



**DIRECCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIERREZ**

Estudio Numérico del Comportamiento Estructural de Equipos para el Procesamiento de Hidrocarburos

Asesores

Dr. José Julián III Montes Rodríguez

M.C. Ignacio Arriola Cárdenas

Revisores

Dr. Roberto Carlos García Gómez

M.C. Juan Carlos Niños Torres

Residente

Yuriko Stephani Hernández López

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. A 27 de mayo de 2014.

Índice

INTRODUCCIÓN	4
1. JUSTIFICACIÓN.....	5
2. OBJETIVOS.....	6
2.1 Objetivo General	6
2.2 Objetivos Específicos.....	6
3. PROBLEMAS A RESOLVER.....	6
4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	7
4.1 Identificación y corte de muestras.....	7
4.2 Análisis químico	7
4.2.1 Generalidades	7
4.2.2 Equipo y material.....	8
4.2.3 Desarrollo	8
4.2.3.1 Preparación de la muestra	8
4.2.3.2 Selección del bloque patrón de calibración.....	8
4.2.3.3 Análisis químico de las muestras	9
4.3 Análisis metalográfico	10
4.3.1 Generalidades	10
4.3.2 Equipo y material.....	10
4.3.3 Preparación de las muestras	10
4.3.3.1 Corte.....	11
4.3.3.2 Limpieza	11
4.3.3.3 Montaje	11
4.3.3.4 Desbaste	11
4.3.3.5 Pulido.....	12
4.3.3.6 Ataque	12
4.3.4 Comparación de muestras.....	13
4.4 Ensayo de tensión	14
4.4.1 Generalidades	14
4.4.2 Equipo y material	16
4.4.3 Procedimiento de ensayo	16
4.4.3.1 Determinación de la velocidad de ensayo.....	16
4.4.3.2 Determinación de la velocidad para determinar las propiedades de fluencia	17
4.4.3.3 Determinación de la velocidad para determinar la resistencia a la tensión.....	17

4.4.4 Ensayo	17
4.4.5 Cálculo de resistencia a la tensión, esfuerzo de cedencia, % elongación	18
4.5 Simulación.....	19
4.5.1 Problema.....	20
4.5.2 Definición del modelo	20
4.5.3 Física Mecánica de solidos	21
4.5.4 Mallado	21
4.5.5 Estudio	21
4.6 Análisis estructural de tuberías.....	21
5. RESULTADOS	22
5.1. Identificación de las Muestras	22
5.2 Análisis Químico	24
5.3 Análisis Metalográfico	25
5.4 Ensayo de Tensión	27
5.5 Simulación.....	27
5.6 Análisis de estructural de tuberías.....	36
6. CONCLUSIONES	37
7. COMPETENCIAS DESARROLLADAS.....	38
8. BIBLIOGRAFÍA.....	39

INTRODUCCIÓN

Existen materiales que poseen la característica de mantener sus propiedades mecánicas a altas temperaturas. Este tipo de materiales son denominados materiales de alta temperatura, y son empleados para funciones específicas en donde se requiere trabajar a temperaturas elevadas de hasta 1200°C, como lo son los componentes de turbinas, intercambiadores de calor y maquinaria de algunas industrias [1].

Las refinerías de petróleo constituyen un ejemplo de aplicación de materiales que trabajan a altas temperaturas, ya que se utilizan materiales que pueden operar por arriba de los 600°C, generalmente aceros con 1 a 12% de Cromo y 0.5 a 1% de Molibdeno. La combinación de extensas horas de trabajo sometidos a cargas y altas temperaturas producen deformación plástica de los materiales, y es a lo que podríamos considerar como el fenómeno de la termofluencia [2]. Los daños más comunes que sufren las tuberías utilizadas en el procesamiento de hidrocarburos ocurren principalmente por el fenómeno de termofluencia, debido a las altas temperaturas que se manejan en el procesamiento de estos fluidos, aunque también se llevan a cabo otros fenómenos tales como la corrosión e interferencia externa (procesos naturales de degradación), que actúan de forma sinérgica en dichas tuberías [3].

La deformación plástica de un material bajo una carga a través del tiempo, genera en el material esfuerzos menores a los de cedencia, y culmina en la fractura del mismo. Dicho fenómeno es causado por procesos difusivos térmicamente activados, y aunque puede ocurrir a cualquier temperatura, es a altas temperaturas (en relación con el punto de fusión) que se manifiesta de forma significativa [4]. La termofluencia se presenta cuando el material se encuentra operando a temperaturas por arriba de $0.4 T_m$, donde T_m es la temperatura absoluta de fusión del material, también denominada temperatura homóloga [5].

La termofluencia tiene tres etapas:

- Transitoria: Velocidad de deformación alta hasta alcanzar un equilibrio dinámico, y disminuye a un valor estable. Existe una transformación de la microestructura, reacomodo de subestructura de dislocaciones y vacancias.
- Secundaria: Velocidad de deformación constante. El equilibrio es alcanzado entre los mecanismos de dislocaciones y vacancias. Los mecanismos de aniquilación de dislocaciones se llevan a cabo.

-
- Terciaria: Los cambios en la microestructura promueven una mayor deformación con un menor endurecimiento por deformación. Se provoca la formación de una constricción. Daño severo en los límites de grano con fractura intergranular [3].

La fractura en termofluencia es de tipo intergranular, las facetas de los granos están cubiertas de pequeños hoyuelos o cráteres que son cavidades separadas. Además, se presenta cierta deformación plástica, formación de cuello y un relieve superficial [3].

El fenómeno puede ser observado a nivel microestructural mediante una réplica metalográfica, en aquellas zonas donde ocurre una decarburación de los aceros al carbono, lo que conlleva a que el material adquiera ductilidad, favoreciendo así el fenómeno de termofluencia.[1]

Algunas aleaciones no ferrosas constituyen una opción de materiales que tienen la capacidad de soportar carga a una temperatura de funcionamiento cerca de su punto de fusión. Actualmente, las superaleaciones base Níquel son empleadas para secciones que requieren resistencia a altas temperaturas [1].

1. JUSTIFICACIÓN

Establecer a qué nivel de daño es aún seguro operar las líneas de tubería de los calentadores de las refinerías es de fundamental importancia, ya que tiene repercusiones económicas relacionadas con el desecho prematuro de materiales en condiciones de seguir operando y con fallos en la operación, así como repercusiones sociales que tienen que ver con la seguridad del personal que labora en dichas industrias. En este sentido, las modernas técnicas de caracterización de materiales en laboratorio y, las actuales herramientas computacionales para simulación de fenómenos y procesos, constituyen herramientas ingenieriles que, al ser empleadas en conjunto, son capaces de proporcionar información relevante relativa al comportamiento de las líneas de tubería dañadas de los calentadores.

En el presente proyecto se realizará caracterización química, metalográfica y mecánica de muestras de tubería dañada por termofluencia, así como una simulación computacional de fragmentos representativos de tubería bajo condiciones de operación similares a las reales, buscando generar información relevante para poder determinar a qué nivel de daño es seguro que una línea de tubería siga en operación en el interior de un equipo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Caracterizar muestras de tubería retirada de calentadores, para determinar su nivel de daño y propiedades actuales, así como simular el comportamiento mecánico durante operación de un fragmento representativo de tubería y, finalmente, correlacionar el nivel de daño con el desempeño predicho para dicho material.

2.2 Objetivos Específicos

- Analizar químicamente las muestras, para comprobar que se trata del grado de material requerido por la aplicación.
- Caracterizar metalográficamente los materiales, para determinar el nivel de daño microestructural que presentan las muestras.
- Realizar ensayos de tensión para obtener las propiedades tensiles de las muestras estudiadas.
- Generar la geometría de los sistemas a estudiar y simular su comportamiento mecánico bajo condiciones similares a las reales, haciendo uso de un software comercial de simulación.
- Analizar los resultados obtenidos de las simulaciones a la luz de las propiedades tensiles obtenidas para las muestras bajo estudio, y correlacionar el nivel de daño del material con el comportamiento predicho bajo condiciones similares a las de operación del equipo.

3. PROBLEMAS A RESOLVER

En instalaciones industriales tales como intercambiadores de calor, hornos, turbinas, calderas y equipos de conformado en caliente, se presenta un fenómeno denominado termofluencia, en el cual actúan sinérgicamente dos factores, que son la temperatura y la carga que deforma al material lenta y continuamente, hasta llegar a la fractura [1]. Este fenómeno ha sido objeto de estudios científicos, dado que en este tipo de sistemas una falla representa una importante pérdida económica, por lo grandes y costosos que son.

En el caso particular de las refinerías, el fenómeno de la termofluencia representa un problema en los calentadores por la operación a altas temperaturas. La identificación

oportuna del grado de daño es fundamental para determinar si el equipo puede seguir o no en operación, sin embargo, en muchas ocasiones no se hace un estudio del material, sino que se siguen procedimientos ya establecidos para retirar material de los calentadores, lo que puede generar pérdidas económicas al retirar material que aún puede seguir operando, o fallos en la producción y pérdida de vidas humanas por no haber retirado a tiempo material que ya no debía seguir en operación.

4. Procedimiento experimental

4.1 Identificación y corte de muestras

La primera actividad realizada durante el desarrollo del proyecto fue la identificación del material existente, la cual se respetaría durante todas las etapas subsecuentes, y que es de suma importancia por cuestiones de rastreabilidad de los resultados.

Enseguida se procedió al corte de las muestras, respetando la identificación realizada previamente, habilitando las muestras requeridas para cada uno de los diferentes ensayos que se realizarían.

4.2 Análisis químico [6]

El método que se utilizó para determinar la composición química de las muestras, las cuales son metálicas, fue mediante Espectrometría de Emisión Óptica por chispa y es descrito a continuación.

4.2.1 Generalidades

El principio de funcionamiento del espectrómetro es suministrar energía suficiente a un átomo o a varios tipos de átomos, para simultáneamente producir sus radiaciones características, las cuales son transmitidas a la óptica, dispersadas y medidas secuencialmente. Para esto se necesita que se produzca una descarga de un capacitor entre la superficie desbastada de una muestra conductora metálica y un electrodo con punta cónica, produciendo un efecto de calentamiento que evapora la muestra. Los electrones que se encuentran en estado basal pasan a un estado excitado, y en su regreso liberan fotones de energía equivalente a $h\nu$, donde h es la constante de Planck (6.6260×10^{-34} J.s) y ν es la frecuencia de la radiación emitida (Hz). La luz correspondiente a esta emisión atómica pasa a través de una rejilla de difracción donde

es separada en diferentes longitudes de onda que son captadas por tubos fotomultiplicadores [7].

4.2.2 Equipo y material

- ❖ Espectrómetro de Emisión Óptica por Chispa SPECTROLAB LAV-M7. Está provisto de una fuente de excitación, mesa de chispeo adecuado a la base de la muestra, electrodos de tungsteno, y sistema de lecturas y cálculo programado por computadora.
- ❖ Desbastadora de banda provista de lijas de zirconio (No.60 a 80).

4.2.3 Desarrollo

4.2.3.1 Preparación de la muestra

Para la preparación de las muestras se consideraron los siguientes puntos:

- ❖ La superficie de la muestra debe ser plana.
- ❖ Se deben evitar manchas, recubrimientos, pintura o porosidades, así como cualquier contaminación por manipuleo y abrasivo.
- ❖ Deben evitarse decoloraciones o formaciones de óxido en la superficie.

Para los materiales estudiados se cortaron muestras de aproximadamente 20 x 50 mm, las cuales se prepararon en una desbastadora de banda vertical utilizando una lija de zirconio (grado 50) que sólo se emplea para materiales base hierro, para evitar contaminación, hasta dejar una superficie plana y sin recubrimientos.

4.2.3.2 Selección del bloque patrón de calibración

Se realizó un análisis preliminar de la muestra de acuerdo a un programa general (orientativo) para aleaciones base hierro, para tener una referencia de la concentración.

