

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**EVALUACIÓN DE UNA TUBERÍA A PRESIÓN DE ACERO  
DE BAJO CARBONO DAÑADA POR FUEGO MEDIANTE LA  
NORMA API 579-1/ASME FFS-1**

Tesis para optar el Título de ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller:

**LEONARDO CÉSAR VÉLIZ MENDOZA**

**ASESOR: ANÍBAL ROZAS GALLEGOS**

**Lima, marzo del 2016**

## RESUMEN

A nivel mundial es común el uso de tuberías de acero de bajo carbono para contener o transportar diferentes fluidos a presión en el sector industrial. Estos componentes a presión no están libres de sufrir algún daño por fuego o calor radiante, los cuales causan paros inesperados y pérdidas económicas a las industrias, por ello realizar una evaluación de las aptitudes de servicio a los componentes que han sufrido daño por fuego da la posibilidad de evaluar si el componente puede seguir funcionando en las mismas condiciones de trabajo, diferentes o ser retirados de servicio.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la integridad de una tubería de acero de bajo carbono que ha sido intencionalmente dañada por fuego en el laboratorio, mediante el estudio y aplicación de la metodología del API 579-1/ASME FFS-1, además del uso del grado de daño de Neubauer para evaluar el daño microestructural, con la finalidad de mostrar de forma práctica el uso de la metodología y determinar si la tubería puede continuar en servicio.

Con este fin, primero se preparó una tubería de acero de bajo carbono para someterla a diferentes temperaturas y tiempos de exposición al calor con la intención de ocasionar un daño por fuego. Luego, se siguió la metodología de forma experimental usando diferentes tipos de ensayos como inspección visual, ensayo de dureza y metalografía, en base a normas ASTM (American Society for Testing of Materials). Los resultados obtenidos fueron analizados para determinar qué cambios ocurrieron en la microestructura y propiedades mecánicas, después se determinó una nueva máxima presión admisible de trabajo en función a los resultados de las pruebas evaluadas de la tubería dañada por fuego, finalmente se corroboró con una prueba hidrostática en el laboratorio.

Esta tesis, proporciona de forma práctica el análisis de componentes a presión como tuberías que han sufrido daño por fuego. En base a la evaluación se puede concluir por ejemplo que la tubería analizada a pesar de estar dañada por fuego puede seguir operando con una nueva presión de operación de 817 psi (presión de diseño 1180 psi) y no es necesario repararla o reemplazarla.





A Dios y a mis padres por el amor,  
apoyo y confianza en todos  
estos años.



## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer especialmente a mis padres, por el apoyo incondicional para culminar mi carrera con el presente trabajo de Tesis. Quienes en todo momento creyeron en mí y siempre estuvieron ahí para seguir adelante.

También agradecer a la especialidad de Ingeniería Mecánica de la PUCP, por la exigencia en todo el pregrado, la cual me permitirá desarrollarme profesionalmente. Agradezco especialmente a mi asesor Aníbal Rozas, quien me apoyo para culminar el presente trabajo.

Además, agradezco a los profesores Rolando Nuñez y Carlos Romero del laboratorio de materiales, por el tiempo y ayuda que me brindaron con los ensayos y dudas absueltas a lo largo de mi Tesis. También, un agradecimiento especial al profesor Jorge Fernández por brindarme las facilidades en el laboratorio de manufactura.

Finalmente, agradecer a mis hermanos Luis y Fernando, tíos Hernán Véliz y Bertha Véliz, por el apoyo para cumplir mis objetivos. Y a todos los amigos que conocí en la PUCP con quienes compartí tantas anécdotas, experiencias, conocimientos, risas y penas, en estos inolvidables años.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1	
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	3
1.1 Normas Internacionales.....	3
1.1.1 Norma API 579 Aptitud para el servicio.....	3
1.1.2 Norma de tubería ASME B31 .....	5
1.1.3 Norma API 570 de inspección de tuberías en servicio.....	6
1.2 Estimación de vida residual Neubabuer .....	7
1.3 Efectos del fuego en los componentes a presión.....	10
1.3.1 Reducción de la resistencia a la corrosión.....	10
1.3.2 Cambios en la microestructura y propiedades.....	14
1.3.3 Relación de la temperatura, tiempo y velocidad de enfriamiento con la microestructura.....	20
1.3.4 Ablandamiento y deformación en aleaciones de aluminio.....	24
1.3.5 Distorsión de aceros estructurales .....	25
1.4 Precedentes de evaluación de incendios en componentes a presión .....	26
1.5 Selección de ensayos.....	29
1.6 Metodología de Análisis API 579.....	30
1.6.1 Aplicabilidad y limitaciones del procedimiento.....	31
1.6.2 Datos requeridos .....	32
1.6.3 Determinar los niveles de exposición al calor .....	33
1.6.4 Datos y dimensiones para componentes expuestos al calor .....	37
1.6.5 Evaluación de las propiedades mecánicas de componentes expuestos a la exposición al calor .....	38
1.6.6 Niveles de evaluación.....	39
1.7 Referencias .....	43

## CAPÍTULO 2

2.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	45
2.1	Componente evaluado.....	45
2.2	Preparación y proceso de daño por fuego al componente.....	47
2.3	Procedimiento de evaluación del componente.....	51
2.3.1	Inspección visual.....	51
2.3.2	Pruebas de dureza.....	53
2.3.3	Metalografía.....	55
2.3.4	Protocolo de prueba hidrostática.....	58

## CAPÍTULO 3

3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	60
3.1	Inspección visual.....	60
3.2	Pruebas de dureza.....	63
3.3	Pruebas de metalografía.....	68
3.4	Cálculo de la nueva máxima presión de operación (MAWP).....	76
3.5	Prueba hidrostática.....	80
	Conclusiones.....	81
	Bibliografía.....	82
	ANEXOS	



## Índice de tablas

Tabla 1.1 Contenido de la norma API 579.....	4
Tabla 1.2 Grado de daño Neubauer. [E. RECOMMENDATIONS, 2005] .....	8
Tabla 1.3 Estimación mínima de servicio según Neubauer. [B. Neubauer y U. Wedel, 2004].....	10
Tabla 1.4 Metales y sus estructuras cristalinas en estado sólido.....	16
Tabla 1.5 Niveles de exposición al calor para la evaluación. [API 579-1/ASME FFS-1, 2007].....	33
Tabla 1.6 Temperatura del acero basado en el espectro de radiación visible. [API 579-1/ASME FFS-1 2007] .....	36
Tabla 2.1 Composición química de los aceros utilizados.....	46
Tabla 2.2 Control de temperatura para la primera zona de daño.....	50
Tabla 2.3 Control de temperaturas para la segunda zona de daño. ....	51
Tabla 3.1 Niveles de exposición al calor debido al daño. ....	61
Tabla 3.2 Valores de dureza Brinell en una zona sin daño.....	64
Tabla 3.3 Valores de dureza Brinell obtenidos de las indentaciones en diferentes ubicaciones. ....	65
Tabla 3.4 Dureza promedio de las diferentes ubicaciones para una exposición al calor de 2 horas. ....	65
Tabla 3.5 Dureza promedio de las diferentes ubicaciones para una exposición al calor de 4 horas. ....	66
Tabla 3.6 Valores de las ubicaciones A, AI y AD.....	67
Tabla 3.7 Valores de las ubicaciones B1, B2 y B3.....	67
Tabla 3.8 Valores de las ubicaciones C1, C3 y C4. ....	68
Tabla 3.9 Durezas equivalentes y resistencias a la tracción para aceros de bajo carbono. [API 579-1/ASME FFS-1 2007] .....	76
Tabla 3.10 Coeficiente para determinar el espesor de tubería. [ASME B31, 2014] .....	77
Tabla 3.11 Espesor por defecto de cargas suplementarias en sistemas de tuberías. [API 574,2009].....	79

## Índice de figuras

Figura 1.1 Corrosión intergranular. Fuente: www.min-us.com. ....	12
Figura 1.2 Resultados de la prueba de estructura metalográfica y corrosión intergranular a diferentes temperaturas de exposición térmica. [Xuedong Chen, 2012] .....	13
Figura 1.3 Distribución espacial, ordenada y repetitiva de átomos, característica de un material cristalino en estado sólido. Fuente: www.scielo.br. ....	15
Figura 1.4 Dos tipos de celdas unitarias que representan dos estructuras cristalinas diferentes de un material en estado sólido: CC y CCC. Fuente: www.min-us.com .....	16
Figura 1.5 El hierro sufre dos transformaciones alotrópicas: $Fe \delta \leftrightarrow Fe \gamma$ y $Fe \gamma \leftrightarrow Fe \alpha$ Fuente: [Fosca, 2003] .....	17
Figura 1.6 Metalografía de un metal en el que se observan los granos y los límites de grano. Fuente: www.scielo.br .....	18
Figura 1.7 Relación entre la temperatura y dureza de aceros. [Xuedong Chen, 2012] .....	21
Figura 1.8 Cambio microestructural del acero AISI 1024.....	22
Figura 1.9 Comportamiento del acero AISI 1024 [Xuedong Chen, 2012].....	23
Figura 1.10 Cambio de la dureza del acero AISI 1024 VS diferentes calentamiento y velocidades de enfriamiento [Xuedong Chen, 2012].....	23
Figura 1.11 Efecto de la exposición al calor sobre la resistencia de una aleación de aluminio 6061-T6. [API 579-1/ASME FFS-1, 2007] .....	25
Figura 1.12 Límite elástico de algunos aceros de bajo carbono a altas temperaturas. [API 579-1/ASME FFS-1, 2007] .....	26
Figura 1.13 Representación de equipos de planta expuestos a diferentes Niveles de calor. [API 579-1/ASME FFS-1, 2007].....	34
Figura 1.14 Patrón de incendio idealizado en equipos expuestos a zonas I hasta VI. (Vista de planta) [API 579-1/ASME FFS-1 2007].....	35
Figura 1.15 Patrón de incendio idealizado en equipos expuestos a zonas I hasta VI. (Elevación) [API 579-1/ASME FFS-1 2007].....	36
Figura 2.1 Tubería usada para la evaluación.....	46
Figura 2.2 Tapa superior de la tubería.....	47
Figura 2.3 Zonas marcadas para evaluar: (a) Primera zona de daño, (b) Segunda zona de daño .....	48

Figura 2.4 Identificación de las ubicaciones. (a) Primera zona de daño, (b) Segunda zona de daño .....	49
Figura 2.5 Preparación del ensayo de daño. ....	49
Figura 2.6 Daño por fuego a la tubería. ....	50
Figura 2.7 Estado de tuberías después del daño. (a) Primera zona de daño, (b) Segunda zona de daño .....	52
Figura 2.8 Durómetro portátil marca Proceq utilizado para las mediciones de dureza. ....	53
Figura 2.9 Preparación de la superficie. (a) Limpieza con amoladora. (b) Superficie limpia. ....	54
Figura 2.10 Ensayo de dureza en campo. ....	54
Figura 2.11 Procedimiento de la metalografía. (a) Pulido, (b) Ataque químico. (c) Revelado de la microestructura, (d) Pegado de la película. ....	56
Figura 2.12 Metalografías obtenidas para el ensayo. ....	57
Figura 2.13 Microscopio marca Leica modelo DFC450. ....	57
Figura 3.1 Zona del primer daño. ....	62
Figura 3.2 Coloración de la tubería durante el segundo daño. ....	62
Figura 3.3 Zona del segundo daño después del fuego .....	63
Figura 3.4 Fotomicrografía del componente en una zona no afectada por el calor. 500x .	69
Figura 3.5 Fotomicrografía del componente en una zona sin daño por fuego.100x.....	69
Figura 3.6 Fotomicrografía de la ubicación Z. 500x.....	71
Figura 3.7 Fotomicrografía de la ubicación Y. 500x.....	71
Figura 3.8 Fotomicrografía de la ubicación X.500x.....	72
Figura 3.9 Fotomicrografía de la ubicación A.500x.....	73
Figura 3.10 Fotomicrografía de la ubicación AD.500x .....	74
Figura 3.11 Fotomicrografía de la ubicación AI.500x.....	74
Figura 3.12 Fotomicrografía de la ubicación C1.500x.....	75
Figura 3.13 Fotomicrografía de la ubicación C3.500x.....	75
Figura 3.14 Comportamiento de la presión en la tubería durante la prueba hidrostática. .	80

## Lista de símbolos

$C_{ism}$	: Margen de servicio.
$D_o$	: Diámetro externo.
$E$	: Eficiencia de la junta soldada o factor de calidad del código de la construcción original.
$FCA$	: Tolerancia de futura corrosión.
LOSS	: Perdida de material en la tubería.
$MA$	: Tolerancia para tuberías roscadas.
$MAWP$	: Presión máxima de trabajo admisible.
$MAWP^C$	: Presión máxima de trabajo admisible en base al esfuerzo circunferencial.
$MAWP^L$	: Presión máxima de trabajo admisible en base al esfuerzo longitudinal.
$t_c$	: Espesor mínimo requerido para una tubería.
$t$	: Espesor real de la tubería.
$t_{sl}$	: Espesor por defecto de cargas suplementarias.
$S$	: Esfuerzo admisible.
$S_{afd}$	: Esfuerzo admisible para un material dañado por fuego.
$S_{aA}$	: Esfuerzo admisible del código de diseño original o estándar a la temperatura ambiente cuando se toman las pruebas de dureza.
$S_{aT}$	: Esfuerzo admisible del código de diseño original o estándar a la temperatura de diseño especificada
$S_{uts}^{ht}$	: Resistencia final a la tracción basada en los resultados del ensayo de dureza.
$Y_{B31}$	: Coeficiente para determinar el espesor de tubería.

## INTRODUCCIÓN

En la industria diferentes componentes a presión como tuberías de acero de bajo carbono tienen la posibilidad de sufrir algún daño por incendios debido al contacto externo con fuego y calor radiante, causando una degradación estructural visible y una menos aparente de sus propiedades mecánicas, tales como resistencia, ductilidad y tenacidad.

A nivel nacional el uso de tuberías de acero de bajo carbono tiene una alta demanda en las industrias, por lo cual no están libres de sufrir alguna explosión, fugas o incendios. Generando paros inesperados de operación por daños ocasionados a estos componentes y pérdidas económicas a las industrias, por lo tanto realizar una evaluación de las aptitudes de servicio a las tuberías que han sufrido daño por incendios da la posibilidad de evaluar si el componente puede seguir funcionando en las mismas condiciones de trabajo, diferentes condiciones de trabajo o ser retirados.

Por tal motivo el presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar la integridad de una tubería de acero de bajo carbono que ha sido intencionalmente dañada por fuego en el laboratorio, mediante el estudio y aplicación de la metodología del API 579-1/ASME FFS-1, además del uso del grado de daño de Neubauer para evaluar el daño microestructural, con la finalidad de mostrar de forma práctica el uso de la metodología y determinar si la tubería puede continuar en servicio.

Como objetivos específicos se tiene lo siguiente:

- Estudio de los cambios microestructurales producidos por el calor en la tubería evaluada.
- Determinar la relación entre los niveles de exposición al calor y los cambios microestructurales de la tubería evaluada.
- Evaluar los efectos para diferentes temperaturas y tiempos de exposición al calor en la tubería dañada.

El presente trabajo de tesis se ha estructurado en 3 capítulos como se muestra a continuación:

Capítulo 1. En este capítulo se presenta las normas técnicas relacionadas a la inspección de tuberías y el procedimiento para evaluar el daño microestructural según Neubauer, así como una revisión teórica sobre los efectos del fuego que puede presentar una tubería de acero, luego se muestra la metodología API 579 usada para evaluar una tubería que ha sido dañada por fuego.

Capítulo 2. Se presenta la tubería que va ser evaluada, después se explica la preparación y proceso de daño realizada al componente. Posteriormente se desarrolla experimentalmente la metodología del API 579 para evaluar la integridad de la tubería mediante diferentes ensayos.

Capítulo 3. En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de la metodología experimental de evaluación. Primero mediante la inspección visual, se clasifico el nivel de exposición al calor de la tubería, después con los resultados obtenidos en los ensayos de dureza se pudo ver los cambios en sus propiedades mecánicas. También con el análisis de las metalografías que se realizaron vemos la relación de los valores de dureza con la microestructura del material evaluado y se estima un tiempo de operación continuo sin falla. Luego con los valores más críticos de la tubería se calculó una nueva máxima presión admisible de trabajo. Finalmente con una prueba hidrostática a la tubería se corrobora la integridad del componente evaluado.

El trabajo de tesis termina presentando las conclusiones obtenidas del análisis de los resultados de las pruebas y uso de la metodología.

## CAPÍTULO 1

### 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 1.1 Normas Internacionales

##### 1.1.1 Norma API 579

La norma API 579 (American Petroleum institute) contiene los procedimientos de evaluación que pueden ser usados para determinar la integridad de diferentes componentes a presión que hayan sufrido algún tipo de daño. Esta contiene tres niveles de evaluación según el grado del daño que presente el componente evaluado, en base a los resultados obtenidos se podrá dar un diagnostico que evalúe la aptitud del componente y proporcione la información necesaria para estimar el tiempo remanente de operación sin presentar peligro. [API 579-1/ASME FFS-1 2007]

La metodología de evaluación está sujeta al tipo de daño, los procedimientos de evaluación se ordenan por el tipo de imperfecciones y mecanismos de daños más comunes en la industria. En la **Tabla 1.1** se muestra el contenido de la norma.

Tabla 1.1 Contenido de la norma API 579

Capítulo en API 579	Defectos o mecanismos de daño	Información general
3	Fractura Frágil	Procedimiento para evaluar la resistencia a la fractura de componentes a presión.
4	Perdida General de Metal	Procedimiento para evaluar la pérdida de espesor por corrosión general. Los datos de espesores utilizados en la evaluación pueden ser lecturas puntuales de espesores o perfiles detallados de espesores.
5	Perdida Local de Metal	Procedimiento para evaluar adelgazamientos locales y defectos tipo ranura en componentes presurizados.
6	Corrosión por picaduras	Procedimiento para evaluar picaduras dispersas, picaduras localizadas y picaduras en una zona de pérdida local de metal.
7	Ampollas por hidrogeno	Procedimientos para evaluar ampollas o redes de ampollas, la evaluación incluye disposiciones para ampollas localizadas en juntas soldadas y discontinuidades estructurales como transiciones de pared y boquillas.
8	Desalineamiento de biseles y deformaciones en envolventes	Procedimiento para evaluar esfuerzos resultantes, discontinuidades geométricas en estructuras tipo envolvente, incluyendo desalineamiento de biseles y distorsiones de envolvente. (ovalizaciones, protuberancias, etc).
9	Defectos tipo fisuras	Procedimiento para evaluar defectos como fisuras. Además son incluidas recomendaciones para evaluar el crecimiento de la fisura incluyendo efectos ambientales.



**Tabla 1.1** Contenido de la norma API 579 (continuación)

Capítulo en API 579	Defectos o mecanismos de daño	Información general
10	Creep	Procedimiento para determinar la vida útil remanente de componentes a presión que operan en el régimen de termo fluencia.
11	Daño por fuego	Procedimiento para evaluar componentes a presión sujetos a daño por fuego. La metodología proporciona a los componentes dañados una clasificación basada en la exposición de calor experimentada durante el incendio.
12	Golpes y hendiduras	Procedimiento para evaluar golpes y hendiduras.
13	Laminaciones	Procedimiento para evaluar laminaciones. Es un defecto plano por falta de fusión durante el proceso de fabricación de la chapa, el cual es fácilmente detectable mediante una inspección de ultra sonido.

### 1.1.2 Norma de tubería ASME B31

El Código ASME B31 para tuberías a presión consiste en un número de secciones publicadas individualmente, según la dirección del Comité B31 de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME, American Society of Mechanical Engineers), Código para Tuberías a Presión. [1] Las reglas para cada sección reflejan los tipos de instalaciones de tuberías consideradas durante su desarrollo. Estas se enuncian de la siguiente manera:

- B31.1 Tuberías de potencia: Se encuentran en las estaciones de generación de energía eléctrica, plantas industriales e institucionales, sistemas de calentamiento geotérmico y en sistemas de calentamiento y de enfriamiento. **[ASME B31, 2014]**

- B31.3 Tuberías de proceso: se localizan en las refinerías de petróleo, en las plantas químicas, farmacéuticas, papeleras, criogénicas, y en todas aquellas relacionadas con el procesamiento.
- B31.4 Sistemas de tuberías para transporte de hidrocarburos líquidos y otros: se emplean en el transporte de productos líquidos, entre plantas y terminales, y tuberías ubicadas dentro de terminales, estaciones de bombeo, y estaciones para regulación y medición. [ASME, 2012]
- B31.5 Tuberías para refrigeración: transportan refrigerantes y enfriadores secundarios.
- B31.8 Sistemas de tubería para transporte y distribución de gas: transportan productos en fase gaseosa, entre fuentes y terminales, incluidas las estaciones de compresión, las estaciones reguladoras, de medición y las tuberías de recolección de gas.
- B31.9 Tuberías para servicios de edificios: se encuentran en edificios industriales, institucionales, comerciales y públicos, y en residencias, que no se incluyan dentro del intervalo de tamaños y valores de presión y temperatura cubiertos en B31.1.
- B31.11 Sistemas de tuberías para transporte de lodos: transportan lechadas acuosas entre plantas y terminales, y tuberías ubicadas dentro de terminales, estaciones de bombeo y estaciones para regulación.
- B31.12 Sistemas de tuberías para transporte de hidrógeno: se emplean para el servicio de hidrógeno en estado gaseoso y líquido.

