16}$ in. to $\frac{3}{16}$ in. (1.6 mm to 4.8 mm) and have a depth not less than 80% of the thickness required for a seamless shell of like dimensions. These holes shall be provided in the opposite surface to that where deterioration is expected. [For telltale holes in clad or lined vessels, see UCL-25(b).]

(f) *Openings for Drain.* Vessels subject to corrosion shall be supplied with a suitable drain opening at the lowest point practicable in the vessel; or a pipe may be used extending inward from any other location to within $\frac{1}{4}$ in. (6 mm) of the lowest point.

UG-26 LININGS

Corrosion resistant or abrasion resistant linings, whether or not attached to the wall of a vessel, shall not be considered as contributing to the strength of the wall except as permitted in Part UCL (see Appendix F).

UG-27 THICKNESS OF SHELLS UNDER INTERNAL PRESSURE

(a) The thickness of shells under internal pressure shall be not less than that computed by the following formulas.¹⁴ In addition, provision shall be made for any of the other loadings listed in UG-22, when such loadings are expected. (See UG-16.)

(b) The symbols defined below are used in the formulas of this paragraph.

t = minimum required thickness of shell, in. (mm)

P = internal design pressure (see UG-21), psi (kPa)

R = inside radius of the shell course under consideration,¹⁵ in. (mm)

S = maximum allowable stress value, psi (kPa) (see UG-23 and the stress limitations specified in UG-24)

E = joint efficiency for, or the efficiency of, appropriate joint in cylindrical or spherical shells, or

¹⁴ Formulas in terms of the outside radius and for thicknesses and pressures beyond the limits fixed in this paragraph are given in 1-1 to 1-3.

¹⁵ For pipe, the inside radius R is determined by the nominal outside radius minus the nominal wall thickness.

the efficiency of ligaments between openings, whichever is less.

For welded vessels, use the efficiency specified in UW-12.

For ligaments between openings, use the efficiency calculated by the rules given in UG-53.

(c) *Cylindrical Shells.* The minimum thickness or maximum allowable working pressure of cylindrical shells shall be the greater thickness or lesser pressure as given by (1) or (2) below.

(1) *Circumferential Stress (Longitudinal Joints).* When the thickness does not exceed one-half of the inside radius, or P does not exceed $0.385SE$, the following formulas shall apply:

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad \text{or} \quad P = \frac{SEt}{R + 0.6t} \quad (1)$$

(2) *Longitudinal Stress (Circumferential Joints).*¹⁶ When the thickness does not exceed one-half of the inside radius, or P does not exceed $1.25SE$, the following formulas shall apply:

$$t = \frac{PR}{2SE + 0.4P} \quad \text{or} \quad P = \frac{2SEt}{R - 0.4t} \quad (2)$$

(d) *Spherical Shells.* When the thickness of the shell of a wholly spherical vessel does not exceed $0.356R$, or P does not exceed $0.665SE$, the following formulas shall apply:

$$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P} \quad \text{or} \quad P = \frac{2SEt}{R + 0.2t} \quad (3)$$

(e) When necessary, vessels shall be provided with stiffeners or other additional means of support to prevent overstress or large distortions under the external loadings listed in UG-22 other than pressure and temperature.

(f) A stayed jacket shell that extends completely around a cylindrical or spherical vessel shall also meet the requirements of UG-47(c).

(g) Any reduction in thickness within a shell course or spherical shell shall be in accordance with UW-9.

¹⁶ These formulas will govern only when the circumferential joint efficiency is less than one-half the longitudinal joint efficiency, or when the effect of supplementary loadings (UG-22) causing longitudinal bending or tension in conjunction with internal pressure is being investigated. An example illustrating this investigation is given in L-2.1 and L-2.2.

ANEXO X

MARGEN POR CORROSIÓN. SEC. VII, DIV. 1, B PT UG 25.

UG-24

2001 SECTION VIII — DIVISION 1

UG-25

(b) at least three pilot castings¹³ representing the first lot of five castings made from a new or altered design are sectioned or radiographed at all critical sections (see footnote 1, Appendix 7) without revealing any defects;

(c) one additional casting taken at random from every subsequent lot of five is sectioned or radiographed at all critical sections without revealing any defects; and

(d) all castings other than those which have been radiographed are examined at all critical sections by the magnetic particle or liquid penetrant methods in accordance with the requirements of Appendix 7.

(3) For nonferrous and ductile cast iron materials, a factor not to exceed 90% may be used for a single casting which has been radiographed at all critical sections and found free of defects.

(4) For nonferrous and ductile cast iron materials, a factor not to exceed 90% may be used for a casting which has been machined to the extent that all critical sections are exposed for examination for the full wall thickness; as in tubesheets drilled with holes spaced no farther apart than the wall thickness of the casting. The examination afforded may be taken in lieu of destructive or radiographic testing required in (2)(b) above.

(5) For carbon, low alloy, or high alloy steels, higher quality factors may be applied if in addition to the minimum requirements of (a)(1) above, additional examinations are made as follows.

(a) For centrifugal castings, a factor not to exceed 90% may be applied if the castings are examined by the magnetic particle or liquid penetrant methods in accordance with the requirements of Appendix 7.

(b) For static and centrifugal castings a factor not to exceed 100% may be applied if the castings are examined in accordance with all of the requirements of Appendix 7.

(6) The following additional requirements apply when castings (including those permitted in UG-11) are to be used in vessels to contain lethal substances (UW-2).

(a) Castings of cast iron (UCI-2) and cast ductile iron (UCD-2) are prohibited.

(b) Each casting of nonferrous material permitted by this Division shall be radiographed at all critical

sections (see footnote 1, Appendix 7) without revealing any defects. The quality factor for nonferrous castings for lethal service shall not exceed 90%.

(c) Each casting of steel material permitted by this Division shall be examined per Appendix 7 for severe service applications [7-3(b)]. The quality factor for lethal service shall not exceed 100%.

(b) *Defects.* Imperfections defined as unacceptable by either the material specification or by Appendix 7, 7-3, whichever is more restrictive, are considered to be defects and shall be the basis for rejection of the casting. Where defects have been repaired by welding, the completed repair shall be subject to reexamination and, when required by either the rules of this Division or the requirements of the castings specification, the repaired casting shall be postweld heat treated and, to obtain a 90% or 100% quality factor, the repaired casting shall be stress relieved.

(c) *Identification and Marking.* Each casting to which a quality factor greater than 80% is applied shall be marked with the name, trademark, or other traceable identification of the manufacturer and the casting identification, including the casting quality factor and the material designation.

UG-25 CORROSION

(a) The user or his designated agent (see U-2) shall specify corrosion allowances other than those required by the rules of this Division. Where corrosion allowances are not provided, this fact shall be indicated on the Data Report.

(b) Vessels or parts of vessels subject to thinning by corrosion, erosion, or mechanical abrasion shall have provision made for the desired life of the vessel by a suitable increase in the thickness of the material over that determined by the design formulas, or by using some other suitable method of protection. (See Appendix E.)

NOTE: When using high alloys and nonferrous materials either for solid wall or clad or lined vessels, refer to UHA-6, UCL-3, and UNF-4, as appropriate.

(c) Material added for these purposes need not be of the same thickness for all parts of the vessel if different rates of attack are expected for the various parts.

(d) No additional thickness need be provided when previous experience in like service has shown that corrosion does not occur or is of only a superficial nature.

¹³ *Pilot casting* — Any one casting, usually one of the first from a new pattern, poured of the same material and using the identical foundry procedure (risering, gating, pouring, and molting) as the castings it is intended to represent. Any pilot casting or castings taken to represent a lot and the castings of that lot shall be poured from a heat of metal from which the castings on the current order are poured.

(e) *Telltale Holes.* Telltale holes may be used to provide some positive indication when the thickness has been reduced to a dangerous degree. Telltale holes shall not be used in vessels which are to contain lethal substances [see UW-2(a)], except as permitted by ULW-76 for vent holes in layered construction. When telltale holes are provided, they shall have a diameter of $\frac{1}{16}$ in. to $\frac{3}{16}$ in. (1.6 mm to 4.8 mm) and have a depth not less than 80% of the thickness required for a seamless shell of like dimensions. These holes shall be provided in the opposite surface to that where deterioration is expected. [For telltale holes in clad or lined vessels, see UCL-25(b).]

(f) *Openings for Drain.* Vessels subject to corrosion shall be supplied with a suitable drain opening at the lowest point practicable in the vessel; or a pipe may be used extending inward from any other location to within $\frac{1}{4}$ in. (6 mm) of the lowest point.

UG-26 LININGS

Corrosion resistant or abrasion resistant linings, whether or not attached to the wall of a vessel, shall not be considered as contributing to the strength of the wall except as permitted in Part UCL (see Appendix F).

UG-27 THICKNESS OF SHELLS UNDER INTERNAL PRESSURE

(a) The thickness of shells under internal pressure shall be not less than that computed by the following formulas.¹⁴ In addition, provision shall be made for any of the other loadings listed in UG-22, when such loadings are expected. (See UG-16.)

(b) The symbols defined below are used in the formulas of this paragraph.

t = minimum required thickness of shell, in. (mm)

P = internal design pressure (see UG-21), psi (kPa)

R = inside radius of the shell course under consideration,¹⁵ in. (mm)

S = maximum allowable stress value, psi (kPa) (see UG-23 and the stress limitations specified in UG-24)

E = joint efficiency for, or the efficiency of, appropriate joint in cylindrical or spherical shells, or

the efficiency of ligaments between openings, whichever is less.

For welded vessels, use the efficiency specified in UW-12.

For ligaments between openings, use the efficiency calculated by the rules given in UG-53.

(c) *Cylindrical Shells.* The minimum thickness or maximum allowable working pressure of cylindrical shells shall be the greater thickness or lesser pressure as given by (1) or (2) below.

(1) *Circumferential Stress (Longitudinal Joints).* When the thickness does not exceed one-half of the inside radius, or P does not exceed $0.385SE$, the following formulas shall apply:

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad \text{or} \quad P = \frac{SEt}{R + 0.6t} \quad (1)$$

(2) *Longitudinal Stress (Circumferential Joints).*¹⁶ When the thickness does not exceed one-half of the inside radius, or P does not exceed $1.25SE$, the following formulas shall apply:

$$t = \frac{PR}{2SE + 0.4P} \quad \text{or} \quad P = \frac{2SEt}{R - 0.4t} \quad (2)$$

(d) *Spherical Shells.* When the thickness of the shell of a wholly spherical vessel does not exceed $0.356R$, or P does not exceed $0.665SE$, the following formulas shall apply:

$$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P} \quad \text{or} \quad P = \frac{2SEt}{R + 0.2t} \quad (3)$$

(e) When necessary, vessels shall be provided with stiffeners or other additional means of support to prevent overstress or large distortions under the external loadings listed in UG-22 other than pressure and temperature.

(f) A stayed jacket shell that extends completely around a cylindrical or spherical vessel shall also meet the requirements of UG-47(c).

(g) Any reduction in thickness within a shell course or spherical shell shall be in accordance with UW-9.

¹⁴Formulas in terms of the outside radius and for thicknesses and pressures beyond the limits fixed in this paragraph are given in 1-1 to 1-3.

¹⁵For pipe, the inside radius R is determined by the nominal outside radius minus the nominal wall thickness.

¹⁶These formulas will govern only when the circumferential joint efficiency is less than one-half the longitudinal joint efficiency, or when the effect of supplementary loadings (UG-22) causing longitudinal bending or tension in conjunction with internal pressure is being investigated. An example illustrating this investigation is given in L-2.1 and L-2.2.

ANEXO XI

TIPOS DE CABEZAS.

SEC. VII, DIV. 1, B PT U-G-32 (f).

UG-31

PART UG — GENERAL REQUIREMENTS

UG-32

01 UG-31 TUBES, AND PIPE WHEN USED AS TUBES OR SHELLS

(a) *Internal Pressure.* The required wall thickness for tubes and pipe under internal pressure shall be determined in accordance with the rules for shells in UG-27.

(b) *External Pressure.* The required wall thickness for tubes and pipe under external pressure shall be determined in accordance with the rules in UG-28.

(c) The thickness as determined under (a) or (b) above shall be increased when necessary to meet the following requirements.

(1) Additional wall thickness should be provided when corrosion, erosion, or wear due to cleaning operations is expected.

(2) Where ends are threaded, additional wall thickness is to be provided in the amount of $0.8/n$ in. ($20/n$ mm) [where n equals the number of threads per inch (25.4 mm)].

NOTE: The requirements for rolling, expanding, or otherwise seating tubes in tube plates may require additional wall thickness and careful choice of materials because of possible relaxation due to differential expansion stresses.

01 UG-32 FORMED HEADS, AND SECTIONS, PRESSURE ON CONCAVE SIDE

(a) The required thickness at the thinnest point after forming¹⁹ of ellipsoidal, torispherical, hemispherical, conical, and toriconical heads under pressure on the concave side (plus heads) shall be computed by the appropriate formulas in this paragraph²⁰ (see UG-16). In addition, provision shall be made for any of the other loadings given in UG-22.

(b) The thickness of an unstayed ellipsoidal or torispherical head shall in no case be less than the required thickness of a seamless hemispherical head divided by the efficiency of the head-to-shell joint.

(c) The symbols defined below are used in the formulas of this paragraph:

t = minimum required thickness of head after forming, in. (mm)

P = internal design pressure (see UG-21), psi (kPa)

D = inside diameter of the head skirt; or inside length of the major axis of an ellipsoidal head; or inside diameter of a conical head at the point under consideration, measured perpendicular to the longitudinal axis, in. (mm)

D_1 = inside diameter of the conical portion of a toriconical head at its point of tangency to the knuckle, measured perpendicular to the axis of the cone, in. (mm)

$= D - 2r(1 - \cos\alpha)$

r = inside knuckle radius, in. (mm)

S = maximum allowable stress value in tension as given in the tables referenced in UG-23, psi (kPa), except as limited in UG-24 and (e) below.

E = lowest efficiency of any joint in the head; for hemispherical heads this includes head-to-shell joint; for welded vessels, use the efficiency specified in UW-12

L = inside spherical or crown radius, in. (mm)

α = one-half of the included (apex) angle of the cone at the center line of the head (see Fig. 1-4)

(d) *Ellipsoidal Heads.* The required thickness of a dished head of semiellipsoidal form, in which half the minor axis (inside depth of the head minus the skirt) equals one-fourth of the inside diameter of the head skirt, shall be determined by

$$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P} \quad \text{or} \quad P = \frac{2SEt}{D + 0.2t} \quad (1)$$

An acceptable approximation of a 2:1 ellipsoidal head is one with a knuckle radius of $0.17D$ and a spherical radius of $0.90D$.

(e) *Torispherical Heads.* The required thickness of a torispherical head for the case in which the knuckle radius is 6% of the inside crown radius and the inside crown radius equals the outside diameter of the skirt, [see (j) below], shall be determined by

$$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P} \quad \text{or} \quad P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t} \quad (2)$$

Torispherical heads made of materials having a specified minimum tensile strength exceeding 70,000 psi (483 MPa) shall be designed using a value of S equal to 20,000 psi (138 000 kPa) at room temperature and reduced in proportion to the reduction in maximum allowable stress values at temperature for the material (see UG-23).

¹⁹In order to ensure that a finished head is not less than the minimum thickness required, it is customary to use a thicker plate to take care of possible thinning during the process of forming. The neck of an opening in a head with an integrally flanged opening will thin out due to the fluting operation. This is permissible provided the neck thickness is not less than the thickness required for a cylindrical shell subject to internal and/or external pressure, as applicable, and having an inside diameter equal to the maximum diameter of the opening [see UG-38(a) and UG-46(j)].

²⁰Formulas in terms of outside dimensions and for heads of other proportions are given in 1-4 together with illustrative examples.

(f) *Hemispherical Heads.* When the thickness of a hemispherical head does not exceed $0.356L$, or P does not exceed $0.665SE$, the following formulas shall apply:

$$t = \frac{PL}{2SE - 0.2P} \quad \text{or} \quad P = \frac{2SEt}{L + 0.2t} \quad (3)$$

(g) *Conical Heads and Sections (Without Transition Knuckle).* The required thickness of conical heads or conical shell sections that have a half apex-angle α not greater than 30 deg. shall be determined by

$$t = \frac{PD}{2 \cos \alpha (SE - 0.6P)} \quad \text{or} \quad P = \frac{2SEt \cos \alpha}{D + 1.2t \cos \alpha} \quad (4)$$

A reinforcing ring shall be provided when required by the rule in 1-5(d) and (e).

Conical heads or sections having a half apex-angle α greater than 30 deg. without a transition knuckle shall comply with Formula (4) and 1-5(g).

(h) *Toriconical Heads and Sections.* The required thickness of the conical portion of a toriconical head or section, in which the knuckle radius is neither less than 6% of the outside diameter of the head skirt nor less than three times the knuckle thickness, shall be determined by Formula (4) in (g) above, using D_1 in place of D .

The required thickness of the knuckle shall be determined by Formula (3) of 1-4(d) in which

$$L = \frac{D_1}{2 \cos \alpha}$$

Toriconical heads or sections may be used when the angle $\alpha \leq 30$ deg. and are mandatory for conical head designs when the angle α exceeds 30 deg., unless the design complies with 1-5(g).

