



---

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

## ESTUDIO DE LOS MÉTODOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS IMPLEMENTADOS PARA LA INSPECCIÓN DE TUBERÍA DE PERFORACIÓN EN LA INDUSTRIA PETROLERA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO PETROLERO**

PRESENTA:

PAREDES GASPAR DAVID ALBERTO

DIRECTOR: ING. JOSE AGUSTÍN VELAZCO ESQUIVEL

MÉXICO, D.F. CIUDAD UNIVERSITARIA 2014



*A mí Padre Dios, verdadero, único y fiel amor:*

*...Escudo de mi socorro y espada de mi triunfo...*

DEUTERONOMIO 33:29

*A mí hermosa y amada madre:*

*...Muchas mujeres hicieron el bien,  
mas tú sobrepasas a todas...*

PROVERBIOS 31:29

*Agradecimientos escolares:*

*A la UNAM y a la Facultad de Ingeniería por su buena,  
generosa e inigualable educación.*

*A mis sinodales y director, por su tiempo, dedicación y  
buena voluntad para la realización de este trabajo.*

---

**ESTUDIO DE LOS MÉTODOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS  
IMPLEMENTADOS PARA LA INSPECCIÓN DE TUBERÍA DE PERFORACIÓN EN  
LA INDUSTRIA PETROLERA**

	Pág.
Introducción	13

**CAPÍTULO 1**

**TUBERÍA DE PERFORACIÓN, DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN. CONCEPTOS  
BÁSICOS DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN**

1.1. DEFINICION Y USOS DE LA TUBERIA DE PERFORACION.	15
1.2. OPERACIÓN.	
1.3. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE UNA TUBERÍA DE PERFORACIÓN.	
1.4. FABRICACIÓN DE LA TUBERIA DE PERFORACION.	18
1.5. CONOCIMIENTOS BÁSICOS PARA MEDIR TUB. DE PERFORACIÓN.	19
1.6. CALIBRACIÓN DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN.	
1.7. ENROSQUE DE TUBERÍA.	20
1.8. CARACTERÍSTICAS Y MANEJO DE LA TUBERÍA PESADA (HW) Y LASTRABARRENAS.	21
1.8.1. TUBERÍA PESADA.	
1.8.2. LASTRABARRENAS.	23
1.9. CAUSAS MÁS COMUNES DE FALLAS EN TUBERÍA.	
1.10. DEFECTOS EN LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN USADA.	24

**CAPÍTULO 2****PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES Y PRINCIPALES ESFUERZOS  
A LOS QUE SE ENCUENTRA SOMETIDA LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN**

2.1. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.	27
2.1.1. LÍMITE ELÁSTICO Y PUNTO DE CEDENCIA.	
2.1.2. DUCTILIDAD Y MÓDULO DE ELASTICIDAD.	30
2.1.3. PRUEBAS DE DUREZA.	31
2.1.4. ELIPSE DE ESFUERZOS BIAXIALES.	32
2.2. ANÁLISIS DE ESFUERZOS A QUE SOMETEN LAS TUBERÍAS PORTENSIÓN, COLAPSO Y TORSIÓN.	33
2.2.1. TENSIÓN.	34
2.2.2. COLAPSO.	
2.2.3. TORSIÓN.	36

**CAPÍTULO 3****MATERIALES METÁLICOS. FUNDAMENTOS, PROPIEDADES FÍSICAS,  
MECÁNICAS Y CORROSIÓN. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS  
DESTRUCTIVOS**

3.1. ACEROS AL CARBONO.	38
3.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.	41
3.3. CORROSIÓN.	51
3.4. FRACTURAS.	57
3.5. CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS; UNA PROPIEDAD INHERENTE A LA ESTRUCTURA CRISTALINA.	61
3.6. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DESTRUCTIVOS.	63

**CAPÍTULO 4****MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN**

4.1. PRUEBA DE TENSIÓN.	71
4.2. PRUEBA DE TORSIÓN.	83
4.3. PRUEBA DE COMPRESIÓN.	89
4.4. PRUEBA DE DUREZA.	92
4.5. NORMATIVIDAD A.S.T.M. Y A.P.I. APLICADA EN EL ANÁLISIS DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN.	100

**CAPÍTULO 5****INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS Y PRINCIPIOS BÁSICOS SOBRE INSPECCIÓN VISUAL APLICADA A LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN**

5.1. INTRODUCCIÓN A LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.	128
5.1.1. APLICACIONES.	
5.1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS END SEGÚN EL ALCANCE DEL MÉTODO.	
5.1.3. MÉTODOS DE INSPECCIÓN DE LA INTEGRIDAD O DE HERMETICIDAD.	129
5.1.4. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS MÉTODOS DE LOS END.	130
5.1.5. BENEFICIOS DE LOS END EN MANTENIMIENTO.	
5.1.6. RAZONES PARA SELECCIONAR UN MÉTODO DE END.	131
5.1.7. PROCEDIMIENTOS PARA INSPECCIÓN DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN.	
5.1.8. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS.	
5.1.9. ESQUEMA GENERAL DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN.	132
5.1.10. CERTIFICACIÓN Y CALIFICACIÓN DEL PERSONAL.	133