### 1.1.3 Norma API 570 de inspección de tuberías en servicio

El API 570 (API, American Petroleum Institute) cubre los procedimientos de inspección, reparación, alteración, y reclasificación para los sistemas de tuberías metálicas en servicio.

El API 570 fue creado para emplearse en las refinerías de petróleo y las industrias de procesos químicos con sistemas de tuberías. Se pretende que sea usado por organizaciones que mantengan o accedan a un organismo de inspección o de reparación

autorizada y técnicamente calificada mediante ingenieros, inspectores o examinadores. Para realizar evaluaciones en servicio, el API 570 emplea como herramienta el API 579. [API 570, 2009]

El fluido en servicio y las clases de sistema de tuberías listadas abajo están excluidos por la API 570, pero pueden incluirse como opción por el dueño o el usuario:

1. Servicio de fluidos peligrosos dentro de los límites definidos por regulaciones locales.
2. Agua (incluido los sistemas de protección contra incendio), vapor, vapor condensado, calderas de agua, y el servicio de fluido de Categoría D definido en la ASME B31.3

Los sistemas de tuberías excluidos u opcionales son los siguientes:

1. Sistemas de tuberías de estructuras móviles.
2. Sistemas de tuberías que integran los componentes rotativos o recíprocos.
3. Tubería interna de calderas, incluyendo tuberías y manifold.
4. Recipientes a presión, calentadores, intercambiadores de calor, incluidas todas las tuberías internas y externas; además de las conexiones.
5. Servicio sanitario, procesos de agua
6. Tuberías con un diámetro exterior que no supere la ½".
7. Tuberías no metálicas, PVC o de vidrio.

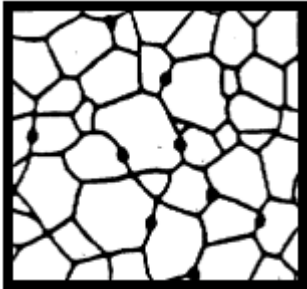
## 1.2 Estimación de vida residual Neubauer

Este procedimiento de evaluación para componentes de acero de bajo carbono, otorga una visión general de la correlación entre la vida residual y los aspectos microestructurales, incluyendo también la dureza que se emplea para el material expuesto a altas temperaturas. Asimismo, incluye información técnica aplicada para la investigación microestructural de componentes en servicio. Además de recomendaciones sobre la utilización de la correlación. [B. Neubauer y U. Wedel, 2004]

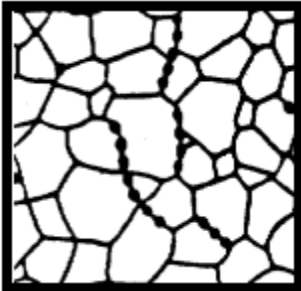
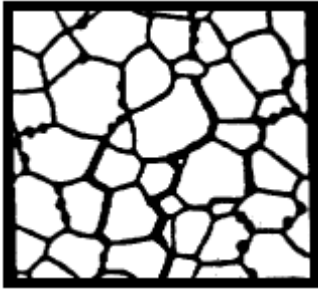

El procedimiento para la estimación de vida remanente es el siguiente:

- a) Determinación del componente: permite una visión general del consumo de vida del componente, el cual indica las pruebas del material expuesto.
- b) Prueba al material expuesto: estas pruebas se llevan a cabo en las partes más expuestas al calor, para comprobar la reacción de los materiales bajo ciertas condiciones afectadas.
- c) Operación continua: Las condiciones de operación continua se basan en los resultados de las evaluaciones de metalografía. Los grados de daño se muestran en la **Tabla 1.2**.
- d) Repetición del análisis: En una próxima evaluación, se debe volver a revisar. Este procedimiento sirve para observar la seguridad del funcionamiento prolongado.

**Tabla 1.2** Grado de daño Neubabuer. [E. RECOMMENDATIONS, 2005]

Grado de daño	Evaluación observada en la metalografía	Replica microestructural
0	Microestructura normal de un componente nuevo.	
1	Microestructura normal en condiciones de servicio, incipiente transformación microestructural.	
2	Difusión de carburos hacia los límites de grano, pocas cavidades en los límites de granos.	

**Tabla 1.2** Grado de daño de Neubabuer. [E. RECOMENDATIONS, 2005] (continuación)

Grado de daño	Evaluación observada en la metalografía	Replica microestructural
3	Orientación vertical de cavidades en los límites de grano, separación de los límites de grano.	
4	Presencia de micro fisuras	
5	Presencia de macro fisuras	

Al identificar el grado de daño se puede estimar el tiempo mínimo de servicio de la tubería en función del estado microestructural. La **Tabla 1.3** muestra la clasificación para estimar el tiempo mínimo de servicio según Neubabuer.

**Tabla 1.3** Estimación mínima de servicio según Neubauer. [B. Neubauer y U. Wedel, 2004]

Grado de daño	Tiempo mínimo de servicio
2	3 años
3	1 a 1 ½ año
4	½ año
5	Reparación inmediata

### 1.3 Efectos del fuego en los componentes a presión

#### 1.3.1 Reducción de la resistencia a la corrosión

La corrosión a altas temperaturas es una forma de desgaste que no requiere la presencia de un electrolito líquido. En la mayor parte de los ambientes industriales, la oxidación participa en las reacciones de corrosión a alta temperatura, independientemente del modo predominante de corrosión. Las aleaciones, generalmente, dependen de la reacción de oxidación para desarrollar una capa protectora resistente al ataque de corrosión tales como la carburación y la corrosión intergranular, las cuales se producen a altas temperaturas.

##### a) Carburación

La carburación ocurre cuando los metales están expuestos a monóxido de carbono, metano, etano, y otros hidrocarburos a temperaturas elevadas. El carbono del medio ambiente se combina principalmente con el cromo, pero también con otros carburos (Nb, W, Mo, Ti, etc.) presentes en la aleación de los carburos internos. Los carburos formados en la microestructura pueden ser de composición y estructura complejas y se precipitan en los límites del grano o en el interior de los granos. El efecto no deseable de la formación de carburos es volverse quebradizo y dúctil a temperaturas de entre 482 °C y 538 °C. Fijando el cromo en forma de carburos ricos de cromo estables, la carburación también reduce la resistencia a la oxidación. Asimismo, la resistencia a la fluencia puede quedar severamente afectada, y las tensiones internas pueden incrementar el volumen

asociado con la admisión de carbono y la formación de carburo. Esta presión interna representa tensiones adicionales superpuestas en tensiones operacionales. El pandeo localizado o incluso grietas de componentes carburizados son indicativos de los niveles de tensión interna.

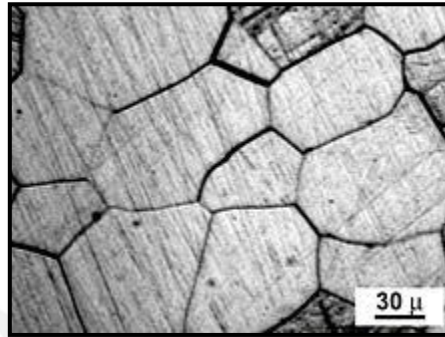
El daño por carburación está asociado con la exposición a altas temperaturas relacionadas con el dióxido de carbono, el metano, y otros hidrocarburos. Los equipos de tratamiento térmico usados para la carburación del gas (endurecimiento superficial) son también vulnerables. Un aspecto insidioso de la carburación es su naturaleza no uniforme. Solo para las otras formas de corrosión localizada, es extremadamente difícil predecir y modelar los daños por carburación localizada. Como norma, estos problemas suelen ocurrir a temperaturas por encima de 815 °C, debido a la cinética no favorable a temperaturas inferiores. Por lo tanto, la carburación no es común en la mayoría de las operaciones de refinación debido a las bajas temperaturas de las tuberías de la mayoría de los calentadores. No obstante, en situaciones de incendios, la carburación podría manifestarse debido a la exposición al calor

#### b) Corrosión intergranular

Es un fenómeno corrosivo en los aceros inoxidables, que se puede presentar en otras aleaciones resistentes a la corrosión. Este consiste en una descarburización del acero debido a un fenómeno difusivo del carbono hacia los bordes del grano. De este modo, durante el proceso, el carbono arrastra átomos de cromo, provocando que el acero pierda sus propiedades anticorrosivas.

En las aleaciones de níquel, así como en aceros inoxidables austeníticos, en donde se agrega cromo para incrementar la resistencia a la corrosión, el mecanismo que se presenta para la corrosión intergranular es la formación de carburos de cromo. Este método es empleado debido a la alta afinidad termodinámica del cromo con el carbono, además de la buena difusividad del carbono a través del acero hacia el borde del grano. Esto se observa en la **figura 1.1**, en ella, se arrastra al cromo hacia el borde para formar zonas pobres en cromo. Normalmente, este proceso se asocia al aumento de la

temperatura de entre 450 a 850 °C, denominado sensibilización, el cual es producto de una soldadura o de un mal tratamiento térmico. [2]



**Figura 1.1** Corrosión intergranular. Fuente: [www.min-us.com](http://www.min-us.com).

La sensibilización se produce cuando una aleación se expone a cierta temperatura o rangos, que lo vuelven susceptible a la corrosión intergranular en una atmósfera corrosiva. Los medios capaces de producir este fenómeno son el agua marina, los crudos de petróleo, los disolventes orgánicos clorados, etc. Cabe resaltar que si la aleación se enfría pasando rápidamente la zona de temperatura de sensibilización, los carburos no precipitan, y el acero se hace inmune a la corrosión. Sin embargo, durante los incendios, la temperatura de enfriamiento es lenta, por ello, este fenómeno podría suceder en estos materiales. [3]

La sensibilización se evalúa por ataque químico con ácido oxálico al 10%. Una vez que se cuantifica la sensibilización, la temperatura y el tiempo de exposición, se estiman los datos de su correlación. Al respecto, se puede mencionar que la sensibilización no siempre es una razón para negarse a la reutilización de los componentes sujetos a fuego. Por lo tanto, el juicio de reutilización depende del clima operativo ya sea corrosivo o no. [4]

En la **Figura 1.2**, se observan el resultado de las pruebas de análisis metalográfico y de corrosión intergranular, las cuales se llevaron a cabo para el acero austenítico inoxidable a diferentes temperaturas de exposición térmica. En ella, se muestra que tras cuatro horas continuas de exposición térmica a 650°C del acero austenítico inoxidable, se



incrementa la precipitación de carburos sobre los límites de granos, con lo cual no puede pasar la evaluación de corrosión intergranular. Sin embargo, si se emplea cuatro horas continuas de exposición térmica a 1100°C, el crecimiento de grano será obvio, (creciendo desde el grado 6 hasta el grado 1). [5]



**Figura 1.2** Resultados de la prueba de estructura metalográfica y corrosión intergranular a diferentes temperaturas de exposición térmica. [Xuedong Chen, 2012]

### c) Corrosión bajo tensión en presencia de sulfuros

Debido a los diferentes grados de aceros de la clase API, estos se utilizan en la construcción de gaseoductos, reactores y utillaje de la industria petroquímica, especialmente en aquellas aplicaciones con presencia de fluidos ácidos, susceptibles de promover la fragilización por hidrógeno de los aceros. En tal sentido, se debe tener en cuenta este mecanismo de daño.

La corrosión bajo tensión en presencia de sulfuros es el agrietamiento de un metal bajo la acción combinada de esfuerzos de tensión y corrosión en presencia de agua y sulfuros de hidrógeno. Es una forma de fragilización por hidrógeno que se produce en aceros de alta resistencia, localizadas en zonas duras en soldadura de materiales susceptibles, en especial, si el entorno contiene  $H_2S$  (Sulfuro de hidrogeno). [6]

Existen efectos sinérgicos o conjuntos de alta resistencia a la deformación y la concentración de sulfuro de hidrógeno en el ambiente que pueden causar corrosión bajo tensión. El hidrógeno atómico se difunde dentro de la estructura metálica hacia las

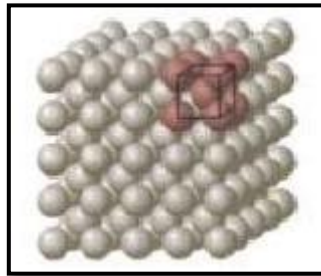
regiones con mayores cargas triaxiales, debido a las tensiones internas (inherentes a la fabricación, mecanizado, fallos en los tratamientos térmicos, etc.) como a las externas (resultantes de las cargas de tracción constantes aplicadas y de los esfuerzos cortantes generados), donde queda atrapado. Todo ello reduce la ductilidad del material y se crean fisuraciones perpendiculares a la resultante de las cargas aplicadas, o incluso fracturas en forma escalonada y sin estricción (reducción de la sección en la zona de la rotura) del acero dañado. [7] [8]

Debido al efecto térmico producido por el fuego, la dureza del acero al carbono puede variar, por ello, en caso de que la dureza sea baja respecto al valor especificado del material y la microestructura se ablande, el riesgo de corrosión bajo tensión en presencia de sulfuros generalmente disminuye. Sin embargo, si se percibe una reducción en la resistencia a la tracción, otra consideración debe ser tomada en cuenta. Pero, en el caso que la dureza medida resulte en valores mayores de los especificados y se observe un microestructura endurecida, se puede incrementar la sensibilidad de corrosión bajo tensión en presencia de sulfuros. En tal sentido, se debe tomar medidas apropiadas como el tratamiento térmico, amolado o la reparación. Con esto se protegerá de los posibles fallos acordes con una mayor dureza. [4] [9]

### 1.3.2 Cambios en la microestructura y propiedades

Para entender el comportamiento del acero frente a la exposición de calor, primero, debemos conocer el comportamiento del acero en estado de equilibrio y fuera de él. Ya que el comportamiento de la microestructura y las propiedades mecánicas varían según la temperatura, tiempo de exposición y velocidad de enfriamiento

El acero es una mezcla de hierro con una cantidad de carbono variable. Cuando este material se transforma en estado sólido, sus átomos se ordenan formando una estructura regular y repetitiva, tal como se muestra en la **Figura 1.3**.

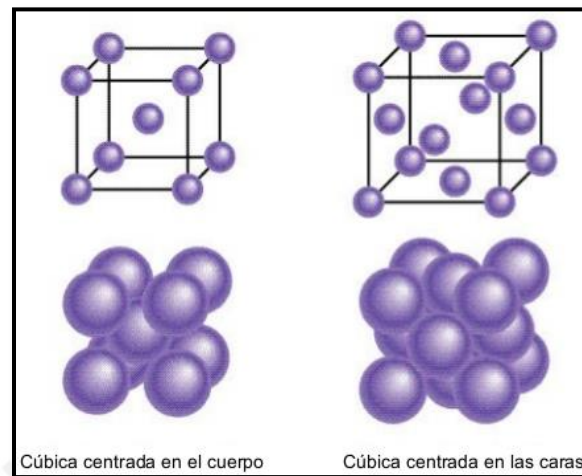


**Figura 1.3** Distribución espacial, ordenada y repetitiva de átomos, característica de un material cristalino en estado sólido. Fuente: [www.scielo.br](http://www.scielo.br).

Esta configuración espacial homogénea de átomos recibe el nombre de estructura cristalina. Por esta razón, un material sólido recibe el nombre de material cristalino. La forma cómo estos átomos se agrupan espacialmente puede ser diferente de un material a otro y para representarla se emplea una cantidad de átomos mínima que se repite espacialmente de manera ordenada (Ver **Figura 1.4**). Esta unidad mínima recibe el nombre de celda unitaria y caracteriza a la estructura cristalina de un material sólido. De tal modo que se puede afirmar que un material sólido es a su vez cristalino en su interior. Este ordenamiento de los átomos no solo define el estado del material sino también sus propiedades mecánicas.

Aunque la estructura cristalina define el estado de los materiales, los metales tienen estructuras cristalinas simples que se representan a través de ordenamientos atómicos denominados:

- Estructura cúbica centrada en el cuerpo (CC)
- Estructura cúbica centrada en las caras (CCC)
- Estructura hexagonal compacta (HC)



**Figura 1.4** Dos tipos de celdas unitarias que representan dos estructuras cristalinas diferentes de un material en estado sólido: CC y CCC. Fuente: www.min-us.com

Una propiedad que determina la estructura cristalina es su densidad. Cuanto más compacto sea el ordenamiento atómico, mayor será la densidad atómica. Por ello, los metales con estructura CCC son más dúctiles, lo cual es consecuencia del ordenamiento atómico interno de los metales.

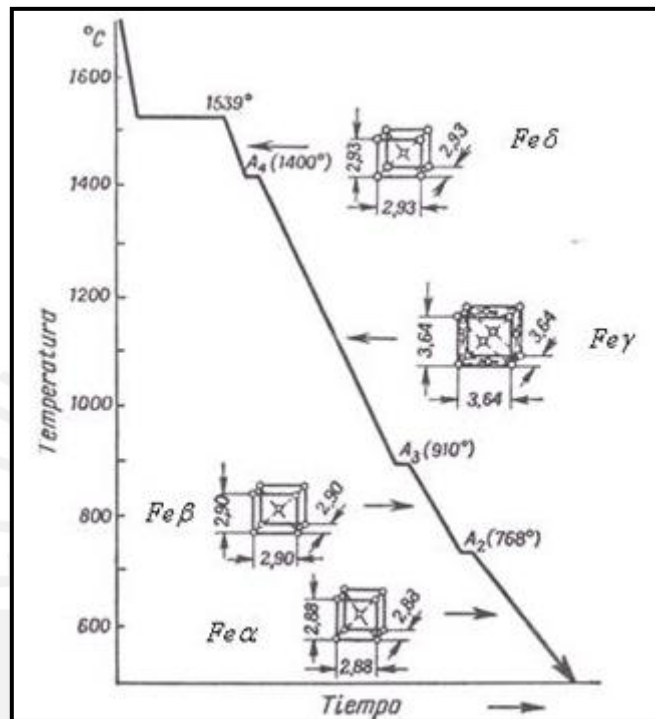
**Tabla 1.4** Metales y sus estructuras cristalinas en estado sólido

Metal (CCC)	Metal (CC)	Metal (HC)
Cu	Mo	Zn
Fe $\gamma$	Fe $\alpha$	Mg
Ni	W	Ti
Ag	Na	Zr

Como se observa en la **Tabla 1.4**, el hierro figura tanto en los metales con estructura CC (Fe $\alpha$ ) como en los metales con estructura CCC (Fe $\gamma$ ). Esto sucede debido a que el hierro cambia de ordenamiento atómico con la temperatura.

Por encima de la temperatura de 1392°C, el hierro presenta una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (CC). Con este ordenamiento atómico, el hierro recibe el nombre de Fe “ $\delta$ ” (hierro delta). Cuando la temperatura desciende debajo de 1392°C, el hierro cambia a un ordenamiento atómico del tipo CCC (Ver **figura 1.5**). Con esta nueva

estructura, el hierro recibe el nombre de Fe “Y” (hierro gamma). Pero, además el hierro “Y” se transforma adquiriendo nuevamente un ordenamiento del tipo CC cuando se enfría por debajo de 911°C, convirtiéndose en hierro “α” (hierro alfa). [Fosca, 2003]



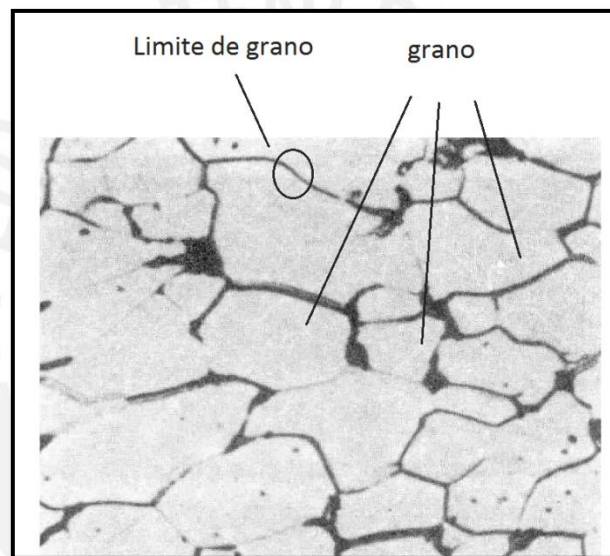
**Figura 1.5** El hierro sufre dos transformaciones alotrópicas:  $Fe \delta \leftrightarrow Fe \gamma$  y  $Fe \gamma \leftrightarrow Fe \alpha$  Fuente: [Fosca, 2003]

Dentro del rango de temperaturas en estado sólido, el hierro cambia dos veces de estructura cristalina. A este cambio de ordenamiento atómico o estructura cristalina, se le denomina alotropía o poliformismo, es decir, puede tomar varias formas cristalinas. Es importante indicar que la transformación alotrópica es un proceso reversible durante el enfriamiento, el  $Fe\delta$  pasa a  $Fe\gamma$  y cuando se calienta nuevamente, se produce su transformación a  $Fe\delta$ .