(i) When an ellipsoidal, torispherical, hemispherical, conical, or toriconical head is of a lesser thickness than required by the rules of this paragraph, it shall be stayed as a flat surface according to the rules of UG-47 for braced and stayed flat plates.

(j) The inside crown radius to which an unstayed head is dished shall be not greater than the outside diameter of the skirt of the head. The inside knuckle radius of a torispherical head shall be not less than 6% of the outside diameter of the skirt of the head but in no case less than 3 times the head thickness.

(k) A dished head with a reversed skirt may be used in a pressure vessel provided the maximum allowable working pressure for the head is established in accordance with the requirements of UG-101.

(l) All formed heads, thicker than the shell and concave to pressure, intended for butt welded attachment, shall have a skirt length sufficient to meet the requirements of Fig. UW-13.1, when a tapered transition is required. All formed heads concave to pressure and intended for butt welded attachment need not have an integral skirt when the thickness of the head is equal to or less than the thickness of the shell. When a skirt is provided, its thickness shall be at least that required for a seamless shell of the same inside diameter.

(m) Heads concave to pressure, intended for attachment by brazing, shall have a skirt length sufficient to meet the requirements for circumferential joints in Part UB.

(n) Any taper at a welded joint within a formed head shall be in accordance with UW-9. The taper at a circumferential welded joint connecting a formed head to a main shell shall meet the requirements of UW-13 for the respective type of joint shown therein.

(o) If a torispherical, ellipsoidal, or hemispherical head is formed with a flattened spot or surface, the diameter of the flat spot shall not exceed that permitted for flat heads as given by Formula (1) in UG-34, using $C = 0.25$.

(p) Openings in formed heads under internal pressure shall comply with the requirements of UG-36 through UG-46.

(q) A stayed jacket that completely covers a formed inner head or any of the types included in this paragraph shall also meet the requirements of UG-47(c).

UG-33 FORMED HEADS, PRESSURE ON CONVEX SIDE

(a) *General.* The required thickness at the thinnest point after forming [see footnote 20, UG-32(a)] of ellipsoidal, torispherical, hemispherical, toriconical, and conical heads and conical segments under pressure on the convex side (minus heads) shall be computed by the appropriate formulas given in this paragraph (see UG-16). In addition, provisions shall be made for any other loading given in UG-22. The required thickness for heads due to pressure on the convex side shall be determined as follows.

(1) For ellipsoidal and torispherical heads, the required thickness shall be the greater of the following:

(a) the thickness computed by the procedure given in UG-32 for heads with pressure on the concave side (plus heads) using a design pressure 1.67 times the design pressure on the convex side, assuming a joint efficiency $E = 1.00$ for all cases; or

ANEXO XII

SEC. VII, DIV. 1, APPENDIX 1.3 Y 1.4 (d).

APPENDIX 1 SUPPLEMENTARY DESIGN FORMULAS

1-1 THICKNESS OF CYLINDRICAL AND SPHERICAL SHELLS

(a) The following formulas, in terms of the outside radius, are equivalent to and may be used instead of those given in UG-27(c) and (d).

(1) For cylindrical shells (circumferential stress),

$$t = \frac{PR_o}{SE + 0.4P} \quad \text{or} \quad P = \frac{SEt}{R_o - 0.4t} \quad (1)$$

where

R_o = outside radius of the shell course under consideration, in. (mm)

(2) For spherical shells,

$$t = \frac{PR_o}{2SE + 0.8P} \quad \text{or} \quad P = \frac{2SEt}{R_o - 0.8t} \quad (2)$$

Other symbols are as defined in UG-27.

1-2 THICK CYLINDRICAL SHELLS

(a)(1) *Circumferential Stress (Longitudinal Joints)*. When the thickness of the cylindrical shell under internal design pressure exceeds one-half of the inside radius, or when P exceeds $0.385SE$, the following formulas shall apply:

When P is known and t is desired,

$$t = R(Z^{1/2} - 1) = R_o \frac{(Z^{1/2} - 1)}{Z^{1/2}} \quad (1)$$

where

$$Z = \frac{SE + P}{SE - P}$$

Where t is known and P is desired,

$$P = SE \left(\frac{Z - 1}{Z + 1} \right) \quad (2)$$

where

$$Z = \left(\frac{R + t}{R} \right)^2 = \left(\frac{R_o}{R} \right)^2 = \left(\frac{R_o}{R_o - t} \right)^2$$

(2) *Longitudinal Stress (Circumferential Joints)*.

When the thickness of the cylindrical shell under internal design pressure exceeds one-half of the inside radius, or when P exceeds $1.25SE$, the following formulas shall apply:

When P is known and t is desired,

$$t = R(Z^{1/2} - 1) = R_o \left(\frac{Z^{1/2} - 1}{Z^{1/2}} \right) \quad (3)$$

where

$$Z = \left(\frac{P}{SE} + 1 \right)$$

When t is known and P is desired,

$$P = SE(Z - 1) \quad (4)$$

where

$$Z = \left(\frac{R + t}{R} \right)^2 = \left(\frac{R_o}{R} \right)^2 = \left(\frac{R_o}{R_o - t} \right)^2$$

Symbols are as defined in UG-27 and 1-1.

1-3 THICK SPHERICAL SHELLS

When the thickness of the shell of a wholly spherical vessel or of a hemispherical head under internal design pressure exceeds $0.356R$, or when P exceeds $0.665SE$, the following formulas shall apply:

$$\frac{D}{2b} = \frac{40}{18} = 2.22$$

From Table 1-4.1, $K = 1.14$. Substituting in Eq. (1),

$$t = \frac{200 \times 40 \times 1.14}{[2 \times 13,750 \times (1.00) - (0.2 \times 200)]} = 0.33 \text{ in.}$$

Example 2² Determine the maximum allowable working pressure P of a seamless ellipsoidal head for the following conditions:

$D = 30$ in.; $h = 7.5$ in.; total thickness = $\frac{1}{2}$ in. with no allowance for corrosion; maximum operating temperature = 800°F; $E = 1.00$.

From the appropriate table given in Subpart 1 of Section II, Part D, $S = 10,200$ psi.

$$\frac{D}{2b} = \frac{30}{15} = 2.0$$

From Table 1-4.1, $K = 1.0$. Substituting in Eq. (1),

$$P = \frac{2 \times 10,200 \times 1.0 \times 0.5}{[1 \times 30 + (0.2 \times 0.5)]} = 339 \text{ psi}$$

(d) Torispherical Heads¹

$$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P} \quad \text{or} \quad P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t} \quad (3)$$

$$t = \frac{PL_0M}{2SE + P(M - 0.2)}$$

or

$$P = \frac{2SEt}{ML_0 - t(M - 0.2)} \quad (4)$$

where

$$M = \frac{1}{4} \left(3 + \sqrt{\frac{L}{r}} \right)$$

Numerical values of the factor M are given in Table 1-4.2.

Example 1³ Determine the required thickness t , exclusive of allowance for corrosion, of a torispherical head for the following conditions:

$D = 40$ in.; $L = 40$ in.; $r = 4$ in.; $P = 200$ psi; $S = 13,750$ psi; $E = 1.00$ (seamless head).

$$\frac{L}{r} = \frac{40}{4} = 10$$

and from Table 1-4.2, $M = 1.54$. Substituting in Eq. (3),

$$t = \frac{200 \times 40 \times 1.54}{[2 \times 13,750 \times (1.00) - (0.2 \times 200)]} = 0.45 \text{ in.}$$

Example 2³ Determine the maximum allowable working pressure P of a torispherical head for the following conditions:

$D = 30$ in.; $L = 24$ in.; $r = 2.00$ in.; $E = 1.00$ (seamless head); total thickness = 0.5 in. with no allowance for corrosion; material conforms to SA-515 Grade 70; maximum operating temperature = 900°F.

From the appropriate table given in Subpart 1 of Section II, Part D, $S = 6500$ psi.

$$\frac{L}{r} = \frac{24}{2.00} = 12.0$$

From Table 1-4.2, $M = 1.62$. Substituting in Eq. (3),

$$P = \frac{2 \times 6500 \times 1.0 \times 0.5}{24 \times 1.62 + 0.2 \times 0.5} = 167 \text{ psi}$$

(e) Conical Heads

$$t = \frac{PD_0}{2 \cos \alpha (SE - 0.6P)}$$

or

$$P = \frac{2SEt \cos \alpha}{D_0 + 1.2t \cos \alpha} \quad (5)$$

$$t = \frac{PD_0}{2 \cos \alpha (SE + 0.4P)}$$

ANEXO XIII

FACTOR “M”

SEC. VII, DIV. 1, APPENDIX 1.3 Y 1.4 (d).

1-4

APPENDIX 1 — MANDATORY

1-5

TABLE 1-4.2
VALUES OF FACTOR *M*
(Use Nearest Value of *L/c*; Interpolation Unnecessary)

<i>L/c</i>	1.0	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50
<i>M</i>	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22
<i>L/c</i>	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0
<i>M</i>	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50
<i>L/c</i>	9.5	10.00	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	$16\frac{2}{3}^{(1)}$
<i>M</i>	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77

NOTE:

(1) Maximum ratio allowed by UG-37(j) when *L* equals the outside diameter of the skirt of the head.

ANEXO XIV

ESPECIFICACIONES DE RESISTENCIA. SHIGLEY, J., Diseño en Ingeniería Mecánica, 2008.

Table 8-9
SAE Specifications for Steel Bolts

SAE Grade No.	Size Range Inclusive, in	Minimum Proof Strength,* kpsi	Minimum Tensile Strength,* kpsi	Minimum Yield Strength,* kpsi	Material	Head Marking
1	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	33	60	36	low or medium carbon	
2	$\frac{1}{4}$ - $\frac{3}{4}$ $\frac{7}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	55	74	57	low or medium carbon	
		33	60	36		
4	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	65	115	100	Medium carbon, cold-drawn	
5	$\frac{1}{4}$ -1 $1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	85	120	92	Medium carbon, Q&T	
		74	105	81		
5.2	$\frac{1}{4}$ -1	85	120	92	low-carbon martensite, Q&T	
7	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	105	133	115	Medium-carbon alloy, Q&T	
8	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	120	150	130	Medium-carbon alloy, Q&T	
8.2	$\frac{1}{4}$ -1	120	150	130	low-carbon martensite, Q&T	

*Minimum strengths are strengths exceeded by 99 percent of fasteners.

ASTM specifications are listed in Table 8-10. ASTM threads are shorter because ASTM deals mostly with structures; structural connections are generally loaded in shear, and the decreased thread length provides more shank area.

Specifications for metric fasteners are given in Table 8-11.

It is worth noting that all specification-grade bolts made in this country bear a manufacturer's mark or logo, in addition to the grade marking, on the bolt head. Such marks confirm that the bolt meets or exceeds specifications. If such marks are missing, the bolt may be imported; for imported bolts there is no obligation to meet specifications.

Bolts in fatigue axial loading fail at the fillet under the head, at the thread runout, and at the first thread engaged in the nut. If the bolt has a standard shoulder under

Table 8-10
ASTM Specifications for Steel Bolts

ASTM Designation No.	Size Range, Inclusive, in	Minimum Proof Strength,* kpsi	Minimum Tensile Strength,* kpsi	Minimum Yield Strength,* kpsi	Material	Head Marking
A307	$\frac{1}{2}$ - $1\frac{1}{2}$	33	60	36	Low carbon	
A325, type 1	$\frac{1}{2}$ -1	85	120	92	Medium carbon, Q&T	
	$1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	74	105	81		
A325, type 2	$\frac{1}{2}$ -1	85	120	92	Low-carbon, martensite, Q&T	
	$1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	74	105	81		
A325, type 3	$\frac{1}{2}$ -1	85	120	92	Weathering steel, Q&T	
	$1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	74	105	81		
A354, grade BC	$\frac{1}{2}$ - $2\frac{1}{2}$	105	125	109	Alloy steel, Q&T	
	$2\frac{3}{4}$ -4	95	115	99		
A354, grade BD	$\frac{1}{2}$ -4	120	150	130	Alloy steel, Q&T	
A449	$\frac{1}{2}$ -1	85	120	92	Medium-carbon, Q&T	
	$1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	74	105	81		
	$1\frac{3}{4}$ -3	55	90	58		
A490, type 1	$\frac{1}{2}$ - $1\frac{1}{2}$	120	150	130	Alloy steel, Q&T	
A490, type 3	$\frac{1}{2}$ - $1\frac{1}{2}$	120	150	130	Weathering steel, Q&T	

*Minimum strengths are strengths exceeded by 99 percent of fasteners.

Table 8-11

Metric Mechanical Property Classes for Steel Bolts, Screws, and Studs*

Property Class	Size Range, Inclusive	Minimum Proof Strength, [†] MPa	Minimum Tensile Strength, [†] MPa	Minimum Yield Strength, [†] MPa	Material	Head Marking
4.6	M5–M36	225	400	240	Low or medium carbon	
4.8	M1.6–M16	310	420	340	Low or medium carbon	
5.8	M5–M24	380	520	420	Low or medium carbon	
8.8	M1.6–M36	600	830	660	Medium carbon, Q&T	
9.8	M1.6–M16	650	900	720	Medium carbon, Q&T	
10.9	M5–M36	830	1040	940	Low-carbon martensite, Q&T	
12.9	M1.6–M36	970	1220	1100	Alloy, Q&T	

*The thread length for bolts and cap screws is

$$l_T = \begin{cases} 2d + 6 & l \leq 125 \\ 2d + 12 & 125 < l \leq 200 \\ 2d + 25 & l > 200 \end{cases}$$

where l is the bolt length. The thread length for structural bolts is slightly shorter than given above.[†]Minimum strengths are strength exceeded by 99 percent of fasteners.

the head, it has a value of K_f from 2.1 to 2.3, and this shoulder fillet is protected from scratching or scoring by a washer. If the thread runout has a 15° or less half-cone angle, the stress is higher at the first engaged thread in the nut. Bolts are sized by examining the loading at the plane of the washer face of the nut. This is the weakest part of the bolt *if and only if* the conditions above are satisfied (washer protection of the shoulder fillet and thread runout $\leq 15^\circ$). Inattention to this requirement has led to a record of 15 percent fastener fatigue failure under the head, 20 percent at thread runout, and 65 percent where the designer is focusing attention. It does little good to concentrate on the plane of the nut washer face if it is not the weakest location.

ANEXOS XV

DIÁMETROS Y ROSCAS MÉTRICAS DE PASO FINO Y DE PASO BASTO.
SHIGLEY, J., DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA, 2008.

Nominal Major Diameter d mm	Coarse-Pitch Series			Fine-Pitch Series		
	Pitch p mm	Tensile-Stress Area A_t mm ²	Minor-Diameter Area A_r mm ²	Pitch p mm	Tensile-Stress Area A_t mm ²	Minor-Diameter Area A_r mm ²
1.6	0.35	1.27	1.07			
2	0.40	2.07	1.79			
2.5	0.45	3.39	2.98			
3	0.5	5.03	4.47			
3.5	0.6	6.78	6.00			
4	0.7	8.78	7.75			
5	0.8	14.2	12.7			
6	1	20.1	17.9			
8	1.25	36.6	32.8	1	39.2	36.0
10	1.5	58.0	52.3	1.25	61.2	56.3
12	1.75	84.3	76.3	1.25	92.1	86.0
14	2	115	104	1.5	125	116
16	2	157	144	1.5	167	157
20	2.5	245	225	1.5	272	259
24	3	353	324	2	384	365
30	3.5	561	519	2	621	596
36	4	817	759	2	915	884
42	4.5	1120	1050	2	1260	1230
48	5	1470	1380	2	1670	1630
56	5.5	2030	1910	2	2300	2250
64	6	2680	2520	2	3030	2980
72	6	3460	3280	2	3860	3800
80	6	4340	4140	1.5	4850	4800
90	6	5590	5360	2	6100	6020
100	6	6990	6740	2	7560	7470
110				2	9180	9080

*The equations and data used to develop this table have been obtained from ANSI B1.1-1974 and B18.3.1-1978. The minor diameter was found from the equation $d_r = d - 1.226869p$, and the pitch diameter from $d_p = d - 0.649519p$. The mean of the pitch diameter and the minor diameter was used to compute the tensile-stress area.

