

*Máster interuniversitario en integridad estructural y
durabilidad de materiales, componentes y estructuras*

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Título de trabajo:

***ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS TUBOS RECEPTORES DE
NUEVA GENERACIÓN EN PLANTAS TERMOSOLARES***

Entidad colaboradora: TSK

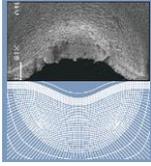
Tutor industrial o externo: Rogelio Peón

Tutor académico: Covadonga Betegón

Departamento: Construcción e ingeniería de fabricación

Universidad de Oviedo

Julio 2017



*Master interuniversitario en integridad estructural y
durabilidad de materiales, componentes y estructuras*

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Título de trabajo:

***ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS TUBOS RECEPTORES DE
NUEVA GENERACIÓN EN PLANTAS TERMOSOLARES***

Rogelio Peón

Tutor industrial

Covadonga Betegón

Tutor académico

Edgar Santos Guevara

Alumno

Universidad de Oviedo

Julio 2017



ÍNDICE

1.- Objetivos	1
2.- Introducción	2
3.- Antecedentes	3
4.- Fundamentación Teórica.....	4
4.1.- Energía termosolar	4
4.2.- Colector solar cilindro parabólico, CCP	4
4.3.- El tubo absorbedor o receptor.....	5
4.4.- El sistema de seguimiento solar.....	6
4.5.- El reflector cilindro parabólico.....	7
4.6.- La cimentación y la estructura soporte	8
4.7.- Fluido de transferencia de calor.....	9
4.8.- Acero inoxidable austenítico	10
5.- Cálculo Analítico.....	12
5.1.- Análisis tensional.....	12
5.1.1.- Configuración general	12
5.1.2.- Determinación de temperaturas.....	14
5.1.3.- Propiedades de material.....	15
5.1.4.- Condiciones de operación.....	16
5.1.5.- Carga axial	17
5.1.6.- Flexión	18
5.1.7.- Torsión.....	24
5.1.8.- Rigidez en estructura de apoyo	25
5.1.9.- Esfuerzo térmico	29
5.1.10.- Combinación de cargas.....	33
5.1.11.- Tensión de Von Mises	36
5.2.- Diseño según norma ASME.....	37
6.- Evaluación de la integridad estructural.....	39
6.1.- Evaluación en fractura	39
6.2.- Evaluación en fatiga.....	42
6.2.1.- Componente no agrietado	42



6.2.2.- Componente agrietado.....	44
7.- Análisis de Resultados.....	46
8.- Conclusiones	49
9.- Referencias Bibliográficas	50
10.- Simbología	52
Anexos	



LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1. Instalación de planta termosolar	4
Figura 4.2. Colector solar cilindro parabólico	5
Figura 4.3. Configuración de tubo receptor	6
Figura 4.4. Tubo receptor	6
Figura 4.5. Sistema de seguimiento solar con mecanismo eléctrico	7
Figura 4.6. Reflector cilindro parabólico	7
Figura 4.7. Radiación solar reflejada	8
Figura 4.8. Perfil de irradiación.....	8
Figura 4.9. Estructura soporte de colector cilindro parabólico	9
Figura 5.1. Configuración general de colector cilindro parabólico	12
Figura 5.2. Geometría de tubo de acero inoxidable	12
Figura 5.3. Geometría de tubo de vidrio	13
Figura 5.4. Geometría de elementos de soporte	13
Figura 5.5. Geometría de placa muelle de acero	13
Figura 5.6. Geometría de tubo cuadrado de acero	14
Figura 5.7. Diferentes temperaturas en la sección del tubo de acero inoxidable	14
Figura 5.8. Diagrama de deflexión por cargas de peso en tubo de acero.....	17
Figura 5.9. Tensión longitudinal debida a la presión.....	18
Figura 5.10. Tensión circunferencial debida a la presión	18
Figura 5.11. Diagramas de cortante y momento debidos a cargas de peso.....	19
Figura 5.12. Momento flector en el tubo, provocado por rótulas esféricas	19
Figura 5.13. Diagrama de momentos para viga de tres vanos.....	20
Figura 5.14. Diagrama de cuerpo libre para viga de tres vanos	20
Figura 5.15. Momento torsor en el tubo de acero, debido a rótulas esféricas.....	24
Figura 5.16. Geometría de placa muelle	25
Figura 5.17. Esquema de torsión en placa muelle	26
Figura 5.18. Sección de tubo cuadrado	26
Figura 5.19. Flexión en tubo cuadrado	27
Figura 5.20. Flexión en soporte simple, dos tubos cuadrados.....	28



Figura 5.21. Gradiente de temperaturas en tubo de acero inoxidable.....	29
Figura 5.22. Efecto de la variación de temperatura en tubo de acero inoxidable.....	30
Figura 5.23. Radio de curvatura en tubo de acero inoxidable, debido a variación de temperatura.....	31
Figura 5.24. Ángulo de deformación en tubo de acero inoxidable, debido a variación de temperatura	32
Figura 5.25. Momento debido a variación de temperatura	32
Figura 5.26. Deflexión debida a variación de temperatura	33
Figura 5.27. Tensiones longitudinales en diferentes puntos del tubo de acero inoxidable	33
Figura 5.28. Tensiones circunferenciales en diferentes puntos del tubo de acero inoxidable	35
Figura 6.1. Grieta superficial interna en el tubo de acero inoxidable	39
Figura 6.2. Diagrama de fallo – evaluación en fractura.....	41
Figura 6.3. Curva tensión aplicada y número de ciclos	43
Figura 6.4. Grieta superficial interna en el tubo de acero inoxidable	44



LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1.- Composición química del acero inoxidable austenítico	15
Tabla 5.1. Tensiones longitudinales en el tubo receptor de nueva generación	34
Tabla 5.2. Tensiones circunferenciales en el tubo receptor de nueva generación	35
Tabla 7.1. Resultados de cálculo analítico para tubo $e=2$ mm y $e=1.65$ mm.....	46
Tabla 7.2. Resultados según ASME II, parte D, para tubo $e=2$ mm y $e=1.65$ mm	46
Tabla 7.3. Resultados de evaluación en fractura para tubo $e=2$ mm y $e=1.65$ mm....	47
Tabla 7.4. Resultados de evaluación en fatiga para tubo $e=2$ mm y $e=1.65$ mm – no agrietado	47
Tabla 7.5. Resultados de evaluación en fatiga para tubo $e=2$ mm y $e=1.65$ mm – agrietado	48



1.- OBJETIVOS

- Establecer las propiedades y características del material de los tubos receptores de nueva generación en plantas termosolares.
- Realizar el análisis tensional, considerando los parámetros requeridos para el diseño y funcionamiento de los tubos receptores.
- Comparar los resultados obtenidos mediante cálculo analítico tradicional y las recomendaciones de cálculo según la norma ASME.
- Evaluar el comportamiento a fractura y fatiga de los tubos receptores.



2.- INTRODUCCIÓN

El presente estudio se enfoca en el análisis de uno de los elementos de las plantas termosolares, las cuales aprovechan la radiación solar, para la generación de energía eléctrica. El elemento de interés, es un tubo metálico de acero inoxidable, componente de un colector cilindro parabólico que recibe la radiación.

Se aborda un estudio basado en la mecánica de materiales. Además, se desarrolla un análisis relacionado a la mecánica de la fractura. Se establecen los criterios de diseño estructural y parámetros mínimos aceptables para garantizar el correcto funcionamiento y asegurar una larga vida del componente. Se siguen las recomendaciones de la norma ASME sección II [1], ASME B31.1-2012 [2] y British Standard 7910:2013 [3].

Se analizan dos tipos de tubos comerciales de acero inoxidable, con el objeto de establecer comparaciones y optimizar los recursos.

Es importante resaltar que el origen de este análisis, es uno de los ambiciosos proyectos que se surge en TSK electricidad y electrónica, una empresa sólida que tiene mucha trayectoria y sigue firme en el mercado mundial en el área de generación de energía. Este proyecto es el complemento a un estudio efectuado previamente.



3.- ANTECEDENTES

El uso de la energía solar, como fuente de calor para generar electricidad, ha incrementado un veinte por ciento en los últimos quince años a nivel mundial [4].

La radiación solar posee una elevada calidad termodinámica, al ser el resultado de procesos que tienen lugar en la superficie del Sol, a una temperatura equivalente de cuerpo negro, visto desde la Tierra de 5777 K. La radiación solar que llega a la superficie terrestre debe ser concentrada, para lograr temperaturas elevadas y convertir esta energía en trabajo mecánico, para la posterior generación de electricidad. Las plantas termosolares están constituidas por diversos elementos, por mencionar algunos tenemos: turbinas, condensadores, válvulas, sistemas propiamente solares que concentran y reciben la radiación, equipos de control y almacenamiento. Generalmente se emplean concentradores solares por reflexión para alcanzar las temperaturas requeridas en la operación de los ciclos termodinámicos, un claro ejemplo lo constituyen los concentradores cilindro-parabólicos, que emplean un sistema constituido, por tubos de acero inoxidable, que reciben la radiación solar y deben ser capaces de soportar altas temperaturas de operación. Se han realizado varios estudios para seleccionar el material más idóneo de los tubos receptores. Se busca optar por el material que sea capaz de ofrecer las mejores características en cuanto a composición química, resistencia mecánica, resistencia ante la corrosión, funcionalidad y durabilidad.

La tecnología de las plantas termosolares con captador cilindro parabólico, ha sido mejorada significativamente desde las primeras plantas, que se instalaron a principios de los años 80; se ha ido alcanzando una gran reducción de costes. A pesar de la clara reducción de costes, aún se está fuera del rango de competitividad con las plantas convencionales de ciclo combinado que consumen gas natural. Esto obliga a disminuir aún más el coste de la electricidad generada con las plantas termosolares con colectores cilindro parabólicos.

España ocupa un lugar de privilegio en tecnologías de helióstatos y concentradores cilindro parabólicos, así como en mecanismos de seguimiento solar [4].



4.- FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

4.1.- Energía termosolar

La energía termosolar o solar termoeléctrica, es la tecnología que usa el calor del Sol para generar electricidad. Este proceso se lleva a cabo en las centrales termosolares. Se emplean diversas técnicas para concentrar la energía del Sol. Los rayos solares se concentran mediante espejos en un receptor que alcanza temperaturas de hasta 1000°C. Esta radiación concentrada, calienta el fluido que circula en el interior, transformando la radiación solar en energía térmica, en forma de calor sensible o latente del fluido y de forma posterior producir vapor, que mueve una turbina y se genera la electricidad [5]. Es una energía limpia, abundante y renovable.

Las primeras centrales sólo podían operar durante las horas de irradiación solar, sin embargo, actualmente es posible almacenar el calor para generar en la noche [6]. Debido a la gran cantidad de elementos que la componen, para su implementación se requieren grandes áreas de suelo como se aprecia en la figura 4.1.



Figura 4.1. Instalación de planta termosolar [7]

4.2.- Colector solar cilindro parabólico, CCP

Es un captador solar de concentración, que transforma la radiación solar directa en energía térmica, calentando un fluido de trabajo. Consiste en un concentrador cilindro parabólico que refleja la radiación solar directa sobre la línea focal de la parábola, en la que se sitúa el tubo receptor, como se muestra en la figura 4.2.

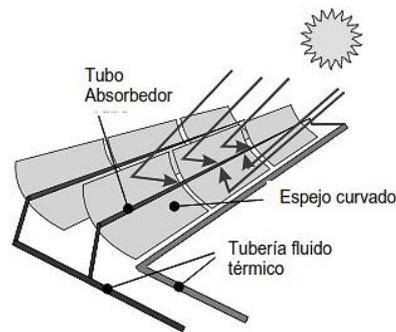


Figura 4.2. Colector solar cilindro parabólico [8]

Desde el punto de vista estructural, este tipo de colectores se compone de cuatro elementos principales:

- El tubo absorbedor o receptor.
- El sistema de seguimiento solar.
- El reflector cilindro parabólico.
- La cimentación y la estructura soporte.

4.3.- El tubo absorbedor o receptor

El receptor lineal del colector solar cilindro parabólico, CCP, es el elemento que convierte la radiación solar concentrada en energía térmica que transporta el fluido calorífero. Se encuentra en la línea focal del concentrador cilindro parabólico, conectado a la estructura mediante unos soportes metálicos. Es uno de los elementos fundamentales de todo CCP, ya que afecta mucho el rendimiento global del colector. Consiste en dos tubos concéntricos: uno interior metálico, por el que circula el fluido calorífero, y otro exterior de cristal, como se muestra en la figura 4.3 y figura 4.4. El tubo metálico lleva un recubrimiento selectivo que posee una elevada absorptividad ($\sim 94\%$) y una baja emisividad en el espectro infrarrojo ($\sim 15\%$). La mayoría de los recubrimientos se degradan en contacto con el aire cuando están calientes, por lo que se requiere que exista un alto vacío en la cámara que queda entre el tubo metálico interior y la cubierta de cristal. El tubo de cristal que rodea al tubo interior metálico, protege el recubrimiento selectivo de las incidencias meteorológicas y reduce las pérdidas térmicas por convección en el tubo receptor. Este tubo suele llevar un tratamiento antirreflexivo en sus dos caras, para aumentar su transmisividad y, en consecuencia, el rendimiento óptico del colector.

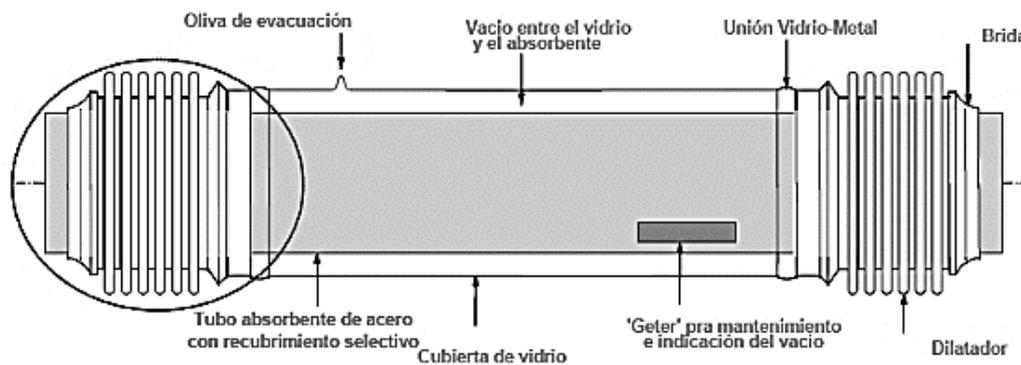


Figura 4.3. Configuración de tubo receptor [8]



Figura 4.4. Tubo receptor [9]

4.4.- El sistema de seguimiento solar

Los colectores solares cilindro parabólicos, CCP, sólo pueden aprovechar la radiación solar directa, lo que exige que el colector vaya modificando su posición durante el día. Este movimiento se consigue mediante el giro alrededor de un eje paralelo a su línea focal.

El sistema de seguimiento más común consiste en un dispositivo que gira los reflectores cilindro parabólicos del colector alrededor de un eje. Normalmente, los CCP se instalan de forma que su eje de giro quede orientado en la dirección Este-Oeste o Norte-Sur. La rotación del colector se realiza mediante un mecanismo eléctrico o hidráulico, que mueve el colector de acuerdo con la posición del Sol. Los mecanismos eléctricos son adecuados para colectores de tamaño pequeño o medio, como se tiene en la figura 4.5, mientras que para colectores grandes se requiere el uso de mecanismos hidráulicos. Con el fin de reducir los costes y simplificar la construcción, un solo mecanismo debe ser capaz de mover varios módulos concentradores conectados en serie.



Figura 4.5. Sistema de seguimiento solar con mecanismo eléctrico [9]

4.5.- El reflector cilindro parabólico

La misión del reflector cilindro parabólico es reflejar y proyectar la radiación solar de forma concentrada sobre el tubo receptor situado en la línea focal de la parábola del reflector, como se ve en la figura 4.6. Para llevar a cabo la reflexión, se utilizan películas de plata o aluminio depositadas sobre un soporte que le da suficiente rigidez. Estos medios de soporte pueden ser de chapa metálica, plástico o cristal.



Figura 4.6. Reflector cilindro parabólico [8]

La radiación solar concentrada, figura 4.7, no incide sobre toda la superficie externa del tubo, porque el concentrador parabólico no rodea todo el tubo y existe un gradiente térmico circunferencial. El perfil de la irradiancia sobre la cara externa del tubo no es homogéneo, teniendo zonas con intensidad diferente, como se aprecia en la figura 4.8.

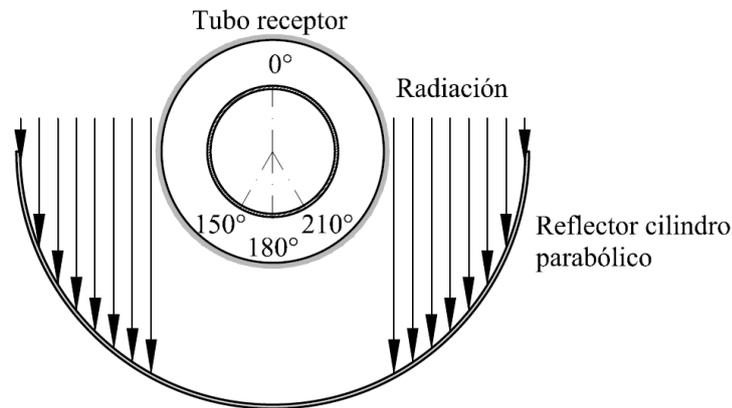


Figura 4.7. Radiación solar reflejada

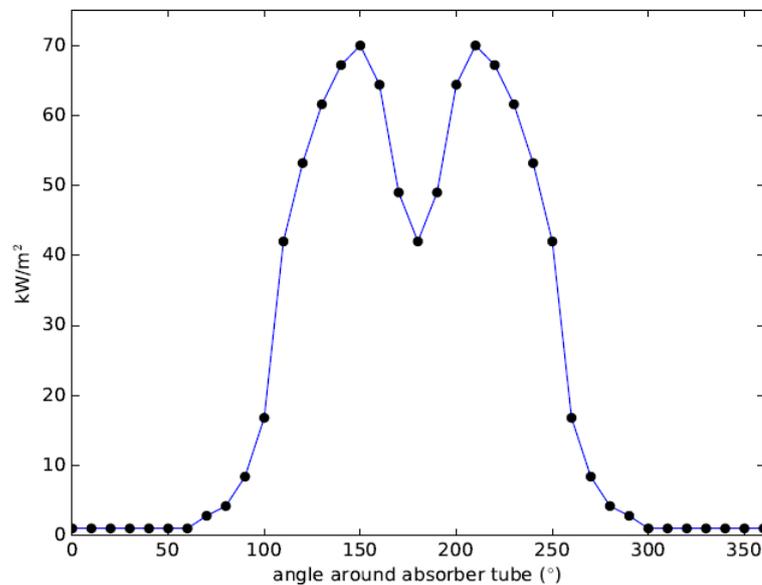


Figura 4.8. Perfil de irradiación

Existe una diferencia de temperatura entre la parte baja y la parte alta del tubo receptor, al mediodía la parte baja está más caliente que la parte alta.