5.1.11. EQUIPO DE SEGURIDAD INDUSTRIAL.	134
5.1.12. PROGRAMA DE INSPECCIÓN.	135
5.1.13. CATEGORÍAS DE SERVICIO PARA TUBERÍAS.	
5.2. INSPECCIÓN VISUAL.	
5.2.1. REQUISITOS DE LA INSPECCIÓN VISUAL.	136
5.2.2. APLICACIONES.	
5.2.3. VENTAJAS GENERALES DE LA INSPECCIÓN VISUAL.	137
5.2.4. LIMITACIONES GENERALES DE LA INSPECCIÓN VISUAL.	
5.3. INSPECCIÓN VISUAL DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN.	
5.3.1. EQUIPO NECESARIO EN ESTE PROCEDIMIENTO.	
5.3.2. PREPARACIÓN DE LA TUBERÍA A INSPECCIONAR.	
5.3.3. PROCEDIMIENTO Y CRITERIO DE ACEPTACIÓN.	138
5.4. INSPECCIÓN VISUAL DE LAS UNIONES (TOOL JOINTS).	139
5.4.1. EQUIPO NECESARIO PARA LA INSPECCIÓN VISUAL DE UNIONES.	
5.4.2. PREPARACIÓN DE LAS UNIONES.	140
5.4.3. PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN.	
5.4.4. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN Y/O RECHAZO.	141
5.5. CALIBRACIÓN DEL DIÁMETRO EXTERNO DEL CUERPO DEL TUBO (O.D GAUGE).	144
5.5.1. EQUIPO A UTILIZAR EN LA CALIBRACIÓN DEL DIÁMETRO EXTERNO DEL TUBO.	
5.5.2. CALIBRACIÓN DEL INSTRUMENTO.	
5.5.3. PREPARACIÓN DE LA TUBERÍA PARA LA CALIBRACIÓN DEL DIÁMETRO EXTERNO DEL TUBO.	145
5.5.4. PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN.	
5.5.5. CRITERIO DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO.	



**CAPÍTULO 6****MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS**

<u>6.1. MÉTODO DE INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES.</u>	147
6.1.1. REQUISITOS DE LA INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES	
6.1.2. ETAPAS DEL MÉTODO DE INSPECCIÓN.	
6.1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS LÍQUIDOS PENETRANTES.	148
6.1.4. APLICACIONES.	
6.1.5. VENTAJAS GENERALES DE LOS LÍQUIDOS PENETRANTES.	149
6.1.6. LIMITACIONES GENERALES DE LOS LÍQUIDOS PENETRANTES.	
6.1.7. ALCANCE.	
6.1.8. PROCEDIMIENTO DE LA INSPECCION POR LIQUIDOS PENETRANTES	
6.1.9. TIPOS DE PENETRANTES USADOS EN LOS METODOS DE INSPECCION POR LIQUIDOS PENETRANTES.	150
6.1.10. PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE.	152
6.1.11. SECADO DESPUÉS DE PREPARACIÓN.	
6.1.12. EXAMINACIÓN Y TÉCNICAS PARA TEMPERATURAS ESTÁNDAR.	
6.1.13. APLICACIÓN DE PENETRANTE.	153
6.1.14. REMOCIÓN DE EXCESO DE PENETRANTE.	
6.1.15. SECADO DESPUÉS DE LA REMOCIÓN DEL EXCESO DE PENETRANTE.	
6.1.16. APLICACION DEL REVELADOR.	154
6.1.17. TIEMPO DE REVELADO.	155
6.1.18. REQUISITOS DE ILUMINACION.	
6.1.19. METODOS DE EVALUACION.	156
6.1.20. EVALUACIÓN.	157
6.1.21. REGISTRO DE LAS INDICACIONES.	
6.1.22. REPORTE DE RESULTADOS.	
<u>6.2. MÉTODO DE INSPECCIÓN POR PARTICULAS MAGNÉTICAS.</u>	158

