

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS ESFUERZOS SECUNDARIOS EN LA
PROPAGACIÓN DE GRIETAS EN UN REACTOR DE HIDROTRATAMIENTO
ENVEJECIDO EN SERVICIO**

JULIANA MARGARITA GUTIÉRREZ GÓMEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2010

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS ESFUERZOS SECUNDARIOS EN LA
PROPAGACIÓN DE GRIETAS EN UN REACTOR DE HIDROTRATAMIENTO
ENVEJECIDO EN SERVICIO**

JULIANA MARGARITA GUTIÉRREZ GÓMEZ

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniera Mecánica**

Director

**OMAR ARMANDO GÉLVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

Co-Director

**EDWING ALBERTO MORANTES APONTE
Ingeniero Metalúrgico**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2010

DEDICATORIA

A mi mamá, Leonor que siempre estuvo ahí en los momentos difíciles, que me ha ayudado a cumplir mis sueños, que ha disfrutado mis alegrías y sufrido mis tristezas.

A mi hermano, Camilo por su apoyo incondicional y comprensión infinita.

A mis tías, Yaneth y Olga por acompañarme en todo momento

A mi amor, Carlos Fernando por todo lo que ha hecho
por mí.

Y a mis amigos, a todos aquellos que de
una u otra forma aportaron en mi
formación profesional.

JULIANA MARGARITA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, por las oportunidades y el aporte a mi crecimiento personal y profesional.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica, especialmente al profesor Omar Gelvez, por creer en mis capacidades, por su colaboración y apoyo en la realización de mi proyecto de grado.

Al grupo de investigación en crudos pesados, especialmente al Ing. Darío Yesid Peña, Iván Uribe y Custodio Vásquez por su colaboración, aportes y paciencia.

Al Instituto colombiano del petróleo ICP-ECOPETROL, al Ing. Luis Eduardo Zabala, Ing. Oscar Culman, Ing. Haydee Quiroga y muy especialmente al Ing. Edwing Morantes por su confianza, apoyo y conocimientos.

A toda mi familia con la que cuento incondicionalmente y ha sido mi soporte en la construcción de mi vida.

A todos mis amigos y compañeros de la Universidad por su colaboración...

JULIANA MARGARITA

CONTENIDO

INTRODUCCION	1
1. OBJETIVOS	3
1.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2. GENERALIDADES DEL HIDROTRATAMIENTO	5
2.1 EL HIDROTRATAMIENTO EN LA INDUSTRIA PETROLERA	7
2.2 UNIDAD DE HIDROTRATAMIENTO	14
2.2.1 Compresores de hidrógeno	15
2.2.2 Horno	16
2.2.3 Separadores.....	18
2.2.4 Reactor.....	21
2.3 PROCESO QUÍMICO	23
2.3.1 Hidrodesulfuración	25
2.3.2 Hidrodesnitrificación	29
2.3.3 Hidrodesoxigenación.....	32
2.3.4 Hidrogenación de olefinas y aromáticos.....	34
2.3.5 Reducción de metales pesados	35
3. ANÁLISIS DEL REACTOR	37
3.1 ANÁLISIS DE ESFUERZOS	40
3.1.1 Esfuerzos primarios.....	42
3.1.2 Esfuerzos secundarios	52
3.2 INTRODUCCIÓN A LA NORMA API 579	58

3.2.1	Evaluación de grietas, sección 9, API 579 FFS	61
3.2.2	Procedimiento para la evaluación de grietas.....	64
4.	ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DE LA CRITICIDAD DE LAS GRIETAS PRESENTES EN EL REACTOR DE HIDROTRATAMIENTO ENVEJECIDO EN SERVICIO CON BASE EN LA NORMA API 579 FFS	68
4.1	ANÁLISIS DE CRITICIDAD	71
4.1.1	Paso 1	71
4.1.2	Paso 2	72
4.1.3	Paso 3	82
4.1.4	Paso 4	88
4.1.5	Paso 5	92
4.1.6	Paso 6	95
4.1.7	Paso 7	100
4.1.8	Paso 8	102
4.1.9	Paso 9	107
4.1.10	Paso 10	110
4.1.11	Paso 11	111
4.1.12	Paso 12	115
4.1.13	Paso 13	117
4.2	ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN	119
4.3	PROGRAMACIÓN Y OPTIMIZACIÓN.....	122
5.	ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DE LA CRITICIDAD DE LAS GRIETAS CON BASE EN LA SIMULACIÓN DEL REACTOR DE HIDROTRATAMIENTO ENVEJECIDO EN SERVICIO.....	124

5.1	CONDICIONES INICIALES Y MODELAMIENTO DEL REACTOR DE HIDROTRATAMIENTO	125
5.2	SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE ESFUERZOS	132
5.2.1	Estado estable	132
5.2.2	Estado transitorio	137
5.3	CÁLCULO DE LA CRITICIDAD DE LAS GRIETAS CON EL REACTOR DE HIDROTRATAMIENTO SIMULADO Y CON BASE EN LA NORMA API 579 FFS 140	
5.4	ESTIMACIÓN DE LA CRITICIDAD CON BASE EN LA SIMULACIÓN Y LOS ESFUERZOS NORMALES PRINCIPALES EN ESTADO ESTABLE	146
5.5	CÁLCULO DE CRITICIDAD CON BASE EN LA SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO	157
6.	CONCLUSIONES	161
7.	RECOMENDACIONES	163
	BIBLIOGRAFÍA	164
	ANEXOS.....	169

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso básico de hidrotratamiento	6
Figura 2. Derivados del petróleo	8
Figura 3. Planta de hidrotratamiento de parafinas	9
Figura 4. Compuestos de azufre presentes en derivados.....	12
Figura 5. Hidrotratamiento de nafta	14
Figura 6. Compresores de hidrógeno	15
Figura 7. Zonas de un horno de proceso	17
Figura 8. Separador de alta presión caliente	20
Figura 9. Reactor	22
Figura 10. Ubicación de las unidades de hidrotratamiento	24
Figura 11. Hidrodesulfuración	27
Figura 12. Estructura aromático polinuclear	35
Figura 13. Compuestos metálicos de vanadio y níquel.....	36
Figura 14. Reactor de hidrotratamiento	38
Figura 15. Ambiente de ANSYS WORKBENCH	41
Figura 16. Esfuerzos circunferenciales sobre un elemento diferencial	43
Figura 17: Esfuerzos longitudinales sobre un elemento diferencial	44
Figura 18. Esfuerzos de un elemento de un anillo unitario	47
Figura 19. Distribución de esfuerzos en un cilindro de pared gruesa	51
Figura 20. Distribución de temperatura longitudinal.....	52
Figura 21. Distribución de temperatura transversal	53
Figura 22. Distribución de temperaturas en cilindros	54
Figura 23. Distribución de temperaturas en cilindros de pared delgada	55
Figura 24. Distribución de grietas	64
Figura 25. Proceso del diagrama de evaluación de falla	67
Figura 26. Distribución de esfuerzos térmicos	70
Figura 27. Diagrama de evaluación de falla FAD actual	70
Figura 28. Dimensiones básicas del reactor	73

Figura 29. Variables térmicas	77
Figura 30. Distribución de esfuerzos por overlay	82
Figura 31. Comportamiento de la pérdida de tenacidad	85
Figura 32. Tendencia de la pérdida de tenacidad	85
Figura 33. Factor de envejecimiento J	86
Figura 34. Determinación de la tenacidad	88
Figura 35. Zona crítica del reactor	89
Figura 36. Variación de elementos por presencia de una grieta	96
Figura 37. Aproximación de la zona plástica	112
Figura 38. Diagrama de evaluación de falla para el reactor de hidrotreatmento .	118
Figura 39. Pantalla principal análisis de criticidad de grietas superficiales internas semielípticas en recipientes a presión interna de pared gruesa	123
Figura 40. Plano de construcción del reactor	129
Figura 41. Modelamiento reactor de hidrotreatmento	130
Figura 42. Aproximación de los defectos	131
Figura 43. Esfuerzos normales principales	134
Figura 44. Dirección de esfuerzos principales	135
Figura 45. Calentamiento del reactor de hidrotreatmento	138
Figura 46. Enfriamiento del reactor de hidrotreatmento	139
Figura 47. Diagrama de evaluación de falla para el reactor de hidrotreatmento simulado	146
Figura 48. Diagrama de evaluación de falla para esfuerzos simulados	155
Figura 49. Cargas aplicadas al reactor de hidrotreatmento para las simulaciones	175
Figura 50. Reactor ideal – estado estable – esfuerzos equivalentes	176
Figura 51. Reactor grieta 1 – estado estable – esfuerzos equivalentes.....	177
Figura 52: Reactor grieta 2 – estado estable – esfuerzos equivalentes.....	178
Figura 53. Reactor grieta 3 – estado estable – esfuerzos equivalentes.....	179
Figura 54. Reactor real (tres defectos) – estado estable – esfuerzos equivalentes	180

Figura 55. Reactor real (tres defectos) – estado transitorio enfriamiento –
esfuerzos equivalentes181

Figura 56. Reactor real (tres defectos) – estado transitorio calentamiento –
esfuerzos equivalentes182

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fracciones obtenidas en la refinación del crudo	11
Tabla 2. Compuestos de azufre en hidrocarburos	26
Tabla 3. Principales moléculas de azufre en asfáltenos	28
Tabla 4. Compuestos de nitrógeno en hidrocarburos	30
Tabla 5. Principales moléculas de nitrógeno en asfáltenos	31
Tabla 6. Compuestos de oxígeno en asfáltenos	33
Tabla 7. Clases de grietas	63
Tabla 8. Esfuerzos según ecuaciones de diseño	69
Tabla 9. Parámetros operacionales iniciales	71
Tabla 10. Características de las grietas	72
Tabla 11. Esfuerzos primarios calculados	76
Tabla 12. Esfuerzos secundarios del reactor	80
Tabla 13. Especificaciones del material del reactor	83
Tabla 14. Dimensiones de las grietas Agosto 2005	90
Tabla 15. Dimensiones de las grietas Marzo 2007	90
Tabla 16. Dimensiones de las grietas Octubre 2008	91
Tabla 17. Factores de seguridad parciales	92
Tabla 18. Esfuerzos primarios modificados	95
Tabla 19. Esfuerzos secundarios modificados	95
Tabla 20. Esfuerzos de referencia primarios	100
Tabla 21. Relación de carga	101
Tabla 22. Coeficientes de Influencia para una grieta superficial	104
Tabla 23. Intensidad de esfuerzos por cargas primarias	107
Tabla 24. Esfuerzos de referencia secundarios	109
Tabla 25. Intensidad de esfuerzos por cargas secundarias	111
Tabla 26. Factor ψ de interacción plasticidad	113
Tabla 27. Factor ϕ de interacción plasticidad	114
Tabla 28. Factor de interacción plástica	115

Tabla 29. Relación de tenacidad.....	116
Tabla 30. Relación de carga y de tenacidades	117
Tabla 31. Velocidad de propagación.....	121
Tabla 32. Condiciones operacionales del reactor de hidrotratamiento	126
Tabla 33. Esfuerzos normales simulación reactor de hidrotratamiento.....	136
Tabla 34. Esfuerzos de referencia primarios para reactor simulado	141
Tabla 35. Relación de carga para el reactor simulado y calculado	142
Tabla 36. Intensidad de esfuerzos para el reactor simulado.....	143
Tabla 37. Factor de interacción plástica para el reactor simulado	144
Tabla 38. Relación de tenacidades para el reactor simulado	145
Tabla 39. Relaciones de carga y tenacidad para el reactor simulado.....	145
Tabla 40. Esfuerzos de referencia primarios con esfuerzos simulados	148
Tabla 41. Relación de carga para esfuerzos simulados	149
Tabla 42. Intensidad de esfuerzos para esfuerzos simulados y calculado	150
Tabla 43. Intensidad de esfuerzos residuales.....	151
Tabla 44. Factor de interacción plástica para el reactor simulado	153
Tabla 45. Relación de tenacidad para esfuerzos simulados.....	154
Tabla 46. Relación de carga y tenacidad para el reactor simulado.....	154
Tabla 47. Diagramas de evaluación de falla con esfuerzos analíticos y simulados	156
Tabla 48. Evaluación de criticidad para el calentamiento del reactor	158
Tabla 49. Evaluación de criticidad para el enfriamiento del reactor	160

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: Líneas de código para el programa implementado en el análisis de criticidad de grietas superficiales internas semielípticas en recipientes a presión interna de pared gruesa:	170
ANEXO B: Simulación del reactor de hidrotratamiento R 111B	174

GLOSARIO

ANSYS: Software de simulación para predecir el comportamiento de un modelo bajo la teoría de elementos finitos.

ESFUERZOS DE MEMBRANA: Es el valor medio del esfuerzo normal que actúa sobre la sección transversal.

ESFUERZOS DE PANDEO: Es la componente variable de los esfuerzos normales.

ESFUERZO DE REFERENCIA: Es la representación de los efectos de la plasticidad sobre la relación de carga.

ESFUERZOS PRIMARIOS: Esfuerzo normal por cargas no-autolimitante. Generalmente es producido por la presión interna y cargas vivas.

ESFUERZOS SECUNDARIOS: Esfuerzo desarrollado por restricciones (autolimitante). Generalmente producido por variaciones térmicas, en algunas ocasiones por grandes discontinuidades estructurales.

ESTADO ESTABLE: En este estado los parámetros operacionales permanecen casi constantes.

ESTADO TRANSITORIO. En este estado los parámetros operacionales varían en un proceso controlado.

FATT: Temperatura de transición por aspecto de fractura.

HIDROTRATAMIENTO: proceso en el que se hace reaccionar una corriente de hidrocarburo a alta temperatura y presión con hidrogeno para la eliminación parcial de azufre, metales pesados, oxígeno y nitrógeno.

INTENSIDAD DE ESFUERZOS: Medida de la intensidad de los esfuerzos en la punta de una grieta ideal en un material lineal elástico; depende de la carga y de la geometría de la grieta.

MODELAMIENTO: Es la representación computacional de un sólido.

REACTOR: Recipientes a presión donde se llevan a cabo intercambios energéticos en condiciones operacionales exigentes.

RESUMEN

TÍTULO:

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS ESFUERZOS SECUNDARIOS EN LA PROPAGACIÓN DE GRIETAS EN UN REACTOR DE HIDROTRATAMIENTO ENVEJECIDO EN SERVICIO*

AUTOR:

Juliana Margarita Gutiérrez Gómez**

PALABRAS CLAVES:

Esfuerzos secundarios, hidrotratamiento, API 579 FFS, criticidad de grietas.

DESCRIPCIÓN:

Con el único motivo de contribuir a la disminución del deterioro ambiental la industria petrolera implementa nuevos métodos como hidrotratar el crudo para obtener no solo mayor cantidad de compuestos, si no derivados de mejor calidad.

Este procedimiento se lleva a cabo en unidades de hidrotratamiento las cuales básicamente mezclan el hidrogeno con el hidrocarburos para disminuir los compuestos más contaminantes como el azufre, nitrógeno, metales pesados y oxigeno. El equipo crítico de este sistema es el reactor; es un recipiente a presión en el cual ocurren los intercambios energéticos y normalmente trabaja bajo unas condiciones operaciones muy severas.

Las cargas térmicas y mecánicas a las que está expuesto el reactor generan múltiples esfuerzos y zonas óptimas para la generación y propagación de grietas. Los procesos de cálculo para determinar estos esfuerzos cuando se presentan defectos son complejos; lo que se realizó en este proyecto fue implementar una metodología práctica para determinar los esfuerzos primarios (producidos por la presión) y los esfuerzos térmicos (producidos por las variaciones de temperatura) con los cuales se realizan los análisis de criticidad de grietas, para facilitar su aplicación se generó un programa en Matlab..

Se implementó estas nuevas formas de cálculo para la determinación de los esfuerzos; también se utilizó la simulación en ANSYS del reactor de hidrotratamiento, tanto en estado estable como en estado transitorio, y con estas dos metodologías propuestas se realizó el análisis de criticidad para obtener el comportamiento de las grietas. Los resultados obtenidos fueron comparados con la metodología especificada por la norma, y se logró una buena caracterización del comportamiento de los defectos.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director Omar Armando Gelvez Arocha y Edwing Alberto Morantes.

ABSTRACT

TÍTULO:

STUDY OF THE INFLUENCE OF SECONDARY EFFORTS IN THE SPREAD OF CRACKS IN A HYDROTREATING REACTOR FOR AGED IN SERVICE *

AUTHOR:

Juliana Margarita Gutiérrez Gómez**

KEY WORDS:

Secondary stress, Hydrotrea, API 579 FFS, Criticality analysis of cracks.

DESCRIPTION:

With the only reason to contribute to the reduction of environmental degradation the oil industry implements new methods such as oil hydro-treated to obtain not only larger number of compounds, but also derivative of better quality.

This procedure is carried out in hydro-treatment units which basically combine the hydrogen with the hydrocarbon compounds to reduce pollutants such as sulfur, nitrogen, heavy metals and oxygen. The critical equipment of this system is the reactor pressure vessel is one in which energy exchanges occur and usually working under very severe operating conditions.

Thermal and mechanical loads they are exposed to the reactor generate multiple efforts and best areas for the generation and propagation of cracks. The calculation processes for determining these efforts when defects are complex, what it was done in this project was to implement a practical methodology for determining the primary forces (produced by pressure) and thermal stress (caused by temperature variations) with which to perform the criticality analysis of cracks, for ease its application a program in Matlab was created.

These new forms of calculation for the determination of effort were implemented; also a simulation in ANSYS of hydro-treatment reactor was used, both steady state and transient state, and with these two methods proposed were analyzed for criticality obtain the behavior of the cracks. The results were compared with the methodology specified by the standard API 579 FFS, and achieving a good characterization of the behavior of the defects.

* Project Work

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering, Director Omar Armando Gelvez Arocha and Edwin Alberto Morantes.

INTRODUCCION

Debido al deterioro medioambiental que enfrentamos actualmente, la explotación y refinación del petróleo evoluciona para lograr una mejor calidad en la obtención de productos, para lo cual se busca adicionar procesos eficientes en las líneas de producción. Uno de los más innovadores es hidrotratar el crudo, con lo que se obtiene no solo mayor cantidad de derivados si no más limpios, pues se extraen los elementos más contaminantes como el azufre, nitrógeno y metales pesados.

Este proceso se realiza en reactores que están expuestos a múltiples esfuerzos debido a las cargas térmicas y mecánicas que soportan, de igual manera la variación constante de presión y temperatura genera zonas críticas y concentración de esfuerzos los cuales son ambientes óptimos para la generación y propagación de grietas; también pueden ser influenciados por otros factores como el trabajo con hidrógeno, catalizadores y ambientes corrosivos que pueden deteriorar el equipo produciendo fallas indeseadas.

Algunas investigaciones muestran que la presencia de grietas (generación) en estos equipos es inducida por la difusión de hidrógeno; pero la propagación o crecimiento de las grietas se puede producir por múltiples factores como pérdida de tenacidad del material por la concentración de hidrógeno, deterioro de la microestructura por presencia de hidrógeno y concentración de esfuerzos.

Uno de los parámetros más influyentes en la propagación de grietas es la concentración de esfuerzos los cuales generan zonas críticas en las cuales pueden caracterizarse los esfuerzos primarios producidos por la presión y los esfuerzos secundarios producidos principalmente por la temperatura. En esta investigación se desea determinar si los esfuerzos secundarios son un parámetro influyente en la propagación de grietas.

La mayoría de los procesos de cálculo de los esfuerzos primarios y secundarios es realizado analíticamente, este procedimiento es complejo, conservativo y demorado; por estas razones es necesario estudiar nuevas alternativas de solución como el modelamiento CAD y el análisis CAE; los cuales brindan soluciones rápidas, de fácil acceso, no intrusivas y de gran exactitud.

Estos nuevos procedimientos están siendo implementados para crear nuevas herramientas de prevención que determinen las características de falla en los equipos y el estado de los mismos para disminuir el número de inspecciones y el tiempo de paradas realizadas a equipos como los reactores de hidrotreatmento. También buscan combatir la incertidumbre que existe alrededor de estos equipos ya que los análisis de esfuerzos se realizan con valores aproximados dando como resultado intervalos de tiempo que deben interpretarse de manera conservadora.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir en el estudio de fenómenos de falla mecánica en equipos de proceso sometidos a presión bajo condiciones de trabajo como parte fundamental del análisis de integridad estructural de equipos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar la influencia de los esfuerzos secundarios en la propagación de grietas en el reactor de hidrotreatmento de parafinas R 111B de la refinería de Barrancabermeja envejecido por hidrogeno en servicio, para lo cual se deberá:

- Calcular con base en el capítulo 9 de la norma 579 FFS; los esfuerzos primarios y secundarios en el reactor de hidrotreatmento, con parámetros reales de operación tomados del histórico de presión y temperatura del mes de junio de 2008.
- Analizar el comportamiento de las grietas del reactor de hidrotreatmento aplicando los esfuerzos calculados para determinar si se presenta propagación de las grietas y determinar la grieta critica con base en la norma 579 FFS.
- Establecer una metodología practica para este procedimiento.

Determinar el nivel y la distribución de esfuerzos (zonas críticas) en el reactor de hidrotreatmento a partir del modelamiento en ANSYS 11.0 en estado estable y estado transitorio:

- Realizar el análisis con un rango de presión interna de 0 a 1400 PSI y temperatura interna de 0 a 600°C para estado transitorio.
- Realizar el análisis en estado estable con temperatura y presión de trabajo 1400 PSI y 600°C; con una variación de temperatura lineal de 13°C de la cima al fondo del reactor.

Realizar el cálculo de propagación de grietas y análisis de grieta crítica con los valores de esfuerzos obtenidos en la simulación del reactor y comparar los resultados con los obtenidos en el procedimiento de la norma API 579 FFS.

2. GENERALIDADES DEL HIDROTRATAMIENTO

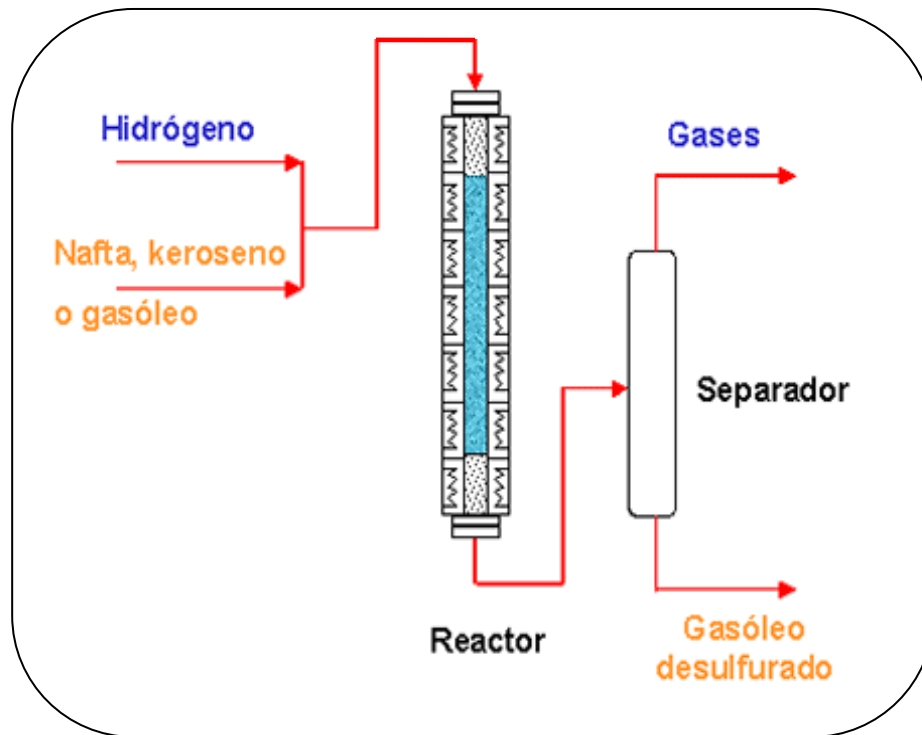
El hidrotratamiento es un proceso muy utilizado debido a la necesidad creciente de aprovechar los recursos, en este caso los hidrocarburos, los cuales pueden ser reprocesados para obtener mayor cantidad de productos y de mejor calidad con alta demanda y valor comercial. Específicamente es usado para adaptar los productos a los requerimientos ambientales exigidos, los cuales son muy estrictos en la industria petrolera por ser altamente contaminante, sin perjudicar la producción.

La función descontaminante de las plantas de hidrotratamiento se debe a la eliminación parcial de azufre, metales pesados, oxígeno y nitrógeno en los hidrocarburos, residuos del alto horno o derivados de otros procesos. Este es el propósito de los ministerios de Ambiente, Vivienda y desarrollo territorial, y minas y energía los cuales restringieron las partes por millón de azufre en combustibles líquidos como la gasolina de 1000 a 300 PPM y en el ACPM de 4500 a 500 PPM¹.

Específicamente el hidrotratamiento es un proceso en el que se hace reaccionar una corriente de hidrocarburo a alta temperatura y presión en presencia de un agente catalítico con una corriente de hidrogeno. Normalmente se manejan temperaturas de 400 a 600°C y presiones de 90 a 100 bares, estos factores operacionales dependen directamente de la cantidad de hidrocarburo a tratar, el elemento de mayor relevancia, el catalizador y el porcentaje de remoción deseado, pues influyen directamente en las reacciones del proceso. En la figura 1 se muestra el proceso de hidrotratamiento de manera general para productos del alto horno como la nafta, el gasóleo y el querosene, los cuales son desulfurados y transformados en productos más livianos de manera muy eficiente.

¹ Consejo Nacional de Política Económica y Social, República de Colombia y Departamento Nacional de Planeación. Documento Conpes, Proyecto de hidrotratamiento para la refinería de Barrancabermeja. 2004. Pg 1.

Figura 1. Proceso básico de hidrotratamiento



Fuente:http://www.repsol.com/es_es/todo_sobre_repsol_ypf/conocer_repsol_ypf/innovacion_y_tecnologia/lineas_de_trabajo/ref_planta_hidrotratamiento.aspx

Una ventaja del hidrotratamiento es que el catalizador, el hidrógeno y los elementos retirados del hidrocarburo (azufre, metales pesados, nitrógeno), pueden recuperarse para su comercialización o reutilización en el proceso; esta es otra razón por la que se le considera un proceso totalmente limpio.

Además puede ser usado tanto en etapas de pre-tratamiento, es decir se puede tratar crudo antes del ingreso a las unidades de destilación; como en el post-tratamiento, es decir se pueden tratar residuos del alto horno para reprocesarlos o productos ya terminados como gasolina, naftas, querosene, fuel oíl y gasóleo para disminuir los porcentajes de azufre.

2.1 EL HIDROTRATAMIENTO EN LA INDUSTRIA PETROLERA

Las corrientes de refinería son mezclas complejas de miles de compuestos orgánicos, que en los procesos petroquímicos reaccionan e interactúan, constituyendo la base del negocio de la industria petrolera. Las impurezas presentes en los derivados del petróleo son parte integral de compuestos heteroatómicos; son compuestos que en el crudo están conformados por átomos distintos al carbono e hidrógeno, como el azufre, nitrógeno, oxígeno, níquel, vanadio, hierro, sodio, calcio, y otros menos comunes².

Los diferentes compuestos que contiene las impurezas, depende directamente del rango de destilación. Por ejemplo, destilados livianos, como nafta y queroseno, contienen azufre en forma de mercaptanos, sulfuros, polisulfuros, tiofenos y tiofenos sustituidos. Destilados medios, como el gasóleo y el gasóleo de vacío, pueden contener moléculas más pesadas, tipo benzotiofeno y dibenzotiofeno. Los residuos contienen compuestos aún más pesados, como los benzonaftotiofenos y poli-aromáticos heterocíclicos³. En la figura 2, se puede visualizar la escala de derivados del petróleo de acuerdo a su temperatura de ebullición.

Además, de las impurezas, los destilados a hidrotatar pueden contener productos insaturados, susceptibles de hidrogenarse. En primer lugar se encuentra los aromáticos y poli-aromáticos, cuyo número de anillos aromáticos incrementa con el rango de destilación. Y en segundo lugar, las olefinas, compuestos originalmente ausente en los destilados, pero presentes en ciertos procesos de hidrotatamiento, debido a que provienen de unidades previas, donde se realiza algún tratamiento al hidrocarburo.

² González Yris Kenelma. Caracterización de las corrientes del reactor del proceso de hidrotatamiento de gasóleo para su aplicación a un nuevo modelo cinético predictivo. Universidad nacional experimental politécnica Antonio José de Sucre. Venezuela. 2008. Pg 44.

³ IBID Pg. 45

Figura 2. Derivados del petróleo



Fuente: <http://www.grupoag.es/refineriabalboa/proyecto/que-es-una-refineria.php>

Como ya se menciona de la refinación del crudo se obtienen gases, gasolina, gasóleo y fracciones pesadas, que comprenden lubricantes, residuos asfálticos y fuel oil. El hidrocarburo más importante es la gasolina; por esta razón se busca que tengan una adecuada constitución química y ausencia de compuestos corrosivos. Las gasolinas pueden ser de varios tipos⁴:

- Ligera, producida en la estabilización.
- Directa, que se obtiene en el fraccionamiento.
- De craqueo y reformado, que se obtiene en los procesos de tratamiento con hidrógeno.
- De reversión gaseosa, que se obtiene con procesos químicos.

⁴ Hernández del Olmo Carolina. Desulfuración de Dibenzotiofeno con *Rhodococcus erythropolis* IGTS8. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, 2004. Pg 16.

De las fracciones más pesadas, el gasóleo es la más importante. Los crudos parafínicos producen un gasóleo con mayor valor comercial. Los crudos asfálticos dan una fracción gasóleo de rendimiento regular, por lo que normalmente se destina a craqueo para obtener gases olefínicos, gasolina de calidad y combustibles (fuel oil). Los gasóleos tienen distinto tratamiento si el crudo es parafínico o asfáltico⁵.

Industrialmente el hidrotratamiento se utiliza para eliminar alrededor del 90 % de los contaminantes presentes en el crudo y derivados (azufre, nitrógeno, haluros, metales e hidrocarburos insaturados (olefinas)), los cuales son perjudiciales para el medio ambiente y pueden desactivar los catalizadores de diferentes procesos que mejoran la calidad de los destilados impidiendo resultados óptimos en los productos terminados como en gasolinas y gasóleos, en la figura 3 se muestra la planta de hidrotratamiento de parafinas de la refinería de Barrancabermeja.

Figura 3. Planta de hidrotratamiento de parafinas



Fuente:<http://www.motor.com.co/revistamotor/26deagostode2009/IMAGEN/IMAGEN-5935567-2.jpg>

⁵ Hernández del Olmo Carolina. Desulfuración de Dibenzotiofeno con *Rhodococcus erythropolis* IGTS8. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, 2004. Pg 17.

Normalmente el hidrotratamiento se realiza antes que otros procesos (como la isomerización, reformación, craqueo catalítico e hidrocraqueo), para que los catalizadores de estos procesos no se contaminen con hidrocarburos no tratados y después de la destilación primaria para reducir contaminantes en destilados aunque nuevos estudios muestran que se obtendrían mejores resultados al implementar el hidrotratamiento a mezclas de crudos sin procesar o destilar, ya que se reduciría en gran porcentaje los problemas que ocasionan estos contaminantes en los equipos de las refinerías.

También se utiliza antes del craqueo catalítico para reducir el azufre y de esta manera incrementar el rendimiento en la producción, así como mejorar las fracciones intermedias de crudo tratadas ya que tanto el hidrógeno como el catalizador enriquecen el contenido de las olefinas y diolefinas transformándolas en parafinas y reducen el contenido de aromáticos. Con esto se obtienen más derivados livianos como el queroseno, gasóleo diesel, gasolina con alto índice de octanos y gasóleos de calefacción. En la tabla 1 se muestran las diferentes fracciones del crudo después de su refinamiento y su aplicación.

El hidrotratamiento es un proceso donde los compuestos de azufre y nitrógeno que hay en la carga a tratar se convierten en ácido sulfhídrico (H_2S) y amoníaco (NH_3); de igual manera el oxígeno presente se transforma en vapor de agua y los metales se depositan en el catalizador como metales libres; en la figura 4 se muestran algunos compuestos de azufre presentes en los derivados con sus puntos de ebullición. El ácido sulfhídrico y el amoníaco residuales se eliminan por separación de vapor que recupera el ácido sulfhídrico en una corriente altamente concentrada para conversión en azufre elemental el cual puede comercializarse. En el hidrotratamiento debe controlarse el ácido sulfhídrico principalmente, se debe mantener en un nivel mínimo con objeto de controlar la corrosión en los equipos.

Tabla 1. Fracciones obtenidas en la refinación del crudo

	Producto	Intervalo T_{eb}	Longitud cadena carbonada	Aplicaciones
FRACCIONES LIGERAS	Gas de refinería((GLP) Gasolina directa Nafta pesada	< 20°C < 20°C 40-150°C 150-200°C	C ₁ - C ₂ C ₃ – C ₄ C ₅ – C ₉ C ₁₀ – C ₁₂	Combustible para refinería; calefacción doméstica e industrial; carburante para automóviles; materia prima para productos químicos, disolvente, etc.
FRACCIONES MEDIAS	Queroseno Gasóleo	170-250°C 250-320°C	C ₁₃ – C ₁₇ C ₁₇ – C ₂₀	Lámparas de alumbrado; carburante para turborreactores; carburante para motores Diesel; calefacción doméstica
FRACCIONES PESADAS	Fuelóleo ligero Fuelóleo pesado Asfaltos	340-400°C 400-500°C >500°C	C ₂₀ – C ₃₅ > C ₃₅	Combustible para buques, locomotoras, etc; materia prima para lubricantes, ceras y parafinas, cremas, aceites esenciales; pavimentación, techado, impermeabilización; abrasivos, electrodos

Fuente: Hernández del Olmo Carolina, Desulfuración de Dibenzotiofeno con *Rhodococcus erythropolis* IGTS8, Madrid, 2004.

Este proceso de transformaciones químicas es importante en la industria petrolera pues existen límites comerciales, no solo restricciones ambientales si no intervalos para ciertos compuestos con los cuales un hidrocarburo tiene un alto o bajo valor comercial, los valores industriales exigidos actualmente son los siguientes⁶:

- Gravedad API: Mínimo 18 (ASTM D-4052)
- Carbón conradson: 3.5% masa mínimo (ASTM D-4530)
- Metales (Ni, V): 6.0 ppm máximo (UOP-800)
- Nitrógeno total: 0.20% masa máximo (ASTM D-5291)
- Azufre total: 0.35% masa máximo (ASTM D-2622/D-4294)

⁶ ECOPETROL. Características técnicas para la preselección del catalizador para hidrotratamiento de residuos (UNIBON), anexo 6.2009. Pg 4.

Figura 4. Compuestos de azufre presentes en derivados

<u>TIPO COMBUSTIBLE</u>	<u>COMPUESTO</u>	<u>PUNTO DE EBULLICIÓN EN DESTILACIÓN</u>
	no tiofénico	$R = S$ < 80 °C
	tiofenos	 84 °C
	sulfuros butílicos terciarios	 99 °C
	metil-etil sulfuros	$C-S-S-C-C$ 135 °C
	benzotiofenos	 219 °C
	dibenzotiofenos	 293 °C

Fuente: Hernández del Olmo Carolina, Desulfuración de Dibenzotiofeno con *Rhodococcus erythropolis* IGTS8, Madrid, 2004.

A veces durante el proceso de hidrotratamiento se forma cloruro de hidrógeno y se condensa en forma de ácido clorhídrico en las secciones de baja temperatura de la unidad, lo que puede producir corrosión localizada. De igual manera en las unidades de alta presión y temperatura se forma bisulfuro amónico, en caso de fuga de estos gases, se producen vapores de naftas aromáticas que contienen benceno, ácido sulfhídrico, hidrógeno y amoníaco los cuales son productos tóxicos; también pueden producirse exposiciones o derrames de agua amarga, por estos gases. Otra precaución es evitar la presencia de fenol, el cual se genera si se procesan cargas con alto punto de ebullición⁷.

⁷ Organización Internacional del Trabajo, O.I.T. y Ministerio del trabajo y Asuntos Sociales. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Vol III. Parte XII. Cap 78. Director cap, Kraus Richard. 2001. Pg 14.

Un tiempo de contacto y/o una temperatura excesivos pueden provocar coquización en la unidad de hidrotreatmento y esto obliga a tomar precauciones al descargar el catalizador coquizado del reactor para prevenir incendios internos o externos por el sulfuro de hierro. El catalizador coquizado deberá enfriarse hasta una temperatura inferior a 49 °C antes de poder extraerse del reactor, o vaciarlo en recipientes inertes (tratados previamente con nitrógeno) donde pueda enfriarse antes de su manipulación; luego debe procesarse para evitar el envenenamiento y pérdida del catalizador debido a la deposición de azufre para catalizadores metálicos, nitrógeno para catalizadores ácidos y metales libres de todos los tipos⁸.

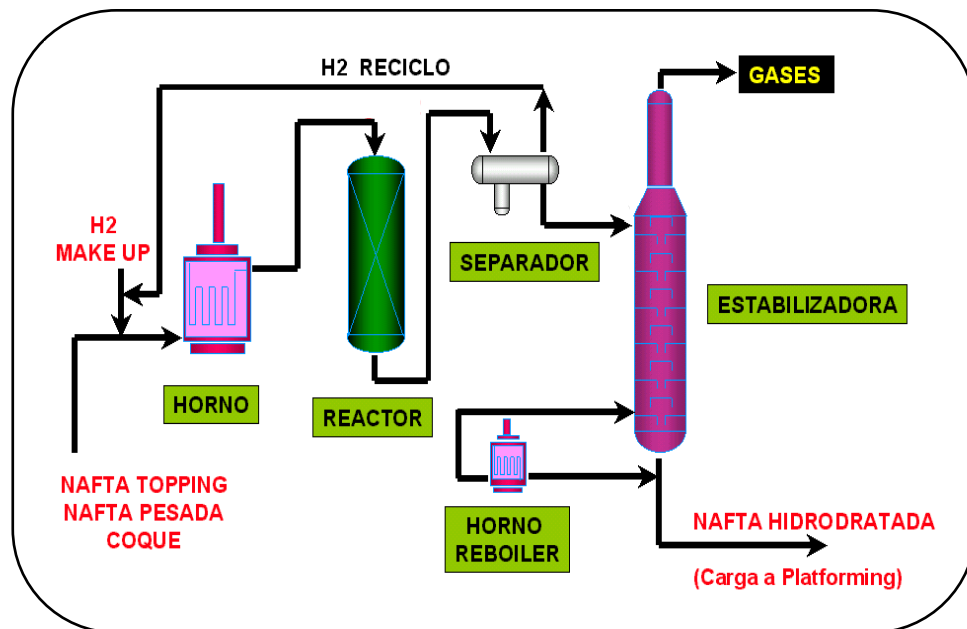
La mayoría de reacciones de tratamiento con hidrógeno se llevan a cabo por debajo de los 500°C para evitar otros daños como el creep, pero depende directamente de las fracciones a tratar, para derivados con bajo y medio punto de ebullición se recomiendan temperaturas de 300 a 400°C; regularmente cuanto más alta es la temperatura de ebullición mayor es el contenido en azufre y se necesitan condiciones de operación más severas para llevar a cabo el proceso, es decir que se requieren temperaturas y presiones cada vez más altas (o bien mayores reactores o mayor número de ellos); para mejorar la eficiencia del catalizador la carga de hidrocarburos se precalienta, esto puede realizarse antes o después de la mezcla con el gas rico en hidrógeno; lo que se busca es garantizar eficiencia en el proceso, obligando a reaccionar la mayor cantidad de hidrógeno con el hidrocarburo a tratar.

La alimentación habitual en el hidrotreatmento son naftas pesadas en bruto (HVN) procedentes de la unidad de destilación de crudo y, cuando sea posible, nafta pesada hidrotreatada procedente de la unidad de hidrocraqueo. La carga se desairea, se mezcla con gas rico en hidrógeno, se precalienta y vaporiza, y se hace pasar a alta presión por un reactor catalítico de lecho fijo.

⁸ Organización Internacional del Trabajo, O.I.T. y Ministerio del trabajo y Asuntos Sociales. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Vol III. Parte XII. Cap 78. Director cap, Kraus Richard. 2001. Pg 16.

El hidrógeno se separa y recicla, el producto se estabiliza en una columna de destilación primaria donde se eliminan los residuos ligeros. La nafta pesada, libre de nitrógeno y compuestos de azufre, que sale de la unidad de hidrotratamiento, pasa a la sección de reformado catalítico con el fin de mejorarla para su uso en la mezcla de gasolinas con alto octanaje. Este proceso se muestra en la figura 5.

Figura 5. Hidrotratamiento de nafta



Fuente: <http://gustato.com/petroleo/hidrotratamiento.html>

2.2 UNIDAD DE HIDROTRATAMIENTO

El hidrotratamiento es un proceso de mejoras continuas con varios atractivos comerciales como el aumento en la producción de gasolina y el mejor rendimiento de los demás derivados. Este procedimiento de hidrotarar el crudo o sus derivados es realizado en unidades de hidrotratamiento las cuales están compuestas por varios equipos entre ellos compresores de hidrógeno, intercambiadores de calor, separadores y el reactor.

2.2.1 Compresores de hidrógeno

Las estructuras para el transporte de hidrógeno son similares a las de gas natural, con algunos pequeños cambios como variación de diámetro, presión máxima y distancia entre estaciones de compresión. En este momento la industria trabaja con compresores de pistón o alternativos y turbocompresores o compresores centrífugos.

Normalmente en las unidades de hidrotratamiento se trabajan con compresores alternativos con cigüeñal horizontal accionado por motor y/o turbina, diseñados para trabajar de manera simultánea en la compresión de hidrógeno de aportación o nuevo, fresco y circulante o de reciclo. En la figura 6 se muestra un grupo de compresores trabajando para mantener el hidrogeno en una unidad de hidrotratamiento.

Figura 6. Compresores de hidrógeno



Fuente: Fabricación, envasado y suministro de hidrógeno y anhídrido carbónico, AGA, 2005.

Los compresores son utilizados para llevar el hidrógeno fresco hasta el punto de mezcla con el hidrocarburo a tratar; normalmente no se emplea hidrógeno puro pues es un flujo de recirculación constante en el ciclo; es una mezcla de hidrógeno nuevo con reciclado.

Podría decirse que el hidrógeno fresco utilizado en el proceso es una mezcla de hidrógeno e hidrocarburos ligeros (metano, etano y ácido sulfhídrico principalmente), con una proporción de 80% de hidrógeno; pues para que las reacciones en el reactor se den adecuadamente es necesaria una alta relación hidrógeno/base a tratar, por lo que hay gran cantidad de hidrógeno que circula sin reaccionar con la carga y es el que se reutiliza. Así mismo hay que aportar continuamente hidrógeno nuevo según sea el grado de reacción con el hidrocarburo a tratar. Por estos motivos es necesario comprimir el hidrógeno que se consume con la carga y a su vez asegurar su recirculación en el proceso, lo cual se hace con compresores⁹.

2.2.2 Horno

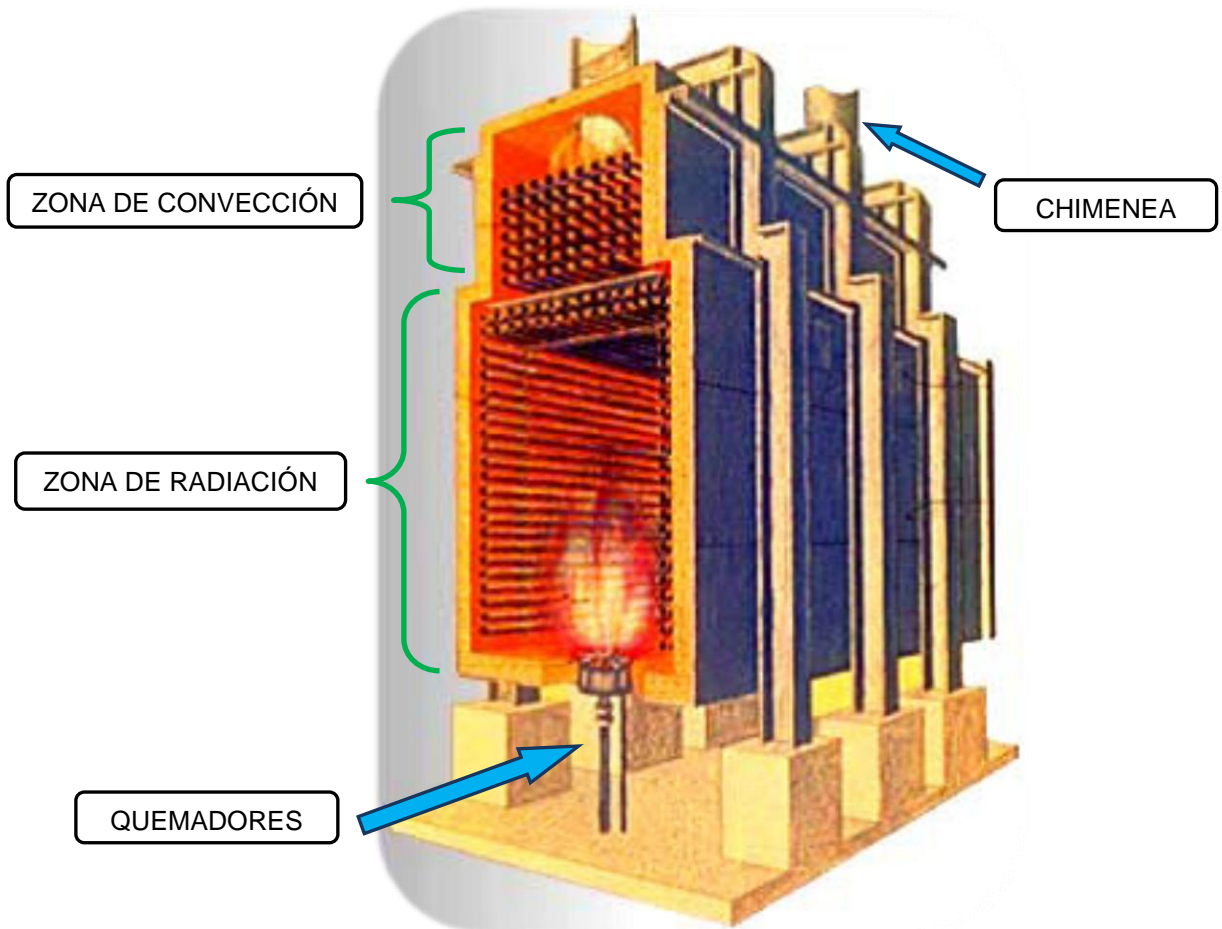
Estos equipos son muy utilizados en la industria petrolera ya que permiten elevar la temperatura de hidrocarburos para utilizar en diferentes procesos y también pueden usarse para forzar reacciones dentro de sí mismo como los hornos de pirólisis. En la unidad de hidrotratamiento son utilizados hornos de proceso, los cuales calientan la carga antes de ingresar al reactor y de esta manera controlar las reacciones del proceso.