Diameters and Area of Unified Screw Threads UNC and UNF*

Size Designation	Coarse Series—UNC				Fine Series—UNF		
	Nominal Major Diameter In	Threads per Inch N	Tensile-Stress Area A_t , In ²	Minor-Diameter Area A_m , In ²	Threads per Inch N	Tensile-Stress Area A_t , In ²	Minor-Diameter Area A_m , In ²
0	0.0600				80	0.001 80	0.001 51
1	0.0730	64	0.002 63	0.002 18	72	0.002 78	0.002 37
2	0.0860	56	0.003 70	0.003 10	64	0.003 94	0.003 39
3	0.0990	48	0.004 87	0.004 06	56	0.005 23	0.004 51
4	0.1120	40	0.006 04	0.004 96	48	0.006 61	0.005 66
5	0.1250	40	0.007 96	0.006 72	44	0.008 80	0.007 16
6	0.1380	32	0.009 09	0.007 45	40	0.010 15	0.008 74
8	0.1640	32	0.014 0	0.011 96	36	0.014 74	0.012 85
10	0.1900	24	0.017 5	0.014 50	32	0.020 0	0.017 5
12	0.2160	24	0.024 2	0.020 6	28	0.025 8	0.022 6
$\frac{1}{4}$	0.2500	20	0.031 8	0.026 9	28	0.036 4	0.032 6
$\frac{5}{16}$	0.3125	18	0.052 4	0.045 4	24	0.058 0	0.052 4
$\frac{3}{8}$	0.3750	16	0.077 5	0.067 8	24	0.087 8	0.080 9
$\frac{7}{16}$	0.4375	14	0.106 3	0.093 3	20	0.118 7	0.109 0
$\frac{1}{2}$	0.5000	13	0.141 9	0.125 7	20	0.159 9	0.148 6
$\frac{9}{16}$	0.5625	12	0.182	0.162	18	0.203	0.189
$\frac{5}{8}$	0.6250	11	0.226	0.202	18	0.256	0.240
$\frac{3}{4}$	0.7500	10	0.334	0.302	16	0.373	0.351
$\frac{7}{8}$	0.8750	9	0.462	0.419	14	0.509	0.480
1	1.0000	8	0.606	0.551	12	0.663	0.625
$1\frac{1}{4}$	1.2500	7	0.969	0.890	12	1.073	1.024
$1\frac{1}{2}$	1.5000	6	1.405	1.294	12	1.581	1.521

*This table was compiled from ANSI B1.1-1974. The minor diameter was found from the equation $d_m = d - 1.299\ 038p$, and the pitch diameter from $d_p = d - 0.649\ 519p$. The mean of the pitch diameter and the minor diameter was used to compute the tensile-stress area.

ANEXO XVI

MODULO DE ELASTICIDAD – Y PROPIEDADES DE LOS FERROSOS. MEGYESY, EUGENE, MANUAL DE RECIPIENTES A PRESIÓN, 2009.

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES (Continuación)											
NOTAS:											
<ol style="list-style-type: none"> 1. La placa SA-283 ABCD puede usarse para partes de presión en recipientes sujetos a presión siempre que se cumplan todos los requisitos siguientes: <ol style="list-style-type: none"> 1) Que los recipientes no se usen para contener sustancias letales, sean líquidas o gaseosas. 2) Que el material no se utilice en la construcción de calderas de vapor sin fuego directo (ver párrafo U-1 (g)). 3) Que la temperatura de aplicación del material esté comprendida entre -20°F y 650°F. 4) Para cascos, cabezas y boquillas, sólo se use si el espesor de las placas en las que se aplique soldadura de resistencia no exceda de 5/8 de pulg. 2. Para temperaturas de servicio superiores a 850°F se recomienda usar aceros muertos que contengan no menos de 0.10% de silicio residual. Los aceros muertos que han sido deoxidados con grandes cantidades de aluminio y los aceros rebordeados pueden tener propiedades de escurrimiento plástico y ruptura por esfuerzo en el intervalo de temperatura superior a los 850°F, un poco inferiores a las que se han tomado como base para los valores de la tabla. 3. Por exposición prolongada a temperaturas superiores aproximadas de 800°F, la fase de carburo del acero al carbono puede convertirse en grafito. 4. Arriba de 850°F se utilizará sólo acero muerto. 5. No se permite arriba de 450°F; valor de esfuerzo permitido 7000 lb/pulg². 6. No se usará el material en espesores mayores de 2 pulg. 7. Para tubo soldado los valores máximos de esfuerzo permitido son 15% menores. No se tolerará ningún incremento en estos valores de esfuerzo por haberse efectuado radiografía. 8. Los valores de esfuerzo a usar para temperaturas inferiores a -20°F cuando los aceros cumplan con el suplemento (5) SA-20, serán los que se dan en la columna de -20 a 650°F. 											
MODULO DE ELASTICIDAD PARA MATERIALES FERROSOS											
Material	Millones de lb/pulg ² , para temperatura F, de										
	70	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Aceros al carbono con C ≤ 0.30%	29.5	28.8	28.3	27.7	27.3	26.7	25.5	24.2	22.4	20.4	18.0
Aceros al carbono con C < 0.30%	29.3	28.6	28.1	27.5	27.1	26.5	25.3	24.0	22.3	20.2	17.9
Aceros con alto contenido de elementos de aleación	28.3	27.6	27.0	26.5	25.8	25.3	24.8	24.1	23.5	22.8	22.1
Los valores en las Gráficas de Presión Externa son sólo para calcular dicha presión.											

ANEXOS XVII

FACTOR K_f DE REDUCCIÓN A LA FATIGA PARA ELEMENTOS ROSCADOS.

SHIGLEY, J., DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA, 2008.

8-10 Gasketed Joints

If a full gasket is present in the joint, the gasket pressure p is found by dividing the force in the member by the gasket area per bolt. Thus, for N bolts,

$$p = \frac{F_m}{A_g/N} \quad (a)$$

With a load factor n , Eq. (8-25) can be written as

$$F_m = (1 - C)nP - F_i \quad (b)$$

Substituting this into Eq. (a) gives the gasket pressure as

$$p = [F_i - nP(1 - C)] \frac{N}{A_g} \quad (8-32)$$

In full-gasketed joints uniformity of pressure on the gasket is important. To maintain adequate uniformity of pressure adjacent bolts should not be placed more than six nominal diameters apart on the bolt circle. To maintain wrench clearance, bolts should be placed at least three diameters apart. A rough rule for bolt spacing around a bolt circle is

$$3 \leq \frac{\pi D_b}{Nd} \leq 6 \quad (8-33)$$

where D_b is the diameter of the bolt circle and N is the number of bolts.

8-11 Fatigue Loading of Tension Joints

Tension-loaded bolted joints subjected to fatigue action can be analyzed directly by the methods of Chap. 6. Table 8-16 lists average fatigue stress-concentration factors for the fillet under the bolt head and also at the beginning of the threads on the bolt shank. These are already corrected for notch sensitivity and for surface finish. Designers should be aware that situations may arise in which it would be advisable to investigate these factors more closely, since they are only average values. In fact, Peterson⁹ observes that the distribution of typical bolt failures is about 15 percent under the head, 20 percent at the end of the thread, and 65 percent in the thread at the nut face.

Use of rolled threads is the predominant method of thread-forming in screw fasteners, where Table 8-16 applies. In thread-rolling, the amount of cold work and strain-strengthening is unknown to the designer; therefore, fully corrected (including K_f) axial endurance strength is reported in Table 8-17. For cut threads, the methods of Chap. 6 are useful. Anticipate that the endurance strengths will be considerably lower.

Most of the time, the type of fatigue loading encountered in the analysis of bolted joints is one in which the externally applied load fluctuates between zero and some

Table 8-16

Fatigue Stress-Concentration Factors K_f for Threaded Elements

SAE Grade	Metric Grade	Rolled Threads	Cut Threads	Fillet
0 to 2	3.6 to 5.8	2.2	2.8	2.1
4 to 8	6.6 to 10.9	3.0	3.8	2.3

⁹W. D. Pilkey, *Peterson's Stress Concentration Factors*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1997, p. 387.

Table 8-17

Fully Corrected
Endurance Strengths for
Bolts and Screws with
Rolled Threads*

Grade or Class	Size Range	Endurance Strength
SAE 5	$\frac{1}{4}$ –1 in	18.6 kpsi
	$1\frac{1}{8}$ – $1\frac{1}{2}$ in	16.3 kpsi
SAE 7	$\frac{1}{4}$ – $1\frac{1}{2}$ in	20.6 kpsi
SAE 8	$\frac{1}{4}$ – $1\frac{1}{2}$ in	23.2 kpsi
ISO 8.8	M16–M36	129 MPa
ISO 9.8	M1.6–M16	140 MPa
ISO 10.9	M5–M36	162 MPa
ISO 12.9	M1.6–M36	190 MPa

*Repeatedly-applied, axial loading, fully corrected.

ANEXOS XVIII

FACTOR K_d EFECTOS DE LA TEMPERATURA.

SHIGLEY, J., DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA, 208.

7-9 EFECTOS DE LA TEMPERATURA

En las figuras 4-9 y 4-10 se vio que la temperatura cambia todas las propiedades mecánicas de un material, y que la existencia de un esfuerzo estático o medio induce asimismo flujo plástico en el material. (También se verifica probablemente que no hay límite de fatiga para los materiales que operan a altas temperaturas.) Esto significa que, por ejemplo, el diagrama $S-N$ para los aceros perdería el quiebre o ángulo de la curva cuando se utilizara en el caso de temperaturas suficientemente altas.

(El significado del factor k_d de la ecuación (7-15) es para recordar al diseñador que deben considerarse los efectos térmicos o de temperatura.) Aunque se han hecho muchas pruebas, los valores del factor k_d son muy evasivos. Por esta razón las pruebas de laboratorio se recomiendan en alto grado cuando se consideran materiales nuevos o no ensayados.

Las altas temperaturas movilizan las dislocaciones y reducen la resistencia a la fatiga de muchos materiales. Esta movilización origina la conversión de un proceso de falla esencialmente independiente del tiempo, en uno que sí depende de él. Existen así mismo interacciones complicadas en las que interviene el flujo plástico debido a esfuerzo estático o de valor medio, la atmósfera ambiental y el proceso de fatiga. Forest* hizo un buen acopio de datos, algunos de los cuales están graficados en la figura 7-17, de modo que pueda obtenerse una idea general del efecto de temperatura. Obsérvese la gran diferencia en los efectos en un acero de bajo carbono y en un acero de aleación de alta resistencia. El límite de fatiga del acero dulce aumenta al crecer la temperatura hasta aproximadamente 350°C. Este efecto lo origina el envejecimiento por deformación cíclica. La figura 4-9 indica que la temperatura tiene aproximadamente el mismo efecto sobre la resistencia última; pero muestra asimismo que la resistencia de fluencia disminuye constantemente con la temperatura. La omisión de este hecho ha originado algunas fallas desastrosas.

A continuación, obsérvese en la figura 7-17 que el acero de aleación UNS G43400 retiene aproximadamente la misma resistencia a la fatiga hasta una tempe-

* P. G. Forest, *Fatigue of Metals*, Pergamon Press, Londres, 1962.

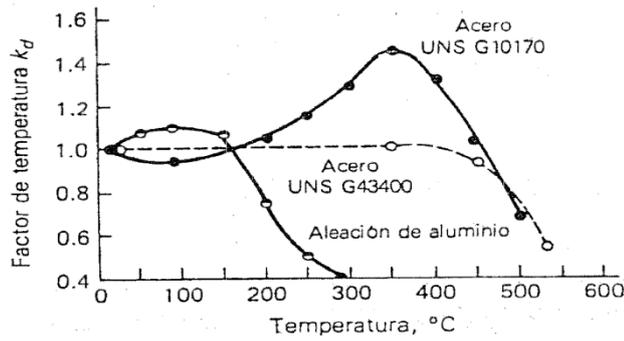


FIGURA 7-17 Gráfica del factor de temperatura para dos aceros forjados y una aleación de aluminio del tipo forjado.

ratura de 450°C, y que el acero dulce vuelve a la resistencia que posee a la temperatura ambiente cuando alcanza la misma temperatura. Estas observaciones se pueden evaluar mediante la relación.

$$k_d = \begin{cases} 1.0 & T \leq 450^\circ\text{C} \text{ (840}^\circ\text{F)} \\ 1 - 5.8(10)^{-3}(T - 450) & 450^\circ\text{C} < T \leq 550^\circ\text{C} \\ 1 - 3.2(10)^{-3}(T - 840) & 840^\circ\text{F} \leq T \leq 1020^\circ\text{F} \end{cases} \quad (7-22)$$

para aceros que no son de alta temperatura y sólo para resolución de problemas. A la temperatura máxima permitida por esta relación, k_d es aproximadamente igual a 0.40. Es probable que un elemento falle por fluencia o flujo plástico a esta temperatura elevada, de modo que es de poco valor el intentar predecir este factor para temperaturas más altas.

Con suficientes datos se pueden expresar relaciones similares para hierros fundidos y aleaciones no ferrosas.

Es importante recordar que el factor de temperatura debe ser aplicada en ambos extremos del diagrama $S-N$, debido a que la resistencia a la fatiga se reduce por el mismo factor en ciclos de 10^3 así como de 10^6 .

ANEXO XIX

SEC. VII, DIV. 1, B PT UW-16.1.

UW-14

PART UW — WELDED VESSELS

UW-16

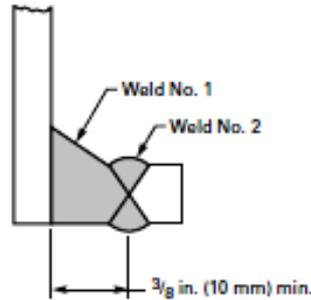


FIG. UW-13.5 FABRICATED LAP JOINT STUB ENDS FOR LETHAL SERVICE

UW-14(d) Except when the adjacent butt weld satisfies the requirement for radiography in (b) above, the edge of openings in solid plate meeting the requirements of UG-36(c)(3) shall not be placed closer than $\frac{1}{2}$ in. (13 mm) from the edge of a Category A, B, or C weld for material $\frac{1}{2}$ in. (38 mm) thick or less.

UW-15 WELDED CONNECTIONS

(a) Nozzles, other connections, and their reinforcements may be attached to pressure vessels by arc or gas welding. Sufficient welding shall be provided on either side of the line through the center of the opening parallel to the longitudinal axis of the shell to develop the strength of the reinforcing parts as prescribed in UG-41 through shear or tension in the weld, whichever is applicable. The strength of groove welds shall be based on the area subjected to shear or to tension. The strength of fillet welds shall be based on the area subjected to shear (computed on the minimum leg dimension.) The inside diameter of a fillet weld shall be used in figuring its length.

(b) Strength calculations for nozzle attachment welds for pressure loading are not required for the following:

(1) Figure UW-16.1 sketches (a), (b), (c), (d), (e), (f-1), (f-2), (f-3), (f-4), (g), (x-1), (y-1), and (z-1), and all the sketches in Figs. UHT-18.1 and UHT-18.2; see L-7.1 and L-7.7;

(2) openings that are exempt from the reinforcement requirements by UG-36(c)(3).

(3) openings designed in accordance with the rules for ligaments in UG-53.

(c) The allowable stress values for groove and fillet welds in percentages of stress values for the vessel material, which are used with UG-41 calculations, are as follows:

Groove-weld tension	74%
Groove-weld shear	60%
Fillet-weld shear	49%

NOTE: These values are obtained by combining the following factors: $87\frac{1}{2}\%$ for combined end and side loading, 80% for shear strength, and the applicable joint efficiency factors.

(d) Reinforcing plates and saddles of nozzles attached to the outside of a vessel shall be provided with at least one telltale hole (maximum size NPS $\frac{1}{4}$ tap) that may be tapped for a preliminary compressed air and soapsuds test for tightness of welds that seal off the inside of the vessel. These telltale holes may be left open or may be plugged when the vessel is in service. If the holes are plugged, the plugging material used shall not be capable of sustaining pressure between the reinforcing plate and the vessel wall.

UW-16 MINIMUM REQUIREMENTS FOR ATTACHMENT WELDS AT OPENINGS

(a) *General*

(1) The terms: nozzles, connections, reinforcements, necks, tubes, fittings, pads, and other similar terms used in this paragraph define essentially the same type construction and form a Category D weld joint between the nozzle (or other term) and the shell, head, etc. as defined in UW-3(a)(4).

(2) The location and minimum size of attachment welds for nozzles and other connections shall conform to the requirements of this paragraph in addition to the strength calculations required in UW-15.

(b) *Symbols.* The symbols used in this paragraph and in Figs. UW-16.1 and UW-16.2 are defined as follows:

D_o = outside diameter of neck or tube attached by welding on inside of vessel shell only, in. (mm)

G = radial clearance between hole in vessel wall

and outside diameter of nozzle neck or tube, in. (mm)

Radius = $\frac{1}{8}$ in. (3.2 mm) minimum blend radius

r_1 = minimum inside corner radius, the lesser of $\frac{1}{4}t$ or $\frac{3}{4}$ in. (19 mm)

t = nominal thickness of vessel shell or head, in. (mm)

t_n = nominal thickness of nozzle wall, in. (mm)

t_w = dimension of attachment welds (fillet, single-bevel, or single-J), measured as shown in Fig. UW-16.1, in. (mm)

t_c = thickness of reinforcing plate, as defined in UG-40, in. (mm)

t_{min} = the smaller of $\frac{3}{4}$ in. (19 mm) or the thickness of the thinner of the parts joined by a fillet, single-bevel, or single-J weld, in. (mm)

t_c = not less than the smaller of $\frac{1}{4}$ in. (6 mm) or $0.7t_{min}$ (inside corner welds may be further limited by a lesser length of projection of the nozzle wall beyond the inside face of the vessel wall)

t_1 or t_2 = not less than the smaller of $\frac{1}{4}$ in. (6 mm) or $0.7t_{min}$

(c) *Necks Attached by a Full Penetration Weld.*

Necks abutting a vessel wall shall be attached by a full penetration groove weld. See Fig. UW-16.1 sketches (a) and (b) for examples. Necks inserted through the vessel wall may be attached by a full penetration groove weld. See Fig. UW-16.1 sketches (c), (d), and (e). When complete joint penetration cannot be verified by visual inspection or other means permitted in this Division, backing strips or equivalent shall be used with full penetration welds deposited from one side.