4.6.- La cimentación y la estructura soporte

En el caso de chapa metálica, el mismo material tiene la doble función de soporte y reflectante. Para ello se suelen usar chapas de aluminio con una reflectancia especular de 80% aproximadamente. La principal ventaja de este sistema es su bajo coste. En el caso de plástico se trata de una película de plata o aluminio sobre una fina lámina de plástico. Como en el caso anterior, el principal problema de estas películas reflectoras es su baja durabilidad, ya que su reflectancia se disminuye rápidamente. La opción que más se utiliza es emplear vidrio como medio soporte. En este caso, se deposita sobre el vidrio una fina película de plata protegida por una película de cobre y otra de pintura. Si se emplea vidrio grueso



(espesor > 3 mm) como soporte, antes de depositar la película de plata, el vidrio es curvado en caliente, en hornos especiales, para que adopte la forma parabólica que debe tener, de modo que los espejos pueden ir colocados directamente sobre la estructura metálica del colector. Cuando el espesor del vidrio es pequeño (espesor < 1.5 mm), los espejos pueden pegarse directamente sobre un soporte metálico, de fibra de vidrio o de otro material, que es el que asegura la adecuada curvatura del concentrador. En la figura 4.9, se pueden ver los soportes de un colector cilindro parabólico.



Figura 4.9. Estructura soporte de colector cilindro parabólico [8]

4.7.- Fluido de transferencia de calor

El rango de temperatura ideal para trabajar con colectores cilindro parabólicos es $150^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$. Para temperaturas superiores las pérdidas térmicas de este tipo de colectores son altas y reducen su rendimiento. Para temperaturas inferiores a 150°C hay otros colectores más económicos. El tipo de fluido de trabajo que se utiliza en los CCP depende de la temperatura que se desea alcanzar. Existe una amplia variedad de fluidos térmicos para canales parabólicos, siendo los principales: aceites o siliconas sintéticos, aceites minerales, sales fundidas, agua, líquidos iónicos, aire u otro gas.

Si las temperaturas que se desean son moderadas ($<150^{\circ}\text{C}$) la utilización de agua desmineralizada como fluido de trabajo no conlleva grandes problemas ya que la presión de trabajo no es excesiva. En cambio, se utiliza aceite sintético en aquellas aplicaciones donde se desean temperaturas más altas ($125^{\circ}\text{C} < T < 400^{\circ}\text{C}$). La explicación de este hecho consiste en que para temperaturas altas las tuberías estarían sometidas a elevadas presiones si el fluido de trabajo fuera agua, porque para evitar que se evapore el agua es necesario mantenerla en todo momento a una presión superior a la de saturación correspondiente a la temperatura máxima que alcance el agua en los colectores solares. Esto significa, por ejemplo, que, si se desea tener agua caliente a 317°C a la salida de los colectores, la presión en el circuito tendrá que ser superior a 10MPa. En cambio, puesto que la presión de vapor del aceite para estas temperaturas es mucho menor que la del agua, se puede calentar aceite a 317°C sin tener que mantener el circuito a más de 1,5MPa. Trabajar a menores presiones hace posible usar



materiales más económicos para las tuberías y simplifica la instalación y sus medidas de seguridad.

Las opciones disponibles para una planta comercial se reducen a los aceites y siliconas sintéticos. Entre estos, los más conocidos y empleados son el óxido de bifenil-difenil (Therminol VP-1 de Solutia, Dowtherm A de Dow Chemical) [8].

4.8.- Acero inoxidable austenítico

Los aceros inoxidables son aleaciones de hierro con un mínimo de un 10,5% de cromo. Sus características se obtienen mediante la formación de una película adherente e invisible de óxido de cromo.

Los aceros inoxidables austeníticos se caracterizan por una adición importante de níquel y/o también de manganeso, que son elementos gammágenos, cuyo efecto es contrario al del cromo, es decir, que la adición de níquel aumenta el rango térmico de estabilidad del acero según la forma austenítica.

La austenita, o acero *gamma* (γ), es una forma de ordenamiento de la estructura cristalina del acero por parte de los átomos de hierro y carbono. La estructura cristalina austenítica que resulta es del tipo cúbica centrada en las caras (FCC), donde los átomos de hierro ocupan los vértices del retículo cúbico y el centro de las caras, mientras que los átomos de carbono, en un porcentaje máximo de carbono del 2,11%, se presentan como elemento intersticial, ocupando los huecos internos que dejan dentro de la estructura los átomos de hierro. Las formas austeníticas son en general de naturaleza dúctil, blanda y tenaz.

El acero inoxidable es esencialmente no magnético en estado recocido y sólo puede endurecerse en frío.

Uno de los problemas típicos que se pueden presentar en los aceros inoxidables austeníticos es la corrosión intergranular, fenómeno conocido también como sensibilización del acero. El proceso de sensibilización suele estar ligado a los calentamientos a que se ven sometidas aquellas zonas afectadas térmicamente por un proceso de soldadura en los aceros, de manera que un acero sensibilizado puede sufrir corrosión intergranular en ambientes donde normalmente no deberían tener ningún tipo de corrosión. El proceso de corrosión intergranular en los aceros austeníticos ocurre cuando estos aceros permanecen durante un cierto tiempo en un rango de temperatura de entre 600 y 800 °C, o cuando hayan sido enfriados lentamente durante este rango térmico. Cuando ocurren estas circunstancias se produce una precipitación intergranular (entre las juntas de granos de austenita) de compuestos de carburos de cromo, de manera que las zonas adyacentes a donde se producen estos precipitados quedan muy empobrecidas en cromo (porcentaje en Cr < 12%), por lo que dejan de ser inoxidables al carecer de la protección del cromo y quedan expuestos a la corrosión. Fuera del rango de temperatura de entre 600 y 800 °C no ocurre este fenómeno. En efecto, por encima de los 900 °C no puede producirse la precipitación dado que el carbono



y el cromo se disuelven perfectamente en la austenita y, por otro lado, a temperaturas inferiores a los 600 °C, la difusión es tan lenta que la precipitación es imperceptible.

Para evitar los fenómenos de corrosión intergranular en los aceros austeníticos se suelen utilizar enfriamientos bruscos en agua en el recocido de los aceros, o bien, se pueden emplear aceros con bajo contenido de carbono (grados L, con un porcentaje de C < 0,03%), dado que a medida que se reduce el contenido en carbono en el acero la precipitación de carburos se hace más lenta. Otra forma efectiva de evitar los riesgos de corrosión intergranular de los aceros inoxidables es el uso de pequeñas adiciones de elementos fuertemente carburígenos (como el titanio, niobio o tántalo) en los grados, denominados estabilizados: 321 y 347. En estos aceros los carburos que precipitan en las regiones susceptibles son del tipo TiC o bien NbC, de manera que las regiones adyacentes mantienen suficiente contenido en cromo sin precipitar como para evitar la corrosión local.

Cuando un acero inoxidable haya sufrido de sensibilización, es decir, de corrosión intergranular por precipitación de carburos de cromo, éste se puede recuperar aplicando al acero un calentamiento de solubilización hasta mantenerlo en un rango de temperatura de 1000 a 1100 °C, seguido de un enfriamiento rápido en agua.

La resistencia a la oxidación a alta temperatura de los aceros inoxidables es función directa de su contenido en cromo. De este modo los aceros con menos de 18% de cromo se deben utilizar en aquellas aplicaciones donde las temperaturas sean inferiores a 800°C, mientras que cuando se requieran aceros que soporten temperaturas superiores a los 1000 °C, aceros denominados refractarios, habrá que recurrir a tipos con un contenido en cromo en torno al 25% [10].



5.- CÁLCULO ANALÍTICO

5.1.- Análisis tensional

5.1.1.- Configuración general

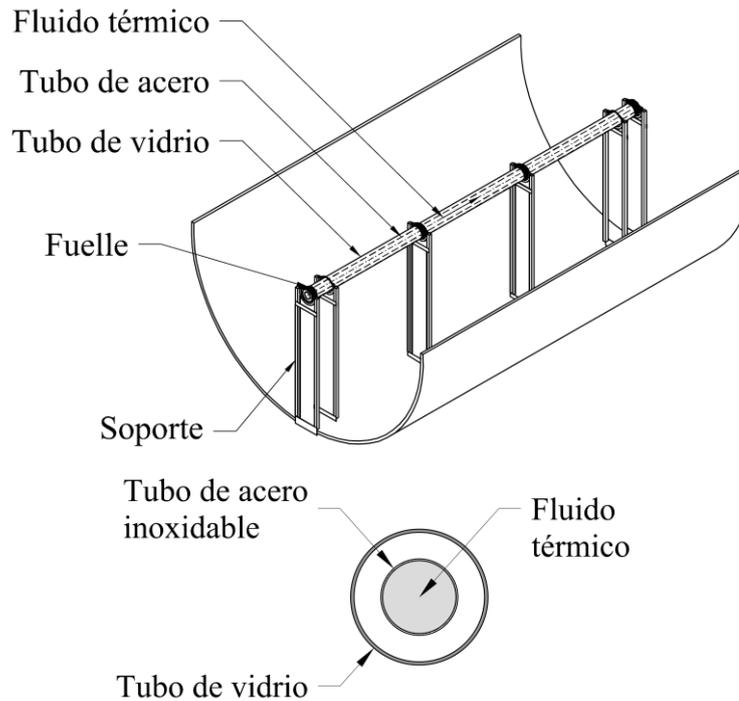


Figura 5.1. Configuración general de colector cilindro parabólico

5.1.1.1.- Geometría del tubo

Tubo de acero

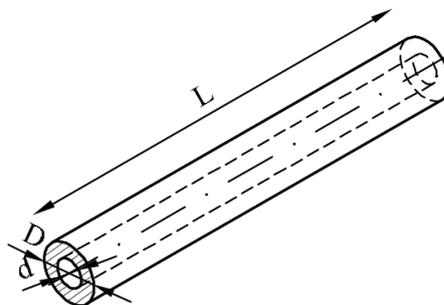


Figura 5.2. Geometría de tubo de acero inoxidable

$$D = 70 \pm 3 = 70.3 \text{ mm}$$

$$e = 2 \pm 0.2 = 1.8 \text{ mm}$$

$$L = 4092 \text{ mm}$$

Tubo de vidrio

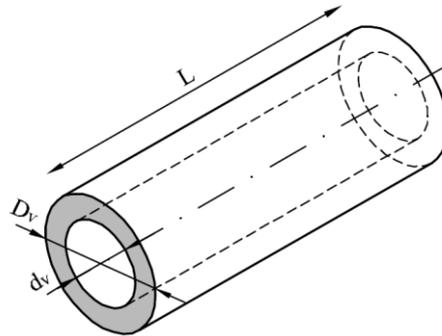


Figura 5.3. Geometría de tubo de vidrio

$$D_v = 125 \text{ mm}$$

$$e = 3 \text{ mm}$$

$$L = 4092 \text{ mm}$$

5.1.1.2.- Geometría del soporte

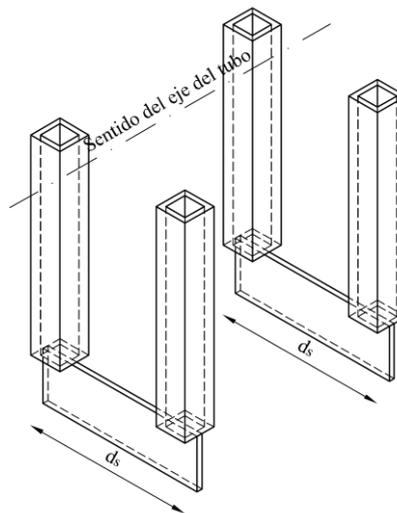


Figura 5.4. Geometría de elementos de soporte

$$d_s = 200 \text{ mm}$$

Placa muelle $80 \times 2 \times 270 \text{ mm}$

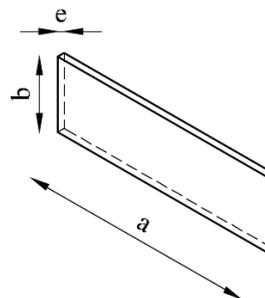


Figura 5.5. Geometría de placa muelle de acero

$$a = L_1 = 270 \text{ mm}$$

$$b = 80 \text{ mm}$$

$$e = 2 \text{ mm}$$

Tubo cuadrado 30×2 mm

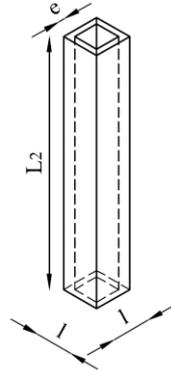


Figura 5.6. Geometría de tubo cuadrado de acero

$$L_2 = 1420 \text{ mm}$$

$$l = 30 \text{ mm}$$

$$e = 2 \text{ mm}$$

5.1.2.- Determinación de temperaturas

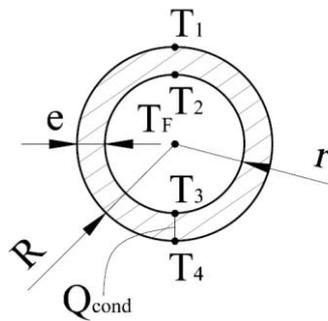


Figura 5.7. Diferentes temperaturas en la sección del tubo de acero inoxidable

Datos existentes

$$T_1 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_3 = 430 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_4 = 437 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_F = 400 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R = 35.15 \text{ mm}$$

$$r = 33.35 \text{ mm}$$



$$e = 1.8 \text{ mm}$$

La concentración de la radiación solar absorbida por el tubo es:

$$Q_{cond} = \frac{2\pi k_{abs}(T_4 - T_3)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

$$T_{abs} = \frac{T_3 + T_4}{2} = 433.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$k_{abs} = 14.8 + 0.0153 \cdot T_{abs} = 21.44 \frac{W}{m \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$Q_{cond} = 18646.09 \frac{W}{m}$$

La temperatura recomendada es la comprendida entre el fluido y el punto más caliente del tubo de acero inoxidable

$$T_{diseño} = T = \frac{T_F + T_4}{2} = 419 \text{ }^\circ\text{C}$$

5.1.3.- Propiedades de material

Considerando la temperatura de diseño:

$$T = 419 \text{ }^\circ\text{C}$$

5.1.3.1.- Acero inoxidable austenítico

Debe estar constituido por los siguientes elementos químicos:

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N	Ti
0.08	2.00	0.045	0.03	1.00	17.0 - 19.0	9.0 - 12.0	0.10	5C - 0.7

Tabla 5.1.- Composición química del acero inoxidable austenítico

$$\rho_{AC} = 7800 \text{ kg/m}^3$$

$$E = 167000 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.3$$

$$\alpha = 2.15 \times 10^{-5} \frac{\text{mm}}{\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\sigma_y = 109 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{adm} = 99.7 \text{ MPa}$$



5.1.3.2.- Vidrio

$$\rho_V = 2500 \text{ kg/m}^3$$

5.1.3.3.- Fluido térmico

$$\rho_F = 653 \text{ kg/m}^3$$

5.1.4.- Condiciones de operación

5.1.4.1.- Presión interna

Dato existente

$$p = p_F = 29 \text{ bar} = 2.9 \text{ MPa}$$

5.1.4.2.- Determinación de cargas debidas al peso

Acero inoxidable

$$D = 0.0703 \text{ m}$$

$$d = 0.0667 \text{ m}$$

$$A_{AC} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = 0.0003874 \text{ m}^2$$

$$V_{AC} = A_{AC} \cdot L = 0.00159 \text{ m}^3$$

$$m_{AC} = \rho_{AC} \cdot V_{AC} = 12.36 \text{ kg}$$

$$I_x = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) = 2.274 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = 64231 \text{ MPa}$$

Vidrio

$$D_V = 0.125 \text{ m}$$

$$d_V = 0.119 \text{ m}$$

$$A_V = \frac{\pi(D_V^2 - d_V^2)}{4} = 0.00115 \text{ m}^2$$

$$V_V = A_V \cdot L = 0.004705 \text{ m}^3$$

$$m_V = \rho_V \cdot V_V = 11.76 \text{ kg}$$

Fuelles (dato existente)



$$m_{Fu} = 3 \text{ kg}$$

Fluido térmico

$$A_F = \frac{\pi d^2}{4} = 0.00349 \text{ m}^2$$

$$V_F = A_F \cdot L = 0.01430 \text{ m}^3$$

$$m_F = \rho_F \cdot V_F = 9.3 \text{ kg}$$

La suma de masas de todos los elementos es

$$m_T = m_{AC} + m_V + m_{Fu} + m_F = 36.5 \text{ kg}$$

El peso de todos los elementos es

$$W_T = m_T \cdot g = (36.5 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 357.7 \text{ N}$$

Deflexión debida al peso

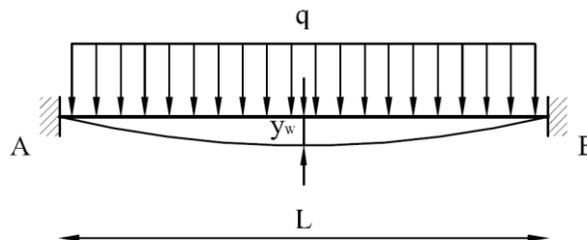


Figura 5.8. Diagrama de deflexión por cargas de peso en tubo de acero

Para $L/2$

$$y_w = \frac{q \cdot L^4}{384E \cdot I} = \frac{W \cdot L^3}{384E \cdot I} = 0.0017 \text{ m}$$

5.1.5.- Carga axial

$$p = p_F = 29 \text{ bar} = 2.9 \text{ MPa}$$

$$r = \frac{d}{2} = 0.0333 \text{ m}$$

Tensión longitudinal

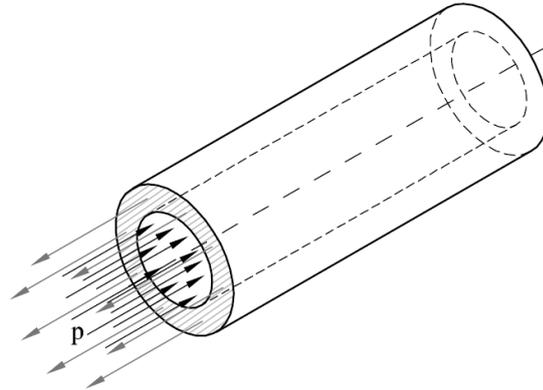


Figura 5.9. Tensión longitudinal debida a la presión

$$\sigma_L = \frac{p \cdot r}{2e} = 26.2 \text{ MPa}$$

Tensión circunferencial

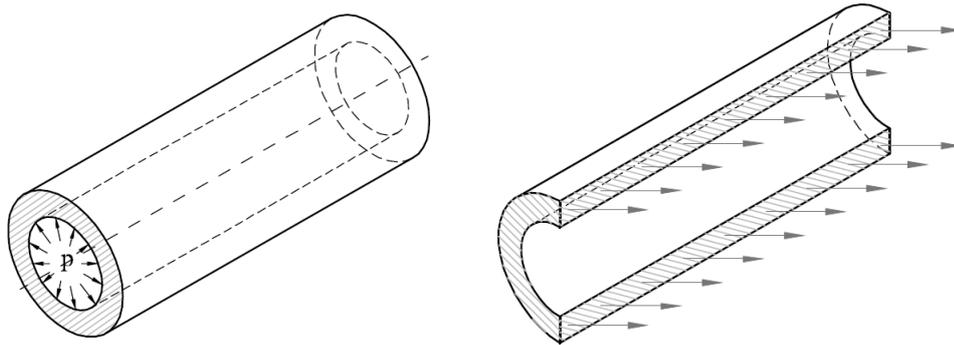


Figura 5.10. Tensión circunferencial debida a la presión

$$\sigma_T = \frac{p \cdot r}{e} = 53.7 \text{ MPa}$$

5.1.6.- Flexión

Diagrama del cuerpo libre, tomando en cuenta el caso crítico, viga simple empotrada, carga uniforme, q, en todo el vano.