---

6.2.1. ELEMENTOS BASICOS DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO.	
6.2.1.2. PERMEABILIDAD MAGNETICA.	159
6.2.2. HISTÉRESIS MAGNETICA.	160
6.2.3. RETENTIVIDAD.	
6.2.4. PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN.	
6.2.5. VENTAJAS DE LAS PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.	161
6.2.6. LIMITACIONES DE LAS PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.	
6.2.7. PREPARACIÓN DE LA PIEZA.	
6.2.8. PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE A INSPECCIONAR.	
6.2.9. LIMPIEZA PREVIA A LA INSPECCIÓN.	162
6.2.10. MÉTODOS DE LIMPIEZA.	
6.2.11. PRECAUCIONES CON RESPECTO A LA PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE.	163
6.2.12. SELECCION DEL METODO O TECNICA.	164
6.2.13. REQUISITOS DE LA INSPECCIÓN POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.	
6.2.14. CORRIENTE DE MAGNETIZACIÓN.	165
6.2.15 TÉCNICAS DE MAGNETIZACIÓN.	
6.2.16. MAGNETIZACIÓN LINEAL.	166
6.2.17. MAGNETIZACIÓN INDIRECTA POR MEDIO DE BOBINA.	
6.2.18. MAGNETIZACIÓN CIRCULAR.	167
6.2.19. MÉTODO CONTINUO.	
6.2.20. MÉTODO RESIDUAL.	
6.2.21. DESMAGNETIZACIÓN.	168
6.2.22. APLICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS.	
6.2.23. TIPO DE PARTÍCULAS.	
6.2.24. COLOR DE LAS PARTÍCULAS.	169

6.2.25. INSPECCIÓN CON PARTÍCULAS MAGNÉTICAS EN ÁREA DE CUÑAS Y UPSETS.	
6.2.26. EQUIPO NECESARIO PARA LA INSPECCIÓN.	
6.2.27. PREPARACIÓN DE LA TUBERÍA.	170
6.2.28. PROCEDIMIENTOS DE INSPECCIÓN.	
6.2.29. INSPECCIÓN CON PARTÍCULAS MAGNÉTICAS HÚMEDAS (BLACK LIGHT).	
6.2.30. EQUIPO NECESARIO PARA LA INSPECCIÓN CON PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.	171
6.2.31. PREPARACIÓN DE LAS CONEXIONES.	172
6.2.32. PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN CON LUZ NEGRA.	173
6.2.33. CRITERIO DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO.	
6.2.34. DISCONTINUIDADES INHERENTES QUE RESPONDEN AL MÉTODO DE INSPECCIÓN POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.	174
<u>6.3. MÉTODO DE INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO.</u>	175
6.3.1. PRINCIPIOS FÍSICOS.	176
6.3.2. TIPOS DE ONDA.	178
6.3.3. ONDAS LONGITUDINALES O DE COMPRESIÓN.	179
6.3.4. ONDAS TRANSVERSALES O DE CORTE.	180
6.3.5. ONDAS DE SUPERFICIE O DE RAYLEIGH.	181
6.3.6. ONDAS DE PLACA O DE LAMB.	
6.3.7. COMPORTAMIENTO DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS EN SUPERFICIES LÍMITES Y USO DE ACOPLANTES.	182
6.3.8. INDEPENDENCIA PERPENDICULAR O NORMAL.	183
6.3.9. INCIDENCIA ANGULAR.	
6.3.10. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL HAZ ULTRASÓNICO.	185
6.3.11. CAMPO MUERTO.	186

6.3.12. CAMPO CERCANO O ZONA DE FRESNEL.	187
6.3.13. SENSIBILIDAD.	
6.3.14. RESOLUCIÓN.	188
6.3.15. FRECUENCIA CENTRAL.	
6.3.16. ATENUACIÓN DEL HAZ.	
6.3.17. EQUIPO UTILIZADO EN LA INSPECCION POR ULTRASONIDO.	190
6.3.18. TRANSDUCTORES.	
6.3.19. MATERIALES PIEZOÉLECTRICOS.	192
6.3.20. EL PALPADOR.	193
6.3.21. COMPONENTES DE UN PALPADOR.	194
6.3.22. CLASIFICACIÓN DE LOS PALPADORES. EXISTEN DIFERENTES FORMAS DE CLASIFICAR LOS PALPADORES.	
6.3.23. PALPADOR DE BANDA ANCHA.	195
6.3.24. DESCRIPCIÓN Y FUNCIÓN DE LOS CONTROLES EXISTENTES EN LOS EQUIPOS COMERCIALES DE ULTRASONIDO.	
6.3.25. SUMINISTRADOR DE ENERGÍA.	
6.3.26. CIRCUITO DE RELOJ O CONTADOR DE TIEMPO.	196
6.3.27. CIRCUITO TRANSMISOR.	197
6.3.28. CIRCUITO RECEPTOR.	
6.3.29. BLOQUES DE CALIBRACIÓN.	198
6.3.30. BLOQUES DE CALIBRACIÓN ESPECIALES.	199
6.3.31. DETECCIÓN DE DISCONTINUIDADES.	200
6.3.32. SENSIBILIDAD.	201
6.3.33. INDICACIÓN.	
6.3.34. DISCONTINUIDAD.	202
6.3.35. DEFECTO.	
6.3.36. REQUISITOS DE LA INSPECCIÓN POR ULTRA. INDUSTRIAL.	203