If additional reinforcement is required, it shall be provided as integral reinforcement as described in (1) below, or by the addition of separate reinforcement elements (plates) attached by welding as described in (2) below.

(1) Integral reinforcement is that reinforcement provided in the form of extended or thickened necks, thickened shell plates, forging type inserts, or weld buildup which is an integral part of the shell or nozzle wall and, where required, is attached by full penetration welds. See Fig. UW-16.1 sketches (a), (b), (c), (d), (e), (f-1), (f-2), (f-3), (f-4), (g), (x-1), (y-1), and (z-1) for examples of nozzles with integral reinforcement where the F factor in UG-37(b) may be used.

(2) Separate reinforcement elements (plates) may be added to the outside surface of the shell wall, the inside surface of the shell wall, or to both surfaces of the shell wall. When this is done, the nozzle and reinforcement is no longer considered a nozzle with

integral reinforcement and the F factor in UG-37(a) shall be $F = 1.0$. Figure UW-16.1 sketches (a-1), (a-2), and (a-3) depict various applications of reinforcement elements added to sketch (a). Any of these applications of reinforcement elements may be used with necks of the types shown in Fig. UW-16.1 sketches (b), (c), (d), and (e) or any other integral reinforcement types listed in (1) above. When a pad is added, the nozzle and reinforcement is no longer considered a nozzle with integral reinforcement. The reinforcement plates shall be attached by welds at the outer edge of the plate, and at the nozzle neck periphery or inner edge of the plate if no nozzle neck is adjacent to the plate. The weld at the outer edge and the weld at the inner edge of the reinforcement plate which does not abut a nozzle neck shall be a fillet weld with a minimum throat dimension of $\frac{1}{2}t_{min}$. See Fig. UW-16.1 sketch (h) for an example of a fillet weld attachment. The welds attaching the reinforcement plate to a nozzle neck abutting a vessel wall shall be a full penetration weld plus a fillet weld with minimum throat dimension t_w not less than $0.7t_{min}$.

(d) *Neck Attached by Fillet or Partial Penetration Welds.*

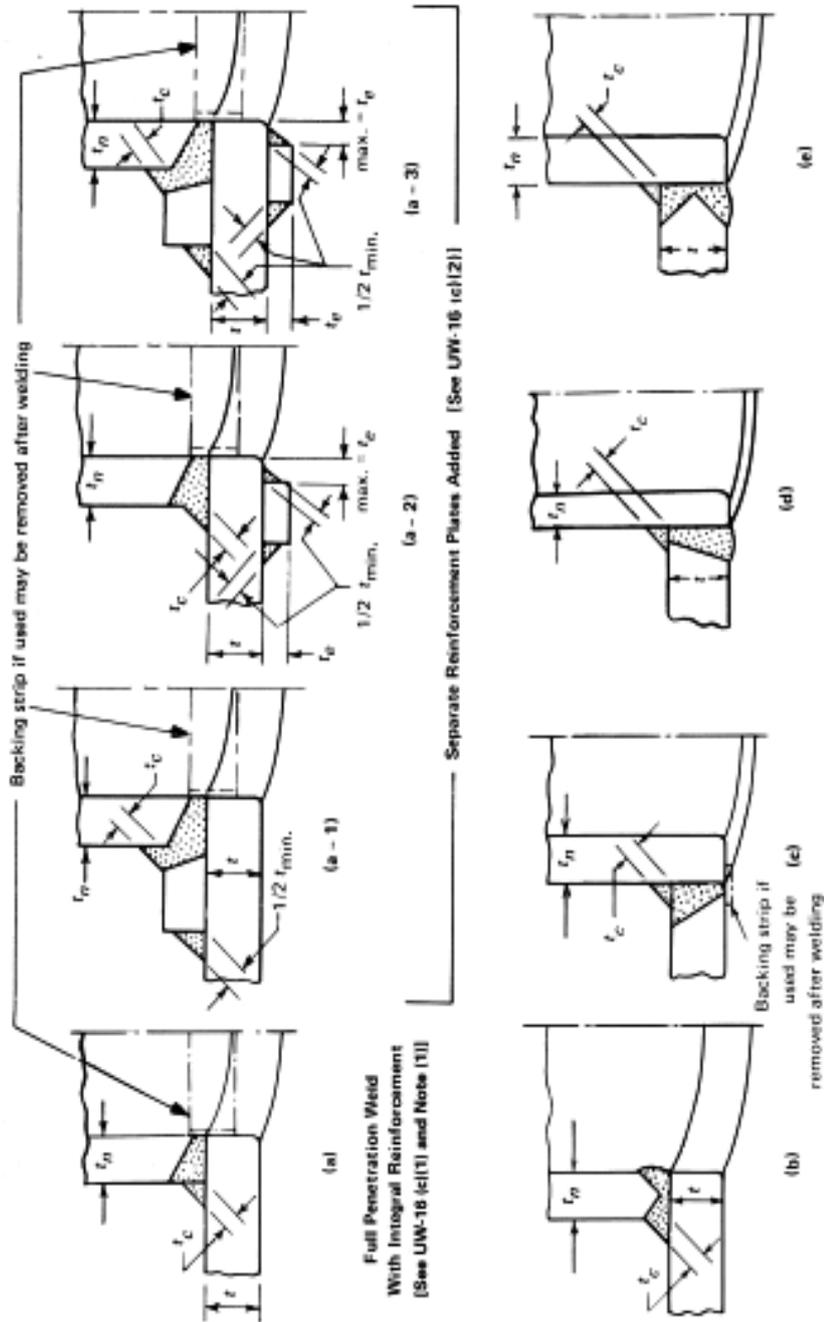
(1) Necks inserted into or through the vessel wall may be attached by fillet or partial penetration welds, one on each face of the vessel wall. The welds may be any desired combination of fillet, single-bevel, and single-J welds. The dimension of t_1 or t_2 for each weld shall be not less than the smaller of $\frac{1}{4}$ in. (6 mm) or $0.7t_{min}$, and their sum shall be not less than $1\frac{1}{4}t_{min}$. See Fig. UW-16.1 sketches (i), (j), (k), and (l).

If additional reinforcement is required, it may be provided in the form of extended or thickened necks, thickened shell plates, forgings, and/or separate reinforcement elements (plates) attached by welding. Weld requirements shall be the same as given in (c)(2) above, except as follows. The welds attaching the neck to the vessel wall or to the reinforcement plate shall consist of one of the following:

(a) a single-bevel or single-J weld in the shell plate, and a single-bevel or single-J weld in each reinforcement plate. The dimension t_w of each weld shall be not less than $0.7t_{min}$. See Fig. UW-16.1 sketches (q) and (r).

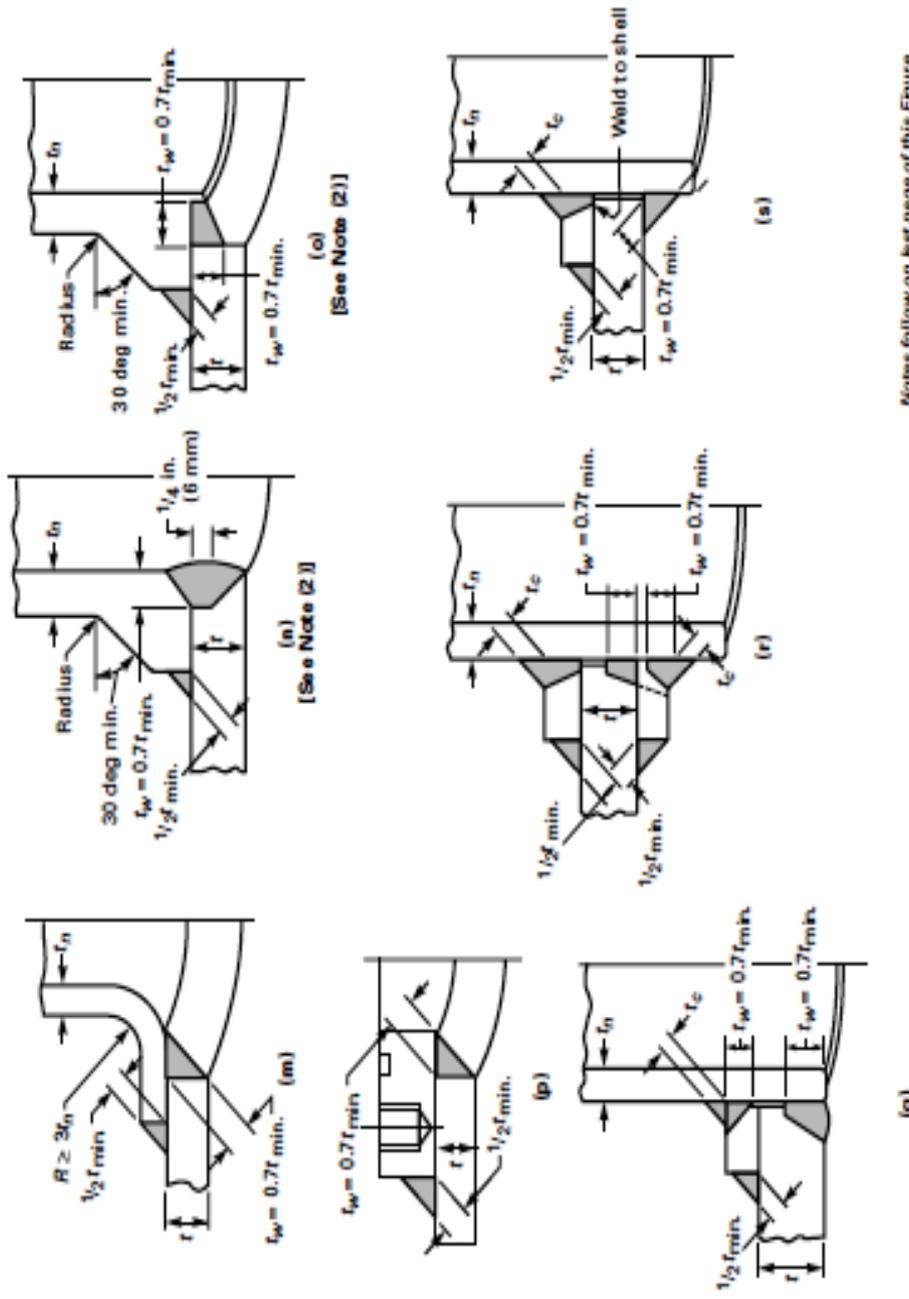
(b) a full penetration groove weld in each reinforcement plate, and a fillet, single-bevel, or single-J weld with a weld dimension t_w not less than $0.7t_{min}$ in the shell plate. See Fig. UW-16.1 sketch (s).

(2) Nozzle necks, flared necks, and studding outlet type flanges may be attached by fillet welds or partial penetration welds between the outside diameter or the



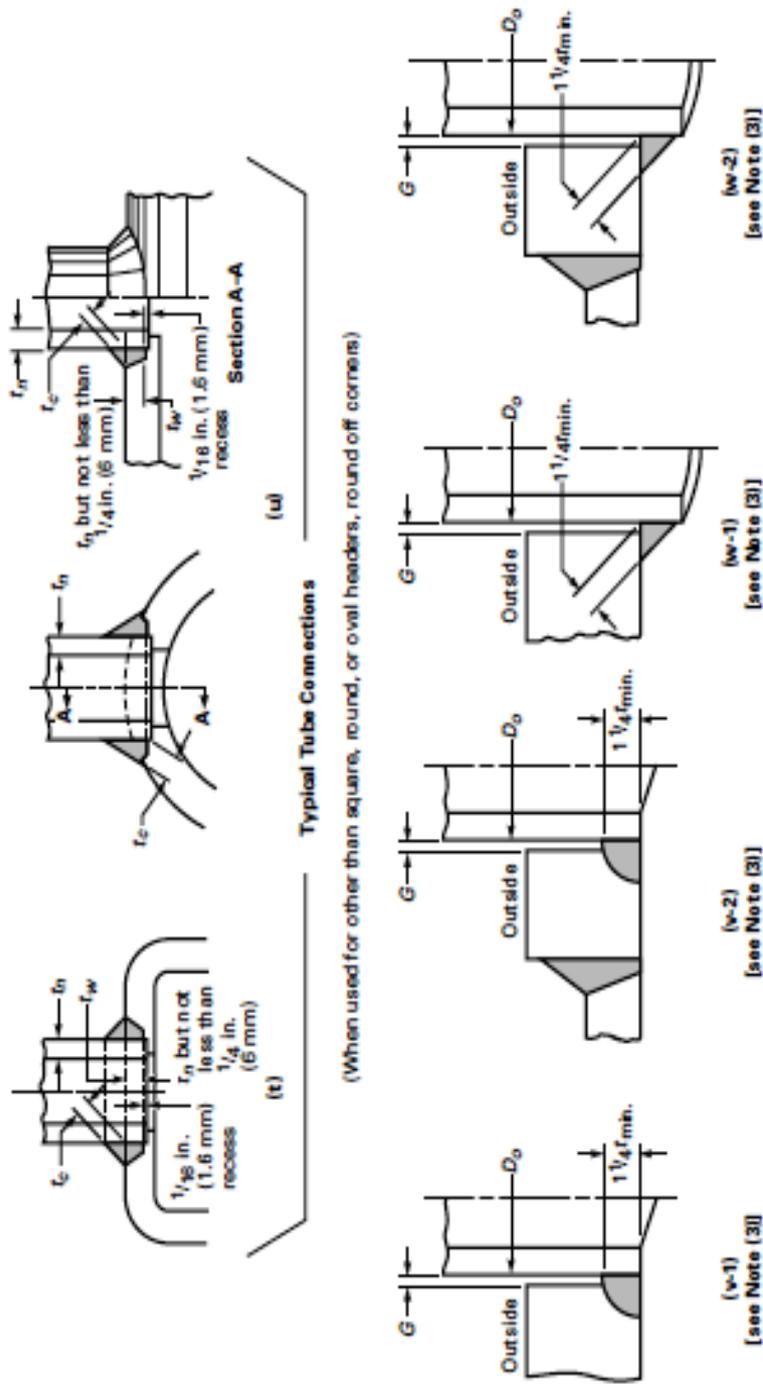
Notes follow on last page of this Figure

FIG. UW-16.1 SOME ACCEPTABLE TYPES OF WELDED NOZZLES AND OTHER CONNECTIONS TO SHELLS, HEADS, ETC.



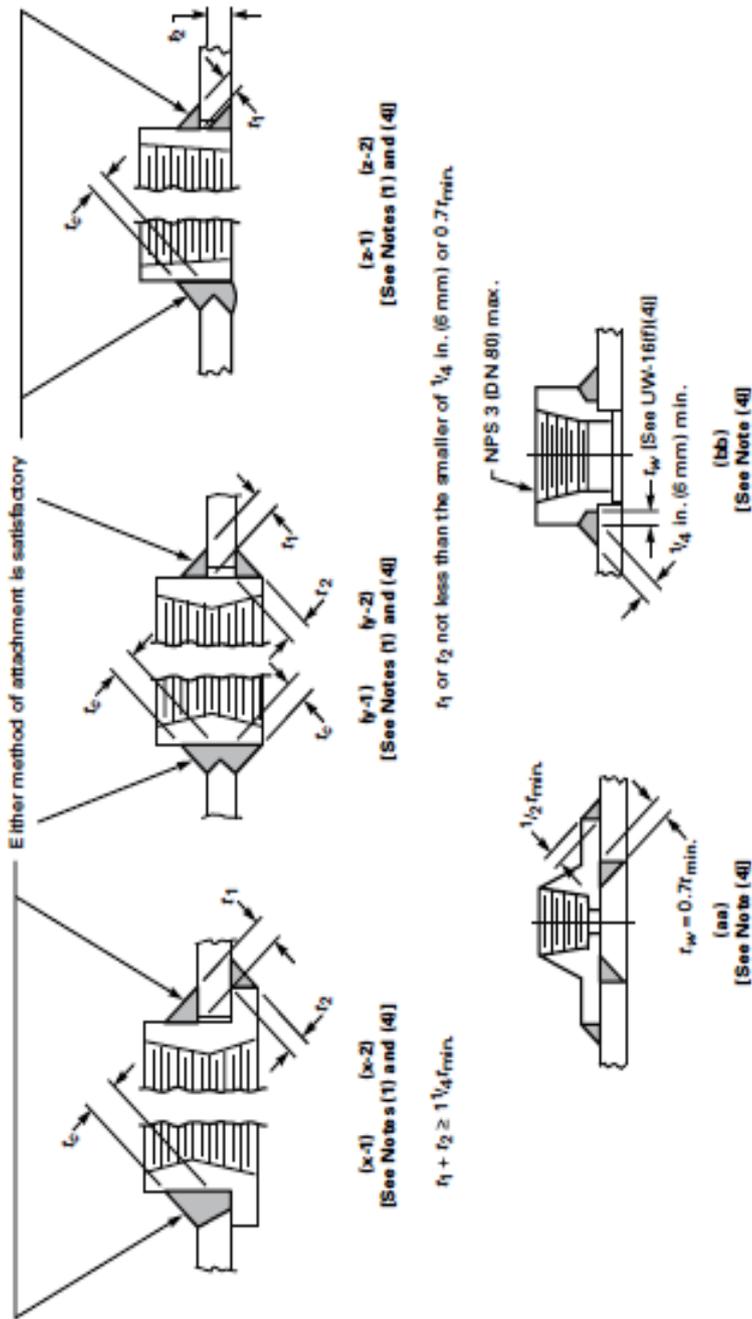
Notes follow on last page of this Figure

FIG. UW-16.1 SOME ACCEPTABLE TYPES OF WELDED NOZZLES AND OTHER CONNECTIONS TO SHELLS, HEADS, ETC. (CONT'D)



Notes follow on last page of this Figure.