Enseguida se seleccionó un bloque patrón cuya composición química fuera lo más parecida posible a la muestra. Se realizaron un mínimo 3 descargas (chispeos) sobre el bloque patrón seleccionado, buscando que no hubiese tendencia hacia un incremento o un decremento continuos en los contenidos de los elementos reportados (en caso de que se registrara tendencia se continuaría chispeando la muestra). Finalmente, se verificó que los resultados de concentración del patrón de referencia empleado estuviera dentro de la

incertidumbre estimada reportada para cada elemento en sus respectivo certificado (NIST).

La composición química del patrón utilizado para la calibración se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del bloque patrón C1152a.

ELEMENTOS (%)											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Co	Cu	V	Pb
0.142	0.64	0.95	0.023	0.064	17.76	0.44	10.86	0.22	0.097	0.033	0.047

4.2.3.3 Análisis químico de las muestras

Después de la calibración se realizó el análisis de las muestras, tomando el promedio de un mínimo de 3 chispazos para cada muestra, una vez que se evitó la ya mencionada tendencia en los resultados.

Al final del análisis de las muestras se hizo una verificación o monitoreo del equipo, empleando bloques patrón cuya composición química fuera similar a la de las muestras, para verificar que el análisis realizado se encontró en un rango confiable.

La composición química de los bloques patrón utilizados para el monitoreo se muestra en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Composición química del bloque patrón C1158a.

ELEMENTOS (%)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V
0.118	0.25	0.35	0.035	0.056	0.13	0.05	0.1	0.09	0.02

Tabla 3. Composición química del bloque patrón C1159a.

ELEMENTOS (%)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V
0.79	0.8	0.92	0.012	0.013	2.1	0.51	0.98	0.47	0.26

4.3 Análisis metalográfico [8]

El análisis metalográfico se realiza empleando un microscopio óptico metalográfico, y es necesario realizar una preparación de las muestras (especímenes metalográficos) a inspeccionar.

4.3.1 Generalidades

El análisis metalográfico es el estudio microscópico de las características estructurales de un metal o aleación. Es posible determinar el tamaño de grano, y el tamaño, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen efecto sobre las propiedades mecánicas del metal. Los informes de resultados constan de interpretación microestructural, de tamaño de grano, análisis de fases así como de fotos de la microestructura.

4.3.2 Equipo y material

- Sierra cinta Marvel.
- Equipo de limpieza por ultrasonido.
- Desbastadora Struers3.
- Prensa montadora Leco.
- Baquelita para montar muestras.
- Desbastadora manual.
- Máquina pulidora buehler.
- Paños para pulido.
- Campana de extracción.
- Alcohol Etílico o Isopropílico.
- Secadora de aire manual.
- Cotonetes.
- Sales y ácidos grado analítico.
- Material de uso común en el laboratorio.
- Lijas de agua de carburo de silicio grado 80, 210, 240, 320, 400, 600, 1200.
- Alúmina 0,5, 1, 5 μm .

4.3.3 Preparación de las muestras

En metales trabajados en caliente o en frío se deben estudiar las secciones longitudinales y transversales.

4.3.3.1 Corte

En el corte de muestras metalográficas del cuerpo principal, debe tenerse mucho cuidado para evitar afectar la estructura del metal. Deben evitarse daños a la estructura durante el corte.

Se cortaron secciones transversales y longitudinales de las muestras de aproximadamente 20 x 50 mm en la sierra cinta. El corte con sierra cinta produjo una superficie rugosa con excesivo flujo plástico que fue removido en subsecuentes preparaciones.

El método de corte se elige de modo que no altere la microestructura en el plano de pulido. Por ejemplo, el oxicorte, que suministra calor a las muestras para realizar el corte, genera cambios en la microestructura del material, razón por la cual se busca evitarlo.

4.3.3.2 Limpieza

La limpieza durante el pulido es esencial. Debe removerse toda la grasa y aceite con algún solvente orgánico adecuado.

Se realizó una limpieza ultrasónica a las secciones cortadas, la cual es especialmente efectiva en la remoción de los últimos vestigios de residuos sobre la superficie de la muestra.

4.3.3.3 Montaje

El método popular de montaje de muestras consiste en sumergir el espécimen en baquelita (resina termofija). Con ello se protege a los especímenes de daños y se provee una geometría uniforme para su preparación, ya sea manual o automática.

El montaje se hizo con baquelita en una prensa montadora, a una temperatura de 160 °C y una presión de 30 MPa, aproximadamente.

4.3.3.4 Desbaste

Una vez montadas las muestras, se realizó un desbaste que consistió de dos etapas:

Desbaste Grueso: Se realiza con lija grado 120 o más gruesa, y se utilizó para:

- Emparejar superficies irregulares o daños por el corte y eliminar óxidos.
- Eliminar grandes cantidades del material (sin cortar) y alcanzar un plano deseado

para el pulido.

- Remover las rebabas del montaje, nivelar la superficie y biselar las orillas del montaje.

Desbaste Fino: La muestra se lijó sobre papeles abrasivos de finura sucesiva, usando agua para eliminar las partículas del desbaste y como lubricante. La muestra fue limpiada en cada paso de desbaste para prevenir el acarreo de abrasivo grueso sobre los más finos.

El desbaste se inició con el papel más fino capaz de emparejar la muestra, removiendo los efectos de la anterior operación tal como el corte. El siguiente papel removió los efectos del papel anterior. La secuencia de papeles abrasivos fue con los grados 240, 320, 600, 1200 y 2000.

El método utilizado fue manual para toda la operación de desbaste, la muestra se rotaba 45° y 90° entre los distintos papeles, hasta que el anterior conjunto de líneas había sido removido. Al finalizar el desbaste en cada lija, todas las líneas de desbaste de la superficie de la muestra y su montaje terminaron en una misma dirección.

4.3.3.5 Pulido

El pulido se distingue, generalmente, del desbaste por el uso de una dispersión de abrasivos embebidos en un lubricante apropiado sobre un soporte adecuado. La selección del abrasivo, lubricante y soporte están en función del material y del objeto de la inspección.

En el presente estudio se pulieron las muestras con pasta de diamante de 1 µm, haciendo rotar las muestras como se había hecho con anterioridad en el desbaste.

El método fue manual y consistió en sujetar la muestra con la mano contra un disco giratorio cargado de abrasivo, moviendo la muestra en una trayectoria elíptica alrededor del disco en la dirección contraria al movimiento del disco.

4.3.3.6 Ataque

El ataque de las muestras se lleva a cabo considerando el tipo de muestra (tipo de material) y lo que se requiera revelar en la misma (motivo del ensayo); una misma muestra puede ser atacada de diferente manera, para revelar todas las características estructurales como pueden ser: los granos y sus límites, maclas, líneas de deslizamiento

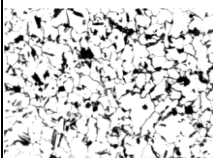
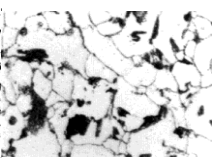
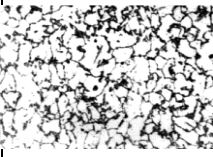
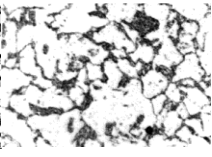
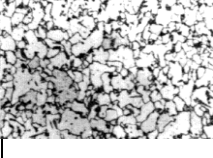
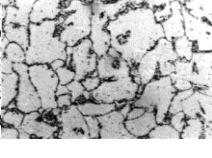
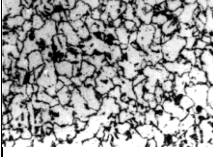

y límites de fase, así como también la identificación selectiva de ciertas fases. De las varias técnicas para revelar la microestructura se utilizará, en primer lugar, el ataque químico con un reactivo general, y si el material no se ataca debidamente se utilizará el ataque electrolítico.

El ataque fue hecho con el reactivo denominado Vilella, que contiene 5 mL Ácido Clorhídrico (HCl), 1 g Ácido Pítrico [C₆H₂OH(NO₂)₃] y 100 mL de Etanol (C₂H₅OH), para delinear los límites de grano de la ferrita y el contorno de los carburos. La muestra se limpió con Etanol antes y después del ataque.

4.3.4 Comparación de muestras

Después de haber concluido con la preparación de las muestras, éstas se observaron en el microscopio óptico, tomando fotografías de las zonas de interés representativas de las muestras.

Para concluir con el análisis se compararon las micrografías de las muestras observadas con las cartas metalográficas de la clasificación de microestructuras para aceros Cromo-Molibdeno como el analizado en el presente estudio (ver Figura 1).

CLASIFICACION DE MICROESTRUCTURAS PARA ACEROS CROMO – MOLIBDENO		
CIDESI/LAB. DE METALOGRAFIA Y ANÁLISIS DE FALLA	Acero Cr-Mo ASTM A 335	Refinería Miguel Hidalgo de Tula
TIPOS DE CLASIFICACION DE T1 A T4		
200X	500X	
		<p>T1 TIPO 1</p> <p>LOS CONSTITUYENTES MICROESTRUCTURALES DE ESTE MATERIAL EN CONDICIONES DE FABRICACION SON: MATRIZ FERRITICA (FONDO CLARO), ISLAS O COLONIAS DE PERLITA PARCIALMENTE LAMINAR (AREAS OSCURAS) Y UNA FINA DISPERSION DE CARBUROS Y PARTICULAS DE CARBURO LOCALIZADAS AL AZAR EN LA MATRIZ (PUNTOS DE COLOR NEGRO).</p>
		<p>T2 TIPO 2</p> <p>LA MORFOLOGIA DE LAS COLONIAS DE PERLITA SE TORNA VARIABLE, PREDOMINANDO AQUELLA EN LA QUE LOS CARBUROS SE ENCUENTRAN EN FORMA DE PARTICULAS. NO OBSTANTE LO ANTERIOR SE APRECIA CLARAMENTE EL MODELO PERLITICO ORIGINAL.</p>
		<p>T3 TIPO 3</p> <p>MANIFESTACION EN GRADO INTERMEDIO (40 – 60%) DE ESFEROIDIZACION Y DISPERSION DE LOS CARBUROS DE LAS COLONIAS DE PERLITA. AUN SE APRECIA RAZONABLEMENTE DEFINIDO EN MODELO PERLITICO ORIGINAL.</p>
		<p>T4 TIPO 4</p> <p>DISPERSION EN LA MATRIZ DEL 75% APROXIMADAMENTE DE LOS CARBUROS DE LAS COLONIAS DE PERLITA. LA ESFEROIDIZACION DE LOS CARBUROS CONTINUA EN AUMENTO, SE ESTIMA QUE ESTA ES DEL ORDEN DEL 90 – 100%. SE OBSERVA COALESCENCIA INCIPIENTE DE CARBUROS.</p>