Si se continúa enfriando el hierro debajo de los 910°C, no sufrirá otra transformación alotrópica, manteniendo su estructura cristalina “CC” hasta la temperatura ambiente. Sin embargo, cuando se desciende por debajo de los 768°C, el hierro se vuelve magnético, cualidad física que conserva debajo de esta temperatura pero que pierde al calentarse por

encima de los 768°C. Aquí no se produce ninguna transformación cristalina pero se transforman las propiedades magnéticas del hierro. [Fosca, 2003]

Si observamos la superficie pulida de un metal mediante un microscopio óptico, se observa la imposibilidad de captar a los millones de átomos ordenados cristalinamente, ya que son de tamaño sub-microscópico. Por el contrario, si esa misma superficie pulida es atacada químicamente, se puede obtener una imagen como la que se muestra en la **Figura 1.6**.



**Figura 1.6** Metalografía de un metal en el que se observan los granos y los límites de grano.  
Fuente: [www.scielo.br](http://www.scielo.br)

Las regiones como mosaicos de formas equiaxiales se llaman “granos” y están constituidas por millones de celdas unitarias que cristalizan a los metales en estado sólido. Cuando el metal empieza a enfriarse y se producen los primeros puntos (núcleos) de solidificación. Estos núcleos crecen en forma de granos, que al encontrarse con otros forman la pared de mosaicos de la figura anterior. A las fronteras entre granos se denominan límites de grano. Estos no poseen un ordenamiento atómico, pues son interfaces que garantizan la cohesión con los granos adyacentes. Las imágenes metalográficas de un metal son los límites de grano y permiten conocer el tamaño de los

granos del metal. El tamaño de estos granos influye sobre las propiedades mecánicas del metal; puesto que cuando el metal está constituido por una microestructura de grano fino, las propiedades son mejores que las del metal con grano grueso. Un mismo metal puede presentar diversos tamaños de grano dependiendo de su historia térmica, es decir, de cómo ha sido calentado y enfriado hasta la temperatura ambiente. Una de las características de los metales en estado sólido sometidos elevadas temperaturas es la tendencia al crecimiento de grano con el tiempo y aumento de la temperatura. Dado que las propiedades mecánicas del metal están influenciadas por el tamaño de grano de su microestructura, estas se perjudican por los calentamientos excesivos.

Otro fenómeno del acero, además de generar una transformación de la estructura cristalina, produce una redistribución de los átomos de carbono en los nuevos constituyentes estables. Ello se genera si el carbono se mueve a través de la estructura cristalina, viajando por la red a través de espacios libres o defectuosos. Este fenómeno se conoce como difusión y se encuentra influenciado por la temperatura. En otros términos, cuando mayor es la temperatura del acero, mayor será la velocidad de difusión de los átomos de su interior. [Fosca, 2003]

En estado de equilibrio durante un enfriamiento muy lento, desde el estado líquido, aparecen sucesivamente diferentes microconstituyentes. Las características de la aleación dependen de los microconstituyentes y de la forma cómo se encuentren en ella:

- La ferrita es una solución sólida que disuelve poco carbono y tiene baja resistencia mecánica.
- La austenita es una solución sólida más densa y su resistencia mecánica es mayor a la ferrita.
- La cementita es la fase más dura del acero. Se encuentra presente a temperatura ambiente.
- La perlita es el constituyente eutectoide constituido por láminas alternadas de ferrita y cementita. Tiene una resistencia mecánica superior que la ferrita y austenita, pero es menos dúctil. Está presente en todos los aceros en estado de equilibrio a temperaturas por debajo de 723°C. Sus propiedades mecánicas están condicionadas por la distancia entre láminas. Perlitas finas tienen mejor resistencia

mecánica que las gruesas. La perlita puede globulizarse si se calienta a temperaturas muy cercanas a los 723°C. En estas condiciones, la dureza y resistencia mecánica del acero se reducen apreciablemente.

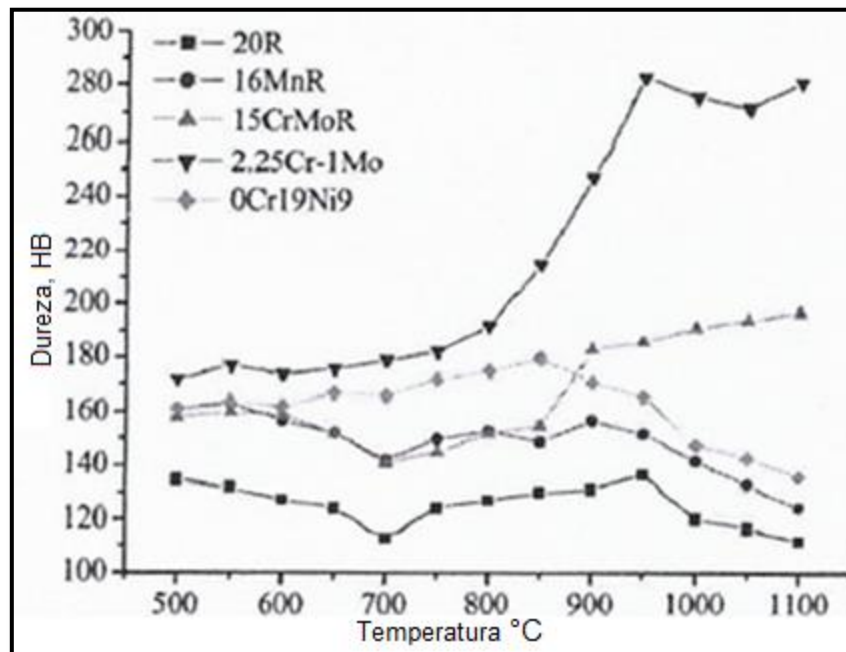
Estos microconstituyentes son de acuerdo al diagrama Fe-C y partiendo del hecho que se analiza cuando el acero es calentado y enfriado muy lentamente dentro del rango de temperaturas en estado sólido. La resistencia mecánica de los aceros en estado de equilibrio depende del porcentaje de carbono, ya que para cada uno, le corresponde una microestructura determinada. Este enfriamiento muy lento se logra enfriando la pieza dentro del horno que previamente ha sido calentado. Este proceso recibe el nombre de tratamiento térmico de recocido. Por el contrario, cuando el acero, en vez de ser enfriado en el horno, es enfriado en el aire, se denomina tratamiento térmico de normalizado. En estas condiciones el acero sufrirá transformaciones fuera de equilibrio y provocará transformaciones microestructurales irreversibles. Cuando uno calienta el acero hasta alcanzar una temperatura donde esté completamente austenizado y luego enfriado hasta la temperatura ambiente, su resistencia mecánica se incrementará conforme aumente la velocidad de enfriamiento desde la temperatura de austenización. De esta forma, un mismo acero puede presentar, a temperatura ambiente, diferentes microestructuras y propiedades mecánicas. [Fosca, 2003]

### **1.3.3 Relación de la temperatura, tiempo y velocidad de enfriamiento con la microestructura.**

La exposición a temperaturas altas en los aceros influye en la microestructura, no obstante, es el único factor, también lo son el tiempo de exposición al calor y la velocidad de enfriamiento que van de la mano con los cambios microestructurales del material. Por ello, a continuación se muestra el comportamiento de las propiedades mecánicas para diferentes simulaciones de daño por fuego de los aceros con sus aleaciones más comunes usados en tuberías.



La **Figura 1.7** muestra el resultado de diferentes simulaciones térmicas, respecto a la relación de la temperatura de exposición térmica versus la dureza en aceros comunes para recipientes a presión y tuberías durante una exposición térmica de dos horas y un enfriamiento lento cuatro horas.



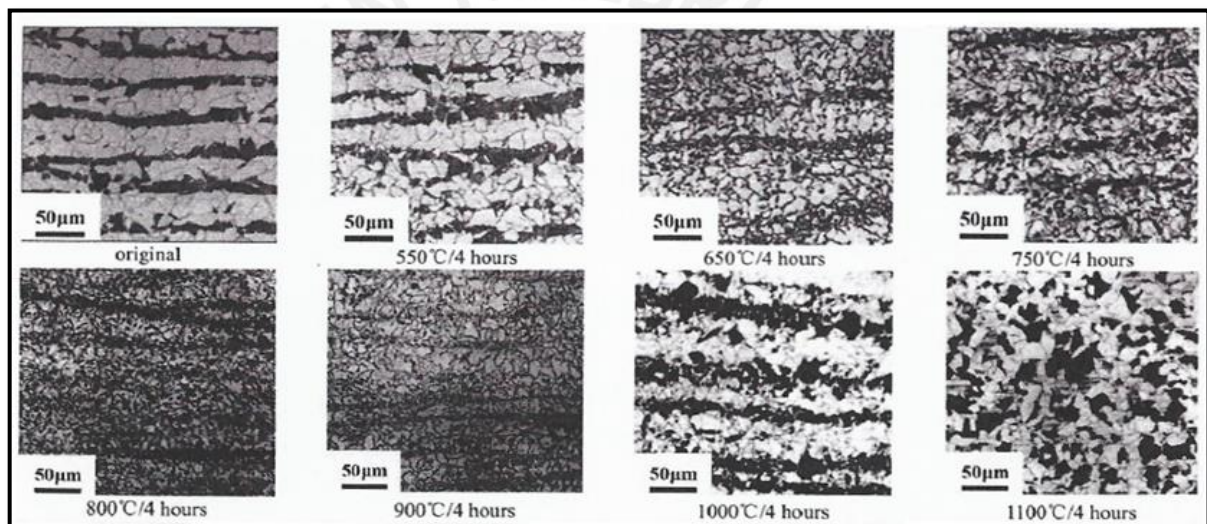
**Figura 1.7** Relación entre la temperatura y dureza de aceros. [Xuedong Chen, 2012]

- Acero AISI 1024 (16MnR)

El acero AISI 1024 es suministrado en estado normalizado, con una temperatura de normalizado de alrededor 920°C - 950°C. La temperatura  $A_{c3}$  es cercana a los 850°C - 880°C y la temperatura  $A_{c1}$  es de aproximadamente 700°C - 720°C. La dureza en estado original es 155HB - 168HB. Cuando las temperaturas de calentamiento alcanzan 680°C - 700°C, la dureza puede caer alrededor de los 140HB. Cuando la temperatura excede los 710°C - 840°C, comparando con el estado original, la dureza del acero AISI 1024 se reducirá debido a la presencia de cambio de fase en estado sólido y porque la velocidad de enfriamiento del cuerpo del equipo en el accidente de fuego puede ser más lenta que

la de normalización antes de la entrega en planchas de acero. Sin embargo, la amplitud de reducción es relativamente pequeña y cae en un rango de 140HB - 152 HB. Cuando la temperatura de calentamiento excede los 880°C, a temperaturas más altas y mayor duración de exposición, el crecimiento de grano será más serio y la velocidad de enfriamiento más lenta, por tanto, su dureza más baja.

La **Figura 1.8** muestra la relación de temperatura de calentamiento y dureza a una temperatura ambiente de un acero 16MnR, bajo cierta exposición térmica (dos horas) y un enfriamiento lento (cuatro horas).



**Figura 1.8** Cambio microestructural del acero AISI 1024

La **Figura 1.9** muestra el cambio de la dureza Brinell del acero AISI 1024 bajo condiciones de calentamiento diferentes y velocidades de enfriamiento lentas.

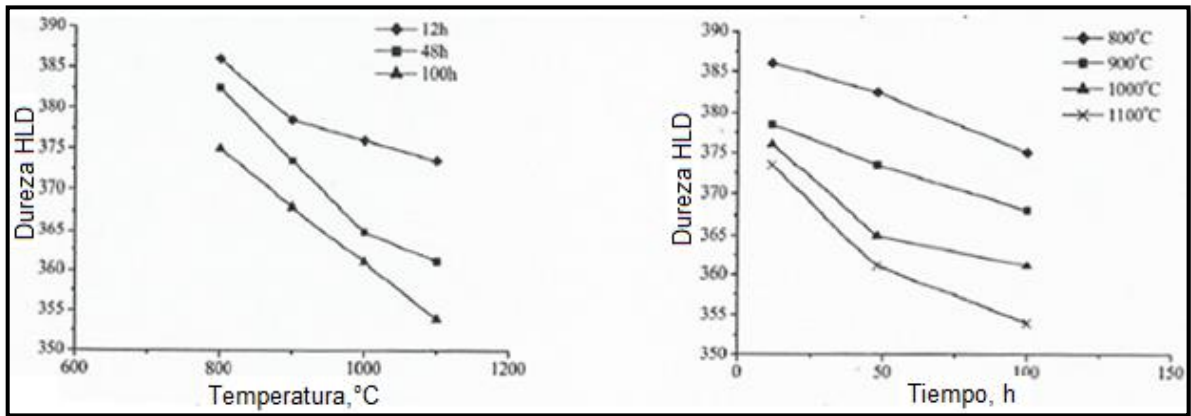


Figura 1.9 Comportamiento del acero AISI 1024 [Xuedong Chen, 2012]

La Figura 1.10 ejemplifica el cambio de ley de la dureza Brinell del acero AISI 1024 bajo condiciones de calentamiento diferente y velocidad de enfriamiento lento.

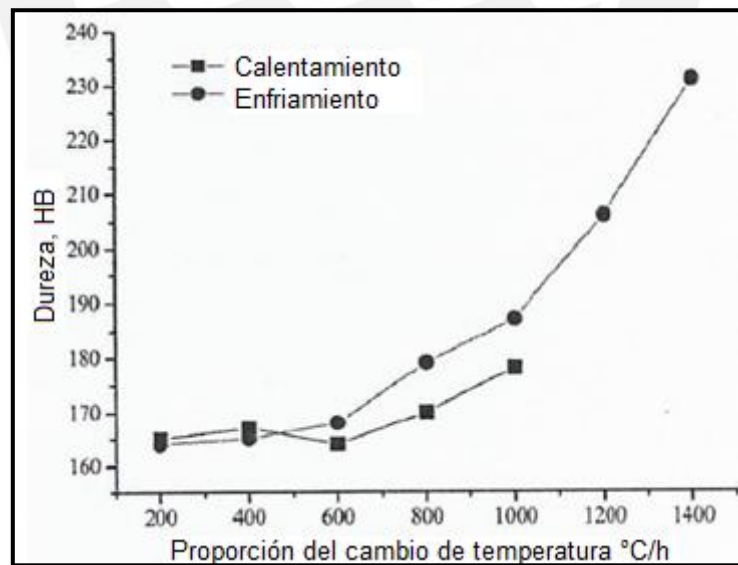


Figura 1.10 Cambio de la dureza del acero AISI 1024 VS diferentes calentamiento y velocidades de enfriamiento [Xuedong Chen, 2012]

- Acero ASTM A182 (15CrMoR)

El acero A182 es presentado en estado normalizado y templado. Su temperatura normalizada es de 930°C - 950°C y la de templado es 650°C - 680°C. En estado original, su dureza es 150HB - 160HB. En un accidente con fuego, el rango de calentamiento puede exceder la temperatura de templado, por lo que la dureza disminuye. Cuando la temperatura alcanza 690°C - 710°C, la dureza cae alrededor de 140HB. Cuando la temperatura fluctúa en el rango de 730°C - 840°C, comparando con el estado original, la dureza caerá un poco debido al cambio de fase y porque la velocidad de enfriamiento del cuerpo de los equipos en el incendio es más lento que un normalizado antes de las planchas de acero, aunque el rango de reducción sea relativamente bajo (de 145HB - 155HB). Cuando la temperatura del acero en un incendio pasa los 880°C (temperatura excedida más alta), el crecimiento de grano será mayor y la dureza se elevará sobre la condición natural de enfriamiento.

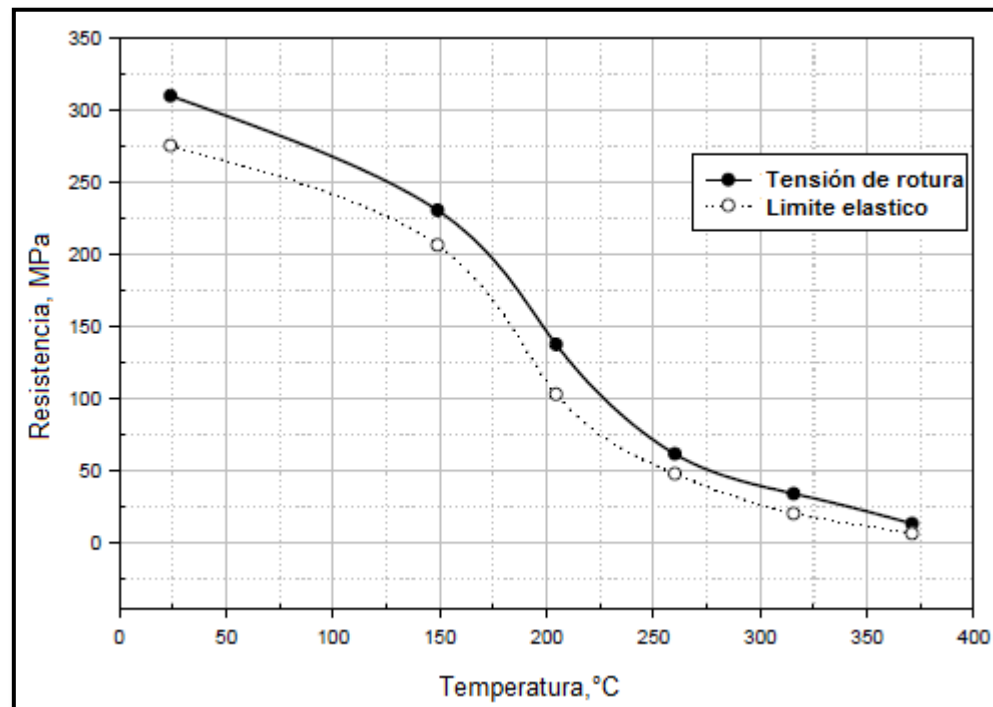
- Acero de baja aleación 2.25Cr-1Mo

El acero 2.25Cr-1Mo se presenta en estado normalizado y templado. Su temperatura normalizada fluctúa los 930°C - 950°C y la de templado es 680°C - 700°C. La dureza en estado original es 170HB - 185HB. Luego que la temperatura de calentamiento durante un incendio pase 800°C, la dureza aumentará (alcanzando 200HB a través de la medición de campo actual). Cuando la temperatura de calentamiento exceda los 900°C, la dureza se elevará (alcanzando 280HB a través de la medición de campo). Esto sucede mayormente porque algunos microconstituyentes como la martencíticas y bainíticas se formaron en el proceso de enfriamiento luego de pasar la temperatura de austenización.

#### 1.3.4 Ablandamiento y deformación en aleaciones de aluminio

Debido al uso de aleaciones de aluminio para diversos accesorios de los componentes a presión, se debe señalar los daños causados, ya que son indicadores para categorizar la temperatura expuesta.

Las aleaciones de aluminio pierden resistencia por encima de 150 °C (300 °F) (Ver Figura 1.11). Por ejemplo, las deformaciones en la tubería de aluminio para los accesorios son indicio de temperaturas relativamente altas.