FIG. UW-16.1 SOME ACCEPTABLE TYPES OF WELDED NOZZLES AND OTHER CONNECTIONS TO SHELLS, HEADS, ETC. (CONT'D)



- NOTES:
- (1) Sketches (a), (b), (c), (d), (e), (f-1) through (f-4), (g), (x-1), (y-1), and (z-1) are examples of nozzles with integral reinforcement.
 - (2) Where the term Radius appears, provide a $\frac{1}{8}$ in. (3.2 mm) minimum blend radius.
 - (3) For sketches (v-1) through (w-2):
 - (a) For applications where there are no external loads, $G = 1/8$ in. (3.2 mm) max.
 - (b) With external loads:
 - $G = 0.005$ for $D_o \leq 1$ in. (25 mm); $G = 0.010$ for 1 in. (25 mm) $< D_o \leq 4$ in. (102 mm); $G = 0.015$ for 4 in. (102 mm) $< D_o \leq 6\frac{5}{8}$ in. (168 mm).
 - (4) For NPS 3 (DN 80) and smaller, see exemptions in UW-16(F)(2).

FIG. UW-16.1 SOME ACCEPTABLE TYPES OF WELDED NOZZLES AND OTHER CONNECTIONS TO SHELLS, HEADS, ETC. (CONT'D)

attachment and the outside surface of the shell and at the inside of the opening in the shell. The throat dimension of the outer attachment weld shall not be less than $\frac{1}{2}t_{min}$. The dimension t_w of the weld at the inside of the shell cutout shall not be less than $0.7t_{min}$. See Fig. UW-16.1 sketches (m), (n), (o), and (p).

(e) *Necks and Tubes up to and Including NPS 6 (DN 150) Attached From One Side Only.* Necks and tubes not exceeding NPS 6 (DN 150) may be attached from one side only on either the outside or inside surface of the vessel.

(1) When the neck or tube is attached from the outside only, a welding groove shall be cut into the surface to a depth of not less than t_w on the longitudinal axis of the opening. It is recommended that a recess $\frac{1}{16}$ in. (1.6 mm) deep be provided at the bottom of the groove in which to center the nozzle. The dimension t_w of the attachment weld shall be not less than t_w nor less than $\frac{1}{4}$ in. See Fig. UW-16.1 sketches (i) and (u).

(2) When the neck or tube is attached from the inside only, the depth of welding groove or throat of fillet weld shall be at least equal to $1\frac{1}{4}t_{min}$. Radial clearance between vessel hole and nozzle outside diameter at the unwelded side shall not exceed tolerances given in Fig. UW-16.1 sketches (v-1), (v-2), (w-1), and (w-2). Such attachments shall satisfy the rules for reinforcement of openings except that no material in the nozzle neck shall be counted as reinforcement.

(f) *Fittings: Internally Threaded, Externally Threaded, Socket Welded or Butt Welded.* The attachment of fittings shall meet the following requirements.

(1) Except as provided for in (2), (3), (4), (5), and (6) below, fittings shall be attached by a full penetration groove weld or by two fillet or partial penetration welds, one on each face of the vessel wall. The minimum weld dimensions shall be as shown in Fig. UW-16.1 sketches (x), (y), (z), and (aa).

(2) Fittings not exceeding NPS 3 (DN 80) shown on Fig. UW-16.1 sketches (x), (y), (z), (aa), and (bb) may be attached by welds that are exempt from size requirements with the following limitations.

(a) UW-15(a) requirements shall be satisfied for UG-22 loadings.

(b) For partial penetration welds or fillet welds, t_1 or t_2 shall not be less than the smaller of $\frac{3}{32}$ in. (2.4 mm) or $0.7t_{min}$.

(3)(a) Fittings and bolting pads not exceeding NPS 3 (DN 80), as shown in Fig. UW-16.2, may be attached to vessels by a fillet weld deposited from the outside only with the following limitations:

(1) maximum vessel wall thickness of $\frac{3}{8}$ in. (10 mm);

(2) the maximum size of the opening in the vessel is limited to the outside diameter of the attached pipe plus $\frac{3}{4}$ in. (19 mm), but not greater than one-half of the vessel inside diameter;

(3) the attachment weld throat shall be the greater of the following:

(a) the minimum nozzle neck thickness required by UG-45 for the same nominal size connection; or

(b) that necessary to satisfy the requirements of UW-18 for the applicable loadings of UG-22.

(4) the typical fitting dimension t_f as shown in Fig. UW-16.2 sketch (p) shall be sufficient to accommodate a weld leg which will provide a weld throat dimension.

(b) If the opening exceeds the requirements of (f)(3)(a)(2) above or (f)(5)(d) below in any direction, or is greater than one-half the vessel inside diameter, the part of the vessel affected shall be subjected to a proof test as required in UG-36(a)(2), or the opening shall be reinforced in accordance with UG-37 and the nozzle or other connection attached, using a suitable detail in Fig. UW-16.1, if welded.

(4) Fittings not exceeding NPS 3 (DN 80) may be attached by a fillet groove weld from the outside only as shown in Fig. UW-16.1 sketch (bb). The groove weld t_w shall not be less than the thickness of Schedule 160 pipe (ANSI/ASME B36.10).

(5) Flange-type fittings not exceeding NPS 2 (DN 50), with some acceptable types such as those shown in Fig. UW-16.2, may be attached without additional reinforcement other than that in the fitting and its attachment to the vessel wall. The construction satisfies the requirements of this Division without further calculation or proof test as permitted in UG-36(c)(3) provided all of the following conditions are met.

(a) Maximum vessel wall thickness shall not exceed $\frac{3}{8}$ in. (10 mm).

(b) Maximum design pressure shall not exceed 350 psi (2410 kPa).

(c) Minimum fillet leg t_f is $\frac{3}{32}$ in. (2.4 mm).

(d) The finished opening, defined as the hole in the vessel wall, shall not exceed the outside diameter of the nominal pipe size plus $\frac{3}{4}$ in. (19 mm).

(b) Fittings conforming to Fig. UW-16.2 sketch (k) not exceeding NPS 3 may be attached by a single fillet weld on the inside of the vessel only, provided the criteria of Fig. UW-16.1 sketch (w) and UW-16(e)(2) are met.

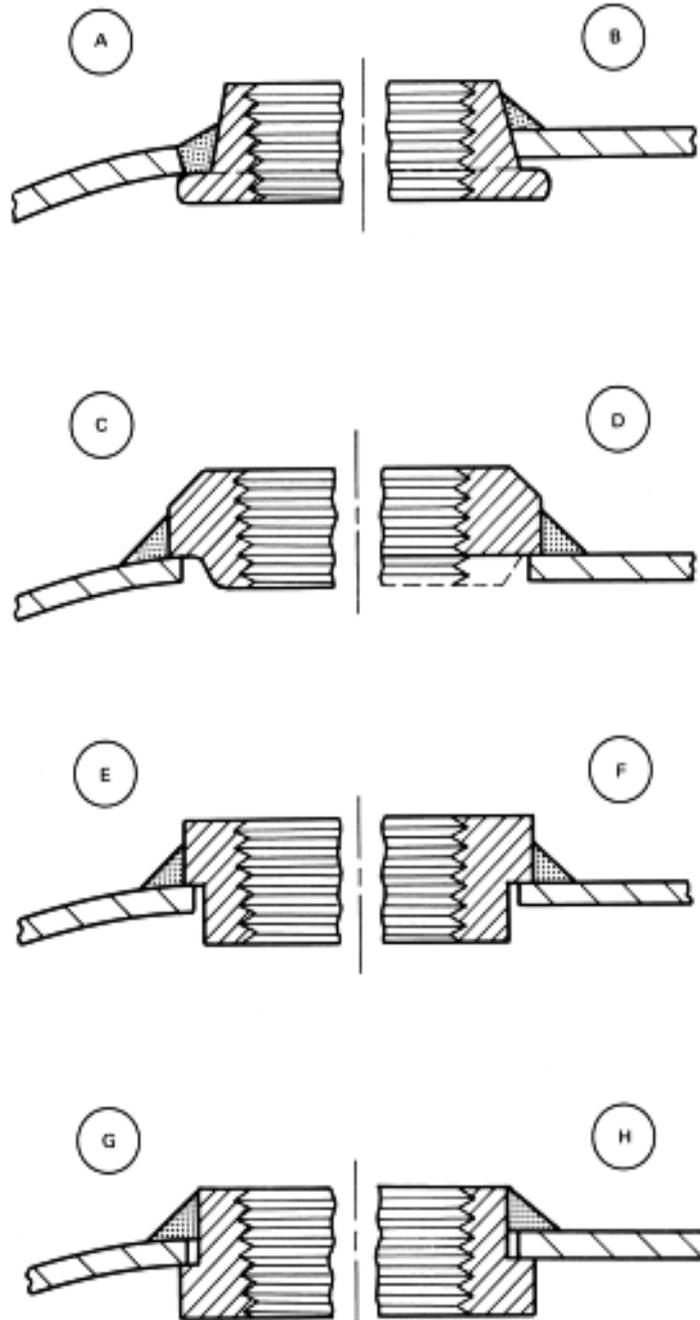


FIG. UW-16.2 SOME ACCEPTABLE TYPES OF SMALL FITTINGS
See UW-16(f)(3)(a) for Limitations

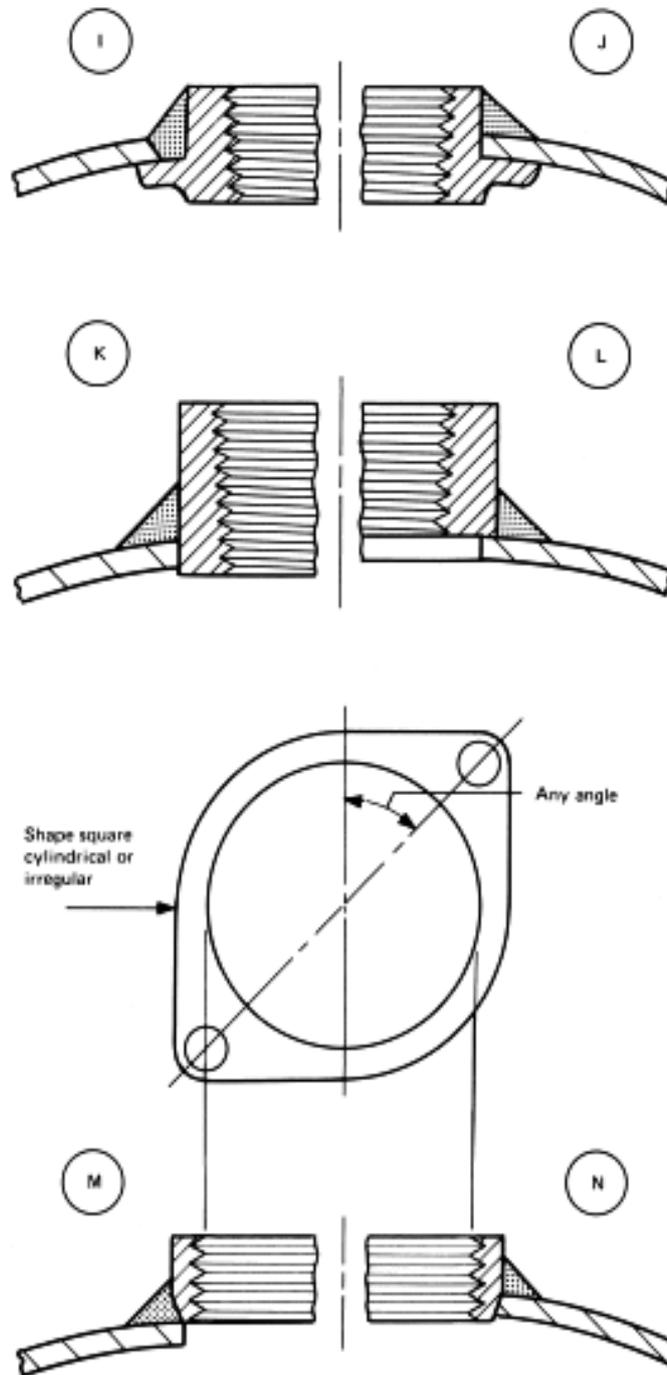


FIG. UW-16.2 SOME ACCEPTABLE TYPES OF SMALL FITTINGS (CONT'D)
See UW-16(f)(3)(a) for Limitations

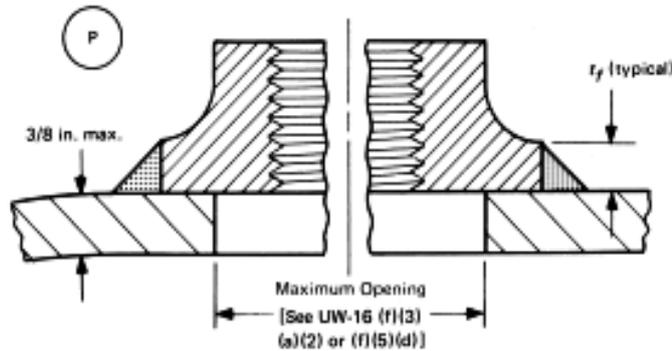


FIG. UW-16.2 SOME ACCEPTABLE TYPES OF SMALL FITTINGS (CONT'D)
See UW-16(f)(3)(a) for Limitations

UW-17 PLUG WELDS

(a) Plug welds may be used in lap joints, in reinforcements around openings and in nonpressure structural attachments. They shall be properly spaced to carry their proportion of the load, but shall not be considered to take more than 30% of the total load to be transmitted.

(b) Plug weld holes shall have a diameter not less than $t + \frac{1}{4}$ in. (6 mm) and not more than $2t + \frac{1}{4}$ in. (6 mm), where t is the thickness in inches of the plate or attached part in which the hole is made.

(c) Plug weld holes shall be completely filled with weld metal when the thickness of the plate, or attached part, in which the weld is made is $\frac{5}{16}$ in. (8 mm) or less; for thicker plates or attached parts the holes shall be filled to a depth of at least half the plate thickness or $\frac{5}{16}$ of the hole diameter, whichever is larger, but in no case less than $\frac{5}{16}$ in. (8 mm).

(d) The allowable working load on a plug weld in either shear or tension shall be computed by the following formula:

for Customary units,

$$P = 0.63S(d - \frac{1}{4})^2$$

for SI units,

$$P = 0.63S(d - 6)^2 \quad **$$

** For some of the terms of the above equation(s), it may be necessary to convert millimeters to meters to obtain a rational result in SI units.

where

P = total allowable working load on the plug weld, lb (kN)

d = the bottom diameter of the hole in which the weld is made, in. (mm)

S = maximum allowable stress value for the material in which the weld is made, psi (kPa) (see UG-23)

UW-18 FILLET WELDS

(a) Fillet welds may be employed as strength welds for pressure parts within the limitations given elsewhere in this Division. Particular care shall be taken in the layout of joints in which fillet welds are to be used in order to assure complete fusion at the root of the fillet.

(b) Corner or tee joints may be made with fillet welds provided the plates are properly supported independently of such welds, except that independent supports are not required for joints used for the purposes enumerated in UG-55.

(c) Figures UW-13.1 and UW-13.2 show several construction details that are not permissible.

(d) Unless the sizing basis is given elsewhere in this Division, the allowable load on fillet welds shall equal the product of the weld area (based on minimum leg dimension), the allowable stress value in tension of the material being welded, and a joint efficiency of 55%.

ANEXO XX

CARACTERIZACIÓN CRUDO DEL CAMPO CITY ORIENTE. PETROPRODUCCIÓN, 2007.



PETROPRODUCCION

INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
LABORATORIO DE CORROSIÓN L. A.
ANÁLISIS DE CRUDO LINEA OLEODUCTO

LUGAR DE LA MUESTRA: LINEA DE TRANSFERENCIA CAMPO LIBERTADOR ESTE

FECHA DE LA MUESTRA : 08 DE AGOSTO 2007
FECHA DEL ANÁLISIS : 10 DE AGOSTO 2007

PARAMETROS	UNIDADES	NORMAS	ESTACIÓN CUYABENO	OLEODUCTO CUYABENO	VHR	CITY ORIENTE	SANSAHUARI
API OBSERVADO			26,778°F	26,76°F	29,574°F	21,578°F	26,477°F
API 60 °F	° API	D - 1298	25,6	25,3	28,6	20,5	25,3
API SECO			25,63	25,33	28,62	20,51	25,31
GRAVEDAD ESPECIFICA	G/E		0,9007	0,9024	0,8838	0,9309	0,9024
AGUA LIBRE			0,2	0,2	0,1	0,1	0,3
EMULSION			0	0	0	0	0
SEDIMENTOS		D - 96/88	0	0	0	0	0
PARAFINA			0,8	0,7	0,8	0,4	0,3
BSW	%		0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
SOLIDOS POR EXTRACCIÓN		D - 473	0,022	0,042	0,017	0,024	0,018
BSW POR DESTILACIÓN		D - 4006	0,250	0,300	0,130	0,120	0,360
BSW TOTAL			0,272	0,342	0,147	0,144	0,378
AZUFRE	% EN PESO	D - 3240	1,055	1,199	0,841	1,778	1,155
VISCOSIDAD A 80° F			29,691	34,693	17,708	228,55	36,124
VISCOSIDAD A 104° F			29,17	33,47	15,49	168,56	34,43
VISCOSIDAD A 120° F	cSt	D - 445	28,84	32,71	13,95	122,4	33,39

Lcdo: Leopoldo Simisterra.
LABORATORIO DE CORROSIÓN
Y TRATAMIENTO QUÍMICO.