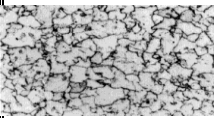
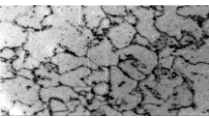
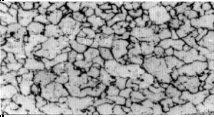
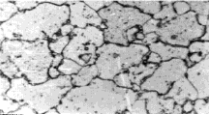
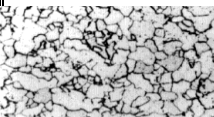
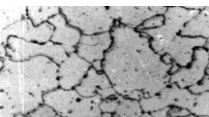
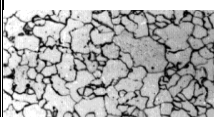
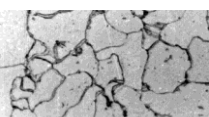
CLASIFICACION DE MICROESTRUCTURAS PARA ACEROS CROMO – MOLIBDENO		
CIDESI/LAB. DE METALOGRAFIA Y ANÁLISIS DE FALLA	Acero Cr-Mo ASTM A 335	Refinería: Miguel Hidalgo de Tula
TIPOS DE CLASIFICACION DE T5 A T8		
200 X	500 X	
		<p>T5 TIPO 5</p> <p>DISPERSION DE LOS CARBUROS Y PARTICULAS DE CARBUROS VIRTUALMENTE COMPLETA. EN LUGAR DE LAS PERLITA AHORA SE APRECIAN PEQUEÑAS AGRUPACIONES DE CARBUROS. LOS CARBUROS, PARTICULAS Y AGRUPACIONES SE ENCUENTRAN DISTRIBUIDAS AL AZAR EN LA MATRIZ. LAS COLONIAS DE PERLITA HAN PERDIDO TOTALMENTE SU DEFINICIÓN. LA COALESCENCIA DE CARBUROS CONTINUA EN AUMENTO.</p>
		<p>T6 TIPO 6</p> <p>TENDENCIA DE LOS CARBUROS A AGRUPARSE EN LOS LIMITES DE GRANO DE LA MATRIZ FERRÍTICA. LAS AGRUPACIONES DE CARBUROS CITADAS EN EL GRADO T5 HAN DESAPARECIDO PRÁCTICAMENTE EN SU TONALIDAD. SE OBSERVA MAYOR COALESCENCIA DE CARBUROS Y UN NOTORIO INCREMENTO DEL TAMAÑO DE ALGUNOS DE ELLOS.</p>
		<p>T7 TIPO 7</p> <p>LOCALIZACIÓN DE CARBUROS PREFERENCIALMENTE EN LOS LIMITES DE GRANO. AUN SE APRECIAN CARBUROS Y PARTICULAS EN CARBUROS EN EL INTERIOR DE LOS GRANOS FERRÍTICOS.</p>
		<p>T8 TIPO 8</p> <p>MICROESTRUCTURA CONSTITUIDA POR UNA MATRIZ FERRÍTICA, EN LA QUE SE OBSERVAN CARBUROS TIPO Fe_3C, Mo_3C Y Cr_7C_3 UBICADOS EN LOS LIMITES DE GRANO FORMANDO UNA RED. AUN SE APRECIAN PARTICULAS DE CARBUROS EN EL INTERIOR DE LOS GRANOS FERRÍTICOS.</p>

Figura 1. Clasificación de microestructuras para aceros Cromo-Molibdeno.

4.4 Ensayo de tensión [9]

El procedimiento para la realización de los ensayos de tensión en materiales metálicos está basado en la norma ASTM E8/E8M, y se describe a continuación.

4.4.1 Generalidades

El ensayo de tensión es utilizado para medir la resistencia de un material a una fuerza estática (aplicada lentamente). Esta prueba consiste en alargar una probeta de ensayo por fuerza de tensión, ejercida gradualmente, con el fin de conocer ciertas propiedades mecánicas del material ensayado. En general, las propiedades en cuestión son la resistencia, la rigidez y la ductilidad. Las máquinas utilizadas para el ensayo de tensión deberán utilizarse en un rango determinado de fuerza, el cual normalmente consiste del 10 al 90 % de la capacidad de la máquina. La máquina de pruebas deberá aplicar la fuerza de tensión dentro de la longitud calibrada de la probeta de ensayo, cuyo eje longitudinal debe de coincidir con la línea central de los cabezales de la máquina, debido a que una desviación en este criterio puede introducir momentos flexionantes cuyo efecto puede incrementar el esfuerzo de tensión registrado en la máquina como respuesta del material.

Las mordazas deben ser planas y en “v”, para probetas planas; se recomienda que las mordazas sujeten toda la zona de sujeción de las muestras evitando sobrepasar la zona de los radios y de sección reducida.

Los extensómetros a utilizarse deberán estar verificados según la norma ASTM E83, y deben cumplir con la clasificación requerida para el ensayo de tensión. Pueden utilizarse extensómetros cuyas longitudes calibradas sean iguales o menores a la longitud calibrada; deben ser utilizados para determinar el comportamiento a la fluencia.

Las probetas para productos conformados en general deberán efectuarse en forma longitudinal al sentido del laminado. El maquinado de las probetas debe efectuarse de tal manera que se evite sobrecalentamiento de la probeta, acabado superficial rugoso, la generación de marcas y muescas que puedan concentrar esfuerzos.

A las probetas para placa y lámina se les conoce comúnmente como “hueso de perro” o “corbata”, porque poseen una parte media que es más delgada que la zona de agarre, permitiendo que el esfuerzo se concentre en el área de trabajo y que la deformación se distribuya uniformemente a lo largo de la zona; debe considerarse que si en un ensayo la muestra falla fuera de la zona de trabajo el resultado debe descartarse ya que será erróneo. En la Figura 2 se muestra una probeta típica para ensayo de tensión, y que de hecho corresponde con las utilizadas en el presente estudio, en donde L es la longitud total de la probeta, B es la longitud de la zona de agarre, A es la longitud reducida, G es la longitud calibrada (para medición del alargamiento), R es el radio de curvatura de la transición entre zonas, W es el ancho de la zona de trabajo, C es el ancho de la zona de agarre y T es el espesor de la probeta [10].

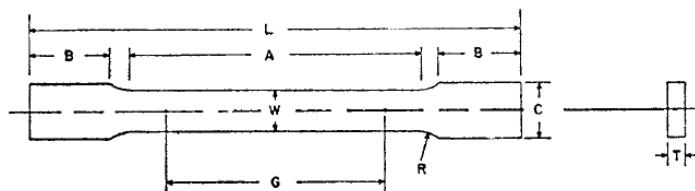


Figura 2. Probeta para ensayo de tensión según la norma ASTM E8/E8M

4.4.2 Equipo y material

- ❖ Máquina Universal Instron modelo 4482 No. Serie C3911 (ver Figura 3).
- ❖ Mordazas para sujeción de probetas planas.
- ❖ Extensómetro clase B2, longitud inicial 50 mm.
- ❖ Calibrador Vernier
- ❖ Marcador
- ❖ Cortador

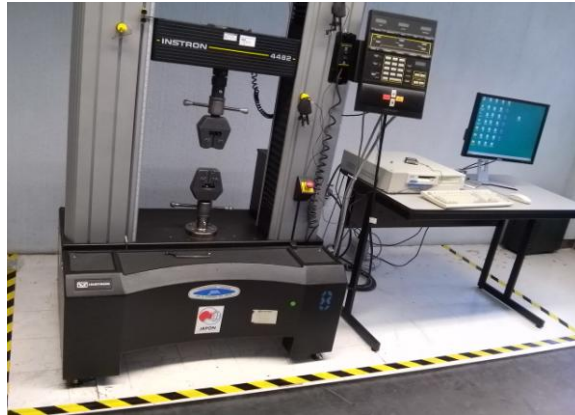


Figura 3. Máquina Universal Instron modelo 4482 No. Serie C3911 (ver Figura 3).

4.4.3 Procedimiento de ensayo

Después de identificar las probetas, se midieron el ancho y el espesor, y se marcó sobre ellas la longitud calibrada a emplear. La medición con el Calibrador Vernier se hizo en diferentes partes de la zona reducida, y se registró la menor de las lecturas encontradas. La longitud calibrada de la probeta se marcó pintando la superficie de la muestra y marcando la longitud con un rayador o navaja.

4.4.3.1 Determinación de la velocidad de ensayo

La velocidad de ensayo debe estar dentro de límites especificados en las normas del producto; en ausencia de dichas especificaciones pueden utilizarse los siguientes criterios:

4.4.3.2 Determinación de la velocidad para determinar las propiedades de fluencia

Para la realización del ensayo de tensión se necesitan dos velocidades, para la primera velocidad se recomienda utilizar el método de control conocido como “Método de la Razón de Esfuerzo”, el cual requiere de la tasa de aplicación de esfuerzo se encuentre dentro de 1.15 MPa/s y 11.5 MPa/s. Esta velocidad sirve para determinar las propiedades de fluencia del material.

Determinamos las dimensiones de la sección transversal de la probeta (mm^2) y multiplicamos por algún valor que se encuentre de los límites establecidos de 1.15 MPa y 11.5 MPa para obtener el valor de carga en N/s aplicado a la probeta. La forma de calcularlos se muestran en la Ecuación 1 y 2.

$$V_Y = 11.5 \frac{N}{\text{mm}^2 \cdot s} \times \text{Área} (\text{mm}^2) \rightarrow \text{máx} \quad (1)$$

$$V_Y = 1.15 \frac{N}{\text{mm}^2 \cdot s} \times \text{Área} (\text{mm}^2) \rightarrow \text{mín} \quad (2)$$

4.4.3.3 Determinación de la velocidad para determinar la resistencia a la tensión

La segunda velocidad sirve para determinar la resistencia a la tensión, y se recomienda utilizar, en el caso de materiales con una elongación mayor al 5 %, una velocidad en el rango de 0.05 a 0.5 mm/mm de la longitud de la sección reducida por minuto.

$$V_{RT} = A \times 0.5 \frac{m/m}{\text{min}} \rightarrow \text{máx} \quad (3)$$

$$V_{RT} = A \times 0.05 \frac{mm/mm}{\text{min}} \rightarrow \text{mín} \quad (4)$$

A = Longitud de la sección reducida

4.4.4 Ensayo

Se prepara la máquina de ensayo y se coloca la probeta en las mordazas planas, se ubica el extensómetro en la parte media de la sección reducida y se efectúa el ensayo (ver Figura 4); al término de éste se registra la carga máxima y la carga a la cedencia. El

esfuerzo de cedencia se puede determinar mediante el diagrama esfuerzo deformación utilizando el criterio de compensación al 0.2 % de la deformación, que consiste en trazar una línea paralela al módulo elástico, que parte de un valor de deformación igual al 0.2%, y que intersecta a la curva esfuerzo deformación en un punto, el cual representa el esfuerzo de cedencia. Al término de cada ensayo se miden las longitudes calibradas finales con el calibrador Vernier. De los datos recabados se calculan los valores de resistencia a la tensión, esfuerzo de cedencia y elongación.



Figura 4. Procedimiento para ensayo de tensión

4.4.5 Cálculo de resistencia a la tensión, esfuerzo de cedencia, % elongación

- **Resistencia a la tensión**

$$\sigma_T = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_{ST}} \left\{ \frac{N}{mm^2} \right\} \quad (5)$$

donde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Carga máxima en N.

A_{ST} = Área de la sección transversal original en mm^2 .

- **Esfuerzo de cedencia**

$$\sigma_Y = \frac{P_{ced}}{A_{ST}} \left\{ \frac{N}{mm^2} \right\} \quad (6)$$

donde:

P_{ced} = Carga de cedencia al 0.2 % en N.

A_{ST} = Área de la sección transversal original en mm^2 .

- **Elongación**

$$Elongación (\%) = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100 \quad (7)$$

Donde:

L_f = Longitud final de la longitud calibrada en mm.

L_o = Longitud inicial de la longitud calibrada en mm.

4.5 Simulación

El Método del Elemento Finito es el método numérico más potente aplicable al análisis de estructuras de cualquier tipo, sometidas a sollicitaciones mecánicas y térmicas tanto estacionarias como transitorias [11].

La Teoría de la Elasticidad establece para un problema dado las relaciones matemáticas exactas en forma diferencial, y plantea su integración cerrando el problema con condiciones iniciales y de frontera para obtener las funciones que definen las variables representativas del comportamiento de la estructura [11].

El Método del Elemento Finito se trata de una simplificación de dichas ecuaciones, puesto que su forma diferencial se sustituye por un conjunto discreto de ecuaciones y de sus respectivas condiciones de frontera para su posterior resolución. En función del número de estas ecuaciones será necesario, como en el presente caso, implementar o no el problema para su resolución computarizada [12].

COMSOL es un software que proporciona soluciones para el modelado multifísico. La compañía fue fundada en julio de 1986 en Estocolmo, Suecia. En 1998 lanzaron la primera versión del producto COMSOL Multiphysics. En los siguientes años la línea se amplió para incluir módulos adicionales para Mecánica Estructural, Electromagnetismo de alta y baja frecuencia, Flujo de Fluidos, Transferencia de Calor, Reacciones Químicas, MEMS, Acústica y más, así como productos LiveLink para software CAD para una integración perfecta entre las simulaciones COMSOL Multiphysics [13].