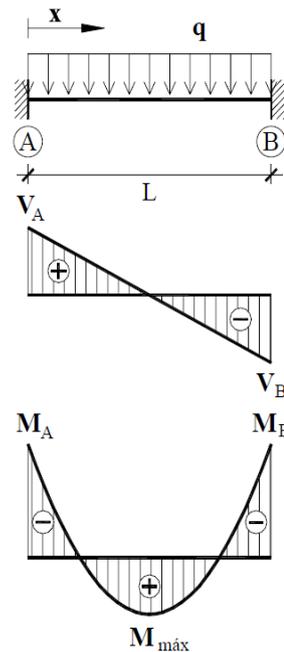


Figura 5.11. Diagramas de cortante y momento debidos a cargas de peso

$$M_A = M_B = \frac{q \cdot L^2}{12}$$

Flexión tomando en cuenta el efecto de las masas de los componentes

$$M_{F1} = \frac{q \cdot L^2}{12} = \frac{W \cdot L^2}{L \cdot 12} = \frac{W \cdot L}{12} = 122 \text{ MPa}$$

$$\sigma_W = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{M_{F1} \cdot D}{I_x \cdot 2} = 18.9 \text{ MPa}$$

Cortante debido al peso de los componentes

$$\tau_W = \frac{\sigma}{2} = \frac{W_T}{2 \cdot A_{AC}} = 0.5 \text{ MPa}$$

Momento flector externo, debido a rótulas esféricas en los extremos

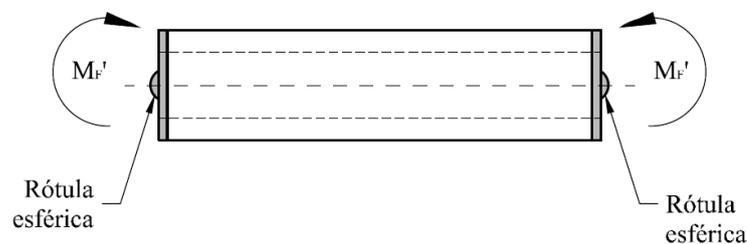


Figura 5.12. Momento flector en el tubo, provocado por rótulas esféricas

$$M'_F \approx 0$$

Rigidez flexional del tubo, se considera la siguiente configuración

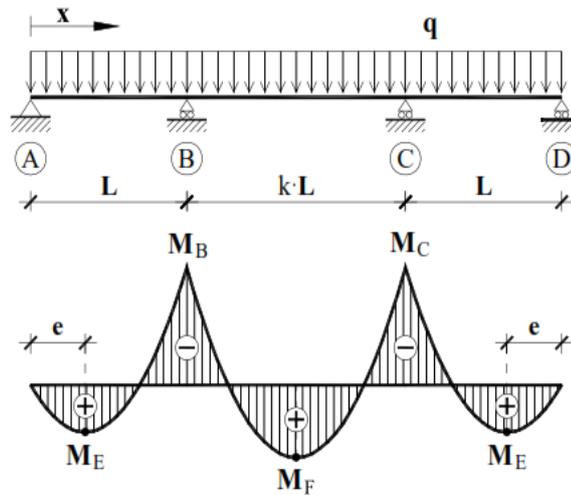


Figura 5.13. Diagrama de momentos para viga de tres vanos

El teorema de Mohr, indica

Para variaciones angulares

$$\theta_{A-B} = \int_A^B \frac{M_F(x)}{E \cdot I_Z} dx$$

Para deflexiones

$$y_{B-A} = \int_A^B \frac{M_F(x)}{E \cdot I_Z} dx$$

Aplicando a este caso

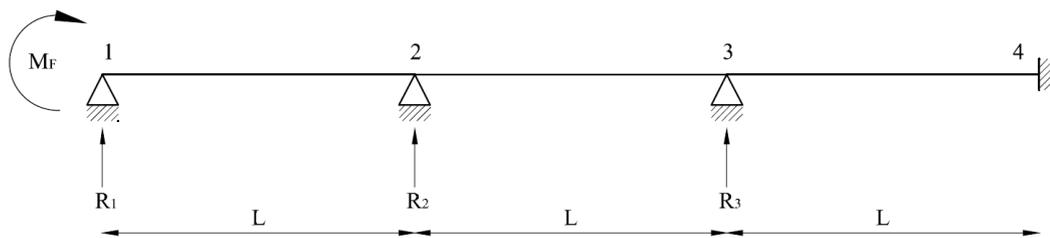


Figura 5.14. Diagrama de cuerpo libre para viga de tres vanos

$$\theta_{(x)} = \int \frac{M_F + R_1 \cdot x}{E \cdot I} dx = \frac{M_F \cdot x}{E \cdot I} + \frac{R_1 \cdot x^2}{E \cdot I \cdot 2} + \theta_1$$

$$\theta_2 = \frac{M_F \cdot L}{E \cdot I} + \frac{R_1 \cdot L^2}{2 \cdot E \cdot I} + \theta_1 \tag{1}$$



$$y(x) = \frac{M_F \cdot x^2}{2 \cdot E \cdot I} + \frac{R_1 \cdot x^3}{6 \cdot E \cdot I} + \theta_1 \cdot x$$

$$y_2 = \frac{M_F \cdot L^2}{2 \cdot E \cdot I} + \frac{R_1 \cdot L^3}{6 \cdot E \cdot I} + \theta_1 \cdot L = 0 \quad (2)$$

$$\theta(x) = \int \frac{M_F + R_1 \cdot (L + x) + R_2}{E \cdot I} dx = \int \frac{M_F + R_1 \cdot L + (R_1 + R_2)x}{E \cdot I} dx$$

$$= \frac{M_F + R_1 \cdot L}{E \cdot I} x + \frac{R_1 + R_2}{2 \cdot E \cdot I} x^2 + \theta_2$$

$$\theta_3 = \frac{M_F + R_1 \cdot L}{2 \cdot E \cdot I} \cdot L + \frac{R_1 + R_2}{2 \cdot E \cdot I} \cdot L^2 + \theta_2 \quad (3)$$

$$y(x) = \frac{M_F + R_1 \cdot L}{2 \cdot E \cdot I} x^2 + \frac{R_1 + R_2}{6 \cdot E \cdot I} x^3 + \theta_2 \cdot x$$

$$y_3 = \frac{M_F + R_1 \cdot L}{2 \cdot E \cdot I} \cdot L^2 + \frac{R_1 + R_2}{6 \cdot E \cdot I} \cdot L^3 + \theta_2 \cdot L = 0 \quad (4)$$

$$\theta(x) = \int \frac{M_F + R_1 \cdot (2L + x) + R_2(L + x) + R_3 \cdot x}{E \cdot I} dx$$

$$= \int \frac{M_F + (2R_1 + R_2)L + (R_1 + R_2 + R_3)x}{E \cdot I} dx$$

$$= \frac{M_F + (2R_1 + R_2)L}{E \cdot I} x + \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{2 \cdot E \cdot I} x^2 + \theta_3$$

$$0 = \frac{M_F + (2R_1 + R_2)L}{E \cdot I} L + \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{2 \cdot E \cdot I} L^2 + \theta_3 \quad (5)$$

$$y(x) = \frac{M_F + (2R_1 + R_2)L}{2 \cdot E \cdot I} x^2 + \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{6 \cdot E \cdot I} x^3 + \theta_3 \cdot x = 0$$

$$y_4 = \frac{M_F + (2R_1 + R_2)L}{2 \cdot E \cdot I} L^2 + \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{6 \cdot E \cdot I} L^3 + \theta_3 \cdot L = 0 \quad (6)$$

Considerando

$$\varphi = \frac{M_F \cdot L}{2 \cdot E \cdot I}$$

$$R'_1 = \frac{R_1 \cdot L^2}{6 \cdot E \cdot I}$$

Multiplicando (1) por $\frac{2 \cdot E \cdot I}{L}$

$$\theta_2 \cdot \frac{2 \cdot E \cdot I}{L} = 2M_F + R_1 \cdot L + \theta_1 \cdot \frac{2 \cdot E \cdot I}{L} \quad (7)$$

$$\theta_2 = 2\varphi + 3R'_1 + \theta_1$$

Multiplicando (2) por $\frac{2 \cdot E \cdot I}{L}$

$$\varphi + R'_1 + \theta_1 = 0 \quad (8)$$



Multiplicando (3) por $\frac{2 \cdot E \cdot I}{L}$

$$\theta_3 \cdot \frac{2 \cdot E \cdot I}{L} = 2M_F + 2R_1 \cdot L + R_1 \cdot L + R_2 \cdot L + \theta_2 \cdot \frac{2 \cdot E \cdot I}{L}$$

$$\theta_3 = 2\varphi + 9R'_1 + 3R'_2 + \theta_2 \quad (9)$$

Multiplicando (4) por $\frac{1}{L}$

$$\frac{M_F \cdot L}{2 \cdot E \cdot I} + \frac{R_1 \cdot L^2}{2 \cdot E \cdot I} + \frac{(R_1 + R_2)}{6 \cdot E \cdot I} \cdot L^2 + \theta_2 = 0$$

$$\varphi + \frac{(3R_1 + R_1 + R_2)}{6 \cdot E \cdot I} \cdot L^2 + \theta_2 = 0$$

$$\varphi + \frac{(4R_1 + R_2)}{6 \cdot E \cdot I} \cdot L^2 + \theta_2 = 0$$

$$\varphi + 4R'_1 + R'_2 + \theta_2 = 0 \quad (10)$$

Multiplicando (5) por $\frac{2 \cdot E \cdot I}{L}$

$$0 = 2M + (4R_1 + 2R_2 + R_1 + R_2 + R_3)L + \theta_3 \cdot \frac{2 \cdot E \cdot I}{L}$$

$$0 = 2M + (5R_1 + 3R_2 + R_3)L + \theta_3 \cdot \frac{2 \cdot E \cdot I}{L}$$

Multiplicando lo anterior por $\frac{L}{2 \cdot E \cdot I}$

$$0 = 2\varphi + 15R'_1 + 9R'_2 + 3R'_3 + \theta_3 \quad (11)$$

Multiplicando (6) por $\frac{1}{L}$

$$\frac{M_F \cdot L}{2 \cdot E \cdot I} + \frac{(6R_1 + 3R_2 + R_1 + R_2 + R_3) \cdot L^2}{6 \cdot E \cdot I} + \theta_3 = 0$$

$$\varphi + 7R'_1 + 4R'_2 + R'_3 + \theta_3 = 0 \quad (12)$$

Resolución de sistema de ecuaciones

$$\theta_1 - \theta_2 + 3R'_1 = -2\varphi$$

$$\theta_1 + R_1 = -\varphi$$

$$\theta_2 - \theta_3 + 9R'_1 + 3R'_2 = -2\varphi$$

$$\theta_2 + 4R'_1 + R'_2 = -\varphi$$

$$\theta_3 + 15R'_1 + 9R'_2 + 3R'_3 = -2\varphi$$

$$\theta_3 + 7R'_1 + 4R'_2 + R'_3 = -\varphi$$



$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 9 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 15 & 9 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 4 & 1 \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ R'_1 \\ R'_2 \\ R'_3 \end{bmatrix}}_x = \underbrace{\begin{bmatrix} -2 \\ -1 \\ -2 \\ -1 \\ -2 \\ -1 \end{bmatrix}}_B$$

$$A \cdot x = B$$

Resolviendo, se tiene

$$\theta_1 = -\frac{15}{26}\varphi$$

$$\theta_2 = \frac{2}{13}\varphi$$

$$\theta_3 = -\frac{1}{26}\varphi$$

$$R'_1 = -\frac{11}{26}\varphi$$

$$R'_2 = \frac{7}{13}\varphi$$

$$R'_3 = -\frac{2}{13}\varphi$$

Reemplazando

$$\varphi = \frac{M_F \cdot L}{2 \cdot E \cdot I}$$

$$R'_1 = \frac{R_1 \cdot L^2}{6 \cdot E \cdot I}$$

Se tiene

$$\theta_1 = -\frac{15M_F \cdot L}{52E \cdot I}$$

$$\theta_2 = \frac{M_F \cdot L}{13E \cdot I}$$

$$\theta_3 = -\frac{M_F \cdot L}{52E \cdot I}$$

$$\frac{R_1 \cdot L^2}{6 \cdot E \cdot I} = -\frac{11}{26} \cdot \frac{M_F \cdot L}{2 \cdot E \cdot I}$$



$$R_1 = -\frac{33M_F}{26L}$$

$$\frac{R_2 \cdot L^2}{6 \cdot E \cdot I} = \frac{7}{13} \cdot \frac{M_F \cdot L}{2 \cdot E \cdot I}$$

$$R_2 = \frac{21M_F}{13L}$$

$$\frac{R_3 \cdot L^2}{6 \cdot E \cdot I} = -\frac{2}{13} \cdot \frac{M_F \cdot L}{2 \cdot E \cdot I}$$

$$R_3 = -\frac{6M_F}{13L}$$

La rigidez del tubo al giro (flexional)

$$k_1 = \frac{M_F}{\theta}$$

Para este caso se contempla el giro en 1. Por lo tanto, se tiene

$$k_1 = \frac{M_F}{\frac{15M_F \cdot L}{52E \cdot I}}$$

$$k_1 = \frac{52E \cdot I}{15L} = 32166 \text{ N} \cdot \text{m}$$

5.1.7.- Torsión

Momento torsor, debido a rótulas esféricas en los extremos

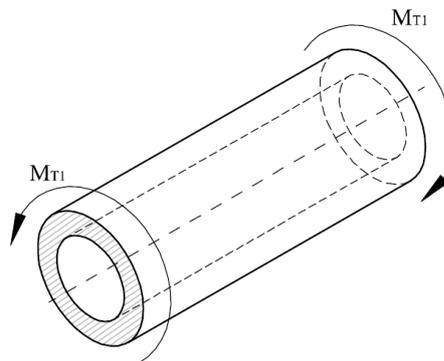


Figura 5.15. Momento torsor en el tubo de acero, debido a rótulas esféricas

Dato de fabricante

$$M_{T1} = 400 \text{ N} \cdot \text{m}$$



$$J = I_0 = I_x + I_y; I_x = I_y$$

$$J = 2I_x = 4.547 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

Rigidez del tubo a torsión

$$k_{T1} = \frac{G \cdot J}{L} = 7137 \text{ N} \cdot \text{m}$$

5.1.8.- Rigidez en estructura de apoyo

5.1.8.1.- Placa muelle

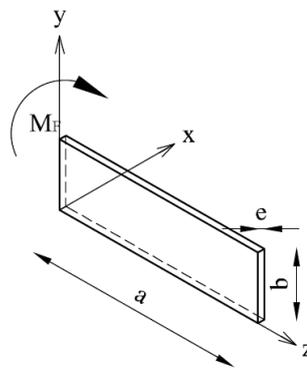


Figura 5.16. Geometría de placa muelle

Material: Acero templado y revenido con enfriamiento en aceite

$$E = 210000 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.3$$

$$a = L_1 = 270 \text{ mm}$$

$$b = 80 \text{ mm}$$

$$e = 2 \text{ mm}$$

Flexión – placa muelle

Según el eje x

$$I_x = \frac{e \cdot b^3}{12} = 85333.33 \text{ mm}^4$$

Rigidez a flexión de placa muelle según el eje x

$$k_{Fx1} = \frac{E \cdot I_x}{L_1} = 66370.7 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{rad}} \rightarrow \text{Super flexible}$$



Según el eje y

$$I_y = \frac{b \cdot e^3}{12} = 53 \text{ mm}^4$$

Rigidez a flexión de placa muelle, según el eje y

$$k_{Fy1} = \frac{E \cdot I_y}{L_1} = 140 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{rad}} \rightarrow \text{Super rígido}$$

Torsión – placa muelle

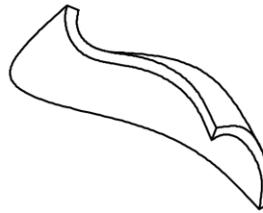


Figura 5.17. Esquema de torsión en placa muelle

$$J = I_0 = I_x + I_y = 85387 \text{ mm}^4$$

Rigidez a torsión de placa muelle

$$k_{T2} = \frac{G \cdot J}{L_1} = 25543 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{rad}}$$