ANEXO XXI

HOJA TÉCNICA HIDRÓGENO. LINDE GAS, AGA, 2010.

Linde Gas } **AGA**

HOJA DE SEGURIDAD DEL MATERIAL (MSDS)

HIDRÓGENO

Nota : Las instrucciones contenidas en esta tarjeta de emergencia aplican también para el hidrógeno purificado, hidrógeno alta pureza e hidrógeno ultra alta pureza.

1. PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

Nombre del producto : Hidrógeno

Familia química : Gas inflamable

Nombre químico : Hidrógeno

Fórmula : H₂

Sinónimos : No aplica

Usos : Hidrogenización de aceites; procesos especiales de soldadura y corte; laboratorios; hornos de sinterización; formación de atmósferas reductoras (industria del vidrio); hornos para reducción de ciertos metales (eliminación de oxígeno); fabricación de semiconductores. "NO SE USE EN NINGUN TIPO DE GLOBO;--PELIGRO INMINENTE DE INCENDIO"

Fabricante :

AGA S.A.

Quito: Av. Pedro Vicente Maldonado 10499

Tel.: 1 800 242 427; 02 2673 011; 04 2101 060 las 24 horas los 365 días del año.

2. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

COMPONENTE	% MOLAR	NUMERO CAS	LIMITES DE EXPOSICIÓN
Hidrógeno	99.9%	1333-74-0	TLV : Gas asfixiante simple

3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

Resumen de emergencia

El hidrógeno es un gas incoloro, inoloro, insípido, altamente inflamable y no es tóxico. El hidrógeno se quema en el aire formando una llama azul pálido casi invisible. Este gas es particularmente propenso a fugas debido a su baja viscosidad y a su bajo peso molecular. El principal peligro es la asfixia producida por el desplazamiento de oxígeno en personas expuestas a altas concentraciones de este gas. Las mezclas de gas/aire son explosivas.

Efectos potenciales para la salud

Inhalación : Asfixiante simple. Altas concentraciones de este gas pueden causar una atmósfera deficiente en oxígeno causando en individuos dolor de cabeza, zumbido en los oídos, mareos, somnolencia, inconsciencia, náusea, vómitos y depresión de todos los sentidos. La piel de la víctima puede adquirir una coloración azulada. En concentraciones inferiores de O₂ (<10%), puede causar pérdida de la conciencia, movimientos convulsivos, colapso respiratorio y muerte.

Otros efectos perjudiciales a la salud : Ninguno.

Carcinogenicidad : El hidrógeno no está listado por la NTP, OSHA, o IARC.

<p>4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS Inhalación: Llevar a la víctima al aire libre lo antes posible. Solamente personal profesionalmente entrenado debe suministrar oxígeno suplementario y/o resucitación cardiopulmonar, de ser necesario. Recibir asistencia médica inmediatamente.</p>
<p>5. MEDIDAS CONTRA INCENDIO</p> <p>Punto de inflamación : No aplica. Temperatura de auto ignición : 571°C (1060°F) Limites de Inflamabilidad en el aire por volumen : Inferior (LEL): 4% Superior (UEL):75% Sensibilidad de explosión a un impacto mecánico: No aplica. Sensibilidad de explosión a una descarga eléctrica: Ignición por descargas electrostáticas</p> <p>Riesgo general El gas hidrógeno quema con una llama celeste, casi invisible. También se enciende fácilmente con poca fuerza de ignición. El hidrógeno es más ligero que el aire y se puede acumular en las partes altas de lugares encerrados. La presión en el cilindro puede aumentar debido a calentamiento y romperse, si los dispositivos de descarga de presión llegaran a fallar.</p> <p>Medios de extinción CO₂, polvo químico seco, rocío de agua o agua pulverizada.</p> <p>Instrucciones para combatir incendios Evacuar a todo el personal de la zona en peligro. No extinguir hasta que el suministro de hidrógeno esté cerrado y controlado. Inmediatamente enfriar los cilindros rociándolos con agua desde lo más lejos posible. Cuidado de no extinguir las llamas! Si las llamas se extinguen accidentalmente, puede re-ocurrir una explosión por vapor expandiéndose en líquido hirviendo! El resultado sería que el contenido fuera expulsado como una masiva bola de fuego causando una explosión. El fuego y la explosión resultante podría causar graves daños al equipo y al personal o muerte alrededor de una gran área. Si es posible y si no hay peligro, cerrar el suministro del gas hidrógeno mientras se continua rociando los cilindros con agua.</p> <p>Si un camión que transporte cilindros está involucrado en el incendio, AISLE un área 1600 metros (1 milla) a la redonda. Combatir el incendio desde una distancia máxima, utilizando soportes fijos para las mangueras.</p> <p>Equipo contra incendios Los socorristas o personal de rescate deben contar como mínimo con un aparato de respiración autosuficiente y protección personal completa, a prueba de fuego.</p>
<p>6. MEDIDAS CONTRA ESCAPE ACCIDENTAL</p> <p>En caso de un escape, despeje el área afectada. Considere la evacuación hacia un lugar contrario a la dirección del viento, por lo menos 800 metros (1/2 milla) a la redonda. Eliminar toda fuente de ignición. La presencia de una llama de hidrógeno se puede detectar acercándose cautelosamente y extendiendo una escoba de paja para hacer la llama visible. Si es posible y no hay peligro, cerrar el suministro de hidrógeno. Nunca entrar al área si la concentración de hidrógeno en el aire es mayor del 10% del limite bajo de explosividad (0.4%).</p> <p>Si el escape se origino por problemas en un equipo o tubería de proceso, inertizelos haciendo circular gas inerte (nitrógeno), a través de ellos, por lo menos durante una hora, antes de iniciar la correspondiente reparación. Mientras tanto, el área se debe ventilar, y permanecer aislada hasta que el gas se haya dispersado.</p>
<p>7. MANEJO Y ALMACENAMIENTO</p> <p>Precauciones que deben tomarse durante el manejo de cilindros</p>

Antes de uso: Mueva los cilindros utilizando carro portacilindros o montacargas. No los haga rodar, ni los arrastre en posición horizontal. Evite que se caigan o golpeen violentamente uno contra otro, o contra otras superficies. No se deben transportar en espacios cerrados, como por ejemplo el baúl de un carro, camioneta o van. Para descargarlos del camión use rodillo de caucho.

Durante su uso: No "medio abrir" la válvula del cilindro de hidrógeno antes de conectarlo porque podrá ocurrir un auto ignición. No use adaptadores, herramientas que generen chispas, aceites o grasas en los ajustadores o en el equipo. No caliente el cilindro, con el fin de aumentar el grado de descarga del producto. No "medio abrir" la válvula del cilindro antes de conectarlo porque podrá ocurrir un auto ignición. Revise el sistema contra escapes, utilizando una solución de agua y jabón. Si se presenta alguna dificultad con el funcionamiento de la válvula del cilindro, suspender su uso y llamar al fabricante. Nunca introduzca objetos (como llaves fijas de doble boca, desatornilladores, palancas, etc.) en las aberturas de la tapa de la válvula, ya que se pueden romper y presentarse escapes. Nunca hacer de un cilindro parte de un circuito eléctrico. Use válvulas de seguridad o trampas en la línea de descarga para prevenir reflujo peligroso hacia el cilindro. Jamás descargue el contenido del cilindro hacia ninguna persona, equipo, fuente de ignición, material incompatible, o a la atmósfera

Después de uso: Cierre la válvula principal del cilindro. Cierre firmemente las válvulas. Marque los cilindros vacíos con una etiqueta que diga "VACIO". Los cilindros deben ser devueltos al proveedor con el protector de válvula. No deben ser reutilizados cilindros que presenten fugas, daños por corrosión o que hayan sido expuestos al fuego. En estos casos notifique al proveedor, para recibir instrucciones.

Precauciones que deben tomarse para el almacenamiento de los cilindros

Almacene los cilindros en posición vertical, separados de materiales combustibles u oxidantes, por una distancia mínima de 6 metros (20 pies) o por una barrera a prueba de fuego de un mínimo de 1.5 metros (5 pies) de altura y con resistencia al fuego de un mínimo de (1/2) media hora. Separe los cilindros vacíos de los llenos. Para esto use el sistema de inventario que "el primero en llegar, primero en salir", para prevenir que los cilindros llenos sean almacenados por un largo periodo.

El área de almacenamiento debe encontrarse delimitada, con el fin de evitar el paso de personal no autorizado, que puedan manipular de forma incorrecta el producto. Los cilindros deben ser almacenados en áreas secas, frescas y bien ventiladas lejos de fuentes de ignición o calor, áreas congestionadas o salidas de emergencia. El área debe ser protegida, con el fin de prevenir ataques químicos o daños mecánicos, como corte o abrasión sobre la superficie del cilindro.

No permita que la temperatura en el área de almacenamiento exceda los 54 °C (130 °F), ni tampoco que entre en contacto con un sistema energizado eléctricamente. Señalice el área con letreros que indiquen "NO FUMAR", "PROHIBIDO EL PASO A PERSONAL NO AUTORIZADO" y con avisos donde se indiquen el tipo de peligro representado por el producto. El almacén debe contar con un extinguidor de fuego apropiado (por ejemplo, sistema de riego, extinguidores portátiles). Todo equipo eléctrico debe ser aprueba de explosiones en los lugares de almacenamiento y áreas en uso. Los cilindros no deben colocarse en sitios donde hagan parte de un circuito eléctrico. Cuando los cilindros de gas se utilicen en conjunto con soldadura eléctrica, no deben estar puestos a tierra ni tampoco se deben utilizar para conexiones a tierra; esto evita que el cilindro sea quemado por un arco eléctrico, afectando sus propiedades físicas o mecánicas.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL

Controles de ingeniería

Proporcionar ventilación natural o mecánica, para asegurarse de prevenir atmósferas deficientes en oxígeno abajo del 19.5% de oxígeno.

Protección respiratoria

Utilice equipo autónomo de respiración (SCBA) o máscaras con mangueras de aire de presión directa si los niveles de oxígeno están por debajo del 19.5% o durante emergencias de un

escape del gas. Los purificadores de aire no proveen suficiente protección.

Vestuario protector

Para el manejo de cilindros es recomendable usar guantes industriales, verificando que estos estén libres de aceite y grasa; gafas ajustables de seguridad y botas con puntera de acero.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Densidad de gas a 0°C (32°F), 1 atm: 0.08432 kg./m³ (0.0052 lb/ft³)

Punto de ebullición a 1 atm: - 253.0°C (-423.0°F)

Punto de congelación / fusión a 1 atm: -259.2°C (-434.6°F)

pH: No aplica.

Peso específico (aire = 1) a 21.1°C (70°F): 0.019

Peso molecular: 1.007

Solubilidad en agua vol/vol a 15.6°C (60°F) y 1 atm: 0.023

Grado de expansión: No aplica.

Grado de evaporación (nBuAc = 1): No aplica.

Olor umbral: No aplica.

Volumen específico del gas 21.1°C (70°F) (ft³/lb) : 192

Presión de vapor : No aplica.

Coefficiente de distribución agua / aceite: No aplica.

Apariencia y color: Gas incoloro y sin olor.

10. REACTIVIDAD Y ESTABILIDAD

Estabilidad

El hidrógeno es un gas estable

Incompatibilidad

Oxidantes fuertes (cloro, bromuro, pentafluoruro, oxígeno, oxígeno difluoruro, y nitrógeno trifluoruro. Mezclas de oxígeno/hidrógeno pueden explotar al hacer contacto con un catalizador como el platino. Algunos aceros son susceptibles al hidrógeno, haciéndolos quebradizos a altas presiones y temperaturas.

Condiciones a evitar

Evite contacto con materiales incompatibles y exponer a calor, chispas o otras fuentes de ignición. Cilindros expuestos a temperaturas altas o llamas directas pueden romperse o estallar.

Reactividad

a) Productos de descomposición : Se produce agua cuando el hidrógeno arde en presencia de aire.

b) Polimerización peligrosa : Ninguna

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

El hidrógeno es un asfixiante simple. En humanos se presentan los siguientes síntomas :

Concentración	Síntomas de exposición
12-16% Hidrogeno:	Respiración y grados del pulso aumenta, coordinación muscular es ligeramente alterada.
10-14% Hidrogeno:	Efectos emocionales, fatiga anormal, respiración perturbada.
6-10% Hidrogeno:	Nausea y vómito, colapso o pérdida de la conciencia.
Abajo 6%:	Movimientos convulsivos, colapso respiratorio y posible muerte.

<p>Capacidad irritante del material: Producto no irritante Sensitización a materiales: El producto no causa sensitización en humanos</p> <p>Efectos al sistema reproductivo Habilidad mutable: No aplicable Mutagenicidad: Ningún efecto mutagénico ha sido descrito para hidrógeno. Embriotoxicidad: Ningún efecto embriotóxico ha sido descrito para hidrógeno. Teratogenicidad: Ningún efecto teratogénico ha sido descrito para hidrógeno. Toxicidad Reproductiva: Ningún efecto de toxicidad reproductiva ha sido descrito para hidrógeno.</p>	
<p>12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA</p> <p>El hidrógeno es un gas que se encuentra naturalmente en la atmósfera. El gas se disipa rápidamente en áreas con buena ventilación. Cualquier efecto adverso en animales o en la vida de las plantas, estará relacionado con ambientes deficientes en oxígeno. No hay efectos adversos anticipados a las plantas.</p>	
<p>13. CONSIDERACIONES DE DISPOSICIÓN</p> <p>Regrese los cilindros vacíos al fabricante, para que este se encargue de su disposición final de acuerdo a lo establecido por la normatividad ambiental.</p>	
<p>14. INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE</p> <p>Número de Naciones Unidas : UN 1049 Clase de peligro D.O.T : 2.1 Rotulo y etiqueta D.O.T : GAS INFLAMABLE Contaminante marino : El producto no está identificado como un contaminante marino por el D.O.T</p> <p>Información especial de embarque: Los cilindros se deben transportar en una posición segura, en un vehículo bien ventilado. El transporte de cilindros de gas comprimido en automóviles o en vehículos cerrados presenta serios riesgos de seguridad y deben ser descartados.</p>	
<p>15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA</p> <p>Para el transporte, almacenamiento y manejo de productos químicos peligrosos se deben tener en cuenta los requerimientos establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2-266:2000.</p> <p>La identificación de cilindros que contienen gases industriales, se encuentra reseñada en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE-INEN 0441:84.</p>	
<p>16. INFORMACIÓN ADICIONAL</p> <p>En las zonas de almacenamiento de acumuladores se debe contar con la siguiente información de riesgos :</p> <p>Código NFPA Salud : 1 "Ligeramente riesgoso" Inflamabilidad : 4 "extremadamente inflamable" Reactividad : 0 "Estable"</p> <p>Salida de válvula : CGA 350</p>	

Recomendaciones de material : Se puede usar la mayoría de los materiales más comunes.

Esta hoja de seguridad es propiedad exclusiva de AGA S.A.
Prohibida su reproducción total o parcial, con fines comerciales
por parte de personas ajenas a esta compañía.

**PROCESS HEAT INTEGRATION OF A HEAVY CRUDE
HYDROTREATMENT PLANT, P.2.
CATALYSIS TODAY, 2005.**

J.A.D. Muñoz et al. / Catalysis Today 109 (2005) 214–218

215

Petroleum (IMP) has been developing a hydrotreatment process for converting heavy crude oils into lighter ones, whose main characteristic is operation at moderate reaction severity [4].

The IMP hydrotreatment process employs a system of two reactors in series with selective catalysts: the first one for hydrodemetalization and asphaltene hydrocracking, and the second one for hydrodesulfurization and hydrogenation. Reactor configuration and operating conditions can be adapted depending on the feed quality and desired removal of impurities.

Since the reactions occurring during hydrotreatment are mostly exothermic, controlling the reaction temperature becomes very important in order to prevent carbon deposition on the catalyst and to keep the product's quality at desired levels. For the process configuration with two fixed-bed reactors in series, the common method of controlling the reaction temperature is by introducing part of the hydrogen recycle stream between the reactor beds, the so-called "quench" [1]. The problem with quenching with hydrogen is its availability in refineries. Hydrogen is also needed to keep the hydrogen-to-oil (H_2/oil) ratio along the reactors, which is a design condition that influences product quality. At high H_2/oil ratios, the product's quality is improved, but the size of the equipment after the reaction section increases considerably, which increases the investment costs. Quenching with hydrogen takes place in some part of the reactor length and has two main functions: (1) control of reaction temperature and (2) improvement of flow distribution in the reactor bed. The quench zone is commonly a mixing chamber where the bed effluent is mixed with the hydrogen recycle stream.