Para la simulación del presente proyecto se utilizó la versión 4.3b de COMSOL Multiphysics, que tuvo las siguientes características según nuestro caso particular:

4.5.1 Problema

El modelo consiste en una tubería de pared delgada sometida a una presión interna manométrica a temperatura y presión atmosférica ambientales, considerando que está elaborada en un material lineal e isotrópico.

4.5.2 Definición del modelo

La geometría física del problema consiste, como ya se mencionó, de una tubería de pared delgada, con un diámetro externo de 170 mm y un espesor de pared de 7.7 mm. Para el estudio se elaboró un modelo en 3 dimensiones y se utilizaron dos configuraciones distintas de tubería, las cuales se muestran en la Figura 5.

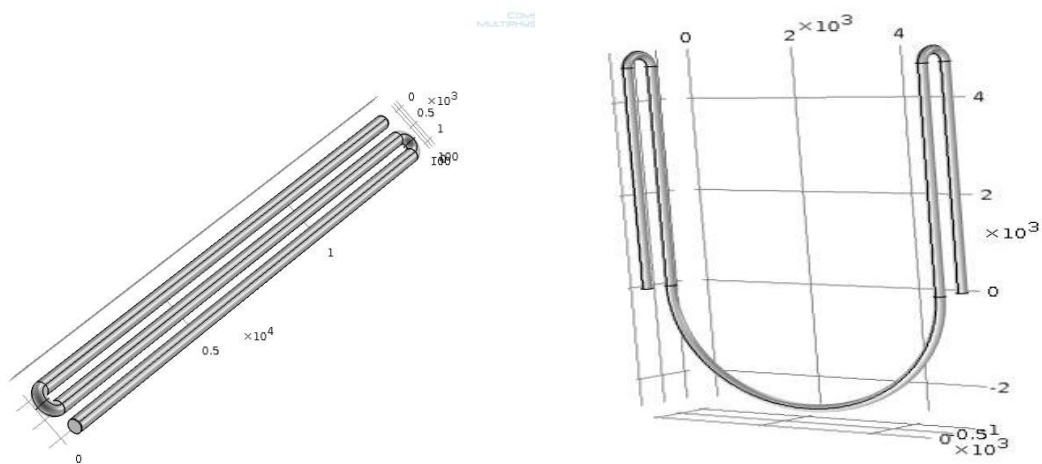


Figura 5. Configuraciones de tubería según su forma

4.5.3 Física Mecánica de sólidos

La simulación consiste de un estudio de fuerzas estáticas; las condiciones que se manejan fueron: una presión interna manométrica de 1.96×10^6 Pa, una restricción en los extremos de la tubería, condiciones iniciales como estáticas, considerando un material isotrópico sin dejar algún dominio libre.

4.5.4 Mallado

El tipo de mallado que se le aplicó a las geometrías consistió en un barrido en forma cuadrícula con una distribución de número de elementos de 150, y un mallado extrafino con una dimensión mínima de elemento de 7 mm, para una física general.

4.5.5 Estudio

Las ecuaciones utilizadas para la resolución de la simulación fueron las de un estudio estático, como se muestra en la Ecuación 8.

$$\sigma \cdot \mathbf{n} = \mathbf{F}A \quad (8)$$

4.6 Análisis estructural de tuberías

Para hacer un análisis más completo, y tener valores contra los cuales comparar los resultados de las simulaciones, se hacen también cálculos analíticos. De acuerdo a la ley de Hooke generalizada, el análisis en un recipiente a presión de pared delgada tiene dos esfuerzos normales (ver ecuaciones 9 y 10, y Figura 4): σ_1 , esfuerzo circunferencial y σ_2 , esfuerzo longitudinal [14].

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t} \text{ {Pa}} \quad (9)$$

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2t} \text{ {Pa}} \quad (10)$$

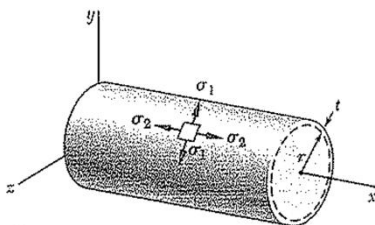


Figura 6. Esfuerzos normales que se producen en un recipiente de pared delgada a presión.

donde p es la presión interna del cilindro en Pa, r es el radio interior en m y t es el espesor en m.

Para encontrar el esfuerzo de von Mises se empleó la Ecuación 11 [15].

$$\sigma' = (\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2)^{1/2} \text{ {Pa}} \quad (11)$$

Las Ecuaciones 9,10 y 11 son aplicables para tubería recta. Para el caso de la curvatura de la tubería la Ecuación 12 es aplicable [16].

$$\sigma_3 = \left(\frac{pD}{2t} - p \right) I \text{ {Pa}} \quad (12)$$

donde p es la presión interna del recipiente, D es el diámetro externo de la tubería, t el espesor e I es una constante que se calcula de acuerdo a si es intradorso, Ecuación 13, o extradorso, Ecuación 14, ambas ecuaciones adimensionales:

$$I = \frac{4(R/D)-1}{4(R/D)-2} \quad (13)$$

$$I = \frac{4(R/D)+1}{4(R/D)+2} \quad (14)$$

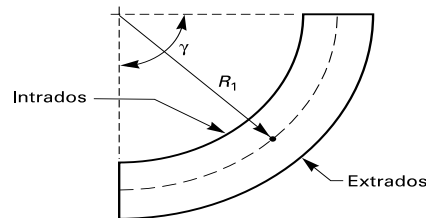


Figura 7. Parte curva de la tubería.

donde R es el radio de curvatura, Figura 7.

5. RESULTADOS

5.1. Identificación de las Muestras

La identificación de los materiales estudiados y sus dimensiones se muestran en la Tabla 4 .

Tabla 4. Identificación y dimensiones de las muestras estudiadas.

Muestra	Dimensiones (mm)		
	Longitud	Ancho	Espesor
Tubo 1	155	170	7.7
Tubo 2	365	170	7.7
Tubo 3	365	170	7.7



Figura 8. Tubo 1.



Figura 9. Tubo 2.



Figura 10. Tubo 3.

5.2 Análisis Químico

Los resultados del análisis químico de cada tubo se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición química de las muestras estudiadas.

Muestra	ELEMENTOS (%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
Tubo 1	0.13	0.37	0.46	0.016	0.002	4.54	0.47	0.08	<0.0050
Tubo 2	0.116	0.41	0.43	0.018	<0.002	4.68	0.49	0.05	0.0066
Tubo 3	0.113	0.4	0.43	0.028	<0.002	4.54	0.5	0.06	0.0122

De los resultados mostrados en la Tabla 5, se puede concluir que el material de los tres tubos corresponde a un acero grado P5, con designación K41545, según la norma ASTM A335/A335M-11, cuya composición química se muestra en la Tabla 6 [17].

Tabla 6. Composición química de un acero grado P5 (%) [Poner referencia de la norma ASTM A335].

ELEMENTOS (%)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.15 máx.	0.5 máx.	0.3 - 0.6	0.025	0.025	4.00 – 6.00	0.45 – 0.65

5.3 Análisis Metalográfico

Cada una de las muestras analizadas se clasificaron con la ayuda de las cartas metalográficas para aceros Cromo-Molibdeno que se mostraron en la Figura 1, según la microestructura observada en cada una de ellas.

- **Tubo 1**

Se determinó que corresponde con una clasificación T5, con la siguiente descripción: dispersión de los carburos virtualmente completa; en lugar de las Perlitas ahora se aprecian pequeñas agrupaciones de carburos; los carburos, partículas y agrupaciones se encuentran distribuidas al azar en la matriz; las colonias de Perlita han perdido totalmente su definición; la coalescencia de carburos continua en aumento.

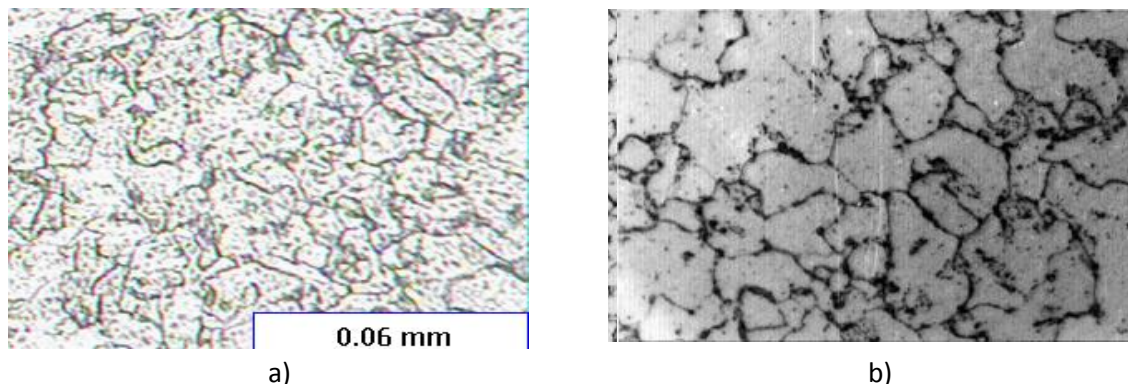


Figura 11. a) Microestructura encontrada en el tubo 1 (aumento x500), b) Microestructura de acuerdo a la carta de clasificación de microestructuras de aceros Cromo-Molibdeno para tipo T5 (aumento 500X).

- **Tubo 2**

Se determinó que corresponde con una clasificación T1, con la siguiente descripción: los constituyentes microestructurales de este material se presentan como en condiciones de fabricación, que son: matriz ferrítica (fondo claro), islas o colonias de perlita parcialmente laminar (áreas oscuras) y una fina dispersión de carburos y partículas de carburo localizadas al azar en la matriz (puntos de color negro).

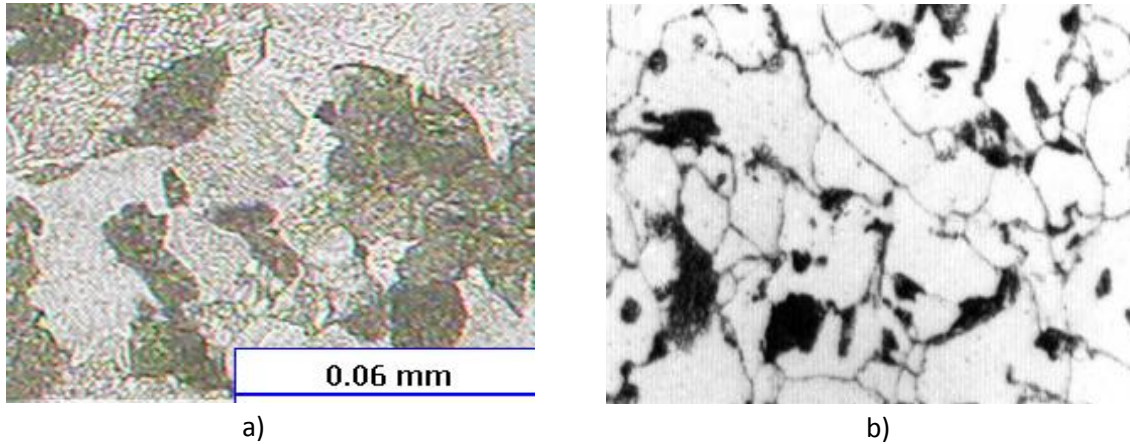


Figura 12.a) Microestructura encontrada en el tubo 2 (aumento x500), b) Microestructura de acuerdo a la carta de clasificación de microestructuras de aceros Cromo-Molibdeno para tipo T1 (aumento 500X).