5.1.8.2.- Tubo cuadrado

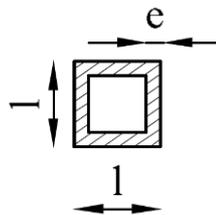


Figura 5.18. Sección de tubo cuadrado

Material: Acero estructural

$$E = 210000 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.3$$

$$l = 30 \text{ mm}$$

$$e = 2 \text{ mm}$$

$$L_2 = 1420 \text{ mm}$$

$$d_s = 200 \text{ mm}$$

$$A_{tc} = l^2 - (l - 2e)^2 = 224 \text{ mm}^2$$



$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = 81000 \text{ MPa}$$

Flexión – tubo cuadrado

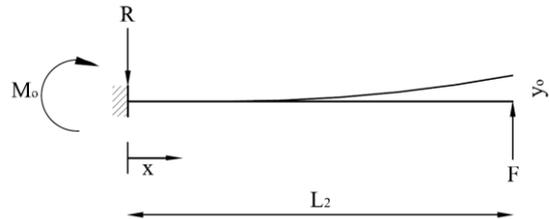


Figura 5.19. Flexión en tubo cuadrado

$$I_x = I_y = \frac{l^4 - (l - 2e)^4}{12} = 29419 \text{ mm}^4$$

Flexión para un tubo cuadrado

$$M = M_o - F \cdot x$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M_o - F \cdot x}{E \cdot I}$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{E \cdot I} \left(M_o \cdot x - \frac{F \cdot x^2}{2} \right)$$

$$y = \frac{1}{E \cdot I} \left(\frac{M_o \cdot x^2}{2} - \frac{F \cdot x^3}{6} \right); M_o = F \cdot L$$

$$y = \frac{F}{E \cdot I} \left(\frac{L \cdot x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right); x = L$$

$$y = \frac{F}{E \cdot I} \left(\frac{L^3}{2} - \frac{L^3}{6} \right); y = y_o$$

$$y_o = \frac{F \cdot L^3}{3E \cdot I}$$

$$F = \frac{3E \cdot I \cdot y_o}{L^3}$$

Rigidez a flexión de un tubo cuadrado

$$k_{F2} = \frac{M}{\theta} = \frac{F \cdot d_s}{\theta} = \frac{3E \cdot I \cdot y_o \cdot d_s}{L_2^3 \cdot \theta} = \frac{3E \cdot I \cdot y_o \cdot d_s \cdot d_s}{L_2^3 \cdot 2 \cdot y_o}$$

$$k_{F2} = \frac{3E \cdot I \cdot d_s^2}{2L_2^3} = 129 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Rigidez a flexión considerando tracción/compresión, de soporte simple (dos tubos cuadrados)

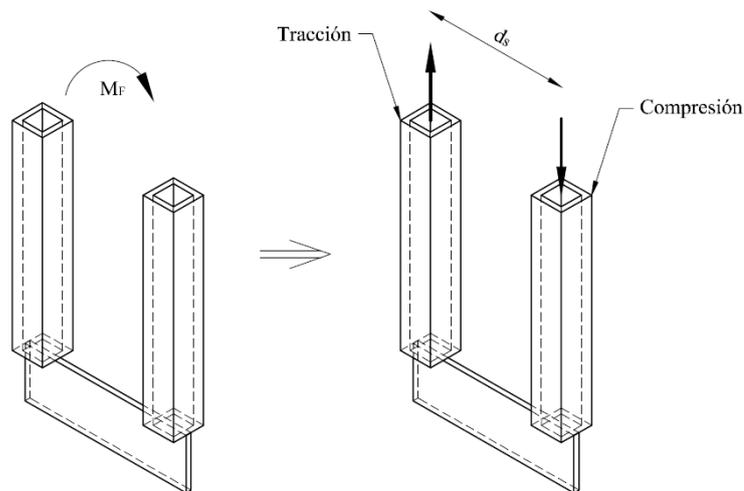


Figura 5.20. Flexión en soporte simple, dos tubos cuadrados

$$k_{TT1} = \frac{M}{\theta} = \frac{F \cdot d_s}{\theta} = \frac{\sigma \cdot A_{tc} \cdot d_s}{\theta} = \frac{E \cdot \epsilon \cdot A_{tc} \cdot d_s}{\theta} = \frac{E \cdot A_{tc} \cdot d_s \cdot \Delta L}{\theta \cdot L}$$

$$= \frac{E \cdot A_{tc} \cdot d_s \cdot \Delta L \cdot d_s}{L_2 \cdot 2 \cdot \Delta L}$$

$$k_{TT1} = \frac{E \cdot A_{tc} \cdot d_s^2}{2L_2} = 662535 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{rad}}$$

Considerando la rigidez de placa muelle

$$k_{TT2} = \frac{1}{\frac{1}{k_{Fx1}} + \frac{1}{k_{TT1}}} = 60327 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{rad}}$$

Rigidez a flexión de soporte doble (dos pares de tubos cuadrados con placas muelle)

$$k_{F3} = 2k_{TT2} = 120654 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{rad}}$$

Torsión – tubo cuadrado

$$J = I_0 = I_x + I_y; I_x = I_y;$$

$$J = 2I_x = 58838 \text{ mm}^4$$

Rigidez a torsión de un tubo cuadrado

$$k_{T3} = \frac{G \cdot J}{L_2} = 3347 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{rad}}$$

Para soporte simple, se aplica una aproximación, considerando que un tubo trabaja a torsión y el otro a flexión.

$$k_{T4} = k_{F2} + k_{T3} = 3476 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{rad}}$$



Considerando la rigidez de placa muelle

$$k_{T5} = \frac{1}{\frac{1}{k_{T2}} + \frac{1}{k_{T4}}} = 3060 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{rad}}$$

Rigidez a torsión de soporte doble (dos pares de tubos cuadrados con placas muelle)

$$k_{T6} = 2k_{T5} = 6119 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{rad}}$$

Factor reductor del momento flector (tubo + soporte)

$$F_1 = \frac{k_1}{k_1 + k_{T6}} = 0.84$$

Momento flector efectivo

$$M_{Fef} = F_1 \cdot M'_F = 0.0001 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Tensión debida a momento flector efectivo

$$\sigma_{Fef} = \frac{M_{Fef} \cdot D}{2I} \approx 0$$

Factor reductor del momento torsor (tubo + soporte)

$$F_2 = \frac{k_1}{k_{T1} + k_{F3}} = 0.06$$

Momento torsor efectivo

$$M_{Tef} = F_2 \cdot M_{T1} = 22.34 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Cortante debida a momento torsor externo

$$\tau_M = \frac{M_{Tef} \cdot D}{J} = 1.73 \text{ MPa}$$

5.1.9.- Esfuerzo térmico

Se toma en cuenta los efectos por variación de temperatura

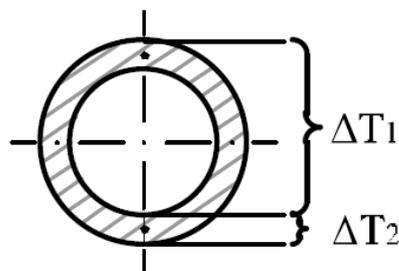


Figura 5.21. Gradiente de temperaturas en tubo de acero inoxidable



$$\Delta T_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = 7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T = 419 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 2.15 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Cambio algebraico en la temperatura del elemento, considerado en la mitad del espesor

$$\Delta T'_2 = \frac{\Delta T_2}{2} = 3.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

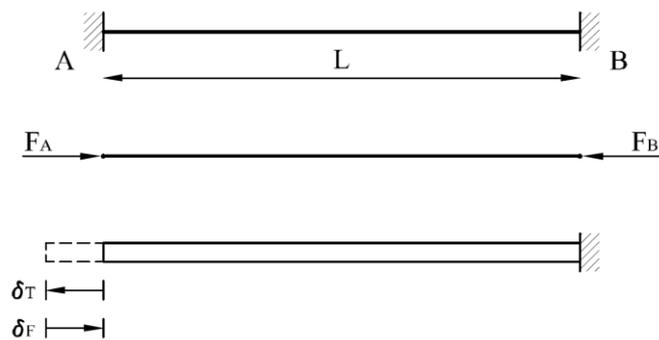


Figura 5.22. Efecto de la variación de temperatura en tubo de acero inoxidable

Como $\delta_{A/B} = 0$, el desplazamiento térmico δ_T que se produce, está contrarrestado por la fuerza F , que se requiere para volver el elemento a su posición original.

$$\delta_{A/B} = \delta_T - \delta_F$$

La relación térmica es

$$\delta_T = \alpha \cdot \Delta T'_2 \cdot L$$

La relación carga – desplazamiento es

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

$$\frac{F}{A} = E \cdot \frac{\delta}{L}$$

$$\delta = \frac{F \cdot L}{A \cdot E}$$

Luego, se tiene

$$0 = \alpha \cdot \Delta T'_2 \cdot L - \frac{F \cdot L}{A \cdot E}$$

$$F = \alpha \cdot \Delta T'_2 \cdot A \cdot E$$

Tensión longitudinal por temperatura



$$\sigma_{TT1} = \frac{F}{A} = \alpha \cdot \Delta T_2' \cdot E = 12.7 \text{ MPa}$$

Tensión circunferencial por temperatura

$$\sigma_{TT2} = \sigma_{TT1} = 12.6 \text{ MPa}$$

Gradiente de temperatura medio

$$\Delta T_1' = \Delta T_1 + \frac{\Delta T_2}{2} = 33.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

El cambio algebraico en la longitud del elemento es

$$\delta = \alpha \cdot \Delta T_1' \cdot L = 0.003 \text{ m}$$

Radio de curvatura debido a temperatura

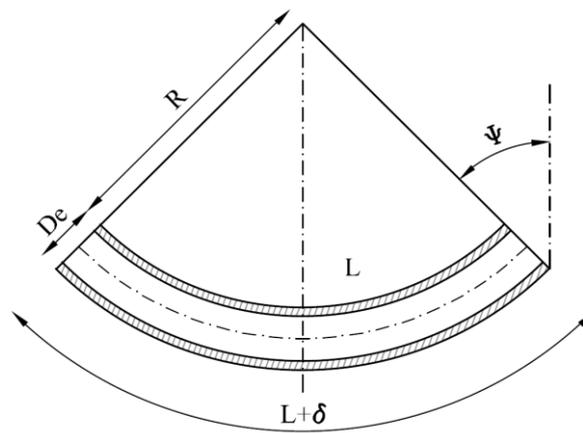


Figura 5.23. Radio de curvatura en tubo de acero inoxidable, debido a variación de temperatura

Relación de equivalencia

$$\frac{L}{R} = \frac{L + \delta}{R + D}$$

$$L \cdot R + L \cdot D = L \cdot R + \delta \cdot R$$

$$R = \frac{L \cdot D}{\delta} = 97 \text{ m}$$

Ángulo de deformación

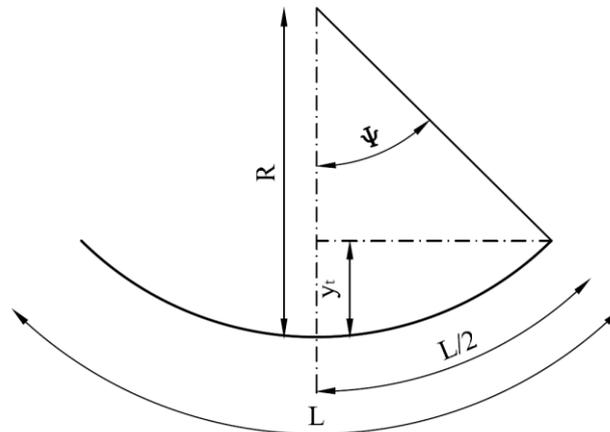


Figura 5.24. Ángulo de deformación en tubo de acero inoxidable, debido a variación de temperatura

$$\Psi = \frac{L}{2R} = 0.021 \text{ rad}$$

Deflexión por alargamiento debida a variación de temperatura

$$\cos \Psi = \frac{R - y_t}{R}$$

$$y_t = R(1 - \cos \Psi) = 0.021 \text{ m}$$

Momento debido a variación de temperatura

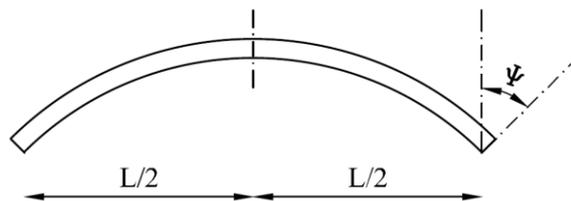


Figura 5.25. Momento debido a variación de temperatura

Aplicando el teorema de Mohr

$$\Psi(x) = \int_0^{L/2} \frac{M}{E \cdot I} dx$$

$$\Psi(x) = \left[\frac{M \cdot x}{E \cdot I} \right]$$

$$\Psi = \frac{M \cdot L}{2E \cdot I}$$

$$M = \frac{2E \cdot I \cdot \Psi}{L} = 390 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Tensión debida a la variación de temperatura

$$\sigma_t = \frac{M_t \cdot D}{2I} = 60.3 \text{ MPa}$$



Deflexión por tensión debida a temperatura

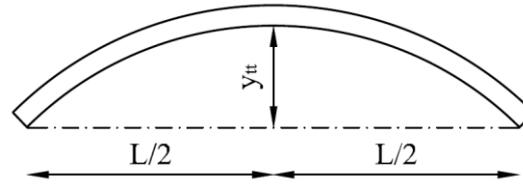


Figura 5.26. Deflexión debida a variación de temperatura

$$y(x) = \frac{M \cdot x^2}{2E \cdot I}; x = \frac{L}{2}$$

$$y = \frac{M}{2E \cdot I} \left(\frac{L}{2}\right)^2$$

$$y_{tt} = -\frac{M \cdot L^2}{8E \cdot I} = -0.021 \text{ m}$$

Deflexión debida a temperatura

$$y_{tt'} = y_t + y_{tt} = 0$$

Deflexión total

$$y_T = y_W + y_{tt'} = 0.017 \text{ m}$$

5.1.10.- Combinación de cargas

5.1.10.1.- Tensiones longitudinales

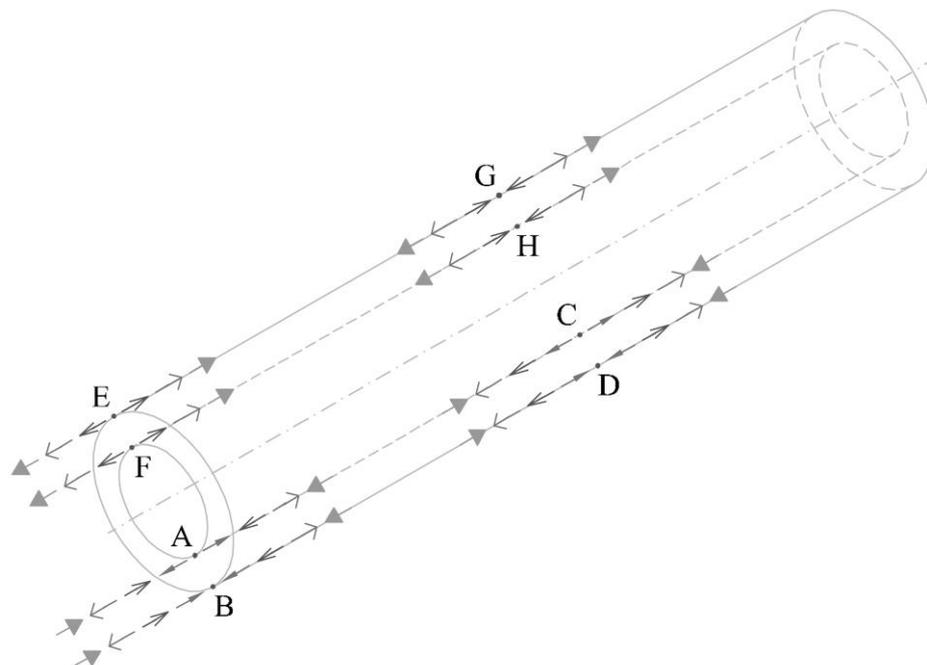


Figura 5.27. Tensiones longitudinales en diferentes puntos del tubo de acero inoxidable



Las tensiones longitudinales se resumen en la siguiente tabla.

Descripción	Representación	Magnitud
Tensión longitudinal debida a presión	→	$\sigma_L = 26.2 \text{ MPa}$
Tensión longitudinal debida a peso	→	$\sigma_W = 18.9 \text{ MPa}$
Tensión longitudinal debida a alargamientos por variación de temperatura	→	$\sigma_{TT1} = 12.6 \text{ MPa}$
Tensión longitudinal debida a la variación de temperatura	→	$\sigma_t = 60.3 \text{ MPa}$

Tabla 5.1. Tensiones longitudinales en el tubo receptor de nueva generación

La acción de las tensiones en diferentes puntos del tubo, se muestra a continuación.

Punto A

$$\sigma_{LA} = \sigma_L - \sigma_W + \sigma_{TT1} - \sigma_t = -40.4 \text{ MPa}$$

Punto B

$$\sigma_{LB} = \sigma_L - \sigma_W - \sigma_{TT1} - \sigma_t = -65.6 \text{ MPa}$$

Punto C

$$\sigma_{LC} = \sigma_L + \sigma_W + \sigma_{TT1} - \sigma_t = -2.7 \text{ MPa}$$

Punto D

$$\sigma_{LD} = \sigma_L + \sigma_W - \sigma_{TT1} - \sigma_t = -27.9 \text{ MPa}$$

Punto E

$$\sigma_{LE} = \sigma_L + \sigma_{TT1} + \sigma_t = 105.3 \text{ MPa}$$

Punto F

$$\sigma_{LF} = \sigma_L + \sigma_{TT1} + \sigma_t = 105.3 \text{ MPa}$$

Punto G

$$\sigma_{LG} = \sigma_L - \sigma_W - \sigma_t = 67.6 \text{ MPa}$$

Punto H

$$\sigma_{LH} = \sigma_L - \sigma_W + \sigma_t = 67.6 \text{ MPa}$$



5.1.10.2.- Tensiones circunferenciales

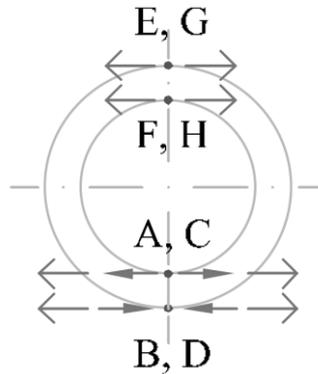


Figura 5.28. Tensiones circunferenciales en diferentes puntos del tubo de acero inoxidable

Las tensiones circunferenciales se resumen en la siguiente tabla.

Descripción	Representación	Magnitud
Tensión circunferencial debida a presión	→	$\sigma_T = 53.7 \text{ MPa}$
Tensión circunferencial debida a alargamientos por variación de temperatura	→	$\sigma_{TT2} = 12.6 \text{ MPa}$

Tabla 5.2. Tensiones circunferenciales en el tubo receptor de nueva generación

La acción de las tensiones en diferentes puntos del tubo, se muestra a continuación.