Para este tipo de aplicaciones de alto requerimiento calórico, los hornos de fuego directo son la alternativa más recomendable. En ellos, el aporte de calor se realiza directamente desde la llama hacia los tubos por los que circula el fluido.

⁹ Contreras Sanjuán Laura y Rangel Seguí Manuel. Aplicación Técnicas de diagnóstico: Compresores de Hidrógeno. Universidad de Sevilla. Pg 3.

El calor en los hornos se intercambia en dos zonas bien diferenciadas: la zona radiante y la convectiva; aunque hay que tener presente que en los hornos la transferencia de calor se produce por conducción, convección y radiación; el más importante es la radiación y el menos relevante es la conducción. En la figura 7 se muestran las zonas del horno.

Figura 7. Zonas de un horno de proceso



Fuente:http://www.flargent.com/espanol/productos/combustointenergEsp/hojas_de_datos/Flargent_Hornos.pdf

En la primera zona, el calor se transfiere a los tubos por radiación; se calcula que la mayor cantidad de calor transmitido se da en esta zona y es del 50% del calor desprendido por los quemadores; luego los gases de combustión se dirigen hacia la zona de convección, pasando previamente por la zona de protección la cual resguarda de la radiación los tubos de convección, en esta zona se aprovecha un 25% de calor desprendido¹⁰.

El mecanismo de intercambio de calor en la zona de convección permite que los tubos posean superficie extendida (aletas o pernos), que mejoran sensiblemente la transferencia de calor y la eficiencia. El calor restante son pérdidas las cuales se transmiten al exterior por la chimenea del horno en mayor parte y también por las paredes del horno en un menor porcentaje. Actualmente en la industria se están aprovechando estos vapores para pre-calentamientos menores.

Normalmente el combustible del horno es el fuel oil ya que es relativamente económico y se puede obtener directamente de los procesos de refinación; también es utilizado por su poder calorífico, viscosidad y compuestos de azufre. El poder calorífico debe ser alto para generar la energía térmica suficiente para calentar el hidrocarburo a la temperatura deseada, la viscosidad es muy importante porque permite la fluidez del combustible a temperaturas medias y los compuestos de azufre para evitar la corrosión de los tubos del horno y las emisiones a la atmosfera por la chimenea.

2.2.3 Separadores

En la unidad de hidrotratamiento se busca convertir del 40 al 50% (en volumen) del material tratado en derivados con una temperatura de ebullición inferior a 400°C, que son los derivados con mayor demanda y valor comercial¹¹.

¹⁰ Bueno Sara y Pérez Benjamín. Hornos. Universidad de Sevilla. 2007.

¹¹ Fisher. Tecnología en control de procesos. Soluciones de descenso de separadores (HHPS y CHPS).

El hidrocarburo de salida del reactor pasa a través de intercambiadores de calor al separador de alta presión caliente donde los gases ricos en hidrógeno se vaporizan instantáneamente. Los gases ricos en hidrógeno se someten a una separación adicional para reprocesar el hidrogeno y reciclarlo en el separador de alta presión frío.

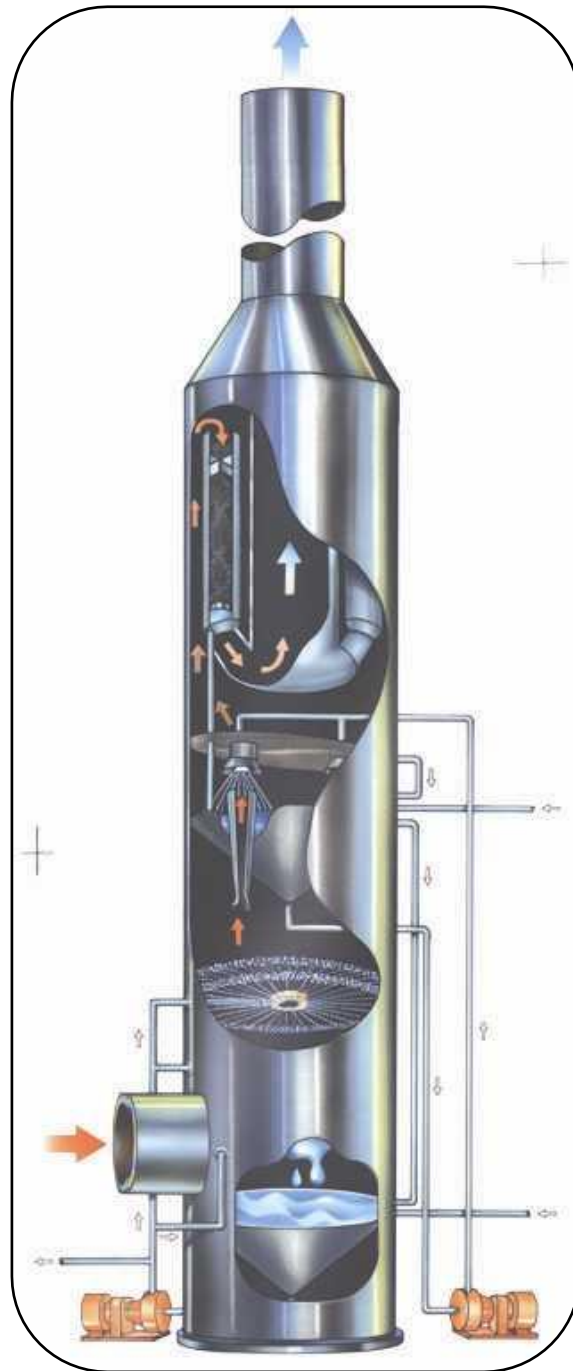
Los gases ricos en hidrógeno restantes se envían a la primera etapa del proceso para mezclarlos con hidrógeno nuevo y empezar de nuevo el proceso de mezclado con el hidrocarburo y el hidrotatamiento. La salida líquida de los separadores de alta presión caliente y alta presión frío se envían a una columna de fraccionamiento donde el butano y otros gases más ligeros se extraen por la parte superior. La nafta ligera y pesada, y el gasóleo se extraen como corrientes laterales líquidas.

Tanto el separador de alta presión caliente como el de alta presión frío tienen dos válvulas de descenso que mantienen el nivel en el separador para asegurar una separación correcta de los productos líquidos y gaseosos a pesar de los múltiples elementos constitutivos que intervienen junto con los gases, hidrocarburos líquidos y partículas de catalizador arrastrados. Además los dos separadores manejan diferentes productos ya que están conectados en serie, es decir lo que procesa el separador de alta presión caliente son los hidrocarburos que salen directamente del reactor y el separador de alta presión frío procesa los gases ricos en ácido sulfhídrico que salen del anterior separador¹².

En la figura 8 se puede ver el funcionamiento de un separador de alta presión caliente, una de las principales ventajas es que pueden mantener la presión constante y puede trabajar durante tiempos largos a temperaturas elevadas.

¹² Fisher. Tecnología en control de procesos. Soluciones de descenso de separadores (HHPS y CHPS).

Figura 8. Separador de alta presión caliente



Fuente: http://www2.dupont.com/Clean_Technologies/es_MX/products/belco/edv/edv.html

2.2.4 Reactor

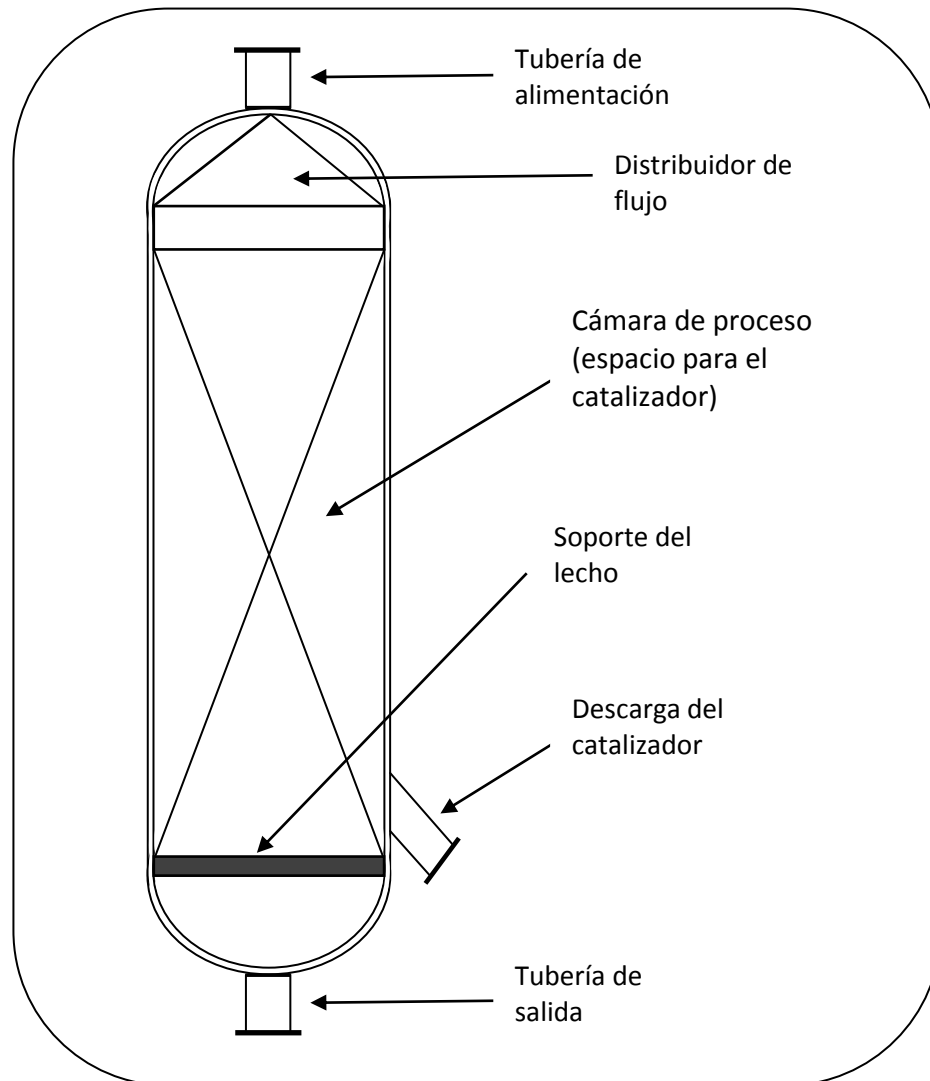
Aunque uno de los parámetros más importantes en el proceso de hidrotratamiento son las reacciones necesarias para hidrotratar el crudo, estas se llevan a cabo en un recipiente a presión denominado reactor, este es el espacio físico asociado en el cual se logran los intercambios energéticos (reacciones químicas), puede variar de acuerdo a la aplicación, en tamaño, cantidad de reactores, espesor de pared, etc; uno de los más utilizados se muestra en la figura 9. Este es el equipo crítico en la unidad de hidrotratamiento y es el objeto de estudio de este proyecto, se analizará de manera más profunda en el capítulo 3.

Un reactor es una unidad de proceso común en una refinería; se utiliza para hidrotratar productos como gasolina, queroseno e intermedios como gasóleo, en el proceso se utiliza hidrógeno para saturar los compuestos aromáticos y las olefinas así como para quitar los compuestos indeseables. De igual manera el hidrógeno también satura enlaces dobles del hidrocarburo que ayuda a aumento la estabilidad del combustible.

En el interior del reactor es necesario un catalizador el cual promueve la reacción del hidrógeno, su selección depende directamente del elemento que se desee remover en mayor porcentaje. Este elemento también es recuperable ya que con hidrometalurgia y piro-metalurgia se le remueven los metales libres que se depositan en él; luego son pulverizados para ser utilizados en la realización de catalizadores nuevos.

Existen varios tipos de catalizadores, los promovidos por cloruro, las zeolitas, los de circonio sulfatado y los de cobalto / níquel / molibdeno; entre otros. Una vez separados del hidrógeno, los hidrocarburos inferiores a C5 contenidos en el producto se eliminan en el separador.

Figura 9. Reactor



Fuente: <http://148.206.53.231/UAM5655.PDF>, apéndice E.

El catalizador y la presión agrietan las moléculas del hidrocarburo logrando fraccionarlas en partes más pequeñas, por ejemplo se puede llevar el gasóleo o el diesel a hidrocarburos más ligeros como butanos que forman la gasolina, lo que tiene un valor agregado en la industria del petróleo.

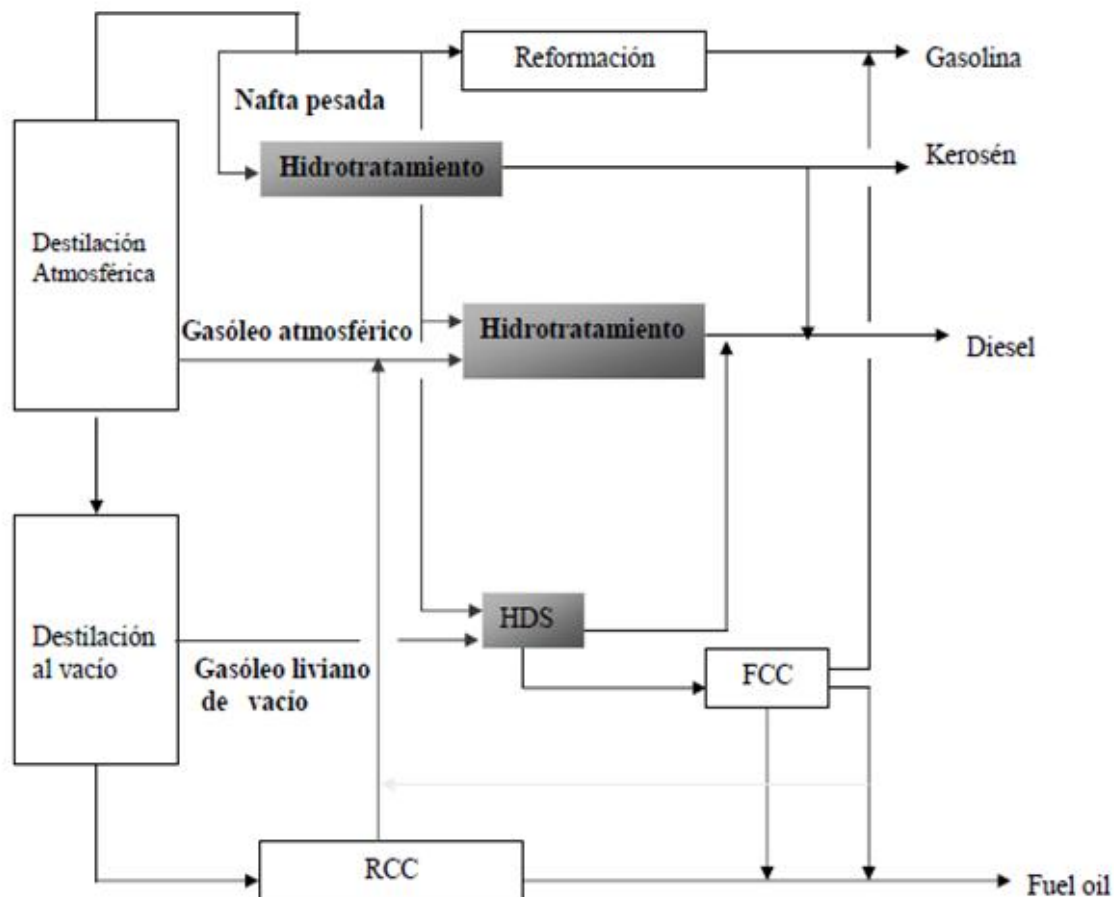
2.3 PROCESO QUÍMICO

El hidrotratamiento puede describirse como una serie de procesos que tienen un resultado conjunto, puede usarse para encontrar especificaciones de productos terminados o preparar la alimentación a otros procesos de refinería. Las principales unidades de hidrotratamiento diseñadas para mejorar la calidad del producto, son para el hidrotratamiento de queroseno, gasóleos y lubricantes. Y las unidades diseñadas para preparar el producto para otros procesos son el pretratamiento para el hidrotratamiento nafta y destilado de vacío. En la figura 10 se muestra la ubicación de las unidades de hidrotratamiento en el proceso de refinación. Sin importar su destino las unidades de hidrotratamiento son muy eficientes y por eso muy utilizadas actualmente en la industria.

En la industria petrolera se utilizan diversos métodos de tratamiento para eliminar impurezas y otros constituyentes que afectan negativamente a las propiedades de rendimiento de los productos acabados o reducen la eficacia de los procesos de conversión. El tratamiento implica reacciones químicas o separación física, como disolución, absorción o precipitación, mediante varios procesos y combinaciones de procesos.

Entre los métodos de tratamiento se cuentan la eliminación o separación de componentes aromáticos y naftenos, y la eliminación de impurezas y contaminantes indeseables. Se utilizan compuestos desmercaptanizantes y ácidos para desulfurar el petróleo crudo antes del procesado, y para tratar los productos durante y después de éste. Otros métodos de tratamiento son la desalinización del crudo, la extracción química de mercaptanos, el tratamiento con ácidos, el contacto con arcilla, la hidrodeshulfuración, el refinado de disolventes, el lavado cáustico, el hidrotratamiento, el secado, y la extracción y el desparafinado de disolventes.

Figura 10. Ubicación de las unidades de hidrotratamiento



Fuente: González Triana Yris Kenelma, Caracterización de las corrientes del reactor del proceso de hidrotratamiento de gasóleo para su aplicación a un nuevo modelo cinético predictivo, Venezuela, 2008.

El hidrotratamiento pertenece a la clase de conversión que involucra reacciones con hidrógeno. El término “hidrotratamiento” es limitado a reacciones de hidrogenólisis e hidrogenación, en las cuales se remueven heteroátomos (especialmente, azufre, nitrógeno y oxígeno)¹³.

¹³ González Yris Kenelma. Caracterización de las corrientes del reactor del proceso de hidrotratamiento de gasóleo para su aplicación a un nuevo modelo cinético predictivo. Universidad nacional experimental politécnica Antonio José de Sucre. Venezuela. 2008. Pg 45.

La química del proceso de hidrotratamiento puede dividirse en sus procesos principales por separado y de esta manera visualizar la complejidad y necesidad de este proceso, a continuación se enumeran los procesos acoplados en el hidrotratamiento.

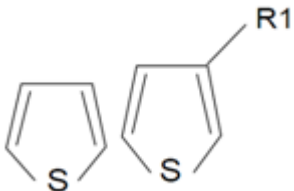
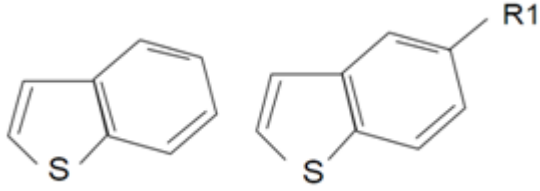
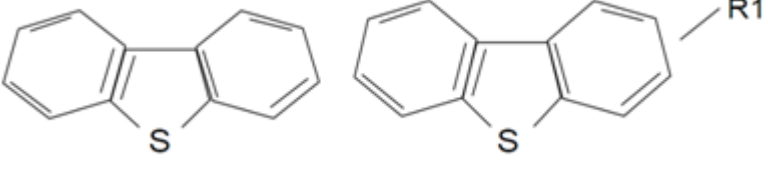
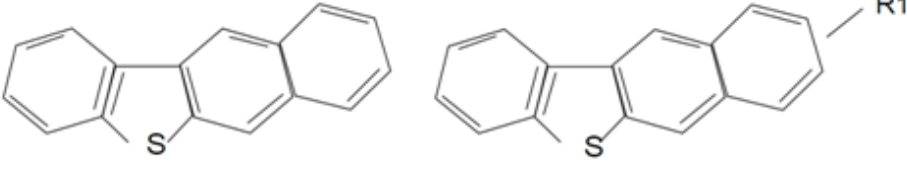
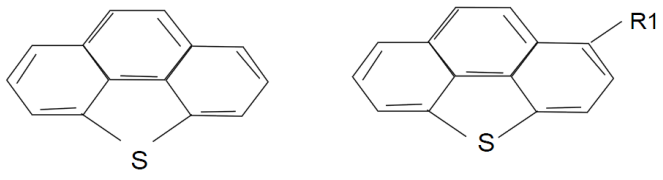
- Hidrodesulfuración.
- Hidrodenitrificación.
- Hidrodesoxigenación.
- Hidrogenación de olefinas o aromáticos.
- Reducción de metales pesados.

2.3.1 Hidrodesulfuración

Este proceso puede realizarse en unidades independientes, o como uno más de los procesos realizados en una unidad de hidrotratamiento, básicamente es utilizado para eliminar los componentes químicos que se encuentran en los combustibles, aparecen como anhídrido sulfuroso (SO_2) y anhídrido sulfúrico (SO_3) que luego de la combustión o a temperaturas de 100°C en adelante, se transformarían en ácido sulfuroso (SO_3H_2) o ácido sulfúrico (SO_4H_2) que son gases no sólo corrosivos, sino que también son los que generan contaminación en el medio ambiente. En la tabla 2 se muestra los principales compuestos de azufre presentes en hidrocarburos tratados en las refinerías.

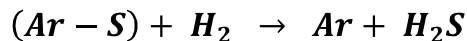
Los combustibles son sometidos al proceso Hidrodesulfuración, que consta en tratar el combustible en forma combinada con hidrógeno, alta temperatura, presión y catalizadores. De esta manera se obtiene el combustible limpio de impurezas (sin azufre) y un gas llamado ácido sulfhídrico (SH_2).

Tabla 2. Compuestos de azufre en hidrocarburos

Tioles	RSH
Disulfuros	RSSR'
Sulfuros	RSR'
Tiofenos	
Benzotiofenos	
Dibenzo- tiofenos	
Benzonafto- tiofenos	
Benzodibenzo- -tiofenos	

Fuente: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/rodriguez_m_ja/capitulo4.pdf

Básicamente es un proceso de remoción parcial de azufre y redistribución de sus compuestos; la reacción de hidrodesulfuración se considera exotérmica, irreversible bajo las condiciones de reacción empleadas industrialmente, el azufre al reaccionar con el hidrógeno forma ácido sulfhídrico; la reacción de este proceso puede ser descrita en forma general para cualquier compuesto azufrado de la siguiente manera¹⁴.



Donde “Ar” es una cadena de hidrocarburo y el H₂ es el hidrógeno, que en el caso industrial es una mezcla rica en hidrógeno como ya se mencionó.

La facilidad con la que se dan las reacciones de hidrodesulfuración depende del tipo de componente, pues los componentes de temperaturas de ebullición bajos son desulfurados más fácilmente que aquellos con temperatura de ebullición altos. La dificultad de remoción del azufre incrementa en el orden de parafinas, naftenos y aromáticos. En la figura 11 se puede ver paso a paso el proceso, desde los productos a tratar hasta los compuestos tratados.

Figura 11. Hidrodesulfuración



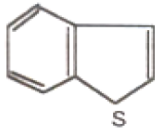
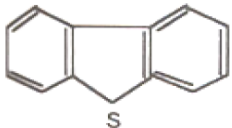
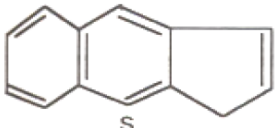
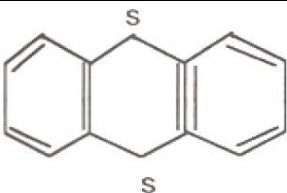
Fuente: Kraus Richard, Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo, petróleo y gas natural.

¹⁴ González Yris Kenelma. Caracterización de las corrientes del reactor del proceso de hidrotratamiento de gasóleo para su aplicación a un nuevo modelo cinético predictivo. Universidad nacional experimental politécnica Antonio José de Sucre. Venezuela. 2008. Pg 46.

El contenido de azufre al igual que la gravedad API son los parámetros más importantes en la comercialización de los hidrocarburos, normalmente el porcentaje en los crudos varía entre el 0.1 y el 5%, pero varía según la temperatura de ebullición del crudo¹⁵.

En la tabla 3 se muestran las principales estructuras moleculares de azufre en asfaltenos que son las fracciones más pesadas por lo tanto son los compuestos más difíciles de remover. Los nuevos estudios muestran que para tener mayor eliminación debe realizarse por etapas, es decir con reactores en serie con catalizadores diferentes que mejoren la reacción de hidrógeno y azufre.

Tabla 3. Principales moléculas de azufre en asfaltenos

Benzotiofeno	
Dibenzotiofeno	
Naftotiofeno	
Triantreno	

Fuente:http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/badillo_c_a/capitulo4.pdf

¹⁵ http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/badillo_c_a/capitulo4.pdf.

2.3.2 Hidrodesnitrificación

La identificación de las reacciones principales y las entidades químicas que están involucradas en el proceso de hidrotratamiento son complejas y aún no se han estudiado totalmente a profundidad; este proceso de eliminación de nitrógeno también puede llevarse en unidades independientes y se investiga la utilización de bacterias para este proceso.

La remoción de Nitrógeno (hidrodesnitrificación) a diferencia de la eliminación de azufre, saturación de olefinas y demás procesos similares, se realiza mediante una reacción muy lenta y levemente exotérmica, que separa la piridina y metilamina en amoniacos y cadenas de hidrocarburos. En la tabla 4 se muestran los principales compuestos de nitrógeno que se presentan en los hidrocarburos tratados en refinería.

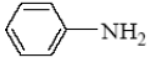
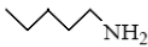


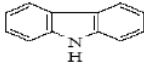



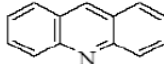
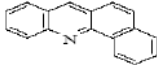
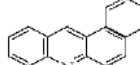
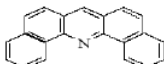
La reacción de este proceso puede ser descrita en forma general para compuesto con nitrógeno de la siguiente manera.



Donde “Ar” es una cadena de hidrocarburo y el H₂ es el hidrógeno, que en el caso industrial es una mezcla rica en hidrógeno como ya se mencionó.

Es necesaria la remoción de nitrógeno porque a pesar de su cantidad tan pequeña los compuestos de nitrógeno tienden a formar coque lo que es muy perjudicial para todos los equipos de la refinería y para los catalizadores de los demás procesos, debido a que restringe la transferencia de calor y ocasiona mayor consumo de energía.

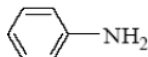


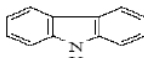



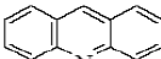
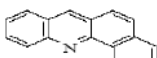
Tabla 4. Compuestos de nitrógeno en hidrocarburos

COMPUESTOS NO HETEROCICLICOS		
Anilina	$C_6H_5NH_2$	
Pentilamina	$C_5H_{11}NH_2$	
COMPUESTOS HETEROCICLICOS NO BASICOS		
Pirrol	C_4H_5N	
Indol	C_8H_7N	
Carbasol	$C_{12}H_9N$	
COMPUESTOS HETEROCICLICOS BASICOS		
Piridina	C_5H_5N	
Quinolina	C_9H_7N	
Indolina	C_8H_9N	
Acridina	$C_{13}H_9N$	
Benz(a)acridina	$C_{17}H_{11}N$	
Benz(a) acridina	$C_{17}H_{11}N$	
Diben(c,h)acridina	$C_{21}H_{13}N$	

Fuente:http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/rodriguez_m_ja/capitulo4.pdf

En la tabla 5 se pueden ver las principales estructuras moleculares presentes en asfáltenos, que como son las fracciones más pesadas, igual que con los compuestos de azufre estos son los compuestos de nitrógeno más difíciles de remover. El contenido de nitrógeno en el crudo es normalmente inferior al 1% pero su remoción es el proceso más complejo, solo en condiciones de temperatura y presión muy severas se alcanzan porcentajes de remoción del 70%, así que muchos de estos compuestos aun se encuentran presentes en los hidrocarburos al terminar los procesos de destilación y es necesario este tipo de procesos.

Tabla 5. Principales moléculas de nitrógeno en asfáltenos

Anilina	
Pirrol	
Indol	
Carbasol	
Piridina	
Quinolina	
Indolina	
Acridina	
Benz(a)acridina	

Fuente: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/badillo_c_a/capitulo4.pdf

Cuando se procesan cargas con alto contenido de nitrógeno, el amoníaco y el ácido sulfhídrico forman bisulfuro amónico, que causa corrosión a temperaturas inferiores al punto de rocío del agua, por esta razón no es permisible en los combustibles a comercializar y su valor máximo permitido es de 0.01 a 0.1%¹⁶.

Los compuestos de nitrógeno pueden ser mejor caracterizados que los de azufre e hidrógeno ya que estos dependen directamente de la temperatura de ebullición del crudo. Los compuestos de nitrógeno no cíclicos como las aminas y nitrilos están presentes en pequeñas cantidades y son fáciles de remover; los heterocíclicos están presentes en mayor cantidad y también son fáciles de remover; pero los compuestos no heterocíclicos como los derivados de las anilinas son los que requieren de procesos de hidrodesnitrogenación severos para ser removidos.

2.3.3 Hidrodesoxigenación

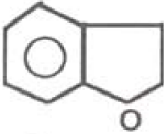

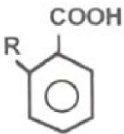
Este proceso ocurre simultáneamente con los anteriormente nombrados, igual que el nitrógeno su porcentaje en el crudo es muy pequeño 2% aproximadamente; pero aumenta proporcionalmente con el punto de ebullición del hidrocarburo. Pueden presentarse valores superiores cuando el crudo sufre una exposición prolongada a la atmosfera durante o después de la refinación¹⁷.

La principal ventaja de este proceso es que la eliminación de oxígeno da como producto benceno y principalmente vapor de agua. Regularmente es la de menor interés debido a las bajas concentraciones de oxígeno y a su limitado número de compuestos. Podría decirse que los compuestos de mayor interés en la industria son el fenol y los ácidos nafténicos por ser altamente corrosivos. En la tabla 6 se muestran los compuestos de oxígeno presentes en los asfáltenos que son las fracciones más pesadas; por lo tanto los compuestos más difíciles de remover.

¹⁶ Organización Internacional del Trabajo, O.I.T. y Ministerio del trabajo y Asuntos Sociales. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Vol III. Parte XII. Cap 78. Director cap, Kraus Richard. 2001. Pg 15.

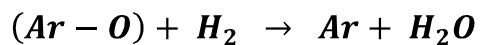
¹⁷ http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/badillo_c_a/capitulo4.pdf. Pg 12.

Tabla 6. Compuestos de oxígeno en asfáltenos

Benzofurano	
Fenol	
Ácidos naftenicos	
Ácidos carboxílicos	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{C}-\text{OH} \end{array}$
Cetonas	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{C}-\text{CH}_2-\text{R}_2 \end{array}$

Fuente:http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/badillo_c_a/capitulo4.pdf

Analizando el procedimiento de remoción de oxígeno, básicamente la reacción de este proceso puede ser descrita en forma general para hidrocarburos con compuestos de oxígeno, de la siguiente manera.



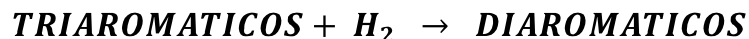
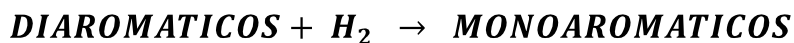
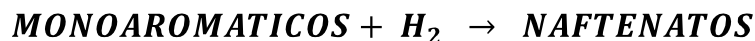
Donde “Ar” es una cadena de hidrocarburo y el H₂ es el hidrógeno, que en el caso industrial es una mezcla rica en hidrógeno como ya se mencionó.

Esta es la reacción que se produce en el proceso de hidrodeshidrogenación que está asociado al hidrotratamiento, al realizarse de procesos independientes estos resultados no son obtenidos ya que en cuando se realiza de manera independiente se busca la remoción de ácidos nafténicos principalmente, por lo tanto las reacciones de remoción son diferentes.

2.3.4 Hidrogenación de olefinas y aromáticos

Los compuestos aromáticos tienden a formar coque, pero con la adición de hidrógeno forman compuestos monoaromáticos los cuales son utilizados para aumentar los octanos de las gasolinas. A diferencia de los demás procesos la hidrogenación solo exige condiciones severas de presión ya que la hidrogenación depende de la presión, son reacciones muy veloces y altamente exotérmicas.

Las reacciones de hidrogenación de aromáticos, son de tipo reversible y exotérmica. Su estequiometría, dependen de los tipos aromáticos presentes en los hidrocarburos, y pueden describirse como¹⁸:



Los compuestos aromáticos están comprendidos por anillos, tal como lo muestra la figura 12, son compuestos muy estables, lo que se busca con la adición de hidrógeno es un rompimiento de sus cadenas para obtener compuestos de bajo peso molecular e hidrogenación de las moléculas.

¹⁸ González Yris Kenelma. Caracterización de las corrientes del reactor del proceso de hidrotratamiento de gasóleo para su aplicación a un nuevo modelo cinético predictivo. Universidad nacional experimental politécnica Antonio José de Sucre. Venezuela. 2008. Pg 46.

Figura 12. Estructura aromático polinuclear



Fuente:http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/badillo_c_a/capitulo4.pdf

En el proceso los aromáticos pesados se convierten en productos más ligeros, a muy altas presiones y temperaturas bastante elevadas, se reduce la formación de alquitrán y previene la acumulación de coque. Este proceso produce cantidades relativamente grandes de isobutano característica importante en el combustible de alta calidad para aviones de reacción.

2.3.5 Reducción de metales pesados

El petróleo contiene casi todos los compuestos metálicos de la tabla periódica, pero el porcentaje de níquel (Ni) y vanadio (V) es muy alto comparado con los demás metales. La remoción de estos elementos se realiza para evitar corrosión, desactivación del catalizador de los procesos de refinación y formación de coque, que como ya se ha explicado tiene consecuencias perjudiciales en los equipos¹⁹.

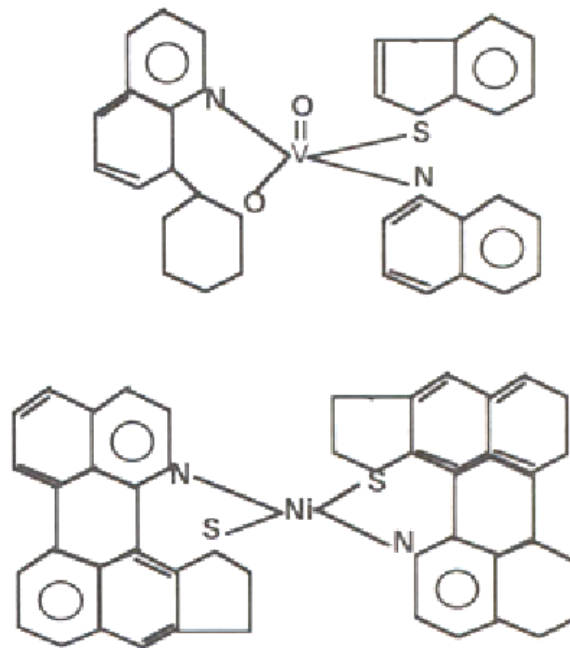
Las reacciones de hidrodeshmetalización son muy importantes, ya que las fracciones pesadas del crudo contienen metales como níquel (Ni) y vanadio (V) en forma de compuestos organometálicos como lo muestra la figura 13, estos compuestos elevan la temperatura de ebullición de los derivados y lo que exige condiciones más severas de presión y temperatura. Con la adición de hidrógeno se pueden romper los enlaces de estos metales causando que los metales libres se depositen en el catalizador del reactor de hidrotratamiento el cual es retratado para su reciclo en el proceso.

¹⁹ http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/badillo_c_a/capitulo4.pdf. Pg 14.

En el hidrotratamiento se logran remover otros metales del hidrocarburo como sílice, sodio, hierro, arsénico, calcio, plomo, fósforo y en mayor cantidad níquel y vanadio. Esto es muy importante porque hay requerimientos específicos para el níquel y el vanadio en el hidrocarburo.

Otro factor importante es que la remoción de metales restringe la temperatura de operación ya que no es completa cuando la temperatura de reacción está por debajo de 315 °C. Aunque la presión no es ajena a este proceso, la temperatura es el parámetro de mayor relevancia.

Figura 13. Compuestos metálicos de vanadio y níquel



Fuente:http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/badillo_c_a/capitulo4.pdf

3. ANÁLISIS DEL REACTOR

Debido a los nuevos requisitos comerciales y medioambientales, los equipos industriales han evolucionado y actualmente son diseñados para soportar mayores cargas, por esta razón es importante que la tecnología pueda generar nuevos procedimientos que faciliten los cálculos tanto de diseño como de predicción en su vida útil.

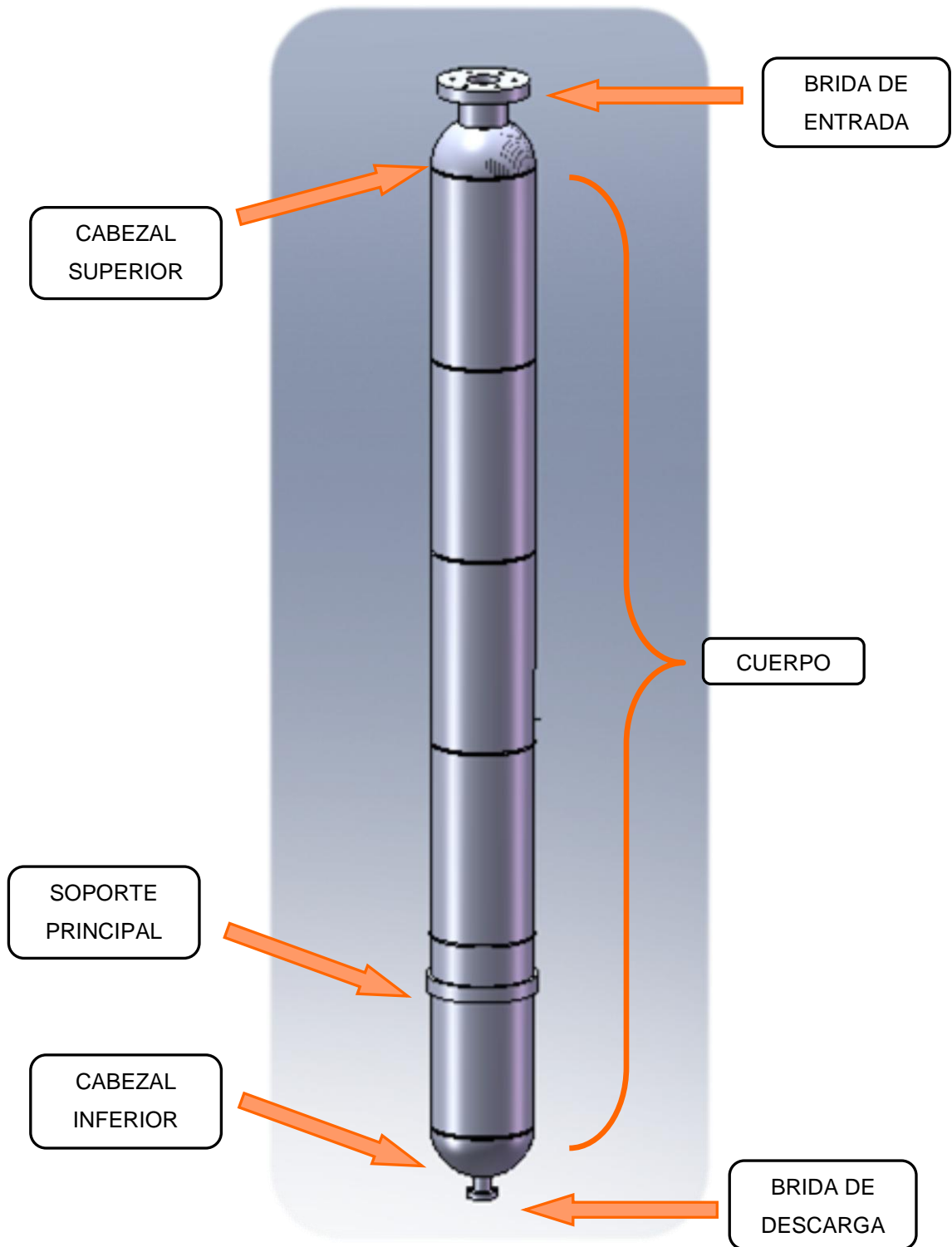
Uno de los equipos más críticos en la industria petrolera son los reactores de hidrotratamiento los cuales como ya se mencionó son recipientes a presión en los que se llevan a cabo intercambios energéticos en condiciones operacionales exigentes.

Los reactores son equipos constituidos por una envolvente, normalmente metálica y reforzada; capaces de contener un fluido, líquido o gaseoso, cuyas condiciones de temperatura y presión son distintas a las del medio ambiente, normalmente severas. La forma más común es cilíndrica, por su fácil construcción al igual que por requerir menores espesores que otras formas para resistir una presión, salvo la forma esférica, pero uso se reduce a grandes esferas de almacenamiento, dada su complejidad en la construcción²⁰.

Los recipientes a presión están formados por una envolvente metálica dividida en anillos soldados, dispositivos de sujeción o apoyo, estos depende directamente si el recipiente es horizontal o vertical; conexiones por las que entran y salen los fluidos, elementos interiores como baffles y accesorios en el exterior del recipiente, dependiendo del ambiente en el que vaya a trabajar. En la figura 14 puede verse el reactor de hidrotratamiento de la planta de parafinas con todos sus componentes.

²⁰ M.M.J. Cálculo de recipientes a presión, anexo 6. 2005. Pg 1.

Figura 14. Reactor de hidrotreatmento



Fuente: autor del proyecto, SolidWorks 2007.

El cálculo mecánico de un recipiente consiste, básicamente, en la determinación de los espesores de las diferentes partes que lo conforman, tomando como datos de partida: la forma del equipo, dimensiones, material utilizado, condiciones de presión y temperatura, cargas debidas al viento o terremoto, peso específico del fluido y la reglamentación, norma o código que debe cumplir el diseño del recipiente.

Poder determinar el comportamiento de estos recipientes durante su operación, o disminuir la incertidumbre alrededor de su comportamiento en operación y conocer zonas críticas, puede ser crucial en el momento de inspeccionar estos equipos industriales, ya que debido a los elementos (hidrógeno, hidrocarburos, catalizadores) con los que trabaja puede deteriorarse y producirse una disminución importante de espesor, con esto producir ambientes óptimos para la propagación de grietas las cuales pueden generarse por múltiples factores como la difusión de hidrógeno, pero su propagación es de mayor importancia ya que los esfuerzos pueden generar crecimiento.

Las expresiones matemáticas que describen estos nuevos procesos de transformación a partir de la información analítica no están disponibles, debido a que se encuentran en proceso de investigación y determinar el comportamiento de cualquier parámetro de estos reactores de hidrotreatmento es muy complejo. Se buscan nuevas bases de diseño y control de procesos para facilitar el análisis de estos equipos. De igual manera se busca explorar en la propagación de grietas, ya que son defectos muy comunes y perjudiciales en recipientes a presión. Además los actuales análisis o logran abarcar el problema de manera global, por esta razón se pueden tener resultados relativos, en rangos de valores sin mostrar una solución real.

3.1 ANÁLISIS DE ESFUERZOS

Los factores más importantes en el análisis de reactores de hidrotreatmento son los esfuerzos primarios y secundarios, pues estos dependen directamente de la presión y la temperatura a los que está sometido el recipiente; además estos parámetros operacionales son relevantes en los procesos, por esta razón no pueden ser adaptados a las especificaciones del recipiente si no a las necesidades del proceso. De igual manera hay que tener presente el estado en el que se encuentra el equipo ya que esto proporciona una parte importante en el análisis.

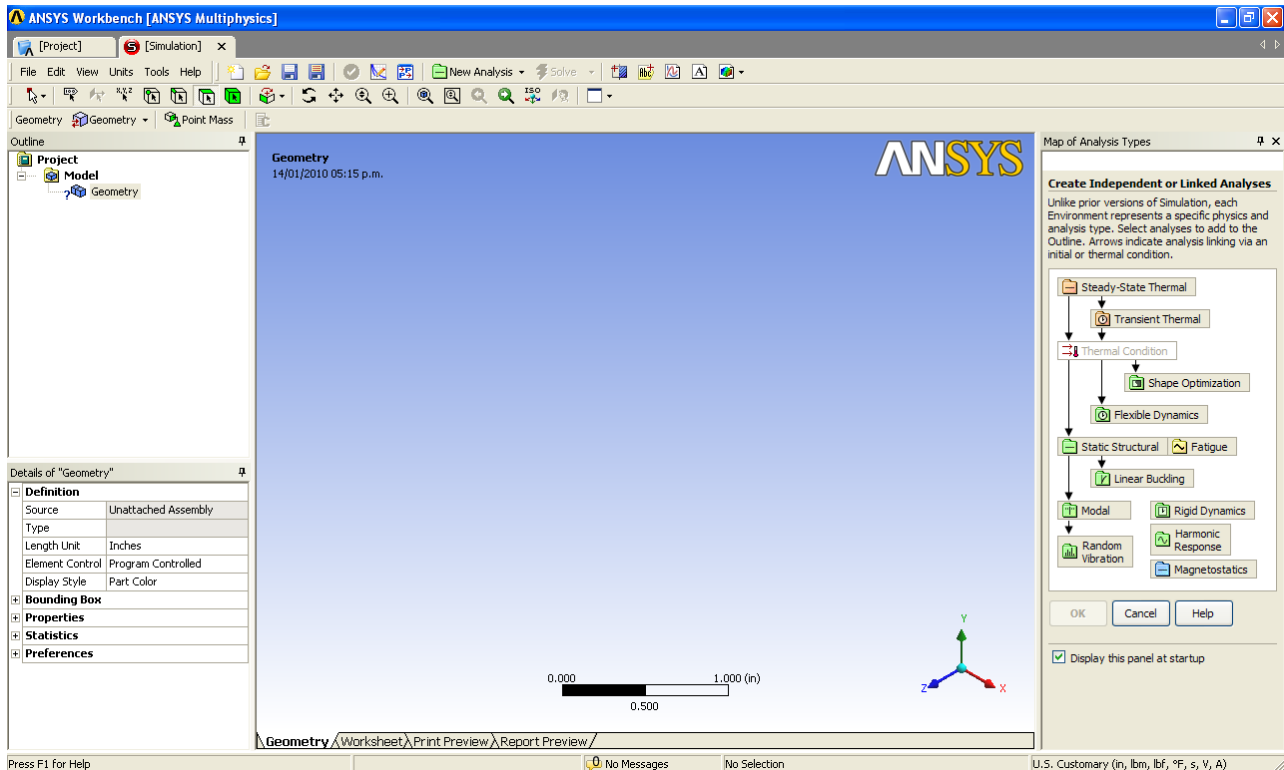
Actualmente el cálculo de estos análisis se realiza analíticamente los cuales pueden volverse complejos; son conservativos y demorados. Normalmente son necesarios conocimientos avanzados y experiencia, para obtener resultados confiables. Esto lo hace un método no muy práctico y da paso a métodos de solución rápida, de fácil acceso y gran exactitud como la simulación. Es muy eficiente en comparación con otros sistemas, aunque puede resultar costoso según el proceso.