Energetically speaking, all processes have certain potential to be improved and the IMP hydrotreatment process is no exception [5]. Since high temperatures are employed in hydrotreatment operations, hot effluents can be used to heat other cold process streams. Pinch analysis is the most utilized tool for the design of heat exchanger networks with an optimization methodology to minimize the amount of heating and cooling utilities and heat transfer area.

The aim of the present paper is to describe and analyze the different alternatives for a heavy oil hydrotreatment plant's process heat integration (PHI), and to select the best option based on energy consumption and total heat transfer area requirements.

2. Summary of experiments

Hydrotreating experiments were conducted in a high pressure pilot plant described elsewhere [3], which operates isothermally. A heavy oil that has the following properties: 21.3° API, 3.57 wt% sulfur, 3200 ppm nitrogen, 11.3 wt% asphaltenes, and 352 wppm Ni + V was employed as feed. Two $\gamma-Al_2O_3$ supported catalysts having the following properties were loaded to the HDT reactors:

- *Catalysts in first reactor:* 175 m²/g specific surface area, 0.56 cm³/g pore volume, 127 Å mean pore diameter, 10.7 wt% Mo, and 29 wt% Ni.

Table 1
Properties of the heavy crude oil and hydrotreated crude oil

	Heavy crude oil	Hydrotreated crude oil
Specific gravity 20/4 °C	0.923	0.887
API gravity	21.3	27.5
HDS (%)	69.8	
HDM (%)	52.0	
HDA (%)	67.6	
HDM (%)	56.8	

- *Catalysts in second reactor:* 248 m²/g specific surface area, 0.51 cm³/g pore volume, 91 Å mean pore diameter, 12.9 wt% Mo, and 2.5 wt% Co.

More details about catalyst loading and sulfiding, operating conditions, reactor characteristics, and sample characterization were reported in previous papers [2,3,6].

In our research laboratory, we have been conducting different tests for hydrotreatment of heavy oils either in one reaction stage [3] or two reaction stages [2]. Catalyst deactivation has been studied with time-on-stream at constant [7] and variable [8] operating conditions, different catalysts have been developed for HDM and HDS applications [9–12], and asphaltenes from heavy oils and hydrotreated products have been precipitated and extensively characterized [13–15]. All these experimental studies have been used to develop kinetic models [16–18] which have been integrated into a hydrotreatment reactor model [19,20]. These modeling tools have allowed us to predict the expected behavior of commercial reactors operated in adiabatic mode, such as temperature and concentration profiles along the reactor, flow rate and location of quenches, reactor delta-T, number and length of catalyst beds, etc.

3. Results and discussion

3.1. Hydrotreatment experiments

Table 1 shows some experimental results of average levels of impurity removals in the two-stage hydrotreatment process. Considerable reductions of sulfur, nitrogen, and metals are achieved. API gravity is also substantially increased, which

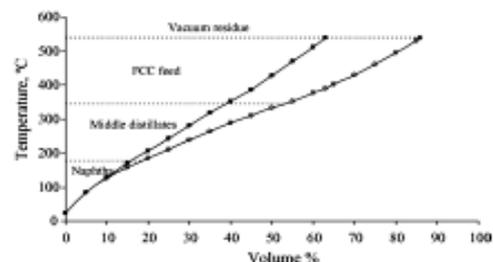


Fig. 1. TBP distillation curves of heavy crude oil (●) and hydrotreated crude oil (○).

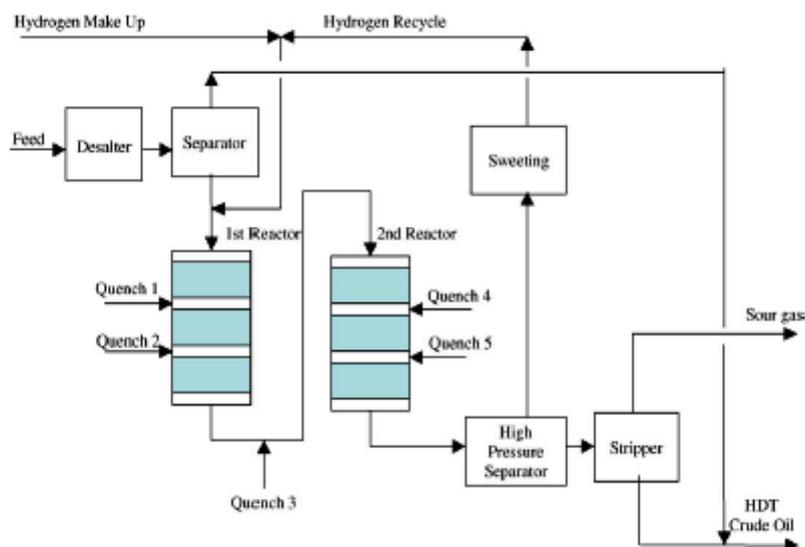


Fig. 4. Process scheme of the two-stage hydrotreatment process [4].

and their position along the reactors. The results are summarized in Table 2. The experimental values of H_2 /oil ratio are also reported in the same table. Case 4 better represents the H_2 /oil ratio reported at the isothermal pilot plant with an absolute error of <3%. The errors for the other cases were >5%. Fig. 3 shows an example of the results obtained for the case 4 hydrogen balance, which was performed with a Hysys process simulator. The values of hydrogen flow rate are presented as percentages with respect to the hydrogen recycle flow rate. Hydrogen consumption is also indicated in each catalytic bed (in parentheses) as a percentage with respect to the total hydrogen consumption.

3.4. Process heat integration

The number and location of required quenches in each of the two reactors were determined with the previous results. Now, process heat integration can be performed. A simplified process scheme of the two-stage hydrotreatment process is shown in Fig. 4. PHI is divided into two parts: PHI with heat exchangers and PHI with heat exchangers and hydrogen quenches. For each option, two cases were identified:

- PHI with heat exchangers: cases A and B.
- PHI with heat exchangers and hydrogen quench: cases C and D.

The description of each case is as follows:

- Case A:** Two heat exchangers to preheat the hydrogen and three heat exchangers to preheat the feed, the desalted crude, and the heavy fraction of the crude.

- Case B:** Identical to case A except that the bottoms stream of the stripping column is employed to preheat the feed.
- Case C:** One hydrogen quench in the first reactor; one hydrogen quench in the second reactor; and three heat exchangers to preheat the feed, the desalted crude, and the heavy fraction of the crude.
- Case D:** Identical to case C except that the bottoms stream of the stripping column is employed to preheat the feed.

The methodology for performing hydrotreatment process heat integration is based on the widely used Pinch analysis, which was taken from the literature [5,21]. With this approach, the following issues can be determined:

- energetic flow diagram,
- hot and cold process streams,
- composite curve,
- grand composite curve,
- utilities,

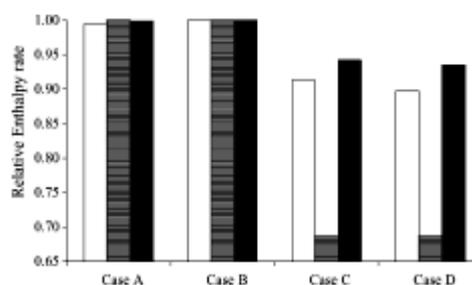


Fig. 5. Total cold (□) and hot (▨) utility requirements and heat recovery (■).

ANEXO XXIII.

CATALIZADORES PARA HIDROPROCESAMIENTO.

PROCATALYSE BY AXENS, 2010.

Axens catalysts and adsorbents



Advanced solutions and services

Product listing





Axens, among the world's leading manufacturers and distributors of catalysts and adsorbents, presents this catalog for use as a first step in selecting the right materials for your processing needs. Here the catalysts and adsorbents are listed by process function along with some of their major physical characteristics.

Our products are grouped as follows:

- Adsorbents
- Guard beds
- Grading materials
- Hydrotreating
- Sulfur recovery
- Hydrogenation
- Reforming and Isomerization
- Specialized catalysts including biofuels and Fisher-Tropsch catalysts

Several choices are often possible for a given application and we are here to help you select the optimum solution. You can always depend on the best and most appropriate product from Axens.

Our offer is more than the material itself. Each product carries with it responsibilities that include competitive performance and pricing, uncompromising quality, meeting delivery dates and competent technical support for sales and after-sales.

See the inside back cover for how Axens provides the complete offer.

You are welcome to find out more about Axens by visiting our website www.axens.net or contacting us at one of our offices - details on back cover.



ADSORBENTS

	Applications	Material	Size (mm)	Shape	Form
Aluminas					
AA 1.5-3	Drying, purification	Alumina	1.5-3	S	1
AA 2.5-5 Grade D	Air liquid drying	Alumina	2.5-5	S	1
AA 2-5 Grade A	Air liquid drying	Alumina	2-5	S	1
AA 2-5 Grade D	Air liquid drying	Alumina	2-5	S	1
AA 2-5 Grade H	Air liquid drying	Alumina	2-5	S	1
AA 2-5 Grade P	Purification	Alumina	2-5	S	1
AA 4-8 Grade A	Drying, purification	Alumina	4-8	S	1
AA 4-8 Grade D	Air liquid drying	Alumina	4-8	S	1
AA 4-8 Grade H	Air liquid drying	Alumina	4-8	S	1
AA 4-8 Grade P	Purification	Alumina	4-8	S	1
CIB	Chromatographic alumina (low Na grade)	Alumina	48-200µm	P	1
CBT	Chromatographic alumina	Alumina	48-200µm	P	1
Molecular Sieves					
MSB 3A	Drying of natural gas and hydrocarbon streams	Zeolite	1.8-2.5 and 2.5-5	S	1
MSE 3A	Drying of natural gas and hydrocarbon streams	Zeolite	1.8, 3.2	E	1
MSE 3A SC	Drying of cracked gases	Zeolite	1.8, 3.2	E	1
MSB 4A	Drying of natural gas, solvents and hydrocarbon streams	Zeolite	1.8-2.5 and 2.5-5	S	1
MSE 4A	Drying of solvents and hydrocarbon streams	Zeolite	1.8, 3.2	E	1
MSE 4A ND	Drying of natural gas	Zeolite	1.8, 3.2	E	1
MSE 5A	Removal of H ₂ S and light mercaptans from natural gas, CO ₂ from H ₂	Zeolite	1.8, 3.2	E	1
MSE 5A IPS	Separation in paraffins by IPSORB process	Zeolite	2	E	1
MSE 5A SP	Separation in paraffins in vapor phase	Zeolite	1.8, 3.2	E	1
MSE 13X	Drying and sweetening of natural gas and LPG streams	Zeolite	1.8, 3.2	E	1
MSB 13X	Drying and sweetening of natural gas and LPG streams	Zeolite	1.8-2.5 and 2.5-5	S	1
Promoted Aluminas					
SAS 351	Purification – polymer production	Promoted alumina	1.5-3, 2-5	S	1
SAS 451	H ₂ S, COS and CS ₂ removal	Promoted alumina	1.5-3, 2-5	S	1
SAS 501	Drying, purification (Multibed™)	Proprietary	1.5-3, 2-5, 4-8	S	1
SAS 513	Drying, purification (Multibed™)	Proprietary	3-8	S	1
SAS 820	TBC removal	Promoted alumina	1.8-3	S	1
SAS 830	TBC removal	Promoted alumina	1.1-1.3	TL	1
SAS 834	Oxygenates removal	Promoted alumina	1.1-1.3	TL	1
SAS 837	Arsenic and fluoride removal from water	Proprietary	1.1-1.3	TL	1
SAS 857	HCl removal from gases	Promoted alumina	2-5	S	1
SAS 858	HCl removal from hydrocarbon liquids	Promoted alumina	1.4-2.8	S	1
SAS 870	Tertiary butyl alcohol (TBA) dehydration	Promoted alumina	2-4	S	1
SAS 890	HCl removal from gases	Promoted alumina	2-5	S	1
SAS 891	HCl removal from hydrocarbon liquids	Promoted alumina	1.5-3	S	1



GUARD BEDS

	Applications	Material	Size (mm)	Shape	Form
ACG 360	Sulfur removal from gases	Proprietary	3	Granules	1
ACT 970	Arsenic and Silicon guard bed	Proprietary	1.4-2.8 and 2-4	S	1, 3
CMG 171	Mercury removal from hydrocarbon liquids containing olefins	Proprietary	3	S	3
CMG 271	Mercury removal from gases	Proprietary	2-4	S	2
CMG 273	Mercury removal from hydrocarbon liquids and gases	Proprietary	1.4-2.8 and 2-4	S	3
CMG 406	Mercury and arsenic removal from liquid hydrocarbons	Proprietary	1.2	TL	1
CMG 841	Arsenic and mercury removal from hydrocarbon liquids (RAM II)	Proprietary	2	S	1
S 1275	Sulphur Removal from Hydrocarbon Liquids	Ni special carrier	1.8	TL	7
MEP 171	Arsenic removal from olefinic streams	Proprietary	3	S	3
MEP 191	Arsenic removal from hydrocarbon	PbO	3	S	1

KEY

Shape: S Sphere E Cylindrical extrudate TL Trilobal extrudate P Powder

Form: 1 Oxide 2 Presulfided 3 Fully sulfided 4 Reduced 5 Resucat™ 6 Activated 7 Reduced and stabilized



GRADING MATERIALS

	Applications	Material	Size (mm)	Shape	Form
Inert Grading					
ACT 068	Shaped ring	Inert ceramic	25	Ring	1
ACT 069	Shaped ring	Inert ceramic	19	Ring	1
ACT 070	Shaped ring	Inert ceramic	13	Ring	1
ACT 072	Shaped ring	Inert ceramic	9.5	Ring	1
ACT 077	Porous, shaped fluted ring	Alumina	10	Fluted ring	1
ACT 078	Shaped ring	Inert Ceramic	11.5	Ring	1
ACT 108	Shaped ring	Inert ceramic	8	Ring	1
ACT 139	Inert porous sphere	Alumina	5	S	1
Inert ceramic balls	Catalyst bed support	Silica, alumina	25, 20, 13, 6, 3	S	-
Inert alumina balls	Catalyst bed support	Alumina	13	S	1
Active Grading					
ACT 845	Active porous sphere	NiMo	5	S	1, 3
ACT 961	Active silica trap	NiMo	1-6, 2.5	E	1
ACT 931	High Porosity Active Grading	NiMo	5	Hollow Cylinder	1
ACT 935	High Porosity Active Grading	NiMo	6.2	Hollow Cylinder	1
ACT 951	High Porosity Active Grading	NiMo	3	Hollow Cylinder	1
ACT 971	Active Silica Traps	NiMo	1.6	TL	1
ACT 981	Active Silica Traps	NiMo	1.6	TL	1



HYDROTREATING

	Applications	Material	Size (mm)	Shape	Form
Distillates					
HR 406	Mid-activity HDS for naphtha and pygas	CoMo	1.2 and 1.6	TL	1, 3
HR 448	High-activity HDS and HDN for diesel and VGO	NiMo	1.2, 1.6 and 2.5	TL	1, 2
HR 516	High-activity HDS for naphtha	CoMo	1.2 and 1.6	TL	1, 3
HR 526	Very High-activity HDS for ULSD and VGO	CoMo	1.2 and 1.6	TL	1, 2
HR 538	High-activity HDS and HDN for diesel and VGO	NiMo	1.2, 1.6 and 2.5	TL	1, 2
HR 548	Very High-activity HDS and HDN for diesel and VGO	NiMo	1.2 and 1.6	TL	1, 2
HR 568	Very High-activity HDS for VGO application	NiCoMo	1.2, 1.6, 2.5	TL	1, 2
HR 626	Very High-activity HDS for ULSD	CoMo	1.6	TL	1, 2
HR 945	Hydrogenation of olefins and diolefins for Delta P management	NiMo/γ-alumina	2-4	S	1, 2, 3
Hydrocracking					
HRK 558	Hydrocracking pretreat	NiMo	1.2 and 1.6	TL	1, 2
HDK 776	HDC for mid distillates and lube oils	NiW amorphous Sil/Alumina	1.6	TL	1, 2
HYC 642	HDC for mid distillates and lube oils	NiMo zeolite	1.6	E	1, 2
HYC 652	HDC for mid distillates and lube oils	NiMo zeolite	1.6	E	1, 2
HYK 742	HDC for mid distillates and lube oils	NiMo zeolite	1.6	TL	1, 2
HTS 338	HDS and HDN of VGO in ebullated bed (H-Oil DC)	Proprietary	0.9	E	1, 2
HTS 458	HDS and HDN of DAO in ebullated bed (H-Oil DC)	Proprietary	1.2	E	1, 2
Residue					
HR 858	HDM and HS asphaltene of atmospheric and vacuum residues	NiCoMo	1.8-2.5	TL, E	1
HR 848	HDM of atmospheric and vacuum residue	NiCoMo	1.3	TL, E	1
HR 868	HDM and asphaltene conversion of atmospheric and vacuum residues	NiCoMo	1.5-3 and 4-8.3	S	1, 2
HT 438	HDS and HDN of aromatised residues	NiCoMo	1.3	TL	1
HT 838	HDS, HDN, and HD CCR of atmospheric and vacuum residues	NiCoMo	1.3	TL, E	1