Punto A = Punto C

$$\sigma_{CA} = \sigma_{CC} = \sigma_T + \sigma_{TT2} = 66.3 \text{ MPa}$$

Punto B = Punto D

$$\sigma_{CB} = \sigma_{CD} = \sigma_T - \sigma_{TT2} = 41.1 \text{ MPa}$$

Punto E = Punto G

$$\sigma_{CE} = \sigma_{CG} = \sigma_T = 53.7 \text{ MPa}$$

Punto F = Punto H

$$\sigma_{CF} = \sigma_{CH} = \sigma_T = 53.7 \text{ MPa}$$



5.1.11.- Tensión de Von Mises

La ecuación general es

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} - \sigma_{xx}\sigma_{zz} - \sigma_{yy}\sigma_{zz} + 3\tau_{xy}^2 + 3\tau_{xz}^2 + 3\tau_{yz}^2}$$

Aplicada a este caso

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_C^2 - \sigma_L\sigma_C + 3\tau_W^2 + 3\tau_M^2}$$

Los resultados para los diferentes puntos del tubo, son

$$\sigma_{VM-A} = 93.4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{VM-B} = 93.3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{VM-C} = 67.8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{VM-D} = 60.2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{VM-E} = 91.2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{VM-F} = 91.2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{VM-G} = 61.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{VM-H} = 61.9 \text{ MPa}$$

Siendo A, el punto crítico

$$\sigma_{VM} = \sigma_{VM-A} = 93.4 \text{ MPa}$$

Se verifica la condición

$$\sigma_{VM} \leq \sigma_{adm}$$

$$93.4 \text{ MPa} < 99.7 \text{ MPa} \therefore \text{Cumple}$$

5.1.11.1.- Factor de seguridad

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{VM}}$$

$$FS = \frac{109 \text{ MPa}}{93.4 \text{ MPa}}$$

$$FS = 1.2$$



5.2.- Diseño según norma ASME

Datos

Acero inoxidable austenítico

$$T = 419 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\sigma_y = 109 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{adm} = 99.7 \text{ MPa}$$

$$p = p_F = 29 \text{ bar} = 2.9 \text{ MPa}$$

$$D = 70 \pm 3 = 70.3 \text{ mm}$$

$$D_n = 70 \text{ mm}$$

ASME recomienda trabajar con valores nominales

Determinación del espesor mínimo

$$\sigma_{req} = \sigma_{adm} = 99.7 \text{ MPa}$$

$$e_{min} = \frac{p \cdot D_n}{2(\sigma_{req} + p \cdot y)} + A$$

$$e_{min} = 1.01 \text{ mm}$$

Determinación de la máxima presión admisible

Considerando el espesor disponible

$$e = 2 \pm 0.2 = 1.8 \text{ mm}$$

$$e_n = 2 \text{ mm}$$

$$p_{adm} = \frac{2\sigma_{req}(e_n - A)}{D_n - 2y(e_n - A)}$$

$$p_{adm} = 5.83 \text{ MPa}$$

$$p_{adm} > p$$

$$5.83 \text{ MPa} > 2.9 \text{ MPa} \therefore \text{Cumple}$$



Determinación de la tensión máxima

Considerando el espesor y presión existente

$$e_n = 2 \text{ mm}$$

$$p = 2.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} = p \left[\frac{D_n}{2(e_n - A)} \right] - y$$

$$\sigma_{max} = 49.6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{req}$$

$$49.6 \text{ MPa} \leq 99.7 \text{ MPa} \therefore \text{Cumple}$$



6.- EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL

6.1.- Evaluación en fractura

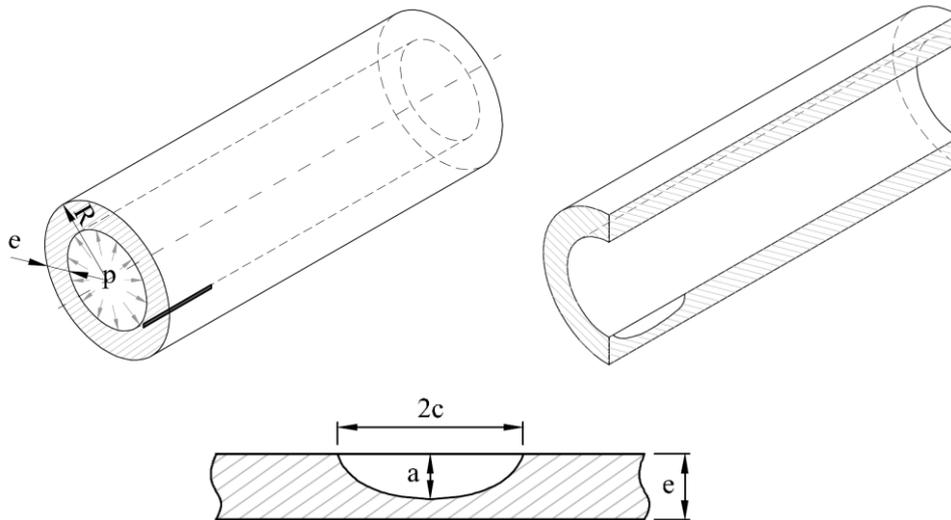


Figura 6.1. Grieta superficial interna en el tubo de acero inoxidable

Geometría

$$a = 0.274 \text{ mm}$$

$$e = 1.8 \text{ mm}$$

$$R = 35.15 \text{ mm}$$

$$2c = 2.74 \text{ mm}$$

Material

Acero inoxidable

$$T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$E = 169000 \text{ MPa}$$

$$\sigma_y = 110 \text{ MPa}$$

$$\sigma_u = 452 \text{ MPa}$$

$$K_{mat} = 50 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$$



Cargas

$$\sigma_m = 66.3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ref} = 93.4 \text{ MPa}$$

$$\left. \begin{array}{l} R/e = 20 \\ a/c = 0.2 \\ a/e = 0.15 \end{array} \right\} M_m = 1.10$$

Diagrama de fallo

Línea de fallo - sin escalón de cedencia

Para $L_r \leq 1$

$$f(L_r) = \left(1 + \frac{L_r^2}{2}\right)^{-1/2} [0.3 + 0.7 \exp(-\mu \cdot L_r^6)]$$

Para $1 < L_r < 1$

$$f(L_r) = f(1) \cdot L_r^{(N-1)/2N}$$

$$N_{FAD} = 0.3 \left(1 - \frac{\sigma_y}{\sigma_u}\right)$$

$$\mu = \min\left(0.001 \cdot \frac{E}{\sigma_y}, 0.6\right)$$

$$L_{rmax} = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2\sigma_y} = 2.55$$

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} = 0.85$$

$$K_I = M_m \cdot \sigma_m \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

$$K_I = 2 \text{ MPa} = K_{th}$$

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} = 0.04$$

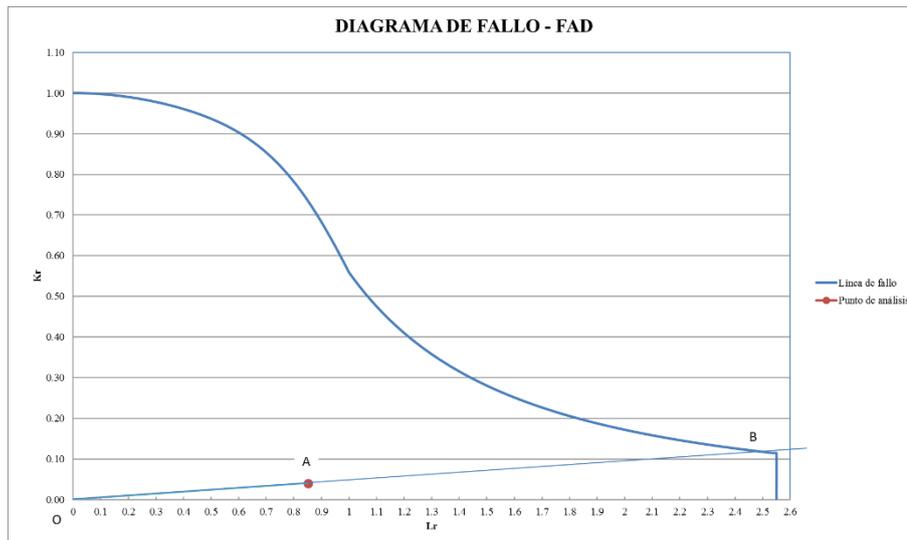


Figura 6.2. Diagrama de fallo – evaluación en fractura

Factor de seguridad

$$FS = \frac{\overline{OB}}{\overline{OA}} = 2.93$$

RESULTADOS FRACTURA - COLAPSO PLÁSTICO

a(mm)	σ_{ref} (Mpa)	M_m (Mpa)	M_b (Mpa)	K_I (Mpa*m ^{0.5})	L_r	K_r	F.S.
0.24	93.40	1.10	0.00	2.00	0.85	0.04	2.93

Determinación del tamaño de grieta crítico

$$K_I = K_{mat}$$

$$K_{mat} = M_m \cdot \sigma_m \cdot \sqrt{\pi \cdot a_c}$$

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{mat}}{M_m \cdot \sigma_m} \right)^2$$

$$a_c = 0.15 \text{ m} \rightarrow 150 \text{ mm} \text{ es mucho mayor que el espesor}$$

Determinación de tensión máxima para que la grieta sea pasante ($a=e$)

$$K_{mat} = M_m \cdot \sigma_{max} \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

$$\text{Para } a = 1.8 \text{ mm} \rightarrow M_m = 2.19$$

$$\sigma_{max} = \frac{K_{mat}}{M_m \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}$$

$$\sigma_{max} = 303.6 \text{ MPa}$$



Se producirá fuga antes de la rotura por lo que es necesario evaluar la velocidad del crecimiento de grieta.

El momento en que se produzca la rotura, el componente no estará apto para continuar operando.

6.2.- Evaluación en fatiga

Material

Acero inoxidable

$$T = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$E = 169000 \text{ MPa}$$

$$\sigma_y = 110 \text{ MPa}$$

$$\sigma_u = 452 \text{ MPa}$$

$$K_{mat} = 50 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$$

6.2.1.- Componente no agrietado

Ciclos de carga

$$\sigma_{max} = 93.4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{min} = 76.4 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 17 \text{ MPa}$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0.8$$

$$f = 0.00006 \text{ Hz}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = 84.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = 8.5 \text{ MPa}$$

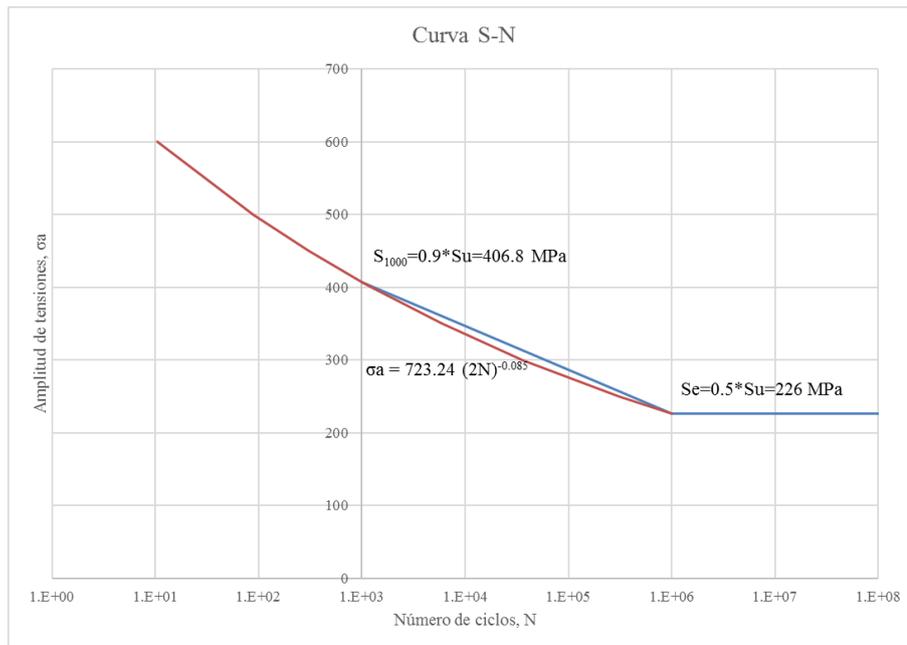


Figura 6.3. Curva tensión aplicada y número de ciclos

Considerando una amplitud constante, se aplica la ley de Basquin

$$\sigma_a = \sigma_f' (2N_f)^b$$

$$226 = \sigma_f' (10^6)^b$$

$$406.8 = \sigma_f' (10^3)^b$$

Con lo que se obtiene el coeficiente de resistencia a la fatiga y el exponente b

$$\sigma_f' = 732.24 \text{ MPa}$$

$$b = -0.085$$

$$\sigma_a = 732.24 (2N_f)^{-0.085}$$

Debido a que $R \neq -1$, se aplica la ley de Goodman

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_a^0} + \left(\frac{\sigma_m'}{\sigma_y} \right) = 1$$

$$\sigma_a^0 = \frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_m'}{\sigma_y} \right)}$$

$$\sigma_a^0 = 37.25 \text{ MPa}$$

Aplicando para este caso

$$37.25 = 732.24 (2N_f)^{-0.085}$$



$$2N_f = N = 1.65 \times 10^{15} \text{ ciclos}$$

$$t = 8.73 \times 10^{11} \text{ años}$$

6.2.2.- Componente agrietado

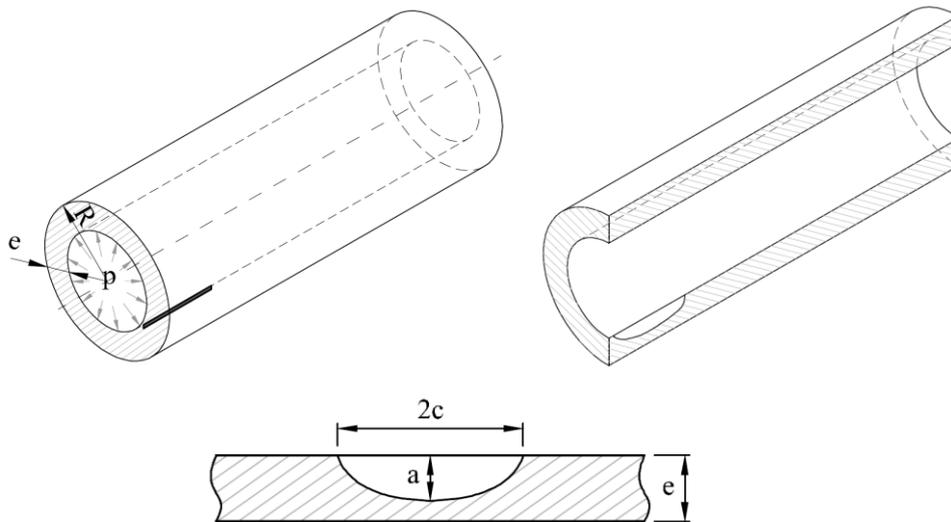


Figura 6.4. Grieta superficial interna en el tubo de acero inoxidable

Geometría

$$a = 0.274 \text{ mm}$$

$$e = 1.8 \text{ mm}$$

$$R = 35.15 \text{ mm}$$

$$2c = 2.74 \text{ mm}$$

Material

Acero inoxidable

$$T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$E = 169000 \text{ MPa}$$

$$\sigma_y = 110 \text{ MPa}$$

$$\sigma_u = 452 \text{ MPa}$$

$$K_{mat} = 50 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$$



Cargas

$$\sigma_m = 66.3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ref} = 93.4 \text{ MPa}$$

$$\left. \begin{array}{l} R/e = 20 \\ a/c = 0.2 \\ a/e = 0.15 \end{array} \right\} M_m = 1.10$$

$$\sigma_{max} = 66.3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{min} = 25.6 \text{ MPa}$$

Ley de propagación de grieta para acero inoxidable austenítico

$$\frac{da}{dN} = 2.82 \times 10^{-9} \cdot (\Delta K \sqrt{m})^{3.39}$$

De forma general

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m$$

De donde

$$N = \frac{1}{C(M_m \cdot \sigma_m)^m \cdot \pi^{m/2} \cdot \left(1 - \frac{m}{2}\right)} \cdot [a_f^{1-m/2} - a_o^{1-m/2}]$$

Aplicando a este acero austenítico

$$N = \frac{1}{2.82 \times 10^{-9} (M_m \cdot \sigma_m)^{3.39} \cdot \pi^{1.695} \cdot (-0.695)} \cdot [a_f^{-0.695} - a_o^{-0.695}]$$

$$N = 46032 \text{ ciclos}$$

RESULTADOS FATIGA

a(mm)	$\Delta\sigma$ (Mpa)	M_m (Mpa)	M_b (Mpa)	K_I (Mpa*m ^{0.5})	Grieta	N (ciclos)	t (años)
0.24	40.70	1.10	0.00	2.00	Propaga	45778	24.2

Existen equipos de ultrasonido, UT, con rangos de medición, desde 0.01 mm. Con ayuda de estos equipos y los datos obtenidos en el análisis, se pueden establecer programas de inspección, mantenimiento y tomar las mejores decisiones para la continuidad de las operaciones de las plantas termosolares.

Los efectos de fluencia (creep) deben ser considerados cuando la temperatura supere los 482 °C [13].



7.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

Realizando el cálculo analítico para el tubo de espesor 2 mm y para el tubo de espesor 1.65 mm, los principales resultados obtenidos se resumen en la tabla 6.1.

Descripción	Tubo e = 2 mm	Tubo e = 1.65 mm
Tensión longitudinal, σ_L	40.4 MPa	38.6 MPa
Tensión circunferencial, σ_C	66.3 MPa	73.7 MPa
Tensión cortante, τ	2.2 MPa	2.2 MPa
Tensión de Von Mises, σ_{VM}	93.4 MPa	98.9 MPa
Tensión admisible, σ_{adm}	99.7 MPa	99.7 MPa
Límite elástico, σ_y	109 MPa	109 MPa
Factor de seguridad, FS	1.2	1.1

Tabla 7.1. Resultados de cálculo analítico para tubo e=2 mm y e=1.65 mm

De acuerdo a los valores obtenidos basados en la mecánica de materiales, bajo las condiciones de trabajo planteadas, se pueden utilizar tanto el tubo de espesor 2 mm, como el de espesor 1.65 mm, porque cumplen con los parámetros requeridos, con un factor de seguridad de 1.2 y 1.1, respectivamente.

Considerando las recomendaciones de diseño de la norma ASME, para ambos tipos de tubos, se tienen los resultados mostrados en la tabla 6.2.

Descripción	Tubo e = 2 mm	Observación	Tubo e = 1.65 mm	Observación
Espesor mínimo requerido, e_{min}	1.01 mm	Cumple	1.01 mm	Cumple
Presión máxima admisible, p_{adm}	5.83 MPa	Cumple (Presión de trabajo = 2.9 MPa)	4.79 MPa	Cumple (Presión de trabajo = 2.9 MPa)
Tensión requerida, σ_{req}	49.6 MPa	Cumple (Tensión max= 99.7 MPa)	60.4 MPa	Cumple (Tensión max= 99.7 MPa)

Tabla 7.2. Resultados según ASME II, parte D, para tubo e=2 mm y e=1.65 mm

Siguiendo las recomendaciones de la norma ASME, sección II, parte D, el diseño con el tubo de espesor 2 mm y el de espesor 1.65 mm, cumplen con lo establecido. Sin embargo, no se consideran los efectos térmicos, que son los que introducen las mayores tensiones en el componente.



Los resultados de la evaluación en fractura son los mostrados en la tabla 6.3.