Actualmente los programas de modelamiento y simulación manejan ambientes muy amigables por lo que puede ser utilizado por profesionales de todas las áreas y no solo por personal especializado, en la figura 15 se muestra la pantalla de inicio del programa ANSYS WORKBENCH, el cual es uno de los más utilizados industrialmente.

Esta herramienta está siendo utilizada en todas las industrias como una forma inicial de visualizar el proceso. La simulación ha logrado una secuencia clara de los diferentes procesos, por esta razón es usada por ingenieros de todas las áreas y no solo por personal especializado.

Lo más interesante de este tipo de programas, es que no se trata únicamente de un programador si no permite satisfacer muchas necesidades complejas de diseño y análisis en casi todas las áreas. Es decir que estos programas facilitan comandos específicos con los que se pueden generar operaciones complejas.

Figura 15. Ambiente de ANSYS WORKBENCH



Fuente: autor del proyecto, ANSYS WORKBENCH.

Analizando específicamente el proceso de hidrotatamiento, el sistema se basaría en las reacciones que se producen en el reactor, el cual puede ser analizado en un programa de elementos finitos para facilitar el cálculo de los esfuerzos presentes en el reactor, ya que maneja múltiples variables como la presión, temperatura, carga, hidrógeno y catalizador.

3.1.1 Esfuerzos primarios

Estos esfuerzos son los producidos por la presión real a la que está sometido el equipo, para el diseño de recipientes a presión estos cálculos se realizan con el código americano ASME, que en su sección VIII, división 1 y división 2, indica los métodos de cálculo, así como los requisitos mínimos exigidos para los materiales, detalles constructivos y pruebas que deben satisfacer estos equipos²¹.

Determinar el valor de estos esfuerzos durante una evaluación o en una inspección se realiza de una manera similar que para el diseño inicial del recipiente, se determina la distribución de estos esfuerzos sobre el recipiente.

Para recipientes como los reactores de hidrotreatmento se tiene esfuerzos circunferenciales y longitudinales, los cuales dependen únicamente de la presión interna del recipiente; aunque en ocasiones la columna de fluido puede producir mayores esfuerzos ya que los hidrocarburos por su gravedad específica pueden generar grandes presiones hidrostáticas, esto se presenta generalmente cuando la presión interna es muy pequeña.

Para el cálculo de los esfuerzos primarios es necesario determinar ciertos parámetros como si el recipiente es de pared gruesa o pared delgada. Esto se puede realizar mediante la fórmula:

Para pared delgada $r_i/t > 10$

Para pared gruesa $r_i/t < 10$

Donde:

r_i es el radio interno y t es el espesor del recipiente

²¹ M.M.J. Cálculo de recipientes a presión, anexo 6. 2005. Pg 6.

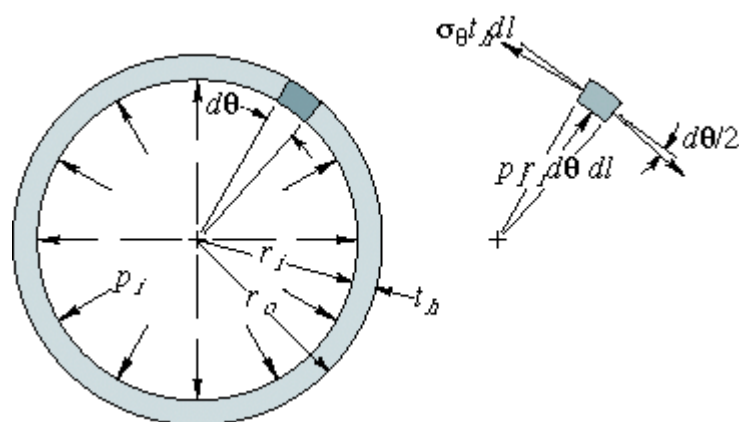
Si la relación es un valor muy cercano a 10 se puede trabajar como recipiente de pared delgada pero se debe tener presente que los esfuerzos resultantes deben ser corregidos ya que según estudios los resultados son 4% inferiores, a los reales.

3.1.1.1 Recipientes de pared delgada

Estos recipientes a presión son normalmente utilizados para soportar presiones internas, industrialmente los de pared delgada tienen limitaciones de presión, pero son muy utilizados en varias aplicaciones.

Si se somete un anillo circular delgado a la acción de fuerzas radiales uniformemente distribuidas, se producirán fuerzas anulares a lo largo de su espesor que actuarán tangencialmente. Si las fuerzas que actúan son radiales hacia fuera se producirá un engrandecimiento uniforme del anillo, mientras que si son radiales hacia dentro se producirá una contracción uniforme. En la figura 16 se puede ver las cargas a las que estaría sometido un elemento del cilindro presurizado²².

Figura 16. Esfuerzos circunferenciales sobre un elemento diferencial



Fuente: dim.usal.es/eps/im/roberto/cmm/Cilindros.ppt

²² Tensiones en un cilindro debidas a la presión hidráulica, anexo B. Pg 181.

Se considera el anillo como una sección de longitud constante de un recipiente cilíndrico de espesor “t” con una presión interna “P” y que las fuerzas sobre cada elemento del cilindro están en equilibrio, al sumarlas se tendrá una fuerza equivalente; la ecuación de esfuerzos tangenciales en el recipiente pared delgada:

$$\sigma_t = \frac{P \cdot r_i}{t}$$

El esfuerzo radial es cero porque en los recipientes de pared delgada no hay variación radial. Los esfuerzos longitudinales pueden calcularse igualando la presión total ejercida contra el extremo del cilindro con las fuerzas longitudinales que actúan en la sección transversal, figura 17; la ecuación de esfuerzos longitudinales o axiales:

$$\sigma_a = \frac{P \cdot r_i}{2t}$$

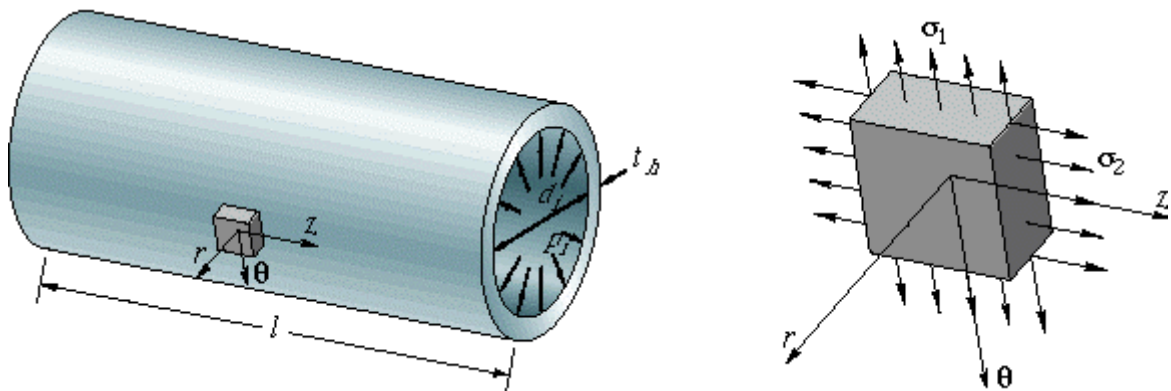
Donde:

r_i : es el radio interno

t: es el espesor

P: es la presión a la que está sometido el recipiente

Figura 17: Esfuerzos longitudinales sobre un elemento diferencial



Fuente: dim.usal.es/eps/im/roberto/cmm/Cilindros.ppt

Para analizar la deformación a la que está sometido el recipiente debido a los esfuerzos primarios se debe analizar el fenómeno de elongación, ya que si cualquier elemento es sometido a una tracción pura no solo sufre un alargamiento, también se adelgaza; de igual manera si un elemento se comprime se ensancha y se acorta. La deformación lateral unitaria y la elongación axial unitaria es constante dentro del límite elástico y esta propiedad se denomina modulo de poisson²³.

La deformación por el esfuerzo longitudinal estaría dada por la ecuación

$$\varepsilon_l = \frac{\sigma_l}{E} - \mu \cdot \frac{\sigma_r}{E}$$

La deformación debida al esfuerzo circunferencial estaría dada por la ecuación

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E} - \mu \cdot \frac{\sigma_l}{E}$$

Donde:

σ_r : es el esfuerzo radial.

σ_l : es el esfuerzo longitudinal.

μ : es el modulo de Poisson, su valor típico para materiales isotrópicos es 0,3.

E: es el módulo de Young.

Los signos de las ecuaciones de deformación dependen directamente de los esfuerzos a los que están expuestos, en caso de recipientes sometidos a presión interna, estos esfuerzos son de tensión. Si fueran de compresión ambos valores de la ecuación serian negativos.

²³ Tensiones en un cilindro debidas a la presión hidráulica, anexo B. Pg 183.

Este tipo de recipientes también puede presentar dilatación o crecimiento radial debido a la presión interna, puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{P r_i^2}{2 t E} \cdot (2 - \mu)$$

Donde:

r_i : es el radio interno

t : es el espesor

P : es la presión a la que está sometido el recipiente

μ : es el modulo de Poisson, su valor típico para materiales isotrópicos es 0,3.

E : es el módulo de Young.

3.1.1.2 Recipientes de pared gruesa

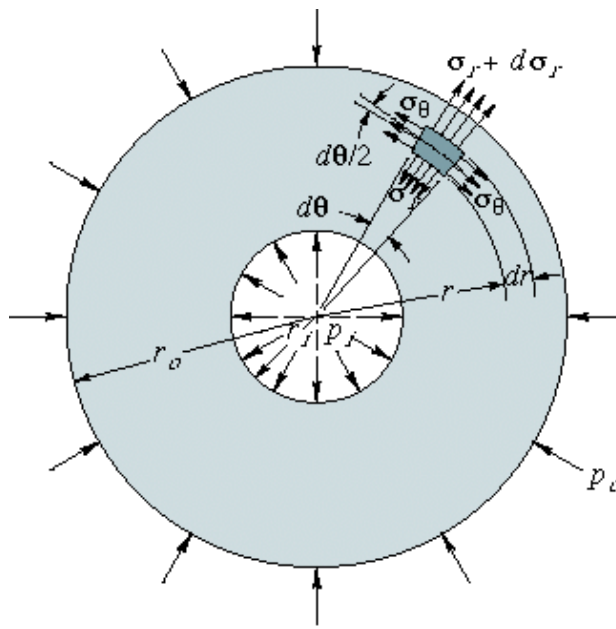
Los recipientes a presión de pared gruesa son diseñados principalmente para soportar grandes presiones, pero funcionan muy bien a altas temperaturas; normalmente el cálculo de estos recipientes se realiza considerando que sobre él actúan presiones externas y/o internas uniformemente distribuidas, las cuales no producen deformaciones a flexión, ya que su cálculo es más complejo que los de pared delgada.

En estos casos, las variaciones en los esfuerzos entre la superficie interior y exterior se hacen apreciables, dependen de la distancia al eje del cilindro, siendo máximas en el radio interior y mínimas en el exterior; por esta razón las fórmulas de pared delgada o las de tensión media no son aceptables para estos casos, pues el error puede llegar a ser del 15%, valor que es muy alto para este tipo de recipientes los cuales manejan altas presiones, las cuales pueden ocasionar daños catastróficos en la industria.

Analizando un cilindro sometido a una presión interna “ P_i ” y a una presión externa “ P_o ”, a consecuencia de la simetría axial del cilindro y de las cargas, las tensiones y las deformaciones en el cilindro también serán simétricas con respecto a su eje.

Tomando un elemento de un anillo unitario del cilindro, tal como se muestra en la figura 18, entre el radio interno “ r_i ” y el radio externo “ r_o ”; es evidente la diferencia con el análisis de pared delgada.

Figura 18. Esfuerzos de un elemento de un anillo unitario



Fuente: dim.usal.es/eps/im/roberto/cmm/Cilindros.ppt

En este elemento actúan esfuerzos radiales y tangenciales que satisfacen las condiciones de equilibrio del elemento. Los esfuerzos radiales varían a lo largo del radio. Analizando este elemento se obtiene una relación entre los esfuerzos radiales y tangenciales; la segunda relación se obtiene de suponer que la deformación longitudinal de todas las fibras del cilindro es igual. Entonces la deformación del cilindro es simétrica respecto del eje y consiste en un desplazamiento radial de todos los puntos de la pared del cilindro²⁴.

²⁴ Tensiones en un cilindro debidas a la presión hidráulica, anexo B.

Este desplazamiento es constante en la dirección circunferencial, pero varía a lo largo del radio. De este modo se puede obtener la expresión general para los esfuerzos axiales, radiales y tangenciales para recipientes a presión de pared gruesa, la cual depende del radio en donde se desea calcular los esfuerzos, esta solución es conocida como la distribución de Lamé²⁵:

$$\sigma_a = \frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_r = -\frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{(P_i - P_o) \cdot r_i^2 r_o^2}{R^2 (r_o^2 - r_i^2)}$$

$$\sigma_t = \frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{(P_i - P_o) \cdot r_i^2 r_o^2}{R^2 (r_o^2 - r_i^2)}$$

Donde:

r_i : es el radio interno

r_o : es el radio externo

P_i : es la presión interna

P_o : es la presión externa

R : es el radio en el que se desea conocer el valor de los esfuerzos

De esta solución se deduce que el valor máximo de los esfuerzos tangenciales σ_t se da en la superficie interior, y el máximo de los esfuerzos radiales σ_r siempre se presentará donde la presión sea mayor, en el interior P_i o en el exterior P_o . También se puede notar que la suma de las dos tensiones se mantiene constante; es decir, que las secciones transversales del cilindro durante y después de la deformación siguen siendo planas; es decir que la deformación de todos los elementos en la dirección axial es la misma.

²⁵ Apuntes de tecnología de mecanismos. Pg 304.

Las ecuaciones de Lamé se usan idealmente para un cilindro infinitamente largo y para secciones del cilindro bastante alejadas de los fondos, de lo contrario deben tenerse en cuenta los puntos de cambio de área ya que en estos puntos hay variación en las deformaciones.

El cálculo de estos esfuerzos se realiza con las ecuaciones de Clavarino, quien toma como base las ecuaciones Lamé pero tiene en cuenta los efectos de las deformaciones transversales del material de la pared del recipiente, correspondientes a cada una de las tensiones, éstas influirán unas sobre otras afectando la capacidad de carga del material, obteniéndose las tensiones axiales, radiales y tangenciales equivalentes, de acuerdo a la teoría de la máxima deformación, como se expresa a continuación:

$$\sigma_a = (1 - 2\mu) \cdot \left(\frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2} \right)$$

$$\sigma_r = - \left[(1 - 2\mu) \cdot \left(\frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2} \right) \right] + \left[(1 + \mu) \cdot \left(\frac{(P_i - P_o) \cdot r_i^2 r_o^2}{R^2 (r_o^2 - r_i^2)} \right) \right]$$

$$\sigma_t = \left[(1 - 2\mu) \cdot \left(\frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2} \right) \right] + \left[(1 + \mu) \cdot \left(\frac{(P_i - P_o) \cdot r_i^2 r_o^2}{R^2 (r_o^2 - r_i^2)} \right) \right]$$

Donde:

r_i : es el radio interno

r_o : es el radio externo

P_i : es la presión interna

P_o : es la presión externa

R : es el radio en el que se desea conocer el valor de los esfuerzos

μ : es el modulo de Poisson

En muy pocas ocasiones un cilindro trabaja con presión interna y externa, el caso general es que le cilindro esté sometido a presión interna solamente, en este caso las formulaciones matemáticas se simplificarían porque $P_o = 0$; la variación de esfuerzos estaría distribuida como se muestra en la figura 19 y las ecuaciones de Lamé se reducirían a:

$$\sigma_a = \frac{r_i^2 P_i}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_r = -\frac{r_i^2 P_i}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{P_i r_i^2 r_o^2}{R^2 (r_o^2 - r_i^2)} \quad \leftrightarrow \quad \sigma_r = \frac{r_i^2 P_i}{r_o^2 - r_i^2} \cdot \left(-1 + \frac{r_o^2}{R^2} \right)$$

$$\sigma_t = \frac{r_i^2 P_i}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{P_i r_i^2 r_o^2}{R^2 (r_o^2 - r_i^2)} \quad \leftrightarrow \quad \sigma_t = \frac{r_i^2 P_i}{r_o^2 - r_i^2} \cdot \left(1 + \frac{r_o^2}{R^2} \right)$$

Donde:

r_i : es el radio interno

r_o : es el radio externo

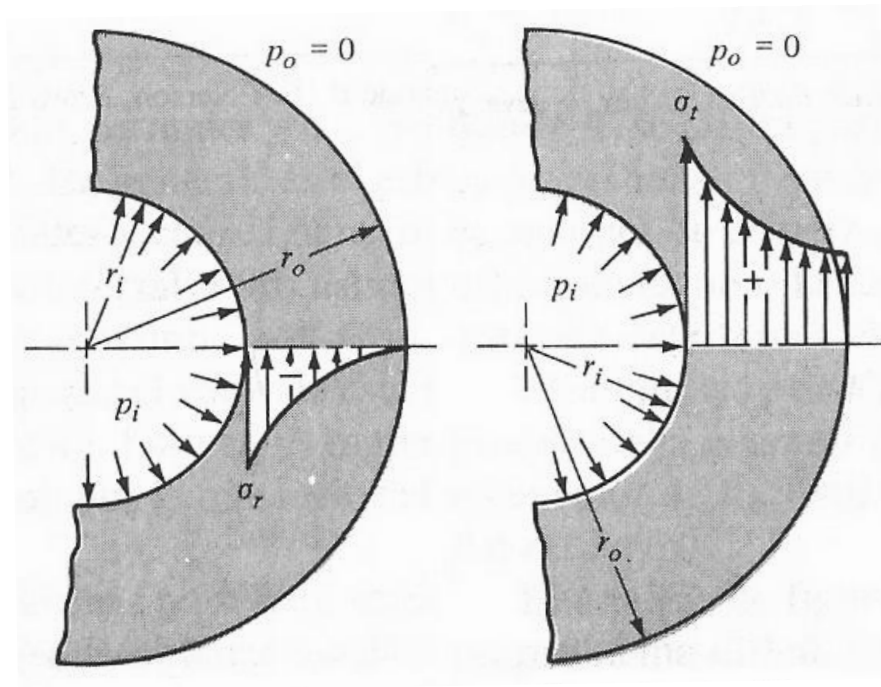
P_i : es la presión interna

P_o : es la presión externa

R : es el radio en el que se desea conocer el valor de los esfuerzos

Las ecuaciones de Clavirino también pueden aplicarse para recipientes sometidos únicamente a presión interna haciendo $P_o = 0$, lo que simplificaría los calculos. Todas estas formulaciones matemáticas no son muy utilizadas en métodos muy complejos, en los cuales sea muy complicado determinar una solución analítica que se acople al problema real, ya que en la mayoría de ocasiones es imposible verificar o evaluar resultados. Esta es una de las principales razones por la que métodos como la simulación son más utilizados en procesos industriales en los que se requieren resultados muy seguros.

Figura 19. Distribución de esfuerzos en un cilindro de pared gruesa



(a) Distribución de esfuerzos radiales en un cilindro de pared gruesa. (b) Distribución de esfuerzos tangenciales en un cilindro de pared gruesa.

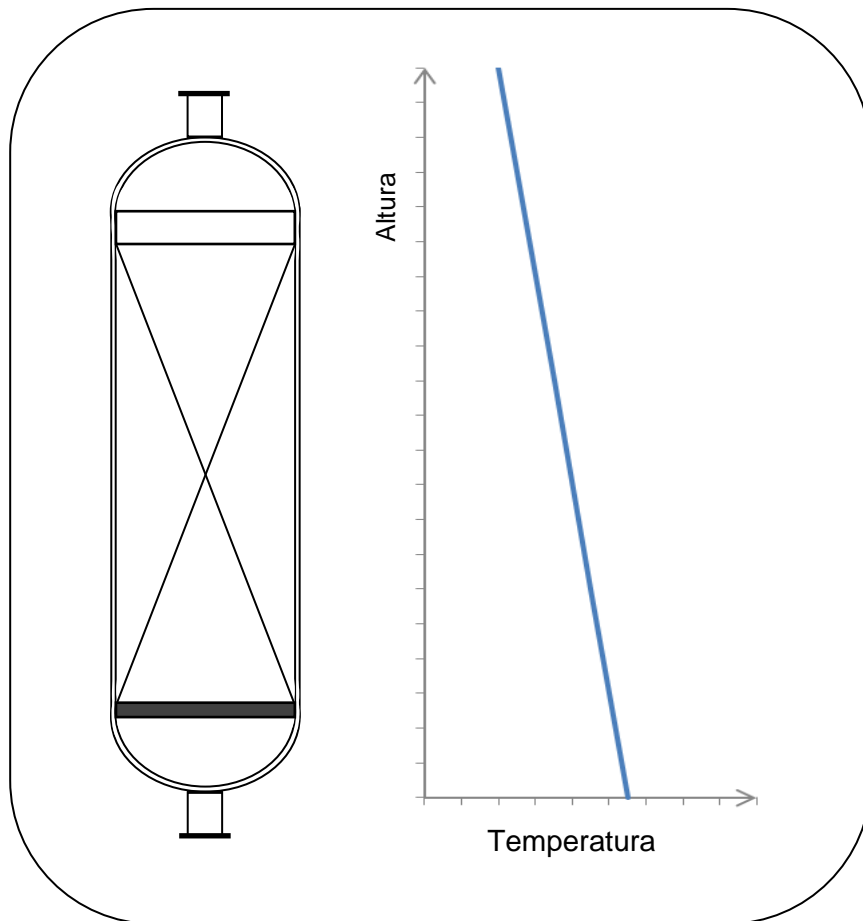
Fuente: Villanueva Pruneda S.A., Damián Noriega, Pérez Moreno, García Segura Pedro; Análisis de piezas ensambladas por ajustes apretados normalizados; Mexico; 2007.

Específicamente con una simulación se puede descubrir el comportamiento de un sistema sin afectar directamente el medio, con esto se postulan hipótesis que expliquen el comportamiento actual para predecir el comportamiento futuro del sistema; así determinar cualquier cambio drástico y evitarlo o mejorar su comportamiento en el sistema real. Más en problemas con los que se presentan en el reactor de hidrotreatmento en los que la temperatura, presión, carga, régimen de trabajo, condiciones de entrada del hidrocarburo y requerimientos de salida varían constantemente.

3.1.2 Esfuerzos secundarios

Los reactores de hidrotratamiento son recipientes a presión de pared gruesa que como ya se mencionó anteriormente son diseñados para altas presiones pero se comportan muy bien a alta temperaturas. Industrialmente manejan temperaturas alternantes desde 400 a 600°C en trabajo continuo, enfriamiento (apagadas) y calentamientos (encendidas) completos; son recipientes en los que la variación de temperatura es una condición severa, ya que varía tanto longitudinal como transversalmente; tal como se muestra en la figura 20 y 21 respectivamente.

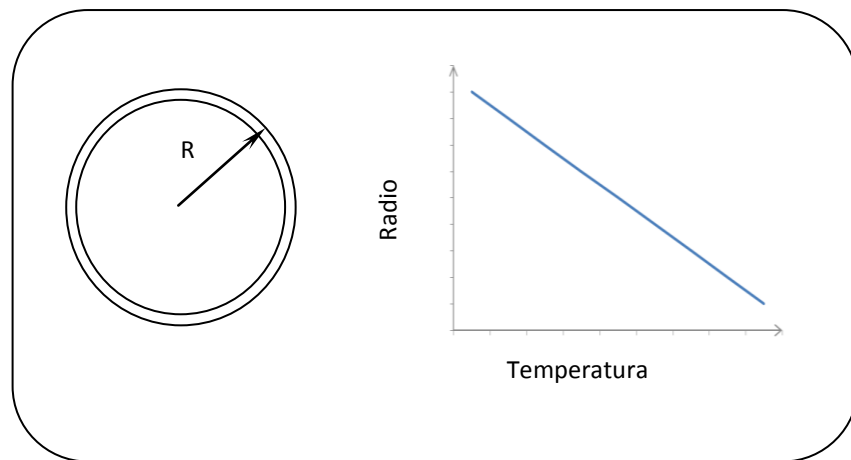
Figura 20. Distribución de temperatura longitudinal



Fuente: Autor del proyecto, modificado <http://148.206.53.231/UAM5655.PDF>.

Los esfuerzos secundarios, también llamados esfuerzos térmicos, son producidos por las variaciones térmicas no homogéneas, las cuales producen cambios irregulares en el material, dilataciones y contracciones rápidas que generan concentración de esfuerzos por las distorsiones que sufre el material.

Figura 21. Distribución de temperatura transversal

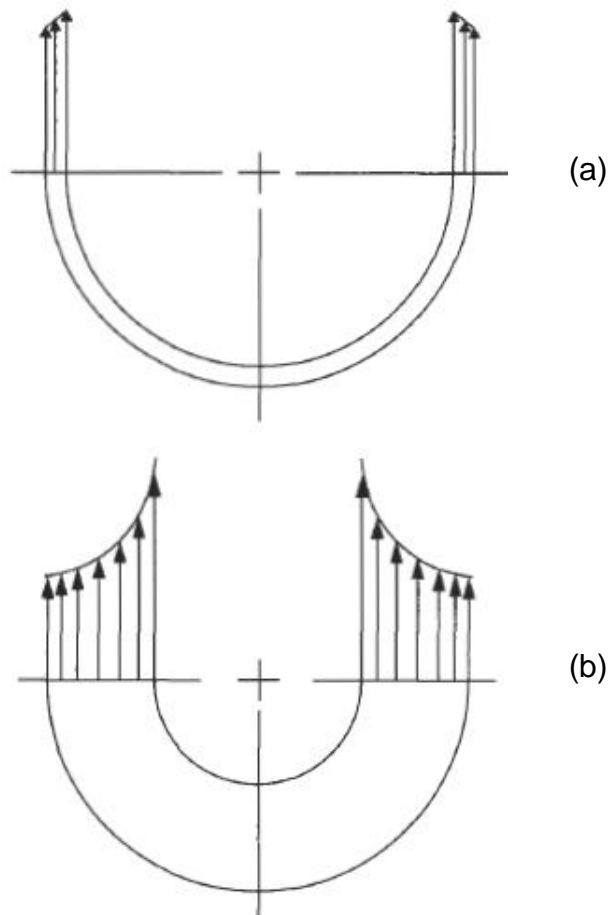


Fuente: Autor del proyecto

Normalmente este tipo de esfuerzos son muy frecuentes en equipos que manejan altas temperaturas. Industrialmente los procedimientos operativos están diseñados para reducir tanto la magnitud como la frecuencia de estas tensiones térmicas; pero las limitaciones operacionales para lograr este efecto incluyen control de la temperatura y de la variación del tiempo de reutilización de los componentes (enfriamientos y calentamientos lentos), límites de temperatura para colocar los sistemas en operación, y temperaturas específicas para presiones específicas en las operaciones del sistema, lo cual es muy difícil. Estas limitaciones reducen al mínimo las tensiones térmicas, pero siempre que se presente una expansión o contracción producida como resultado de calentamientos o enfriamientos se desarrollan esfuerzos térmicos. Normalmente son causados por algún tipo de restricción mecánica.

Dada una entrada de calor constante dentro o fuera de un recipiente, se presenta una variación de temperatura entre el interior y exterior; este efecto de la distribución es mucho más significativo en recipientes de paredes gruesas tal como ve en la figura 22. En los recipientes de pared delgada la distribución de temperatura es prácticamente lineal. Los cálculos de esfuerzos son mucho más simples para la distribución lineal como se muestra en la figura 23.

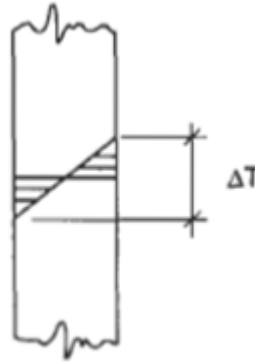
Figura 22. Distribución de temperaturas en cilindros



(a) Distribución de temperatura en recipientes de pared delgada. (b) Distribución de temperatura en recipientes de pared gruesa.

Fuente: Moss Dennis, Pressure vessel design manual, third edition.

Figura 23. Distribución de temperaturas en cilindros de pared delgada



Fuente: Moss Dennis, Pressure vessel design manual, third edition.

Este tipo de esfuerzos también se ve influenciado por el espesor de la pared, así que el cálculo para esfuerzos secundario en recipientes de pared delgada está dada por la expresión:

$$\sigma_T = \frac{\alpha E \Delta T}{2(1 - \mu)}$$

Donde:

E: es el módulo de Young.

α : es el coeficiente de expansión térmica.

ΔT : es el cambio de temperatura a la que está sometido el recipiente

μ : es el modulo de Poisson

Generalmente los esfuerzos térmicos no causan la propagación del defecto. Sin embargo, estos esfuerzos causan deformaciones excesivas por restricciones mecánicas internas o externas. Las restricciones externas se producen cuando un componente como los apoyos restringe el movimiento térmico (expansión o contracción). La restricción interna se produce cuando la temperatura no es uniforme y se producen gradientes térmicos, entonces la variación de temperatura crea un diferencial en el movimiento de tal manera que el crecimiento de una fibra es influido por las fibras adyacentes, lo cual genera esfuerzos térmicos y el resultado es la distorsión o deformación.

Las ecuaciones básicas para los esfuerzos térmicos son simples pero se vuelven complejas cuando intervienen otras variables como gradientes térmicos, estado transitorio, etc. Las ecuaciones para el cálculo de los esfuerzos térmicos aún se están estudiando en muchos lugares, pero de las últimas investigaciones se tienen las siguientes ecuaciones para cálculos de esfuerzos térmicos axiales, radiales y tangenciales para cilindros de pared gruesa²⁶:

$$\sigma_{Tt} = \left(\frac{\alpha E \Delta T}{2(1-\mu)} \right) \cdot \left[\frac{(r_o/r_i)^2 + (r_o/R)^2}{(r_o/r_i)^2 - 1} - \frac{1 + \ln(R/r_i)}{\ln(r_o/r_i)} \right]$$

$$\sigma_{Ta} = \left(\frac{\alpha E \Delta T}{2(1-\mu)} \right) \cdot \left[\frac{2(r_o/r_i)^2}{(r_o/r_i)^2 - 1} - \frac{1 + 2 \ln(R/r_i)}{\ln(r_o/r_i)} \right]$$

$$\sigma_{Tr} = \left(\frac{\alpha E \Delta T}{2(1-\mu)} \right) \cdot \left[\frac{(r_o/r_i)^2 - (r_o/R)^2}{(r_o/r_i)^2 - 1} - \frac{\ln(R/r_i)}{\ln(r_o/r_i)} \right]$$

Donde:

E: es el modulo de Young.

α : es el coeficiente de expansión térmica.

ΔT : es la variación de temperatura, es igual a $(T_i - T_R)$

T_i : es la temperatura interna del recipiente

T_R : es la temperatura donde se desea conocer lo esfuerzos

T_o : es la temperatura externa del recipiente

μ : es el modulo de Poisson

r_i : es el radio interno

r_o : es el radio externo

R: es el radio en el que se desea conocer el valor de los esfuerzos

²⁶ Annaratone Donatello. Pressure vessel design. Editorial Springer. 2007. Pg 65.

La diferencia fundamental entre los esfuerzos mecánicos y térmicos se encuentra en la naturaleza de la carga. Si la carga es térmica las fibras a alta temperatura se comprimen y las que están a menor temperatura se alargan. Si se aplica una carga mecánica mayor a su límite elástico, el recipiente se romperá, a menos que las deformaciones inducidas por los esfuerzos térmicos la limiten por el fenómeno de endurecimiento por deformación. Así como los esfuerzos térmicos pueden ayudar a la falla total de un defecto, también pueden ayudar a disminuir la propagación del defecto, todo depende si estos esfuerzos están actuando a tensión o a compresión.

De igual manera en los esfuerzos térmicos es muy importante determinar el estado en el que se encuentra el equipo pues el cálculo de temperaturas varía si está en estado estable o estado transitorio, y este parámetro es muy importante en el análisis de recipientes a presión ya que actualmente los esfuerzos térmicos o secundarios no son tenidos en cuenta.

Generalmente estos esfuerzos son calculados mediante programas de análisis, pues es muy complejo determinar todos los parámetros para el cálculo de los esfuerzos térmicos. Aun más, en problemas como los que se presentan en los reactores de hidrotatamiento, en los cuales la temperatura varía constantemente, son más difíciles de analizar los métodos analíticos, es por esto que con este proyecto se busca la construcción de grupos de herramientas computacionales que ayuden en esta tarea es de gran importancia para el mejor entendimiento y manejo de los procesos de refinación.

3.2 INTRODUCCIÓN A LA NORMA API 579

Esta norma intenta cubrir de un modo sistemático y objetivo, los actuales requerimientos industriales; podría decirse que es como una ayuda para todos los profesionales que deben tomar decisiones sobre la aceptabilidad o no, de los defectos que aparecen durante el trabajo variante y continuo de los diferentes equipos industriales.

Durante muchos años las decisiones sobre estos problemas se basaron en la experiencia, el criterio profesional y muchas veces en la intuición y el sentido práctico de los ingenieros, con la carga de responsabilidad personal que esto implica; y no en un cálculo adecuado de los parámetros realmente influyentes en el proceso.

Hoy en día la norma API 579 pone a disposición de estos profesionales un conjunto de procedimientos para la caracterización, documentación, evaluación y toma de decisiones respecto de la continuidad en el servicio o de la puesta en práctica de medidas correctivas basadas en la experiencia de los muchos profesionales que aportaron sus conocimientos y experiencias.

Esta norma cubre los campos de mecánica de la fractura, evalúa mecanismo por daño como fractura frágil, colapso plástico, corrosión general, corrosión localizada, pérdida de material, pitting, ampollas y delaminaciones, distorsiones del cuerpo del recipiente, daño en soldadura, fisuras y agrietamiento, creep, daño por fuego y daño por hidrógeno. Es muy utilizada actualmente porque facilita las decisiones para ejecutar, modificar, reparar, vigilar, o sustituir los equipos y orienta sobre la frecuencia de las inspecciones de equipos, el cual es un parámetro muy importante para garantizar la funcionalidad del equipo. De igual manera emplea métodos de análisis, principalmente los análisis de esfuerzos para evaluar las principales fallas y daños entre otros.

Las instalaciones industriales y sus componentes pueden sufrir muchos tipos de defectos durante su vida útil. Dado que estos defectos pueden causar daño permanente, su efecto sobre la integridad debe ser evaluado. Fitness For Service (FFS) - Evaluación de Aptitud para el Servicio es un tipo especial de evaluación que se lleva a cabo para determinar si el equipo puede cumplir con sus fines específicos bajo operación normal hasta la parada siguiente o si la reparación y/o sustitución es necesaria con el fin de continuar con el servicio que se necesita. Al aplicar el enfoque de aptitud para el servicio, todos los mecanismos de falla potenciales serán identificados y la evaluación se llevará a cabo para garantizar que las condiciones de falla no se den durante el tiempo de trabajo del equipo.

En la industria petrolera más que en otras industrias, se presentan equipos con un importante tiempo en servicio los cuales son más susceptibles a daños que comprometan su integridad estructural y vida residual; especialmente los recipientes sometidos a presión. A fin de poder evaluar estos últimos factores es necesario conocer no solo los parámetros de funcionamiento del equipo si no también las características de los defectos presentes en el.

Todas las secciones de la norma API 579 FFS tienen la misma organización²⁷:

- Identificación del mecanismo de daño
- Aplicabilidad y limitaciones del procedimiento de evaluación
- Datos requeridos
- Técnicas de evaluación y criterios de aceptación
- Evaluación de vida residual
- Remediación y/o sustitución
- Monitoreo en servicio
- Documentación

²⁷ American Petroleum Institute. API Energy. Fitness-For-Service API 579-1/ASME FFS-1. SECOND EDITION. 2007.

Las limitaciones y aplicabilidad de un procedimiento de análisis están relacionadas con el nivel de evaluación. Básicamente la norma contempla tres niveles de evaluación, cada uno puede definirse como un balance entre el conservatismo, información requerida para la evaluación, la habilidad del personal que realiza la evaluación y la complejidad del análisis que se está desarrollando. Los tres niveles son descritos brevemente a continuación.

- **Nivel I.** Es el nivel básico de inspección, es el menos exacto pero el más conservativo debido a que se usa para equipos con ciertas especificaciones. Es desarrollado en ocasiones como un cálculo preliminar para tener una idea del proceso y es el más fácil de usar.
- **Nivel II.** Esta evaluación es más precisa y compleja que la del nivel I; son necesarios los registros de inspección, condiciones de operación y hojas de cálculo, para realizar cálculos detallados. Es la más utilizada de las tres, porque se obtienen resultados más cercanos a la realidad de una manera no tan compleja.
- **Nivel III.** Es un análisis más refinado, es el menos conservador pero el más preciso debido a la aplicación de técnicas como el modelamiento y simulación; normalmente es usado en problemas muy complejos donde los niveles anteriores no arrojan resultados confiables. Debe ser realizado por personal experto en FFS.

Usados correctamente, los análisis de integridad estructural permiten no solo evaluar el estado actual del equipo o algún componente si no optimizar diseños y procesos de fabricación, estimar la necesidad de reparaciones y por tanto evitarlas cuando no son necesarias, calcular la vida remanente de equipos y componentes estructurales y analizar fallas estructurales. De esta manera se obtiene un equilibrio total entre seguridad, economía, beneficios y tecnología.

3.2.1 Evaluación de grietas, sección 9, API 579 FFS

La norma API 579 FFS, trata de abarcar los problemas industriales de una manera global; una de las secciones más importantes de la norma es el análisis de equipos y componentes industriales con fisuras o grietas. El procedimiento FFS para evaluación de fisuras es basado en el método FAD, diagrama de evaluación de falla; esta metodología es ampliamente usada y la más aceptada para este tipo de evaluación.

Es necesario caracterizar los parámetros más importantes en el momento de inspeccionar un equipo, definir unos pasos a seguir para planificar y organizar el análisis logrando una metodología con cual se pueden obtener resultados óptimos. A continuación se enumeran los ocho (8) pasos más importantes que hay que identificar antes de iniciar cualquier análisis de integridad o estudio de aptitud para el servicio.

- **Etapa 1:** Identificar el tipo de defecto y mecanismo de daño. Esto se puede realizar utilizando parámetros como el diseño original, técnicas de fabricación, historial de operación y material de construcción.
- **Etapa 2:** Evaluar la aplicabilidad y limitaciones de los procedimientos de la evaluación fitness for service (FFS). Este análisis depende directamente del tipo de daño y del nivel de la evaluación.
- **Etapa 3:** Datos requeridos. Este parámetro también depende del tipo de defecto y mecanismo de daño. Los datos necesarios de una evaluación pueden ser documentos originales de diseño, información de mantenimiento, históricos de operación y datos sobre parámetros operacionales futuros; también están incluidos todo lo relacionado con el defecto como el tamaño, estado, ubicación y propiedades del material.

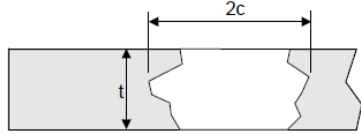
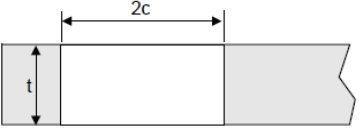
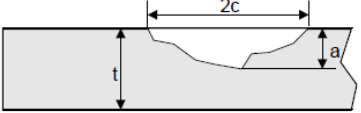
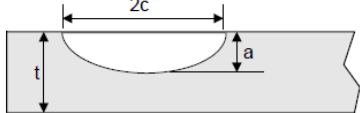
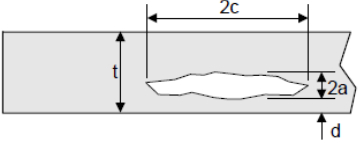
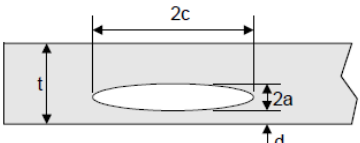
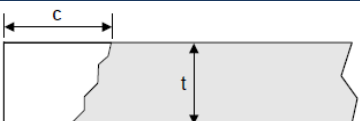
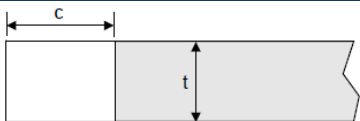
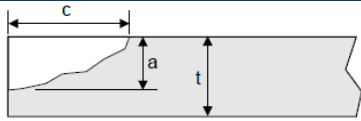
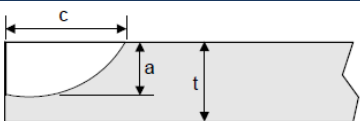
- **Etapa 4:** Técnicas de evaluación y criterios de aceptación. Esta metodología esta especificada en cada una de las secciones, pues dependen del mecanismo de daño presente.
- **Etapa 5:** Evaluación de vida Remanente. Es una estimación del tamaño máximo aceptable del defecto o un cálculo de nuevas condiciones de trabajo en conjunto con un plan de inspección, para establecer intervalos de operación.
- **Etapa 6:** Métodos de remediación y reparaciones. Esto depende del tipo de daño y su objetivo es controlar el crecimiento de los defectos y/o el deterioro del material.
- **Etapa 7:** Monitoreo en servicio. Son métodos para controlar el estado del defecto mientras el equipo está en servicio, depende directamente del tipo de defecto.
- **Etapa 8:** Documentación. Esta debe incluir registros del proceso, decisiones tomadas, memorias de cálculo, requisitos de los procedimientos y resultados de la evaluación.

Actualmente tratando de facilitar muchos de estos procesos los cuales pueden ser complejos y muy analíticos, se están generando aplicaciones computacionales que permiten el cálculo de todos estos parámetros con programas, ahorrando tiempo y dinero; también se obtiene resultados más exactos. Uno de los objetivos de este proyecto es generar una herramienta computacional, una programación basada en la metodología práctica para el cálculo de defectos específicos, como las grietas.

El capítulo 9 de la norma API 579 FFS, analiza las grietas como defectos importantes en equipos industriales, especialmente en equipos sometidos a presión. Estos procedimientos de evaluación están basados en el método de Diagrama de Evaluación de Falla (FAD). Con el cual se determina la condición o el estado del equipo, con ciertas consideraciones iniciales como el tipo de defecto.

Podría decirse que las grietas generalmente son defectos planos que son caracterizados principalmente por una longitud y profundidad, pero también influye su posición y estado. Estos defectos pueden ser superficiales, embebidos, o pasantes, como se muestra en la tabla 7. Si estas consideraciones iniciales son tomadas de una manera adecuada, el resultado de la evaluación es óptimo.

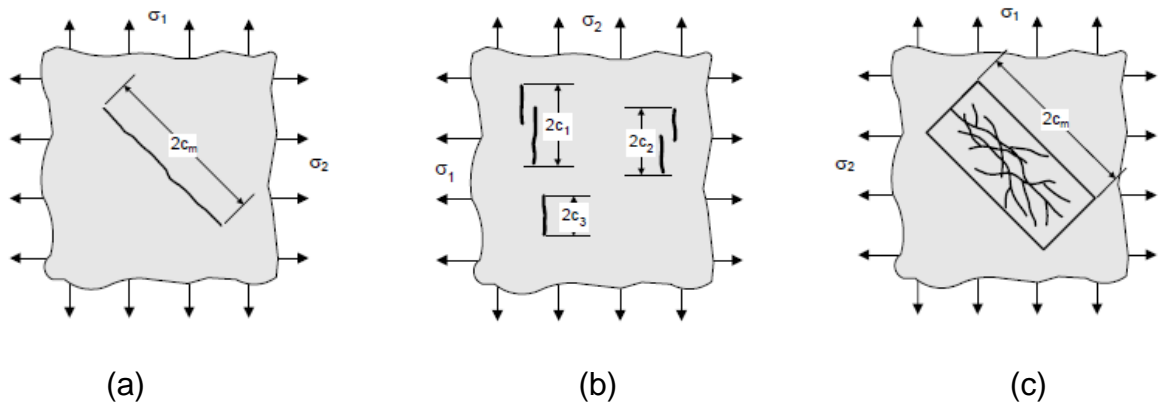
Tabla 7. Clases de grietas

NOMBRE	REAL	IDEAL
PASANTE		
SUPERFICIAL		
EMBEBIDA		
DEFECTO DE ESQUINA		
GRIETA DE BORDE		

Fuente: Autor del proyecto, norma API 579 FFS.

Los procedimientos de evaluación pueden ser usados por ejemplo para evaluar el riesgo de fractura frágil, debido a la distribución de los defectos. Los defectos pueden estar asociados con una amplia variedad de interacciones entre el ambiente, material, proceso y mecanismos de daño. Generalmente las grietas pueden lineales pero también pueden ramificarse, como se muestra en la figura 24. Los procedimientos de evaluación pueden ser aplicados para cualquiera de estas distribuciones de grietas.

Figura 24. Distribución de grietas



(a) Grieta lineal. (b) Conjuntos de grietas lineales. (c) Grieta ramificada

Fuente: Norma API 579 FFS.