- **Tubo 3**

Se determinó que corresponde con una clasificación tipo T5, con la siguiente descripción: dispersión de los carburos virtualmente completa; en lugar de las Perlitas ahora se aprecian pequeñas agrupaciones de carburos; los carburos, partículas y agrupaciones se encuentran distribuidas al azar en la matriz; las colonias de Perlita han perdido totalmente su definición; la coalescencia de carburos continua en aumento.

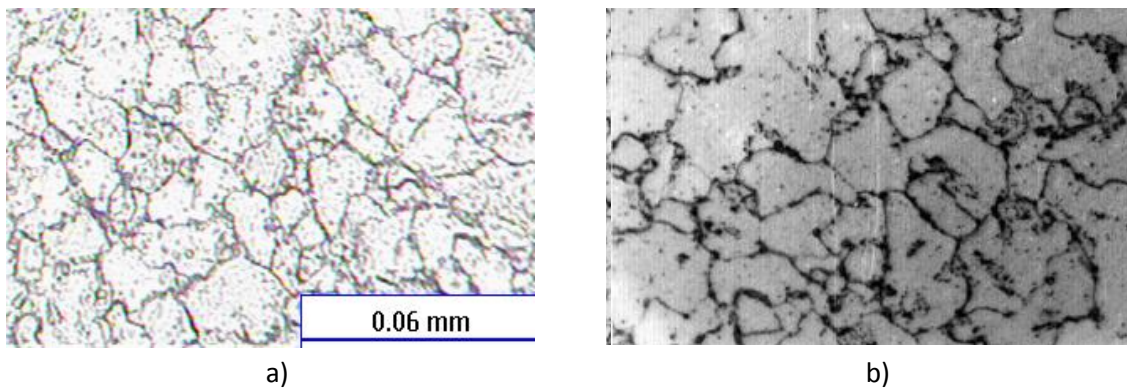


Figura 13.a) Microestructura encontrada en el tubo 3 (aumento x500), b) Microestructura de acuerdo a la carta de clasificación de microestructuras de aceros Cromo-Molibdeno para tipo T5 (aumento 500X).

5.4 Ensayo de Tensión

Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente (24°C) y una humedad relativa de 22%. De acuerdo a las Ecuaciones 1 y 2, empleadas para determinar la velocidad de aplicación de carga para estimar la resistencia a la cedencia, considerando el 80% de la máxima velocidad del cabezal, y las ecuaciones 3 y 4, utilizadas para determinar la velocidad de separación de cabezales de la máquina universal para estimar la resistencia a la tensión, tenemos los resultados en las Ecuaciones 15 y 16.

$$V_Y = 13.401 \text{ KN/min} \quad (15)$$

$$V_{RT} = 10 \text{ mm/min} \quad (16)$$

Los resultados obtenidos después de realizar nueve ensayos de tensión, tres para cada muestra, se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados prueba de tracción.

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Lo (mm)	Lf (mm)	P _{máx} (kN)	P _{ced} (kN)	Área (mm ²)	R.T (MPa)	E.C (MPa)	Elongación (%)
T1.1	5.98	4.64	25.4	34.77	13.94	7.10	27.74	502.39	256.20	36.88
T1.2	5.99	4.61	25.4	35.11	13.92	6.88	27.61	504.09	249.14	38.22
T1.3	5.98	4.63	25.4	34.66	13.9	6.85	27.68	502.03	247.44	36.45
T2.1	6.00	4.62	25.4	34.78	14.35	7.32	27.72	517.67	264.10	36.92
T2.2	6.02	4.62	25.4	34.48	14.36	7.26	27.81	516.31	261.10	35.74
T2.3	6.03	4.62	25.4	34.43	14.33	6.98	27.85	514.38	250.73	35.55
T3.1	6.03	4.56	25.4	35.18	13.26	6.60	27.49	482.23	240.06	38.50
T3.2	6.04	4.61	25.4	35.22	13.48	6.58	27.84	484.11	236.49	38.66
T3.3	6.02	4.61	25.4	34.78	13.57	5.58	27.75	488.97	201.28	36.92

5.5 Simulación

Para el análisis en la simulación utilizamos dos configuraciones de tubería (ver Figura 8), según la forma de ésta. También, se clasificaron en dos casos en base a la clasificación de la microestructura realizada (ver Figura 5, 6 y 7).

- Caso I

Tubo 1 y 3 de acuerdo a los resultados metalográficos.

- Caso II

Tubo 2 de acuerdo a los resultados metalográficos.

Después de hacer una simulación con el espesor de pared de los tubos reales extraídos de la refinería (ver Tabla 4), fue posible concluir que es en los codos de las tuberías donde encontramos los esfuerzos más altos. Por lo tanto, se decidió simplificar la simulación y se hizo énfasis en los codos, de modo que, de acuerdo a los resultados arrojados en las pruebas de tracción, se buscó variar los espesores de tubería buscando alcanzar como esfuerzo máximo en dicha zona valores iguales a 20, 40, 60, 80 y 100%, aproximadamente, del esfuerzo de cedencia, para determinar así cuáles son los espesores críticos, es decir, aquellos que presentan un riesgo de alcanzar la cedencia del material.

En la Tabla 8 se muestran los espesores que se simularon para el análisis del proyecto.

Tabla 8. Espesores simulados y los esfuerzos máximos estimados.

Caso I			
% del esfuerzo de cedencia del material	Espesor (mm)	Esfuerzo de cedencia (MPa)	Figura
100	0.78	238.4392	16
80	0.98	190.7513	17
60	1.30	143.0635	18
40	1.95	95.3756	19
20	3.98	47.6878	20
Caso II			
100	0.73	258.6474	21
80	0.90	206.9179	22
60	1.20	155.1884	23
40	1.78	103.4589	24
20	3.65	51.7294	25

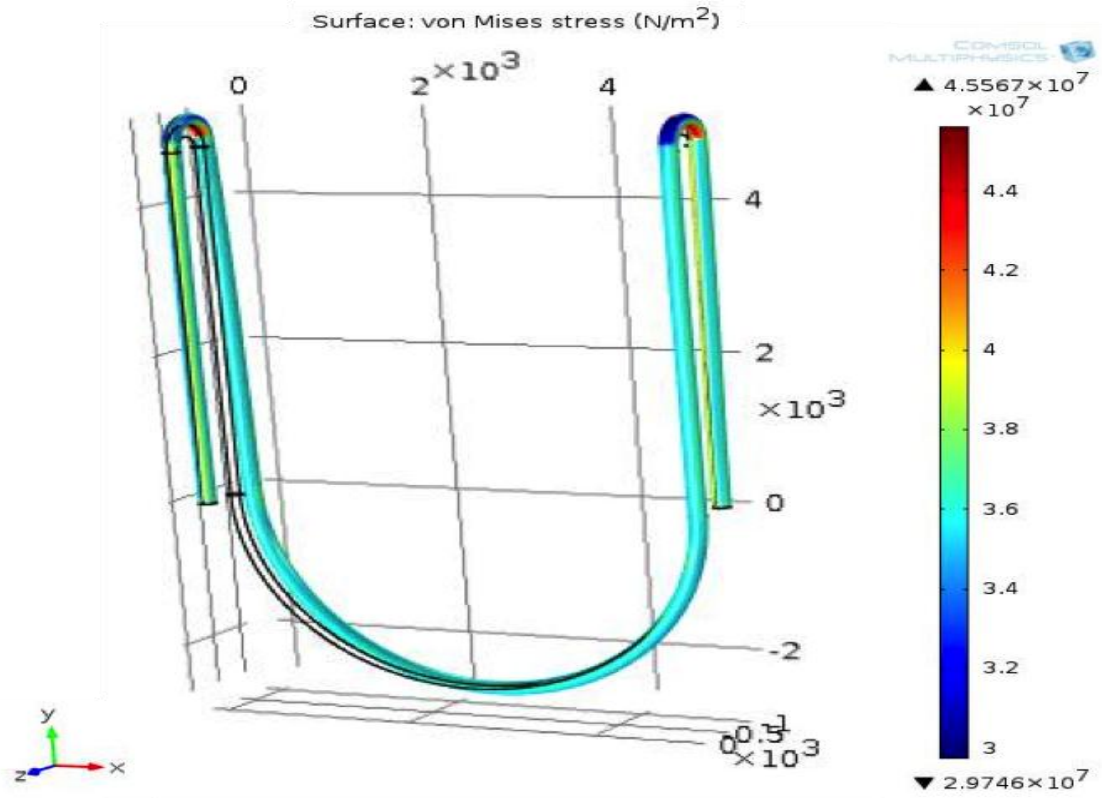
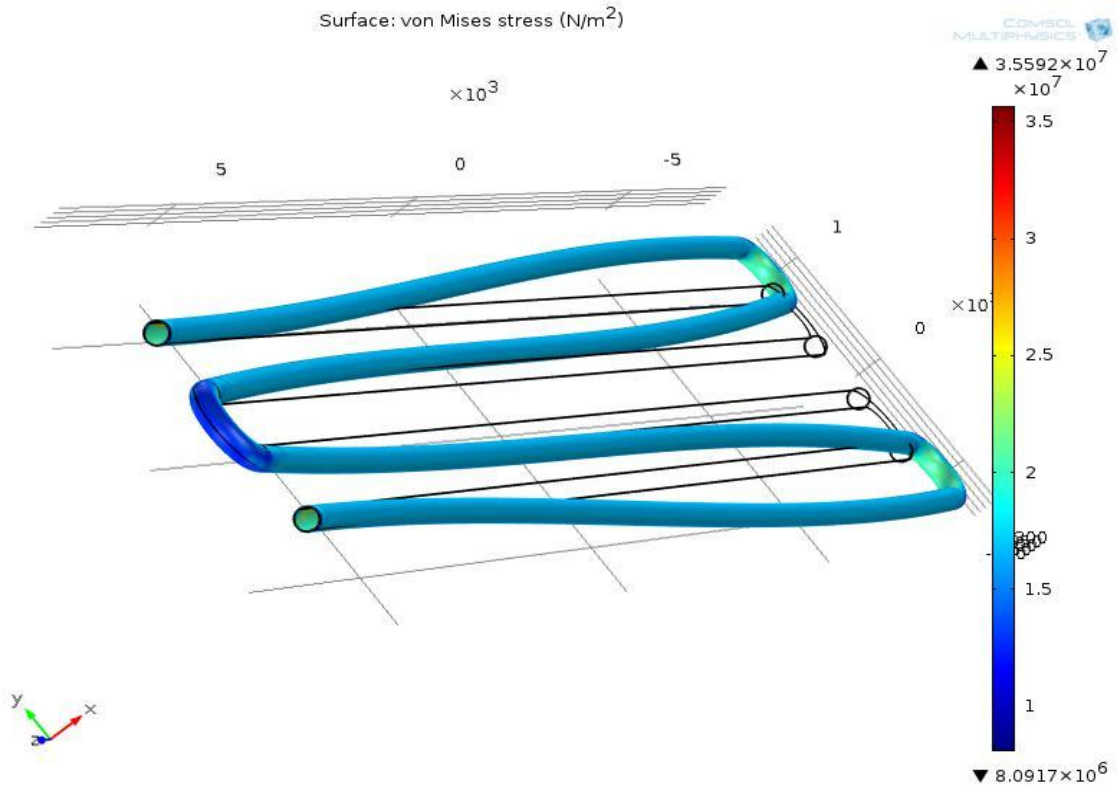


Figura 14. Configuraciones de tubería simuladas según su forma.