Descripción	Tubo e=2 mm	Tubo e=1.65 mm
Tamaño de grieta inicial, a_o	0.24	0.20
Tensión de referencia, σ_{ref}	93.40	98.90
Factor geométrico, M_m	1.10	1.09
Factor de intensidad de tensiones, K_I	2.00	2.00
Relación K_I sobre K_{mat} , K_r	0.85	0.90
Relación tensión σ_{ref} sobre límite elástico σ_y , L_r	0.04	0.04
FS	2.93	2.84

Tabla 7.3. Resultados de evaluación en fractura para tubo e=2 mm y e=1.65 mm

Considerando la existencia de grietas en el componente y haciendo uso del diagrama de fallo, FAD, como herramienta de análisis para determinar la existencia de fractura o colapso plástico en el mismo, se determina que el tubo de acero, se encuentra en condiciones seguras. De tal forma que cuando empieza el crecimiento de la grieta, se tienen factores de seguridad de 2.93 y 2.84 para los espesores de tubo de 2 mm y 1.65 mm, respectivamente. Por lo que se hace necesario un análisis del crecimiento de grieta.

Los resultados de la evaluación en fatiga – componente no agrietado son los mostrados en la tabla 6.4.

Descripción	Tubo e=2 mm	Tubo e=1.65 mm
Tensión de referencia, σ_{max}	93.40 MPa	98.90 MPa
Tensión de referencia, σ_{min}	76.40 MPa	78.30 MPa
Amplitud de tensión, $\Delta\sigma$	17.00 MPa	20.60 MPa
Tensión media, σ_m	84.90 MPa	88.60 MPa
Tensión alterna, σ_a	8.50 MPa	10.30 MPa
Tensión alterna para $\sigma_m = 0$, σ_a^0	37.25 MPa	52.94 MPa
Número de ciclos, N	1.65×10^{15} ciclos	2.64×10^{13} ciclos
Tiempo de vida, t	8.73×10^{11} años	1.40×10^{10} años

Tabla 7.4. Resultados de evaluación en fatiga para tubo e=2 mm y e=1.65 mm – no agrietado

En un primer análisis simplificado a fatiga, sin agrietamiento, se determina el número de ciclos que el componente es capaz de resistir. Obteniendo valores altos tanto para el tubo de espesor 2 mm como para el tubo de espesor 1.65 mm, consecuentemente tomando en



cuenta la frecuencia y magnitud de las cargas fluctuantes, se determinan tiempos grandes de vida del componente, se dice entonces que el componente tendrá vida infinita.

Los resultados de la evaluación en fatiga – componente agrietado son los mostrados en la tabla 6.5.

Descripción	Tubo e=2 mm	Tubo e=1.65 mm
Tamaño de grieta inicial, a_o	0.24 mm	0.20 mm
Tamaño de grieta final, a_f	1.80 mm	1.55 mm
Tensión de referencia, σ_{max}	66.30 MPa	73.70 MPa
Tensión de referencia, σ_{min}	25.60 MPa	26.00 MPa
Tensión de referencia, $\Delta\sigma$	40.70 MPa	47.70 MPa
Factor geométrico, M_m	1.10	1.09
Factor de intensidad de tensiones, K_I	2.00 MPa·m ^{0.5}	2.00 MPa·m ^{0.5}
Número de ciclos, N	45778 ciclos	32101 ciclos
Tiempo de vida, t	24.2 años	17.0 años

Tabla 7.5. Resultados de evaluación en fatiga para tubo e=2 mm y e=1.65 mm – agrietado

Tomando en cuenta la fluctuación de cargas, presencia de grietas y demás condiciones de operación, el análisis a fatiga indica que se producirá la fuga antes de la rotura. Por lo que se estima el tiempo crítico de vida del componente, a partir del momento en que la grieta empieza a propagar. Obteniéndose los siguientes resultados:

- Tubo espesor 2 mm

Grietas menores que 0.24 mm no propagan.

Con grietas iguales a 0.24 mm se tienen 45778 ciclos hasta que se produzca la fuga, que corresponde a aproximadamente 24.2 años.

Para grietas de tamaños superiores, el número de ciclos corresponde según la tabla mostrada en el anexo 1 para grietas internas y en el anexo 2 para grietas externas.

- Tubo espesor 1.65 mm

Grietas menores que 0.20 mm no propagan.

Con grietas iguales a 0.20 mm se tienen 32101 ciclos hasta que se produzca la fuga, que corresponde a aproximadamente 17 años.

Para grietas de tamaños superiores, el número de ciclos corresponde según la tabla mostrada en el anexo 3 para grietas internas y en el anexo 4 para grietas externas.



8.- CONCLUSIONES

- * El acero inoxidable austenítico, es un material con excelentes propiedades, buena resistencia a la corrosión, esfuerzos y características de fabricación. Con el aumento de temperatura disminuyen las propiedades mecánicas, así por ejemplo a temperatura ambiente (20 °C) se tiene un $E = 195000 \text{ MPa}$, $\sigma_y = 172 \text{ MPa}$, $\sigma_u = 517 \text{ MPa}$ y a 400 °C se tiene $E = 169000 \text{ MPa}$, $\sigma_y = 110 \text{ MPa}$, $\sigma_u = 452 \text{ MPa}$. El análisis estructural se lo hizo para las condiciones de alta temperatura.
- * Para la realización del cálculo analítico se han tenido que efectuar simplificaciones para facilitar la obtención de resultados, siendo los efectos tensionales (de mayor a menor) más representativos aquellos debidos a cargas por efecto térmico, presión interna del fluido y las debidas al propio peso de los elementos.
- * Al tomar en cuenta las recomendaciones de la norma ASME, sección II, parte D, se obtienen resultados de una manera rápida, debido a que se introducen menor cantidad de datos en comparación con el cálculo previo (basado en la mecánica de materiales), en donde se consideran con mayor meticulosidad las condiciones de operación. Para mayor confiabilidad de resultados, se recomienda el uso de programas computacionales de elementos finitos en componentes estructurales, cargas y geometrías complejas para conocer los puntos críticos.
- * En los últimos años ha ido en aumento la implementación de plantas termosolares y existe un gran mercado potencial. La reducción de costos hará más rápida la inclusión de estos sistemas para la generación de electricidad. Al tomar en cuenta el uso del tubo de espesor 1.65 mm en lugar del tubo de espesor 2 mm, esto representa una reducción, tanto en peso de componentes, como en costos de adquisición del 13.6 %.
- * El análisis a fractura, asumiendo la presencia de una grieta longitudinal, da como resultado un buen comportamiento del tubo, estando en condiciones seguras, con un factor de seguridad 2.93 y 2.84 para el tubo de 2mm y 1.65 mm, respectivamente.
- * Se tiene fatiga de alto número de ciclos, con tensiones inferiores al límite elástico. La condición crítica de agrietamiento se produce por perforación LBB (leak before break) fuga antes de la rotura. La grieta empieza a crecer a partir de 0.24 mm y 0.20 mm, para el tubo de espesor 2mm y 1.65; alcanzando una vida del componente de 24.2 años y 17 años, respectivamente.



9.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] American Society of Mechanical Engineers. ASME section II, materials. Part D, properties. New York. 2013.
- [2] American Society of Mechanical Engineers. ASME B31.1. ASME code for pressure piping. New York. 2012.
- [3] British Standard Institution. BS 7910:2013+A1. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. 3rd ed. 2015.
- [4] Romero Alvarez Manuel. Energía solar termoeléctrica. Apartado 22. Plataforma solar de Almería – CIEMAT. Almería.
- [5] Dirección URL: <http://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/solar-power/>
- [6] Dirección URL: <http://www.solarweb.net/termosolar.php>
- [7] Dirección URL: [read:http://www.protermosolar.com/honorificos/que-es-tipos-de-plantas-beneficios/](http://www.protermosolar.com/honorificos/que-es-tipos-de-plantas-beneficios/)
- [8] Silva Pérez Manuel. Aprovechamiento de la energía solar en media y alta temperatura. Sistemas termosolares de concentración. Grupo de Termodinámica y Energías Renovables Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos. 2004.
- [9] Dirección URL: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70237/fichero/4.+CAPITULO+2.+INTRODUCCION%20UCCI%20C3%93N.pdf>
- [10] Dirección URL: <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-321.html>
- [11] Lukács János. Fatigue crack growth test on type 321 austenitic stainless Steel in corrosive environment at elevated temperatura. Department of mechanical engineering. University of Miskolc. Hungary. 2010.
- [12] Hibbeler Russell. Mecánica de materiales. 8va ed. México. 2011.
- [13] High temperature characteristics of stainless steels. Dirección URL: http://www.academia.edu/8980505/A_DESIGNERS_HANDBOOK_SERIES_N_o



_9004_HIGH-
TEMPERATURE_CHARACTERISTICS_OF_STAINLESS_STEELS



10.- SIMBOLOGÍA

Símbolo	Unidad	Descripción
D	m, mm	Diámetro externo de tubo
e	mm	Espesor
L	mm	Longitud de tubo
D_V	mm	Diámetro exterior de tubo de vidrio
d_s	mm	Distancia entre tubos cuadrados de soporte
T_1	$^{\circ}C$	Temperatura en la parte superior externa del tubo de acero
T_2	$^{\circ}C$	Temperatura en la parte superior interna del tubo de acero
T_3	$^{\circ}C$	Temperatura en la parte inferior interna del tubo de acero
T_4	$^{\circ}C$	Temperatura en la parte inferior externa del tubo de acero
T_F	$^{\circ}C$	Temperatura de fluido térmico
R	mm	Radio externo del tubo de acero
r	mm	Radio interno del tubo de acero
Q_{cond}	W/m	Concentración de radiación solar absorbida por el tubo
T_{abs}	$^{\circ}C$	Temperatura absorbida
k_{abs}	$\frac{W}{m \cdot ^{\circ}C}$	Conductividad térmica del acero inoxidable
$T_{diseño}$	$^{\circ}C$	Temperatura de diseño
ρ_{AC}	kg/m^3	Densidad del acero inoxidable
E	MPa	Módulo elástico
ν	—	Coefficiente de Poisson



α	$\frac{mm}{mm \cdot ^\circ C}$	Coefficiente de expansión térmica
σ_y	MPa	Límite elástico
σ_{adm}	MPa	Tensión admisible
ρ_V	kg/m^3	Densidad del vidrio
ρ_F	kg/m^3	Densidad del fluido térmico
p, p_F	MPa	Presión interna del fluido
d	m	Diámetro interno del tubo de acero
A_{AC}	m^2	Sección del tubo de acero
V_{AC}	m^2	Volumen del tubo de acero
m_{AC}	kg	Masa del tubo de acero
I, I_x, I_y, I_z	m^4	Inercia
G	MPa	Módulo cortante
d_V	m	Diámetro interno del tubo de vidrio
A_V	m^2	Área del tubo de vidrio
V_V	m^2	Volumen del tubo de vidrio
m_{Fu}	kg	Masa de fuelles
A_F	m^2	Área del fluido térmico
V_F	m^2	Volumen del fluido térmico
m_F	kg	Masa del fluido térmico
m_T	kg	Masa total
W_T	N	Peso total
g	m/s^2	Gravedad
y_W	m	Deflexión debido al peso



q	N/m	Carga distribuida de peso
W	N	Peso
σ_L	MPa	Tensión longitudinal
σ_T	MPa	Tensión circunferencial
M_{F1}	MPa	Momento flector debido al peso de los componentes
σ_W	MPa	Tensión debido al peso
M	$N \cdot m$	Momento
c	m	Distancia desde el eje neutro a la fibra exterior de la sección transversal
τ_W	MPa	Cortante debido al peso de los componentes
M'_F	$N \cdot m$	Momento flector externo debido a rótulas esféricas en los extremos
θ_{A-B}	rad	Ángulo comprendido entre dos tangentes en los puntos A y B
M_F	$N \cdot m$	Momento flector
y_{B-A}	m	Deflexión máxima
$\theta_{(x)}, \theta_1, \theta_2, \theta_3$	rad	Ángulo comprendido entre dos tangentes en los puntos 1, 2, 3 respectivamente
R_1, R_2, R_3	N	Reacción en los puntos 1, 2, 3 respectivamente
$y_{(x)}, y_2, y_3, y_4$	m	Deflexión en los puntos 2, 3, 4 respectivamente
φ	rad	Ángulo auxiliar
R'_1, R'_2, R'_3	N	Reacción auxiliar en los puntos 1, 2, 3 respectivamente
k_1	$N \cdot m$	Rigidez del tubo al giro (flexional)
θ	rad	Ángulo de giro



M_{T1}	$N \cdot m$	Momento torsor debido a rótulas esféricas en los extremos
J, I_0	m^4	Momento polar de inercia
k_{T1}	$N \cdot m$	Rigidez del tubo a torsión
a, L_1	mm, m	Longitud de placa muelle
b	mm	Ancho de placa muelle
k_{Fx1}, k_{Fy1}	$N \cdot \frac{m}{rad}$	Rigidez a flexión de placa muelle según ejes x, y
k_{T2}	$N \cdot \frac{m}{rad}$	Rigidez a torsión de placa muelle.
l	mm	Lado del tubo cuadrado
L_2	mm	Longitud de tubo cuadrado
A_{tc}	mm^2, m^2	Área del tubo cuadrado
M_o	$N \cdot m$	Momento a flexión de tubo cuadrado
F	N	Fuerza aplicada
y_o	mm, m	Deflexión en tubo cuadrado
k_{F2}	$N \cdot m$	Rigidez a flexión de un tubo cuadrado
k_{TT1}	$N \cdot \frac{m}{rad}$	Rigidez a flexión de soporte simple (dos tubos cuadrados)
σ	MPa	Tensión
ϵ	—	Deformación
ΔL	mm, m	Variación de longitud
k_{TT2}	$N \cdot \frac{m}{rad}$	Rigidez a flexión considerando soporte simple y placa muelle
k_{F3}	$N \cdot \frac{m}{rad}$	Rigidez a flexión de soporte doble (dos pares de tubos cuadrados con placas muelle)



k_{T3}	$N \cdot \frac{m}{rad}$	Rigidez a torsión de un tubo cuadrado
k_{T4}	$N \cdot \frac{m}{rad}$	Rigidez a torsión de soporte simple (dos tubos cuadrados)
k_{T5}	$N \cdot \frac{m}{rad}$	Rigidez a torsión considerando soporte simple y placa muelle
k_{T6}	$N \cdot \frac{m}{rad}$	Rigidez a torsión de soporte doble (dos pares de tubos cuadrados con placas muelle)
F_1	—	Factor reductor del momento flector (tubo + soporte)
M_{Fef}	$N \cdot m$	Momento flector efectivo
σ_{Fef}	MPa	Tensión debida a momento flector efectivo
F_2	—	Factor reductor del momento tensor (tubo + soporte)
M_{Tef}	$N \cdot m$	Momento torsor efectivo
τ_M	MPa	Cortante debida a momento torsor efectivo
ΔT_1	$^{\circ}C$	Gradiente de temperatura entre parte superior externa e inferior interna del tubo
ΔT_2	$^{\circ}C$	Gradiente de temperatura entre parte inferior interna e inferior externa del tubo
T	$^{\circ}C$	Temperatura
$\Delta T'_2$	$^{\circ}C$	Temperatura media en la parte inferior del tubo
$\delta_{A/B}$	—	Desplazamiento de A respecto a B
δ_T	—	Desplazamiento térmico
δ_F	—	Desplazamiento provocado por la fuerza F
σ_{TT1}	MPa	Tensión longitudinal provocada por variación de temperatura
σ_{TT2}	MPa	Tensión circunferencial provocada por variación de temperatura



$\Delta T'_1$	$^{\circ}C$	Temperatura media en todo el tubo
Ψ	rad	Ángulo de deformación
y_t	m	Deflexión por alargamiento debida a variación de temperatura
M_t	$N \cdot m$	Momento debido a variación de temperatura
y_{tt}	m	Deflexión por tensión debida a temperatura
$y_{tt'}$	m	Deflexión debida a temperatura
y_T	m	Deflexión total
σ_{LA}	MPa	Tensión longitudinal en el punto A
σ_{LB}	MPa	Tensión longitudinal en el punto B
σ_{LC}	MPa	Tensión longitudinal en el punto C
σ_{LD}	MPa	Tensión longitudinal en el punto D
σ_{LE}	MPa	Tensión longitudinal en el punto E
σ_{LF}	MPa	Tensión longitudinal en el punto F
σ_{LG}	MPa	Tensión longitudinal en el punto G
σ_{LH}	MPa	Tensión longitudinal en el punto H
σ_{CA}	MPa	Tensión circunferencial en el punto A
σ_{CB}	MPa	Tensión circunferencial en el punto B
σ_{CC}	MPa	Tensión circunferencial en el punto C
σ_{CD}	MPa	Tensión circunferencial en el punto D
σ_{CE}	MPa	Tensión circunferencial en el punto E
σ_{CF}	MPa	Tensión circunferencial en el punto F
σ_{CG}	MPa	Tensión circunferencial en el punto G



σ_{CH}	<i>MPa</i>	Tensión circunferencial en el punto H
σ_{VM}	<i>MPa</i>	Tensión de Von Mises
σ_{xx}	<i>MPa</i>	Tensión en el eje x
σ_{yy}	<i>MPa</i>	Tensión en el eje y
σ_{zz}	<i>MPa</i>	Tensión en el eje z
τ_{xy}	<i>MPa</i>	Cortante en el eje xy
τ_{xz}	<i>MPa</i>	Cortante en el eje xz
τ_{yz}	<i>MPa</i>	Cortante en el eje yz
σ_C	<i>MPa</i>	Tensión circunferencial
σ_{VM-A}	<i>MPa</i>	Tensión de Von Mises en el punto A
σ_{VM-B}	<i>MPa</i>	Tensión de Von Mises en el punto B
σ_{VM-C}	<i>MPa</i>	Tensión de Von Mises en el punto C
σ_{VM-D}	<i>MPa</i>	Tensión de Von Mises en el punto D
σ_{VM-E}	<i>MPa</i>	Tensión de Von Mises en el punto E
σ_{VM-F}	<i>MPa</i>	Tensión de Von Mises en el punto F
σ_{VM-G}	<i>MPa</i>	Tensión de Von Mises en el punto G
σ_{VM-H}	<i>MPa</i>	Tensión de Von Mises en el punto H
<i>FS</i>	—	Factor de seguridad
D_n	<i>mm</i>	Diámetro nominal externo
σ_{req}	<i>MPa</i>	Tensión requerida
e_{min}	<i>mm</i>	Espesor mínimo
e_n	<i>mm</i>	Espesor nominal



y	mm	Coeficiente depende del material y temperatura. Valor 0.4 para aceros austeníticos hasta 1050 °C
A	mm	Espesor adicional (corrosión, 0 en este caso)
p_{adm}	MPa	Presión admisible
σ_{max}	MPa	Tensión máxima
σ_u	MPa	Resistencia última a la tracción
K_{mat}	$MPa \cdot m^{0.5}$	Tenacidad a fractura del material
K_I	$MPa \cdot m^{0.5}$	Factor de intensidad de tensiones
K_r	—	Relación K_I sobre K_{mat}
K_{th}	$MPa \cdot m^{0.5}$	Umbral de crecimiento de grieta
σ_m	MPa	Tensión primaria de membrana
σ_{ref}	MPa	Tensión de referencia
L_r	—	Relación de tensión aplicada σ_{ref} , sobre el límite elástico σ_y
L_{rmax}	—	Límite permitido de L_r
M_m	—	Factor de aumento/reducción de intensidad de tensión
μ	—	Parámetro para la obtención del diagrama de fallo, FAD, se toma el valor mínimo entre 0.001 (E/σ_y) ó 0.6
N_{FAD}	—	Parámetro para la obtención del diagrama de fallo, FAD, en función de σ_y, σ_u
a_c	mm	Tamaño crítico de grieta
σ_{max}	MPa	Tensión máxima
σ_{min}	MPa	Tensión mínima
$\Delta\sigma$	MPa	Variación de tensión