3.2.2 Procedimiento para la evaluación de grietas

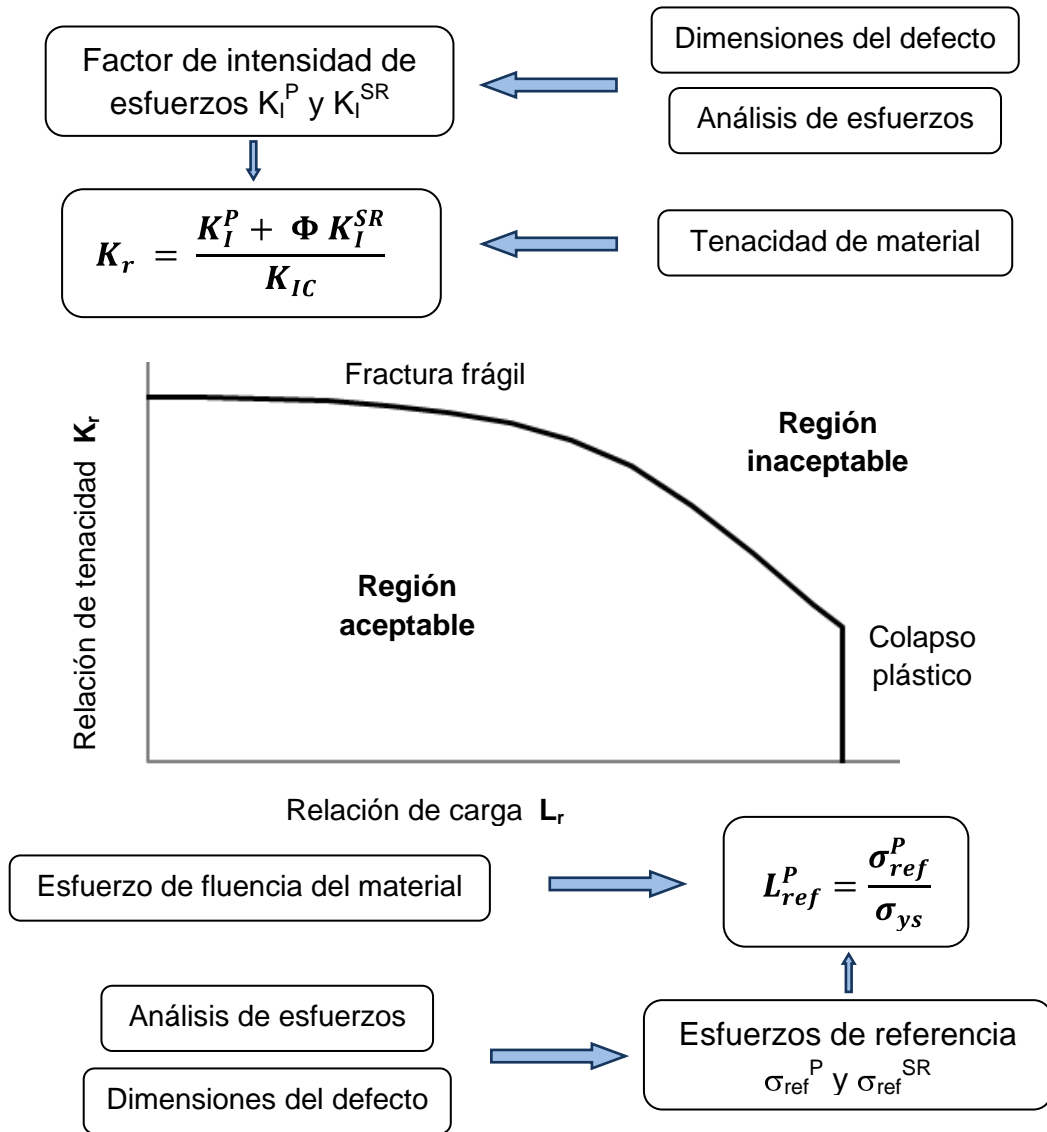
Como se especifico anteriormente en las etapas la evaluación fitness for service (FFS) está totalmente definida para ciertos mecanismos de daño, en este caso el procedimiento para inspeccionar recipientes a presión con agrietamiento está totalmente definido en el capítulo 9 de la norma, basada en 13 pasos que se describen a continuación.

- **Paso 1.** Evaluar las condiciones de funcionamiento; determinar la presión, temperatura y combinaciones de carga a ser evaluadas.
- **Paso 2.** Determine la distribución de esfuerzos en la ubicación del defecto basado en las cargas aplicadas en el PASO 1 y clasifique los esfuerzos resultantes en las siguientes categorías:
 - Esfuerzos primarios
 - Esfuerzos secundarios
 - Esfuerzos residuales
- **Paso 3.** Determine las propiedades del material; límite elástico, límite de resistencia a la tracción y tenacidad a la fractura para las condiciones de evaluación que fueron tomadas en el PASO 1.
- **Paso 4.** Determine las dimensiones del defecto de datos de inspección. El defecto debe ser clasificado.
- **Paso 5.** Modifique los esfuerzos principales, la tenacidad a la fractura y el tamaño del defecto con el uso de los factores de seguridad parciales (PSF) recomendados.
- **Paso 6.** Calcule los esfuerzos primarios de referencia, σ_{ref}^p , basado en la distribución de esfuerzos modificada por el factor de seguridad parcial en el PASO 5. Este proceso se muestra en el anexo D de la norma API 579 FFS.
- **Paso 7.** Calcule la relación de carga primaria L_{ref}^p o la abscisa de la FAD con el esfuerzo primario de referencia del PASO 6 y el límite elástico del PASO 3.

- **Paso 8.** Calcule la intensidad de esfuerzo atribuida a las cargas primarias K_I^P , usando la distribución de esfuerzos primarios modificada y el tamaño del defecto del PASO 5; para $K_I^P < 0.0$ entonces $K_I^P = 0$.
- **Paso 9.** Calcule los esfuerzos secundarios y residuales de referencia, σ_{ref}^{SR} , con base en las distribuciones de esfuerzos modificadas por el factor de seguridad parcial en el PASO 5. Este proceso se muestra en el anexo D de la norma API 579 FFS.
- **Paso 10.** Calcule la intensidad de esfuerzos, K_I^{SR} , para los esfuerzos secundarios y residuales usando las distribuciones de esfuerzos secundarios y residuales del PASO 2, el tamaño de defecto modificado del PASO 5; para valores de $K_I^{SR} < 0.0$ se toma $K_I^{SR} = 0$. El valor de K_I^{SR} debe determinarse en el mismo lugar donde se determino la intensidad de esfuerzos por cargas primarias K_I^P del paso 8.
- **Paso 11.** Calcule el factor de interacción plástica. Si $K_I^{SR} = 0$ entonces $\phi = 1$, de lo contrario calcule el valor con la relación de carga secundaria L_r^{SR} con los esfuerzos secundarios del paso 9 y el límite elástico del paso 3. Con este valor determine el del factor de interacción plástica.
- **Paso 12.** Determine la relación de tenacidad u ordenada del diagrama FAD, usando la intensidad del esfuerzo atribuida a las cargas primarias K_I^P , calculadas en el paso 8; la intensidad de esfuerzos, K_I^{SR} , por los esfuerzos secundarios y residuales del paso 10; la tenacidad de la fractura K_{MAT} y el factor de interacción plástica del paso 11.
- **Paso 13.** Evaluar y analizar los resultados, el punto de evaluación en el diagrama FAD para el tamaño del defecto actual y las condiciones de funcionamiento.

El resultado del análisis consiste en la valoración de las condiciones reales del equipo definiendo si su operación se encuentra en una zona aceptable o no tal como se muestra en la figura 25.

Figura 25. Proceso del diagrama de evaluación de falla



Fuente: Autor del proyecto, norma API 579 FFS

4. ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DE LA CRITICIDAD DE LAS GRIETAS PRESENTES EN EL REACTOR DE HIDROTRATAMIENTO ENVEJECIDO EN SERVICIO CON BASE EN LA NORMA API 579 FFS

El proceso para el análisis FFS es muy utilizado en la industria petrolera ya que la presencia de grietas afecta considerablemente la operación de la mayoría de equipos. En este proyecto se consideraron dos clases de cálculos, para realizar una comparación entre los procedimientos actuales que aunque son analíticos omiten los esfuerzos secundarios; y los procedimientos contemplados en este proyecto que son simulación y cálculos analíticos pero teniendo en cuenta los esfuerzos secundarios.

Con base en las consideraciones de la norma API 579 FFS, los cálculos son documentados para tener un registro con el cual comparar futuras inspección, actualmente para el cálculo de los esfuerzos primarios son utilizadas las siguientes ecuaciones:

Esfuerzo circunferencial:
$$\frac{P}{\xi} \left(\frac{R_c}{t_c} + 0.6 \right)$$

Esfuerzo longitudinal:
$$\frac{P}{2\xi} \left(\frac{R_c}{t_c} - 0.4 \right)$$

Donde:

ξ : es la eficiencia de junta.

R_c : es el radio interno

t_c : es el espesor

P : es la presión

El conjunto de esfuerzos primarios, secundarios y residuales contemplados para este análisis FFS con las ecuaciones de diseño anteriormente nombradas se muestran en la tabla 8. Los esfuerzos primarios se calcularon tomando una presión de 1685 PSI y los residuales son determinados por recomendaciones establecidas.

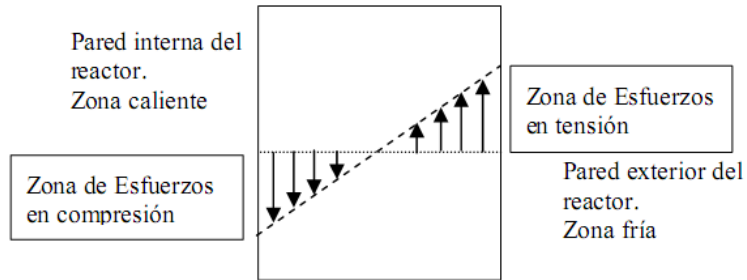
Tabla 8. Esfuerzos según ecuaciones de diseño

		Presión		Térmico		Overlay	Residual
		Primario		Secundario			
Categ		P _m (Psi)	P _b (Psi)	Q _m (Psi)	Q _b (Psi)	Q _m (Psi)	Q _m (Psi)
Cabezal	Circf.	6.272	0	0	0	0	11.000
Cuerpo	Long.	5.767	0	0	0	0	11.000
	Circf.	13.219	0	0	0	0	11.000

Fuente: Uribe Iván, Velosa Aldrin, Zabala Luis; Estudio del proceso de generación y comportamiento de grietas en un acero 2¼ Cr 1Mo envejecido; Colombia; 2009.

Los esfuerzos secundarios no se consideran en esta evaluación FFS por la distribución mostrada en la figura 26, con la cual se establece que los esfuerzos desde el interior hasta la mitad del espesor del reactor serían de compresión y a partir de allí hasta el exterior estarían a tensión. Las grietas analizadas en los reactores aun no tienen un tamaño apreciable como para alcanzar la mitad de la pared del reactor así que en una primera aproximación no se tienen en cuenta los esfuerzos secundarios, ya que los esfuerzos a compresión no influyen en la propagación de grietas.

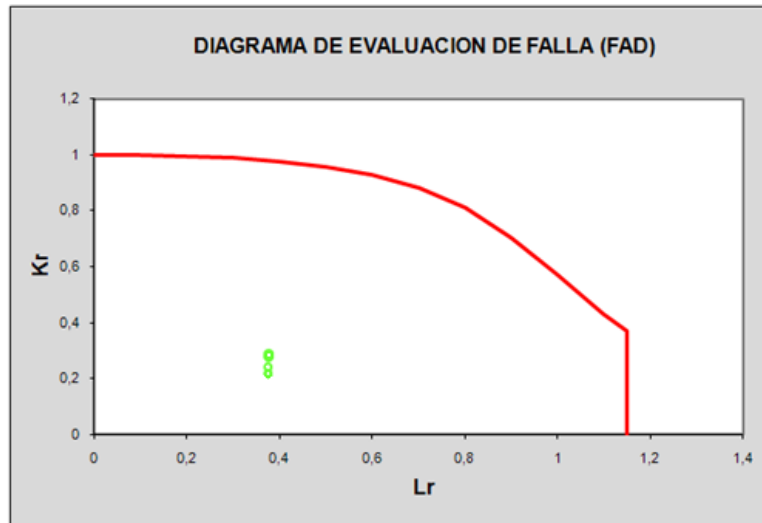
Figura 26. Distribución de esfuerzos térmicos



Fuente: Uribe Iván, Velosa Aldrin, Zabala Luis; Estudio del proceso de generación y comportamiento de grietas en un acero 2 ¼ Cr 1 Mo envejecido en servicio, 2009.

Con estos análisis de esfuerzos se realiza el procedimiento de evaluación FFS mediante los 13 pasos especificados, con los cuales se logra establecer la grieta crítica con base en el diagrama FAD, el cual se muestra en la figura 27.

Figura 27. Diagrama de evaluación de falla FAD actual



Fuente: Reactores de parafinas, ICP-ECOPETROL, 2002.

Por estas aproximaciones e incertidumbres en los cálculos actuales; en este proyecto se busca determinar un proceso adecuado para el cálculo de esfuerzos y con esto obtener un procedimiento óptimo para que la evaluación FFS.

4.1 ANÁLISIS DE CRITICIDAD

Con este procedimiento analítico se busca incluir los esfuerzos secundarios en el proceso de cálculo para la evaluación FFS, en recipientes a presión como los reactores de hidrotreatmento, con la cual se determinara la criticidad de las grietas presentes tomando como referencia los pasos establecidos por la norma API 579 FFS, mediante el método de evaluación de falla (diagrama FAD). Estos cálculos se realizaran bajo consideraciones más reales que las actualmente utilizadas, además se considera que los defectos no interactúan entre sí.

4.1.1 Paso 1

Evaluar las condiciones de funcionamiento; determinar la presión, temperatura y combinaciones de carga a ser evaluadas.

Estos parámetros operacionales o condiciones de funcionamiento se tomaron del histórico de operación del reactor de hidrotreatmento, en trabajo estable; y se tomo el valor máximo de presión para tener un escenario crítico. También se podría analizar otras condiciones operacionales en las cuales se presentes escenarios críticos por la variación de presión y temperatura, ya que se considera que el trabajo a altas temperaturas es favorable para el material. Para los cálculos se tomaron unos parámetros iniciales los cuales se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Parámetros operacionales iniciales

	R-111B
Presión operación	1400 PSI
Temperatura de operación	600 °C

Fuente: Autor del proyecto.

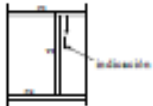
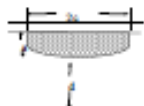

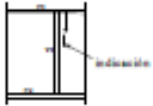
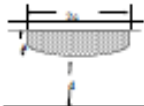

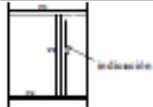
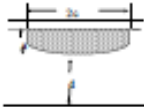

4.1.2 Paso 2

Determine la distribución de esfuerzos en la ubicación del defecto basado en las cargas determinadas en el PASO 1 y clasifique los esfuerzos resultantes en las siguientes categorías:

- Esfuerzos primarios
- Esfuerzos secundarios
- Esfuerzos residuales

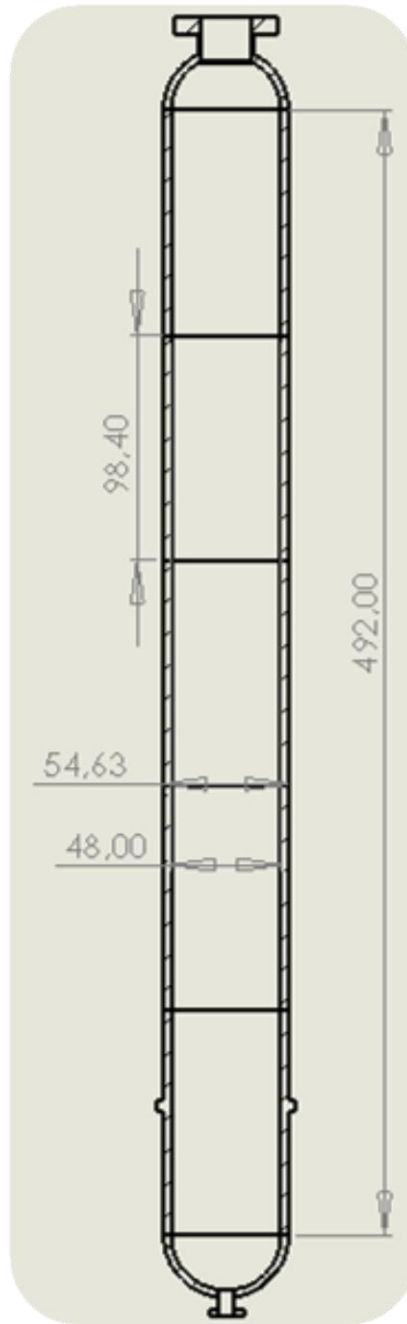
Para determinar los esfuerzos es necesario conocer algunas características y propiedades del reactor, al igual que de los defectos presentes, esto se realizara con más detalle en el paso 4. Las características de las grietas utilizadas para los cálculos están definidas en la tabla 10 y las dimensiones del reactor se referencian en la figura 28, todas las cotas en pulgadas.

Tabla 10. Características de las grietas

	UBICACIÓN		Dimensiones (mm)				lugar	esquema
	mm	esquema	d	a	2c	esquema		
1	620		74	16	380		Superficie interna metal base	
2	1320		77	13	170		Superficie interna metal base	
3	1260		70	20	940		Superficie interna metal base	

Fuente: Autor del proyecto, Inspección por ultrasonido reactor R-111b planta de parafinas; ICP-ECOPETROL.

Figura 28. Dimensiones básicas del reactor



Fuente: autor del proyecto, SolidWorks 2007.

Para facilitar los cálculos, el análisis de las grietas se realizara como fueron numeradas en la tabla 10.

– **Esfuerzos primarios**

Los esfuerzos primarios son producidos únicamente por la presión y su cálculo se realizara con las ecuaciones de Lamé especificadas en el capítulo 3 pagina 48. Este análisis de esfuerzos se realizara de manera independiente para las tres grietas. Es importante identificar si el reactor es un recipiente de pared delgada o de pared gruesa, para iniciar con el análisis; bajo las condiciones anteriormente mencionadas.

Para pared delgada $r_i/t > 10$

Para pared gruesa $r_i/t < 10$

$$\frac{24 \text{ in}}{3.3125 \text{ in}} = 7,24 \quad \text{es un recipiente de pared gruesa}$$

Para la **grieta 1**, se realizaron los cálculos para determinar los esfuerzos axiales o longitudinales, radiales, tangenciales y circunferenciales como se muestran a continuación.

Esfuerzos primarios axiales o longitudinales de la **grieta 1**

$$\sigma_a = \frac{r_i^2 P_i}{r_o^2 - r_i^2} \quad \rightarrow \quad \sigma_a = \frac{(24)^2 \cdot (1400)}{(27,3125)^2 - (24)^2}$$

$$\sigma_a = 4.744,29 \text{ Psi}$$

Esfuerzos primarios circunferenciales radiales de la **grieta 1**

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 P_i}{r_o^2 - r_i^2} \cdot \left(-1 + \frac{r_o^2}{R^2} \right)$$

$$\rightarrow \sigma_r = \left[\frac{(24)^2 \cdot (1400)}{(27,3125)^2 - (24)^2} \right] \cdot \left(-1 + \frac{(27,3125)^2}{(24,63)^2} \right)$$

$$\sigma_r = 1.089,733 \text{ Psi}$$

Esfuerzos primarios circunferenciales tangenciales de la **grieta 1**

$$\sigma_t = \frac{r_i^2 P_i}{r_o^2 - r_i^2} \cdot \left(1 + \frac{r_o^2}{R^2} \right)$$

$$\rightarrow \sigma_t = \left[\frac{(24)^2 \cdot (1400)}{(27,3125)^2 - (24)^2} \right] \cdot \left(1 + \frac{(27,3125)^2}{(24,63)^2} \right)$$

$$\sigma_t = 10.578,318 \text{ Psi}$$

Esfuerzos primarios circunferenciales de la **grieta 1**

$$\sigma_c = \sqrt{(\sigma_t)^2 + (\sigma_r)^2} \quad \rightarrow \quad \sigma_c = \sqrt{(10.578,318)^2 + (1.089,733)^2}$$

$$\sigma_c = 10.635,23 \text{ Psi}$$

Este procedimiento se realizo de igual manera para todas las grietas y los resultados de los cálculos se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Esfuerzos primarios calculados

	Dimensión (in)		Esfuerzos (Psi)			
	a	Radio critico	radial	tangencial	circunferencial	axial
1	0,63	24,63	1.089,733	10.578,318	10.635,23	4.744,29
2	0,51	24,51	1.146,01	10.634,676	10.696,25	4.744,29
3	0,78	24,78	1.015,838	10.504,424	10.553,43	4.744,29

Fuente: autor del proyecto.

– **Esfuerzos secundarios**

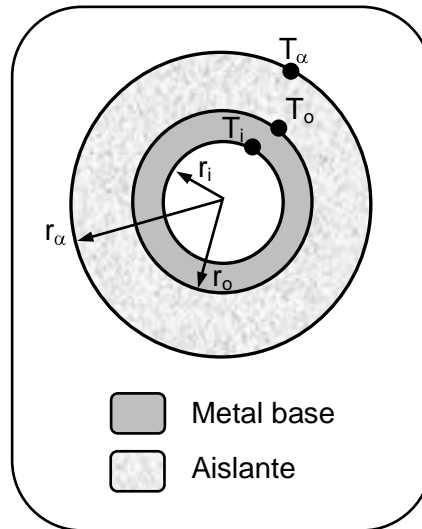
Como ya se menciona los esfuerzos secundarios, también llamados esfuerzos térmicos, son producidos por cambios de temperatura; por variaciones térmicas no homogéneas, las cuales producen dilataciones y contracciones rápidas que generan concentración de esfuerzos por las distorsiones que sufre el material.

Para calcular estos esfuerzos térmicos se tendrá en cuenta el trabajo continuo del reactor como se determino en el paso 1 y todos los parámetros necesarios se calcularan bajo esta condición. Se realizara de igual manera que los esfuerzos primarios con las ecuaciones especificadas en el capítulo 3 pagina 56.

Normalmente los esfuerzos térmicos no se tiene en cuenta porque industrialmente existen algunos procedimientos para reducir tanto la magnitud como la frecuencia de estas tensiones térmicas; pero no es posible asegurar que un equipo está libre de esfuerzos térmicos, son menores que los primarios y no se les considera representativos.

La temperatura de piel interna del reactor es de 600°C, pero para determinar la temperatura externa es necesario realizar un análisis de transferencia de calor utilizando la ley de conservación, los términos utilizados para este cálculo se muestra en la se muestran en la figura 29.

Figura 29. Variables térmicas



Fuente: autor del proyecto.

Igualando el calor en la frontera se tiene

$$\frac{T_i - T_o}{\left(\frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi K_m}\right)} = \frac{T_o - T_\alpha}{\left(\frac{\ln(r_\alpha/r_o)}{2\pi K_a}\right)}$$

$$\rightarrow \frac{600 - T_o}{\left(\frac{\ln(27,31/24)}{2 \cdot \pi \cdot 50}\right)} = \frac{T_o - 35}{\left(\frac{\ln(35,18/27,31)}{2 \cdot \pi \cdot 0,038}\right)}$$

$$T_o = 599,78 \text{ C}$$

T_o es la temperatura de superficie exterior del reactor, pero es necesario conocer la temperatura en el radio crítico; para lo cual se utiliza la siguiente ecuación:

$$T_R = T_o + \left[(T_i - T_o) \cdot \left(\frac{\ln(R/r_i)}{\ln(r_o/r_i)} \right) \right]$$

Donde:

T_R : es la temperatura en el radio de la grieta

T_i y T_o : es la temperatura interna y externa del reactor respectivamente

R : es el radio crítico, es el radio donde está la grieta

r_i y r_o : es el radio interno y externo del reactor respectivamente

Estos cálculos son necesarios debido a que a través de la pared del reactor se presenta una variación de temperatura, la cual debe ser determinada ya que es un recipiente de pared gruesa y con esto analizar su aporte en los esfuerzos.

Para la **grieta 1**, se determinaron todos los esfuerzos térmicos.

Esfuerzos secundarios axiales o longitudinales de la **grieta 1**

$$\sigma_{Ta} = \left(\frac{\alpha E \Delta T}{2(1 - \mu)} \right) \cdot \left[\frac{2(r_o/r_i)^2}{(r_o/r_i)^2 - 1} - \frac{1 + 2 \ln(R/r_i)}{\ln(r_o/r_i)} \right]$$

$$\rightarrow \sigma_{Ta} = \left(\frac{(6,71 \times 10^{-4}) \cdot (3,045 \times 10^7) \cdot (0,18)}{2(1 - 0,3)} \right) \cdot \left[\frac{2(27,31/24)^2}{(27,31/24)^2 - 1} - \frac{1 + 2 \ln(24,63/24)}{\ln(27,31/24)} \right]$$

$$\sigma_{Ta} = 1.687 \text{ Psi}$$

Esfuerzos primarios circunferenciales radiales de la **grieta 1**

$$\sigma_{Tr} = \left(\frac{\alpha E \Delta T}{2(1-\mu)} \right) \cdot \left[\frac{(r_o/r_i)^2 - (r_o/R)^2}{(r_o/r_i)^2 - 1} - \frac{\ln(R/r_i)}{\ln(r_o/r_i)} \right]$$

$$\rightarrow \sigma_{Tr} = \left(\frac{(6,71 \times 10^{-4}) \cdot (3,045 \times 10^7) \cdot (0,18)}{2(1-0,3)} \right) \cdot \left[\frac{(27,31/24)^2 - (27,31/24,63)^2}{(27,31/24)^2 - 1} - \frac{\ln(24,63/24)}{\ln(27,31/24)} \right]$$

$$\sigma_{Tr} = 57,8 \text{ Psi}$$

Esfuerzos primarios circunferenciales tangenciales de la **grieta 1**

$$\sigma_{Tt} = \left(\frac{\alpha E \Delta T}{2(1-\mu)} \right) \cdot \left[\frac{(r_o/r_i)^2 + (r_o/R)^2}{(r_o/r_i)^2 - 1} - \frac{1 + \ln(R/r_i)}{\ln(r_o/r_i)} \right]$$

$$\rightarrow \sigma_{Tt} = \left(\frac{(6,71 \times 10^{-4}) \cdot (3,045 \times 10^7) \cdot (0,18)}{2(1-0,3)} \right) \cdot \left[\frac{(27,31/24)^2 + (27,31/24,63)^2}{(27,31/24)^2 - 1} - \frac{1 + \ln(24,63/24)}{\ln(27,31/24)} \right]$$

$$\sigma_{Tt} = 1.631,322 \text{ Psi}$$

Esfuerzos secundarios circunferenciales equivalentes de la **grieta 1**

$$\sigma_{Tc} = \sqrt{(\sigma_{Tt})^2 + (\sigma_{Tr})^2} \quad \rightarrow \quad \sigma_{Tc} = \sqrt{(1.631,322)^2 + (57,8)^2}$$

$$\sigma_{Tc} = 1.632,35 \text{ Psi}$$

Este procedimiento se realizo para las tres grietas y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Esfuerzos secundarios del reactor

	Dimensión (in)		Temperatura crítica	Esfuerzos (Psi)			
	a	Radio critico		radial	tangencial	circunferencial	axial
1	0,63	24,63	599,82	57,8	1.631,32	1.632,35	1.687
2	0,51	24,51	599,85	40	1.532,4	1.533	1.571,31
3	0,78	24,78	599,78	78,9	1681,57	1683,42	1760,45

Fuente: autor del proyecto.

– **Esfuerzos residuales**

Este tipo de esfuerzos están compuestos por múltiples factores, los cuales generalmente son desconocidos o difíciles de determinar, actualmente su cálculo se basa en modelos matemáticos definidos. Entre estos esfuerzos se encuentran los esfuerzos residuales por soldadura y los esfuerzos por Overlay principalmente. El valor de todos estos parámetros se toma generalmente de normas o recomendaciones de las mismas.

Los esfuerzos residuales por soldadura son los producidos por el cambio brusco de temperatura en el momento de la aplicación de los cordones, normalmente son anulados o reducidos a su mínima expresión por medio de pretratamientos al momento de soldar o justo al terminar el procedimiento.

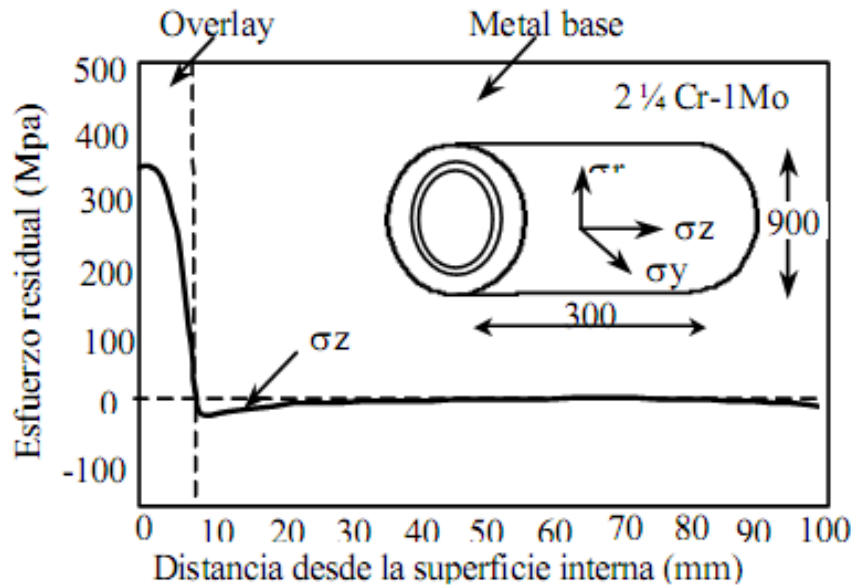
Como ya se menciona este tipo de esfuerzos son muy difíciles de calcular, en el anexo E de la norma API 579 FFS se especifica como determinarlos pero por recomendaciones y consideraciones generalmente se toman valores del 20% del límite de fluencia del material más 10.000 Psi.

$$\sigma_r = 0,2 (\sigma_{ys} + 10.000)$$

Este valor es muy importante cuando el defecto se encuentra directamente en el cordón de soldadura o en una zona muy cercana denominada zona HAZ. Se desprecia cuando el defecto se encuentra en el metal base o bajo otras consideraciones como cuando se toman medidas necesarias para no afectar la integridad del equipo con la aplicación de los cordones en el momento de su construcción. Para nuestros cálculos como se analiza el caso crítico este parámetro se tomara como valor recomendado por la norma, el cual es de 10.800 Psi en dirección paralela al cordón de soldadura; es decir que en este caso los esfuerzos residuales por soldadura son longitudinales ya que en el sector adjunto al cordón es donde se puede presentar variación en la estructura cristalina del material y por lo tanto concentración de esfuerzos de este tipo.

Los esfuerzos por overlay se consideran como la relación existente entre los coeficientes de dilatación térmica entre el material base y el recubrimiento interno del reactor, el cual es de un acero inoxidable de bajo espesor y con una baja permeabilidad de hidrogeno, con lo que se ayuda a proteger el cuerpo del reactor. Aunque estos esfuerzos han sido ampliamente estudiados aun no se tienen correlaciones claras sobre su forma de cálculo, generalmente se determinan analizando la distribuciones experimentales para cada material con geometrías definidas como lo muestra la figura 30.

Figura 30. Distribución de esfuerzos por overlay



Fuente: Uribe Iván, Velosa Aldrin, Zabala Luis; Estudio del proceso de generación y comportamiento de grietas en un acero 2 ¼ Cr 1 Mo envejecido en servicio; Colombia; 2009.

Analizando el comportamiento de estos esfuerzos en las dimensiones de las grietas de interés para nuestros cálculos se puede observar que estos valores no son representativos debido a que los defectos están en el metal base y son esfuerzos mínimos de compresión; por lo tanto no serán tenidos en cuenta en los cálculos.

4.1.3 Paso 3

Determine las propiedades del material; límite elástico, límite de resistencia a la tracción y tenacidad a la fractura para las condiciones de evaluación que fueron tomadas en el PASO 1.

Todas las características y especificaciones del material del reactor, usadas en los cálculos están detalladas en la tabla 13. Fueron tomadas de las propiedades del acero 21/4 Cr 1Mo ideal, sin envejecimiento ya que no es posible realizar pruebas para determinar las características del material real pero se considera que estas características no están influenciadas por el envejecimiento; además las normas no determinan valores para estas condiciones.

Tabla 13. Especificaciones del material del reactor

	R-111B
Material base	ASTM A387 Gr22
Modulo de Young	$3,045 \times 10^7$ Psi
Radio de Poisson	0,3
Densidad	0,34 Lbm/in ³
Expansión térmica	$6,2 \times 10^{-6}$ 1/°F
Esfuerzo de tensión	45.000 Psi
Esfuerzo de compresión	45.000 Psi
Esfuerzo ultimo	75.000 Psi
Conductividad térmica	$6,71 \times 10^{-4}$ BTU/seg in °F
Tenacidad ideal	120.000 Psi√in

Fuente: autor del proyecto, 2004 ASME boiler & pressure vessel code an international code, table 2a (cont'd) section III, class 1 and section VIII, division 2 design stress intensity values s_m for ferrous materials

La tenacidad del reactor no es un parámetro tan fácil de calcular; la tenacidad de los materiales varía de acuerdo a múltiples factores como el trabajo con hidrogeno, presiones y temperaturas severas de operación, entre otras condiciones las cuales son muy frecuentes en los reactores de hidrotreatmento, por esta razón este es uno de los factores críticos de la evaluación. La única forma de conocer su valor real es con pruebas destructivas no muy aceptadas para los análisis de integridad.

Para nuestro caso se determina la tenacidad del material analíticamente, se realiza una muy buena aproximación; se calcula una pérdida de tenacidad del material por envejecimiento, K_{IC} . En otras ocasiones se utiliza el K_{IR} que es un factor por envejecimiento por trabajo con hidrogeno. El factor más utilizado para este tipo de equipos es el K_{IC} , ya que es más cercano a la realidad que tomar la tenacidad de un material nuevo.

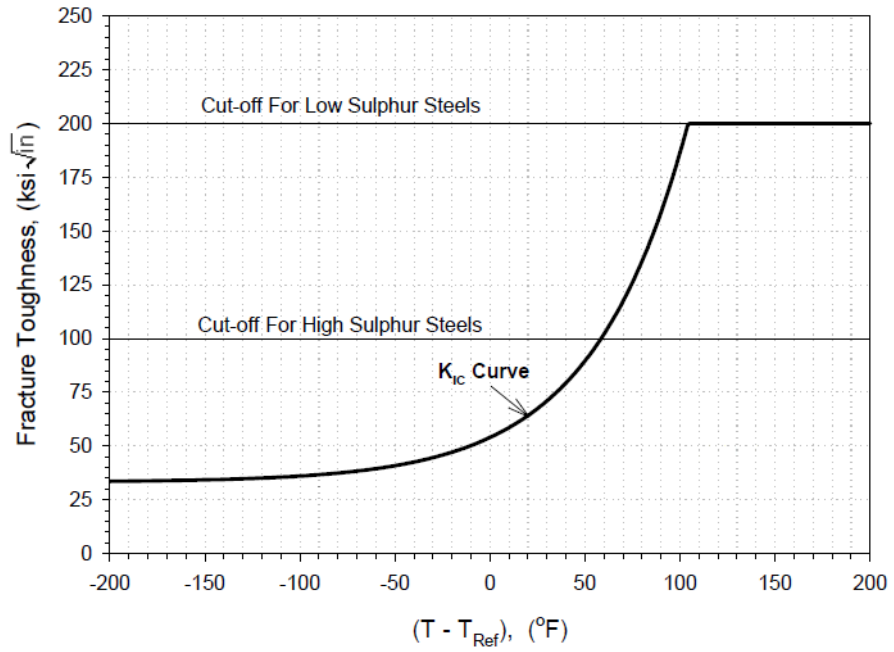
En el reactor de hidrotreatmento analizado se tiene pérdida de tenacidad por envejecimiento, por tal razón se utiliza en los cálculos el factor K_{IC} , el cual se determina bajo los siguientes parámetros calculando algunos factores, como la temperatura de referencia y el factor de envejecimiento.

- Si $-200^{\circ}\text{F} \leq T_{\text{Operación}} - T_{\text{ref}} \leq 200^{\circ}\text{F}$ se puede determinar con la siguiente ecuación. En la figura 31 se muestra en comportamiento del K_{IC} en este rango.

$$K_{IC} = 33,2 + 2,806 \exp[0,02 (T_{\text{operación}} - T_{\text{ref}} + 100)]$$

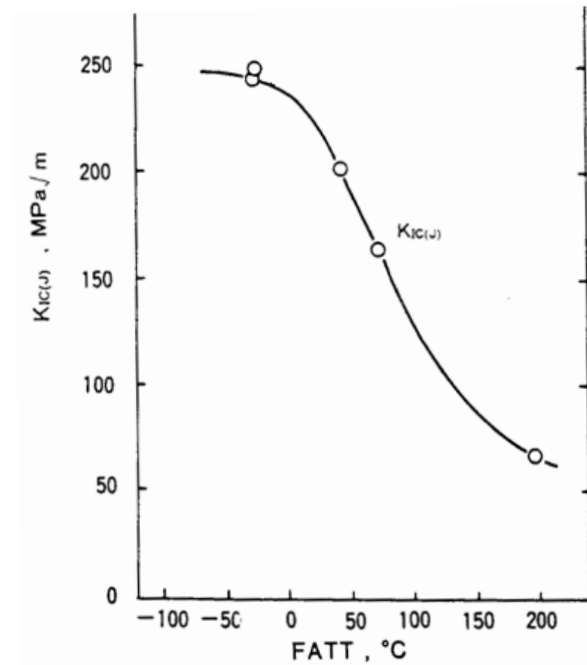
- Si $-200^{\circ}\text{F} > T_{\text{Operación}} - T_{\text{ref}}$ o $T_{\text{Operación}} - T_{\text{ref}} > 200^{\circ}\text{F}$ debe utilizarse la figura 32 para determinar el valor del K_{IC} .

Figura 31. Comportamiento de la pérdida de tenacidad



Fuente: Norma API 579 FFS.

Figura 32. Tendencia de la pérdida de tenacidad



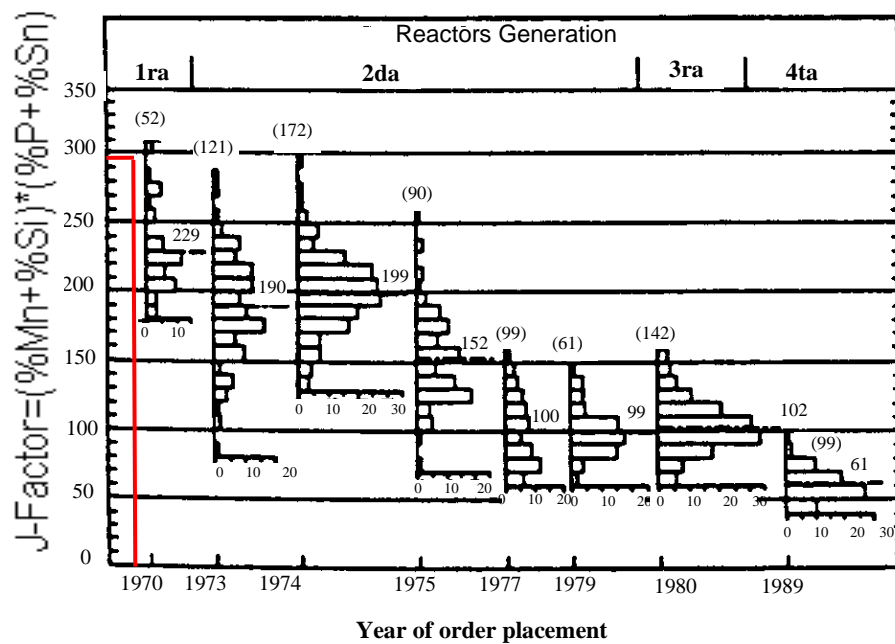
Fuente: Viswanathan R. Damage Mechanism and life assessment of high – temperature components.

Para determinar la temperatura de referencia que en este caso que es igual a la FATT; la cual es la temperatura de transición por aspecto de fractura; es necesario mirar el tiempo de trabajo del reactor, pues con el tiempo, el envejecimiento y el trabajo con hidrogeno logran que la temperatura de fragilización sea un parámetro crítico, esta temperatura es calculada con la siguiente ecuación, la cual depende del factor J.

$$FATT = -15,416 + 0,7267 J - 8.0043 \times 10^{-4} J^2$$

El parámetro J es un factor elasto-plástico, un factor de envejecimiento; el cual se determina con la figura 33. Este factor depende directamente del tiempo de operación del equipo, donde J es una temperatura y está en grados centígrados.

Figura 33. Factor de envejecimiento J



Fuente: Reactores de parafinas, ICP-ECOPETROL, 2002.

Lo que se analiza con este parámetro J es directamente la pérdida de tenacidad comparándolo con reactores que se fabricaron en esa misma época (generación). Teniendo en cuenta que el reactor de hidrotreatmento analizado en este proyecto es del año 1969, y para este año específicamente no está determinado el valor del J, en los cálculos se tomara un valor de 290°C. Con esta temperatura se calcula la temperatura de referencia.

$$FATT = -15,416 + 0,7267 J - 8.0043 \times 10^{-4} J^2$$

$$\rightarrow FATT = -15,416 + 0,7267(290) - 8.0043 \times 10^{-4} (290)^2$$

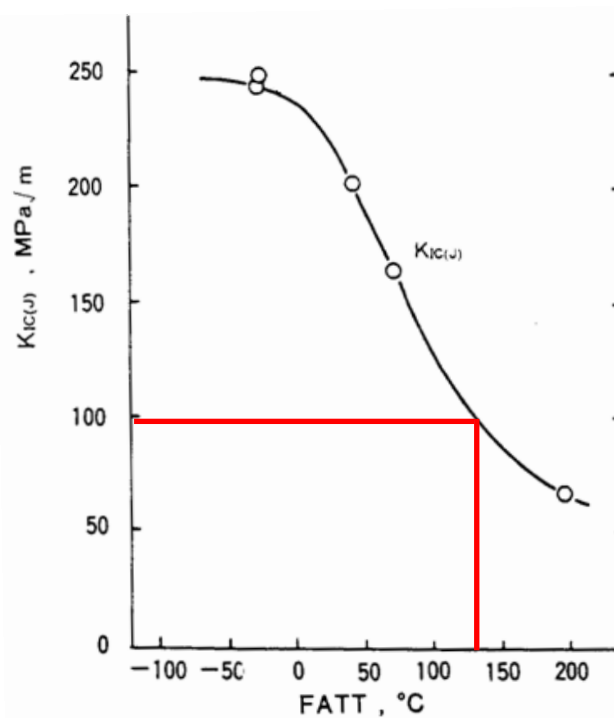
$$FATT = 128 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Con el valor de la temperatura de referencia o la FATT se puede determinar el valor de la tenacidad del material, para nuestro caso se debe entrar a la figura 32 para obtener el valor del K_{IC} ya que la diferencia de entre la temperatura de operación y la temperatura de referencia es mayor a 200 °F. Este proceso se muestra en la figura 34.

$$[T_{operaci\ n} - T_{ref}] = 600 - 128 = 472 \text{ } C \rightarrow 880 \text{ } F$$

De la grafica se puede determina que la tenacidad actual para el material del reactor es aproximadamente 98 Mpa√m. Equivalentes a 90.000 Psi √in aproximadamente. La curva de la grafica para determinar el K_{IC} es función únicamente de la FATT, es decir que no se tiene en cuenta la temperatura de operación del reactor.

Figura 34. Determinación de la tenacidad



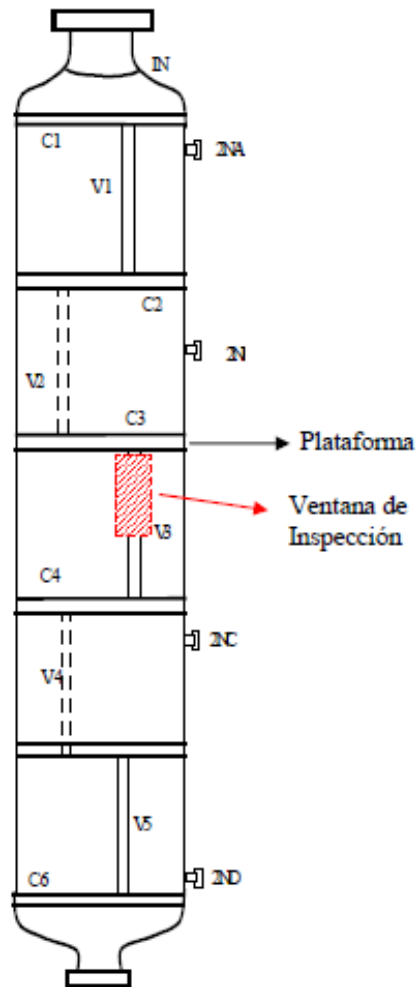
Fuente: Autor del proyecto, Viswanathan R. Damage Mechanism and life assessment of high – temperature components.

4.1.4 Paso 4

Determine las dimensiones de los defectos, de datos de inspección. El defecto debe ser clasificado.

Todos los datos de los defectos encontrados en el reactor se especialmente la ubicación y características de las grietas fueron tomados de una inspección por ultrasonido realizada por ICP-ECOPETROL, en la cual se detectaron tres defectos, los cuales se encuentran en la zona HAZ de la soldadura longitudinal del anillo 3 del reactor denominada V3, zona específica donde se realizó la inspección; esta zona se muestra en la figura 35.

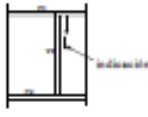
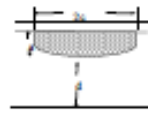

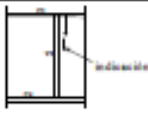
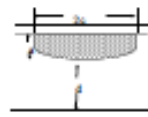

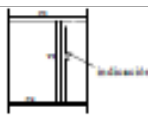
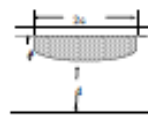

Figura 35. Zona crítica del reactor



Fuente: Inspección por ultrasonido reactor R-111B planta de parafinas; ICP-ECOPETROL.

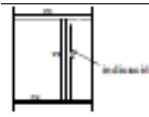
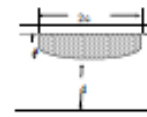

Los resultados de las dimensiones de las grietas encontradas en la inspección; el histórico de la ubicación y dimensiones de las grietas encontradas se enumeran a continuación, en las tablas 14, 15, 16; estos factores muestran una pauta para apreciar el crecimiento de las grietas en los últimos años. Las dimensiones especificadas en esta inspección son la profundidad (a), la longitud (2c) y la distancia al cordón de soldadura circunferencial (d).