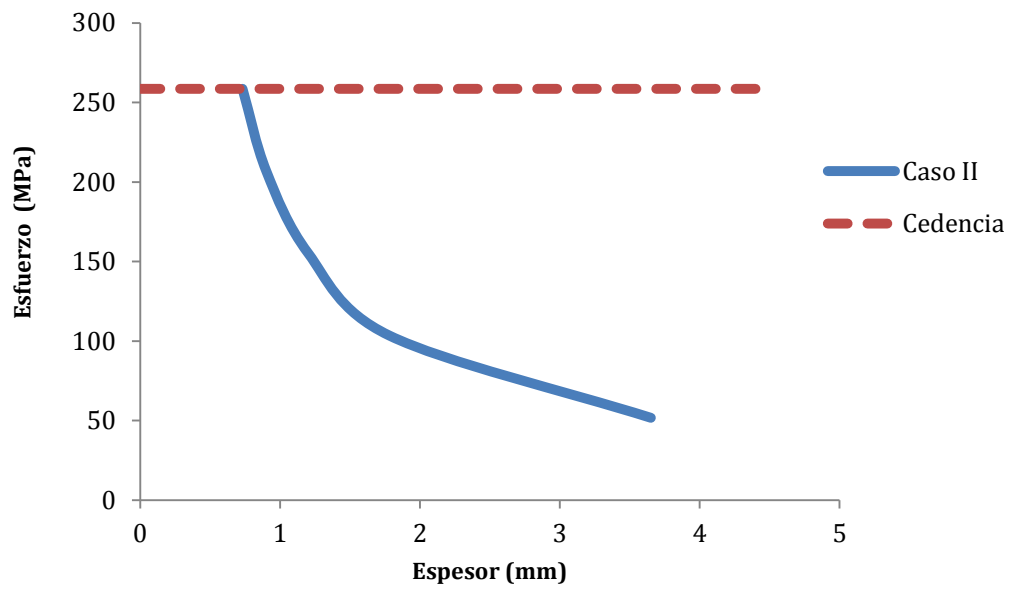
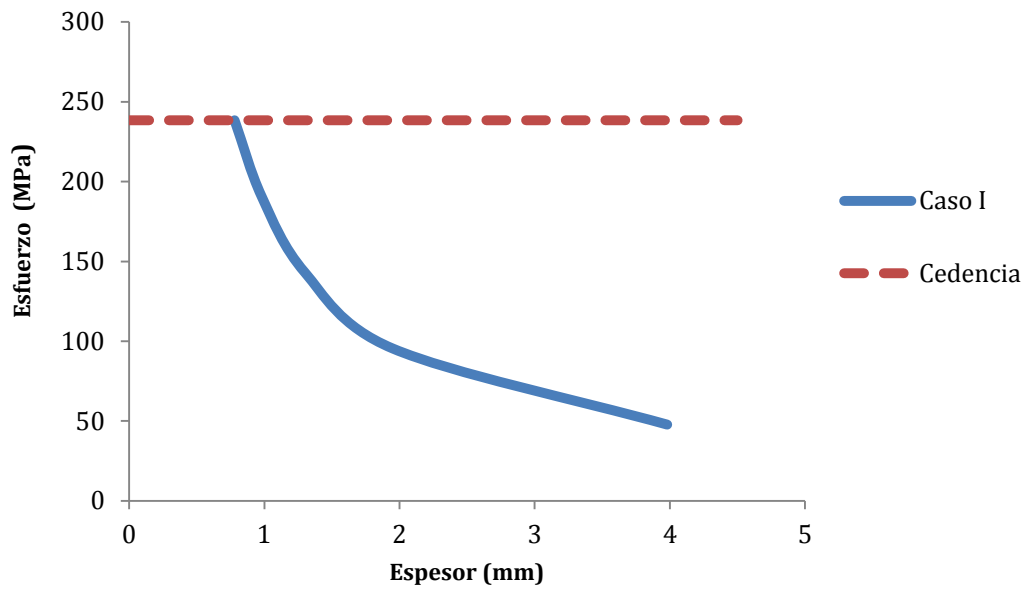


Figura 15. Resultados de simulaciones

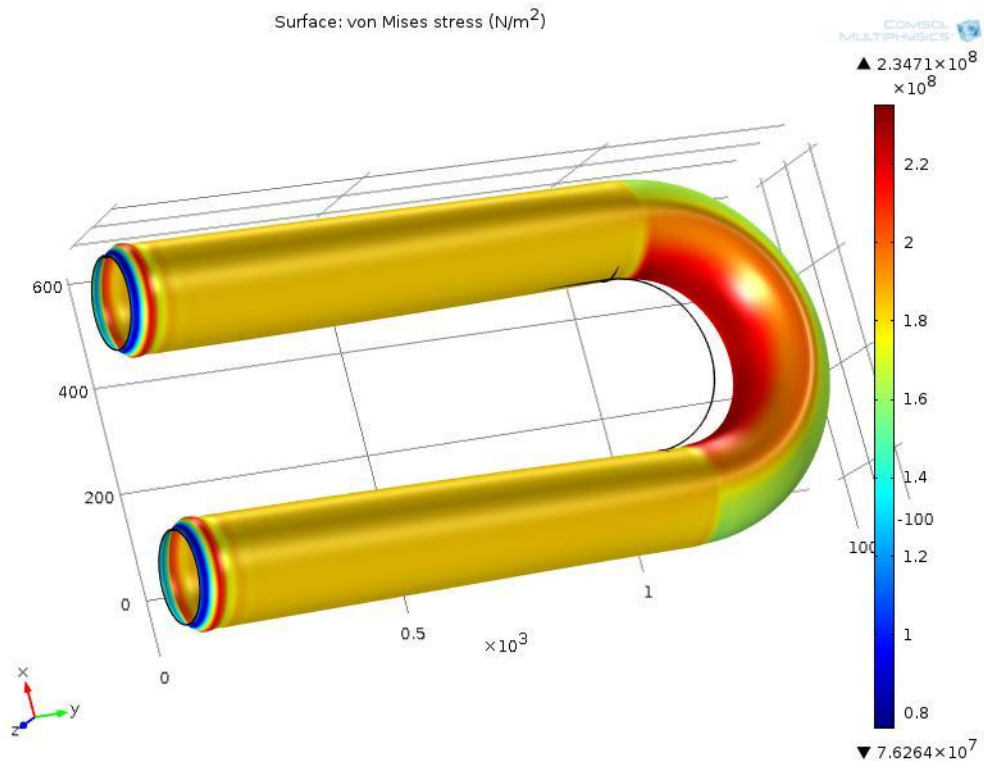


Figura 16.

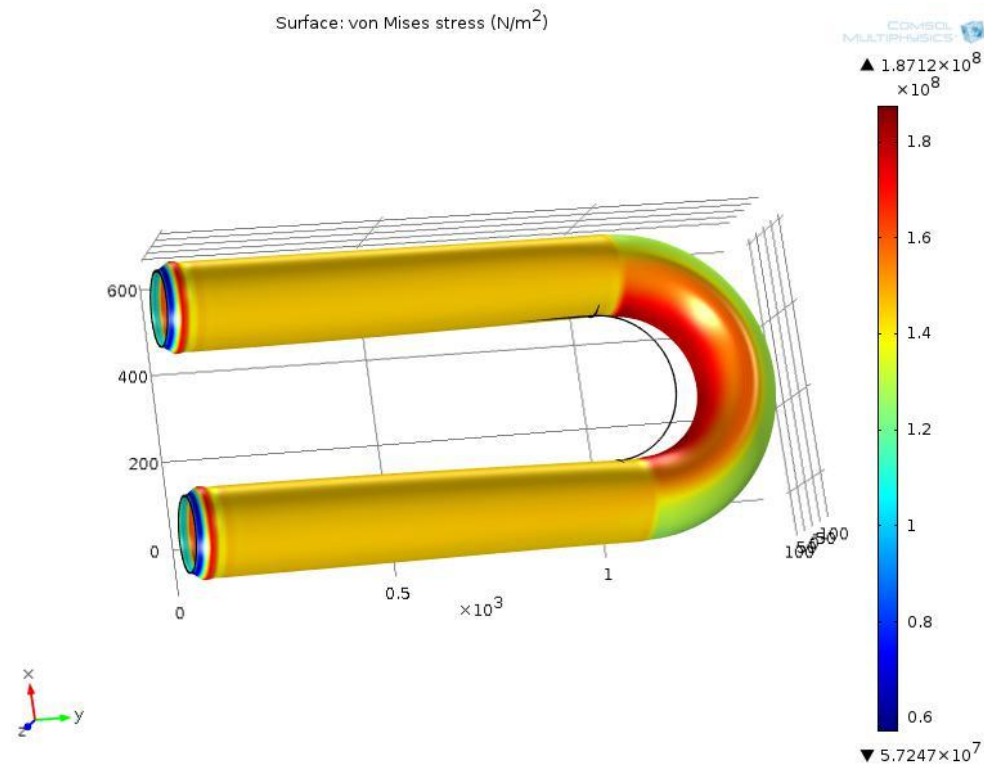


Figura 17.

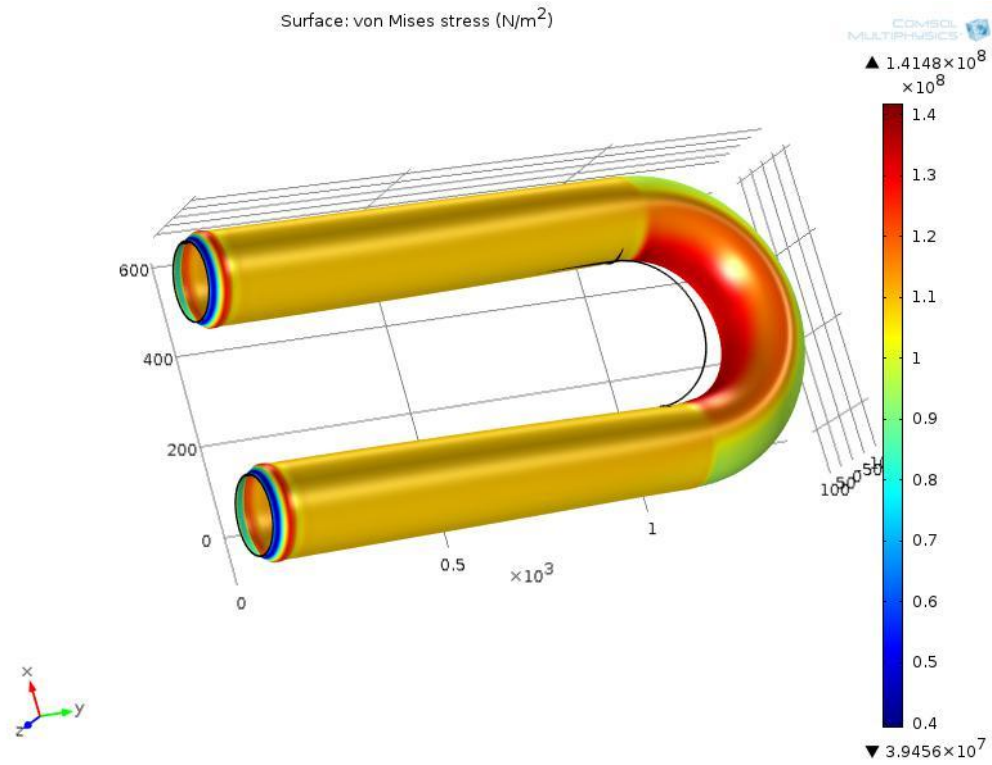
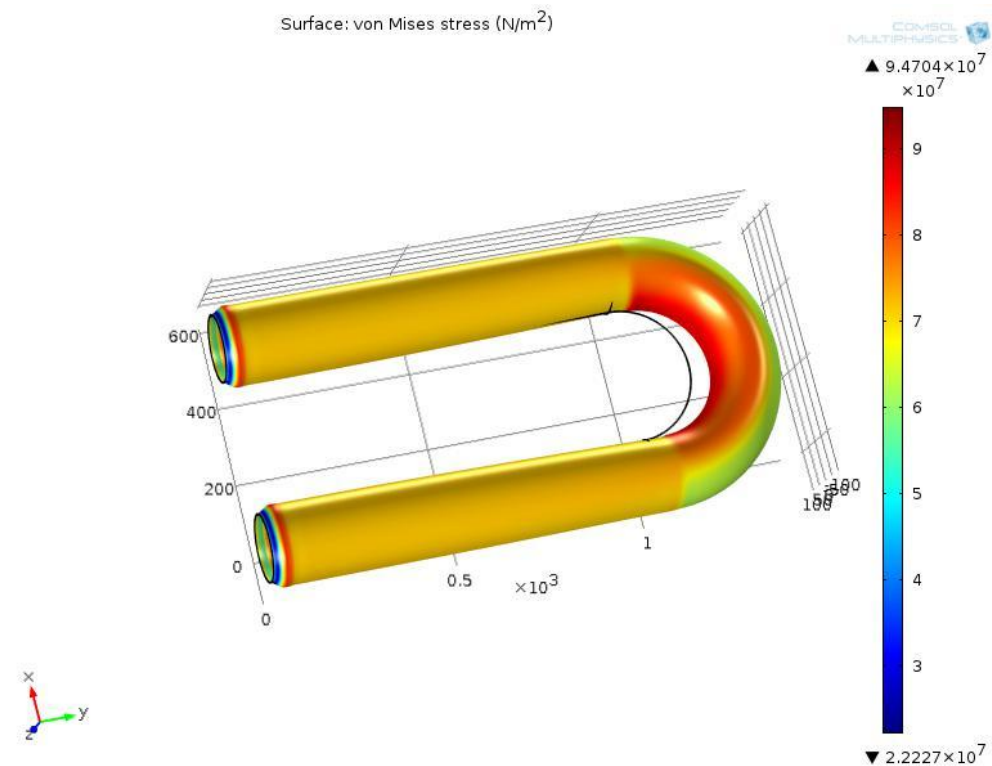


Figura 18.