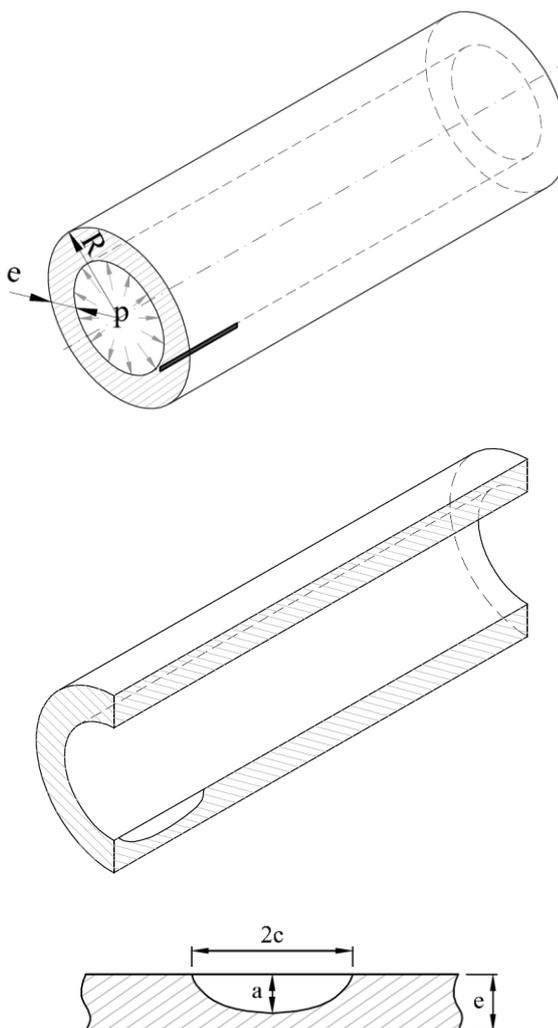


f	Hz	Frecuencia
$\sigma_{m'}$	MPa	Tensión media
σ_a	MPa	Tensión alterna
σ_a^0	MPa	Tensión alterna para $\sigma_{m'}$
N	<i>ciclos</i>	Vida a fatiga
σ_f'	—	Coeficiente de resistencia a la fatiga
b	—	Exponente cuyo valor oscila entre -0.05 a -0.12 en la mayoría de los metales
t	<i>años</i>	Tiempo
C	—	Constante del material en el crecimiento de grietas con cargas cíclicas
a_o	<i>mm, m</i>	Tamaño de grieta inicial
a_f	<i>mm, m</i>	Tamaño de grieta final

ANEXOS

ANEXO 1.1

GRIETAS LONGITUDINALES INTERNAS, $e = 1.8 \text{ mm}$ ($e_n = 2 \text{ mm}$)





ANEXO 1.2

GRIETAS LONGITUDINALES INTERNAS

Tubería $e=1.8$ mm

Grieta interna

 $a/c = 0.2$

a(mm)	2c (mm)	N (ciclos)	t (años)	t(meses)	t(días)	Observación
0.231	2.31	47335	25.0	304.4	9131	
0.237	2.37	45778	24.2	294.4	8831	P
0.25	2.5	42647	22.5	274.2	8227	P
0.3	3	33053	17.5	212.5	6376	P
0.35	3.5	26178	13.8	168.3	5050	P
0.4	4	20873	11.0	134.2	4026	P
0.45	4.5	16818	8.9	108.1	3244	P
0.5	5	13688	7.2	88.0	2640	P
0.55	5.5	11231	5.9	72.2	2167	P
0.6	6	9272	4.9	59.6	1789	P
0.65	6.5	7696	4.1	49.5	1485	P
0.7	7	6417	3.4	41.3	1238	P
0.75	7.5	5372	2.8	34.5	1036	P
0.8	8	4510	2.4	29.0	870	P
0.85	8.5	3795	2.0	24.4	732	P
0.9	9	3197	1.7	20.6	617	P
0.95	9.5	2662	1.4	17.1	514	P
1	10	2218	1.2	14.3	428	P
1.05	10.5	1848	1.0	11.9	357	P
1.1	11	1538	0.8	9.9	297	P
1.15	11.5	1277	0.7	8.2	246	P
1.2	12	1057	0.6	6.8	204	P
1.25	12.5	872	0.5	5.6	168	P
1.3	13	715	0.4	4.6	138	P
1.35	13.5	582	0.3	3.7	112	P
1.4	14	469	0.2	3.0	90	P
1.45	14.5	373	0.2	2.4	72	P
1.5	15	289	0.2	1.9	56	P
1.55	15.5	219	0.1	1.4	42	P
1.6	16	160	0.1	1.0	31	P
1.65	16.5	109	0.1	0.7	21	P
1.7	17	66	0.0	0.4	13	P
1.75	17.5	30	0.0	0.2	6	P
1.8	18	0	0.0	0.0	0	P

P: La grieta propaga



ANEXO 1.3

GRIETAS LONGITUDINALES INTERNAS

Tubería $e=1.8$ mm

Grieta interna

 $a/c = 0.6$

a(mm)	2c (mm)	N (ciclos)	t (años)	t(meses)	t(días)	Observación
0.354	1.18	61425	32.5	395.0	11849	P
0.43	1.43	47333	25.0	304.4	9131	P
0.45	1.5	44369	23.4	285.3	8559	P
0.5	1.7	37957	20.1	244.1	7322	P
0.55	1.8	32681	17.3	210.1	6304	P
0.6	2.0	28282	14.9	181.9	5456	P
0.65	2.2	24571	13.0	158.0	4740	P
0.7	2.3	21410	11.3	137.7	4130	P
0.75	2.5	18697	9.9	120.2	3607	P
0.8	2.7	16351	8.6	105.1	3154	P
0.85	2.8	14312	7.6	92.0	2761	P
0.9	3.0	12530	6.6	80.6	2417	P
0.95	3.2	10962	5.8	70.5	2115	P
1	3.3	9580	5.1	61.6	1848	P
1.05	3.5	8359	4.4	53.7	1612	P
1.1	3.7	7276	3.8	46.8	1404	P
1.15	3.8	6313	3.3	40.6	1218	P
1.2	4.0	5455	2.9	35.1	1052	P
1.25	4.2	4688	2.5	30.1	904	P
1.3	4.3	4002	2.1	25.7	772	P
1.35	4.5	3387	1.8	21.8	653	P
1.4	4.7	2834	1.5	18.2	547	P
1.45	4.8	2338	1.2	15.0	451	P
1.5	5.0	1893	1.0	12.2	365	P
1.55	5.2	1492	0.8	9.6	288	P
1.6	5.3	1130	0.6	7.3	218	P
1.65	5.5	803	0.4	5.2	155	P
1.7	5.7	508	0.3	3.3	98	P
1.75	5.8	46	0.0	0.3	9	P
1.8	6.0	0	0.0	0.0	0	P

P: La grieta propaga



ANEXO 1.4

GRIETAS LONGITUDINALES INTERNAS

Tubería $e=1.8$ mm

Grieta interna

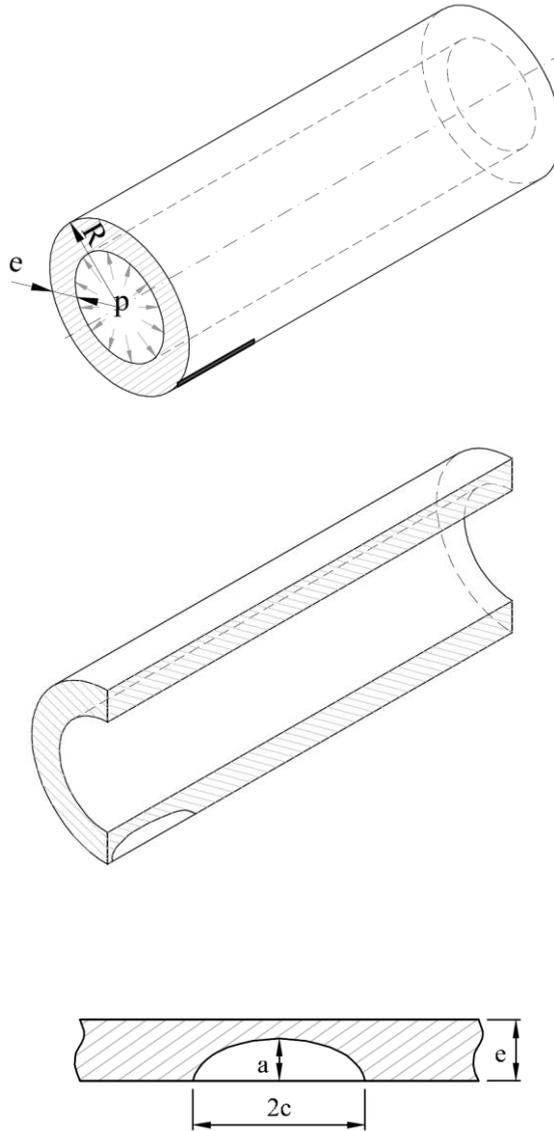
a/c = 1

a(mm)	2c (mm)	N (ciclos)	t (años)	t(meses)	t(días)	Observación
0.56	1.12	79720	42.1	512.6	15378	P
0.778	1.56	47393	25.0	304.7	9142	P
0.8	1.60	45073	23.8	289.8	8695	P
0.85	1.70	40227	21.3	258.7	7760	P
0.9	1.80	35901	19.0	230.8	6925	P
0.95	1.90	32014	16.9	205.8	6175	P
1	2.00	28511	15.1	183.3	5500	P
1.05	2.10	25344	13.4	163.0	4889	P
1.1	2.20	22470	11.9	144.5	4334	P
1.15	2.30	19854	10.5	127.7	3830	P
1.2	2.40	17465	9.2	112.3	3369	P
1.25	2.50	15279	8.1	98.2	2947	P
1.3	2.60	13259	7.0	85.3	2558	P
1.35	2.70	11403	6.0	73.3	2200	P
1.4	2.80	9696	5.1	62.3	1870	P
1.45	2.90	8129	4.3	52.3	1568	P
1.5	3.00	6695	3.5	43.0	1291	P
1.55	3.10	5366	2.8	34.5	1035	P
1.6	3.20	4132	2.2	26.6	797	P
1.65	3.30	2983	1.6	19.2	575	P
1.7	3.40	1915	1.0	12.3	369	P
1.75	3.50	923	0.5	5.9	178	P
1.8	3.60	0	0.0	0.0	0	P

P: La grieta propaga



ANEXO 2.1

GRIETAS LONGITUDINALES EXTERNAS, $e = 1.8 \text{ mm}$ ($e_n = 2 \text{ mm}$)



ANEXO 2.2

GRIETAS LONGITUDINALES EXTERNAS

Tubería $e=1.8$ mm

Grieta externa

 $a/c = 0.2$

a(mm)	2c (mm)	N (ciclos)	t (años)	t(meses)	t(días)	Observación
0.275	2.75	51291	27.1	329.8	9894	P
0.291	2.91	47288	25.0	304.1	9122	P
0.3	3.00	45223	23.9	290.8	8723	P
0.35	3.50	35701	18.9	229.6	6887	P
0.4	4.00	28152	14.9	181.0	5430	P
0.45	4.50	22401	11.8	144.0	4321	P
0.5	5.00	18018	9.5	115.9	3476	P
0.55	5.50	14623	7.7	94.0	2821	P
0.6	6.00	11961	6.3	76.9	2307	P
0.65	6.50	9841	5.2	63.3	1898	P
0.7	7.00	8136	4.3	52.3	1570	P
0.75	7.50	6751	3.6	43.4	1302	P
0.8	8.00	5618	3.0	36.1	1084	P
0.85	8.50	4687	2.5	30.1	904	P
0.9	9.00	3917	2.1	25.2	756	P
0.95	9.50	3203	1.7	20.6	618	P
1	10.00	2623	1.4	16.9	506	P
1.05	10.50	2149	1.1	13.8	415	P
1.1	11.00	1761	0.9	11.3	340	P
1.15	11.50	1440	0.8	9.3	278	P
1.2	12.00	1176	0.6	7.6	227	P
1.25	12.50	957	0.5	6.2	185	P
1.3	13.00	774	0.4	5.0	149	P
1.35	13.50	623	0.3	4.0	120	P
1.4	14.00	496	0.3	3.2	96	P
1.45	14.50	389	0.2	2.5	75	P
1.5	15.00	296	0.2	1.9	57	P
1.55	15.50	220	0.1	1.4	43	P
1.6	16.00	158	0.1	1.0	30	P
1.65	16.50	106	0.1	0.7	20	P
1.7	17.00	64	0.0	0.4	12	P
1.75	17.50	29	0.0	0.2	6	P
1.8	18.00	0	0.0	0.0	0	P

P: La grieta propaga



ANEXO 2.3

GRIETAS LONGITUDINALES EXTERNAS

Tubería $e=1.8$ mm

Grieta externa

 $a/c = 0.6$

a(mm)	2c (mm)	N (ciclos)	t (años)	t(meses)	t(días)	Observación
0.416	1.39	67927	35.9	436.8	13103	P
0.528	1.76	47304	25.0	304.2	9125	P
0.55	1.83	44223	23.4	284.4	8531	P
0.6	2.00	38058	20.1	244.7	7341	P
0.65	2.17	32885	17.4	211.5	6344	P
0.7	2.33	28503	15.1	183.3	5498	P
0.75	2.50	24762	13.1	159.2	4777	P
0.8	2.67	21546	11.4	138.5	4156	P
0.85	2.83	18766	9.9	120.7	3620	P
0.9	3.00	16349	8.6	105.1	3154	P
0.95	3.17	14249	7.5	91.6	2749	P
1	3.33	12407	6.6	79.8	2393	P
1.05	3.50	10786	5.7	69.4	2081	P
1.1	3.67	9352	4.9	60.1	1804	P
1.15	3.83	8078	4.3	51.9	1558	P
1.2	4.00	6950	3.7	44.7	1341	P
1.25	4.17	5948	3.1	38.2	1147	P
1.3	4.33	5056	2.7	32.5	975	P
1.35	4.50	4262	2.3	27.4	822	P
1.4	4.67	3553	1.9	22.8	685	P
1.45	4.83	2920	1.5	18.8	563	P
1.5	5.00	2357	1.2	15.2	455	P
1.55	5.17	1852	1.0	11.9	357	P
1.6	5.33	1399	0.7	9.0	270	P
1.65	5.50	991	0.5	6.4	191	P
1.7	5.67	624	0.3	4.0	120	P
1.75	5.83	295	0.2	1.9	57	P
1.8	6.00	0	0.0	0.0	0	P

P: La grieta propaga



ANEXO 2.4

GRIETAS LONGITUDINALES EXTERNAS

Tubería $e=1.8$ mm

Grieta externa

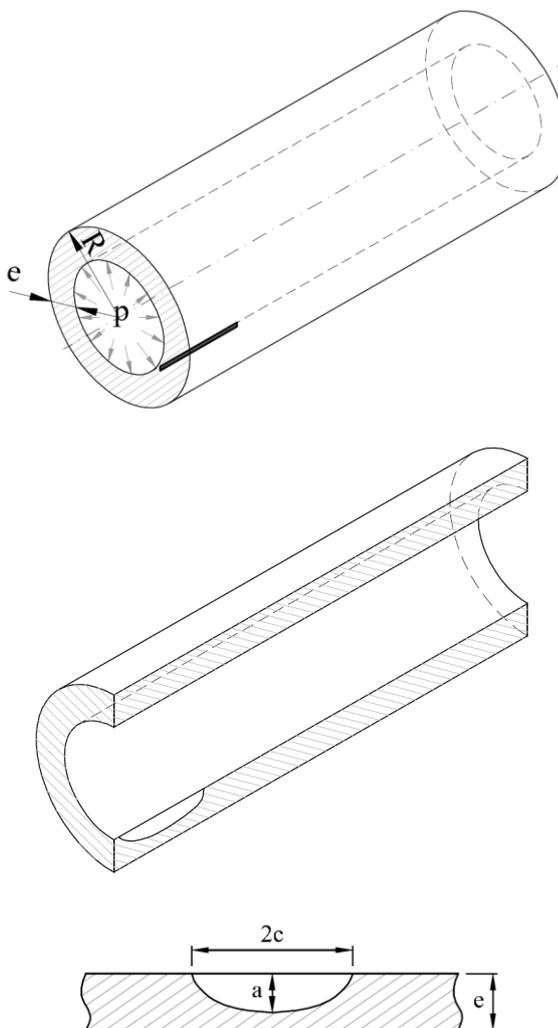
 $a/c = 1$

a(mm)	2c (mm)	N (ciclos)	t (años)	t(meses)	t(días)	Observación
0.665	1.33	85199	45.0	547.8	16435	P
0.915	1.83	47396	25.0	304.8	9143	P
0.95	1.90	43748	23.1	281.3	8439	P
1	2.00	38975	20.6	250.6	7518	P
1.05	2.10	34656	18.3	222.8	6685	P
1.1	2.20	30735	16.2	197.6	5929	P
1.15	2.30	27163	14.4	174.7	5240	P
1.2	2.40	23901	12.6	153.7	4611	P
1.25	2.50	20915	11.1	134.5	4034	P
1.3	2.60	18174	9.6	116.9	3506	P
1.35	2.70	15653	8.3	100.7	3020	P
1.4	2.80	13331	7.0	85.7	2572	P
1.45	2.90	11191	5.9	72.0	2159	P
1.5	3.00	9221	4.9	59.3	1779	P
1.55	3.10	7394	3.9	47.5	1426	P
1.6	3.20	5697	3.0	36.6	1099	P
1.65	3.30	4121	2.2	26.5	795	P
1.7	3.40	2654	1.4	17.1	512	P
1.75	3.50	1282	0.7	8.2	247	P
1.8	3.60	0	0.0	0.0	0	P