Tabla 14. Dimensiones de las grietas Agosto 2005

SOLDADURA LONGITUDINAL V ₃ ANILLO 3								
UBICACIÓN		Dimensiones (mm)				lugar	esquema	
mm	esquema	d	a	2c	esquema			
1	620		74	16	380		Superficie interna metal base	
2	1320		77	13	170		Superficie interna metal base	
3	1260		78	12	920		Superficie interna metal base	

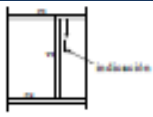
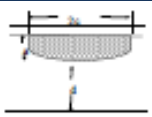
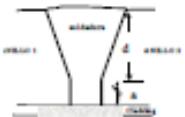
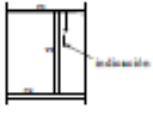
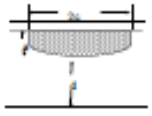
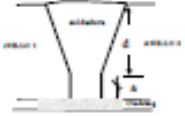
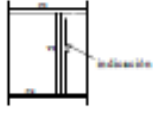
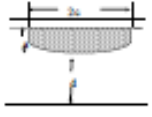
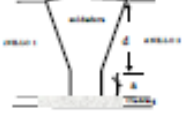
Fuente: Autor del proyecto, Inspección por ultrasonido reactor R-111B planta de parafinas; ICP-ECOPETROL.

Tabla 15. Dimensiones de las grietas Marzo 2007

SOLDADURA LONGITUDINAL V ₃ ANILLO 3								
UBICACIÓN		Dimensiones (mm)				lugar	esquema	
mm	esquema	d	a	2c	esquema			
3	1260		78	12	940		Superficie interna metal base	

Fuente: Autor del proyecto, Inspección por ultrasonido reactor R-111B planta de parafinas; ICP-ECOPETROL.

Tabla 16. Dimensiones de las grietas Octubre 2008

SOLDADURA LONGITUDINAL V ₃ ANILLO 3								
	UBICACIÓN		Dimensiones (mm)				lugar	esquema
	mm	esquema	d	a	2c	esquema		
1	620		74	16	380		Superficie interna metal base	
2	1320		77	13	170		Superficie interna metal base	
3	1260		70	20	940		Superficie interna metal base	

Fuente: Autor del proyecto, Inspección por ultrasonido reactor R-111B planta de parafinas; ICP-ECOPETROL.

Todos estos parámetros son fundamentales en el cálculo de los esfuerzos primarios y secundarios, los esfuerzos de referencia y los factores de intensidad de esfuerzos de las tres grietas presentes en el reactor de hidrot ratamiento y con esto realizar el análisis de aptitud para el servicio FFS para la criticidad de las grietas.

Para poder definir la clasificación de los diferentes defectos presentes en el reactor, es necesario tener en cuenta las características mostradas en la tabla 7, con base en estos datos todas las grietas encontradas son DEFECTOS SUPERFICIALES.

4.1.5 Paso 5

Modifique los esfuerzos principales, la tenacidad a la fractura y el tamaño del defecto con el uso de los factores de seguridad parciales (PSF).

Estos factores de seguridad se determinan bajo ciertas características, tal como se muestran en la tabla 17; y están predeterminados para cada parámetro.

Tabla 17. Factores de seguridad parciales

Probability Of Failure Category (2)	COV_s (3)	R_c (4)	$R_{ky} \leq R_c$ (5),(6)			$R_{ky} > R_c$ (5),(6)		
			PSF_s	PSF_k	PSF_a	PSF_s	PSF_k	PSF_a
$p_f = 2.3(10^{-2})$ ($\beta = 2.0$)	0.10	1.8	1.20	1.33	1.10	1.25	1.0	1.0
	0.20	1.3	1.40	1.54	1.10	1.50	1.0	1.0
	0.30	1.1	1.60	1.67	1.10	1.75	1.0	1.0
$p_f = 10^{-3}$ ($\beta = 3.09$)	0.10	1.9	1.40	1.67	1.15	1.50	1.0	1.0
	0.20	1.5	1.80	1.43	1.10	2.0	1.0	1.0
	0.30	1.3	2.30	1.43	1.10	2.50	1.0	1.0
$p_f = 10^{-6}$ ($\beta = 4.75$)	0.10	1.8	1.70	2.0	1.25	2.00	1.0	1.0
	0.20	1.5	2.60	1.82	1.25	3.10	1.0	1.0
	0.30	1.5	3.50	1.67	1.25	4.10	1.0	1.0

Fuente: Norma API 579 FFS.

Para determinar el tamaño de la grieta modificado depende directamente del tipo de grieta y se debe realizar de la siguiente manera:

Para grietas superficiales $\rightarrow a_{mod} = PSF_a \cdot a$

Para grietas embebidas y pasantes $\rightarrow 2a_{mod} = PSF_a \cdot 2a$

Para determinar la tenacidad modificada se debe aplicar el factor de seguridad de la siguiente manera:

$$K_{mod} = \frac{K}{PSF_k}$$

De igual manera para determinar los esfuerzos principales modificados, se debe aplicar el factor de seguridad así:

$$\sigma_{mod} = PSF_s \cdot \sigma$$

Para determinar el grupo de factores de seguridad a utilizar se deben tener en cuenta varios parámetros, como la probabilidad de falla p_f , la cual se debe a la fractura frágil inminente; este valor es pequeño una vez se ha demostrado que el recipiente a presión puede funcionar en un nivel máximo de líquido. Si cualquiera de los parámetros de operación varía, el servicio debe considerarse más severo y la probabilidad de fractura frágil mayor, ya que una variación sea disminución o aumento de los parámetros de operación puede generar un ambiente óptimo para la propagación de grietas y por tal razón una fractura frágil. Debido a que el reactor analizado trabaja con parámetros operacionales variables para los cálculos se toma el valor más alto, es decir $p_f = 2.3 (10^{-2})$.

El coeficiente de variación estándar COV es utilizado para definir la incertidumbre en la distribución de esfuerzos primarios, ya que el esfuerzo que se utilice en la evaluación debe estar basado en el valor promedio. Para los cálculos se tomara un $COV_s = 0,1$; pues los esfuerzos primarios en la región de la falla se pueden calcular o medir, es decir son un parámetro conocido.

El parámetro R_c es definido por la tabla al conocerse la probabilidad de falla y el coeficiente de variación estándar, para un p_f de $2.3 (10^{-2})$ y COV_s de $0,1$ el valor de R_c es de $1,8$; como se especifica en la tabla 17.

El factor R_{ky} es una relación de comparación, usado solamente para determinar los factores de seguridad parciales junto con el factor R_c y está definido por la siguiente ecuación:

$$R_{ky} = \frac{K_{mat}}{\sigma_{ys}} C_u$$

Donde C_u es un factor de conversión de unidades, cuando se trabaja en sistema ingles este factor es igual a 1, y si es sistema internacional el factor es 6,275. La tenacidad del material K_{mat} , es un parámetro conocido y σ_{ys} es el esfuerzo de fluencia del material.

$$R_{ky} = \frac{90.000}{45.000} (1) = 2$$

Para nuestros cálculos se tienen en cuenta los factores de la columna de la derecha en la tabla 17 porque al comparar los factores $R_{ky} > R_c$. Con todos los parámetros ya determinados se puede conocer los valores de los factores de seguridad.

$$PSF_s = 1.25$$

$$PSF_k = 1.0$$

$$PSF_a = 1.0$$

Solo son modificados los esfuerzos principales, en las tablas 18 y 19 se muestran los esfuerzos primarios y secundarios modificados, por los factores de seguridad PSF_s .

Tabla 18. Esfuerzos primarios modificados

	Dimensión (in)		Esfuerzos Modificados (Psi)			
	a	Radio critico	radial	tangencial	circunferencial	axial
1	0,63	24,63	1.362,17	13.222,9	13.294	5.930,36
2	0,51	24,51	1.432,51	13.293,35	13.370,3	5.930,36
3	0,78	24,78	1.269,8	13.130,53	13.191,8	5.930,36

Fuente: autor del proyecto.

Tabla 19. Esfuerzos secundarios modificados

	Dimensión (in)		Temperatura crítica	Esfuerzos (Psi)			
	a	Radio critico		radial	tangencial	circunferencial	axial
1	0,63	24,63	599,82	72,25	2.039,2	2.040,44	2.108,75
2	0,51	24,51	599,85	50	1.915,5	1.916,25	1.964,14
3	0,78	24,78	599,78	98,63	2.101,96	2.104,28	2.200,56

Fuente: autor del proyecto.

4.1.6 Paso 6

Calcule los esfuerzos primarios de referencia, σ_{ref}^p , basado en la distribución de esfuerzos modificados en el PASO 5.

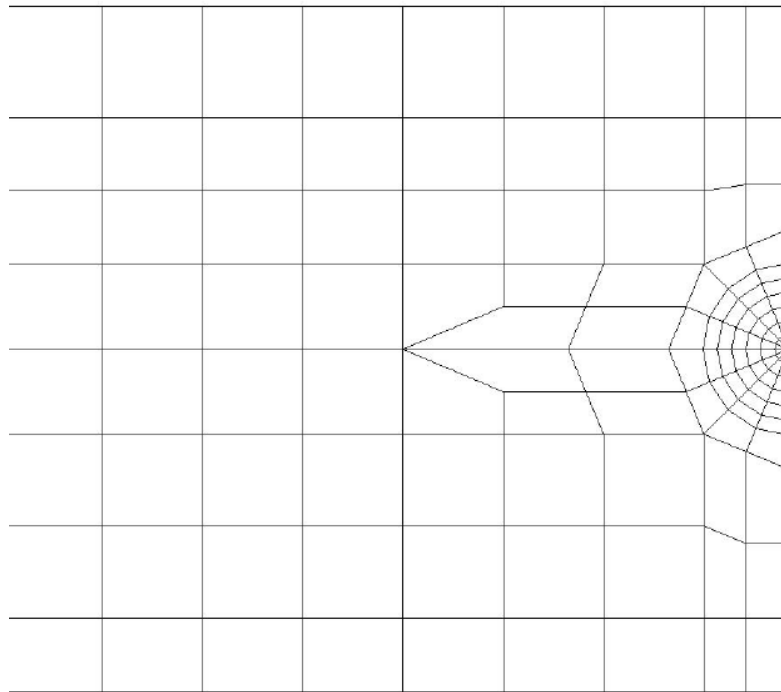
Este parámetro es una combinación de esfuerzos usada para calcular la relación de carga, para recipientes con presión interna se utiliza la ecuación 5.10 del anexo D de la norma API 579 FFS, que se muestra a continuación.

$$\sigma_{ref}^P = \frac{gP_b + \sqrt{(gP_b)^2 + 9(M_s P_m (1 - \alpha)^2)^2}}{3(1 - \alpha)^2}$$

Los factores P_m y P_b ; son esfuerzos de membrana y de pandeo calculados con base a las distribuciones de esfuerzos determinadas anteriormente.

Los factores g , M_t , M_s y α ; son factores geométricos para aproximar la distribución de esfuerzos en la punta de la grieta a lo que se presenta en la realidad. Mirando el entorno de una grieta también presenta una variación natural la cual puede ser aproximada con estos factores, en la figura 36 se puede ver la variación en la distribución por causa de un defecto, con esto comprender el papel que juegan estos factores geométricos.

Figura 36. Variación de elementos por presencia de una grieta



Fuente: Norma API 579 FFS.

Para determinar los esfuerzos primarios de referencia es necesario calcular los esfuerzos de membrana y pandeo; al igual que los parámetros geométricos para lo cual se utilizan las ecuaciones especificadas en el anexo D.

$$\alpha = \frac{a/t}{1 + t/c} \qquad g = 1 - 20 \left(\frac{a}{2c} \right)^{0,75} \alpha^3$$

$$M_s = \frac{1}{1 - a/t + a/t \left(\frac{1}{M_t} \right)} \qquad \lambda = \frac{1,818 c}{\sqrt{a r_i}}$$

$$M_t = \sqrt{\left(\frac{1,02 + 0,4411 \lambda^2 + 0,006124 \lambda^4}{1 + 0,02642 \lambda^2 + [1,533 \times 10^{-6}] \lambda^4} \right)}$$

$$P_b = \sigma_a \left[\frac{t}{r_i} - \frac{3}{2} \left(\frac{t}{r_i} \right)^2 + \frac{9}{5} \left(\frac{t}{r_i} \right)^3 \right]$$

Los esfuerzos de membrana están definidos como la tensión media que actúa sobre la sección transversal del recipiente cilíndrico. Para el cálculo analítico del reactor de hidrotreatment se consideran condiciones críticas, por esta razón se toma el esfuerzo de membrana como el esfuerzo circunferencial total calculado en el paso 1, siguiendo con la recomendación de la norma.

Para la **grieta 1**, se realizan los cálculos para determinar los esfuerzos de pandeo y membrana; los factores geométricos necesarios como se muestra a continuación, para determinar los esfuerzos de referencia.

$$\alpha = \frac{a/t}{1 + t/c} \quad \rightarrow \quad \alpha = \frac{0,63/3,3125}{1 + 3,3125/7,48}$$

$$\alpha = 0,13$$

$$g = 1 - 20 \left(\frac{a}{2c} \right)^{0,75} \alpha^3 \quad \rightarrow \quad g = 1 - 20 \left(\frac{0,63}{14,96} \right)^{0,75} (0,13)^3$$

$$g = 0,9957$$

$$\lambda = \frac{1,818 c}{\sqrt{a r_i}} \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{1,818 (7,48)}{\sqrt{(0,63)(24)}}$$

$$\lambda = 3,497$$

$$M_t = \sqrt{\left(\frac{1,02 + 0,4411 \lambda^2 + 0,006124 \lambda^4}{1 + 0,02642 \lambda^2 + [1,533 \times 10^{-6}] \lambda^4} \right)}$$

$$\rightarrow M_t = \sqrt{\left(\frac{1,02 + 0,4411 [3,497]^2 + 0,006124 [3,497]^4}{1 + 0,02642 [3,497]^2 + [1,533 \times 10^{-6}] [3,497]^4} \right)}$$

$$M_t = 2,35354$$

$$M_s = \frac{1}{1 - a/t + a/t \left(1/M_t\right)}$$

$$M_s = \frac{1}{1 - \left(0,63/3,3125\right) + \left(0,63/3,3125\right) \left(1/2,35354\right)}$$

$$M_s = 1,1228$$

Para calcular el esfuerzo de referencia primario, el esfuerzo de membrana es un parámetro conocido ya que es igual a los esfuerzos circunferenciales primarios calculados; el esfuerzos de pandeo es determinado a continuación.

$$P_m = \sigma_c \quad \rightarrow \quad P_m = 13.294$$

$$P_b = \sigma_a \left[\frac{t}{r_i} - \frac{3}{2} \left(\frac{t}{r_i}\right)^2 + \frac{9}{5} \left(\frac{t}{r_i}\right)^3 \right]$$

$$\rightarrow P_b = 5.930,36 \left[\frac{3,3125}{24} - \frac{3}{2} \left(\frac{3,3125}{24}\right)^2 + \frac{9}{5} \left(\frac{3,3125}{24}\right)^3 \right]$$

$$P_b = 677,2 \text{ Psi}$$

Remplazando estos parámetros en la ecuación y calculando el esfuerzo de referencia primarios para la grieta 1.

$$\sigma_{ref}^P = \frac{gP_b + \sqrt{(gP_b)^2 + 9(M_s P_m (1 - \alpha)^2)^2}}{3(1 - \alpha)^2}$$

$$\rightarrow \sigma_{ref}^P = \frac{(0,99)(677,2) + \sqrt{[(0,99)(677,2)]^2 + 9[(1,122)(13.294)(1 - 0,13)^2]^2}}{3(1 - 0,13)^2}$$

$$\sigma_{ref}^P = 15.218,434 \text{ Psi}$$

Todo este procedimiento de cálculo para determinar los parámetros geométricos, esfuerzos de pandeo y membrana; al igual que el esfuerzo de referencia primario se realizaron para las tres grietas y los resultados de los cálculos se muestran en la tabla 20.

Tabla 20. Esfuerzos de referencia primarios

	a (in)	α	g	λ	M_t	M_s	P_b (Psi)	P_m (Psi)	Esfuerzos primarios de referencia σ_{ref}^P (Psi)
1	0,63	0,13	0,99	3,49	2,35	1,122	677,12	13.294	15.218,434
2	0,51	0,07	0,99	1,74	1,5	1,053	677,12	13.370,3	14.341,8
3	0,78	0,19	0,99	7,77	4,38	1,222	677,12	13.191,8	16.464,977

Fuente: autor del proyecto.

4.1.7 Paso 7

Calcule la relación de carga o la abscisa de la FAD con el esfuerzo primario de referencia del PASO 6 y el límite elástico del PASO 3.

Para calcular este parámetro se utiliza la ecuación

$$L_{ref}^P = \frac{\sigma_{ref}^P}{\sigma_{ys}}$$

El límite elástico del material puede variar al cambiar la temperatura de trabajo, para nuestro caso se tomara que es el valor para la temperatura ambiente ya que todos los otros parámetros se han tomado en su punto más crítico. El cálculo para la **grieta 1**:

$$L_{ref}^P = \frac{\sigma_{ref}^P}{\sigma_{ys}} \quad \rightarrow \quad L_{ref}^P = \frac{15.218,434}{45.000}$$

$$L_{ref}^P = 0,34$$

Se realizo este cálculo para las tres grietas y los resultados se muestran en la tabla 21.

Tabla 21. Relación de carga

	Esfuerzos primarios de referencia σ_{ref}^P (Psi)	Proporción de carga L_r^P
1	15.218,434	0,34
2	14.341,8	0,32
3	16.464,977	0,37

Fuente: autor del proyecto.

4.1.8 Paso 8

Calcule la intensidad de esfuerzos atribuida a las cargas primarias K_I^P , usando la distribución de esfuerzos primarios modificada y el tamaño del defecto modificado del PASO 5.

Este proceso depende directamente de la distribución de esfuerzos analizada en el cálculo de esfuerzos primarios y la ubicación y geometría de la grieta. Es directamente proporcional a la carga; y a continuación se muestra la ecuación a utilizar para el cálculo de la intensidad de esfuerzos, según el anexo C ecuación 5.10 de la norma API 579 FFS.

$$K_I^P = \sigma_a \left[2G_0 - 2G_1 \left(\frac{a}{r_i} \right) \right] \cdot \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

Los factores G_0 y G_1 , de esta ecuación son factores adimensionales geométricos que dependen únicamente de las especificaciones de las grietas y se calculan con las siguientes ecuaciones.

$$G_0 = A_{0,0} + A_{1,0}\beta + A_{2,0}\beta^2 + A_{3,0}\beta^3 + A_{4,0}\beta^4 + A_{5,0}\beta^5 + A_{6,0}\beta^6$$

$$G_1 = A_{0,1} + A_{1,1}\beta + A_{2,1}\beta^2 + A_{3,1}\beta^3 + A_{4,1}\beta^4 + A_{5,1}\beta^5 + A_{6,1}\beta^6$$

Donde los parámetros $A_{i,j}$ también son factores que dependen del espesor del recipiente y las dimensiones de los defectos, son seleccionados de tablas y las necesarias para los cálculos del reactor de hidrotreatmento son mostradas en la tabla 22.

El factor β es el ángulo donde se presentan los esfuerzos máximos en la grieta, para la geometría seleccionada, es decir para grietas semielípticas se presenta justo en el centro del defecto. Este factor se determina con las especificaciones del anexo C, con la siguiente ecuación.

$$\beta = 2 \varphi / \pi$$

Estos análisis son realizados para una grieta semielíptica con un ángulo de esfuerzos máximo igual a $\pi/2$. Por tal razón para las tres grietas del reactor el parámetro $\beta = 1$.

El factor Q también depende de las dimensiones de la grieta y sus características; se determina teniendo en cuenta las siguientes restricciones.

$$Q = 1 + 1,464 (a/c)^{1,65} \quad \text{Para valores } a/c \leq 1$$

$$Q = 1 + 1,464 (c/a)^{1,65} \quad \text{Para valores } a/c > 1$$

Analizando los tres defectos del reactor, todos cumplen $a/c < 1$. Y este parámetro para la **grieta 1** es calculado a continuación.

$$Q = 1 + 1,464 (a/c)^{1,65} \quad \rightarrow \quad Q = 1 + 1,464 (16/190)^{1,65}$$

$$Q = 1,02438$$

Tabla 22. Coeficientes de Influencia para una grieta superficial

t/R_1	a/c	a/t	G_1	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0.05	0.5	0	G_0	0.8776607	-0.6729719	3.7721411	-6.5209060	6.3377934	-3.7028038	0.9872447
			G_1	0.1277541	0.4368502	0.4904522	1.0427434	-2.9631236	2.0826525	-0.5184313
		0.2	G_0	0.8998006	-1.1008716	6.7949974	-16.008148	20.985635	-14.692497	4.2008852
			G_1	0.1482707	0.1526809	2.2809119	-4.6071223	5.8286426	-4.5922291	1.4712639
		0.4	G_0	0.9875950	-0.6604200	2.5904420	-0.9060400	-4.6843400	6.1350420	-2.3065200
			G_1	0.1703150	0.3037660	1.2129670	-0.7351300	-0.9145500	0.9993630	-0.3136400
		0.6	G_0	1.1535210	-1.0846600	3.8853140	-2.6803400	-4.3200500	7.2246270	-2.9408900
			G_1	0.2189650	0.1820740	1.4974930	-1.0467100	-0.7825700	1.0459000	-0.3613100
		0.8	G_0	1.3387940	-1.3846800	4.5947460	-4.6182500	-0.8155300	3.8499650	-1.6650000
			G_1	0.2704200	0.0863940	1.7356660	-1.5215400	-0.1070200	0.5843010	-0.2509500
0.05	1	0	G_0	1.1977992	-0.5244870	0.1498299	2.3284866	-5.1058499	4.3469049	-1.3487980
			G_1	0.1870117	0.6987352	0.1316900	0.7289255	-2.5259384	2.1756251	-0.6540458
		0.2	G_0	1.2091906	-1.2119075	5.0112782	-13.553361	21.141961	-17.036849	5.4856225
			G_1	0.2131357	0.1842366	3.2319216	-9.0396511	13.389696	-10.704130	3.4528991
		0.4	G_0	1.2822800	-0.9719500	1.8928700	-1.1442300	-1.7988400	3.1176240	-1.3148300
			G_1	0.2313746	0.1294187	3.4578251	-9.7497871	14.680574	-11.902752	3.8908182
		0.6	G_0	1.3703740	-1.1028000	1.7930470	-0.4916100	-2.7326500	3.6494690	-1.4011700
			G_1	0.2379550	0.5278330	0.6693230	-0.2931400	-1.5654000	1.8255750	-0.6478900
		0.8	G_0	1.4740600	-1.2903000	1.9333060	-0.7538900	-1.8525600	2.4833110	-0.8912300
			G_1	0.2620950	0.4999820	0.6688010	-0.3352900	-1.2212800	1.3934660	-0.4801300
0.05	2	0	G_0	0.8150546	-0.5623828	1.4465771	-4.6778133	8.4192164	-7.9025932	2.9866351
			G_1	0.1359146	0.0702340	3.5558581	-11.034445	16.967724	-14.126991	4.8706612
		0.2	G_0	0.8405900	-0.9828964	3.9783944	-11.929139	19.232361	-16.107076	5.4985318
			G_1	0.1401448	0.0460755	3.3846820	-10.137821	15.107048	-12.328596	4.2110577
		0.4	G_0	0.8204618	-0.2806825	-0.8637066	3.6013842	-6.4111767	5.0203080	-1.3749797
			G_1	0.1422434	0.0527995	3.3104268	-9.9190612	14.794871	-12.107982	4.1496887
		0.6	G_0	0.8457322	-0.3595145	-0.6426755	3.1612151	-5.9385710	4.7719679	-1.3235536
			G_1	0.1488396	0.0406125	3.3249114	-9.9017635	14.712096	-12.020216	4.1204818
		0.8	G_0	0.8946607	-0.9436510	2.9530039	-8.0365810	12.297855	-10.128340	3.4958489
			G_1	0.1434305	0.2331398	2.0104442	-5.6212616	7.5252202	-5.9911091	2.1206547
0.1	0.03125	0	G_0	0.1965046	2.9373464	-5.2582823	7.4889153	-6.9282667	3.3673349	-0.6677966
			G_1	0.0051780	0.1750280	2.7718680	-4.6457154	4.6780502	-3.2768090	0.9840994
		0.2	G_0	0.2144509	2.4711734	-1.2860189	-3.9437101	10.258246	-9.4874515	3.0628400
			G_1	0.0080221	0.2380830	2.4576921	-3.7039504	3.6653669	-2.8375154	0.9161589
		0.4	G_0	0.2362020	3.0232830	-3.3746300	2.6514220	4.2891070	-8.6980100	3.7198100
			G_1	0.0103150	0.3971020	1.6371740	-0.4826500	-0.6416000	-0.1376700	0.1653300
		0.6	G_0	0.2803270	3.5106810	-4.3633000	9.2831770	-2.7203100	-7.4474300	4.2735200
			G_1	0.0176640	0.6383120	0.3362480	4.6736560	-7.0299900	3.3065000	-0.6400000
		0.8	G_0	0.4108450	2.7858000	7.1999900	-24.966400	63.838540	-72.490500	27.635600
			G_1	0.0459140	0.6441140	1.8109850	0.1500500	5.6303710	-11.329200	4.9191600
0.1	0.0625	0	G_0	0.2695332	2.1626001	-1.6551569	-1.2970208	4.5604304	-4.3163876	1.4010655
			G_1	0.0138667	0.1827458	2.5749608	-3.9044679	3.3556301	-2.1772209	0.6420134
		0.2	G_0	0.2852801	2.0623971	-0.9452314	-1.7155871	3.4690201	-2.5845398	0.6675616
			G_1	0.0195666	0.2161881	2.5579251	-4.2119758	4.4980423	-3.4714625	1.1164625
		0.4	G_0	0.3294820	2.5547280	-2.2095000	1.8316820	0.5378940	-2.4428800	1.0694100
			G_1	0.0290130	0.4029930	1.6912760	-0.7784700	-0.9590600	0.6513490	-0.1510800
		0.6	G_0	0.4058800	3.3662220	-5.1482900	13.513450	-16.655100	8.6671530	-1.7293500
			G_1	0.0569260	0.4451650	2.3945360	-2.9719000	4.1328030	-4.5775200	1.6727700
		0.8	G_0	0.5908720	3.5314460	-0.6929200	3.3140250	-0.2495400	-7.1101300	4.1118800
			G_1	0.1004430	0.7134420	1.8363740	0.1930190	-0.5388500	-1.7508700	0.9917100

Continuación tabla 22

t/R_1	a/c	a/t	G_1	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0.1	0.125	0	G_0	0.4065238	0.7772483	3.8861644	-12.573943	16.760207	-11.014593	2.8708957
			G_1	0.0320270	0.1825342	2.2670449	-2.7076615	1.2088194	-0.3777430	0.0763155
		0.2	G_0	0.4138525	1.1243780	1.7964950	-6.5013714	8.2843111	-5.2897626	1.3521056
			G_1	0.0488254	0.0124168	3.9238498	-9.1173502	12.630693	-9.8176804	3.0170051
		0.4	G_0	0.4900830	1.5797060	0.2456910	-1.4169300	0.1330550	1.0979610	-0.6544400
			G_1	0.0625190	0.3795970	1.5007820	-0.2215400	-2.5534400	2.4056210	-0.7613400
		0.6	G_0	0.6383460	1.8896790	0.1654880	0.1405470	-2.8887800	3.1374330	-1.1431800
			G_1	0.1078790	0.4418080	1.8093490	-1.0600900	-0.9104200	0.7835470	-0.1968000
		0.8	G_0	0.9106040	1.6778320	4.1741310	-7.6274100	2.6957210	2.3283330	-1.6172500
			G_1	0.1827830	0.5316620	2.0011150	-0.7238700	-2.5544000	2.7998200	-1.0318900
0.1	0.25	0	G_0	0.6152816	-0.3348894	6.2955620	-15.590618	19.299508	-12.488107	3.3010035
			G_1	0.0703566	0.2828152	1.4036169	-0.6511596	-1.2076596	1.0318656	-0.2423741
		0.2	G_0	0.6221458	-0.2652412	7.1236921	-20.415683	28.691172	-20.391119	5.7567350
			G_1	0.0893032	0.1771452	2.4437349	-4.8273884	5.9604631	-4.5972261	1.4308564
		0.4	G_0	0.7269240	0.0331400	4.0541080	-7.6758800	5.6254770	-1.1588100	-0.3180200
			G_1	0.1141390	0.2282720	1.9094300	-2.0571800	0.7745000	-0.3425200	0.1223300
		0.6	G_0	0.9136940	-0.1128200	4.7770370	-7.7684000	3.1756140	2.1324410	-1.6080500
			G_1	0.1690410	0.2367980	1.7775820	-0.9219600	-1.8420100	2.1429690	-0.7348900
		0.8	G_0	1.2285610	-1.3887200	13.423440	-33.608900	42.330360	-27.500000	7.2734400
			G_1	0.2605760	-0.1180300	4.1243640	-7.6919700	8.0993900	-4.9636300	1.2276300
0.1	0.5	0	G_0	0.8776607	-0.6729719	3.7721411	-6.5209060	6.3377934	-3.7028038	0.9872447
			G_1	0.1277541	0.4368502	0.4904522	1.0427434	-2.9631236	2.0826525	-0.5184313
		0.2	G_0	0.8939439	-1.0523498	6.4920812	-15.138217	19.688676	-13.725026	3.9161703
			G_1	0.1471464	0.1576874	2.2477033	-4.5209327	5.7119515	-4.5121924	1.4494557
		0.4	G_0	0.9797560	-0.6583400	2.5905960	-0.9807000	-4.5022900	5.9676820	-2.2512600
			G_1	0.1683280	0.3025050	1.2065640	-0.7030600	-0.9925300	1.0836790	-0.3460700
		0.6	G_0	1.1399170	-1.0507000	3.7096220	-2.2768200	-4.7650200	7.4625310	-2.9908600
			G_1	0.2156530	0.1890000	1.4447400	-0.8854600	-1.0301700	1.2393260	-0.4219800
		0.8	G_0	1.3104950	-1.0667900	2.8675320	-0.6020200	-5.1697700	6.1071010	-2.1308200
			G_1	0.2673520	0.1194700	1.5170160	-0.8642000	-1.0371700	1.2474400	-0.4452900
0.1	1	0	G_0	1.1977992	-0.5244870	0.1498299	2.3284866	-5.1058499	4.3469049	-1.3487980
			G_1	0.1870117	0.6987352	0.1316900	0.7269255	-2.5259384	2.1756251	-0.6540458
		0.2	G_0	1.2047909	-1.2012348	4.9676187	-13.426779	20.945504	-16.887172	5.4412264
			G_1	0.2119663	0.1873102	3.2105329	-8.9636386	13.261943	-10.603790	3.4231621
		0.4	G_0	1.2697440	-0.9183700	1.6384390	-0.4675200	-2.7367600	3.7616560	-1.4871500
			G_1	0.2313746	0.1294187	3.4578251	-9.7497871	14.680574	-11.902752	3.8908182
		0.6	G_0	1.3563790	-1.1020000	1.8638360	-0.5992700	-2.7466300	3.7780850	-1.4700900
			G_1	0.2338370	0.5347500	0.6371980	-0.1619900	-1.8137100	2.0426640	-0.7195100
		0.8	G_0	1.4582970	-1.3079100	2.2328620	-1.6002400	-0.6409600	1.6167600	-0.6502600
			G_1	0.2583450	0.5028090	0.6746630	-0.2815000	-1.3831100	1.5504100	-0.5408600
0.1	2	0	G_0	0.8150546	-0.5623828	1.4465771	-4.6778133	8.4192164	-7.9025932	2.9866351
			G_1	0.1359146	0.0702340	3.5558581	-11.034445	16.967724	-14.126991	4.8706612
		0.2	G_0	0.8389023	-0.9910827	4.0593253	-12.185366	19.630219	-16.411826	5.5902596
			G_1	0.1391760	0.0538372	3.3380006	-9.9908862	14.871100	-12.143930	4.1552336
		0.4	G_0	0.8168007	-0.2921048	-0.7346646	3.2014916	-5.8126583	4.5798416	-1.2477748
			G_1	0.1412816	0.0503688	3.3380869	-10.010705	14.949170	-12.238855	4.1935739
		0.6	G_0	0.8387058	-0.3482355	-0.6184382	3.0476208	-5.7528210	4.6253567	-1.2780857
			G_1	0.1473521	0.0388746	3.3532681	-9.9888648	14.848958	-12.132523	4.1580679
		0.8	G_0	0.8878357	-0.9627154	3.2133021	-8.8604927	13.568698	-11.103565	3.7915359
			G_1	0.1419379	0.2284659	2.0631482	-5.7641990	7.7262423	-6.1414207	2.1673189

Fuente: Norma API 579 FFS.

Con la determinación de estos parámetros se pueden determinar los primeros coeficientes de influencia. Los cálculos para grieta 1.

$$G_0 = A_{0,0} + A_{1,0}\beta + A_{2,0}\beta^2 + A_{3,0}\beta^3 + A_{4,0}\beta^4 + A_{5,0}\beta^5 + A_{6,0}\beta^6$$

$$\rightarrow G_0 = 0,285 + 2,062 - 0,95 - 1,716 + 3,469 - 2,585 + 0,667$$

$$G_0 = 1,232$$

$$G_1 = A_{0,1} + A_{1,1}\beta + A_{2,1}\beta^2 + A_{3,1}\beta^3 + A_{4,1}\beta^4 + A_{5,1}\beta^5 + A_{6,1}\beta^6$$

$$\rightarrow G_1 = 0,0196 + 0,2162 + 2,558 - 4,211 + 4,496 - 3,471 + 1,1165$$

$$G_1 = 0,7243$$

Conociendo todos los factores necesarios se calcula la intensidad de esfuerzos primarios.

$$K_I^P = \sigma_a \left[2G_0 - 2G_1 \left(\frac{a}{r_i} \right) \right] \cdot \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

$$\rightarrow K_I^P = 5.693,15 \left[2(1,232) - 2(0,7243) \left(\frac{0,63}{24} \right) \right] \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot 0,63}{1,02438}}$$

$$K_I^P = 19.197,89 \text{ Psi } \sqrt{\text{in}}$$

Este procedimiento se realizo para las tres grietas y los resultados se muestran a continuacion en la tabla 23.

Tabla 23. Intensidad de esfuerzos por cargas primarias

	a (mm)	a (in)	Q	G ₀	G ₁	Factor de Intensidad de esfuerzos por cargas primarias K ₁ ^P (Psi/in)
1	16	0,63	1,02438	1,232	0,7243	19.197,89
2	13	0,51	1,066	1,167	0,697	16.083,763
3	20	0,78	1,008	1,287	0,744	22.418,99

Fuente: autor del proyecto.

4.1.9 Paso 9

Calcule la distribución de esfuerzos secundarios y residuales σ_{ref}^{SR} , usando las distribuciones de esfuerzos secundarios y residuales del PASO 2, el tamaño de defecto modificado del PASO 5

Este parámetro al igual que los esfuerzos de referencia primarios es una relación de esfuerzos. Esta combinación de esfuerzos es usada para calcular la relación de carga secundaria, para distribución de esfuerzos por presión interna se utilizo la ecuación 5.10; para otras distribuciones conocidas se utiliza la ecuación 5.11 del anexo D de la norma API 579 FFS.

Para el cálculo de este parámetro es necesario tener en cuenta los esfuerzos térmicos y los esfuerzos residuales determinados anteriormente.

Los esfuerzos de referencia por esfuerzos secundarios y residuales se determina con una ecuación similar a la que se utilizo para el cálculo de los esfuerzos de referencia primarios, pero teniendo en cuenta la variación en los esfuerzos de membrana y de pandeo.

$$\sigma_{ref}^{SR} = \frac{gP_b + \sqrt{(gP_b)^2 + 9(M_t P_m (1 - \alpha)^2)^2}}{3(1 - \alpha)^2}$$

Los factores P_m y P_b ; son esfuerzos de membrana y de pandeo secundarios y residuales calculados con base a las distribuciones de esfuerzos térmicas y a las consideraciones para los esfuerzos residuales determinadas en el paso 2.

Los factores g , M_t , M_s y α ; como ya se menciona en el paso 6; son factores geométricos para aproximar la distribución de esfuerzos en la punta de la grieta y alrededor de la grieta a la realidad. Para los esfuerzos de referencia secundarios estos parámetros tiene el mismo valor que para los primarios ya que depende únicamente de los factores geométricos de la grieta.

Los cálculos para determinar el esfuerzo de pandeo secundario para la **grieta 1** y los esfuerzos de membrana secundarios y residuales.

$$P_b = \sigma_a \left[\frac{t}{r_i} - \frac{3}{2} \left(\frac{t}{r_i} \right)^2 + \frac{9}{5} \left(\frac{t}{r_i} \right)^3 \right]$$

$$\rightarrow P_b = 2.108,75 \left[\frac{3,3125}{24} - \frac{3}{2} \left(\frac{3,3125}{24} \right)^2 + \frac{9}{5} \left(\frac{3,3125}{24} \right)^3 \right]$$

$$P_b = 240,77 \text{ Psi}$$

$$P_m = \sigma_{Tc} + \sigma_r \quad \rightarrow \quad P_m = 2.040,44 + 11.000$$

$$P_m = 13.040,44$$

Remplazando los parámetros geométricos, los esfuerzos de pandeo y membrana calculados para determinar el esfuerzo de referencia secundario para la grieta 1.

$$\sigma_{ref}^{SR} = \frac{gP_b + \sqrt{(gP_b)^2 + 9(M_t P_m (1 - \alpha)^2)^2}}{3(1 - \alpha)^2}$$

$$\rightarrow \sigma_{ref}^{SR} = \frac{(0,99)(240,7) + \sqrt{[(0,99)(240,7)]^2 + 9[(1,122)(13.040)(1 - 0,13)^2]^2}}{3(1 - 0,13)^2}$$

$$\sigma_{ref}^{SR} = 14.739,91 \text{ Psi}$$

Este procedimiento de cálculo de los esfuerzos de pandeo, membrana secundario y residual; al igual que el esfuerzo de referencia secundario se realizaron para todas las grietas y los resultados se muestran en la tabla 24.

Tabla 24. Esfuerzos de referencia secundarios

	a	α	g	λ	M_t	M_s	Esfuerzos residuales	Esfuerzos secundarios		Esfuerzos secundarios de referencia σ_{ref}^{SR}
							P_m (Psi)	P_b (Psi)	P_m (Psi)	
1	0,63	0,13	0,99	3,49	2,35	1,122	11.000	240,7	2.040,44	14.739,91
2	0,51	0,07	0,99	1,74	1,5	1,053	11.000	224,2	1.916,25	13.687,32
3	0,78	0,19	0,99	7,77	4,38	1,222	11.000	251,2	2.104,28	16.140,42

Fuente: autor del proyecto.

4.1.10 Paso 10

Calcule la intensidad de esfuerzos producidos por los esfuerzos secundarios y residuales, basados en las distribuciones de esfuerzos modificadas, K_I^{SR} ; el valor de K_I^{SR} , si $K_I^{SR} \leq 0$ entonces $K_I^{SR} = 0$; de lo contrario debe determinarse en el mismo lugar donde se determino el K_I^P .

Este factor como su nombre lo indica es la intensidad de esfuerzos en la grieta causados por los esfuerzos secundarios, su cálculo directamente de la distribución de esfuerzos secundarios analizada anteriormente. A continuación se muestra la ecuación para este cálculo, según el anexo C ecuación 5.11 de la norma API 579 FFS.

$$K_I^{SR} = G_o (Q_{Tm} + Q_{rm}) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

El valor del coeficiente de influencia G_o , y el factor Q se determinan de la misma manera que para los calculados de intensidad de esfuerzos por cargas primarias.

Los esfuerzos Q_{Tm} y Q_{rm} , son producidos por las cargas térmicas y residuales como se calculo en el paso 9. Para la **grieta 1**:

$$K_I^{SR} = G_o (Q_{Tm} + Q_{rm}) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

$$\rightarrow K_I^{SR} = (1,232)(2.040,44 + 11.000) \sqrt{\frac{\pi \cdot 0,63}{1,02438}}$$

$$K_I^{SR} = 22.331,5$$

Este procedimiento se realizo para las tres grietas y los resultados se muestran en la tabla 25.

Tabla 25. Intensidad de esfuerzos por cargas secundarias

	a (mm)	a (in)	Q	Q _{Tm}	Q _{rm}	G ₀	Intensidad de esfuerzos por cargas secundarias K ^{SR} ₁ (Psi/in)
1	16	0,63	1,0243	2.040,44	11.000	1,232	22.331,5
2	13	0,51	1,066	1.916,25	11.000	1,167	18.479,44
3	20	0,78	1,008	2.104,28	11.000	1,287	26.295,6

Fuente: autor del proyecto.

4.1.11 Paso 11

Calcule el factor de interacción plástica Φ . Si $K_1^{SR} = 0$ entonces $\phi = 1$, de lo contrario calcule el valor con L_r^{SR} con los esfuerzos secundarios del paso 9 y el limite elástico del paso 3. Con este valor determine el del factor de interacción plástica.

Este factor de interacción plástica se presenta en los metales debido a la variación de esfuerzos a la que se expone la punta de la grieta, ocasionando que se presente una zona plástica que restringe el crecimiento de la grieta, este fenómeno se muestra en la figura 37. Este parámetro se determina con la siguiente ecuación:

$$\phi = \phi_o \left(1 + \psi/\phi \right)$$

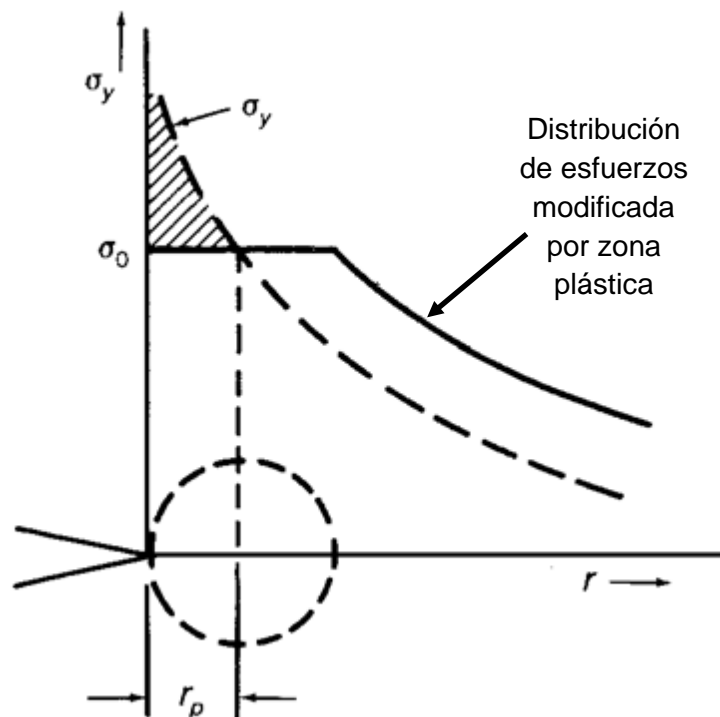
Los factores ϕ y ψ son seleccionados de las tablas 26 y 27 respectivamente; y dependen de la relación de cargas primarias y secundarias; las cuales dependen de los esfuerzos de referencia.

El factor Φ_0 tiene restricciones, depende únicamente de la relación de carga secundaria.

$$\phi_0 = 1 \quad \text{SI } 0 < L_r^{SR} \leq 4$$

$$\phi_0 = \frac{K_{IP}^{SR}}{K_I^{SR}} \quad \text{SI } L_r^{SR} > 4$$

Figura 37. Aproximación de la zona plástica



Fuente: Dieter George. Mechanical Metallurgy, Cap 11.

La relación de carga secundaria L_{ref}^{SR} se determina de la forma como se cálculo la relación de carga primaria en el paso 7. Este parámetro es necesario para seleccionar los factores de interacción plástica, el cálculo para la grieta 1.

$$L_{ref}^{SR} = \frac{\sigma_{ref}^{SR}}{\sigma_{ys}} \quad \rightarrow \quad L_{ref}^{SR} = \frac{14.739,91}{45.000}$$

$$L_{ref}^{SR} = 0,33$$

Tabla 26. Factor ψ de interacción plasticidad

ψ											
L_r^p	L_r^{SR}										
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	≥ 5.0
0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	0.0	0.020	0.043	0.063	0.074	0.081	0.086	0.090	0.095	0.100	0.107
0.2	0.0	0.028	0.052	0.076	0.091	0.100	0.107	0.113	0.120	0.127	0.137
0.3	0.0	0.033	0.057	0.085	0.102	0.114	0.122	0.130	0.138	0.147	0.160
0.4	0.0	0.037	0.064	0.094	0.113	0.126	0.136	0.145	0.156	0.167	0.180
0.5	0.0	0.043	0.074	0.105	0.124	0.138	0.149	0.160	0.172	0.185	0.201
0.6	0.0	0.051	0.085	0.114	0.133	0.147	0.159	0.170	0.184	0.200	0.215
0.7	0.0	0.058	0.091	0.117	0.134	0.147	0.158	0.171	0.186	0.202	0.214
0.8	0.0	0.057	0.085	0.105	0.119	0.130	0.141	0.155	0.169	0.182	0.190
0.9	0.0	0.043	0.060	0.073	0.082	0.090	0.101	0.113	0.123	0.129	0.132
1.0	0.0	0.016	0.019	0.022	0.025	0.031	0.039	0.043	0.044	0.041	0.033
1.1	0.0	-0.013	-0.025	-0.033	-0.036	-0.037	-0.042	-0.050	-0.061	-0.073	-0.084
1.2	0.0	-0.034	-0.058	-0.075	-0.090	-0.106	-0.122	-0.137	-0.151	-0.164	-0.175
1.3	0.0	-0.043	-0.075	-0.102	-0.126	-0.147	-0.166	-0.181	-0.196	-0.209	-0.220
1.4	0.0	-0.044	-0.080	-0.109	-0.134	-0.155	-0.173	-0.189	-0.203	-0.215	-0.227
1.5	0.0	-0.041	-0.075	-0.103	-0.127	-0.147	-0.164	-0.180	-0.194	-0.206	-0.217
1.6	0.0	-0.037	-0.069	-0.095	-0.117	-0.136	-0.153	-0.168	-0.181	-0.194	-0.205
1.7	0.0	-0.033	-0.062	-0.086	-0.107	-0.125	-0.141	-0.155	-0.168	-0.180	-0.191
1.8	0.0	-0.030	-0.055	-0.077	-0.097	-0.114	-0.129	-0.142	-0.155	-0.166	-0.177
1.9	0.0	-0.026	-0.049	-0.069	-0.086	-0.102	-0.116	-0.129	-0.141	-0.154	-0.162
≥ 2.0	0.0	-0.023	-0.043	-0.061	-0.076	-0.091	-0.104	-0.116	-0.126	-0.137	-0.146

Fuente: Norma API 579 FFS.