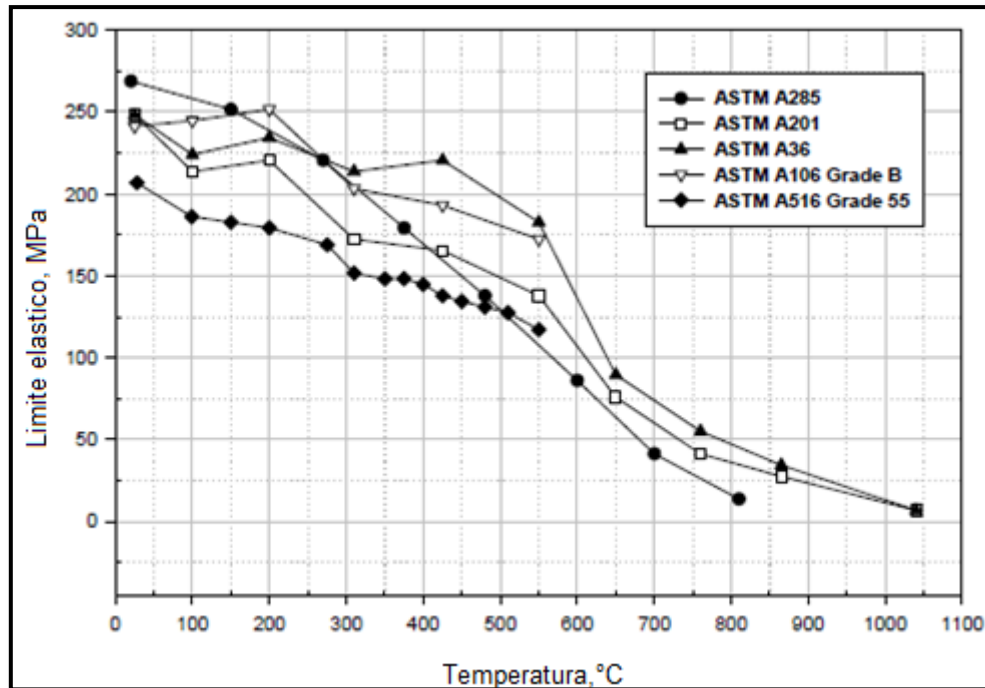


**Figura 1.11** Efecto de la exposición al calor sobre la resistencia de una aleación de aluminio 6061-T6. [API 579-1/ASME FFS-1, 2007]

### 1.3.5 Distorsión de aceros estructurales

Una deformación plástica de aceros de bajo carbono en vigas en I, secciones de canal, y otros miembros estructurales es observable si la temperatura es suficientemente alta como para reducir el límite de fluencia por debajo del esfuerzo aplicado. Por encima de 760 °C (1400 °F), el límite de fluencia de los aceros al carbono se ha reducido a solo 26 MPa (3750 psi) y la deformación plástica es posible a niveles relativamente bajos de

esfuerzo (Ver **Figura 1.12**). Por lo tanto, la presencia de acero estructural gravemente deformado por un incendio es indicativa de temperaturas de 760 °C (1400 °F) o superiores.



**Figura 1.12** Límite elástico de algunos aceros de bajo carbono a altas temperaturas. [API 579-1/ASME FFS-1, 2007]

#### 1.4 Precedentes de evaluación de incendios en componentes a presión

- Planta petroquímica 2006

En septiembre del 2006, ocurrió un incendio en una planta petroquímica del noreste de China. En el lugar se encontraban alrededor de 34 componentes y más de 150 tuberías, atacadas por fuego. Al momento de la investigación, las causas del accidente eran

inciertas ya que no se pudo determinar el tiempo de exposición térmica y la temperatura de exposición de los componentes. Por lo tanto, era imposible clasificar las zonas de exposición al calor y conducir una evaluación acorde al API 579. Por ello, primero, se examinó la dureza y la metalografía de todos los equipos atacados por el fuego. Luego, se llevó una examinación macroscópica (dimensión y deformaciones) y ensayos no destructivos (superficies internas y externas). De acuerdo con los resultados de dureza y metalografía, los equipos con resultados anormales fueron identificados. Después, se condujo una simulación térmica usando un material igual al del incendio. Con ello, se estudió el régimen de cambio en la dureza y en la microestructura del material. El proceso de simulación térmica, con el cual es obtenido el daño del material, es esencialmente la reproducción de la ley de cambio de la exposición térmica por temperatura, el tiempo de exposición y la velocidad de enfriamiento en el incendio. Además, con los materiales dañados, se evaluaron las propiedades mecánicas, el comportamiento a la fractura y fatiga. Paralelamente, se realizaron pruebas de resistencia a la corrosión. De este modo, fueron obtenidos los datos sobre las propiedades de los materiales después del incendio. Con ellos, se calcularon, la presión máxima admisible de trabajo del equipo, las evaluaciones de seguridad y las predicciones de vida residual y otros modos de falla. Todos los tornillos y sellos no metálicos fueron reemplazados, también los soportes deformados fueron reparados. Tras la evaluación, los equipos fueron puestos en operación, exceptuando tres que no eran seguros. En la actualidad, gracias a las inspecciones y evaluaciones, estos equipos continúan en funcionamiento. [10]

- Refinería de petróleo 2008

En abril del 2008, debido a la explosión de una tubería, se desencadenó un incidente con fuego sobre una refinería de petróleo en el sur de China. El fuego se extinguió después de dos horas. Algunas tuberías se quemaron y once piezas de equipos y 24 líneas de tuberías fueron atacadas por el fuego. En la evaluación se adoptó el método ya mencionado para inspeccionar los equipos y las tuberías. Después de buscar macroscópicamente y por ensayos no destructivos, los resultados mostraron que debido al aislamiento de protección externo, la dureza y la estructura metalográfica de los equipos y tuberías estaban sin anomalías. Por eso, las conclusiones fueron que los

equipos y tuberías podían seguir en servicio. Hoy, estos equipos evaluados siguen operando de forma segura. [11]

- Planta de etileno 2008

En junio del 2008, un incendio fue causado por la explosión de una tubería de gas que presentaba fisuras en una planta de etileno al sur de China. La duración del fuego excedió las cuatro horas. En tal sentido, se examinó en campo y se evaluaron las 31 piezas de los equipos y las 43 tuberías afectadas. En la inspección se encontraron dos tuberías (cédula #20) dañadas, en las cuales, y debido al sobrecalentamiento, el grano empezaba a crecer y la dureza bajaba (HB 80). La prueba de simulación térmica provee un fenómeno de deterioración del material. Las dos tuberías no alcanzaban los requerimientos de resistencia, por eso, se rechazaron y reemplazaron. Mientras que el resto de las 31 piezas y las 51 tuberías volvieron a funcionar después de una evaluación de sus propiedades, inspección visual, ensayos no destructivos y evaluación segura obtenida del daño al material con similar dureza y estructura metalográfica a través de la simulación térmica. Todos estos equipos y tuberías siguen operando hasta la fecha en buenas condiciones. [12]

- Planta petroquímica 2005

En Julio del 2005, un incendio fue causado por la explosión de una tubería fisurada de un horno en una planta petroquímica en el centro de China. Tras una inspección y evaluación de las doce piezas de equipos y 23 tuberías afectados, la inspección halló sobrecalentamientos y quemaduras graves en cinco tuberías (cedula #20), cuyos granos crecieron de un grado normal 6 a un grado 1-0, y reduciéndose la dureza de un valor normal de 120 HB a 85 HB. Después de una simulación térmica, y al no lograr la resistencia deseada, las tuberías fueron rechazadas. Por otro lado, después del análisis y evaluaciones, el resto de equipos y tuberías fueron admitidos para continuar operando. [13]

- Planta de carbón 2008

En diciembre del 2008 se incendió una empresa química de carbón en el Oeste de China, debido a la explosión de la cabeza del reactor de hidrogeno. Ello provocó la quemadura



de cinco reactores, seis intercambiadores de calor y varias tuberías. En la inspección de campo, se halló en la parte baja de uno de los reactores una tubería de efluentes la cual tuvo un incremento en su dureza local por encima de los 278 HB. Además, se observó la presencia de martencita y vainita. Tras la evaluación, se descartó el uso del reactor. En tanto que el resto de equipos y tuberías presentaron fenómenos normales durante la evaluación de metalografía y dureza por lo que pasaron a servicio continuo. [14]

### 1.5 Selección de ensayos

- Inspección visual

Consiste en la observación de un material bajo determinadas condiciones. Este se efectúa a simple vista (ojo desnudo) o con ayuda de instrumental auxiliar como, por ejemplo, lupas, linternas, espejos, boroscopios y otros. Este análisis sirve para detectar discontinuidades o disconformidad como son las fisuras, las porosidades (soldadura, fundición, etc.), el estado superficial (corrosión, ralladuras, etc.), el color adecuado (matices, blancura, etc.), las formas y las dimensiones. Para limpiar las superficies antes de una inspección visual, la norma ASTM E 165 brinda algunos métodos.

- Ensayos de metalografía in situ

Son el uso de la microscopía óptica para evaluar la microestructura del material, obtener su grado de deterioro y propiedades mecánicas. La metalografía in situ o de campo se emplea cuando los componentes son muy grandes para trasladarlos a un laboratorio y no pueden ser seccionados o alterados. Es de utilidad en la industria petrolera, ya que determina la degradación micro estructural de los equipos y líneas de proceso expuestas a altas temperaturas. Con esto se prevé, graves incidentes industriales.

Ventajas:

- La técnica se puede aplicar en el centro de labores.
- La técnica puede ser utilizada como un monitor de la calidad de un componente.
- La técnica es no destructiva.

- La metalografía in situ es un medio para observar los cambios microestructurales en un componente.

- Ensayos de dureza

Es la evaluación de la resistencia de un material tras oponerse a la penetración de otro más duro. Para ello, se han desarrollado diferentes procedimientos, ensayos y formas del indentador. En algunos casos, se mide el diámetro de indentación (Dureza Brinell) o cualquier otra dimensión de la indentación (Dureza Vickers, Dureza Knoop) mientras que en otros, la profundidad de penetración (Dureza Rockwell). Todos estos ensayos varían de acuerdo con el material y la forma del indentador como también las cargas de las muestras a las cuales han sido sometidas. [ASTM 956 2012]

- Prueba hidrostática

Las pruebas hidrostáticas se encuentran incluidas en los ensayos no destructivos y en los de hermeticidad. Esta prueba es no destructiva ya que verifica la integridad física de una tubería o sistema en donde el agua es bombeada a una presión más alta que la de operación. Esta presión es mantenida por un tiempo establecido que varía según la longitud del tramo.

Esta prueba se aplica en recipientes que trabajan con presión y son de importancia para verificación de la calidad de las tuberías.

## 1.6 Metodología de Análisis API 579

La metodología que se explica a continuación evalúa las aptitudes para el servicio de recipientes a presión, tuberías y tanques diseñados, según normas ASME y API.

El API 579 capítulo 11 muestra los procedimientos para calificar la tubería que ha sufrido daño al estar expuestos al fuego. Se brinda pautas para calificar componentes a presión en contacto con fuego y calor radiante por incendio. Esta calificación propone a la industria la posibilidad de observar las condiciones de sus componentes a presión luego

de haber sufrido daños por incendios. Asimismo, sirve para saber si son aptos para volver a servicio en las mismas condiciones, o si necesitan diferentes presiones máximas de trabajo o deben ser descartados.

Por ello, si luego de haber realizado la metodología de análisis, la evaluación indica que el equipo a presión no es el óptimo para las condiciones de trabajo y/o diseño, se debe seguir uno de los siguientes métodos:

- a) Calcular una nueva máxima presión admisible de trabajo, MAWP (por sus siglas en inglés).
- b) Las secciones defectuosas del equipo deben ser reparadas o reemplazadas.
- c) El equipo debe ser retirado del servicio.

### **1.6.1 Aplicabilidad y limitaciones del procedimiento**

Este trabajo incluye los procedimientos que identifican y evalúan los componentes a presión expuestos a fuego durante un incendio o con trastornos por recalentamiento.

Los equipos presurizados cubiertos en esta parte incluyen a todos los componentes con límites de presión. Esto es, recipientes a presión, tuberías y trayectoria del armazón de los tanques de almacenamiento.

Los ensayos no destructivos que se usan siempre para la evaluación de daño por fuego son inspección visual, ensayo de dureza y metalografía. La prueba hidrostática que se realiza para comprobar la integridad de la tubería se aplica como prueba obligatoria según el código de fabricación del ASME para verificar la presión de trabajo.

La norma API 579 define un componente como cualquier parte que se ha diseñado y fabricado para un código o norma reconocida. Mientras que el equipo se define como un conjunto de componentes. Por lo tanto, la MAWP para el equipo es la MAWP más baja para cualquier componente del ensamblaje.

### 1.6.2 Datos requeridos

- **Datos originales de diseño del equipo**

Los datos de diseño de la tubería original deben reunirse para evaluar las aptitudes en el servicio del componente. La medida de los datos requeridos depende del mecanismo de daño y nivel de evaluación. En el ANEXO A, se detallan los requerimientos de datos.

- **Historial de mantenimiento y operaciones**

La obtención de los datos de mantenimiento de los componentes evaluados ayuda a una buena evolución, ya que muestra el historial de reparaciones, así como los ensayos y las pruebas realizadas. Asimismo, el registro de operaciones sirve para verificar la adecuación de las condiciones de trabajo. En el ANEXO B, se detallan diferentes requerimientos para el historial de mantenimiento y operaciones.

- **Medidas para una evaluación FFS**

### Evidencia de daño por fuego

La evidencia de daño por fuego puede ser recogida durante el curso de un incendio y después de su extinción. El objetivo de la recolección de pruebas es doble:

- Determina la razón del incendio.
- Determina la naturaleza y magnitud de los daños. Con ello se evalúa si el equipo puede volver a servir.

Como los incendios accidentales son eventos aleatorios, la recolección de datos es difícil. Sin embargo, los observadores pueden recoger hechos importantes sobre los

incendios que ayuden a determinar los límites de los daños potenciales. Los datos que debemos obtener para la evaluación son los siguientes:

- 1) Las temperaturas extremas a las que diversos componentes fueron sometidos.
- 2) La naturaleza del combustible.
- 3) La ubicación de la fuente de ignición.
- 4) El tiempo de exposición al fuego.
- 5) La velocidad de enfriamiento.

### 1.6.3 Determinar los niveles de exposición al calor

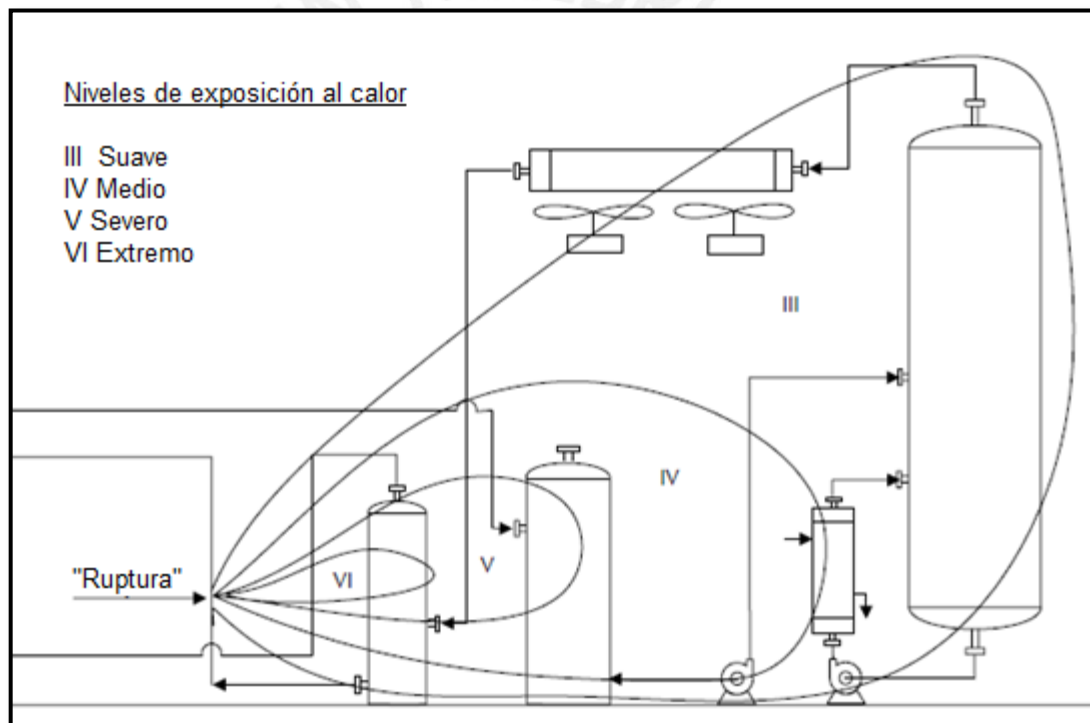
Los niveles de exposición al calor deben definirse para la tubería sujeta a daño por fuego. Para determinar las zonas de evaluación. Una descripción de los niveles de exposición al calor se proporciona en la **Tabla 1.5**.

**Tabla 1.5** Niveles de exposición al calor para la evaluación. [API 579-1/ASME FFS-1, 2007]

Nivel de exposición al calor	Descripción
I	Temperatura ambiente durante el incendio, sin exposición al fuego.
II	Ambiente a 65 °C (150 °F); exposición a humo y agua.
III	65°C a 205°C (150 °F a 400 °F); ligera exposición al calor.
IV	>205°C to 425 °C (>400 °F to 800 °F); moderada exposición al calor.
V	>425°C a 730°C (>800 °F a 1350 °F); fuerte exposición al calor.
VI	>730°C (>1350 °F); severa exposición al calor.

Los niveles de exposición al calor se establecen para un componente basado en la temperatura máxima de la exposición durante el incendio. Esta temperatura se instituye después de la extinción del fuego y se basa en las observaciones de campo y en la

degradación asociada a cada zona de exposición (región física expuesta a una cierta temperatura). Esta zona puede estar limitada a solo una parte de los equipos afectados. La asignación de las zonas o niveles afectados por el calor ayuda a identificar los equipos. Sin embargo, los componentes adyacentes podrían haber estado expuesto a diferentes niveles de calor y por lo tanto sufrido diversos daños (Ver **Figura 1.13**). Esto es consecuencia de que, uno de los componentes fue protegido o estaba a prueba de fuego, mientras que el otro no.

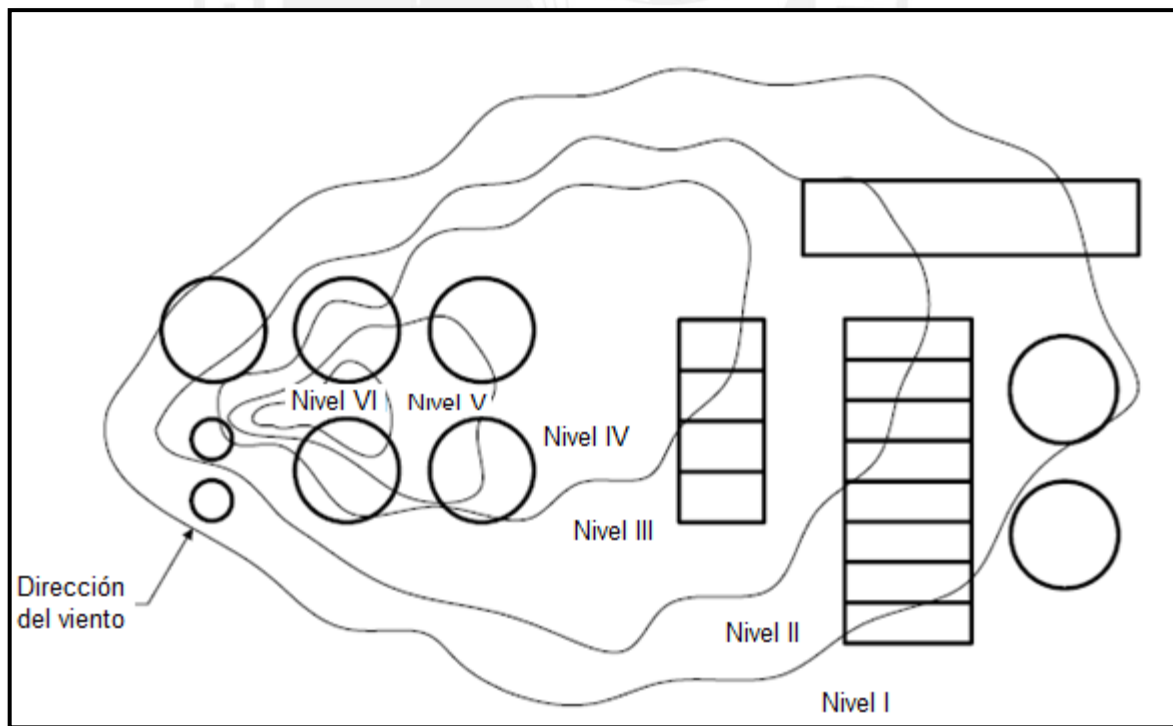


**Figura 1.13** Representación de equipos de planta expuestos a diferentes Niveles de calor. [API 579-1/ASME FFS-1, 2007]

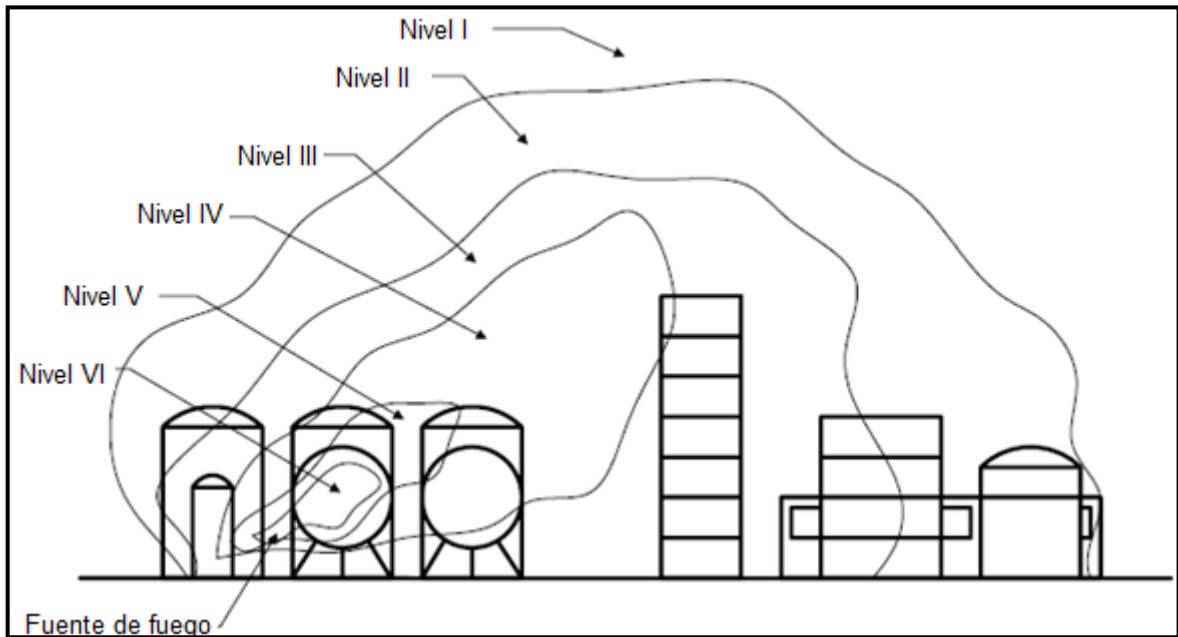
Una gama de indicadores de temperatura clasifican a los equipos dañados por el fuego en niveles de exposición al calor. La base de estas observaciones es el conocimiento de los cambios de estado en los materiales como, por ejemplo, los aumentos de temperatura. La oxidación de los polímeros y metales, la formación de incrustaciones en metales, puntos

de fusión, puntos de ebullición, y los cambios de fase de estado sólido se transforman en posibles indicadores de temperatura si su interpretación es correcta. El conocimiento de las formas de degradación y una visión general de las observaciones asociadas al daño con fuego deducen la temperatura a la que un componente fue expuesto.