P: La grieta propaga

ANEXO 3.1

GRIETAS LONGITUDINALES INTERNAS, $e = 1.55 \text{ mm}$ ($e_n = 1.65 \text{ mm}$)





ANEXO 3.2

GRIETAS LONGITUDINALES INTERNAS

Tubería $e=1.55$ mm

Grieta interna

 $a/c = 0.2$

a(mm)	2c (mm)	N (ciclos)	t (años)	t(meses)	t(días)	Observación
0.1433	1.43	47390	25.0	304.7	9142	
0.197	1.97	32101	17.0	206.4	6192	P
0.2	2.00	31473	16.6	202.4	6071	P
0.25	2.5	23147	12.2	148.8	4465	P
0.3	3	17568	9.3	113.0	3389	P
0.35	3.5	13517	7.1	86.9	2607	P
0.4	4	10553	5.6	67.9	2036	P
0.45	4.5	8345	4.4	53.7	1610	P
0.5	5	6663	3.5	42.8	1285	P
0.55	5.5	5361	2.8	34.5	1034	P
0.6	6	4341	2.3	27.9	837	P
0.65	6.5	3533	1.9	22.7	681	P
0.7	7	2886	1.5	18.6	557	P
0.75	7.5	2364	1.2	15.2	456	P
0.8	8	1928	1.0	12.4	372	P
0.85	8.5	1564	0.8	10.1	302	P
0.9	9	1269	0.7	8.2	245	P
0.95	9.5	1029	0.5	6.6	198	P
1	10	831	0.4	5.3	160	P
1.05	10.5	668	0.4	4.3	129	P
1.1	11	534	0.3	3.4	103	P
1.15	11.5	423	0.2	2.7	82	P
1.2	12	331	0.2	2.1	64	P
1.25	12.5	254	0.1	1.6	49	P
1.3	13	190	0.1	1.2	37	P
1.35	13.5	136	0.1	0.9	26	P
1.4	14	92	0.0	0.6	18	P
1.45	14.5	55	0.0	0.4	11	P
1.5	15	25	0.0	0.2	5	P
1.55	15.5	0	0.0	0.0	0	P

P: La grieta propaga



ANEXO 3.3

GRIETAS LONGITUDINALES INTERNAS

Tubería $e=1.55$ mm

Grieta interna

 $a/c = 0.6$

a(mm)	2c (mm)	N (ciclos)	t (años)	t(meses)	t(días)	Observación
0.272	0.91	47326	25.0	304.3	9129	
0.294	0.98	42975	22.7	276.3	8290	P
0.3	1.0	41890	22.1	269.4	8081	P
0.35	1.2	34209	18.1	220.0	6599	P
0.4	1.3	28341	15.0	182.2	5467	P
0.45	1.5	23727	12.5	152.6	4577	P
0.5	1.7	20015	10.6	128.7	3861	P
0.55	1.8	16981	9.0	109.2	3276	P
0.6	2.0	14469	7.6	93.0	2791	P
0.65	2.2	12390	6.5	79.7	2390	P
0.7	2.3	10643	5.6	68.4	2053	P
0.75	2.5	9151	4.8	58.8	1765	P
0.8	2.7	7847	4.1	50.5	1514	P
0.85	2.8	6706	3.5	43.1	1294	P
0.9	3.0	5719	3.0	36.8	1103	P
0.95	3.2	4867	2.6	31.3	939	P
1	3.3	4130	2.2	26.6	797	P
1.05	3.5	3484	1.8	22.4	672	P
1.1	3.7	2916	1.5	18.8	563	P
1.15	3.8	2415	1.3	15.5	466	P
1.2	4.0	1973	1.0	12.7	381	P
1.25	4.2	1582	0.8	10.2	305	P
1.3	4.3	1236	0.7	8.0	239	P
1.35	4.5	929	0.5	6.0	179	P
1.4	4.7	656	0.3	4.2	127	P
1.45	4.8	412	0.2	2.6	79	P
1.5	5.0	194	0.1	1.2	37	P
1.55	5.2	0	0.0	0.0	0	P

P: La grieta propaga



ANEXO 3.4

GRIETAS LONGITUDINALES INTERNAS

Tubería $e=1.55$ mm

Grieta interna

 $a/c = 1$

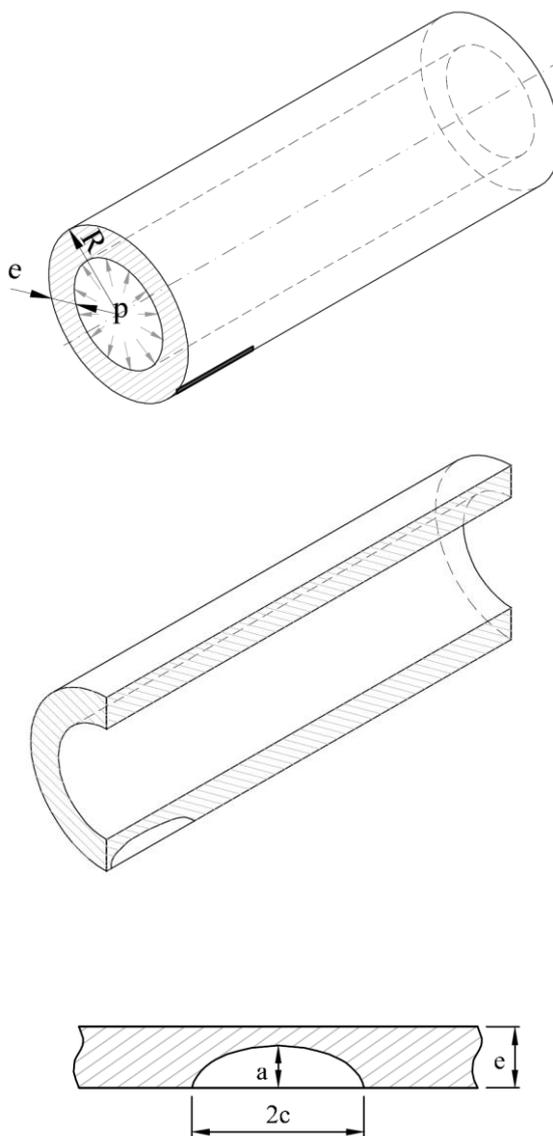
a(mm)	2c (mm)	N (ciclos)	t (años)	t(meses)	t(días)	Observación
0.464	0.93	56389	29.8	362.6	10877	P
0.525	1.05	47303	25.0	304.2	9125	P
0.55	1.10	44111	23.3	283.6	8509	P
0.6	1.20	38465	20.3	247.3	7420	P
0.65	1.30	33645	17.8	216.3	6490	P
0.7	1.40	29482	15.6	189.6	5687	P
0.75	1.50	25849	13.7	166.2	4986	P
0.8	1.60	22654	12.0	145.7	4370	P
0.85	1.70	19828	10.5	127.5	3825	P
0.9	1.80	17313	9.1	111.3	3340	P
0.95	1.90	15067	8.0	96.9	2907	P
1	2.00	13054	6.9	83.9	2518	P
1.05	2.10	11240	5.9	72.3	2168	P
1.1	2.20	9595	5.1	61.7	1851	P
1.15	2.30	8097	4.3	52.1	1562	P
1.2	2.40	6737	3.6	43.3	1300	P
1.25	2.50	5502	2.9	35.4	1061	P
1.3	2.60	4381	2.3	28.2	845	P
1.35	2.70	3353	1.8	21.6	647	P
1.4	2.80	2408	1.3	15.5	465	P
1.45	2.90	1538	0.8	9.9	297	P
1.5	3.00	737	0.4	4.7	142	P
1.55	3.10	0	0.0	0.0	0	P

P: La grieta propaga



ANEXO 4.1

GRIETAS LONGITUDINALES EXTERNAS, $e = 1.55 \text{ mm}$ ($e_n = 1.65 \text{ mm}$)





ANEXO 4.2

GRIETAS LONGITUDINALES EXTERNAS

Tubería $e=1.55$ mm

Grieta externa

 $a/c = 0.2$

a(mm)	2c (mm)	N (ciclos)	t (años)	t(meses)	t(días)	Observación
0.181	1.81	47385	25.0	304.7	9141	
0.225	2.25	35482	18.8	228.2	6845	P
0.25	2.50	30530	16.1	196.3	5889	P
0.3	3.00	23106	12.2	148.6	4457	P
0.35	3.50	17597	9.3	113.1	3394	P
0.4	4.00	13582	7.2	87.3	2620	P
0.45	4.50	10625	5.6	68.3	2050	P
0.5	5.00	8405	4.4	54.0	1621	P
0.55	5.50	6707	3.5	43.1	1294	P
0.6	6.00	5388	2.8	34.6	1039	P
0.65	6.50	4349	2.3	28.0	839	P
0.7	7.00	3525	1.9	22.7	680	P
0.75	7.50	2865	1.5	18.4	553	P
0.8	8.00	2308	1.2	14.8	445	P
0.85	8.50	1843	1.0	11.8	355	P
0.9	9.00	1472	0.8	9.5	284	P
0.95	9.50	1176	0.6	7.6	227	P
1	10.00	936	0.5	6.0	181	P
1.05	10.50	743	0.4	4.8	143	P
1.1	11.00	587	0.3	3.8	113	P
1.15	11.50	459	0.2	3.0	89	P
1.2	12.00	355	0.2	2.3	69	P
1.25	12.50	269	0.1	1.7	52	P
1.3	13.00	198	0.1	1.3	38	P
1.35	13.50	140	0.1	0.9	27	P
1.4	14.00	93	0.0	0.6	18	P
1.45	14.50	55	0.0	0.4	11	P
1.5	15.00	25	0.0	0.2	5	P
1.55	15.50	0	0.0	0.0	0	P

P: La grieta propaga



ANEXO 4.3

GRIETAS LONGITUDINALES EXTERNAS

Tubería $e=1.55$ mm

Grieta externa

 $a/c = 0.6$

a(mm)	2c (mm)	N (ciclos)	t (años)	t(meses)	t(días)	Observación
0.338	1.13	47386	25.0	304.7	9141	P
0.35	1.17	45158	23.9	290.4	8711	P
0.4	1.33	37250	19.7	239.5	7185	P
0.45	1.50	31052	16.4	199.7	5990	P
0.5	1.67	26075	13.8	167.7	5030	P
0.55	1.83	22019	11.6	141.6	4248	P
0.6	2.00	18677	9.9	120.1	3603	P
0.65	2.17	15888	8.4	102.2	3065	P
0.7	2.33	13541	7.2	87.1	2612	P
0.75	2.50	11552	6.1	74.3	2228	P
0.8	2.67	9865	5.2	63.4	1903	P
0.85	2.83	8424	4.5	54.2	1625	P
0.9	3.00	7179	3.8	46.2	1385	P
0.95	3.17	6098	3.2	39.2	1176	P
1	3.33	5154	2.7	33.1	994	P
1.05	3.50	4331	2.3	27.8	835	P
1.1	3.67	3610	1.9	23.2	696	P
1.15	3.83	2979	1.6	19.2	575	P
1.2	4.00	2424	1.3	15.6	468	P
1.25	4.17	1937	1.0	12.5	374	P
1.3	4.33	1510	0.8	9.7	291	P
1.35	4.50	1132	0.6	7.3	218	P
1.4	4.67	797	0.4	5.1	154	P
1.45	4.83	499	0.3	3.2	96	P
1.5	5.00	234	0.1	1.5	45	P
1.55	5.17	0	0.0	0.0	0	P

P: La grieta propaga



ANEXO 4.4

GRIETAS LONGITUDINALES EXTERNAS

Tubería $e=1.55$ mm

Grieta externa

 $a/c = 1$

a(mm)	2c (mm)	N (ciclos)	t (años)	t(meses)	t(días)
0.541	1.08	60115	31.8	386.5	11596
0.627	1.25	47389	25.0	304.7	9141
0.65	1.30	44524	23.5	286.3	8589
0.7	1.40	38920	20.6	250.3	7508
0.75	1.50	34040	18.0	218.9	6566
0.8	1.60	29809	15.8	191.7	5750
0.85	1.70	26111	13.8	167.9	5037
0.9	1.80	22819	12.1	146.7	4402
0.95	1.90	19869	10.5	127.8	3833
1	2.00	17214	9.1	110.7	3321
1.05	2.10	14820	7.8	95.3	2859
1.1	2.20	12656	6.7	81.4	2441
1.15	2.30	10692	5.7	68.7	2062
1.2	2.40	8905	4.7	57.3	1718
1.25	2.50	7278	3.8	46.8	1404
1.3	2.60	5799	3.1	37.3	1119
1.35	2.70	4440	2.3	28.6	857
1.4	2.80	3192	1.7	20.5	616
1.45	2.90	2044	1.1	13.1	394
1.5	3.00	983	0.5	6.3	190
1.55	3.10	0	0.0	0.0	0

P: La grieta propaga



ANEXO 5.1

HOJA DE CÁLCULO DESARROLLADA, PARA ESTIMAR LA VIDA DEL COMPONENTE

TIPO DE GRIETA: LONGITUDINAL INTERNA

INGRESAR DATOS DE TUBERÍA:

MATERIAL

Tipo:	Acero Inoxidable
Temperatura (°C) =	400
E (MPa) =	169000
σ_y (MPa) =	110
σ_u (MPa) =	452
K_{mat} (MPa*m ^{0.5}) =	50
K_{th} (MPa*m ^{0.5}) =	2

GEOMETRÍA

a_0 (mm) =	0.197
a (mm) =	1.55
e (mm) =	1.55
R (mm) =	35.15
2c (mm) =	1.97

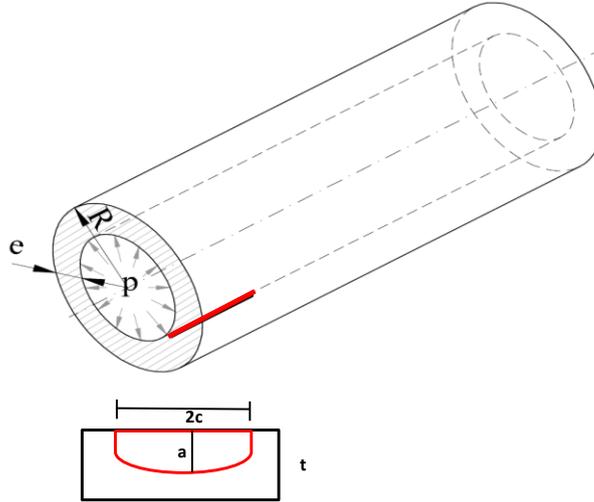
CARGAS

P_m (Mpa) =	73.70
P_b (Mpa) =	0.00
M_m (Mpa) =	1.09
M_b (Mpa) =	0.00
σ_{ref} (MPa) =	98.90

R/e	23
a/c	0.2
a/e	0.13

CARGAS - PROPAGACIÓN DE GRIETA

σ_{max} (MPa) =	73.7
σ_{min} (MPa) =	26
$\Delta\sigma$ (MPa) =	47.7
R =	0.4
f (Hz) =	0.00006



RESULTADOS FATIGA

a (mm)	$\Delta\sigma$ (Mpa)	M_m (Mpa)	M_b (Mpa)	K_t (Mpa*m ^{0.5})	Grieta	N (ciclos)	t (seg)	t (h)	t (días)	t (años)
0.20	47.70	1.09	0.00	2.00	Propaga	32101	535015248	148615	6192	17.0



ANEXO 6.1

DATOS DE NORMA ASME

Módulo elástico del acero inoxidable

ASME II	GRUPO G
Temperatura	Módulo Elástico
T (°C)	E (GPa)
-200	209
-125	204
-75	201
25	195
100	189
150	186
200	183
250	179
300	176
350	172
400	169
450	165
500	160
550	156
600	151
650	146
700	140



ANEXO 6.2

DATOS DE NORMA ASME

Propiedades del acero inoxidable

División 2				
Temperatura	Sin soldar Sm	Soldada W		
T (°C)	Sadm (MPa)	Sadm (MPa)	Su (Mpa)	Sy (Mpa)
-30	138	117		
40	138	117	517	172
65	138	117		162
100	138	117	487	154
125	138	117		147
150	138	117	461	143
175	138	117		138
200	138	117	452	133
225	138	117		129
250	135	115	452	125
275	131	111		121
300	128	109	452	118
325	125	106	452	116
350	123	104	452	113
375	120	102	452	111
400	119	101	452	110
425	117	99.4	452	108
450	116	98.2	452	101
475	114	97.2	452	106
500	113	96.3	447	105
525	112	95.5		104
550	88.7	75.4		

Sadm Maximun allowable stress
Su Tensile strength
Sy Yield strength



ANEXO 6.3

DATOS DE NORMA ASME

Coeficiente de expansión térmica

T	α
°C	10E-6 mm/mm/°C
20	15.3
50	16.0
75	16.5
100	17.0
125	17.4
150	17.8
175	18.1
200	18.4
225	18.6
250	18.8
275	18.9
300	19.1
325	19.2
350	19.3
375	19.4
400	19.5
425	19.6
450	19.8
475	20.0
500	20.2
525	20.4
550	20.6
575	20.9
600	21.1
625	21.4
650	21.6
675	21.7
700	21.7
725	21.5
750	21.2
775	20.6
800	19.7
825	18.4



ANEXO 7.1

DATOS DE FABRICANTE

Densidad de fluido térmico

T	ρ		
°C	kg/m ³		
12	1 065.9	155	947.8
15	1 063.5	160	943.4
20	1 059.6	165	938.9
25	1 055.7	170	934.5
30	1 051.7	175	930.0
35	1 047.8	180	925.5
40	1 043.8	185	920.9
45	1 039.8	190	916.4
50	1 035.8	195	911.8
55	1 031.8	200	907.1
60	1 027.8	205	902.5
65	1 023.7	210	897.8
70	1 019.7	215	893.1
75	1 015.6	220	888.3
80	1 011.5	225	883.5
85	1 007.4	230	878.7
90	1 003.2	235	873.8
95	999.1	240	868.9
100	994.9	245	864.0
105	990.7	250	859.0
110	986.5	255	854.0
115	982.3	257.1	851.9
120	978.1	260	849.0
125	973.8	265	843.9
130	969.5	270	838.7
135	965.2	275	833.6
140	960.9	280	828.3
145	956.6	285	823.0
150	952.2	290	817.7
		295	812.3
		300	806.8
		305	801.3
		310	795.8
		315	790.1
		320	784.4
		325	778.6
		330	772.8
		335	766.9
		340	760.9
		345	754.8
		350	748.6
		355	742.3
		360	735.9
		365	729.4
		370	722.8
		375	716.1
		380	709.2
		385	702.2
		390	695.0
		395	687.7
		400	680.2
		405	672.5
		410	664.6
		415	656.5
		420	648.1
		425	639.4