Tabla 27. Factor ϕ de interacción plasticidad

ϕ											
L_r^p	L_r^{SR}										
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	≥ 5.0
0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
0.1	0.0	0.815	0.869	0.877	0.880	0.882	0.883	0.883	0.882	0.879	0.874
0.2	0.0	0.690	0.786	0.810	0.821	0.828	0.832	0.833	0.833	0.831	0.825
0.3	0.0	0.596	0.715	0.752	0.769	0.780	0.786	0.789	0.789	0.787	0.780
0.4	0.0	0.521	0.651	0.696	0.718	0.732	0.740	0.744	0.745	0.743	0.735
0.5	0.0	0.457	0.589	0.640	0.666	0.683	0.693	0.698	0.698	0.695	0.688
0.6	0.0	0.399	0.528	0.582	0.612	0.631	0.642	0.647	0.648	0.644	0.638
0.7	0.0	0.344	0.466	0.522	0.554	0.575	0.587	0.593	0.593	0.589	0.587
0.8	0.0	0.290	0.403	0.460	0.493	0.516	0.528	0.533	0.534	0.534	0.535
0.9	0.0	0.236	0.339	0.395	0.430	0.452	0.464	0.470	0.475	0.480	0.486
1.0	0.0	0.185	0.276	0.330	0.364	0.386	0.400	0.411	0.423	0.435	0.449
1.1	0.0	0.139	0.218	0.269	0.302	0.326	0.347	0.367	0.387	0.406	0.423
1.2	0.0	0.104	0.172	0.219	0.256	0.287	0.315	0.340	0.362	0.382	0.399
1.3	0.0	0.082	0.142	0.190	0.229	0.263	0.291	0.316	0.338	0.357	0.375
1.4	0.0	0.070	0.126	0.171	0.209	0.241	0.269	0.293	0.314	0.333	0.350
1.5	0.0	0.062	0.112	0.155	0.190	0.220	0.247	0.270	0.290	0.309	0.325
1.6	0.0	0.055	0.100	0.139	0.172	0.200	0.225	0.247	0.267	0.285	0.301
1.7	0.0	0.048	0.089	0.124	0.154	0.181	0.204	0.224	0.243	0.260	0.276
1.8	0.0	0.042	0.078	0.110	0.137	0.161	0.183	0.202	0.220	0.236	0.250
1.9	0.0	0.036	0.068	0.096	0.120	0.142	0.162	0.180	0.196	0.211	0.225
≥ 2.0	0.0	0.031	0.058	0.083	0.104	0.124	0.141	0.170	0.172	0.186	0.198

Fuente: Norma API 579 FFS.

Al determinarse el valor de los parámetros ψ y ϕ , se puede realizar el cálculo para el factor de interacción plástica, para la grieta 1:

$$\phi = 1 + \psi/\phi \quad \rightarrow \quad \phi = 1 + 0,02575/0,428$$

$$\phi = 1,06$$

El procedimiento de selección de los factores ψ y ϕ , el cálculo para determinar la relación de carga secundaria L_r^{SR} y la determinación del factor de interacción plástica Φ , se realizó para las tres grietas y los resultados se muestran en la tabla 28.

Tabla 28. Factor de interacción plástica

	Esfuerzos secundarios de referencia σ_{ref}^{SR}	Relación de carga secundaria L_r^{SR}	Relación de carga primaria L_r^P	ψ	ϕ	Φ
1	14.739,91	0,33	0,37	0,025	0,42	1,06
2	13.687,32	0,3	0,35	0,021	0,33	1,062
3	16.140,42	0,36	0,4	0,026	0,36	1,071

Fuente: autor del proyecto.

4.1.12 Paso 12

Determine la relación de tenacidad u ordenada del diagrama FAD, usando la intensidad de esfuerzos atribuida a las cargas primarias K_I^P , calculadas en el paso 8; la intensidad de esfuerzos atribuida a las cargas secundarias y esfuerzos residuales K_I^{SR} , del paso 10 y el factor de interacción plástica del paso 11.

Esta relación de tenacidad determinarse con el K_{MAT} , que es la tenacidad ideal del material, pero lo óptimo es que se calcule con el K_{IC} , este es un factor de pérdida de tenacidad del material por envejecimiento, o con el K_{IR} que es un factor por envejecimiento por trabajo con hidrogeno.

En el caso del reactor de hidrotratamiento se tiene una pérdida de tenacidad por envejecimiento, por tal razón se utilizara para los cálculos el factor K_{IC} , para la relación de tenacidad, la cual se determina con la siguiente ecuación.

$$K_r = \frac{K_I^P + \Phi K_I^{SR}}{K_{IC}}$$

Como todos los parámetros necesarios para determinar la relación de tenacidades ya fueron calculados, para la **grieta 1**:

$$K_r = \frac{K_I^P + \Phi K_I^{SR}}{K_{IC}} \rightarrow K_r = \frac{19.197,89 + (1,06)(22.331,5)}{90.000}$$

$$K_r = 0,476$$

Este cálculo se realizo para las tres grietas del reactor y los resultados se muestran en la tabla 29.

Tabla 29. Relación de tenacidad

	Intensidad de esfuerzos por cargas primarias K_I^P	Intensidad de esfuerzos por cargas secundarias K_I^{SR}	Φ	K_r
1	19.197,89	22.331,5	1,06	0,476
2	16.083,763	18.479,44	1,062	0,4
3	22.418,99	26.295,6	1,071	0,562

Fuente: autor del proyecto.

4.1.13 Paso 13

Evaluar los resultados, el punto de evaluación del diagrama FAD para el tamaño del defecto actual y las condiciones de funcionamiento.

Conociendo los parámetros necesarios se evalúa la condición de las tres grietas en el diagrama FAD. En la tabla 30 se muestra el resumen de la relación de tenacidades y proporción de carga, calculadas para las tres grietas.

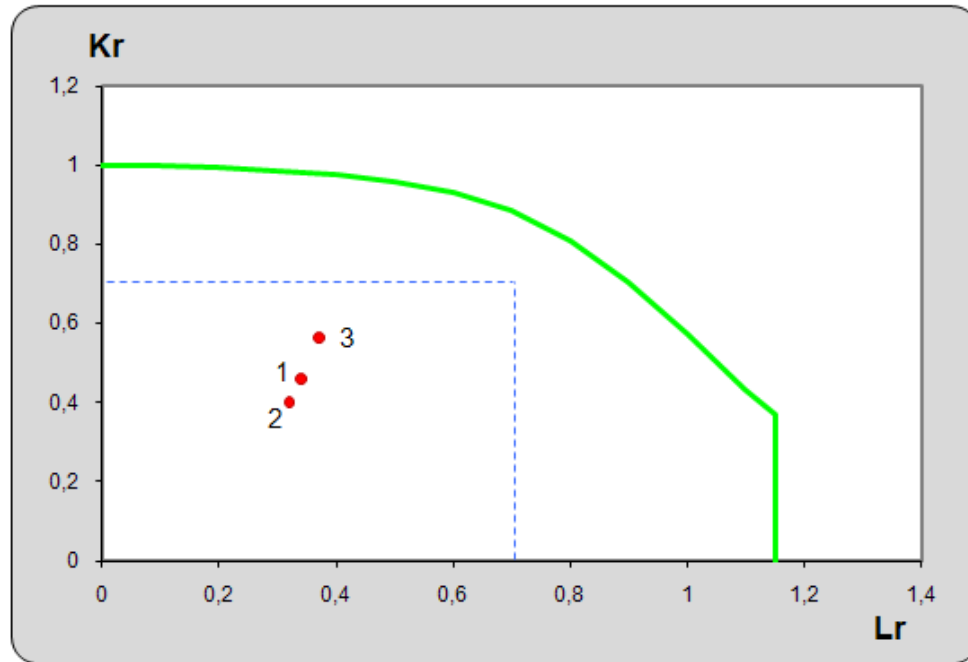
Tabla 30. Relación de carga y de tenacidades

	Relación de tenacidades K_r	Relación de carga L_r^P
1	0,476	0,34
2	0,4	0,32
3	0,562	0,37

Fuente: autor del proyecto.

En la figura 38 se muestran los puntos de evaluación de las tres grietas presentes en el reactor de hidrotreatmento analizado en el diagrama FAD. Este diagrama está definido por zonas; la curva principal (línea verde) demarca la zona permisible para todo tipo de defectos; dentro de esta zona se considera que las fallas o defectos no presentaran falla catastrófica; fuera se presentan varias zonas importantes, como la de colapso plástico, fractura frágil y efecto combinado; identificadas anteriormente en la figura 23. Dentro de la curva hay una zona demarcada (rectángulo), que se consideran más conservativa, ya que puede tomarse como un nivel II.

Figura 38. Diagrama de evaluación de falla para el reactor de hidrot ratamiento



Fuente: autor del proyecto.

De los tres defectos analizados en este proceso analítico, ninguna de las tres grietas está fuera del rango seguro de operación, podría decirse que el defecto de mayor cuidado es la grieta 3, ya que es la que está más cerca al límite de la zona de trabajo seguro; durante los cálculos de la evaluación esta grieta siempre presento los valores más altos debido a su longitud ya que si comparamos las dimensiones de esta grieta con las otras dos hay una diferencia considerable, pero aun así no es un defecto crítico, bajo estas condiciones de operación.

Al comparar esta evaluación con la obtenida anteriormente sin esfuerzos secundarios en la figura 27, se observa una variación en los rangos de operación de las grietas. Siendo el análisis con esfuerzos secundarios un poco más severo, aunque se confirma que las tres grietas están en un rango de operación seguro, por tal razón se espera que el equipo opere sin mayores inconvenientes.

4.2 ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN

Después de analizar la criticidad de las grietas es importante mirar cómo será su comportamiento durante el tiempo de operación del reactor de hidrotreatmento; para determinar la velocidad de propagación de un defecto es necesario conocer su estado y el del equipo; es decir el valor de la tenacidad del material, el valor de la distribución de esfuerzos, la clase de defecto, las dimensiones del defecto, entre otras.

Normalmente el crecimiento de los defectos se presenta cuando los esfuerzos en la punta de la grieta son cercanos al límite elástico del material, es por esta razón que algunos autores muestran la temperatura como un parámetro fundamental; uno de los métodos más utilizados para determinar la velocidad de propagación es la ecuación de París.

$$\frac{da}{dN} = C K_I^m$$

Donde:

C y m: son constantes relacionadas directamente con el material.

da/dN: es la velocidad de propagación.

K_I: es el factor de intensidad de esfuerzos.

De igual manera que la tenacidad del material; específicamente esta no es una forma exacta de calcular la velocidad de propagación ya que las constantes de la relación son experimentales, pero estudios realizados evalúan estas constantes para diferentes escenarios entre ellos los reactores de hidrotreatmento, trabajo a altas temperaturas, trabajo con hidrogeno, trabajo a bajas temperaturas para aceros al cromo-molibdeno.

Tomando las recomendaciones para el cálculo de propagación de grietas superficiales y usando las ecuaciones recomendadas por la norma en el anexo F, los parámetros que se deben utilizar para la relación de la velocidad de propagación sería:

$$\frac{da}{dN} = (2,85 \times 10^{-25}) \Delta K_I^{11,7}$$

Antes de calcular la velocidad de propagación es de gran importancia determinar si se presenta crecimiento, ya que solo cuando hay una intensidad de esfuerzos cercana al valor de la tenacidad del material se presenta propagación de los defectos. Para lo cual debe cumplirse

$$K_{th} < \Delta K_I < K_{IC}$$

Donde:

K_{th} : es el factor de intensidad de esfuerzos umbral, definido por la norma con la ecuación mostrada a continuación.

K_{IC} : es la tenacidad del material.

ΔK_I : es el factor de intensidad de esfuerzos totales ($K_I^P + \Phi K_I^{SR}$).

$$K_{th} = \frac{0,0014 FATT^2 - 0,421 FATT + 57}{1,0988}$$

Determinando el umbral para el reactor de hidrot ratamiento

$$\rightarrow K_{th} = \frac{0,0014 (128)^2 - 0,421 (128) + 57}{1,0988}$$

$$K_{th} = 23,7 \text{ Ksi } \sqrt{in} \quad \rightarrow \quad K_{th} = 23.700 \text{ Psi } \sqrt{in}$$

Dado que se cumple la condición pues la intensidad de esfuerzos de todas las grietas es mayor a 23.000 Psi $\sqrt{\text{in}}$, es posible calcular la velocidad de propagación de las grietas; donde la intensidad de tensiones esta en Ksi $\sqrt{\text{in}}$ y la velocidad de propagación (da/dN) está en in/hora. Para la **grieta 1**:

$$\frac{da}{dN} = (2,85 \times 10^{-25}) \Delta K_I^{11,7} \quad \rightarrow \quad \frac{da}{dN} = (2,85 \times 10^{-25}) (42,87)^{11,7}$$

$$\frac{da}{dN} = 3,56 \times 10^{-6} \text{ in/hora} \quad \rightarrow \quad \frac{da}{dN} = 0,0312 \text{ in/año}$$

Este procedimiento se realizo para las tres grietas y los resultados se muestran en la tabla 31.

Tabla 31. Velocidad de propagación

	ΔK_I (Ksi $\sqrt{\text{in}}$)	Velocidad de propagación da/dN (in/año)	Velocidad de propagación da/dN (mm/año)
1	42,87	0,0312	0,8
2	35,709	$3,67 \times 10^{-3}$	0,1
3	47,71	0,2158	5,48

Fuente: autor del proyecto.

Los tres defectos analizados se consideran seguros; la grieta 2 tiene una velocidad de propagación muy baja, ya que en 10 años crecería solo 1 mm. La grieta 1 tiene un comportamiento un poco diferente, pero su crecimiento sería máximo 8 mm en 10 años. La grieta 3 a diferencia de las otras dos tiene una velocidad de propagación considerable, de 5,48 mm por año.

Este valor se vería modificado año a año ya que la grieta 3 aumentaría sus dimensiones de manera considerable, por esta razón la intensidad de esfuerzos aumentaría y es posible que esta grieta tenga un crecimiento mayor a los 55 mm en 10 años; por sus dimensiones esta es la grieta mas critica del reactor de hidrotratamiento.

4.3 PROGRAMACIÓN Y OPTIMIZACIÓN

Actualmente las herramientas computacionales como los programas de cálculo, facilitan los análisis industriales; permiten resolver numerosos problemas aplicados y muestran los resultados de manera analítica y gráfica. La industria ha sido una promotora en este tipo de avances, ya que maneja procesos complejos.

Después de analizar el estado de los defectos presentes en el reactor de hidrotratamiento, se puede observar que el proceso analítico es complejo, lo que da posibilidad a errores involuntarios por causa del análisis tan extenso.

Para facilitar estos procedimientos y evitar errores no deseados, se implemento la programación, con lo cual se establece el procedimiento adecuado y necesario para estos análisis; el programa realiza todos los cálculos, determinando todos los parámetros requeridos de una manera más segura y precisa.

En la figura 39 se muestra la pantalla de inicio del programa realizado, la cual facilita el ingreso de los datos necesarios para el cálculo para evitar errores; ya que todas las variables de inicio están definidas con sus respectivas unidades.

Para el proyecto se trabajo en Matlab, un programa muy utilizado actualmente y de lenguaje no tan complejo; con el cual se realizo una metodología practica para el procedimiento de análisis de criticidad, estableciendo los trece (13) pasos recomendados por la norma de una manera secuencial.

Figura 39. Pantalla principal análisis de criticidad de grietas superficiales internas semielípticas en recipientes a presión interna de pared gruesa

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ICP - ECOPETROL

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS ESFUERZOS SECUNDARIOS EN LA PROPAGACION DE GRIETAS EN UN REACTOR DE HIDROTRATAMIENTO ENVEJECIDO EN SERVICIO

JULIANA MARGARITA GUTIERREZ GOMEZ DIRECTOR: ING OMAR GELVEZ
ING EDWING MORANTES

AÑO (DEL 69 AL 2004)

CONDUCTIVIDAD DEL MATERIAL
 $K_m =$ W/m°C

COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA
 $\alpha =$ 1/°F

RADIO INTERNO
 $r_i =$ in

RADIO EXTERNO
 $r_e =$ in

ENVEJECIMIENTO POR HIDROGENO
 K_{Ir}

ENVEJECIMIENTO POR REVENIDO
 K_{Ic}

GENERACION (DE 1 A 5)

TEMPERATURA INTERNA
 $T_i =$ °C

MODULO DE YOUNG
 $E =$ Psi

FACTOR DE SEGURIDAD DE ESFUERZOS
 $PSF_s =$

PROFUNDIDAD DE GRIETA
 $a =$ in

MODULO DE POISSON
 $\mu =$

FACTOR DE SEGURIDAD DE PROFUNDIDAD
 $PSF_a =$

LONGITUD DE GRIETA
 $2c =$ in

PRESION
 $P =$ Psi

ESFUERZO DE FLUENCIA
 $\sigma_y =$ Psi

FACTOR DE SEGURIDAD DE TENCIDAD
 $PSF_k =$

TEMPERATURA AMBIENTE
 $T_a =$ °C

ANALISIS DE GRIETAS SUPERFICIALES INTERNAS SEMIELIPTICAS EN RECIPIENTES A PRESION DE PARED GRUESA

Fuente: autor del proyecto.

Este programa está definido únicamente para grietas superficiales internas semielípticas en recipientes a presión interna de pared gruesa, ya que si varía cualquiera de las especificaciones las ecuaciones de cálculo también cambian y el programa solo está planificado para la configuración mencionada.

Todas las líneas del programa principal realizado para este análisis están definidas en el anexo A, el cual es simplificado con la ayuda de subprogramas que realizan operaciones mucho más pequeñas y sencillas; con esto evitar la saturación del programa.

5. ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DE LA CRITICIDAD DE LAS GRIETAS CON BASE EN LA SIMULACIÓN DEL REACTOR DE HIDROTRATAMIENTO ENVEJECIDO EN SERVICIO

Las tecnologías actuales muestran nuevos procesos para evaluar equipos con discontinuidades o defectos como las grietas presentes en el reactor de hidrotreatmento; con los procedimientos planteados en este proyecto se busca analizar todos los parámetros influyentes en conjunto y no condicionar las soluciones a características específicas, como se ha venido realizando en los cálculos analíticos.

En este capítulo el proceso de evaluación para el reactor de hidrotreatmento se realizara con base en nuevos procesos de cálculo como la simulación y análisis de elementos finitos; pero siguiendo la misma línea del proceso analítico realizado; para lo cual se determinaron características específicas de trabajo del reactor, en las cuales su condición es severa, en base a las parámetros operaciones obtenidos del histórico de operación.

Con el cálculo analítico se determino que los esfuerzos secundarios tienen un papel muy importante en propagación de grietas ya que los defectos que se consideraban seguros están trabajando en condiciones más rigurosas, además todos los defectos tiene un estado más severo al calculado sin esfuerzos térmicos. Ahora con la simulación se desea simplificar aun mas estos cálculos incluyendo también los esfuerzos secundarios como parámetro importante en el cálculo de análisis de criticidad de grietas.

También se desea proponer una metodología práctica aplicable a otros tipos de recipientes a presión, los cuales también son de interés para la industria petrolera ya que todos los equipos no tienen las mismas dimensiones ni operan bajo las mismas características.

5.1 CONDICIONES INICIALES Y MODELAMIENTO DEL REACTOR DE HIDROTRATAMIENTO

Para iniciar con el proceso de evaluación es necesario conocer ciertos parámetros como las condiciones de operación, dimensiones del reactor y de las grietas, los detalles de los defectos presentes y las propiedades del material del reactor de hidrotratamiento. Todos son factores conocidos y necesarios para la evaluación FFS.

Como ya se menciona, el reactor de hidrotratamiento está en funcionamiento desde el año 1969, las condiciones de temperatura y presión para este análisis se tomaron del histórico de operación del mes de junio de 2008. Para el análisis en trabajo estable se tomaron los valores máximos para tener un escenario crítico, aunque no es el estado más crítico del reactor; para este análisis se tendrá en cuenta la presión hidrostática, la cual no es tenida en cuenta en el proceso analítico, pues se considera mínima, al igual que los esfuerzos residuales por overlay, comparandolas con los esfuerzos primarios. Pero en estos procesos de simulación algunos parámetros son más fáciles de incluir y por esta razón la carga del reactor se tendrá en cuenta; con una gravedad específica de 0,85.

Para el estado transitorio (apagadas y encendidas) los parámetros operacionales críticos se consideran teóricamente como los puntos de mayor presión y menor temperatura pero en este proyecto se analizaran a partir de la simulación del reactor en estado transitorio; con el fin analizar valores de presión y temperatura que generen condiciones severas para el reactor; los parámetros operacionales utilizados para los dos estados se muestran en la tabla 32.

Tabla 32. Condiciones operacionales del reactor de hidrot ratamiento

Estado estable				
minutos	T_{entrada}	T_{salida}	ΔT	P
3600	619,813965	632,054749	12,2407837	1399,48291
7200	623,553284	643,011536	19,458252	1396,19165
10800	630,088013	641,006165	10,9181519	1399,88928
14400	635,764343	648,667969	12,9036255	1399,98022
18000	640,433105	657,014771	16,581665	1400,25745
21600	645,10083	665,361572	20,2607422	1399,92578
25200	649,768433	671,378955	21,6105225	1399,80383
28800	653,136169	673,091187	19,9550171	1399,9646
32400	653,435181	674,285889	20,850708	1400,03235
36000	653,691943	675,59082	21,898877	1400,46387
39600	652,677856	671,226685	18,5488281	1400,90466
43200	643,943054	657,741577	13,7985229	1400,39526
46800	634,958252	642,510559	7,55230713	1399,49646
50400	629,670532	641,093933	11,4234009	1399,80176
54000	630,597412	640,212158	9,61474609	1399,78125
57600	631,62323	639,330444	7,70721436	1399,68848
61200	632,649048	638,44873	5,79968262	1399,87817
64800	633,674805	637,566956	3,89215088	1400,59705
68400	634,700562	636,685242	1,98468018	1399,93298
72000	635,749756	636,465027	0,715271	1400,08997
75600	639,026489	650,982727	11,9562378	1399,52527
79200	643,767151	657,79657	14,0294189	1399,74561
82800	648,507813	668,167175	19,6593628	1400,17822
86400	653,248535	672,054199	18,8056641	1399,43921

Continuación tabla 32

Estado transitorio					
Enfriamiento (apagada)			Calentamiento (encendida)		
minutos	T	P	minutos	T	P
60	623,707153	1394,57043	60	25,0304337	-
120	556,864868	1319,67395	120	184,709778	-
180	500,796722	1219,65332	180	189,9534	-
240	466,024506	1115,42688	240	302,947052	15,4529619
300	442,908508	1012,07159	300	583,525574	56,9415436
360	423,31012	909,895142	360	595,091431	113,437111
420	403,711761	816,584839	420	594,589294	261,154358
480	375,597626	717,90271	480	593,584961	487,12384
540	295,971191	609,378906	540	593,082764	501,533722
600	251,131302	497,32962	600	592,580627	504,086639
660	218,863724	351,606598	660	591,885193	501,794769
720	195,669922	236,062759	720	590,877319	500,510742
780	172,477325	158,45607	780	589,865234	498,822937
840	150,283768	104,074715	840	588,853027	500,40506
900	139,732071	69,4181061	900	587,840942	500,123779
960	132,51857	47,3959274	960	586,828735	504,324799
1020	125,305069	33,7220612	1020	585,504395	499,442688
1080	118,09156	23,3082542	1080	583,820129	499,414063
1140	110,878052	17,5616646	1140	582,135742	506,093231
1200	105,888802	11,9666519	1200	583,650391	565,462463
1260	103,141144	8,99071789	1260	588,244324	685,348328
1320	100,393494	7,73603821	1320	591,221069	780,585632
1380	97,6458435	6,48135853	1380	592,800537	887,833069
1440	94,8981934	5,22667933	1440	594,379944	991,958008
1500	92,1505356	3,97199965	1500	595,959412	1083,34583
1560	89,4028854	3,17153792	1560	597,521362	1199,74316
1620	86,6690292	3,12881584	1620	597,536255	1320,31213
1680	85,8072205	3,09376236	1680	596,550232	1391,61377
1740	86,2642059	3,01083994	1740	595,564209	1400,21228
1800	86,7211761	2,89675763	1800	594,578247	1400,09412
1860	87,1781616	2,65098476	1860	593,592163	1399,3335

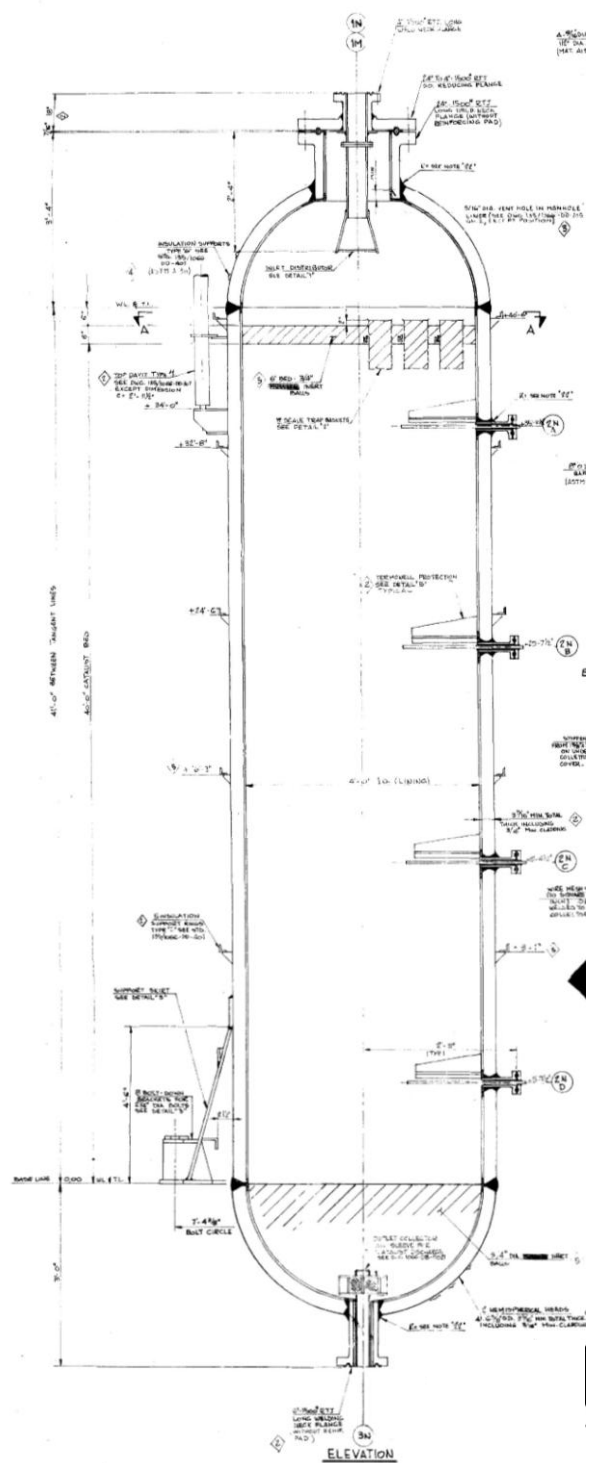
Fuente: autor del proyecto, datos de presión y temperatura ICP-ECOPETROL.

Se modelo el reactor en SolidWors, tomando las condiciones y medidas del plano de construcción original el cual se muestra en la figura 40. El reactor de hidrotratamiento fue modelado con sus dimensiones reales, las cuales no han sido modificadas desde su construcción; con el modelamiento realizado se pueden generar nuevos planos del reactor para facilitar procedimientos posteriores a esta investigación, ya que el único plano existente del reactor no está en las mejores condiciones.

El reactor de hidrotratamiento analizado está compuesto por 5 anillos de igual longitud, con cordones de soldadura circunferenciales y longitudinales en cada uno de los anillos, y dos tapas semiesféricas, con bridas soldadas para la entrada y salida del hidrocarburo. El anillo donde se presentan todos los defectos es el anillo del centro denominado el anillo tres, cerca al cordón de soldadura longitudinal de este anillo denominada V_3 ; el reactor modelado con todos sus componentes y el anillo de interés se muestran en la figura 41; todas las dimensiones del reactor fueron mostradas en la figura 28, para realizar el cálculo de criticidad.

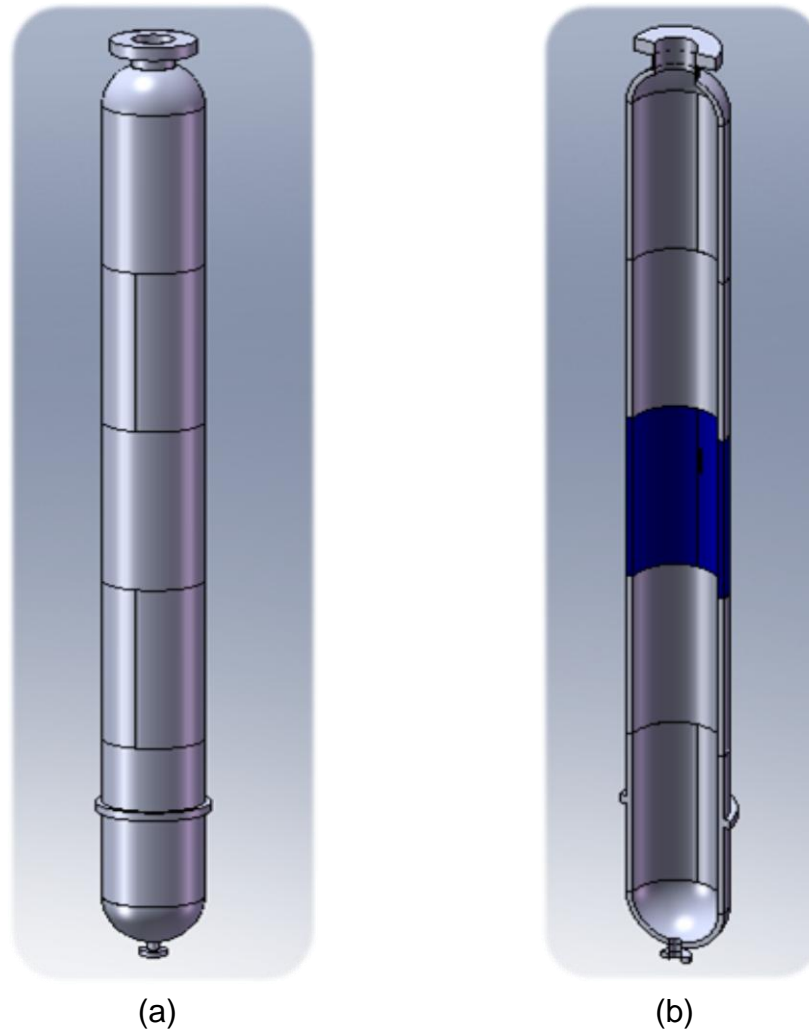
Para el cálculo analítico únicamente se tomaron las tres grietas de manera independiente y se analizaron, para la simulación también se realizo el análisis de manera individual, pero para evaluar otros criterios se realizo un modelamiento de las tres grietas en conjunto, para determinar el estado de esfuerzos reales sobre el reactor ya que el comportamiento de los esfuerzos varía en cada grieta, pero el conjunto de grietas es el escenario real y su distribución de esfuerzos es muy diferente a la generada por un solo defecto. En el cálculo analítico por recomendación de la norma API 579 FFS no se considero las interacciones entre los defectos y lo que se desea ver en la simulación es si se genera alguna interaccion.

Figura 40. Plano de construcción del reactor



Fuente: ICP-ECOPETROL.

Figura 41. Modelamiento reactor de hidrot ratamiento



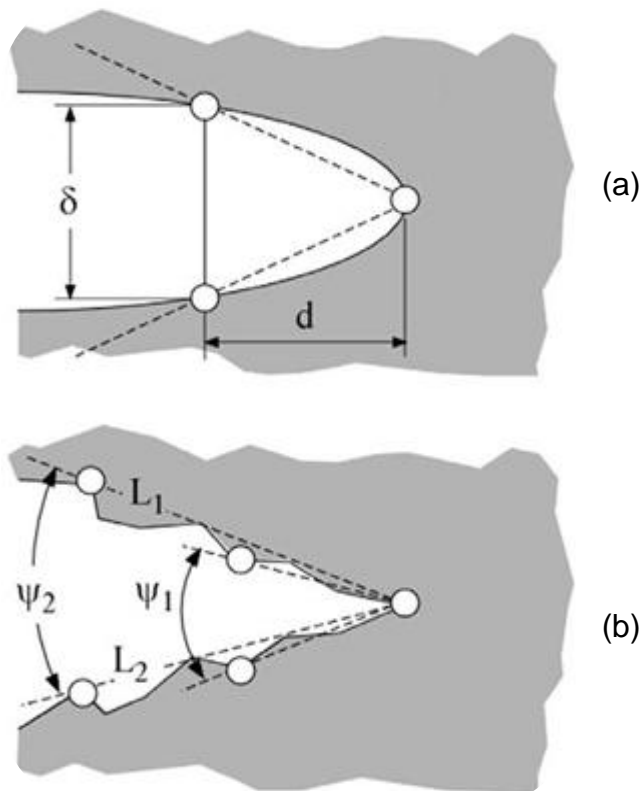
(a) Reactor de hidrot ratamiento modelado. (b) sección del reactor, anillo 3.

Fuente: autor del proyecto, SolidWorks 2007.

De igual manera que en el cálculo analítico se tomaron los datos de las grietas de la inspección por ultrasonido mostrados en las tablas 4, 5 y 6, para este procedimiento y análisis.

Las grietas presentes en el reactor se caracterizaron como grietas superficiales semielípticas internas, de acuerdo a las especificaciones dadas por la norma. En la figura 42 se muestra la aproximación realizada al tomar los defectos presentes como semielípticos, y la razón por la cual se utilizan factores geométricos. En la simulación las grietas se realizaron circulares, ya que no generan ningún tipo de concentrador de esfuerzos.

Figura 42. Aproximación de los defectos



(a) Aproximación, defecto ideal. (b) Defecto real.

Fuente: Uwe Zerbst, Markus Heinemann, Claudio Dalle Donne, Dirk Steglich; Fracture and damage mechanics modelling of thin-walled structures – An overview. Alemania, 2007.

5.2 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE ESFUERZOS

La norma API 579 FFS considera los esfuerzos como un factor influyente en el análisis de propagación de grietas. Los esfuerzos primarios son utilizados directamente en la abscisa del diagrama FAD, y los secundarios como complemento del proceso. Básicamente los esfuerzos que soporta el equipo son comparados de forma directa con la capacidad elástica del material, que es como determinar la zona en la cual se desea que trabaje el material, en la zona elástica y de lo contrario es una zona no permisible; y con esto asegurar en qué condiciones puede operar el equipo.

Para el análisis de esfuerzos de igual manera que en los cálculos analíticos se desea comparar un estado ideal del reactor con el estado real, es decir con los defectos; ya que estos generan una concentración de esfuerzos en la zona donde se encuentran, lo cual aumenta la criticidad de las grietas como se observo en el cálculo analítico. Con estos programas de simulación como ANSYS es más fácil determinar la magnitud de los esfuerzos en estas zonas, y no es necesario implementar complementos como factores de seguridad pues el valor obtenido es el que se presenta directamente en la punta de la grieta. Además se realizara un análisis en estado transitorio para verificar cuales son los puntos críticos durante las encendidas y apagadas del reactor, algo complejo para realizarse analíticamente.

5.2.1 Estado estable

El trabajo continuo del reactor de hidrotreatmento, es decir el estado estable del equipo, es uno de los puntos seguros por la combinación de presión con alta temperatura, sin embargo para este análisis se tomaron diferentes escenarios con el fin de analizar el comportamiento y estado de las grietas bajo diferentes condiciones.

En el cálculo analítico desarrollado anteriormente, se realizó una evaluación del estado del equipo caracterizando el comportamiento de las grietas de manera independiente; pero es de gran importancia visualizar la posible interacción que puede existir entre las tres grietas como se mencionó anteriormente, el cual es el escenario más parecido al estado real del reactor de hidrotreatmento.

Se simuló el reactor ideal, el reactor real y el reactor con las tres grietas de manera independiente a plena carga; estas simulaciones de estado estable se muestran en el anexo B. Para tener una idea del estado global del equipo se muestran los esfuerzos equivalentes sobre el reactor; se trabajó en ANSYS WORKBENCH 11.0.

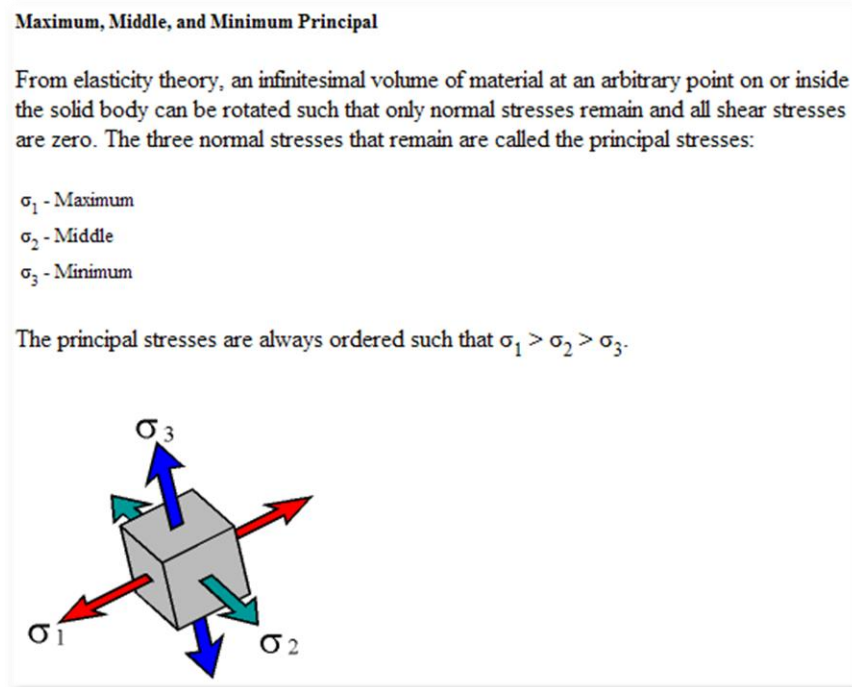
Como se puede ver en el reactor ideal, en la figura , a condiciones normales de operación, las zonas alrededor de los cordones de soldadura del reactor están totalmente definidas, pues en estas se presenta una distribución y un valor de esfuerzos superior comparado con las áreas de metal base alejadas de los cordones, es decir que independientemente de los defectos presentes en el reactor, estas zonas son óptimas para que se presenten estas clases de defectos.

Al realizar este procedimiento para todas las grietas se obtuvieron valores de los esfuerzos principales del reactor, definidos internamente por ANSYS como se muestra en la figura 43, ya que es posible calcular los esfuerzos normales principales, nombrados anteriormente en los cálculos como esfuerzos radiales, tangenciales, circunferenciales y axiales para recipientes cilíndricos.

Lo que se realizó con este proyecto fue ampliar la condición inicial de los esfuerzos presentes en el reactor, ya que se analizaron varias condiciones y escenarios sin limitarlos únicamente a la influencia de la presión, ya que estos recipientes a presión están sometidos a múltiples esfuerzos inducidos por otros factores como la temperatura, carga, peso, soportes, etc.

Para determinar la dirección correcta de los esfuerzos simulados, el programa facilita la visualización de los vectores de estos esfuerzos los cuales se muestran en la figura 44; esto facilita los cálculos de grieta crítica y evita errores en la caracterización de los esfuerzos.

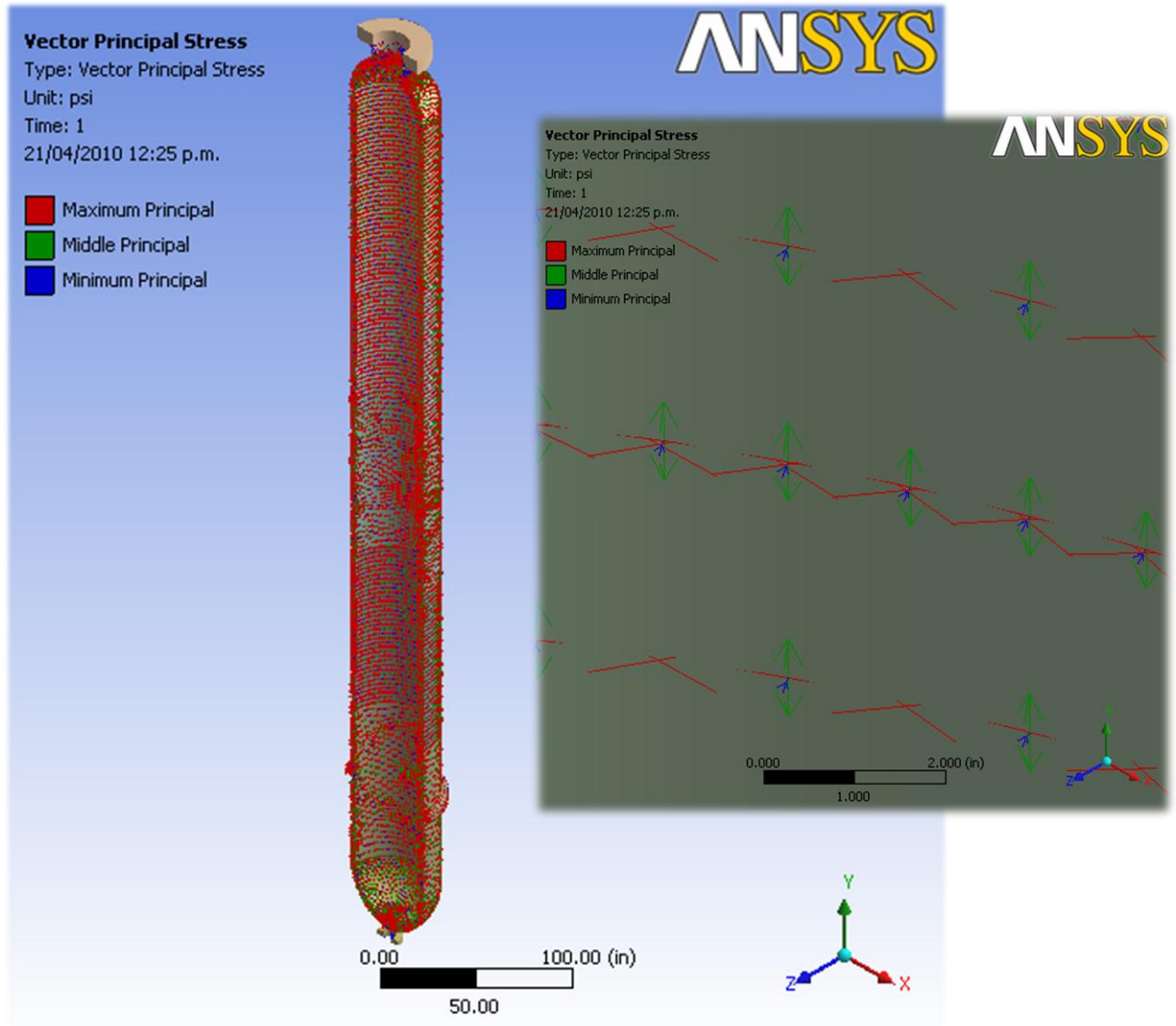
Figura 43. Esfuerzos normales principales



Fuente: ANSYS WORKBENCH 11.0; Review Results | Result Types | Structural Result Types | Stress/Strain.

Este procedimiento de simulación se realizó para todas las tres grietas independientes al igual que para el reactor ideal y el reactor real, los resultados de estas simulaciones se muestran en la tabla 33, valores que son usados directamente ya que los factores de seguridad no son necesarios, para los cálculos realizados en el procedimiento propuesto para evaluar con estos esfuerzos la criticidad de las grietas del reactor.

Figura 44. Dirección de esfuerzos principales



Fuente: Autor del proyecto, ANSYS WORKBENCH 11.0.

Esta distribución define que el esfuerzo máximo principal es el esfuerzo tangencial, el esfuerzo middle es el esfuerzo axial y el esfuerzo mínimo es el esfuerzo radial.

Tabla 33. Esfuerzos normales simulación reactor de hidrotreatmento

	Dimensión a (in)	Esfuerzos (Psi)			
		radial	tangencial	circunferencial	axial
0	IDEAL	1.262	13.058	13.118,84	8.531,4
1	0,63	3.865,2	25.946	26.232,32	9.097,5
2	0,51	4.392,4	23.963	24.362,24	9.165,2
3	0,78	4.615	33.737	34.051,2	11.255
x	REAL	6.694,7	37.045	37.645	11.665

Fuente: Autor del proyecto.

Es notorio el aumento de los esfuerzos al simular el reactor en comparación con los esfuerzos calculados, este fenómeno tiene explicaciones claras.

- Las ecuaciones de esfuerzos para recipientes de pared gruesa usados para el cálculo analítico son ideales, a pesar de que se pueden conocer los valores en diferentes radios, son deducidos de ecuaciones originales de diseño de recipientes sin defectos.
- La variación en los criterios de cálculo; ya que existen varios modelos para el cálculo de esfuerzos, el usado en el cálculo analítico fue la distribución de Lamé y ANSYS usa aproximación por elementos finitos la cual a su vez tiene varias formas de cálculo.
- La simulación del reactor muestra todos sus elementos como cordones de soldadura, tapas semiesféricas y especialmente los defectos presentes en el reactor, lo que conlleva a que los esfuerzos sean los reales en la punta de la grieta.

- La solución de ANSYS es una compleja mezcla de cálculos discretos; y los esfuerzos, temperatura y otras propiedades representan parámetros continuos; por esta razón los resultados son aproximaciones que dependerán del número de elementos utilizados.