6.3.37. SELECCIÓN DEL PALPADOR Y DEL CABLE COAXIAL A SER EMPLEADOS.	
6.3.38. APLICACIONES.	
6.3.39. VENTAJAS DEL ULTRASONIDO INDUSTRIAL.	204
6.3.40. LIMITACIONES DEL ULTRASONIDO INDUSTRIAL.	
6.3.41. INSPECCIÓN DE ESPESORES DE PARED CON ULTRASONIDO.	205
6.3.42. EQUIPO NECESARIO PARA LA INSPECCIÓN ULTRASÓNICA DE ESPESORES DE PARED.	
6.3.43. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO.	206
6.3.44. VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DEL EQUIPO.	207
6.3.45. PREPARACIÓN DE LA TUBERÍA PARA LAS MEDICIONES ULTRASÓNICAS.	208
6.3.46. PROCEDIMIENTO PARA LAS LECTURAS CON ULTRASONIDO.	
6.3.47. CRITERIO DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO.	209

## CAPÍTULO 7

### ANÁLISIS DE CÓDIGOS, NORMAS Y PROCEDIMIENTOS GENERALES UTILIZADOS EN TRABAJOS DE INSPECCIÓN DE TUBERÍA DE PERFORACIÓN

7.1. GENERALIDADES	211
7.1.1. DEFINICIONES	
7.1.2. CLASIFICACIÓN DE LAS NORMAS	213
7.2. NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES	214
7.2.1. NORMAS ASTM	
7.2.2. NORMAS API	
7.2.3. NORMAS ASNT	217
7.3. NORMAS DE INSPECCIÓN EN END	
7.4. ANÁLISIS DE NORMAS, ESPECIFICACIONES Y RECOMENDACIONES.	218

---

7.4.1. ANÁLISIS DE LA ESPECIFICACIÓN API 5D	
7.4.2. ANÁLISIS DE LA RECOMENDACIÓN PRÁCTICA API RP 5A5	219
7.4.3 ANÁLISIS DE LA RECOMENDACIÓN PRÁCTICA API RP 7 G	220
7.4.4. ANÁLISIS DE LA NORMA ASTM E-709	
7.4.5. ANÁLISIS DE LA RECOMENDACIÓN PRÁCTICA ASNT SNT-TC-1 <sup>a</sup>	221
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>223</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>224</b>

## INTRODUCCIÓN

La industria petrolera nacional, como pilar en la economía del país requiere que sus procedimientos, equipos, materiales y personal sean de la máxima calidad posible, asegurando el cumplimiento de los objetivos planteados y alcanzando la mayor eficiencia durante los procesos productivos.

Por estas razones un paso importante en cualquier proceso del sector petrolero nacional e internacional es la inspección técnica, cuya ejecución está orientada para revisar el estado mecánico, funcionalidad, características de los materiales y equipos utilizados a diario, logrando determinar la vida útil o la toma de decisiones para el mantenimiento preventivo o correctivo según sea el caso.

En la extensa gama de materiales y equipos que son sometidos a inspección técnica se encuentran los elementos tubulares, mejor conocidos como tubería y que son empleados durante la perforación, cementación y producción de un pozo petrolero; por esta razón se debe de emplear una apropiada inspección de estos y desarrollarla bajo los parámetros establecidos, destacando que de esta manera se evitan problemas operativos, de seguridad y ecológicos que vemos reflejados en costos.

La inspección de tubulares se realiza de manera destructiva y no destructiva, es decir, afectando y sin afectar las propiedades mecánicas de los materiales inspeccionados y garantizando que estos cumplirán sus funciones de igual manera antes y después de la inspección.

El presente proyecto pretende dar al lector un conocimiento de los principios, equipos y procedimientos de inspección destructiva y no destructiva aplicada a la tubería de perforación petrolera, la cual se llega a dañar dentro del pozo debido a los esfuerzos a que se encuentra sometida y a factores como: presión, temperatura y fricción; dado la importancia de esta tubería se ha elaborado a partir de normas nacionales e internacionales que son utilizadas actualmente, que rigen los parámetros y controles de calidad para aprobar o no el tubular inspeccionado.

# CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LATUBERÍA DE PERFORACIÓN

## CAPÍTULO 1

### TUBERÍA DE PERFORACIÓN, DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN



# CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LATUBERÍA DE PERFORACIÓN

## 1.1. DEFINICION Y USOS DE LA TUBERIA DE PERFORACION.

La tubería de perforación es una barra circular de acero sin costura exterior y hueca en el centro, utilizada para llevar a cabo diversos trabajos durante la operación de perforación, transmitiendo la rotación desde la mesa rotaria hasta la barrena en el fondo y conduciendo dentro de ella el fluido que ayudara a mantener las presiones de formación y a estabilizar el pozo. Generalmente se le conoce como tubería de trabajo o drill pipe, cuya longitud oscila entre los 9 metros; están provistas de extremos con roscas especiales cónicas llamadas uniones, la de rosca exterior se denomina macho o “pin” y la de rosca interior caja o “box”; las uniones de algunas tuberías están cubiertas con material duro llamado bandas de metal duro.