En la evaluación se utilizara la zona expuesta a la temperatura más elevada en la tubería, a menos que haya una razón distinta para permitir evaluaciones separadas. Se asigna a la tubería el nivel de exposición al calor más grave si la información recogida durante la investigación es insuficiente para clasificar el componente. El daño causado por el fuego y calor extremo generalmente se extiende hacia fuera desde la fuente de combustible y hacia arriba (Ver las **Figuras 1.14 y 1.15**). Las excepciones son los casos de las fuentes de combustible de alta presión, donde un chorro de llama o soplete pueden ser altamente direccional.



**Figura 1.14** Patrón de incendio idealizado en equipos expuestos a zonas I hasta VI. (Vista de planta) [API 579-1/ASME FFS-1 2007]



**Figura 1.15** Patrón de incendio idealizado en equipos expuestos a zonas I hasta VI. (Elevación)  
[API 579-1/ASME FFS-1 2007]

Temperaturas asociadas al fuego también pueden determinarse usando las lecturas del instrumento tomadas durante el desarrollo del incendio. Las temperaturas se estiman en base a los colores de radiación de las superficies de acero durante el incendio. La **Tabla 1.6** muestra los colores de radiación correspondiente a una gama de diferentes temperaturas.

**Tabla 1.6** Temperatura del acero basado en el espectro de radiación visible. [API 579-1/ASME FFS-1 2007]

Color de radiación durante un incendio	Temperaturas aproximadas	
	(°C)	(°F)
Negro	540	1000
Rojo tenue oscuro	590	1100
Rojo cereza(oscuro)	650	1200
Rojo oscuro (medio)	700	1300
Rojo	760	1400
Rojo claro	815	1500
Anaranjado rojizo	870	1600
Anaranjado	930	1700



**Tabla 1.6** Temperatura del acero basado en el espectro de radiación visible.[API 579-1/ASME FFS-1 2007] (continuación)

Color de radiación durante un incendio	Temperaturas aproximadas	
	(°C)	(°F)
Anaranjado a pálido naranja limón	980	1800
Anaranjado a pálido naranja limón	1040	1900
Anaranjado a pálido naranja limón	1090	2000
Limón	1150	2100
Limón claro	1205	2200
Amarillo	1260	2300
Amarillo claro	1315	2400
Gris amarillento	1370	2500

#### 1.6.4 Datos y dimensiones para componentes expuestos al calor

Los siguientes datos y dimensiones deben considerarse para la asignación de una zona expuesta a un nivel de exposición al calor ya que pueden producir cambios en las propiedades mecánicas y cambios dimensionales:

- a) Las variaciones diametrales y circunferenciales de la tubería.
- b) Dimensiones de perfiles verticales y horizontales de la tubería.
- c) La rectitud de las secciones y de las tuberías.
- d) Orientación de la boquilla.
- e) Mediciones verticales con una plomada.
- f) Las pruebas de dureza del metal base.
- g) Extracción de cupones para ensayos mecánicos
- h) Mediciones del espesor de la pared de los componentes a presión que contiene.
- i) Reproducción metalográfica in-situ.

j) Técnicas de detección de grietas en superficie tales como partículas magnéticas y líquidos penetrantes.

k) Las condiciones de la superficie del equipo con respecto a la formación de costras, fusión, daños al revestimiento, condiciones del aislamiento, y la construcción y condiciones de protecciones ambientales.

### **1.6.5 Evaluación de las propiedades mecánicas de componentes expuestos a la exposición al calor**

a) Deben evaluarse los componentes susceptibles a cambios en las propiedades mecánicas durante la exposición a temperaturas, ya que estos determinan si el material ha conservado las propiedades de resistencia y tenacidad estipuladas en el código de construcción original

b) Los ensayos de dureza evalúan la pérdida de resistencia a la tracción en aceros al carbono y de baja aleación, y la pérdida o alcance de cambios en otras propiedades de los materiales tales como tenacidad y ductilidad.

c) La metalografía In-situ se debe realizar en las superficies de componentes con valores de dureza divergentes o donde se requiera una inevitable microestructura, tales como tener una microestructura normalizada en el equipo de acero al carbono para registrar los requisitos de tenacidad

d) La metalografía In-situ también evalúa si las réplicas se pueden obtener tanto de una zona de fuego afectada y una zona no afectada del mismo componente.

e) Si las lecturas de dureza y metalografía in situ o campo no son concluyentes, entonces se debe retirar un cupón del componente para pruebas destructivas y evaluaciones. La evaluación destructiva debe incluir ensayos de tracción, el examen metalográfico en la parte de la superficie incendiada, etc.

### 1.6.6 Niveles de evaluación

- **Evaluación de Nivel 1**

El procedimiento de evaluación de Nivel 1 es un criterio de revisión donde la aceptabilidad por un servicio continuado se basa en el nivel de exposición al calor y el material de construcción. Los criterios de revisión son conservadores y los cálculos no son necesarios para establecer la idoneidad para el servicio continuo.

El objetivo es reunir y documentar las observaciones y los datos utilizados que justifiquen la asignación de un nivel de calor a la tubería. Las tuberías que no necesiten una evaluación a fondo de las propiedades mecánicas, tienen que haber sido asignadas a un nivel de exposición de calor aceptable, ya que no tienen daños en sus propiedades mecánicas y desviaciones dimensionales.

Si la tubería no cumple con los requisitos de nivel 1 de evaluación, entonces el siguiente, o combinaciones de los mismos, pueden ser considerados:

- a) Reparación, reemplazo retiro de la tubería,
- b) Llevar a cabo una evaluación de Nivel 2 o Nivel 3
- c) Volver a evaluar el componente.

- **Evaluación de Nivel 2**

Las tuberías que no aprueben la evaluación de Nivel 1 pueden ser valoradas para el servicio continuo utilizando un nivel 2 de evaluación.

El procedimiento de evaluación de nivel 2 determina la integridad estructural de la tubería mediante la resistencia del componente dañado por el fuego. Los procedimientos de

evaluación incluyen métodos de evaluación de defectos y daños durante el fuego, por ejemplo, áreas adelgazadas localmente, defectos como grietas y distorsiones de pared, y un medio para volver a tasar los componentes. Esta evaluación se aplica normalmente a las tuberías sujetas a un nivel de exposición al calor V y/o superior, o cuando se observen cambios dimensionales durante una inspección visual.

El ensayo de dureza estimará la resistencia a la tracción aproximada de un componente expuesto al fuego. Posteriormente, dicha información se utiliza con los procedimientos para re-calcular y establecer una nueva máxima presión admisible de operación aceptable o MAWP por sus siglas en inglés (Maximum Allowable Working Pressure).

El siguiente procedimiento puede usarse en la evaluación de un componente a presión construido con acero al carbono o de baja aleación para la operación continua si se sospecha que las propiedades de resistencia mecánica han sido degradadas por la exposición al fuego.

PASO 1 - Si la tubería está fabricada de carbono y/o acero de baja aleación, realice una prueba de dureza en el componente y convierta el valor de la dureza que resulte en una resistencia a la tracción final estimada usando la Tabla del ANEXO C del presente trabajo. Evaluaciones adicionales de materiales pueden ser necesarias dependiendo de la gravedad de los daños y las necesidades de servicios futuros. Esta evaluación debe incluir metalografía in-situ de campo para determinar la condición de un componente.

PASO 2 - Determine un esfuerzo admisible de la tubería dañada por el fuego sobre la base de la resistencia a la tracción final estimada con el paso 1 y utilizando la ecuación (1). En esta ecuación, el parámetro  $C_{ism}$  es el margen en servicio, que puede ser tomada igual al margen de diseño utilizado en la resistencia a la tracción en el código de construcción original. Si este valor no se conoce, un valor de  $C_{ism} = 4$  se recomienda.

$$S_{afd} = \min \left[ \left\{ \left( \frac{S_{ht}}{C_{ism}} \right) \times \left( \frac{S_{aT}}{S_{aA}} \right) \right\}, \{S_{aT}\} \right] \quad (1)$$

$C_{ism}$ : Margen en servicio.

$S_{afd}$  : Esfuerzo admisible para un material dañado por fuego.

$S_{aA}$ : Esfuerzo admisible del código de diseño original o estándar a la temperatura ambiente cuando se toman las pruebas de dureza.

$S_{aT}$ : Esfuerzo admisible del código de diseño original o estándar a la temperatura de diseño especificada

$S_{uts}^{ht}$  : Resistencia final a la tracción basada en los resultados del ensayo de dureza.

PASO 3 - Realizar los cálculos necesarios de la MAWP utilizando el valor del esfuerzo admisible determinado en el paso 2.

PASO 4 - Si se presentan formas adicionales de daños, la MAWP se modifica mediante las partes aplicables del API 579.

PASO 5 - Evaluar daños por creep del componente utilizando la parte 10 del API 579. Normalmente los componentes sometidos a altas temperaturas durante un incendio no experimentan daños de creep significativos porque el tiempo a la temperatura es corto y los esfuerzos de creep y daños significativos asociados no se acumulan.

Si la tubería no cumple con los requisitos de nivel 2 de evaluación, entonces se pueden considerar las siguientes características:

- a) Reparar, reemplazar o retirar la tubería.
- d) Llevar a cabo una evaluación de Nivel 3.

- **Evaluación de Nivel 3**

Los procedimientos de evaluación de nivel 3 se emplean si resulta inaceptable la resistencia del material actual de la tubería establecida mediante los procedimientos de evaluación de nivel 2. La replicación o metalografía in-situ en campo, la eliminación y el

ensayo de muestras de material, y un análisis de esfuerzos se emplean en una evaluación de nivel 3.

Una evaluación nivel 3 de una tubería dañada por fuego se lleva a cabo si el componente no satisface los criterios de nivel 1 o 2. Una evaluación de Nivel 3 se realiza por las siguientes razones:

Si los cálculos MAWP asociados con una Evaluación de Nivel 2 no representan la condición actual del componente. Si el componente está severamente deformado o distorsiones de la pared se encuentran en una región de gran discontinuidad estructural, entonces se utiliza la técnica de análisis de esfuerzos mediante simulación. [API 579-1/ASME FFS-1 2007]



## 1.7 Referencias

- [1] ASME, «"SELECTING APPLICABLE B31 PIPING CODE SECTIONS",» Enero 2010. [En línea]. Available: <https://www.asme.org/>. [Último acceso: 4 Octubre 2014].
- [2] «"Corrosión intégranular",» [En línea]. Available: <http://inoxidable.com/>. [Último acceso: 10 abril 2015].
- [3] H. H. Uhlig, *The corrosion handbook*, New York: Wiley, 1948.
- [4] ASME, «Pressure Vessels and Piping Conference,» de *Volume 7: Operations, Applications and Components.*, Paris, 2013.
- [5] Xuedong Chen, Zhibin Ai, Zhichao Fan, Rongrong Li, Peng Xu y Huifeng Jiang, «Integrity Assessment of Pressure Vessels and Pipelines Under Fire Accident Environment,» de *Pressure Vessels and Piping Conference, Volume 1*, Toronto, 2012.
- [6] C. Fosca, R. Salas, E. Saenz y E. Otero, «Influencia de los tratamientos térmicos de solubilización y estabilización sobre la respuesta de corrosión intergranular del acero AISI-321.,» *Revista de Metalurgia*, vol. 4, 1993.
- [7] E. Saldaña, R. Lezcanom, F. Belzunce y C. Rodriguez, «Análisis de los Procesos de Fractura en Presencia de Hidrogeno en aceros resistentes al Medio Acido,» *Anales de Mecánica de la Fractura*, vol. 18, 2001.
- [8] C. bao-Iturbe y S. Gutierrez de Saiz- Solabarria, «Study of the Sulphide Stress Corrosion Crackin (SCCC) Resistance of API 5L GrB an X60 Pipeline Steels,» *Revista de Metalurgia*, vol. 5, 1993.
- [9] J. Hau, «"Assessment of Fire Damage to Pressure Vessels in a Refinery Unit",» *Corrosion : the journal of science and engineering corrosion*, vol. 49, nº 5, 1993.
- [10] H. G. M. R. Institute, «"Feasibility study reporto on disaster prevention and reduction key technology for storage and transportation of dangerous chemical products",» 2011.
- [11] H. G. M. R. Institute, «"Inspection and assessment report on burned equipment and pipelines for hydrocracking plant of a PetroChina branch company",» 2008.

- [12] H. G. M. R. Institute, «“Inspection and assessment report on burned equipment and pipelines for cracking plant of a PetroChina branch company”,» 2008.
- [13] H. G. M. R. Institute, «“Inspection and assessment report on burned equipment and pipelines for ethylene plant of a PetroChina company limited”,» 2005.
- [14] H. G. M. R. Institute, «“Inspection and assessment report on burned equipment and pipelines of a chemical company”,» 2008.





## CAPÍTULO 2

### 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

#### 2.1 Componente evaluado

Para desarrollar la metodología según la norma API 579 de daño por fuego a componentes a presión, se preparó una tubería de acero y se soldó a modo de tapas dos placas, para simular un incendio. Esto con el fin de evaluarlo en base con la metodología API 579.

El componente está compuesto por una tubería de acero ASTM A53 Grado B con una presión de diseño de 1180 psi y dos placas de acero de acero ASTM A36. El detalle se muestra en las **figuras 2.1 y 2.2**.

A continuación, la **tabla 2.1** muestra la composición química especificada de los aceros utilizados en el presente trabajo:

**Tabla 2.1** Composición química de los aceros utilizados.

Acero	%C	%Cr	%Ni	%Mn	%Mo	%Cu	%V	%Si	%P	%S
A53 Grado B	0.30	0.40	0.40	1.20	0.15	0.40	0.08	-	0.05	0.045
A36	0.25	-	-	0.8-1.2	-	0.20	-	0.40	0.03	0.03

Las dimensiones del componente evaluado son:

- a) Tubería :
  - Longitud: 1000 mm
  - Diámetro: 280 mm
  - Espesor: 9.87 mm
- b) Placa A:
  - Espesor: 38 mm
  - Lados: 500 mm
- c) Placa B:
  - Espesor: 38 mm
  - Lados 500mm

**Figura 2.1** Tubería usada para la evaluación.



**Figura 2.2** Tapa superior de la tubería.

## 2.2 Preparación y proceso de daño por fuego al componente

Para realizar el daño a la tubería, se utilizó un quemador de gas propano que controle el flujo de gas y por ende el calor entregado a la tubería, con este se puede alcanzar una temperatura de hasta 1020 °C. De esta forma, se evitó la preocupación de fundir la tubería. Asimismo, para las simulaciones se necesitaron dos balones de gas propano de 10 kg cada uno y un pirómetro que mida la temperatura sin tener un contacto con la superficie de la tubería.

Se realizaron dos simulaciones de daño por fuego, primero, se marcaron las ubicaciones donde se iba a controlar la temperatura de exposición al calor. Estas ubicaciones tendrían un contacto directo o recibirían el calor de la flama. En el primer daño (zona 1), se marcaron tres ubicaciones (X, Y, Z), y para el segundo daño (zona 2), se marcaron once ubicaciones (AI, AD, A, B1, B2, B3, B4, C1, C2, C3, C4) con el fin de controlar la temperatura y realizar otras evaluaciones de daño por fuego. En las **figuras 2.3 y 2.4** se observan las zonas y ubicaciones marcadas para los daños.

En la primera simulación (zona 1), y para calentar la tubería, se colocó la boquilla del quemador de gas propano a una distancia de 200 mm respecto a la tapa superior. Para la segunda simulación, se ubicó a una distancia de 500 mm respecto a la tapa superior. La distancia entre la boquilla del quemador y la tubería fue de 150 mm para las dos simulaciones. De esta forma la flama tuvo un contacto directo con el componente. En las **figuras 2.5 y 2.6** se muestran la preparación del ensayo y el daño de la tubería.

Los parámetros para la primera simulación fueron calentar la tubería en un rango de 600°C-650°C y por un lapso de dos horas. De esta manera, se simula una exposición de calor V en la ubicación de contacto directo con la flama. Para la segunda simulación, los parámetros fueron calentar la tubería a una temperatura mayor a 760°C y por un tiempo de cuatro horas, con el objetivo de simular una exposición de calor VI en la ubicación de contacto con la flama. El control de la temperatura en las dos simulaciones fue por medio del flujo de salida del gas. El enfriamiento para ambos ensayos fue al aire quieto. En las **Tablas 2.2 y 2.3** se muestran respectivamente el control de temperatura para la primera y segunda simulación de daño.



(a)

(b)

**Figura 2.3** Zonas marcadas para evaluar: (a) Primera zona de daño, (b) Segunda zona de daño

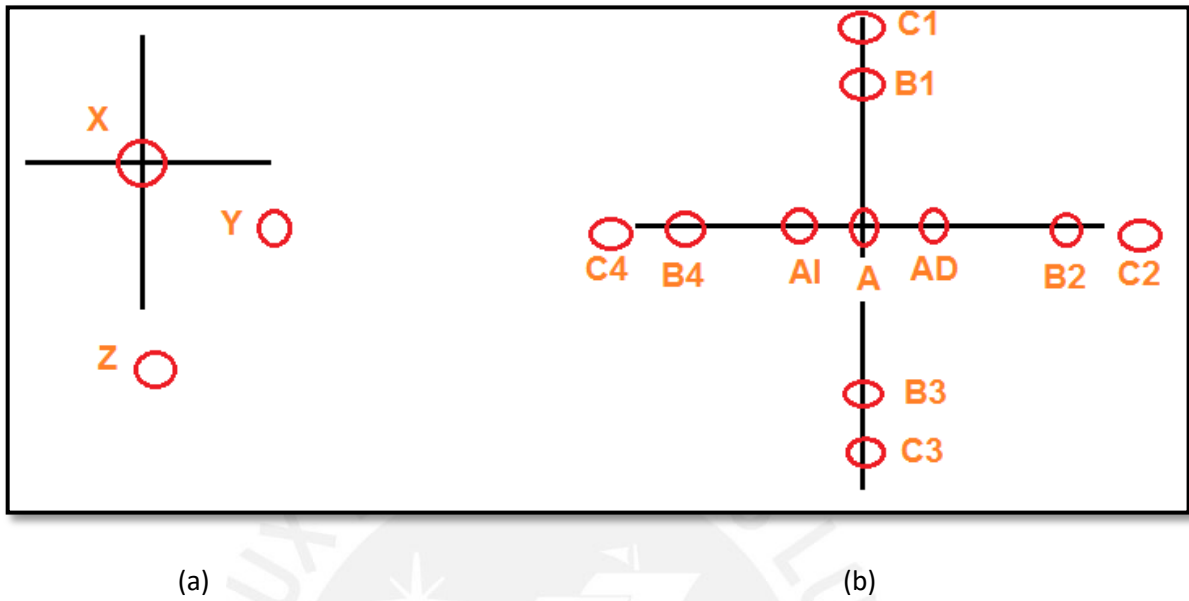


Figura 2.4 Identificación de las ubicaciones. (a) Primera zona de daño, (b) Segunda zona de daño



Figura 2.5 Preparación del ensayo de daño.