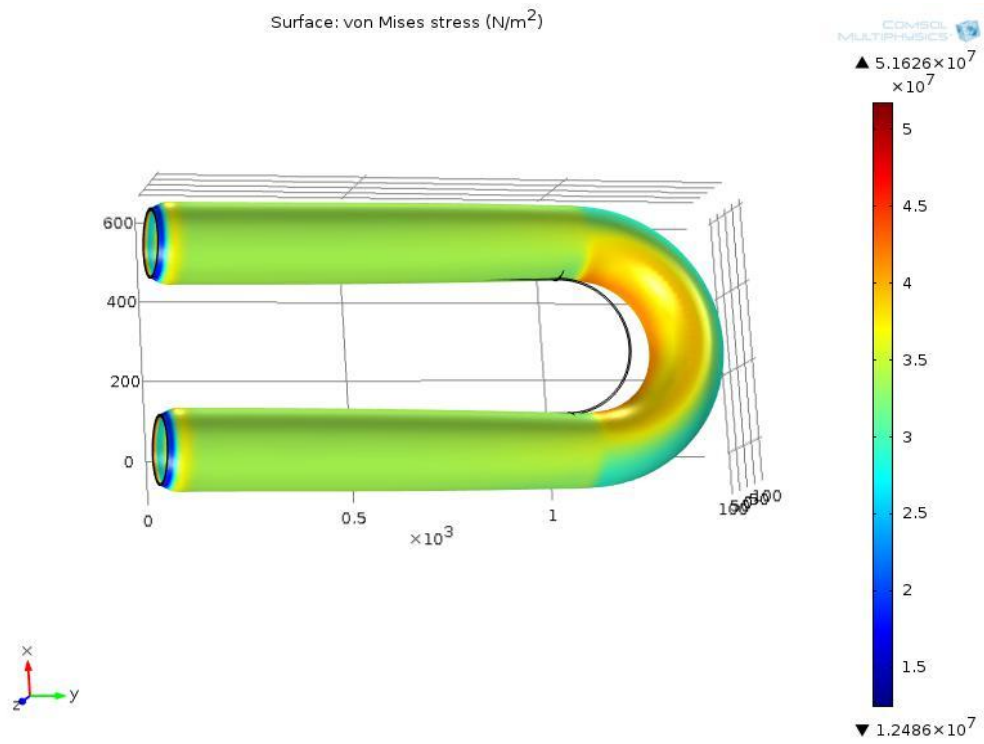


Figura 19.

Figura
a 20.

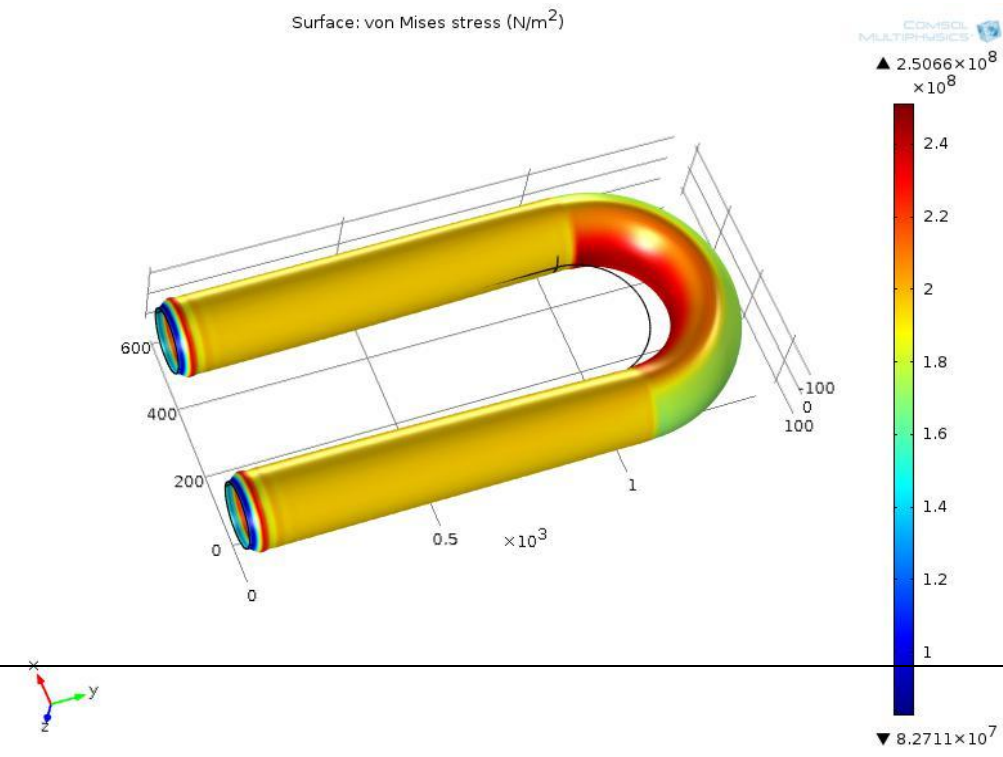


Figura 21.

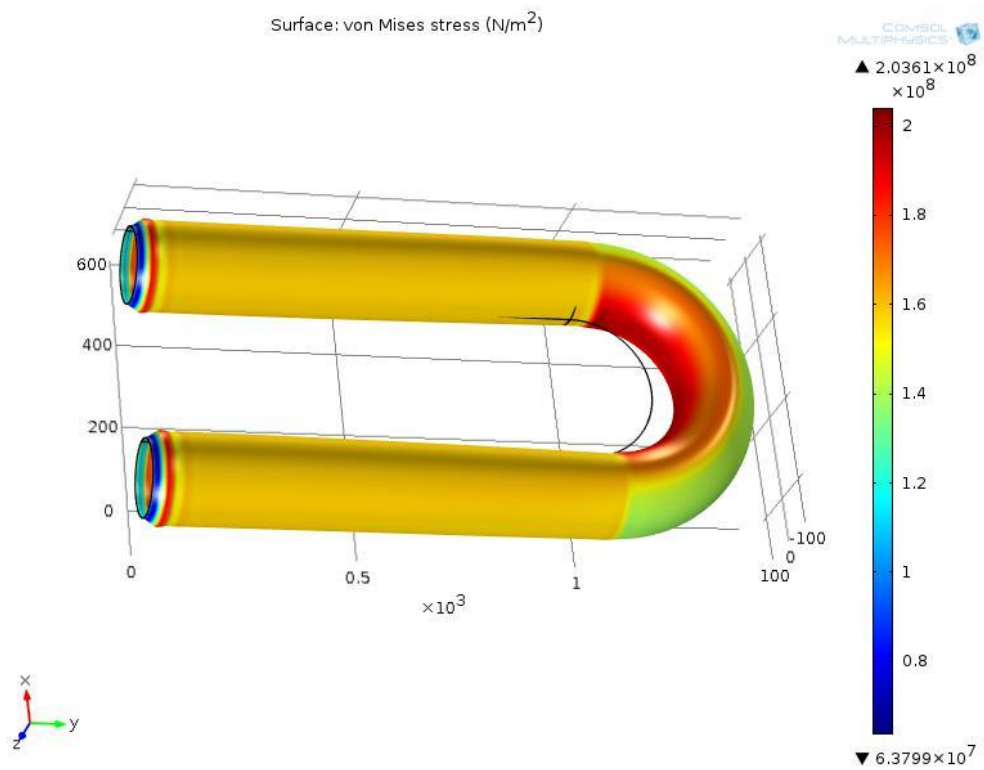


Figura 22.

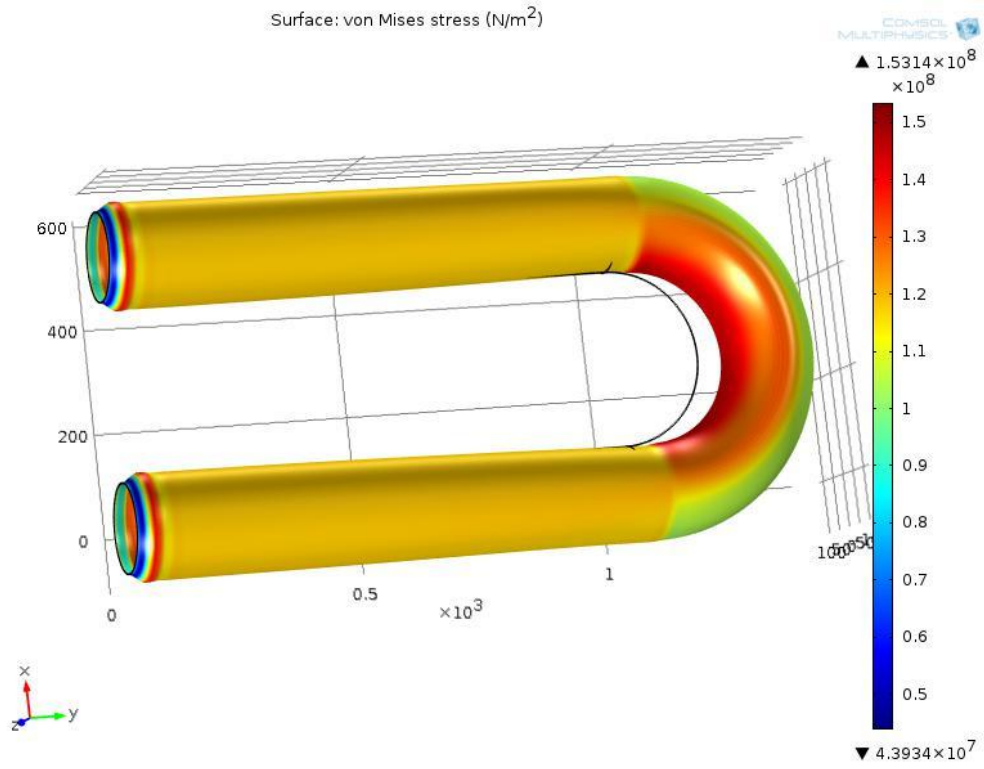


Figura 23.