## 1.2. OPERACIÓN.

Las tuberías de perforación trabajan como elementos de la sarta de perforación, las cuales se juntan por medio de conexiones, permitiendo alcanzar la longitud necesaria para perforar hasta la profundidad final del pozo; todo este arreglo gira junto con la flecha o “Kelly”, la cual es la encargada de transmitir el movimiento a la sarta y esta a su vez a la barrena (herramienta de corte).

Con el fin de lubricar la barrena y de conducir hacia la superficie los recortes causados por la perforación se utiliza el fluido de perforación (cumpliendo diversas características tixotrópicas y reológicas), el cual es bombeado hacia abajo por el interior de la tubería.

En un pozo profundo, la parte superior de la tubería de perforación está sometida a considerable tensión durante el proceso de perforación, debido a que la mayor parte del peso de la tubería se sostiene desde la torre.

## 1.3. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE UNA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

Tubo de perforación.- Es una envolvente cilíndrica que tiene una longitud determinada, con diámetro exterior, diámetro interior, recalcados, conexión caja piñón, diámetro exterior de junta, espesor de pared y marca de identificación.



**Tubería de Perforación.**

## CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LATUBERÍA DE PERFORACIÓN

A continuación describiremos brevemente éstos componentes:

Longitud.- es la medida que tiene el tubo de la caja del piñón.

La tubería de perforación se suministra en el siguiente rango API de longitud:

- Rango 1 de (7.5 a 8.5 metros).
- Rango 2 de (8.5 a 9.5 metros).
- Rango 3 de (9.5 a 10.5 metros).

Diámetro exterior.- Es la medida que tiene el cuerpo del tubo en su parte externa, pasando de un extremo al otro y por el punto imaginario llamado centro.

Diámetro interior.- Es la medida del diámetro dentro de un tubo de perforación.

Recalcado.- Es la parte más gruesa del tubo y provee una superficie de contacto satisfactoria para la soldadura de las juntas. Este recalcado permite un factor de seguridad adecuado en el área soldada para proveer resistencia mecánica y otras consideraciones metalúrgicas. La junta es también hecha con un cuello soldado, para asegurar una superficie de contacto considerable durante la soldadura.

Conexión caja-piñón.- Es el punto donde se realiza el enlace de la caja de un tubo con el piñón de otro tubo.

Diámetro exterior de la junta.- Es la medida que resulta de la unión de la caja con el piñón de un tubo de perforación.

Espesor de pared.- Es el grosor (área transversal) que tiene la pared de un tubo de perforación.

Marca de identificación.- La información referente al grado y el peso de la tubería de perforación se graba en una ranura colocada en la base del piñón; excepto en la tubería grado E-75, ya que en ésta la marca de identificación se encuentra en el piñón.

Nota.- Este marcaje se realiza en la compañía donde se fabrica la tubería, y por ningún motivo el personal de perforación podrá alterar o marcar otro tipo de datos en la tubería.

La clasificación que el API en las tuberías de trabajo en función a su desgaste es la siguiente:

**a.- Clase nueva.-** Es la tubería que conserva sus propiedades o que ha sufrido como máximo un desgaste exterior uniforme del 12% en el cuerpo del tubo.

## CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LATUBERÍA DE PERFORACIÓN

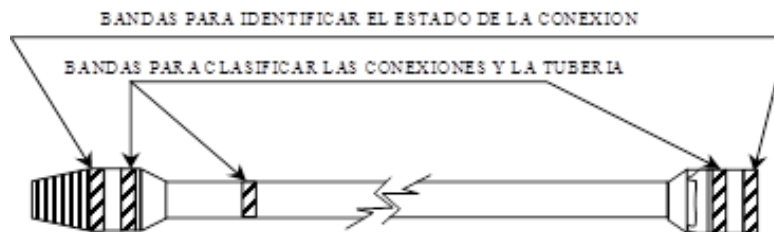
**b.- Clase Premium.-** Las tuberías que se clasifican en esta categoría son aquellas que han sufrido como máximo un desgaste exterior uniforme del 12 al 20%

**c.- Clase 2.-** en esta clasificación se ubican las tuberías que han perdido entre el 12.5 y el 20% del área de acero del cuerpo del tubo en forma excéntrica; y además en algún punto el espesor de pared es del 65% del espesor original como máximo; esta condición se toma como base para evaluar la capacidad de resistencia de la tubería de esta clase. A la presión interna, colapso y torsión.