Figura 2.6 Daño por fuego a la tubería.

Tabla 2.2 Control de temperatura para la primera zona de daño.

Tiempo	Temperatura (°C)		
	Ubicación X	Ubicación Y	Ubicación Z
20 min	643	344	235
30 min	620	330	236
40 min	636	420	250
50 min	625	350	270
60 min	632	370	248
80 min	630	370	240
100 min	624	350	225
120 min	650	440	260

**Tabla 2.3** Control de temperaturas para la segunda zona de daño.

Tiempo	Temperatura (°C)								
	A	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
10 min	680	580	620	320	455	405	480	230	280
30 min	690	590	620	360	475	420	480	240	300
60 min	730	610	630	410	510	450	495	285	350
90 min	750	634	670	430	530	475	520	320	370
120 min	760	620	670	450	550	450	550	330	380
150 min	T > 760	590	645	490	550	460	546	340	385
180 min	T > 760	650	675	505	580	510	600	349	430
210 min	T > 760	650	680	500	600	500	600	350	400
240 min	T > 760	660	680	495	610	505	550	360	410

## 2.3 Procedimiento de evaluación del componente

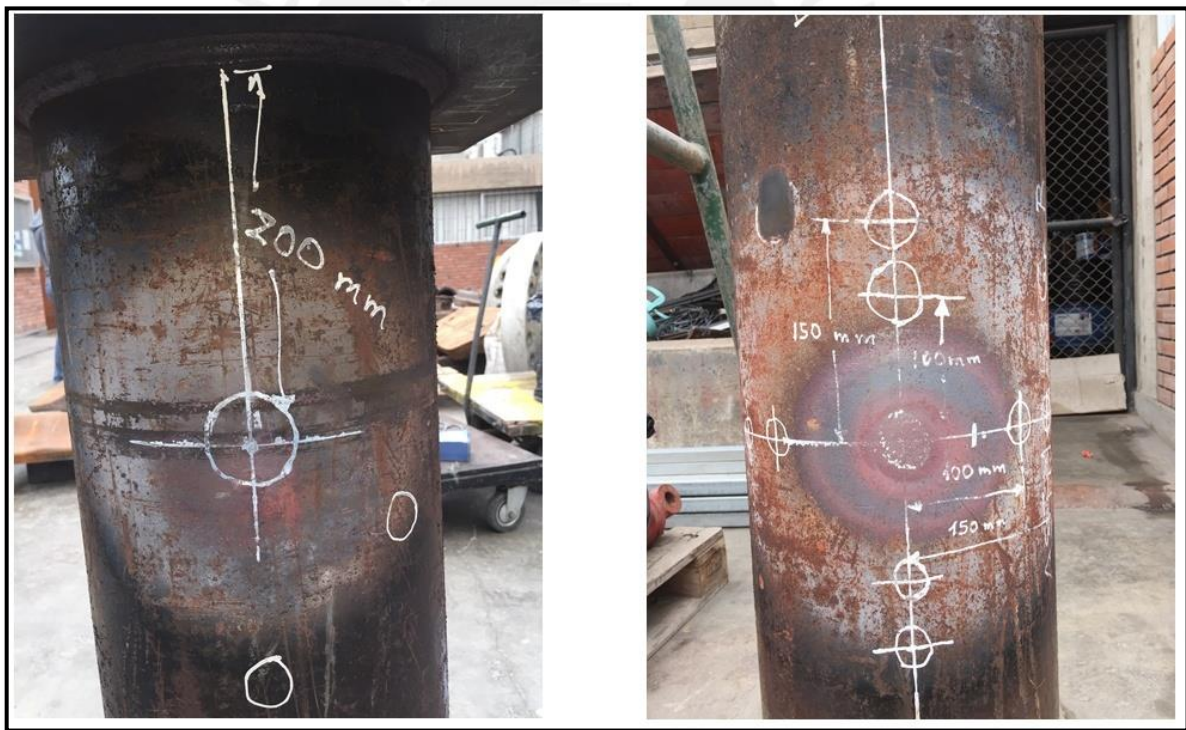
### 2.3.1 Inspección visual

Como ya se explicó en el punto 2.2 del presente capítulo, la tubería se dañó por el fuego. Luego se inspeccionó a nivel macro con el fin de detectar la presencia de defectos y/o fallas. A simple vista, se observó que antes del daño las tapas de las tuberías estaban cubiertas con óxido de hierro. Las observaciones después del daño son las siguientes:

- Se encontró desprendimiento de las cascarillas de óxido en las dos zonas donde la tubería contactó directamente con el fuego.
- La tubería no sufrió ningún cambio dimensional ni hundimientos.
- Se observa coloraciones circulares en las dos zonas dañadas, consecuencia de la fuente de ignición que estuvo cerca y fue altamente direccional al componente.

- d) Se puede apreciar una coloración oscura, alrededor de la zona quemada a 200 mm de la tapa superior, el cual ha sido producto del daño por fuego. Esta coloración indica el alcance de la flama.
- e) En la segunda zona dañada, la cual se encuentra a 500 mm de la tapa superior, se puede apreciar diferentes coloraciones en la tubería. Estas tonalidades durante el incendio ayudan a clasificar los niveles de exposición al calor en un incendio.

En la **Figura 2.7** se puede observar el estado de la tubería después de los daños.



(a)

(b)

**Figura 2.7** Estado de tuberías después del daño. (a) Primera zona de daño, (b) Segunda zona de daño



### 2.3.2 Pruebas de dureza

Para evaluar las propiedades mecánicas en la tubería, se tomaron medidas de dureza en las zonas afectadas por el calor. El ensayo se efectuó en campo por dos motivos: las dimensiones del componente y para no retirar material del equipo.

Las indentaciones se realizaron con un equipo de dureza portátil de marca Proceq modelo Equotip (Ver **Figura 2.8**). Las medidas registradas fueron tomadas en su equivalente Brinell. [ASTM E10, 2015]



**Figura 2.8** Durómetro portátil marca Proceq utilizado para las mediciones de dureza.

Para realizar la prueba, la superficie deberá estar libre de suciedad (aceite, marcas, escarillas de óxido), debido a que podría afectar lectura de datos. Por ello, primero se limpiaron las superficies con una amoladora (Ver **Figura 2.9**). La identificación de los valores se realizó con los procesos mostrados en la **Figura 2.4**. El ensayo de dureza se realizó de acuerdo con la norma ASTM A956, tomando cinco valores de dureza por cada zona (Ver **Figura 2.10**. [ASTM 956, 2012]



(a)

(b)

**Figura 2.9** Preparación de la superficie. (a) Limpieza con amoladora. (b) Superficie limpia.



**Figura 2.10** Ensayo de dureza en campo.

### 2.3.3 Metalografía

Estos ensayos caracterizan las ubicaciones afectadas por el calor. La metalografía realizada fue en campo, debido al tamaño del componente y con el fin de no seccionarlo (véase la **Figura 2.11**).

El procedimiento seguido para las ubicaciones evaluadas fue el siguiente:

- Se usó una amoladora para retirar la pintura y óxido de hierro de la tubería.
- Se pulió la superficie con lijas de grado 240, 320, 400 y 600 (siguiendo ese orden) para disminuir la rugosidad de la superficie.
- Se usó alcohol en la superficie para quitar la suciedad del desbaste.
- Luego se untó pasta de diamante de 6 micras y 1 micra para un mejor acabado superficial.
- Se volvió a limpiar la superficie con alcohol.
- A la superficie, se le aplicó el reactivo nital, compuesto de 98% alcohol y 2% ácido nítrico, por un lapso de tres minutos, dejando que la superficie se seque.
- Para revelar la microestructura a la superficie se le echó acetato de etilo con un gotero.
- Para copiar la microestructura, pegamos a la superficie la réplica de aluminio dejándola por un minuto y luego retirarla. (Ver **Figura 2.12**)

Para analizar las metalografías, se usó el microscopio del laboratorio de ingeniería de materiales (Ver **Figura 2.13**) marca Leica, modelo DFC450 C, el cual cuenta con aumentos de 50X, 100X, 200X, 500X Y 1000X.



(a)

(b)



(c)

(d)

**Figura 2.11** Procedimiento de la metalografía. (a) Pulido, (b) Ataque químico. (c) Revelado de la microestructura, (d) Pegado de la película.

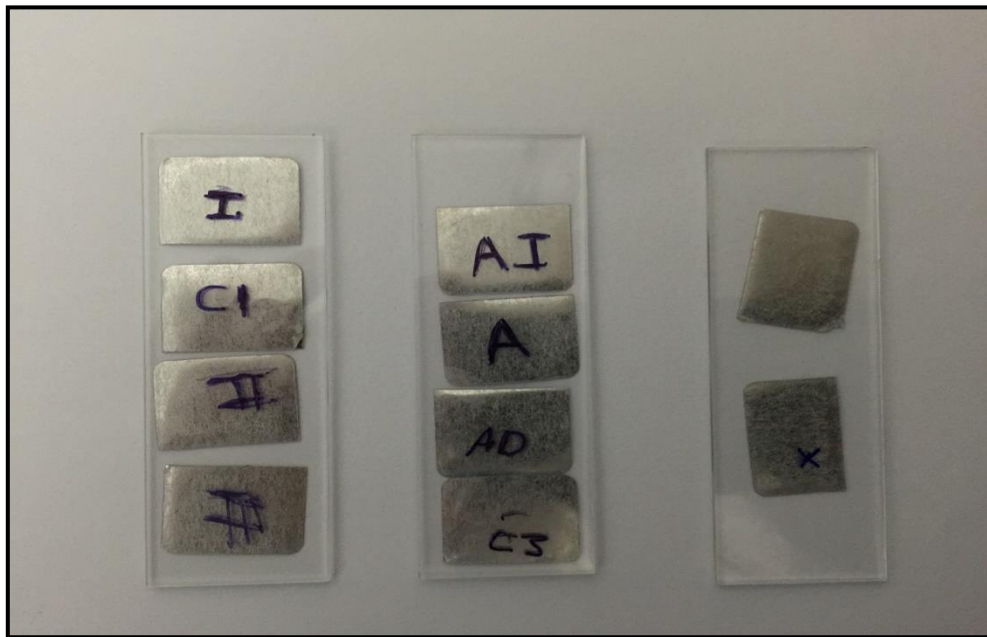


Figura 2.12 Metalografías obtenidas para el ensayo.

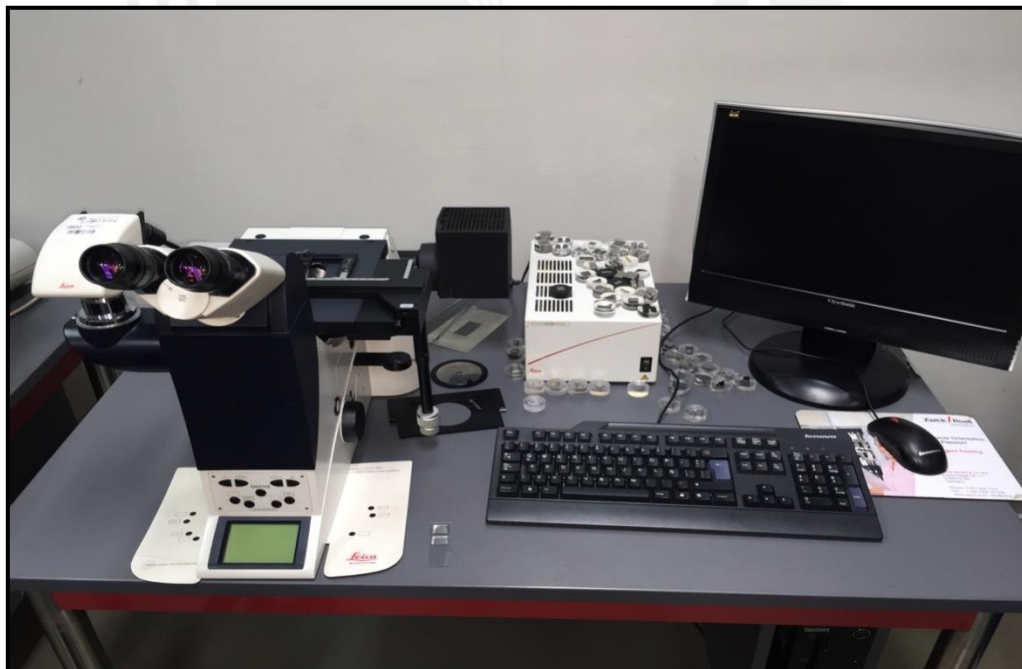


Figura 2.13 Microscopio marca Leica modelo DFC450.

### 2.3.4 Protocolo de prueba hidrostática

Antes de la puesta en operación de una tubería, se realiza la prueba de integridad, mediante una prueba hidrostática, por ello, para realizar este ensayo se realizó un protocolo de prueba según lo indicado en el ASME B31.3 Sec. 345.2, especificando el fluido a utilizarse, presión de prueba, procedimiento e instrumentos de medición a utilizar.

#### a) Fluido de prueba

El fluido es típicamente agua limpia, a no ser que produzca daños debido a la congelación o a los efectos adversos del agua sobre la tubería. En ese caso, se puede usar líquidos no tóxicos. Si el líquido es inflamable, su punto de inflamación no deberá ser menor de 49°C (120 °F), debiendo considerarse el ambiente de prueba.

No se realiza la prueba hidrostática cuando la temperatura ambiente sea menor de 0 °C. Se tendrá especial cuidado cuando la temperatura del metal sea inferior a 0°C, a fin de evitar congelamiento.

#### b) Presión de prueba

La presión de prueba hidrostática en cualquier punto del sistema de la tubería no debe ser inferior a 1.5 veces la presión de diseño.

La presión hidrostática máxima de prueba de un sistema, estará limitada por la presión máxima de prueba del componente más débil de dicho sistema.

#### c) Procedimiento

- a) Se limpia la tubería antes de la prueba, pasando agua o aire a presión, con el fin de eliminar tierra o material extraño.
- b) Se proveen desfuegos en el punto alto del sistema de tuberías que expulsen los bolsones de aire formados cuando la tubería está siendo llenada con el líquido de prueba.

- c) De ser el caso, se aíslan las partes que no estén sometidas a la prueba.
- d) La presión de prueba será aplicada mediante un método de bombeo, el cual se aísla del sistema hasta que quede dispuesto para la prueba. Se instala un manómetro en la descarga de la bomba para vigilar la presión del sistema. La bomba debe ser vigilada durante la prueba por una persona, quien la desconectara del sistema cuando suspenda dicha vigilancia.
- e) La presión deberá ser incrementada gradualmente hasta alcanzar el 50% de la presión de prueba, momento en el cual se inspecciona la tubería. Posteriormente, se continúa incrementando gradualmente la presión hasta llegar a la presión de prueba. En ese momento, se inspeccionan todas las tuberías.
- f) La presión de prueba se mantendrá durante cinco minutos antes de la inspección y un lapso suficientemente largo que permita la inspección completa del sistema a prueba.

#### **d) Instrumentos de medición**

Para realizar la prueba hidrostática en la tubería, se usa manómetros calibrados. El tamaño del dial del manómetro debe facilitar la lectura de la presión.

## CAPÍTULO 3

### 3. ANALISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 Inspección visual

##### Zonas de exposición al calor

El API 579 clasifica la exposición al calor en seis niveles (ver **Tabla 1.3**). En una evaluación de daño por fuego, existen diferentes indicadores de temperatura. Sin embargo, al tratarse de un caso práctico, se determinaron las temperaturas asociadas a las zonas con el fuego durante el daño con la ayuda de un pirometro. Ello resulta válido en una evaluación real durante un incendio.

La **Tabla 3.1** muestra la clasificación de las ubicaciones elegidas para un análisis posterior de las dos zonas dañadas:



**Tabla 3.1** Niveles de exposición al calor debido al daño.

Ubicaciones Evaluadas	Nivel de Exposición al Calor
A	VI
AD	VI
AI	VI
C1	IV
C3	IV
X	V
Y	IV
Z	IV

Se realizó una comprobación de las temperaturas tomadas durante el daño con las temperaturas asociadas a los colores que aparecieron durante el calentamiento. Esto se realizó con ayuda de la **Tabla 1.4**, la cual brinda una gama diferente de colores ligadas a la temperatura alcanzada en la zona.

En la primera zona de daño (Ver **Figura 3.1**), se observó una coloración entre rojo tenue y rojo cereza oscura, las cuales representan una temperatura máxima de 590°C y 650°C respectivamente, rodeado de una coloración negra ligada a una temperatura máxima de 540 °C. En general, la zona expuesta a más fuego se clasificaría en una zona de exposición al calor nivel V por la máxima temperatura registrada.

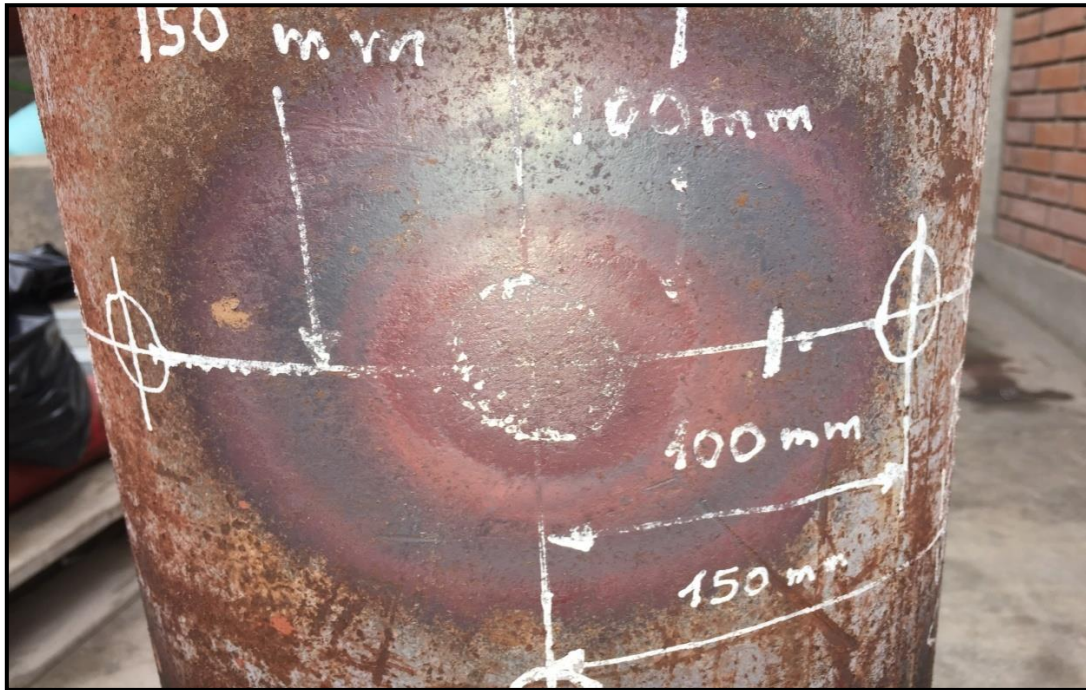
En la segunda zona de daño (Ver **Figura 3.2 y 3.3**), se observó en el centro una coloración roja clara correspondiente a una temperatura máxima de 815 °C. A esta zona, la rodea una coloración entre anaranjada rojiza y anaranjada que relaciona temperaturas máximas de 870 °C y 930 °C respectivamente. También, se aprecia que a esta zona la encierra una circunferencia roja medio oscura, la cual representa una temperatura de 650°C a 700°C. Toda la segunda zona se clasifica en una zona de exposición al calor nivel VI por tener una temperatura mayor de 730°C.



Figura 3.1 Zona del primer daño.



Figura 3.2 Coloración de la tubería durante el segundo daño.



**Figura 3.3** Zona del segundo daño después del fuego

### 3.2 Pruebas de dureza

El ensayo evalúa los cambios producidos en la dureza del material en las secciones afectadas por el calor. Las catorce ubicaciones tomadas en el ensayo se muestran en la **Figura 2.4**. Para cada ubicación, se tomaron cinco indentaciones.