KEY

Shape: S Sphere E Cylindrical extrudate TL Trilobal extrudate

Form: 1 Oxide 2 Presulfided 3 Fully sulfided 4 Reduced 5 Resucat™ 6 Activated 7 Reduced and stabilized

SULFUR RECOVERY

	Applications	Material	Size (mm)	Shape	Form
Claus Catalyst					
AM	Oxygen conversion and Claus catalyst	Proprietary	4-8	S	1
AMS	Oxygen conversion and Claus catalyst	Proprietary	3-6	S	1
CR	Claus catalyst	Alumina	4-8	S	1
CR 35	Advanced alumina Claus catalyst	Alumina	3-6	S	1
CRS 31	Claus catalyst, hydrolysis CO ₂ , CS ₂ , HCN, direct oxidation	TiO ₂	3-4	E	1
CSM 31	Claus catalyst and catalyst management	Promoted alumina	3-6	S	1
DR 5-10	Claus catalyst - active bed support	Alumina	5-10	S	1
Tail Gas Treatment Catalyst					
TG 103	Tail gas treatment	CoMo	2-4	S	1, 3
TG 123	Tail gas treatment	CoMo	2-4	S	1, 3
TG 107	Low-temperature tail gas treatment	CoMo	2-4	S	1, 3
TG 136	Low-temperature tail gas treatment	CoMo	1.2-2.5	TL	1, 3

HYDROGENATION

	Applications	Material	Size (mm)	Shape	Form
Hydrogenation					
AX 744	Aromatics hydrogenation	Ni	1.2	TL	7
AX 745	Aromatics hydrogenation	Ni	1.2	TL	7
AX 746	Olefins and aromatics hydrogenation	Ni	1.3	TL	7
LS 402	Aromatics hydrogenation	Pt, promoter	1.2	E	1
LD 412R	Olefins and aromatics hydrogenation	Pt	1.2	E	4
LS 746	Aromatics hydrogenation	Ni	1.6	TL	7
Primo-G+™					
HR 806	Primo-G+ HDS (selective HDS of cracked naphtha)	Proprietary	2-4	S	1, 3
HR 841	Primo-G+ HDS (selective HDS of cracked naphtha)	Proprietary	1.4-2.8	S	1, 3
HR 845	Primo-G+ SHU (olefins and light sulfur removal)	Proprietary	2-4	S	1, 3
Selective Hydrogenation					
LD 143	Benzene hydrogenation	Ni	2-4	S	1
LD 145	Cracked gasoline hydrogenation	NiMo, special alumina	2-4	S	1, 3
LD 241	Pyrolysis gasoline selective hydrogenation	Ni	2-4	S	1, 5, 8
LD 265	Diolefins selective hydrogenation and olefins hydrogenation	Pd	2-4	S	1, 4
LD 267R	Selective hydroisomerization and Arofining	Pd	2	S	8
LD 269	Diolefins selective hydrogenation and olefins hydrogenation	Pd	2	S	1, 4
LD 271	Butadiene hydrogenation with maximum 1-butene yield	Pd plus promoter	2	S	1, 4
LD 273	MAFD hydrogenation with maximum propylene yield	Pd plus promoter	2	S	1, 4
LD 277	Acetylenes selective hydrogenation	Pd plus promoter	2	S	1, 4
LD 2773	Sulfur-rich C ₄ cut selective hydrogenation or phenylacetylene selective hydrogenation	Pd plus promoter	2	S	1, 4
LD 341	Pyrolysis gasoline selective hydrogenation	Ni	2-4	S	1, 5, 8
LD 365	Pyrolysis gasoline selective hydrogenation	Pd	2-4	S	1, 4
LD 441	Pyrolysis gasoline selective hydrogenation	Ni	2-4	S	1
LD 465	Pyrolysis gasoline selective hydrogenation	Pd	2-4	S	1, 4
LD 485	Pyrolysis gasoline selective hydrogenation	Pd	2-4	S	1, 4
LD 541	Pygas Hydrogenation	Ni	1.6	TR, E	1, 5, 8

KEY

Shape: S Sphere E Cylindrical extrudate TL Tubular extrudate

Form: 1 Oxide 2 Presulfided 3 Fully sulfided 4 Reduced 5 Resucat™ 6 Activated 7 Reduced and stabilized

REFORMING AND ISOMERIZATION

	Applications	Material	Size (mm)	Shape	Form
Isomerization					
ATIS 1L	C ₄ paraffins isomerization	Pt on chlorinated alumina	1.6	E	6
ATIS 2L	C ₅ /C ₆ paraffins isomerization	Pt on chlorinated alumina	1.6	E	6
IS 463	C ₅ olefins skeletal isomerization (iso-5)	Proprietary	1.8	S	1
Oparik	EB and Xylenes isomerization	Pt zeolite	1.4	E	1
Reforming					
AR 707	CCR reforming for aromatics production*	Pt, Sn, promoter	1.8	S	1, 4
AR 701	CCR reforming for aromatics production*	Pt, Sn, promoter	1.8	S	1, 4
AR 501	CCR reforming for aromatics production*	Pt, Sn	1.8	S	1, 4
AR 505	CCR reforming for aromatics production*	Pt, Sn, promoter	1.8	S	1, 4
CR 801	CCR reforming for gasoline production*	Pt, Sn, promoter	1.8	S	1, 4
CR 401	CCR reforming for gasoline production*	Pt, Sn	1.8	S	1, 4
CR 807	CCR reforming for gasoline production*	Pt, Sn, promoter	1.8	S	1, 4
CR 405	CCR reforming for gasoline production*	Pt, Sn	1.8	S	1, 4
CR 702	CCR reforming for gasoline production	Pt, Sn	1.6	S	1, 4
RG 532	Cyclic reforming	Pt	1.2, 1.6 and 2.1	E	1
RG 582	Semi-regeneration and cyclic reforming*	Pt, Ru, promoter	1.2 and 1.6	E	1
RG 682	Semi-regeneration and cyclic reforming*	Pt, Ru, promoter	1.2 and 1.6	E	1

* Low platinum version available

SPECIALIZED CATALYSTS

	Applications	Material	Size (mm)	Shape	Form
Biodiesel					
STR 111	Transesterification for biodiesel production	Proprietary	2.4	E	1
Fischer-Tropsch					
FTF 402	Transformation of FT paraffins	Pt	1.6	E	1
Homogeneous Catalysts – Hydrogenation					
HC 1023	Benzene hydrogenation	Proprietary	Liquid catalyst	–	–
HC 1025	Benzene hydrogenation	Proprietary	Liquid catalyst	–	–
Linear Alkyl Benzenes (LAB)					
DP 805	Dehydrogenation of C ₁₂ -C ₁₄ paraffins for LAB production	Pt, Sn	1.4-2.8	S	4
DS 276	Selective hydro following dehydrogenation in LAB production	Pd plus promoter	2	S	1
Oligomerization					
IP 501	C ₇ /C ₈ olefin oligomerization into gasoline (Polynaphtha™ and Selectopol™)	Proprietary	2-5	S	1
IP 811	Light olefins oligomerization into gasoline and Middle distillates (Polynaphtha™ Selectopol™ Polyfining)	Proprietary	1.6	T	1
Thiophene Alkylation					
TAB01	OAFS	Proprietary	<1.5	S	1
Dimerization of Olefins					
LC 1252	C ₃ or C ₄ olefins dimerization (Dimensol™)	Proprietary	Liquid catalyst	–	–
LC 1255	C ₃ or C ₄ olefins dimerization (Dimensol™)	Proprietary	Liquid catalyst	–	–
LC 2253	Ethylene dimerization to 1-butene (Alphabulol™)	Proprietary	Liquid catalyst	–	–
DS 111	Dimensol reaction finishing (Dimacid™)	Proprietary	Liquid catalyst	–	–
Sweetening					
CCS 30	Sweetening of LPG, gasoline and kerosene	Proprietary	Liquid catalyst	–	6
Aromatics					
ARU 11	Aromatics concentration of pyrolysis gasoline	Proprietary	–	–	–

KEY

Shape: S Sphere E Cylindrical extrudate TL Trilobal extrudate

Form: 1 Oxide 2 Pre-sulfided 3 Fully sulfided 4 Reduced 5 Resucat™ 6 Activated 7 Reduced and stabilized



Benchmark offer

Experience

Five decades of scientific achievement in catalyst and adsorbent research, product development, engineering expertise, process licensing, manufacturing capability, and industrial feedback form the basis of the most advanced and reliable catalysts and adsorbents available anywhere.

Quality

These highly technical products issue from modern production facilities with careful attention being paid to each step of the manufacturing process. The quality of materials, procedures and techniques is subject to continuous improvement. Axens' management systems are ISO 9001 (v2000), ISO 14000 and ISO 18000 certified.

Performance

The true value of our products goes beyond the cost of the delivered material. Axens continuously invests in product development and improvement programs. Our products are backed by performance guarantees assuring that you are getting the proper value for your investment.

Performance management

Technical service

Our strong, experienced technical service teams can assist you in all technical matters involving such activities as dense loading of catalysts and adsorbents, start-up assistance, analysis, troubleshooting, catalyst management including regeneration, material disposal and reactor services.

Resource optimization

Axens offers services designed to optimize returns on both human and operational resources. The Performance Programs business unit is responsible for advanced process control applications, operator training and process simulation, linear programming for refinery optimization, system audits and special training programs. Experience has proved that efforts in these areas are very rewarding.

ANEXOS XXIV

PROFORMA MATERIALES PARA CUERPO DEL RECIPIENTE. EMPRESA IPAC, 2010.

DE : IPAC

N° DE TEL : 5932826600

17 MAR. 2010 16:24 P1

IPAC

Quito, 17 de Marzo del 2010

Proforma No.111005-DG20021

PETROECUADOR

Atención: Ing. Andrés Checa
Presente.-

Tel: 2661260 - Ext. 3290

De nuestra consideración:

De acuerdo a su gentil solicitud a continuación nos permitimos detallar nuestra oferta:

Item	Descripción	U	Cant.	Peso Unitario Kg	Peso Total Kg	Valor Unitario USD \$	Valor Total USD \$	Tiempo de Entrega
1	Pl. 2440x6000x16mm A516 - Gr.70	U	1	1839,00	1839,00	2134,55	2134,55	3 Días
2	Pl. 2440x6000x6.35mm A56 - Gr.70	U	4	729,77	2919,08	847,05	3388,20	3 Días
						4758,08	SUMA \$: 5.522,75	
							12% IVA \$: 662,73	
							TOTAL \$: 6.185,48	

Son: Seis mil ciento ochenta y cinco con 48/100 dólares americanos

Tiempo de entrega: **Según lo indicado**
Forma de pago: **Contado**
Lugar de entrega: **Quito**
Validez de la oferta: **Inmediato**

Sin más por el momento y seguros de contar con su grata orden de pedido, nos despedimos.

Atentamente,
IPAC S.A.

Diana García E.
ESTRUCTURAS
Telf: 2021241
EXT: 114

ANEXOS XXV

PROFORMA MATERIALES, ACCESORIOS E INSUMOS. EMPRESA B&T, 2010.



Quito, 16 Marzo del 2010

PROFORMA

A continuación se detallan los precios de fabricación para un reactor para hidrogenación con una presión de diseño de 850 PSI.

ITEM	COSTOS	PRECIOS	UNIDAD
1	Costo plancha acero A-516 Grado 70	\$ 56	Kg
2	Costo Rolado	\$ 0,35	Kg
3	Costo de soldadura (E7018)	\$ 50	Kg
4	Costo de radiografía	\$ 45	c/radiog.
5	Costo oxicorte plancha e=1/4 plg	\$ 6,35	m
6	Costo oxicorte plancha e=15mm	\$ 6,30	m
7	Costo ensamblado	\$ 0,35	kg
8	Costo pruebas hidrostáticas	\$ 600	m ³
9	Costos Sand blasting	\$ 6	m ²
10	Costo de pintura Sigma Temp 520	\$ 120	gal
11	Costo pintura sigma zinc 158	\$ 120	gal
12	Costo mano de obra pintura	\$ 8	m ²
13	Aislamiento térmico	\$ 150	m
14	Costo brida slipon clase 600 d=12plg	\$ 250	uds
15	Costo brida slipon clase 600 d=4plg	\$ 90	uds
16	Costo cap torisférico d=12plg	\$ 400	c/u
17	Esparragós completo 1 1/4 x 9 plg	\$ 4	c/u
18	Esparragós completos 7/8 x 5 1/2 plg	\$ 2,5	c/u
19	Empaques espirometálico clase 600 d=12 plg	\$ 35	c/u
20	Empaques espirometálico clase 600 d=4 plg	\$ 20	c/u
21	Manómetro Wyka 800 PSI	\$ 150	c/u

Este certificado tendrá únicamente fines académicos debido a que en este se indica los costos reales de fabricación de recipientes en la empresa B&T, por lo tanto esta información no será suministrada a empresas afines.

Atentamente

Engineering Chief
Ingeniería

Jefe de Ingeniería



Empresa con estampe ASME

Vía Carapungo - Marianitas Km. 3 1/2 Calle A Lote No. 28 y Calle I - Telefax: (593-2) 2820 889
Teléfono: 2820 890 - E-mail: beite@punto.net.ec - www.beite.com.ec
Quito - Ecuador

ANEXO XXVI

HOJA TÉCNICA ELECTRODO E-7018

LINDE GAS, AGA, 2010.

ELECTRODO BÁSICO BAJA ALEACIÓN

B - 10

Norma:

AWS	E 7018
-----	--------

Color de Revestimiento: Gris	Identificación: Punta Blanca
------------------------------	------------------------------

Análisis del Metal Depositado:
Características:

C	0.08%	Mn	1.0%	Si	0.6%
---	-------	----	------	----	------

*Valores típicos

Electrodo con revestimiento de bajo hidrógeno, con polvo de hierro. Indicado para la soldadura de aceros de alta resistencia a la tracción (56 kg/mm² Máx) así como para aceros de construcción. Su arco es sumamente estable, poco chisporroteo y para mejores resultados úsese arco corto. Se recomienda mantener un arco corto para garantizar buenos resultados en inspecciones radiográficas. Para trabajos de alta responsabilidad es necesario secarlos a 350°C durante una hora.

Aprobación:

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING

Propiedades Mecánicas:

Resistencia a la Tracción	Elongación	Resistencia al Impacto
54-57 kg/mm ²	30 - 34%	CHARPY-V
76.000		Joules
81.000 lbs/pulg ²		70 - 90 (-29°C)

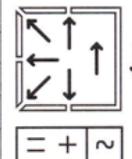
*Valores típicos

Posiciones de Soldar:

Plana, horizontal, sobrecabeza, vertical ascendente, vertical descendente.

Corriente y Polaridad:

Para corriente continua o alterna Electrodo al polo positivo		
ø mm	ø Pulg.	Amperaje
3.20	1/8	100-140
4.00	5/32	140-190
5.00	3/16	190-250



Aplicaciones:

- Para aceros de mediano y bajo carbono, baja aleación
- Para aceros laminados en frío, por sus características de resistencia a la deformación a altas temperaturas, su fácil manejo y óptimo rendimiento, es especialmente adecuado.
- Para soldadura de tuberías de vapor.
- Calderas de alta presión, tanques.
- Piezas para maquinaria pesada.
- Construcciones metálicas en obra.
- Reparaciones Navales.

IMPORTANTE:

Los electrodos húmedos o con manchas de grasa, deben destruirse.

LARGO: 350 mm.

PESO POR CAJA: 20 kg/44 lbs.

ELECTRODO CELULÓSICO ESPECIAL

C - 10

Norma:

AWS	E 6010
-----	--------

Análisis del Metal Depositado:

Color de Revestimiento: rojo ladrillo | Identificación: sin color

C	0.12%	Mn	0.6%	Si	0.25%
---	-------	----	------	----	-------

*Valores típicos

Características:

Es un electrodo de penetración profunda y uniforme que difiere del E6010 convencional por tener determinadas características especiales de soldabilidad en posición vertical descendente. Ideal para pasadas de raíz en la soldadura de oleoductos, donde la alta velocidad, el control del arco y la rápida solidificación de la escoria son sumamente importantes.

Aprobación:

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING

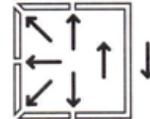
Propiedades Mecánicas

Resistencia a la Tracción	Límite Elástico	Elongación
48 -51 kg/mm ²	40 - 43 kg/mm	24-26%

*Valores típicos

Posiciones de Soldar

Plana, horizontal, sobrecabeza, vertical ascendente, vertical descendente



Corriente y Polaridad

Para corriente continua Electrodo al polo positivo		
ø	1/8"	5/32"
Amp. Mín.	80	110
Amp. Máx.	120	150



Pasada de relleno y recubrimiento



Pasada de Raíz

Aplicaciones:

- Especial para tuberías de petróleo (oleoductos) de los tipos API 5L, X42, X46, X52.
- Tanques de almacenamiento
- Recipientes de presión
- Tuberías en general para la conducción de fluidos

LARGO: 350 mm.

PESO POR CAJA: 20 kg. / 44 lbs.

10