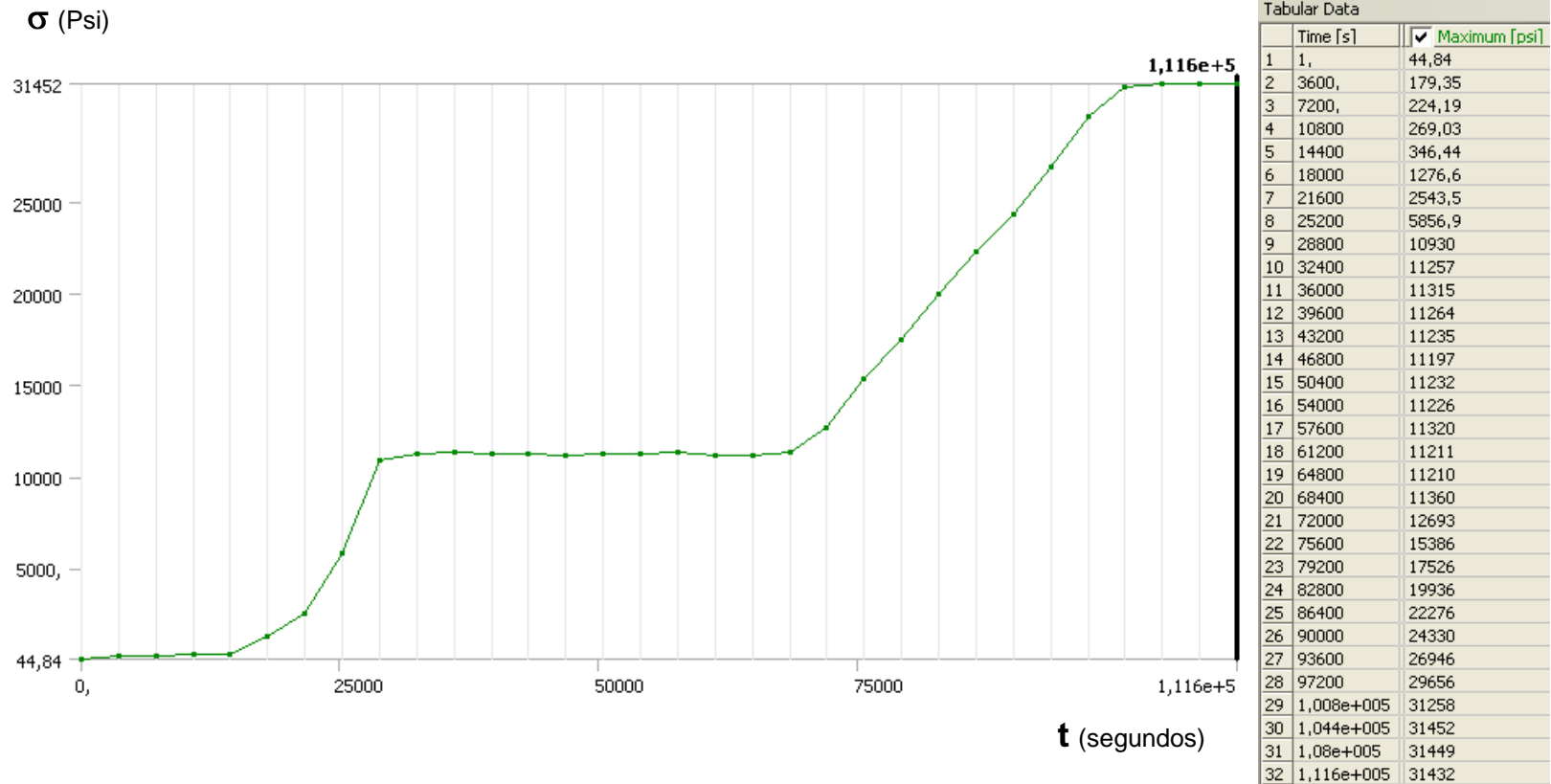
5.2.2 Estado transitorio

Para recipientes a presión como los reactores de hidrotreatmento, el estado transitorio es el más analizado; se considera que durante la variación de los parámetros operacionales pueden presentarse puntos con valores de esfuerzos altos, lo que es perjudicial para estos equipos. También es necesario controlar el proceso para disminuir el deterioro que se pueda presentar en el equipo.

Con el análisis en ANSYS del estado transitorio del reactor (encendidas y apagadas) se desean buscar los puntos de operación críticos en donde se generan los mayores esfuerzos por la combinación de alta presión con baja temperatura, este análisis se realizó solamente para el reactor real con los tres defectos, ya que es el escenario más crítico; los datos usados para el análisis del reactor se mostraron en la tabla 32.

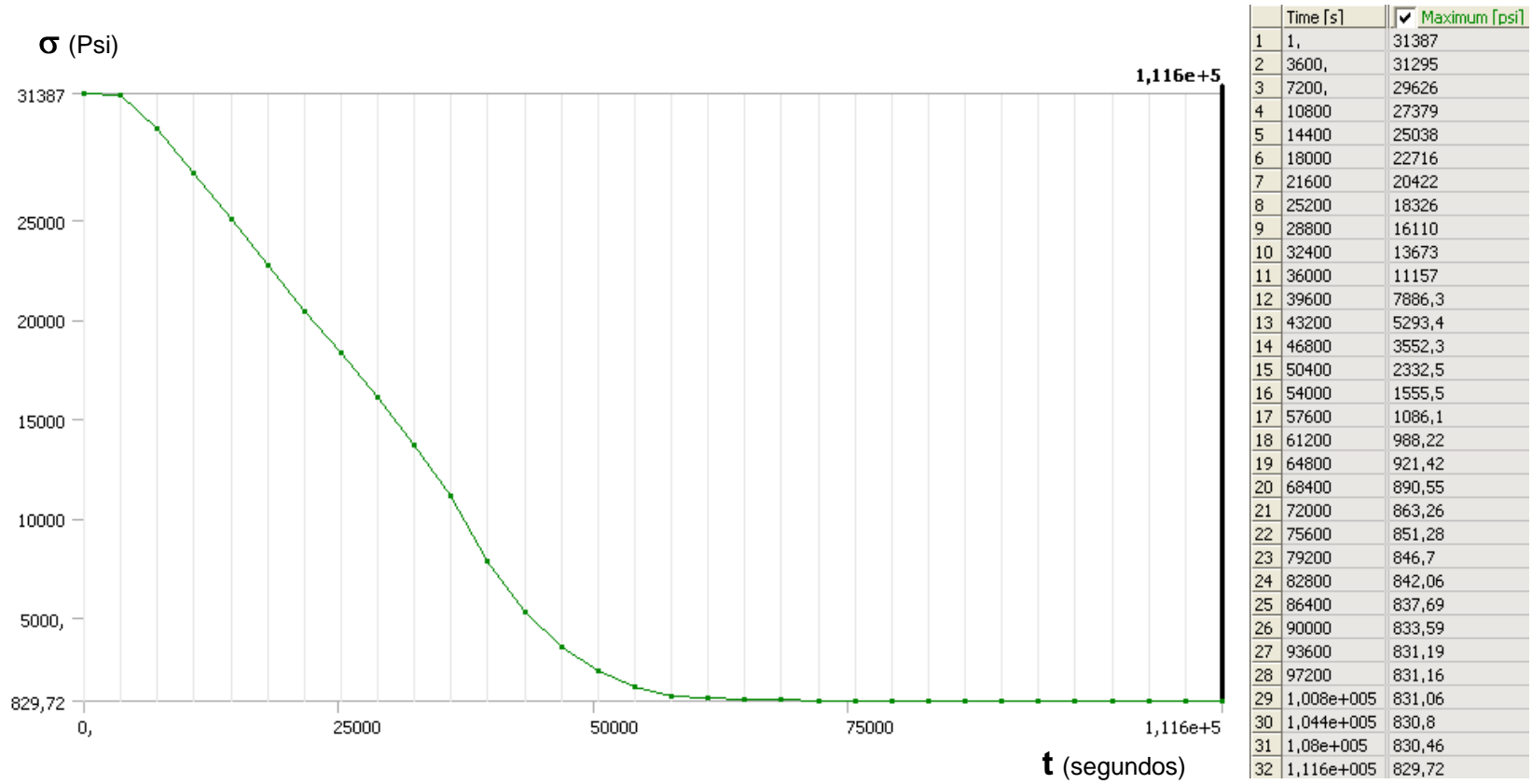
Los resultados completos de la simulación para el proceso de enfriamiento y calentamiento del reactor se muestran en el anexo B. Los valores del esfuerzo equivalente obtenido para el proceso de calentamiento se muestran en la figura 45 con su respectiva tabla de datos y el proceso de enfriamiento se muestra en la figura 46. Con estos valores se puede determinar el valor de temperatura, la presión y el tiempo en el cual se producen los mayores esfuerzos sobre el reactor de hidrotreatmento.

Figura 45. Calentamiento del reactor de hidrotreatmento



Fuente: Autor del proyecto, ANSYS WORKBENCH 11.0.

Figura 46. Enfriamiento del reactor de hidrot ratamiento



Fuente: Autor del proyecto, ANSYS WORKBENCH 11.0.

De estos resultados podemos deducir que el proceso más crítico para el reactor es el calentamiento, ya que el reactor alcanza un nivel de esfuerzos medio a tan solo 480 Psi y lo mantiene por 11 horas; y una distribución total con esfuerzos de 30.000 Psi con una presión cercana a los 800 Psi. Es decir que para evitar deterioro del equipo, la temperatura de trabajo debe ser alcanzada por el equipo antes de los 480 Psi.

Para el proceso de enfriamiento del reactor la distribución de esfuerzos es más homogénea y menos severa que el calentamiento, sin embargo este proceso debe realizarse de manera controlada para evitar esfuerzos excesivos, por esta razón se observa que cuando la presión es de 1.000 Psi, es decir se ha reducido en más de una tercera parte, la temperatura aun no ha disminuido de manera considerable, con esto evitar esfuerzos indeseados.

5.3 CÁLCULO DE LA CRITICIDAD DE LAS GRIETAS CON EL REACTOR DE HIDROTRATAMIENTO SIMULADO Y CON BASE EN LA NORMA API 579 FFS

Realizando la evaluación del reactor con base en la norma API 579 FFS para esfuerzos simulados, en el anexo B de la norma se define que el procedimiento debe iniciarse con el cálculo de los esfuerzos de referencia teniendo en cuenta que los esfuerzos equivalentes (Von-mises) son considerados los esfuerzos de membrana para todos los defectos.

Es necesario tener en cuentas que los parámetros geométricos no varían ya que depende de la geometría de la grieta, y para este análisis se tomaron las mismas consideraciones, dimensiones y especificaciones de las grietas definidas en el cálculo analítico. En este caso como no hay esfuerzos de pandeo la ecuación 5:11 utilizada en el paso 6 para el cálculo de esfuerzos de referencia podría simplificarse. Los cálculos para la grieta 1.

$$\sigma_{ref}^P = \frac{gP_b + \sqrt{(gP_b)^2 + 9(M_s P_m (1 - \alpha)^2)^2}}{3(1 - \alpha)^2}$$

$$\sigma_{ref}^P = M_s P_m \quad \rightarrow \quad \sigma_{ref}^P = (1,122)(11.993)$$

$$\sigma_{ref}^P = 13.458,5$$

Teniendo en cuenta estas consideraciones, en la tabla 34 se definen los valores para los tres defectos presentes en el reactor analizado.

Tabla 34. Esfuerzos de referencia primarios para reactor simulado

	a (in)	α	g	λ	M_t	M_s	P_m (Psi)	Esfuerzos primarios de referencia σ_{ref}^P (Psi)
1	0,63	0,13	0,99	3,49	2,35	1,122	11.993	13.458,5
2	0,51	0,07	0,99	1,74	1,5	1,053	11.993	12.628,63
3	0,78	0,19	0,99	7,77	4,38	1,222	11.993	14.655,45

Fuente: Autor del proyecto.

Con este parámetro definido es posible calcular la relación de carga primaria, determinada anteriormente en el paso 7. Los cálculos para la grieta 1:

$$L_{ref}^P = \frac{\sigma_{ref}^P}{\sigma_{ys}} \quad \rightarrow \quad L_{ref}^P = \frac{13.458,5}{45.000}$$

$$L_{ref}^P = 0,3$$

Tabla 35. Relación de carga para el reactor simulado y calculado

	Esfuerzos primarios de referencia σ_{ref}^P (Psi)	Proporción de carga L_r^P (esfuerzos simulados)	Proporción de carga L_r^P (esfuerzos calculados)
1	13.458,5	0,3	0,34
2	12.628,63	0,28	0,32
3	14.655,45	0,325	0,37

Fuente: Autor del proyecto.

Iniciando el procedimiento para determinar la relación de tenacidades, se calculan la intensidad de tensiones primarias y secundarias, estos procedimientos se realizaran con la ecuación D.5.11, con la cual pueden determinarse la intensidad de tenacidades para distribuciones de esfuerzos conocidas. Los cálculos para la grieta 1.

$$K_I^P = G_o (P_m) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad \rightarrow \quad K_I^{SR} = (1,232)(11.993) \sqrt{\frac{\pi \cdot 0,63}{1,02438}}$$

$$K_I^P = 20.537,76$$

$$K_I^{SR} = G_o (Q_{rm}) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad \rightarrow \quad K_I^{SR} = (1,232)(11.000) \sqrt{\frac{\pi \cdot 0,63}{1,02438}}$$

$$K_I^{SR} = 18.837,27$$

Este procedimiento de cálculos para determinar la intensidad de esfuerzos se realizo para las tres grietas y los resultados se muestran en la tabla 36.

Tabla 36. Intensidad de esfuerzos para el reactor simulado

	a (in)	Q	G ₀	Intensidad de esfuerzos por cargas primarias K _I ^P (Psi√in)	Intensidad de esfuerzos por cargas primarias K _I ^{SR} (Psi√in)
1	0,63	1,024	1,232	20.537,76	18.837,27
2	0,51	1,066	1,167	17.158,53	15.737,834
3	0,78	1,008	1,287	24.065,7	22.073,1

Fuente: Autor del proyecto.

Por último para determinar la relación de tenacidad es necesario conocer el valor del factor de interacción plástica, para esto se calcula los esfuerzos de referencia secundarios de la misma manera como se determinaron los primarios

$$\sigma_{ref}^{SR} = \frac{gP_b + \sqrt{(gP_b)^2 + 9(M_s P_m (1 - \alpha)^2)^2}}{3(1 - \alpha)^2}$$

$$\sigma_{ref}^{SR} = M_s P_m \quad \rightarrow \quad \sigma_{ref}^{SR} = (1,122)(11.000)$$

$$\sigma_{ref}^{SR} = 12.342 \text{ Psi}$$

$$L_{ref}^{SR} = \frac{\sigma_{ref}^{SR}}{\sigma_{ys}} \quad \rightarrow \quad L_{ref}^{SR} = \frac{12.342}{45.000}$$

$$L_{ref}^{SR} = 0,27$$

Con los factores determinados, el factor de interacción plástica para la grieta 1.

$$\phi = 1 + \psi/\varphi \quad \rightarrow \quad \phi = 1 + 0,02575/0,428$$

$$\phi = 1,06$$

El proceso se realizo para las tres grietas y los resultados se muestran en la tabla 37.

Tabla 37. Factor de interacción plástica para el reactor simulado

	Esfuerzos secundarios de referencia σ_{ref}^{SR}	Relación de carga secundaria L_r^{SR}	Relación de carga primaria L_r^P	ψ	φ	Φ
1	12.342	0,27	0,3	0,018	0,32	1,055
2	11.583	0,25	0,28	0,015	0,28	1,053
3	13.442	0,3	0,327	0,02	0,34	1,06

Fuente: Autor del proyecto.

Con todos los parámetros calculados es posible determinar la relación de tenacidades para el reactor simulado, los cálculos para la grieta 1.

$$K_r = \frac{K_I^P + \Phi K_I^{SR}}{K_{IC}} \quad \rightarrow \quad K_r = \frac{20.537,76 + (1,055)(18.837,27)}{90.000}$$

$$K_r = 0,45$$

El procedimiento se realizo para los tres defectos y en la tabla 38 se muestran los resultados y se comparan con los obtenidos analíticamente.

Tabla 38. Relación de tenacidades para el reactor simulado

	Intensidad de esfuerzos por cargas primarias K_I^P	Intensidad de esfuerzos por cargas secundarias K_I^{SR}	Φ	K_r (simulados)	K_r (calculados)
1	20.537,76	18.837,27	1,055	0,45	0,476
2	17.158,53	15.737,834	1,053	0,375	0,4
3	24.065,7	22.073,1	1,06	0,53	0,562

Fuente: Autor del proyecto.

Evaluando los resultados de carga y tenacidad obtenidos, en la tabla 39 se muestran los valores de las relaciones calculados y en la figura 47 se muestra el diagrama de evaluación de falla.

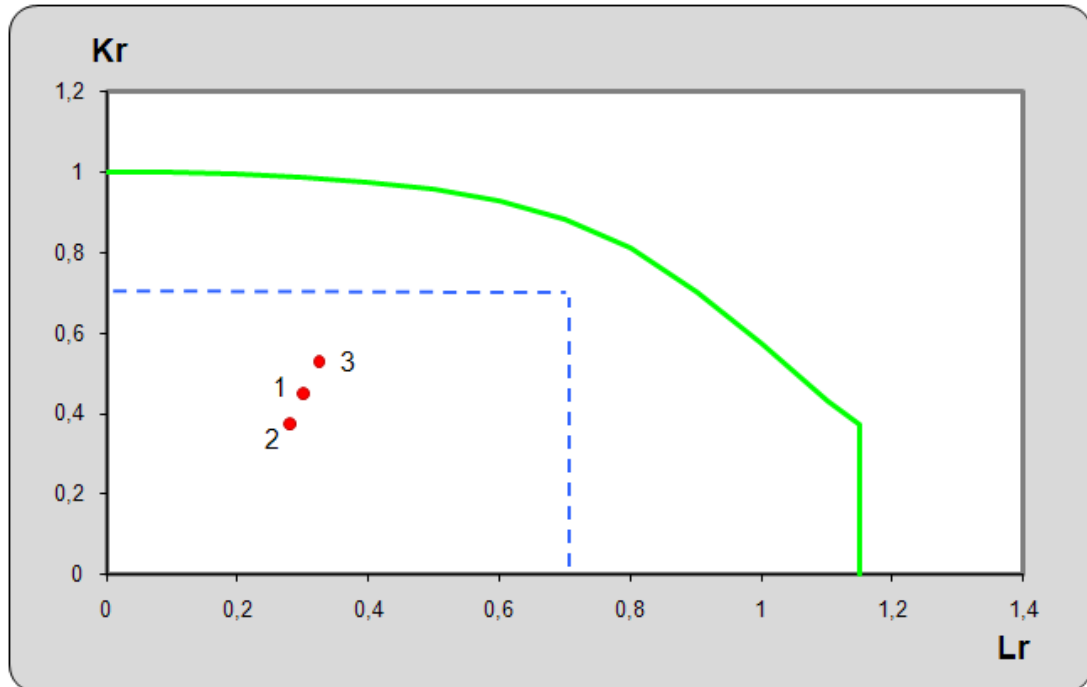
Tabla 39. Relaciones de carga y tenacidad para el reactor simulado

	Relación de tenacidades K_r	Relación de carga L_r^P
1	0,45	0,3
2	0,375	0,28
3	0,53	0,325

Fuente: Autor del proyecto.

Podemos concluir que los defectos en este proceso tienen un comportamiento muy similar al mostrado en el cálculo analítico; su relación de carga es un poco menor y esto puede considerarse más severo ya que la tendencia del defecto sería hacia la fractura frágil, un estado no deseado en el reactor de hidrot ratamiento.

Figura 47. Diagrama de evaluación de falla para el reactor de hidrotratamiento simulado



Fuente: Autor del proyecto.

5.4 ESTIMACIÓN DE LA CRITICIDAD CON BASE EN LA SIMULACIÓN Y LOS ESFUERZOS NORMALES PRINCIPALES EN ESTADO ESTABLE

La evaluación del reactor recomendada por la norma API 579 FFS para esfuerzos simulados, es una aproximación que muestra un estado de operación del reactor; se desea realizar un procedimiento similar con los esfuerzos mostrados en el anexo B y en la tabla 33. Con este proyecto se desea proponer una metodología abierta a varios tipos de recipientes a presión; similar al cálculo analítico establecido por la norma, pero con los esfuerzos obtenidos a partir de la simulación del reactor en estado estable; con el fin de evaluar la criticidad de las grietas.

Es necesario tener en cuenta que los parámetros geométricos en este proceso tampoco varían ya que depende de la geometría de las grietas, y para este análisis se tomaron las mismas consideraciones, dimensiones y especificaciones de las grietas definidas en el cálculo analítico, para el escenario del reactor real con las tres grietas se tomaran los datos de la grieta 3 ya que es la más influyente.

Determinando los esfuerzos de referencia; para los cuales es necesario determinar los esfuerzos de pandeo, se calcularon con la misma ecuación que se uso en el paso 6 y los esfuerzos de membrana se calculan como la tensión media que actúa sobre la sección transversal del recipiente, para este caso no se toman los esfuerzos circunferenciales totales ya que estas nuevas distribuciones de esfuerzos son calculadas directamente en la punta del defecto y es un condición menos conservativa, además es mediante un proceso de simulacion; los cálculos para la **grieta 1**.

$$P_m = \sigma_c / 2 \quad \rightarrow \quad P_m = 26.232,32 / 2$$

$$P_m = 13.116,16 \text{ Psi}$$

$$P_b = \sigma_a \left[\frac{t}{r_i} - \frac{3}{2} \left(\frac{t}{r_i} \right)^2 + \frac{9}{5} \left(\frac{t}{r_i} \right)^3 \right]$$

$$\rightarrow P_b = 9.097,5 \left[\frac{3,3125}{24} - \frac{3}{2} \left(\frac{3,3125}{24} \right)^2 + \frac{9}{5} \left(\frac{3,3125}{24} \right)^3 \right]$$

$$P_b = 1.038,74 \text{ Psi}$$

Este procedimiento se realizo para las tres grietas individuales y el reactor real con la misma ecuación utilizada en el paso 6; para el reactor ideal se empleo la ecuación 5.1 del anexo D; remplazando los parámetros y calculando el esfuerzo de referencia para la grieta 1.

$$\sigma_{ref}^P = \frac{gP_b + \sqrt{(gP_b)^2 + 9(M_s P_m (1 - \alpha)^2)^2}}{3(1 - \alpha)^2}$$

$$\rightarrow \sigma_{ref}^P = \frac{(0,99)(1.038) + \sqrt{[(0,99)(1.032)]^2 + 9[(1,122)(13.116)(1 - 0,13)^2]^2}}{3(1 - 0,13)^2}$$

$$\sigma_{ref}^P = 15.181,47 \text{ Psi}$$

Todo este procedimiento de cálculo para determinar los esfuerzos de pandeo y membrana; al igual que el esfuerzo de referencia se realizaron para las tres grietas y el reactor real, los resultados de los cálculos se muestran en la tabla 40. Aunque la influencia de los esfuerzos es directa, este parámetro aumenta poco en comparación al cálculo analítico.

Tabla 40. Esfuerzos de referencia primarios con esfuerzos simulados

	a (in)	α	g	λ	M_t	M_s	P_b (Psi)	P_m (Psi)	Esfuerzos primarios de referencia σ_{ref}^P (Psi)
1	0,63	0,13	0,99	3,49	2,35	1,122	1.038,7	13.116,16	15.181,47
2	0,51	0,07	0,99	1,74	1,5	1,053	1.046,5	12.181,12	13.241,87
3	0,78	0,19	0,99	7,77	4,38	1,222	1.285	17.025,6	21.462,38
x	0,78	0,19	0,99	7,77	4,38	1,222	1.331,9	18.822,5	23.681,5

Fuente: Autor del proyecto.

Siguiendo con el análisis; con los esfuerzos de referencia se determina la relación de carga calculada anteriormente en el paso 7; Para la grieta 1.

$$L_{ref}^P = \frac{\sigma_{ref}^P}{\sigma_{ys}} \quad \rightarrow \quad L_{ref}^P = \frac{15.181,47}{45.000}$$

$$L_{ref}^P = 0,34$$

El cálculo de la relación de carga se realizó para todos los escenarios especificados y en la tabla 41 se muestran los resultados obtenidos en el cálculo con los esfuerzos simulados y los determinados en el cálculo analítico.

Aunque se esperaba que este parámetro se afectara considerablemente, al igual que el esfuerzo de referencia se obtiene valores muy aproximados, validando los procesos utilizados en este análisis.

Tabla 41. Relación de carga para esfuerzos simulados

	Esfuerzos primarios de referencia σ_{ref}^P (Psi)	Proporción de carga L_r^P (esfuerzos simulados)	Proporción de carga L_r^P (esfuerzos calculados)
1	15.181,47	0,34	0,34
2	13.241,87	0,3	0,32
3	21.462,38	0,47	0,37
x	23.681,5	0,52	-

Fuente: Autor del proyecto.

Continuando con el análisis de criticidad de grietas, se determina la intensidad de esfuerzos, teniendo en cuenta que los parámetros geométricos no cambian; este parámetro se calculo en el paso 8, con la ecuación C 5.10; para estos cálculos se utilizara la ecuación C5.11, ya que es para distribuciones de esfuerzos conocidas y no para esfuerzos de presión interna únicamente. Los nuevos cálculos para la grieta 1.

$$K_I^P = G_o (\sigma_a) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

$$\rightarrow K_I^{SR} = (1,232)(9.097,5) \sqrt{\frac{\pi \cdot 0,63}{1,02438}}$$

$$K_I^{SR} = 15.579,3$$

Los resultados de estos cálculos se muestran en la tabla 42.

Tabla 42. Intensidad de esfuerzos para esfuerzos simulados y calculado

	a (mm)	a (in)	Q	G ₀	Intensidad de esfuerzos por cargas primarias K _I ^P (Psi√in) simuladas	Intensidad de esfuerzos por cargas primarias K _I ^P (Psi√in) calculadas
1	16	0,63	1,024	1,232	15.579,3	19.197,89
2	13	0,51	1,066	1,167	13.112,76	16.083,763
3	20	0,78	1,008	1,287	22.584,8	22.418,99
x	20	0,78	1,008	1,287	23.407,5	-

Fuente: Autor del proyecto.

Para el cálculo de la intensidad de esfuerzos por cargas secundarias se tendrá en cuenta la recomendación dada por la norma para la determinación de los esfuerzos residuales, los cálculos para la grieta 1.

$$K_I^{SR} = G_o (Q_{rm}) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

$$\rightarrow K_I^{SR} = (1,232)(11.000) \sqrt{\frac{\pi \cdot 0,63}{1,02438}}$$

$$K_I^{SR} = 18.837,27$$

Los cálculos se realizaron para todos los escenarios especificados y los resultados se muestran en la tabla 43.

Tabla 43. Intensidad de esfuerzos residuales

	a (mm)	a (in)	Q	G ₀	Intensidad de esfuerzos por cargas primarias K ^{SR} _I (Psi√in)
1	16	0,63	1,02438	1,232	18.837,27
2	13	0,51	1,066	1,167	15.737,8
3	20	0,78	1,008	1,287	22.073
x	20	0,78	1,008	1,287	22.073

Fuente: Autor del proyecto.

Antes de entrar a calcular la relación de tenacidades es necesario conocer el factor de interacción plástica, el cual depende de los parámetros calculados a continuación para la grieta 1; como se menciono anteriormente la ecuación del cálculo de esfuerzos secundarios es simplificada.

$$\sigma_{ref}^{SR} = \frac{gP_b + \sqrt{(gP_b)^2 + 9(M_t Q_{rm} (1 - \alpha)^2)^2}}{3(1 - \alpha)^2}$$

$$\sigma_{ref}^{SR} = M_s Q_{rm}$$

$$\rightarrow \sigma_{ref}^{SR} = (1,122)(11.000)$$

$$\sigma_{ref}^{SR} = 12.342 \text{ Psi}$$

$$L_{ref}^{SR} = \frac{\sigma_{ref}^{SR}}{\sigma_{ys}} \quad \rightarrow \quad L_{ref}^{SR} = \frac{12.342}{45.000}$$

$$L_{ref}^{SR} = 0,27$$

Con los factores geométricos seleccionados de las tablas 26 y 27, se determinaron los todos los parámetros para el cálculo de factor de plasticidad como se realizo en el paso11. En la tabla 44 se muestran los resultados de todos los defectos.

$$\phi = 1 + \psi/\varphi \quad \rightarrow \quad \phi = 1 + 0,019/0,3$$

$$\phi = 1,062$$

Tabla 44. Factor de interacción plástica para el reactor simulado

	Esfuerzos secundarios de referencia σ_{ref}^{SR}	Relación de carga secundaria L_r^{SR}	Relación de carga primaria L_r^P	ψ	Φ	Φ
1	12.342	0,27	0,34	0,019	0,3	1,062
2	11.583	0,25	0,3	0,016	0,29	1,055
3	13.442	0,3	0,47	0,025	0,3	1,08
x	13.442	0,3	0,52	0,027	0,26	1,1

Fuente: Autor del proyecto.

Por último se determina la relación de tenacidad calculada anteriormente en el paso 12, la tenacidad del material es un parámetro constante y fue tomada del cálculo analítico en el paso 3. Para la grieta 1.

$$K_r = \frac{K_I^P + \Phi K_I^{SR}}{K_{IC}}$$

$$\rightarrow K_r = \frac{15.579,3 + (1,062)(18.837,27)}{90.000}$$

$$K_r = 0,4$$

El cálculo de la relación de tenacidad se realizó para todos los escenarios especificados y en la tabla 45 se muestran los resultados obtenidos en el cálculo con los esfuerzos simulados y los determinados en el cálculo analítico; para comparar el comportamiento de los defectos analizándolos por dos métodos.

Tabla 45. Relación de tenacidad para esfuerzos simulados

	Intensidad de esfuerzos por cargas primarias K_I^P	Intensidad de esfuerzos por cargas secundarias K_I^{SR}	Φ	K_r (simulados)	K_r (calculados)
1	15.579,3	18.837,27	1,062	0,4	0,476
2	13.112,76	15.737,8	1,055	0,33	0,4
3	22.584,8	22.073	1,08	0,52	0,562
x	23.407,5	22.073	1,1	0,53	-

Fuente: Autor del proyecto.

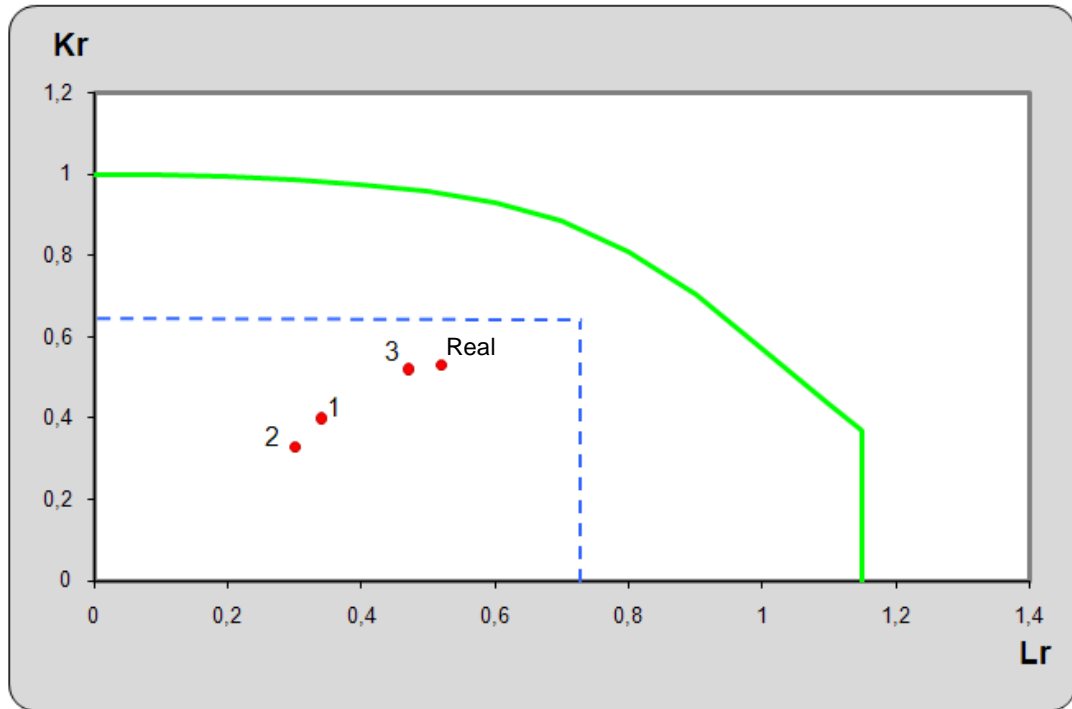
En la tabla 46 se resumen las relaciones de carga y tenacidad del reactor; en la figura 48 se evalúan la condición del reactor con las tres grietas independientes y del reactor real.

Tabla 46. Relación de carga y tenacidad para el reactor simulado

	Relación de tenacidades K_r	Relación de carga L_r^P
1	0,4	0,34
2	0,33	0,3
3	0,52	0,47
x	0,53	0,52

Fuente: Autor del proyecto.

Figura 48. Diagrama de evaluación de falla para esfuerzos simulados

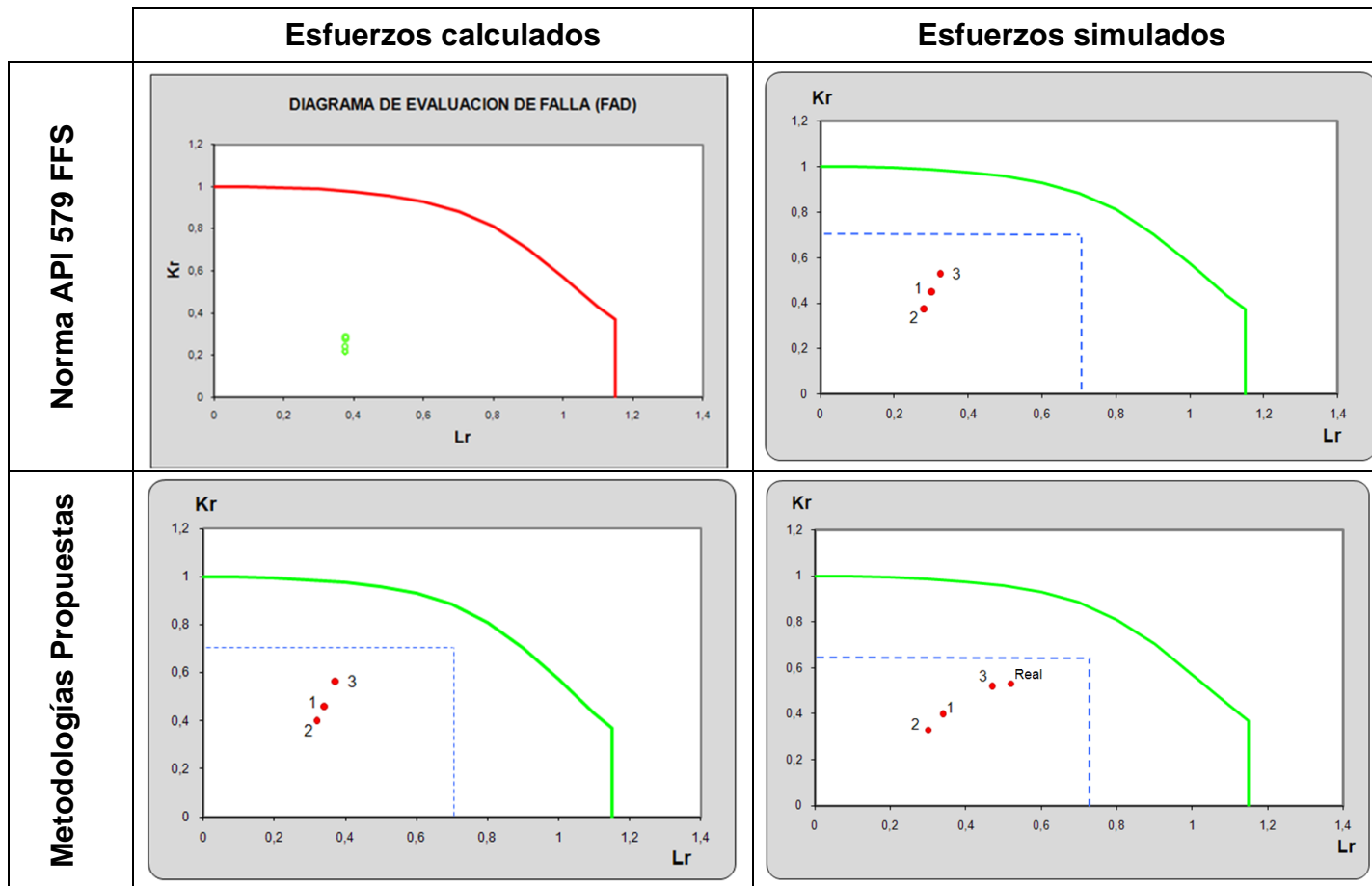


Fuente: Autor del proyecto.

Aunque este procedimiento de cálculo con esfuerzos normales principales simulados no está directamente especificado en la norma, uno de los objetivos del proyecto es realizar una comparación entre el cálculo analítico y la simulación del reactor, ya que puede ser útil para análisis de recipientes a presión con otras especificaciones, y simplificar los cálculos significativamente.

En la tabla 47 se comparan todos los diagramas de evaluación de falla calculados en este proyecto; se puede observar que la grieta 1 y la grieta 2, muestran características similares en todos los procesos de cálculo y que no son defectos peligrosos bajo estos parámetros operacionales. La grieta 3 tiene una condición un poco más severa, a la calculada analíticamente esto se debe a que los esfuerzos simulados son mayores por las condiciones y forma de cálculo.

Tabla 47. Diagramas de evaluación de falla con esfuerzos analíticos y simulados



Fuente: Autor del proyecto.

5.5 CÁLCULO DE CRITICIDAD CON BASE EN LA SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO

Se realizara el cálculo de criticidad de grietas del reactor real, es decir con los tres defectos; con los valores de temperatura y presión obtenidos en la simulación del reactor en estado transitorio para compararlos con los resultados obtenidos con el análisis en estado estable. Se evalúan puntos de estos procesos con el programa realizado en este proyecto (calculo analítico) para analizar el comportamiento de los defectos con estos parámetros operacionales.

De acuerdo al cálculo implementado en estado estable, para el reactor real los parámetros geométricos usados fueron los de la grieta 3, de igual manera se evaluara para el estado transitorio. Para el proceso de calentamiento que es la condición más severa del reactor se evaluaron cuatro puntos de acuerdo al comportamiento de los esfuerzos, las condiciones utilizadas y los resultados se muestran en la tabla 48.

Para el enfriamiento, dado que es un proceso menos severo se evaluaron dos puntos medios, las condiciones usadas y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 49.

Con las evaluaciones realizadas podemos concluir que al igual que en el trabajo estable los defectos se encuentran en una zona de trabajo aceptable y que solo bajo las características especificadas no se presentan puntos críticos, es decir que el proceso de enfriamiento y calentamiento es el adecuado para el reactor.

Tabla 48. Evaluación de criticidad para el calentamiento del reactor

Temperatura (°C)	Presión (Psi)	Tiempo (seg)	FAD
593	501	32.400 (8 horas)	
592	780,6	79.200 (22 horas)	

Continuación tabla 48

<p>597</p>	<p>1.199,7</p>	<p>93.600 (26 horas)</p>	
<p>595</p>	<p>1.391,6</p>	<p>100.800 (28 horas)</p>	

Fuente: Autor del proyecto.

Tabla 49. Evaluación de criticidad para el enfriamiento del reactor

Temperatura (°C)	Presión (Psi)	Tiempo (seg)	FAD
556,86	1319,7	7.200 (2 horas)	
433,31	909,9	21.600 (6 horas)	

Fuente: autor del proyecto.

6. CONCLUSIONES

- ❖ Durante el proceso de análisis para precisar la influencia de los esfuerzos secundarios en la criticidad y propagación de grietas; se realizó la evaluación del reactor de hidrotratamiento R-111 con base en el capítulo 9 de la norma API 579 FFS y se determinó la criticidad de las grietas y su velocidad de propagación; es decir se calculó el estado mecánico del reactor.
- ❖ Para establecer una metodología práctica y apropiada del proceso analítico se implementó un programa realizado en Matlab, que determina todos los parámetros necesarios, con el fin de simplificar los cálculos de la evaluación para determinar la criticidad de grietas superficiales internas semielípticas en recipientes a presión interna de pared gruesa, bajo diferentes parámetros operacionales.
- ❖ Con el estudio realizado se demuestra que los esfuerzos secundarios son un factor influyente en el análisis de criticidad y propagación de grietas; ya que los defectos analizados en el proyecto, del reactor de hidrotratamiento muestran condiciones más severas comparadas con las evaluaciones realizadas anteriormente sin estos esfuerzos.
- ❖ Con los análisis realizados en este proyecto, bajo diferentes condiciones operacionales y con la influencia de los esfuerzos secundarios, se puede asegurar que los defectos presentes en el reactor de hidrotratamiento son seguros; aunque la grieta 3 muestra una condición severa y es la de mayor cuidado.

- ❖ Con los modelos de simulación se obtuvieron parámetros básicos para las inspecciones a equipos de proceso sometidos a presión como los son las zonas críticas. Estas regiones están ubicadas principalmente alrededor de los cordones de soldadura y en la superficie interna del reactor de hidrotratamiento, lo cual es un punto de partida para futuras evaluaciones.

- ❖ Con los esfuerzos normales principales obtenidos en la simulación del reactor de hidrotratamiento, se estimó una aproximación de la criticidad de grietas; comparándolo con el procedimiento de evaluación analítico y para esfuerzos simulados, propuestos por la norma API 579 FFS; se obtuvieron resultados semejantes y coherentes. Estos procedimientos propuestos puede ser considerado para futuras evaluaciones.

- ❖ Con este proyecto se afianza una vez el vínculo interinstitucional UIS- ICP- ECOPETROL, y se logra relacionar al estudiante con la industria. El estudiante adquiere responsabilidades; desarrolla capacidad de análisis y criterio confrontando problemáticas reales.

7. RECOMENDACIONES

- ❖ Para obtener resultados más concretos se recomienda que el cálculo de tenacidad se realice con parámetros experimentales como ensayos de laboratorio, con los cuales se obtiene la tenacidad real del material y no la teórica, como ocurre en el proceso de cálculo analítico.
- ❖ Se recomienda realizar diferentes procedimientos para determinar la geometría óptima para la simulación de la grieta, ya que a pesar de que existe una especificación, una geometría semielíptica puede variar en muchos aspectos y esto afecta directamente los esfuerzos primarios y secundarios.
- ❖ Es importante implementar las nuevas herramientas computacionales para facilitar los procesos de cálculos no solo para grietas superficiales internas semielípticas en recipientes a presión interna de pared gruesa, si no para las demás especificaciones de defectos posibles.

BIBLIOGRAFÍA

AGA, línea de gas. Fabricación, envasado y suministro de hidrogeno y anhídrido carbónico. 2005.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API Energy. Fitness-For-Service API 579-1/ASME FFS-1. SECOND EDITION. Cap. 9. 2007.

ANNARATONE Donatello. Pressure vessel design. Editorial Springer. 2007.

ASME BOILER & pressure vessel code. Parte D. 2004.

BATE S.K., CHARLES R. y WARREN A. Finite element analysis of a single bead-on-plate specimen using SYSWELD. Elsevier. 2009.

BENITEZ Adrian. Estructura de los catalizadores de Niw/a1203f(x) y su actividad en reacciones de hidrodeshulfuración, hidrodeshnitrogenación e hidrocraqueo. Universidad Complutense de Madrid. 1992.

BUENO Sara y PÉREZ Benjamín. Hornos. Universidad de Sevilla. 2007.

BLUMBERG Katherine, WALSH Michael y PERA Charlotte. Gasolina y diesel de bajo azufre: la clave para disminuir las emisiones vehiculares. 2003.

CHAKRABARTY J. Theory of plasticity. 3ª edición. Texas. USA. 2006.

Consejo Nacional de Política Económica y Social, República de Colombia y Departamento Nacional de Planeación. Documento Conpes, Proyecto de hidrotreatmento para la refinería de Barrancabermeja. 2004.

CONTRERAS Sanjuán Laura y RANGEL Seguí Manuel. Aplicación Técnicas de diagnóstico: Compresores de Hidrógeno. Universidad de Sevilla.

CÓRDOBA Robin Javier, ZABALA Luis Eduardo, GUZMÁN Jairo Humberto y GERMÁN Tobacia. Evaluación fitness for service de integridad estructural y vida residual en reactores de hidrotreatmento, Instituto Colombiano del Petróleo. ECOPETROL-ICP.

Corporación financiera internacional. Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la refinación del petróleo.

DIETER George. Mechanical Metallurgy. Cap. 11. Mc Graw Hill. 1988.

ECOPETROL. Características técnicas para la preselección del catalizador para hidrotreatmento de residuos (UNIBON), anexo 6.2009.

FERNÁNDEZ Pedro. Diseño y análisis estructural de recipientes a presión. Vol VIII.

FISHER. Tecnología e Innovación en Control de Procesos. Soluciones de descenso de, separadores, (HHPS y CHPS) de Fisher®.

FLARGENT. Hornos de calentamiento de aceite térmico-petróleo-gasolina-gas.

GONZÁLEZ Yris Kenelma. Caracterización de las corrientes del reactor del proceso de hidrotreatmento de gasóleo para su aplicación a un nuevo modelo cinético predictivo. Universidad nacional experimental politécnica Antonio José de Sucre. Venezuela. 2008.

GUERRERO M. A. y Betegón M^a C. Análisis a fractura de recipientes a presión fabricados en aceros de alta resistencia "HSS". Anales de Mecánica de la Fractura Vol. I. 2006

HERNÁNDEZ Alfredo, NIETO Martín y OLAYO Roberto. Elaboración de unidades de hidrotreatmento para el diesel. Universidad autónoma metropolitana Iztapalapa. 1997.

HERNÁNDEZ DEL OLMO Carolina. Desulfuración de Dibenzotiofeno con *Rhodococcus erythropolis* IGTS8. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, 2004.

MEGYESY Eugene. Pressure vessel handbook. 10^a edición. Universidad de Tulsa. Oklahoma.

M.M.J. Cálculo de recipientes a presión, anexo 6. 2005.

MOSS Dennis. Pressure vessel design manual. 3^a edición. Elsevier. 2004.

Organización Internacional del Trabajo, O.I.T. y Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Vol III. Parte XII. Cap 78. Director del capítulo, Kraus, Richard S. 2001.