Como parte del procedimiento, según el API 579, se debe tomar los valores de dureza incluso en ubicaciones que no hayan sido dañadas por el calor. Esto sirve para comparar los valores con las ubicaciones afectadas. En la **Tabla 3.2** se muestran los valores obtenidos en una zona sin daño. De este modo, se obtiene una dureza promedio de 109 HB.

**Tabla 3.2** Valores de dureza Brinell en una zona sin daño.

Ensayo de dureza Brinell		
Posición Extremo inferior		
Identificación	Indentación	Dureza HB
Zona sin daño	1	107
	2	109
	3	108
	4	112
	5	110
	6	115
	7	104
	8	110

**A. Zona de daño 1**

La simulación de daño 1 tuvo una exposición por fuego de dos horas, teniendo un nivel de exposición al calor de nivel V. En este caso, las zonas ensayadas no revelan diferencias apreciables debido al corto tiempo y baja temperatura de exposición al calor.

La **Tabla 3.3** resume los valores promedios de dureza en las tres zonas evaluadas.

La **Tabla 3.4** muestra los valores de dureza promedio obtenidos en cada zona.

- La dureza del metal en la zona Z con mayor temperatura registrada (600 °C~650°C) tiene una dureza de 109 HB.
- La dureza del metal en la zona Y y X con nivel de exposición al calor nivel V, tiene una dureza 114HB y 110 HB respectivamente.

**Tabla 3.3** Valores de dureza Brinell obtenidos de las indentaciones en diferentes ubicaciones.

Ensayo de daño 1		
Identificación	Indentación	Dureza HB
Ubicación X	1	105
	2	111
	3	109
	4	111
	5	111
Ubicación Y	1	112
	2	109
	3	114
	4	115
	5	121
Ubicación Z	1	109
	2	110
	3	112
	4	108
	5	111

**Tabla 3.4** Dureza promedio de las diferentes ubicaciones para una exposición al calor de 2 horas.

Ensayo de daño 1	
Identificación	Dureza promedio
Ubicación X	109
Ubicación Y	114
Ubicación Z	110

## B. Zona de daño 2

Los valores registrados corresponden al segundo daño por fuego con una duración de cuatro horas de exposición al calor. La **Tabla 3.5** resume los valores promedios tomados en diferentes ubicaciones. Se evaluó solo nueve ubicaciones, con la finalidad de comparar los valores, pero sin obviar la ubicación A por ser la más crítica.

**Tabla 3.5** Dureza promedio de las diferentes ubicaciones para una exposición al calor de 4 horas.

Ensayo de daño 2	
Identificación	Dureza promedio
Ubicación A	95
Ubicación AI	99
Ubicación AD	105
Ubicación B1	98
Ubicación B2	100
Ubicación B3	106
Ubicación C1	103
Ubicación C3	100
Ubicación C4	110

- En la ubicación A con un nivel de exposición de calor VI, se obtuvo una dureza de 95 HB, presentando una disminución notable respecto a una zona sin daño. Este valor representa la degradación de la perlita en la microestructura.
- Existe una tendencia a disminuir los valores de dureza en función al aumento de temperatura y tiempo de exposición.
- Se observan durezas de C1, C3, B3 y B2 pertenecientes a una exposición al calor nivel V, y con un ablandamiento similar, debido al calentamiento uniforme en esa zona.
- En la ubicación C4, la dureza es similar respecto a una zona sin daño. Esto se debe a la de exposición al calor nivel IV, ya que estas no afectan al acero.
- El valor de dureza en la ubicación AD, no varía a pesar de registrar una exposición al calor nivel VI. Se esperaba un valor similar a las ubicaciones A y AI.

Las **Tablas 3.6, 3.7 y 3.8** muestran los valores de dureza obtenidos en cada ubicación.

**Tabla 3.6** Valores de las ubicaciones A, AI y AD.

<b>Ensayo 2</b>		
<b>Identificación</b>	<b>Indentación</b>	<b>Dureza HB</b>
Ubicación A	1	96
	2	95
	3	94
	4	96
	5	95
Ubicación AI	1	97
	2	99
	3	100
	4	102
	5	99
Ubicación AD	1	104
	2	104
	3	107
	4	106
	5	105

**Tabla 3.7** Valores de las ubicaciones B1, B2 y B3.

<b>Ensayo 2</b>		
<b>Identificación</b>	<b>Indentación</b>	<b>Dureza HB</b>
Ubicación B1	1	98
	2	98
	3	100
	4	97
	5	99
Ubicación B2	1	98
	2	100
	3	102
	4	103
	5	99
Ubicación B3	1	105
	2	105
	3	108
	4	107
	5	106

**Tabla 3.8** Valores de las ubicaciones C1, C3 y C4.

Ensayo 2		
Identificación	Indentación	Dureza HB
Ubicación C1	1	102
	2	102
	3	104
	4	105
	5	103
Ubicación C3	1	103
	2	100
	3	100
	4	99
	5	100
Ubicación C4	1	111
	2	106
	3	112
	4	110
	5	111

### 3.3 Pruebas de metalografía

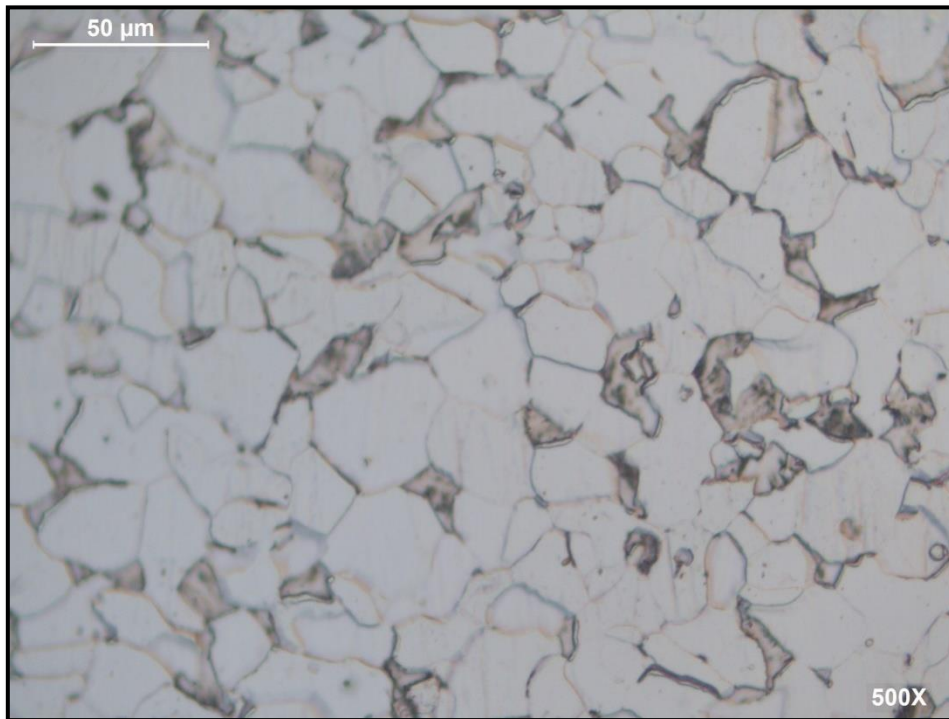
El material base de la tubería evaluada fue un ASTM A53 Grado B con microestructura ferrítico / perlítica.

La **Figura 3.4** muestra los granos de ferrita y perlita del material sin daño por fuego, puesto que son microestructuras compatibles con aceros de bajo carbono.

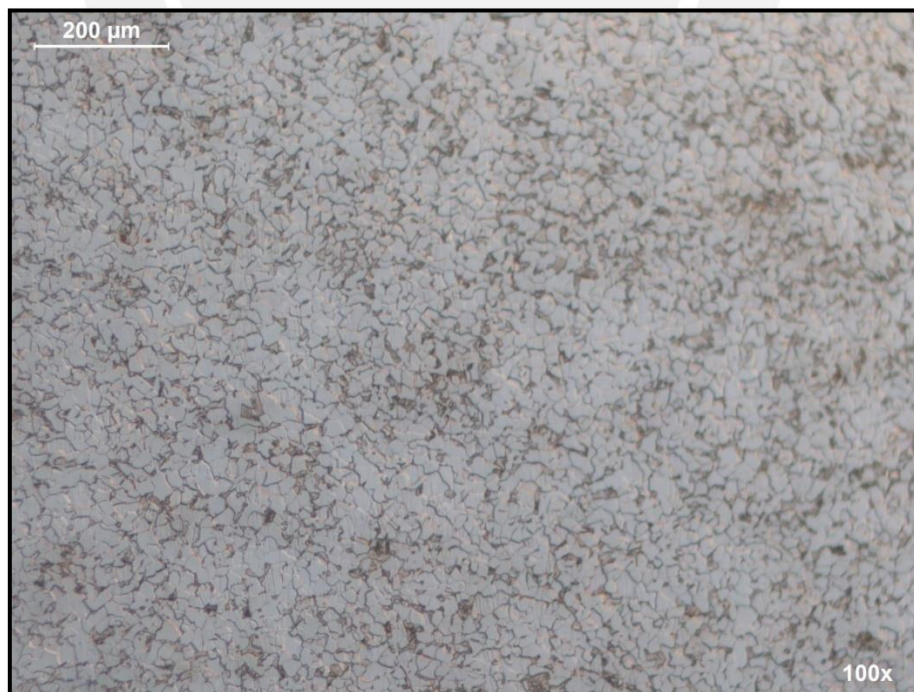
La determinación del tamaño de grano se hizo de acuerdo con la norma ASTM E112, observando un grano promedio con un tamaño N° 8, (Ver **Figura 3.5**).

Para determinar el nivel de daño de la microestructura y estimación restante de vida, se usó el procedimiento de *Neubauer assessment of microstructure*. [E. RECOMMENDATIONS, 2005] ,[B. Neubauer y U. Wedel, 2004 ]





**Figura 3.4** Fotomicrografía del componente en una zona no afectada por el calor. 500x



**Figura 3.5** Fotomicrografía del componente en una zona sin daño por fuego. 100x

### A. Metalografías del ensayo de daño 1

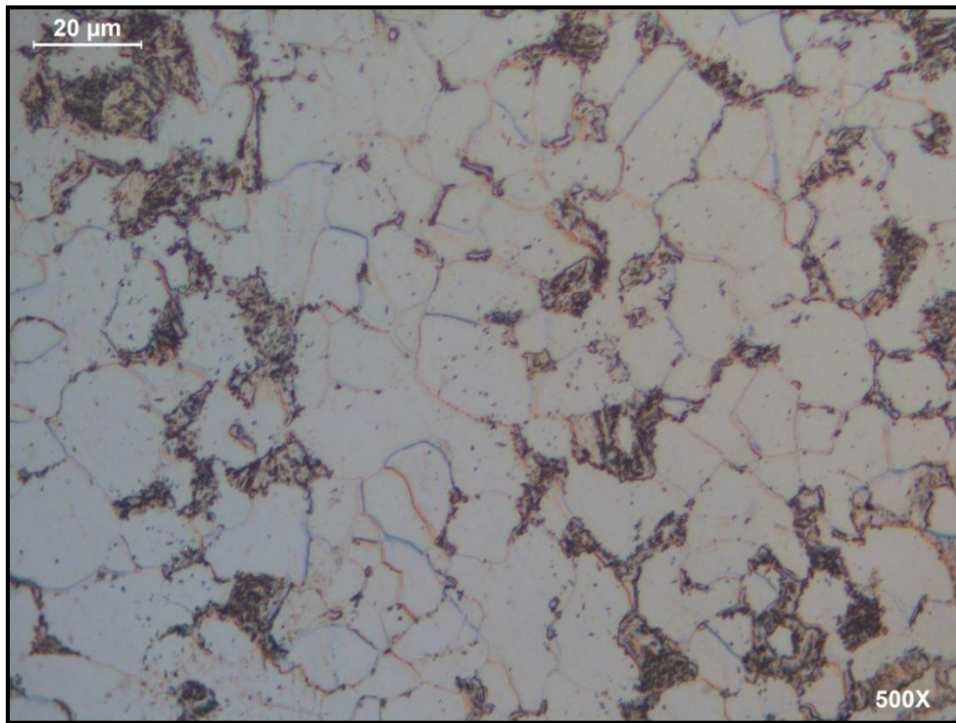
Como se mencionó, para el primer daño por fuego a la tubería, el tiempo de exposición al calor fue de dos horas. Para tal fin se tomó como referencia las tres ubicaciones donde se registraron temperaturas diferentes.

En la ubicación Z (ver **Figura 3.6**), se observa el inicio de daño a la microestructura reflejado en un incipiente inicio de globulización de la perlita. Además de una leve degradación de la perlita.

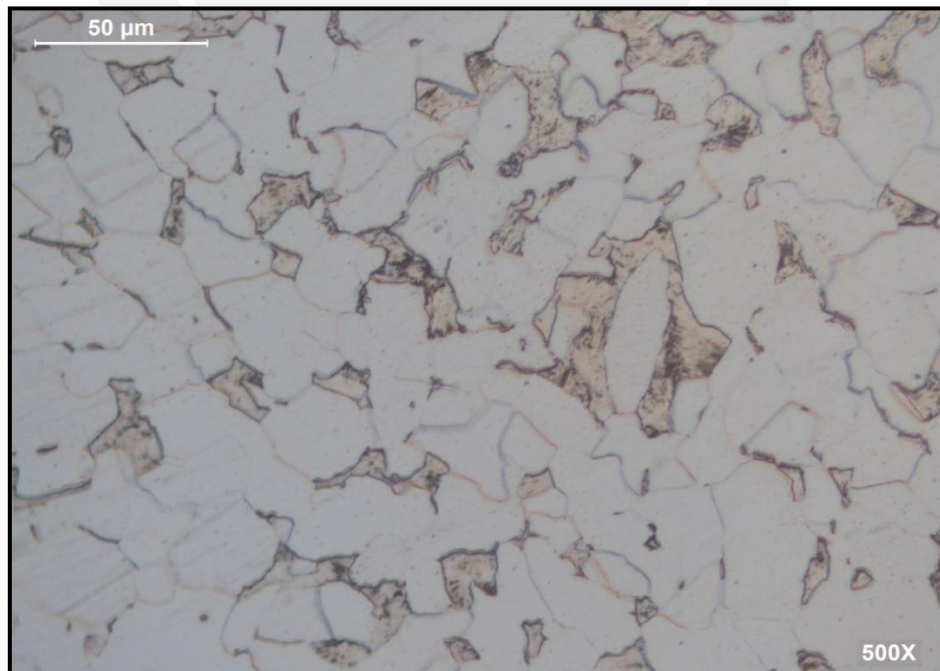
En la ubicación Y (ver **Figura 3.7**), se observa una orientación muy leve de los carburos hacia los límites de granos.

En la ubicación X (ver **Figura 3.8**), la cual registró una temperatura alrededor de 640 °C (la más alta de las zonas dañadas), se observa un cambio leve en la perlita, orientando los carburos a los límites de granos. Se clasifica la microestructura en base al Neubauer como un parámetro de daño 2. Con ello, se estima como mínimo tres años de servicio y un intervalo de tiempo normal para inspeccionar el componente en el caso de solo haber recibido este daño.

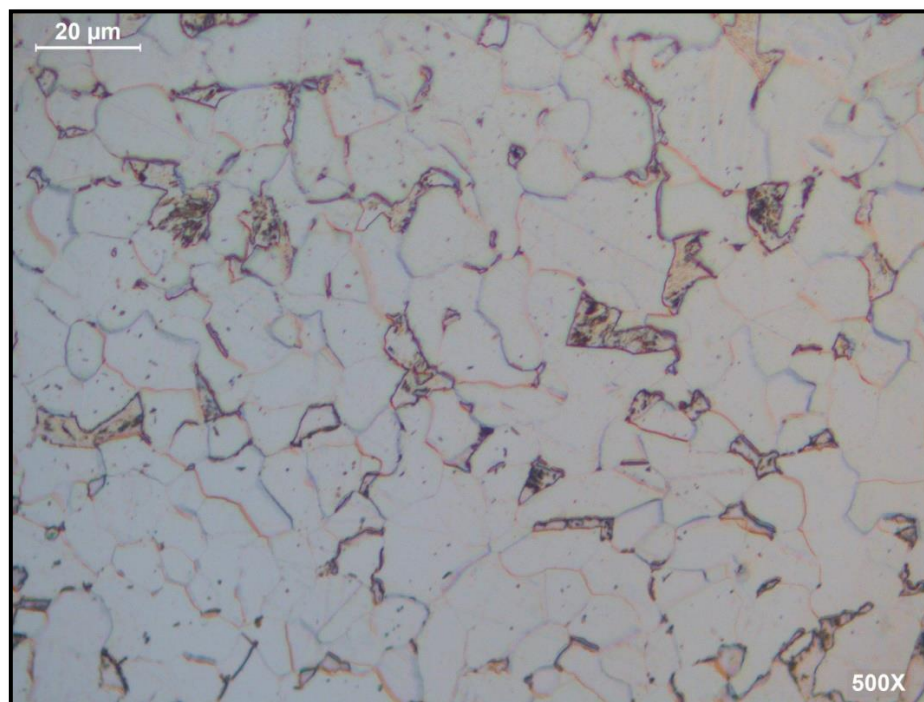
El tamaño de grano para las ubicaciones X, Y y Z, no varía. Esto se observa en las imágenes del anexo D.



**Figura 3.6** Fotomicrografía de la ubicación Z. 500x



**Figura 3.7** Fotomicrografía de la ubicación Y. 500x



**Figura 3.8** Fotomicrografía de la ubicación X.500x

### **B. Metalografías del ensayo de daño 2**

En el ensayo de daño 2, hubo una exposición al calor de cuatro horas. Aquí se tomó muestras de metalografía de las ubicaciones A, AD, AI, C1 Y C3.

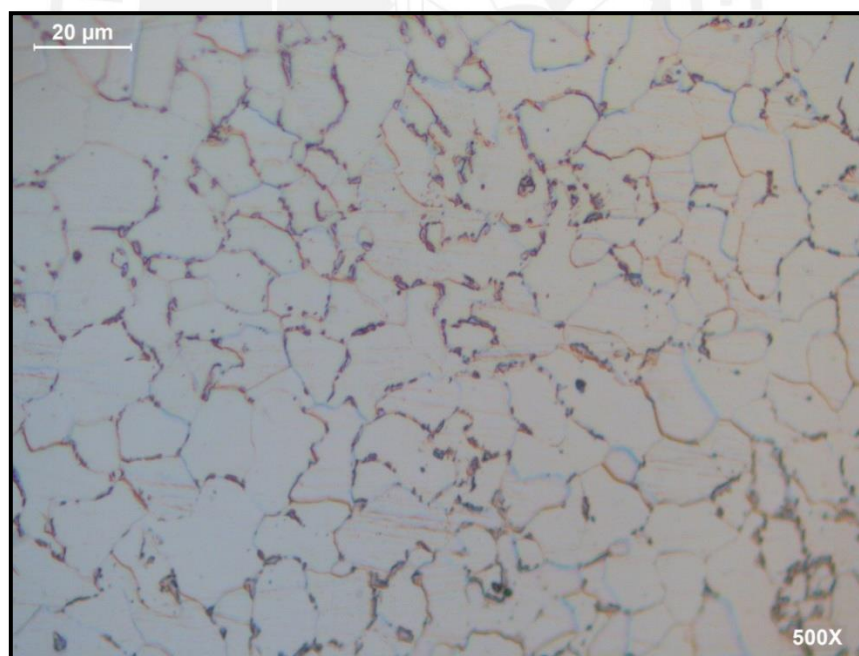
En condiciones de temperaturas mayores a 730°C (nivel de exposición al calor VI), con daño directo del fuego, se observa que el porcentaje de perlita ha disminuido en la microestructura a medida que la temperatura de exposición se incrementa, respecto a una zona sin daño. Esta disminución de perlita se refleja en las propiedades mecánicas del material. La **Tabla 3.5** muestra la disminución de la dureza (Ver **Figuras 3.9, 3.10, 3.11**).

En la ubicación A es la más afectada por el daño (ver **Figura 3.9**). Se observan carburos distribuidos homogéneamente, además de una separación de los límites de los granos, donde se encuentra la disminución más notable de perlita. Por las características mencionadas, y con base al Neubauer, se clasifica a la microestructura evaluada como un parámetro de daño 3; por lo que se estima desde un año a un año y medio de servicio.