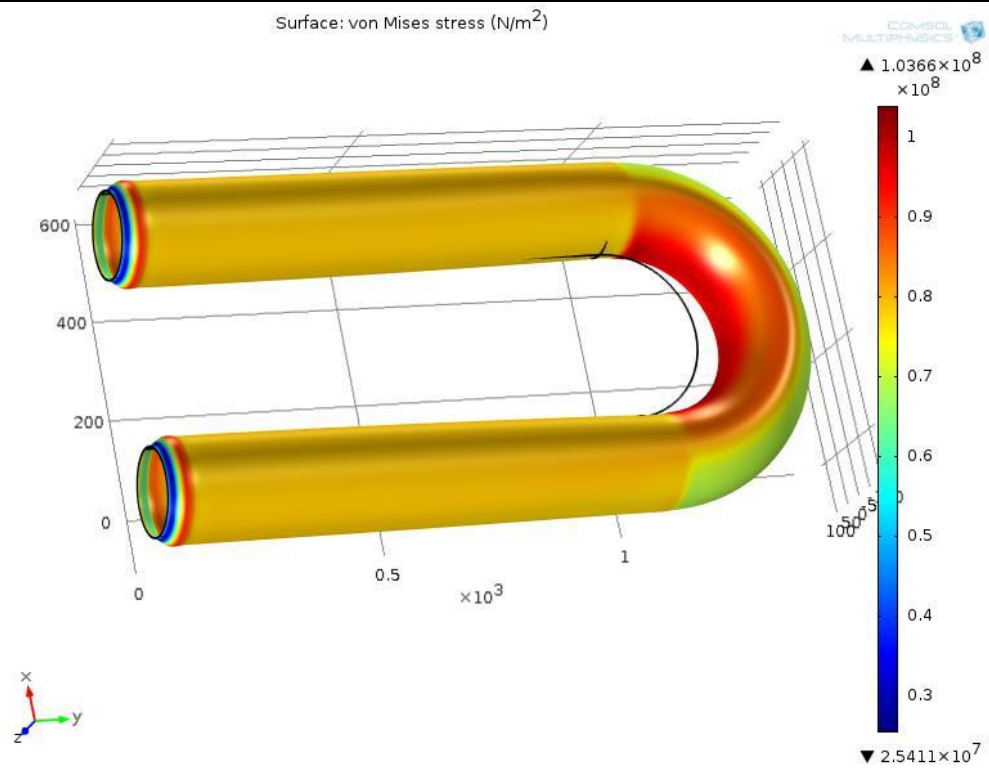


Figura 24.

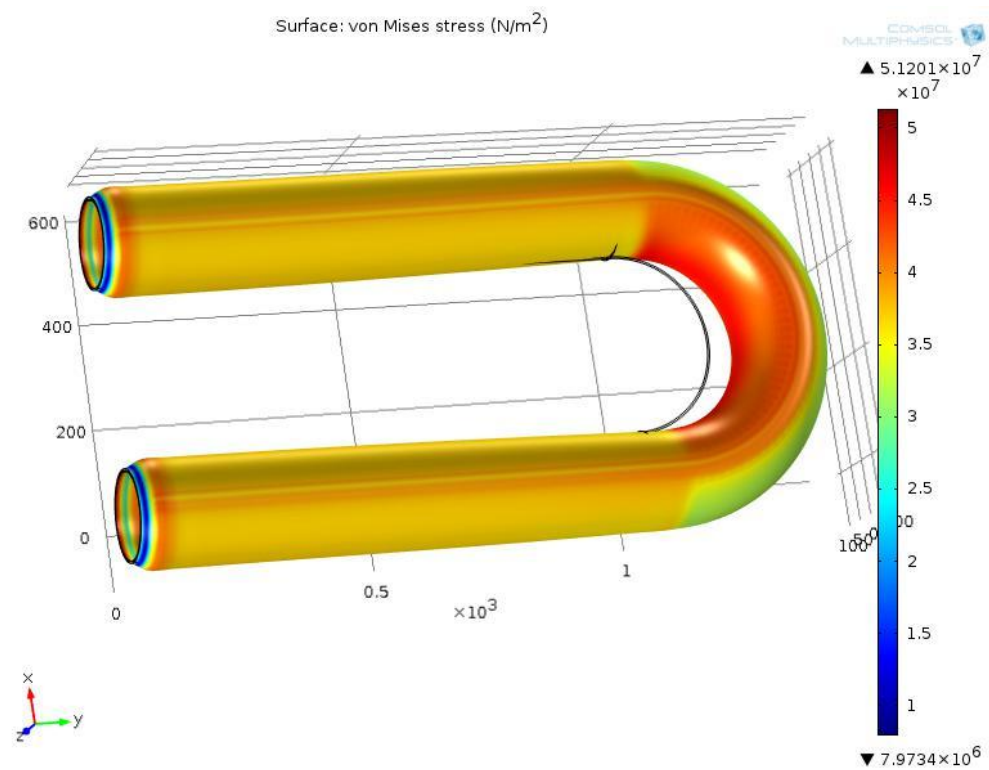


Figura 25.

5.6 Análisis de estructural de tuberías

Para corroborar los resultados de la simulación, se hace un análisis estructural por medio de expresiones analíticas. Empleando las ecuaciones 9 y 10, y sustituyendo ahí los valores $p = 1.96 \times 10^6$ Pa, $r = 77.3 \times 10^{-3}$ m y, $t = 7.7 \times 10^{-3}$ m, se obtiene:

$$\sigma_1 = 19.68 \times 10^6 \text{ Pa} \quad (17)$$

$$\sigma_2 = 9.84 \times 10^6 \text{ Pa} \quad (18)$$

Para el esfuerzo von Mises que se da en la ecuación 11, se sustituyeron los resultados de las Ecuaciones 13 y 14, y se obtiene:

$$\sigma' = 17.0401 \times 10^6 \text{ Pa} \quad (19)$$

Tomando las Ecuaciones se obtuvieron los resultados en el intradorso, Ecuación 20, y extradorso, Ecuación 21:

$$\sigma_i = 24.6 \times 10^6 \text{ Pa} \quad (20)$$

$$\sigma_e = 17.21 \times 10^6 \text{ Pa} \quad (21)$$

Estos son los resultados para la tubería con dimensiones reales, y en la Tabla 9 se presentan los resultados para cada espesor de tubería. Las pequeñas variaciones se deben a parámetros en las expresiones analíticas de los cuales se desconocía su valor y se consideraron como la unidad.

Tabla 9. Comparación de resultados entre simulación y el método analítico.

% del esfuerzo de cedencia del material	Resultado de esfuerzos más altos de cedencia	
	Método analítico (MPa)	Simulación (MPa)
Caso I		
100	264.53	231
80	210.05	185
60	157.74	140
40	104.34	92
20	49.87	46
Caso II		
100	282.82	250
80	228.93	204
60	171.10	153
40	116.994	101
20	54.60	49

6. Conclusiones

1. De los resultados del análisis químico se concluye que el material estudiado corresponde a un acero ASTM A335/A335M-11 grado P5, de uso común para aplicaciones a altas temperaturas.
2. De acuerdo al análisis metalográfico, se encontró que dos de las tres muestras estudiadas tenían el mismo grado de daño, mientras que la tercera difería de las otras dos, de acuerdo a la evaluación realizada por comparación con cartas de clasificación de microestructuras para aceros Cromo-Molibdeno. Para las muestras 1 y 3 se estimó un grado T5, y para la muestra 2 un grado T1.
3. A partir de los resultados que arrojaron las pruebas de tracción realizadas en probetas estándar obtenidas de las muestras estudiadas, se pudo confirmar lo que se esperaba según la teoría, que para un nivel de daño mayor, causado por los efectos combinados de la temperatura y los esfuerzos a los que se ve sometido el material, se observa una disminución en las propiedades mecánicas del material. Aunque las pruebas se realizaron a temperatura ambiente, la información recabada es de gran utilidad.
4. Con toda la información recabada a partir de los estudios realizados, fue posible tener un panorama que caracteriza el material de estudio. Retomando lo anterior, se hicieron una serie de simulaciones, donde se conocieron los esfuerzos que se producen en la tubería, y así fue como se localizaron las zonas de mayor interés,

que son aquellas en las que hay una concentración de esfuerzos. Se tomaron los datos de la prueba de tracción para buscar espesores donde se alcanzara el 20, 40, 80 y 100% del esfuerzo de cedencia, para los dos casos presentados.

5. De los cálculos analíticos se obtuvieron resultados de los esfuerzos producidos tanto en la parte de tubería recta como en la sección curva, de acuerdo a las condiciones planteadas en la parte 5. El análisis fue tomado de la ley generalizada de Hooke, considerando el comportamiento del material en la parte elástica.
6. Los resultados de los esfuerzos obtenidos de la simulación y el cálculo analítico de las tuberías son similares, por lo que podemos concluir que, de acuerdo a las condiciones consideradas, los resultados de las simulaciones son confiables y representativos.
7. Con la información y herramientas que se tienen disponibles hoy día se puede determinar los años de vida del material bajo el fenómeno de la termofluencia. El presente trabajo tuvo como objetivo, aunque se excluyeron factores tales como la corrosión y la erosión, entre otros que actúan sinérgicamente, ampliar la información existente sobre el tiempo de vida que tendrán los materiales sometidos al fenómeno de la termofluencia, y a partir de eso influir sobre los criterios que se toman para retirar de servicio los materiales.
8. Podemos asegurar que la presente investigación es de utilidad, porque con revisiones metalográficas periódicas de las líneas de tubería de los calentadores, y con la información anterior, podríamos asegurar qué espesores debe presentar la tubería para un funcionamiento seguro del equipo.

7. Competencias Desarrolladas

Las competencias que se desarrollaron a lo largo del proyecto son diversas, y por citar algunas tenemos: capacidad de organizar y planificar, saber administrar el tiempo, para trabajar bajo presión, de análisis, crítica y síntesis, potencial de liderazgo, capacidad para adaptarse a nuevas situaciones, flexibilidad, buena expresión escrita. De forma más particular en el área ingenieril se desarrollaron las siguientes competencias: preparación de muestras para análisis químico, metalográfico y pruebas de tracción, medición de especímenes, simulación en software, análisis de resultados.

8. Bibliografía

- [1] Roger, C. Reed; *The superalloys fundamentals and applications*:Cambridge Unversity press; Capitulo 1; 2006.
- [2] Milović, L., Vuherer, T., Zrilić, M., Sedmak, A. y Putić, S; Study of the Simulated Heat Affected Zone of Creep Resistant 9–12% Advanced Chromium Steel; *Materials and Manufacturing Processes*; Volumen 23, 2008;pp 37-41.
- [3] Cortes, C; Análisis de integridad de ductos; Dirigida por Victorino Juárez Rivera; Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica Electrica; 2011.
- [4] González J. L; *Metalurgia mecánica*; Limusa; 1999.
- [5] McEvily A; *Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention*; John Wiley & Sons; Capitulo 9; 2002.
- [6] Procedimiento interno; Análisis de aleaciones metálicas por el método de espectrometría de emisión por chispa; 2013; CIDESI.
- [7] Higson, S; *Analytical Chemistry; Oxford University Press Inc*; Capítulo 9; 2004.
- [8] Procedimiento interno;Procedimiento de preparación de especimenes metalograficos; 2010; CIDESI.
- [9] Procedimiento interno; Procedimiento para realizar ensayo de tension. Norma ASTM E8. Capacidad de 1 a 800 kN; 2013; CIDESI.
- [10] ASTM E8/E8M; *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*; 2011.
- [11] Love, A; *A treatise on the mathematical theory of elasticity*; Dover Publications; 4ª edición; 1994.
- [12] Martínez, A. C; *El método de los elementos finitos en el análisis estructural*; Publicaciones de la E.T.S.I.A (Escuela Superior de Ingenieros Aeronáuticos); 1998.

[13] www.comsol.com/company

[14] Popov, E; *Mecánica de Sólidos*; Capítulo 5; 2002.

[15] Budynas, R., Nisbett, J; *Diseño de ingeniería mecánica de Shigley*; 9ª edición; Capítulo 6; 2013.

[16] ASME B31.3-2010; *Process Piping*; 2010.

[17] ASTM A335/A335M-11; Standard Specification for Seamless Ferritic Alloy-Steel Pipe for High-Temperature Service; 2011.