SALAZAR SOTELO Daniel. Beneficios del proceso de hidrotreatmentos de gasóleos de carga a FCC. Revista del centro de investigación. Universidad La Salle. Vol 4. México D.F. 2000.

URIBE PÉREZ Iván, VELOSA PACHECO Aldrin Belisario y ZABALA CAPACHO Luis Eduardo. Estudio del proceso de generación y comportamiento de grietas en un acero 2¼ Cr 1Mo envejecido en servicio. 10ª COTEQ – Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos. 2009.

VERRUSCHI PIGLIACAMPO Elisa Marisol. Optimización de la distribución de catalizadores en hidrotratamiento de destilados medios. Departamento de ingeniería química industrial y del medio ambiente, escuela técnica superior de ingenieros industriales. 2008.

VILLANUEVA PRUNEDA S.A., NORIEGA Damián., PÉREZ MORENO R. y GARCÍA SEGURA Pedro. Análisis de piezas ensambladas por ajustes apretados normalizados. 8º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECANICA. Cusco. 2007.

VISWANATHAN R. Damage Mechanism and life assessment of high – temperature components. Cap. 7. ASM International. 1989.

ZAMORA SAUMA Sergio. Proyecto de investigación, análisis técnico, financiero y económico, Evaluación de la depuración de los combustibles pesados de recope como estrategia de control de emisiones de contaminantes atmosféricos de fuentes estacionarias en Costa Rica. 2005.

ZERBST Uwe, HEINIMANN Markus, DALLE Donne Claudio y STEGLICH Dirk. Fracture and damage mechanics modelling of thin - walled structures – an overview. Elsevier. 2007.

WEB

http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0307107-123943//12EAsm12de13.pdf.

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/rodriguez_m_ja/capitulo4.pdf

.

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/badillo_c_a/capitulo4.pdf.

ANEXOS

ANEXO A: Líneas de código para el programa implementado en el análisis de criticidad de grietas superficiales internas semielípticas en recipientes a presión interna de pared gruesa:

```

% CALCULOS
c=L_c/2;

R=r_i+a;
s_a=(r_i^2*p_i)/(r_o^2-r_i^2);
s_r=s_a*(-1+(r_o/R)^2);
s_t=s_a*(1+(r_o/R)^2);
s_c=((s_t)^2+(s_r)^2)^0.5;

ln_B=log(r_o/r_i)/(2*pi*K_m);
ln_D=log(r_a/r_o)/(2*pi*K_a);
T_o=(T_i*ln_D+T_a*ln_B)/(ln_B+ln_D);
T_R=T_o+(T_i-T_o)*(log(R/r_i)/log(r_o/r_i));

DT=T_i-T_R;
K_1=alfa*E*DT/(2*(1-miu));
s_Ta=K_1*((2*(r_o/r_i)^2)/((r_o/r_i)^2-1)-(1+2*log(R/r_i))/log(r_o/r_i));
s_Tr=K_1*((r_o/r_i)^2-(r_o/R)^2)/((r_o/r_i)^2-1)-
log(R/r_i)/log(r_o/r_i);
s_Tt=K_1*((r_o/r_i)^2+(r_o/R)^2)/((r_o/r_i)^2-1)-
(1+log(R/r_i))/log(r_o/r_i);
s_Tc=((s_Tt)^2+(s_Tr)^2)^0.5;

a_1=PSF_a*a;
s_a1=PSF_s*s_a;
s_r1=PSF_s*s_r;
s_t1=PSF_s*s_t;
s_c1=PSF_s*s_c;
s_Ta1=PSF_s*s_Ta;
s_Tr1=PSF_s*s_Tr;
s_Tt1=PSF_s*s_Tt;
s_Tc1=PSF_s*s_Tc;

t=r_o-r_i;
aa=(a/t)/(1+(t/c));
g=1-(20*(aa^3)*(a/L_c)^0.75);
lamda=(1.818*c)/(a*r_i)^0.5;
Mt=((1.02+(0.4411*lamda^2)+(0.006124*lamda^4))/(1+(0.02642*lamda^2)+(0.00
0001533*lamda^4)))^0.5;
Ms=1/(1-(a/t)+(a/(t*Mt)));
Pb=s_a1*((t/r_i)-((3/2)*(t/r_i)^2)+((9/5)*(t/r_i)^3));

s_Pref=(g*Pb+(((g*Pb)^2)+9*((Ms)*(s_c1)*((1-aa)^2))^0.5))/(3*((1-
aa)^2));
L_Pref=s_Pref/s_ys;

t_Ri=t/r_i;
a_c=a_1/c;
a_t=a_1/t;
G01=G0yG1_f(t_Ri,a_c,a_t);
G_0=G01(1);
G_1=G01(2);

```

```

if a_c<=1
    Q=1+1.464*a_c^1.65;
else
    Q=1+1.464*a_c^-1.65;
end
K_PI=s_a1*(2*G_0-2*G_1*(a_1/r_i))*(pi*a_1/Q)^.5;

s_R=.2*(s_ys+10000);
Qm=s_R+s_Tc1;
Qb=s_Ta1*((t/r_i)-((3/2)*(t/r_i)^2)+((9/5)*(t/r_i)^3));
s_SRref=(g*Qb+(((g*Qb)^2)+9*((Ms)*(Qm)*((1-aa)^2))^2)^.5)/(3*((1-aa)^2));
K_SRI=Qm*G_0*(pi*a_1/Q)^.5;

L_SRref=s_SRref/s_ys;

PSIyFiv=PSIyFI_f(L_SRref,L_Pref);
PSIv=PSIyFiv(1);
Fiv=PSIyFiv(2);
FIM=1+PSIv/Fiv;

Jag=Janogen(ano);
Fatt=FATT(Jag);

Ti_F=T_i-Fatt;
if Ti_F>-128.89 && Ti_F<=93.33
    K_IC=33.2+2.8*exp(.02*(T_i-Fatt+100));
else
    K_IC=KICv_f(Fatt);
end
K_ICmod=K_IC/PSF_k;
K_r=(K_PI+FIM*K_SRI)/K_ICmod;

% GRAFICA
S_v=0:.05:FinFAD;
K_v=K_var(S_v);
S_r=L_Pref;

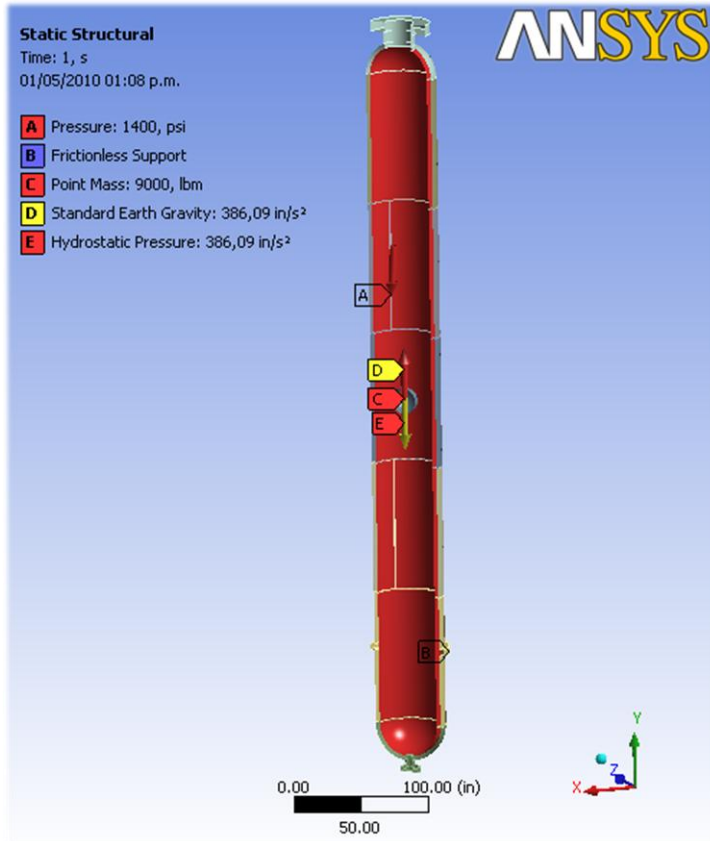
plot(S_v,K_v)
axis equal
axis([0 FinFAD 0 1.1])
set(findobj(gca,'Type','line','Color',[0 0 1]),'Color','red','LineWidth',2)
hold on
plot(S_r,K_r,'o','LineWidth',2,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','g','MarkerSize',8)
K_vlim=K_var(LimFAD);
line([LimFAD, LimFAD],[0,K_vlim])
CorteG=.80557;
line([0,CorteG],[0,CorteG])
xlabel('\sigma_r')
ylabel('K_r')
title('FAD (Diagrama de Evaluacion de Falla)')

```

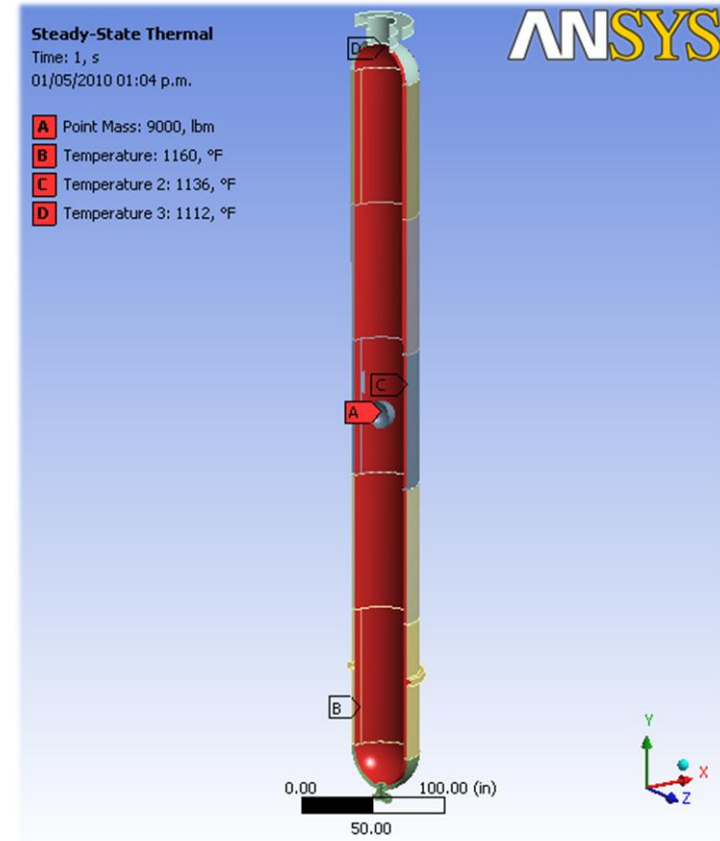
```
% REGION
K_vcom=K_var(S_r);
if K_r>K_vcom || S_r>LimFAD
    errordlg('Zona Inaceptable')
elseif K_r<S_r
    warndlg('Tendencia a Colapso plastio')
else
    msgbox('Tendencia a fractura fragil')
end
```

ANEXO B: Simulación del reactor de hidrotratamiento R 111B

Figura 49. Cargas aplicadas al reactor de hidrotreatmento para las simulaciones



(a)

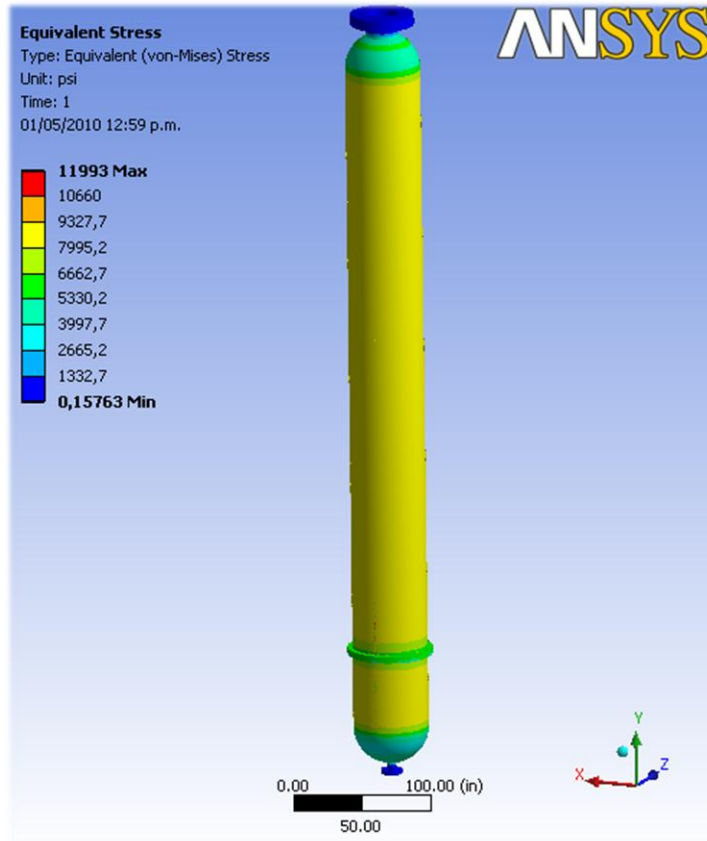


(b)

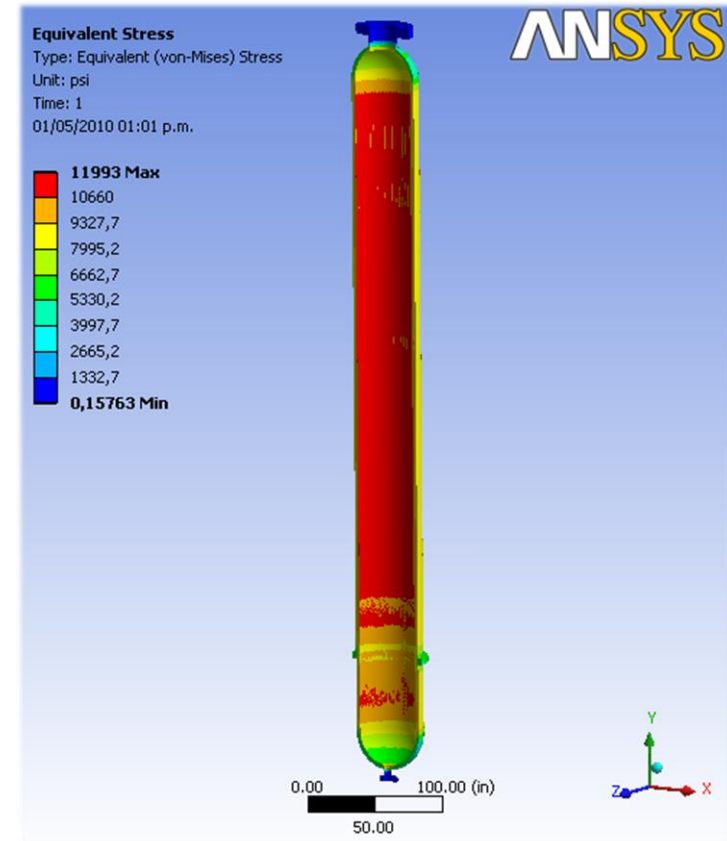
(a) Cargas estructurales. (b) Cargas térmicas.

Fuente: Autor del proyecto, ANSYS WORKBENCH 11.0.

Figura 50. Reactor ideal – estado estable – esfuerzos equivalentes



(a)

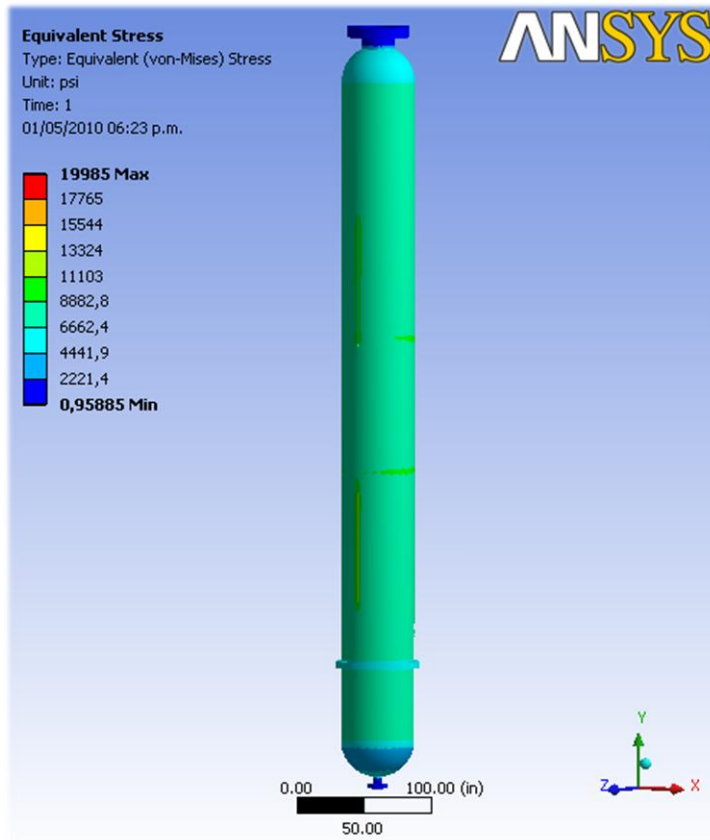


(b)

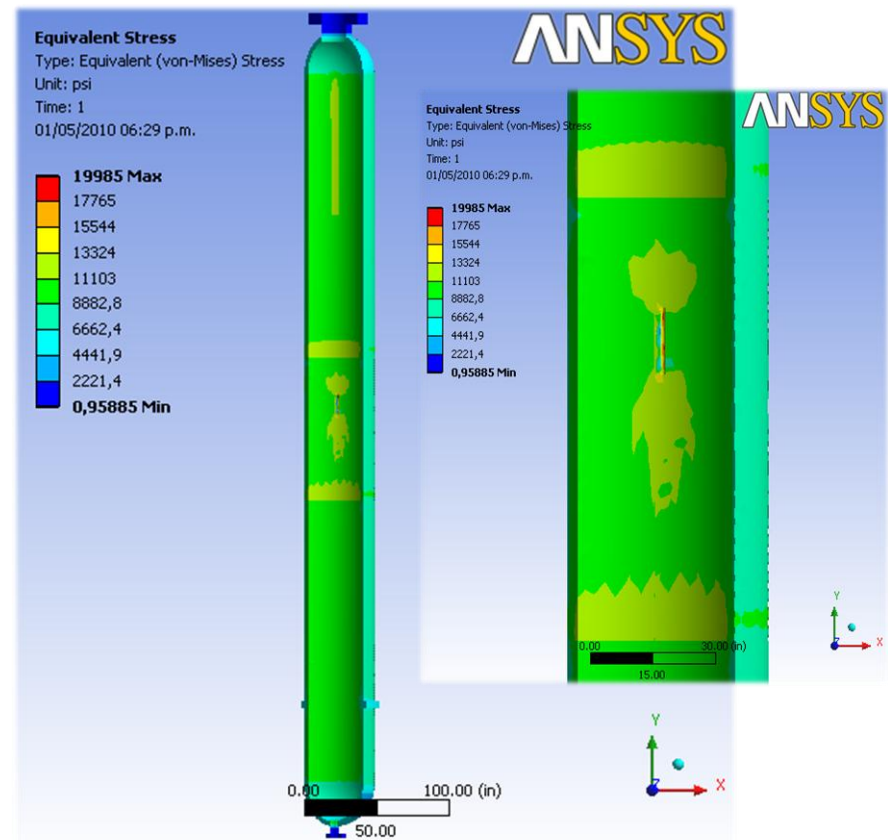
(a) Distribución de esfuerzos externa del reactor. (b) Distribución de esfuerzos interna del reactor.

Fuente: Autor del proyecto, ANSYS WORKBENCH 11.0.

Figura 51. Reactor grieta 1 – estado estable – esfuerzos equivalentes



(a)

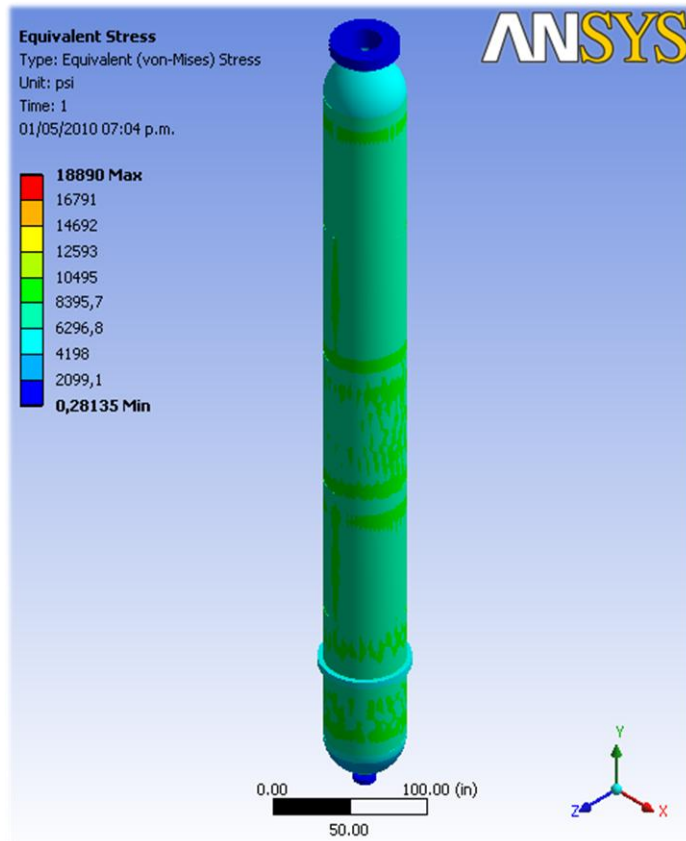


(b)

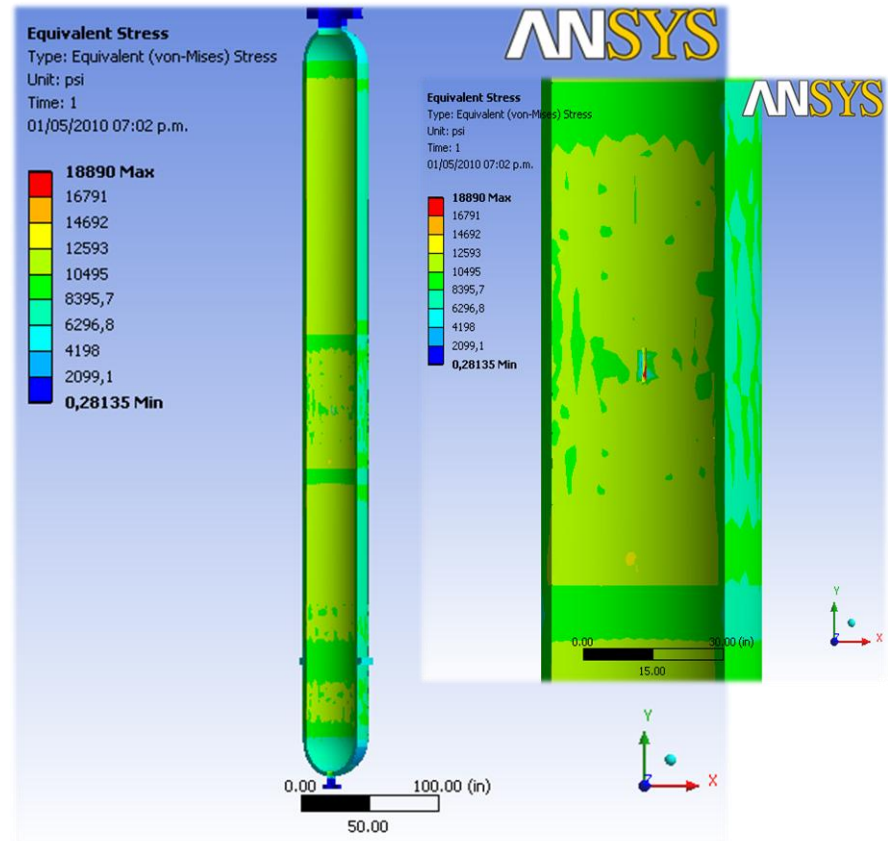
(a) Distribución de esfuerzos externa del reactor. (b) Distribución de esfuerzos interna del reactor.

Fuente: Autor del proyecto, ANSYS WORKBENCH 11.0.

Figura 52: Reactor grieta 2 – estado estable – esfuerzos equivalentes



(a)

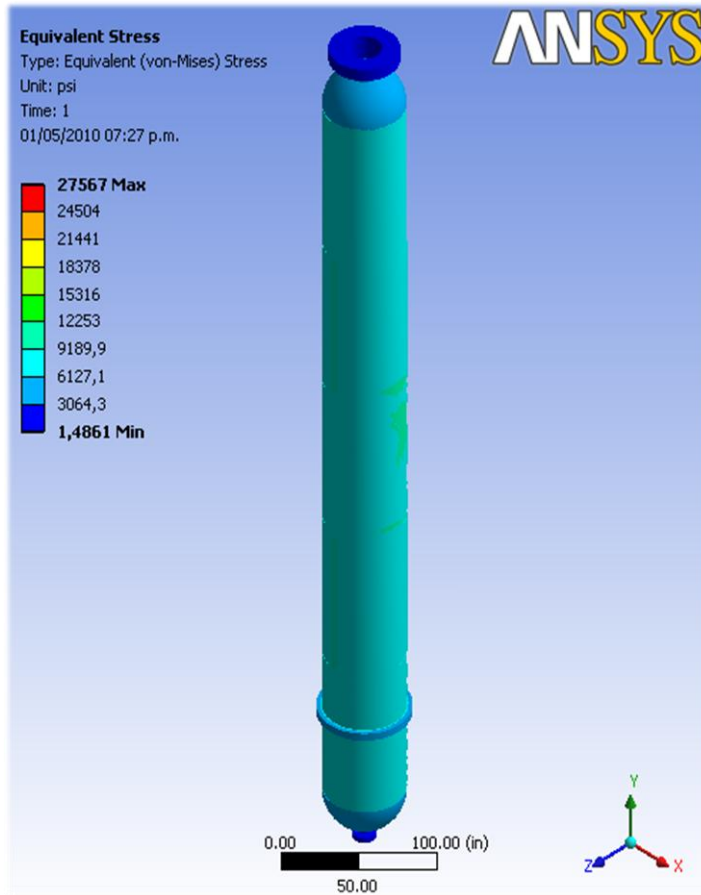


(b)

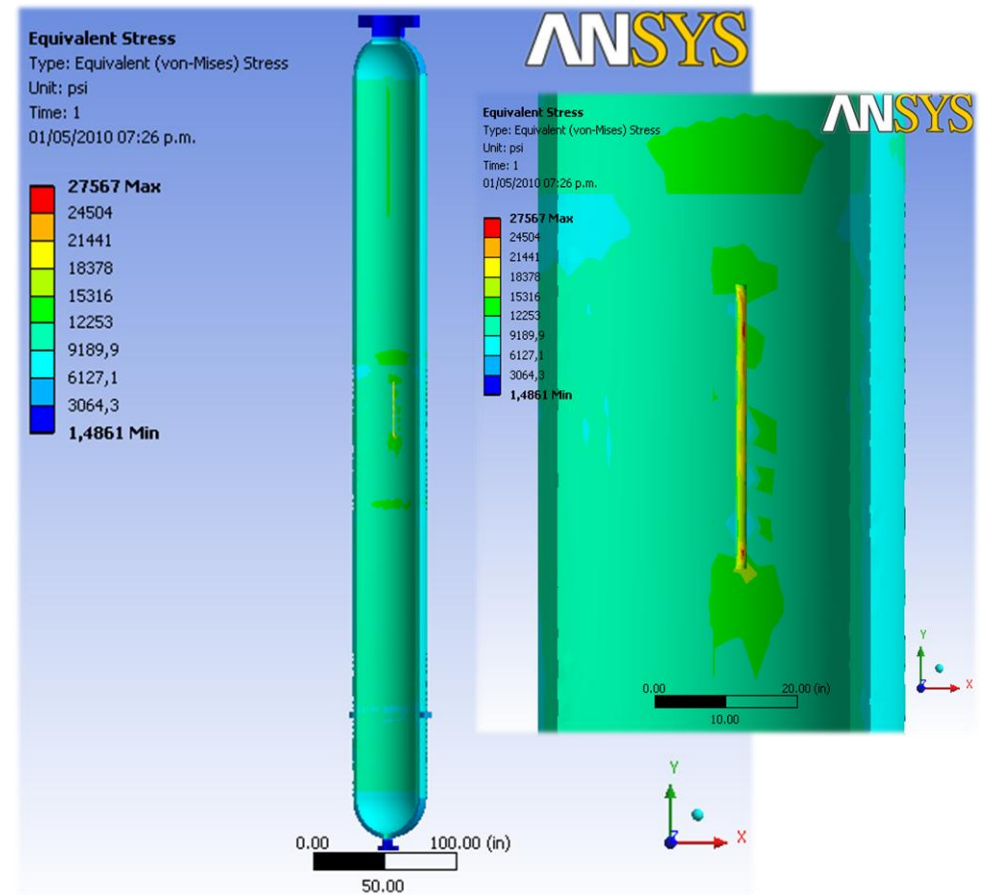
(a) Distribución de esfuerzos totales del reactor. (b) Distribución de esfuerzos en la zona de los defectos.

Fuente: Autor del proyecto, ANSYS WORKBENCH 11.0.

Figura 53. Reactor grieta 3 – estado estable – esfuerzos equivalentes



(a)

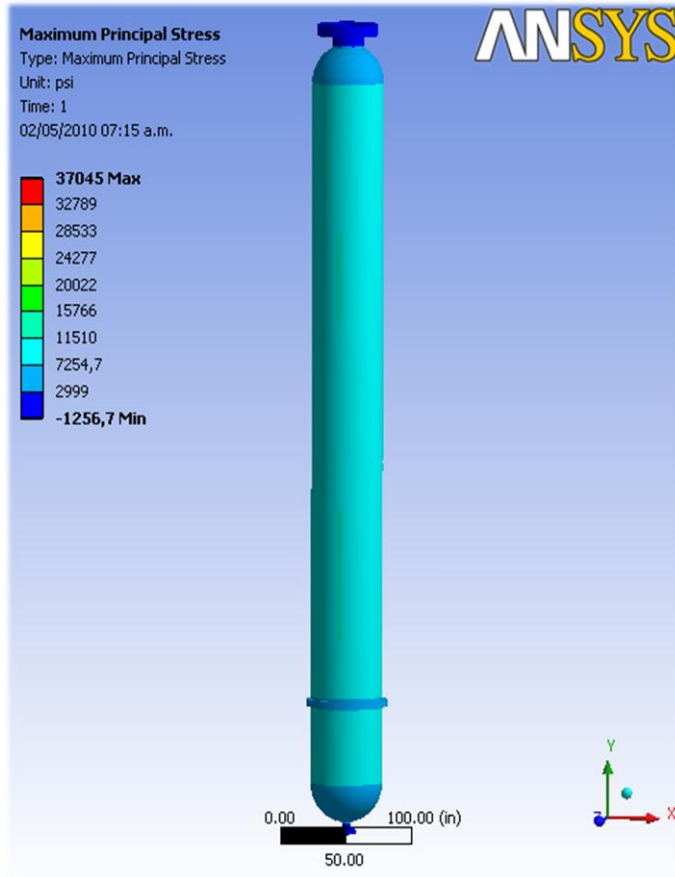


(b)

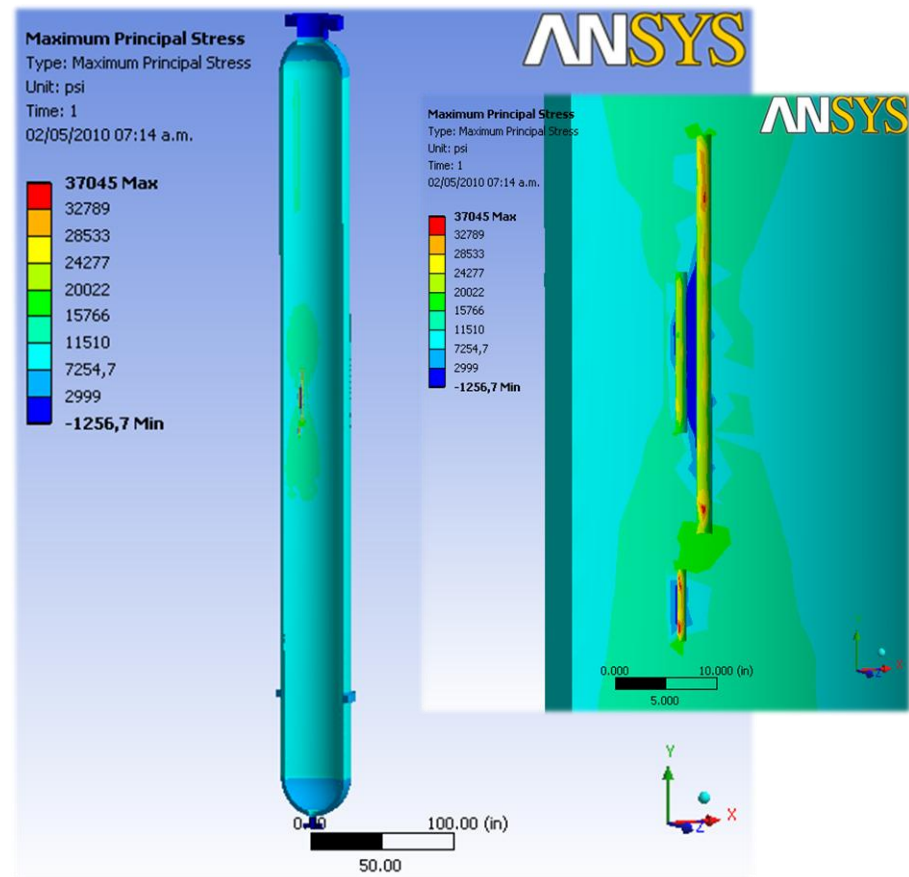
(a) Distribución de esfuerzos totales del reactor. (b) Distribución de esfuerzos en la zona de los defectos.

Fuente: Autor del proyecto, ANSYS WORKBENCH 11.0.

Figura 54. Reactor real (tres defectos) – estado estable – esfuerzos equivalentes



(a)

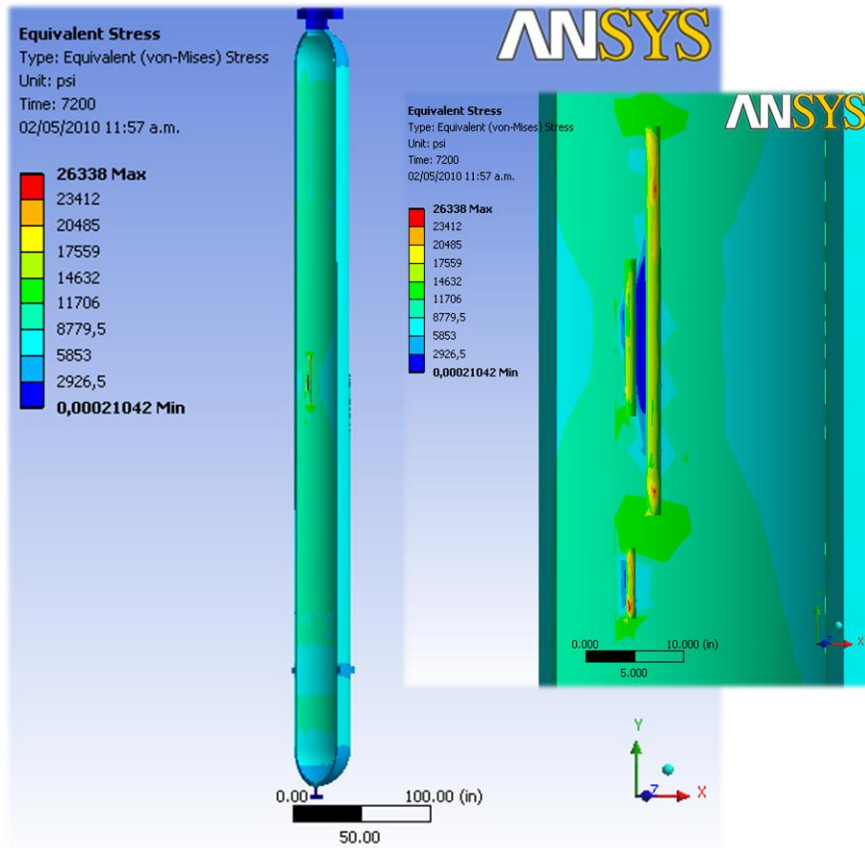


(b)

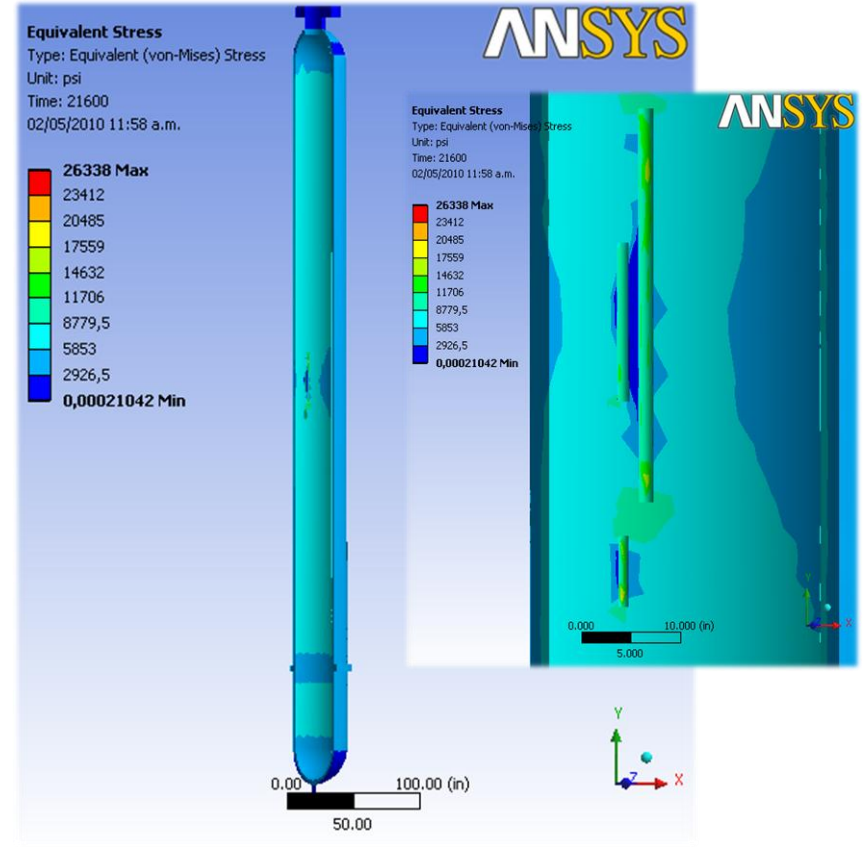
(a) Distribución de esfuerzos totales del reactor. (b) Distribución de esfuerzos en la zona de los defectos.

Fuente: Autor del proyecto, ANSYS WORKBENCH 11.0.

Figura 55. Reactor real (tres defectos) – estado transitorio enfriamiento – esfuerzos equivalentes



(a)

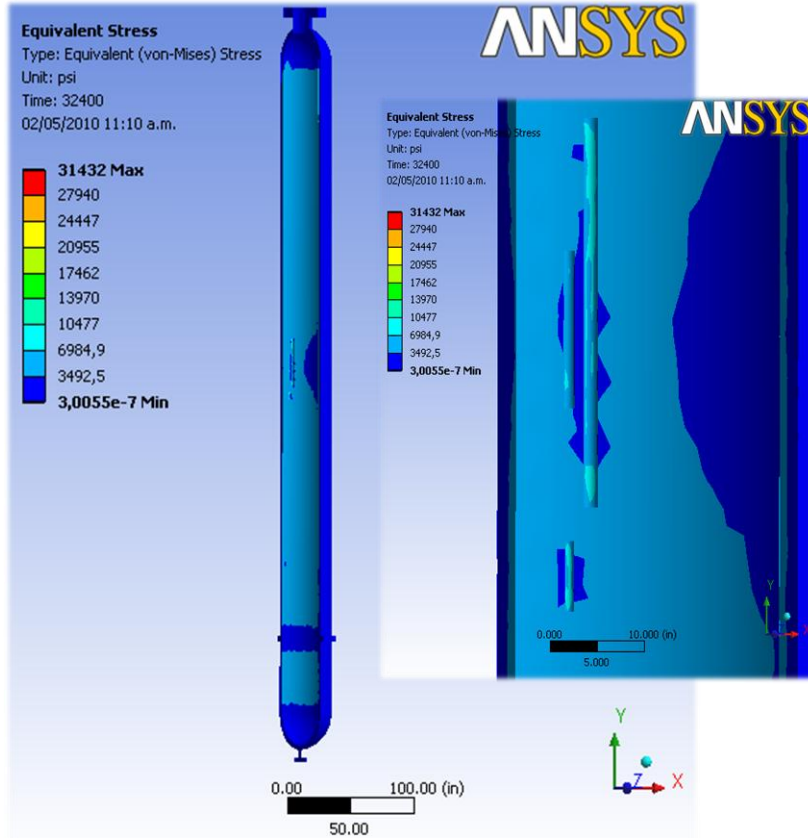


(b)

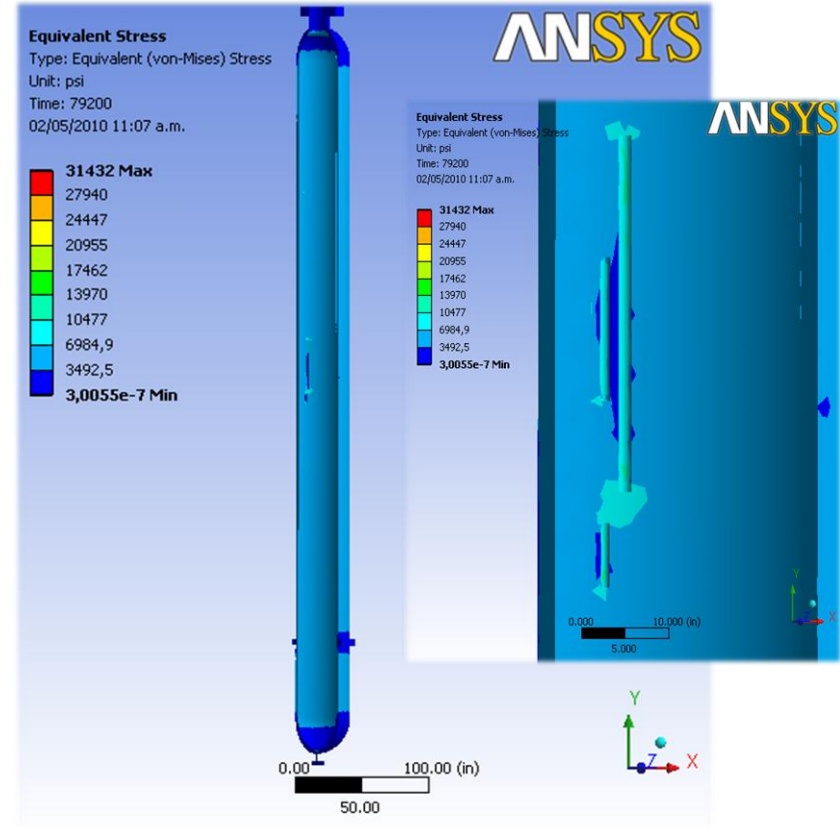
(a) Distribución de esfuerzos a los 7.200 segundos. (b) Distribución de esfuerzos a los 21.600 segundos.

Fuente: Autor del proyecto, ANSYS WORKBENCH 11.0.

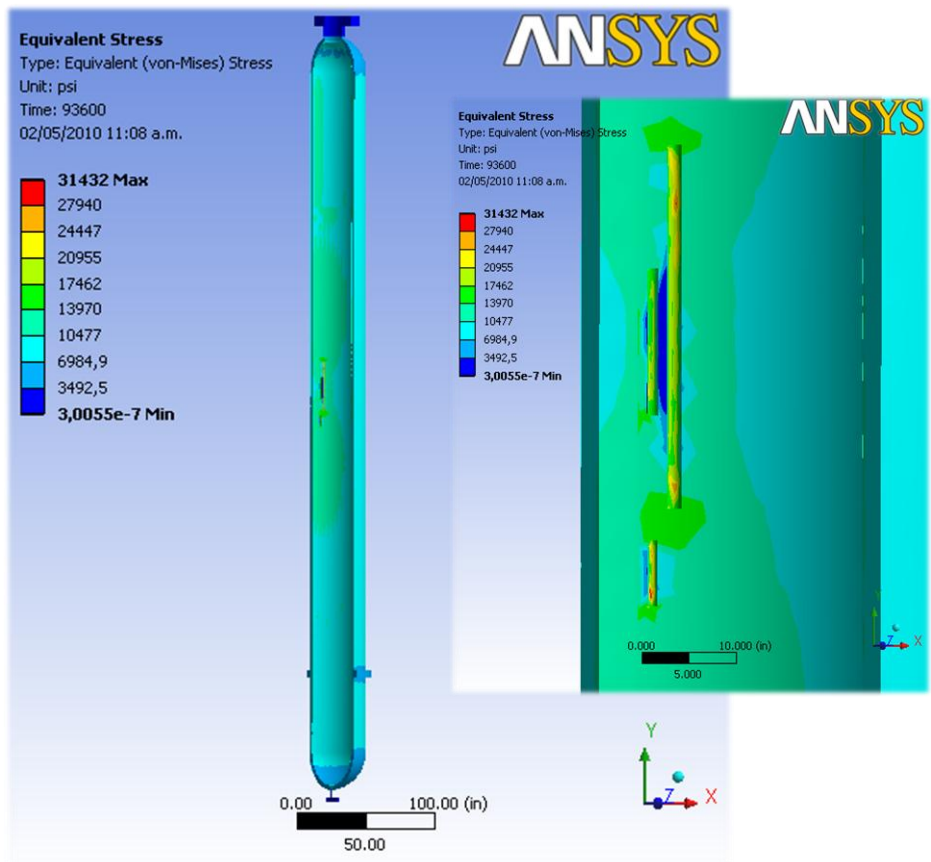
Figura 56. Reactor real (tres defectos) – estado transitorio calentamiento – esfuerzos equivalentes



(a)



(b)



(c)

(a) Distribución de esfuerzos a los 32.400 segundos. (b) Distribución de esfuerzos a los 79.200 segundos. (c) Distribución de esfuerzos a los 93.600 segundos.

Fuente: Autor del proyecto, ANSYS WORKBENCH 11.0.