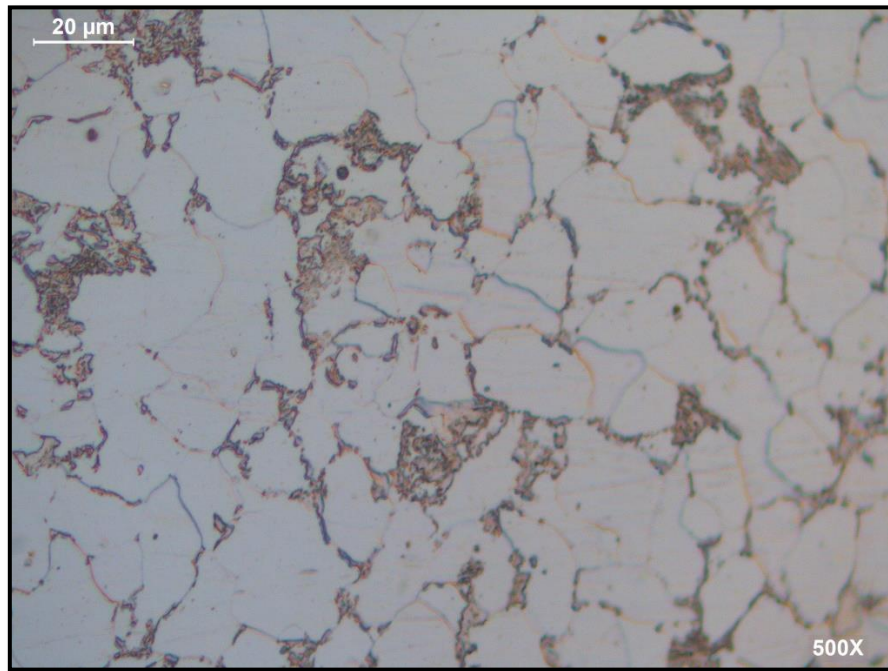
En las ubicaciones AD y AI (ver **Figuras 3.10 y 3.11**), se observa una leve cantidad de cavidades sobre los límites de granos. También un nivel intermedio de esferodización, en la cual la perlita es parcialmente globular. En la ubicación AI, se aprecia una disminución de la perlita respecto a la ubicación AD, lo cual se refleja en los valores de dureza 99 HB y 105 HB respectivamente.

En cuanto a la ubicación C1 (ver **Figura 3.12**), se observa una leve difusión de los carburos a las fronteras de grano, así como una fragmentación de la perlita. Respecto a la ubicación C3 (ver **Figura 3.13**), se observa una colonia uniforme de perlita, que no afecta la microestructura tras una exposición al calor nivel IV.

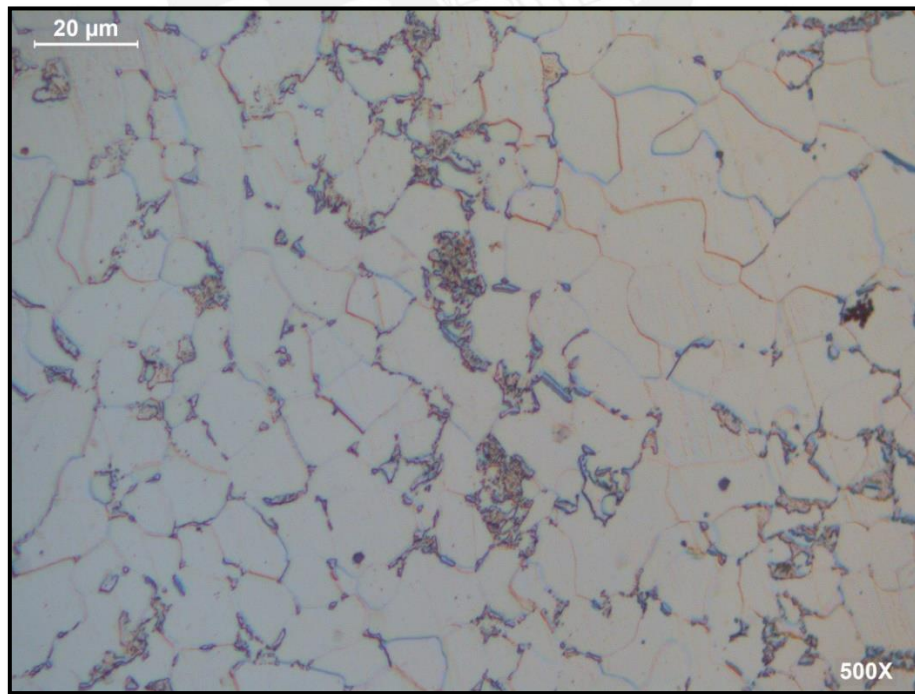
Las imágenes del anexo D muestran que no hubo crecimiento de grano en las ubicaciones A, AD, AI, C1 Y C3.



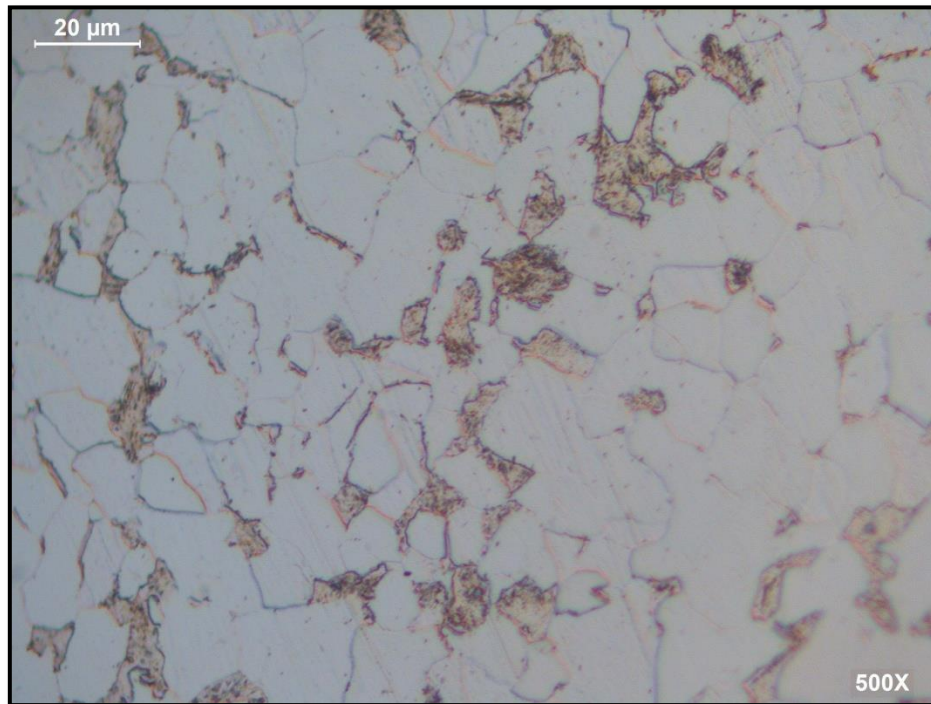
**Figura 3.9** Fotomicrografía de la ubicación A.500x



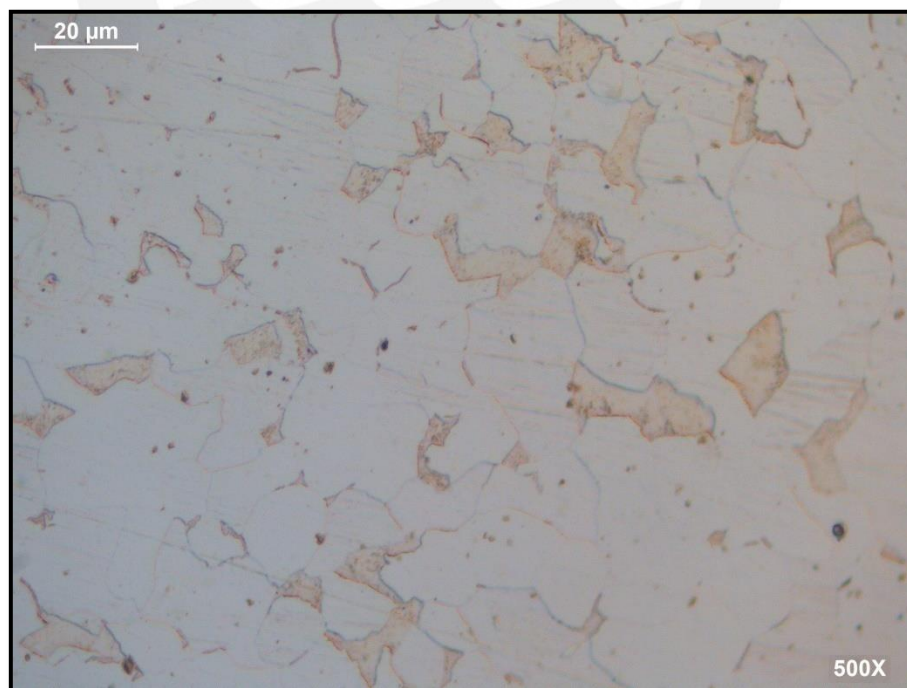
**Figura 3.10** Fotomicrografía de la ubicación AD.500x



**Figura 3.11** Fotomicrografía de la ubicación AI.500x



**Figura 3.12** Fotomicrografía de la ubicación C1.500x



**Figura 3.13** Fotomicrografía de la ubicación C3.500x

### 3.4 Cálculo de la nueva máxima presión de operación (MAWP)

#### Paso 1

En base a los resultados de la prueba de dureza, se analizó la zona más crítica, la cual obtuvo un valor de 95 HB. Usando la **Tabla 3.9**, se convirtió este valor a la resistencia de la tracción máxima.

**Tabla 3.9** Durezas equivalentes y resistencias a la tracción para aceros de bajo carbono. [API 579-1/ASME FFS-1 2007]

Dureza Brinell	Dureza Vickers	Resistencia a la tracción aproximada	
		(MPa)	(ksi)
143	150	490	71
133	140	455	66
124	130	427	62
114	120	393	57

Debido a que no existen valores para una dureza de 95 HB, se aproximó el valor mediante una extrapolación, ya que la curva formada es casi lineal.

$$95 \text{ HB} \rightarrow S_{uts}^{ht} = 323 \text{ Mpa} = 46.84 \text{ ksi}$$

#### Paso 2

Se determinó una tensión admisible de la tubería dañada en base a la siguiente ecuación:

$$S_{afd} = \min \left[ \left\{ \left( \frac{S_{uts}^{ht}}{C_{ism}} \right) \times \left( \frac{S_{aT}}{S_{aA}} \right) \right\}, \{S_{aT}\} \right] \quad (1)$$

En el caso de no conocer el factor de seguridad (margen de diseño), se emplea un  $C_{ism} = 4$ , valor recomendado por el API 579. Para la tubería evaluada por ser diseñada mediante el ASME B31.3 usamos un  $C_{ism} = 3$



El material utilizado es un ASTM A53 grado B, por ello, al ser un material utilizado para tuberías de proceso se puede aproximar que la temperatura de diseño al alrededor de 600 °F (315 °C). Teniendo en cuenta esto y usando el ASME B31.3 (tuberías de procesos) se pueden encontrar los siguientes valores:

$$S_{aA} : 20 \text{ ksi (Presión a la temperatura ambiente)}$$

$$S_{aT} : 17.3 \text{ ksi (Presión a la temperatura de diseño)}$$

$$S_{afd} = \min \left[ \left\{ \left( \frac{46.84}{3} \right) \times \left( \frac{17.3}{20} \right) \right\}, \{17.3\} \right]$$

$$S_{afd} = \min[\{13.50 \text{ ksi}\}, \{17.3 \text{ ksi}\}]$$

### Pasó 3

Se calculó la MAWP con el  $S_{afd}$  obtenido en el paso 2.

**Tabla 3.10** Coeficiente para determinar el espesor de tubería. [ASME B31, 2014]

Valores de $Y_{B31}$						
Materiales	Temperatura °C (°F)					
	≤ 482 (≤ 900)	510 (950)	538 (1000)	566 (1050)	593 (1100)	≥ 621 (≥ 1150)
Aceros ferriticos	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
Aceros austeniticos	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
Otros metales dúctiles	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Hierro fundido	0.4	---	---	---	---	---

a) Cálculo de la MAWP circunferencial

$$MAWP^c = \frac{2 \cdot S \cdot E (t_c - M \cdot A)}{D_o - 2 \cdot Y_{B31} (t_c - M \cdot A)}$$

$$S_{afd} = 13.5 \text{ ksi}$$

$$E = 1 \text{ (Tubería sin costura)}$$

$Y_{B31} = 0.4$  Este valor se escoge con la temperatura de diseño y material del acero en la **Tabla 3.10**.

$$D_o = 11.0 \text{ pulg}$$

$$t_c = t - \text{Perdida} - FCA$$

$$t = 0.365 \text{ pulg. Espesor nominal de la tubería suministrada.}$$

$$\text{Perdida de material} = 0$$

$$FCA = 0.0393 \text{ pulg (1mm)}$$

$$t_c = 0.365 - 0 - 0.0393 = 0.325 \text{ pulg}$$

$$MA = 0, \text{ La tubería no cuenta con zonas roscadas.}$$

$$MAWPC = \frac{2 \times 13500 \times 1(0.325 - 0)}{11 - 2 \times 0.4(0.325 - 0)} = 817 \text{ psi} = 5.63 \text{ Mpa}$$

b) Cálculo de la MAWP longitudinal

$$MAWPL = \frac{4 \cdot S \cdot E(t_c - t_{sl} - M \cdot A)}{D_o - 4 \cdot Y_{B31}(t_c - t_{sl} - M \cdot A)}$$

$$S_{afd} = 13.50 \text{ ksi}$$

$$E = 1 \text{ (Tubería sin costura)}$$

$Y_{B31} = 0.4$ , Este valor se escoge con la temperatura de diseño y material del acero en la **Tabla 3.10**.

$$D_o = 11.0 \text{ pulg}$$

$$t_c = 0.365 \text{ pulg}$$

$MA = 0$  , La tubería no cuenta con zonas roscadas.

$t_{sl} = 0.11$  Este valor se obtiene de la **Tabla 3.11** en función del diámetro nominal.

**Tabla 3.11** Espesor por defecto de cargas suplementarias en sistemas de tuberías. [API 574,2009]

$D_o(\text{pulg})$	Defecto por cargas suplementarias (pulg)
½ a 1	0.07
1 ½	0.07
2	0.07
3	0.08
4	0.09
6 a 18	0.11
20 a 24	0.12

$$MAWP^L = \frac{4 \times 13500 \times 1(0.325 - 0.11 - 0)}{11 - 4 \times 0.4(0.325 - 0.11 - 0)}$$

$$MAWP^L = 1089 \text{ psi} = 7.51 \text{ Mpa}$$

$$MAWP = \min[MAWP^C, MAWP^L]$$

$$MAWP = \min[817 \text{ psi} , 1089 \text{ psi}]$$

$$MAWP = 817 \text{ psi}$$

### 3.5 Prueba hidrostática

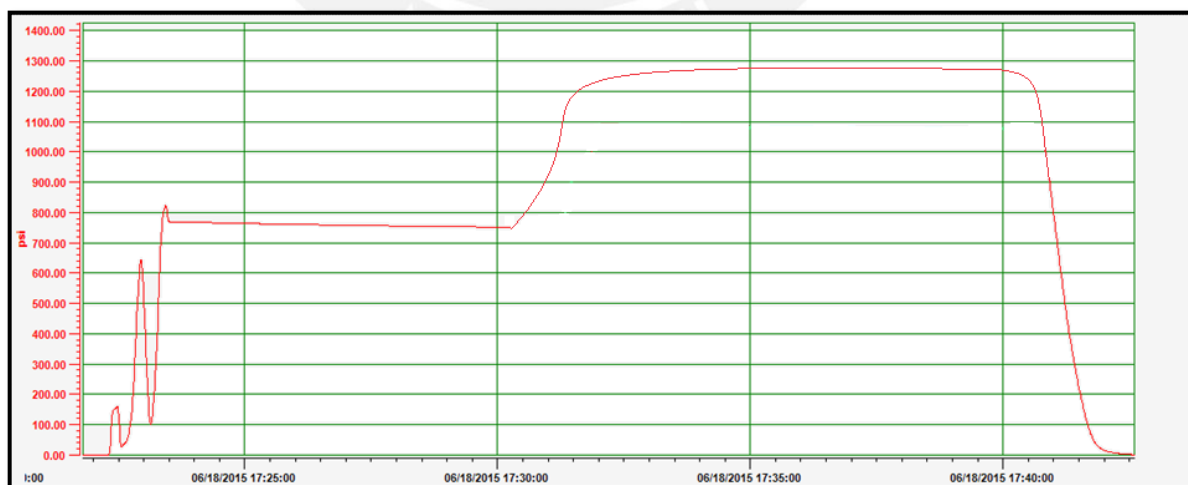
Con esta prueba se corrobora si la tubería puede operar después del daño con una nueva máxima presión de operación admisible.

En tal sentido, la nueva máxima presión de operación y presión de prueba según los cálculos realizados en el **Capítulo 3.4** son las siguientes:

**Nueva máxima presión de operación (MAWP) = 817 psi**

**Presión de prueba = 817 psi x 1.5 = 1225 psi**

Al realizarse la prueba hidrostática, se elevó la presión alrededor de 750 psi en dos minutos. Luego se mantuvo durante cinco minutos a esa presión, con una caída muy leve debido a que los hilos del roscado no eran compatibles con el tapón. Después, se subió la presión en un tiempo de dos minutos hasta llegar a una presión alrededor de 1280 psi, se mantuvo esa presión por un tiempo total de siete minutos. Finalmente se bajó la presión gradualmente hasta llegar a cero. (Ver **Figura 3.14**).



**Figura 3.14** Comportamiento de la presión en la tubería durante la prueba hidrostática.

## Conclusiones

- Se determinó que la tubería usada en el presente trabajo después de sufrir el daño por fuego, puede seguir trabajando, pero con una nueva máxima presión de operación de 817 psi.
- Los cambios microestructurales en la tubería evaluada brindan una relación para identificar los niveles de exposición al calor VI y V, debido a la notable disminución de la perlita; sin embargo, determinar los niveles de exposición al calor nivel IV, III, II y I, mediante los cambios de la microestructura, no es de utilidad práctica debido al poco cambio de la microestructura en temperaturas por debajo de los 600°C y cortos tiempos de exposición.
- En la tubería evaluada se puede concluir que para temperaturas por debajo de 730°C, con tiempo de exposición al fuego de dos horas y con un enfriamiento lento a temperatura ambiente, los cambios microestructurales en el acero de la tubería son muy leves y no hubo crecimiento del grano. Por lo tanto, los cambios en sus propiedades mecánicas no varían significativamente; no obstante, para exposiciones a temperaturas superiores a 730°C, por un tiempo de cuatro horas y enfriamiento lento a temperatura ambiente, no varió el tamaño del grano, pero los cambios en la microestructura son notorios por la degradación de la perlita, reflejando cambios en sus propiedades mecánicas tales como una caída de dureza de 115 HB a 95 HB.

## Bibliografía

**[API 579-1/ASME FFS-1, 2007]** American Petroleum Institute, API Fitness-for-Service API 579-1/ASME FFS-1, API, 2007.

**[ASME B31, 2014]** ASME, Process piping : ASME code for pressure piping, B31 : an American National Standard., New York: ASME, 2014.

**[ASME, 2012]** ASME, Pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids : ASME code for pressure piping, B31 an American National Standard., New York: ASME, 2012.

**[API 570, 2009]** American Petroleum Institute, Piping inspection code API 570, Washington DC: API, 2009.

**[API 574, 2009]** American Petroleum Institute, Inspection practice for piping system components API 570, Washington DC: API, 2009.

**[ASTM 956, 2012]** ASTM, «A 956 Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products,» ASTM, 2012.

**[ASTM 165, 2012]** ASTM, «Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry,» ASTM, 2012.

**[ASTM E10, 2015]** ASTM «Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials,» ASTM, 2015.

**[B. Neubauer y U. Wedel, 2004 ]** B. Neubauer y U. Wedel, «Restlife estimation of creeping components by means of replicas,» Rheinisch - Westalischer Technischer Überwachungsverein, Essen, West Germany, 2004.

**[E. RECOMMENDATIONS, 2005]** E. RECOMMENDATIONS, Residual life assesment and microestructure, Piacenza: ECCC, 2005.

**[Fosca, 2003]** Fosca Pastor, Carlos, Introducción a la metalurgia de la soldadura, Lima: PUCP, 2003

[H. H. Uhlig, 1948] H. H. Uhlig, The corrosion handbook, New York: Wiley, 1948.

[Xuedong Chen, 2012] Xuedong Chen, Zhibin Ai, Zhichao Fan, Rongrong Li, Peng Xu y Huifeng Jiang, «Integrity Assessment of Pressure Vessels and Pipelines Under Fire Accident Environment,» de *Pressure Vessels and Piping Conference, Volume 1*, Toronto, 2012.