**d.- Clase 3.-** cuando una tubería se desgasta del 20 al 37.5% del área del acero original en forma excéntrica cae en esta clasificación.

En la siguiente tabla se indican los grados utilizados en la tubería de perforación, el número indicara su resistencia a la tensión en miles de unidades de libras por pulgada cuadrada.

<b>CÓDIGO DE GRADOS.</b>			
<b>GRADO ESTÁNDAR</b>		<b>GRADO DE ALTO ESFUERZO</b>	
<b>GRADO</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>GRADO</b>	<b>SÍMBOLO</b>
N-80	N	X-95	X
E-75	E	G-105	G
C-75	C	P-110	P
		S-135	S
		V-150	V



**Identificación de las bandas.**

## CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LATUBERÍA DE PERFORACIÓN

CÓDIGO DE COLORES PARA IDENTIFICAR TUBERÍA DE TRABAJO Y SU CONEXIÓN.			
CLASIFICACIÓN DE LA TUBERÍA Y SU CONEXIÓN	COLORES Y NÚMERO DE BANDAS	ESTADO DE LA CONEXIÓN	COLOR DE LAS BANDAS
NUEVA	1 BLANCA	DESECHO O REPARABLE EN TALLER	ROJA
PREMIUM	2 BLANCA		
CLASE 2	1 AMARILLA		
CLASE 3	1 AZUL	REPARABLE EN LOCALIZACIÓN	VERDE
CLASE 8	1 VERDE		
DESECHO	1 ROJA		

### 1.4. FABRICACIÓN DE LA TUBERIA DE PERFORACION

La tubería de perforación está fabricada siguiendo las Normas API esta se elabora en tres distintos rangos dependiendo de su longitud.

- Rango 1: 5,5 a 6,7 m (18 - 22 pies)
- Rango 2: 8.23 a 9,75 m (27 - 32 pies)
- Rango 3: 11,6 a 13,7 m (38 - 45 pies)

Siendo la tubería más comúnmente usada la de 9,1 m (30 pies), esta longitud no incluye la unión de tubería que va fija en cada extremo.

Los tubos de perforación pertenecen a uno de los cuatro grados API (API SPEC 5D):

1. Grado E-75
2. Grado X-95
3. Grado G-105
4. Grado S-135

## CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LATUBERÍA DE PERFORACIÓN

Los tramos de tubería se unen entre sí por medio de uniones (tool joint). La mitad macho de la unión se fija a un extremo de un tramo de tubería y la otra mitad hembra a otro extremo.

Por lo tanto las roscas de las uniones que son grandes y maquinadas se cortan en secciones cortas de acero de aleación con diámetro exterior suficiente, para acomodar esas roscas. Se ha logrado un funcionamiento satisfactorio ajustando estrechamente la unión de herramienta (Tool Joint) a la tubería y soldando una pestaña alrededor del extremo de la unión para que quede firmemente apretada en la tubería.

### **1.5. CONOCIMIENTOS BÁSICOS PARA MEDIR TUBERÍA DE PERFORACIÓN.**

Para medir tubería de perforación se debe de tener siempre presente que la longitud de un tubo abarca desde la caja de éste hasta la base del piñón. Nunca se debe de incluir el piñón para determinar el largo, ya que al unirse el piñón con la caja de otro tubo éste se pierde al quedar dentro de la caja.

La medición se realiza estando colocado el tubo en la rampa, utilizando una cinta métrica de acero de 30 m.

Para determinar el diámetro exterior de un tubo se utiliza un calibrador de compás, una regla o un flexómetro. Se coloca el compás en el cuerpo del tubo y con la regla o el flexómetro, se mide la distancia que hay entre un extremo y otro del compás. Esta distancia es el diámetro exterior del tubo.

### **1.6. CALIBRACIÓN DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN.**

La calibración se realiza para verificar que el interior del tubo esté libre de obstáculos (estopa, madera, etc.), o que no esté colapsado. Si no se calibra el tubo se mete, dañado o con basura, al pozo, esto puede provocar que las toberas se obstruyan y se tape la barrena. Por lo que se tendría que efectuar un viaje a la superficie lo que retrasaría las operaciones de perforación.

La calibración, con el calibrador A.P.I. (en el campo se le conoce como conejo) se lleva a cabo estando colocado el tubo sobre la rampa deslizadora, el tubo debe conservar el guardarosca. Al momento que se va a introducir el tubo al hoyo de conexión rápida, se retira el guardarosca del piñón y se recupera el calibrador, volviendo a colocar el guardarosca. En caso de que no salga el calibrador, se deberá invertir la posición del tubo para introducir un objeto pesado, por ejemplo un perno, que desplace el calibrador para recuperarlo y evaluar si se puede ocupar ese tubo o se debe de remplazar.

## CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LATUBERÍA DE PERFORACIÓN

### 1.7. ENROSQUE DE TUBERÍA.

Antes de efectuar el enrosque se debe de verificar que tanto el piñón como la caja no tengan el empaque que sirve de apriete al guardarosca, también se recomienda limpiar con diesel la rosca de la caja y del piñón para retirar la película adhesiva que contienen.

A continuación se debe de aplicar grasa a la caja y al piñón, ya que pueden ocurrir amarres por no contar con una película separadora. Las grasas compuestas para roscas proporcionan esta película y así mismo también ayudarán a minimizar el apriete excesivo.

Actualmente se está utilizando la llave de rolar marca VARCO, que realiza la misma función pero de una forma más segura. Este sistema está montado en el piso de perforación del equipo y es capaz de manejar desde tubería de perforación de 2 <sup>3</sup>/<sub>8</sub>" hasta lastra barrenas de 8" D.E. El sistema incluye la llave de rolar modelo SSW-20 y la llave de torsión TW-60.

Estando enroscado el tubo se coloca la llave de aguante en la caja y la llave de apriete en la base del piñón. En seguida realice el apriete de acuerdo al grado que se esté usando. Se recomienda que la llave de apriete queden en posición de 90° para que el apriete sea efectivo.

El diámetro (instalado al lado del indicador de peso), le indicará al perforador el rango de apriete que están efectuando las llaves, soltando la perilla cuando se llegue al apriete recomendado.

Recomendaciones.- Cuando se trata de tubería nueva, puede ser posible que queden residuos de la película protectora en las rosca, por lo que es recomendable quebrar, limpiar y volver a apretar para eliminar completamente estos residuos.

### PARÁMETROS DE VIDA ÚTIL EN CONEXIONES Y TUBERÍAS PREMIUM.

DESCRIPCIÓN	CONEXIONES	TIEMPO HORAS ROTACION	OBSERVACIONES
Tubería de perforación Diam. Ext. 5"	NC-50 API	800	400 Hrs. Para revisión de roscas mantenimiento un aparejo de 400 a 550 amp.

## CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LATUBERÍA DE PERFORACIÓN

Tubería de perforación 4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> " Diam. Ext.	NC-45 API	800	400 Hrs. Para revisión de roscas mantenimiento un aparejo de 400 a 550 amp.
Tubería de perforación 3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> " Diam. Ext.	NC-38 API.	700	400 Hrs. Para revisión de roscas mantenimiento un aparejo de 300 a 400 amp.
Tubería de perforación 2 <sup>7</sup> / <sub>8</sub> " Diam. Ext.	NV-2 <sup>7</sup> / <sub>8</sub> FD- PH6	120	Cambio de tubería al cumplir su ciclo de horas de rotación.
Lastrabarrenas de 8", 7 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> " y 6 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> " D. Ext. Heavy Weight 5" y 4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> "	6 <sup>5</sup> / <sub>8</sub> " Reg. Y 5 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> " Reg. NC-50 y NC46	800	400 horas para revisión de roscas.
Lastrabarrenas de 4 <sup>3</sup> / <sub>4</sub> " Diam. Ext. Heavy Weight 3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> " Diam. Ext.	NC-35 Y NC-38 NC-38	700	400 horas para revisión de roscas.
Lastrabarrenas de 8 <sup>1</sup> / <sub>8</sub> " Diam. Ext.	3 <sup>3</sup> / <sub>8</sub> " Reg.	120	Cambio de tubería al cumplir su ciclo de horas de rotación.

### 1.8. CARACTERÍSTICAS Y MANEJO DE LA TUBERÍA PESADA (HW) Y LASTRABARRENAS.

#### 1.8.1. TUBERÍA PESADA.

La tubería de perforación extra pesada (Heavy-Weight). Es un componente de peso intermedio, para la sarta de perforación, entre los lastrabarrenas y la tubería de perforación. Proporcionando un cambio gradual de rigidez de la herramienta

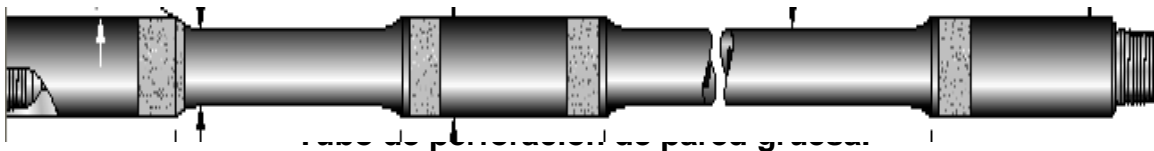
## CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LATUBERÍA DE PERFORACIÓN

rígida a frágil tubería de perforación, reduciendo la fatiga de ésta, al colocar tubería en el punto de transición. Son tubos de pared gruesa unidos entre sí, por juntas extra largas, para facilitar su manejo; tienen las mismas dimensiones de la tubería de perforación normal, por su peso y forma; la tubería “Heavy-Weight” se pueden usar en compresión, al igual que los lastra barrenas, un distintivo sobre saliente en el recalcado central, que protege al cuerpo del tubo del desgaste por la abrasión, esta sección recalcada actúa como un centralizador y contribuye a una mayor rigidez, y resistencia de la tubería “Heavy-Weight”. Otra ventaja, es que no se requiere cambiar de elevadores y no requiere el uso de la grapa de seguridad (collarín para herramienta).

### CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA HEAVY-WEIGHT.

Uniones de tubería (24” y 30” de longitud) (609.6 y 762 mm):

- Más área de apoyo para reducir el desgaste del diámetro exterior.
- Más longitud para cortar conexiones nuevas.
- Más espacio para poner bandas de metal duro.
- La pared gruesa da máximo peso por metro.
- Larga sección central recalcada (24” de longitud) (609.6 mm).
- Enteriza con el cuerpo del tubo.
- Reduce el desgaste de la porción central del tubo.
- Se le puede aplicar metal duro fácil y seguramente.
- Se puede reconstruir el diámetro exterior.
- Ayuda a evitar la pegadura por presión diferencial.





## CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LATUBERÍA DE PERFORACIÓN

### 1.8.2. LASTRABARRENAS.

Son barras de acero huecas de gran espesor de pared, los extremos tienen roscas maquinada en torno, utilizadas para auxiliar a la tubería de perforación y dar peso a la barrena durante las operaciones de perforación, prevenir el pandeo de la sarta de perforación y mantener la tubería de perforación en tensión. También son conocidas como Drill Collars.

Actualmente se tienen en uso dos tipos de lastrabarrenas:

#### 1.- Acabado de fábrica (liso).

Este acabado se denomina convencional, ya que trae la forma tal y como sale de la fábrica, satisface todos los requisitos nominales.



**Lastrabarrena liso.**

#### 2.- Diseño de espiral.

Reduce el área de contacto entre las lastrabarrenas y la pared del pozo, evitando con esto pegaduras por presión diferencial en agujero abierto.



**Lastrabarrenas en espiral.**

### 1.9. CAUSAS MÁS COMUNES DE FALLAS EN TUBERÍA

El mayor causante de las fallas de la tubería de perforación se debe al proceso de corrosión-fatiga, estas fallas por lo general empiezan en el interior de la tubería, formando grietas diminutas que se abren en la superficie y se cierran al estar trabajando la tubería en rotación y tensión o compresión, y los fluidos corrosivos que se bombean metiéndolos y sacándolos de la grieta de modo que ésta es agrandada tanto por falla mecánica como por corrosión hasta que el tramo de tubería debe desecharse o finalmente falla.

Un choque violento, el cual puede ser causado por el exceso de peso en la barrena también puede producir fatiga y consecuentemente falla de la

## CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LATUBERÍA DE PERFORACIÓN

tubería.

Un tramo de tubería puede fallar por la aplicación de una tensión excesiva, estas fallas generalmente se dan en la parte superior del pozo y se debe a que la carga por unidad de área excede la capacidad de tensión del componente más débil.

Las fallas por torsión, casi siempre ocurren en la unión de la tubería en la parte superior del pozo, y se manifiesta como una elongación del Piñón o una expansión en la caja, depende de cuál sea la más débil.

La presencia de partículas extrañas pueden causar mucha fricción, arrancando partes del metal, las cuales se conglomerarán perjudicando a la rosca o a la superficie del tope que harán fallar la junta. Por esto es muy importante que las roscas y los topes se conserven limpios y protegidos con un lubricante adecuado para roscas.

La presencia de sulfuro (SSC) puede causar agrietamiento esto suele darse cuando la tubería de perforación opera en presencia de sulfuro de hidrógeno, y es más común en los pines de las conexiones rotatorias.

Además las uniones están expuestas al desgaste superficial debido al rozamiento en las paredes del pozo. Para evitar este desgaste las uniones de algunas tuberías se cubren con material duro llamado bandas de metal duro.

### **1.10. DEFECTOS EN LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN USADA.**

El esfuerzo o tensión, y el medio ambiente al cual la tubería de perforación está sujeta produce varios tipos de daños como los que se señala a continuación:

1. Grietas por fatiga
2. Corrosión de Hoyo
3. Desgaste por abrasión
4. Desgaste por abrasión en la zona de la tubería
5. Ensanchamiento del diámetro externo (D.E.),
6. Daños en el área de las cuñas.

#### **1. Grietas por fatiga.**

Este tipo de daños usualmente se orientan en forma transversal, y pueden

## CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LATUBERÍA DE PERFORACIÓN

ubicarse tanto en el interior como en el exterior de la superficie de la tubería. Este tipo de fallas suelen darse debido al ciclo de tensión a esfuerzo al cual están expuestos; los ciclos de carga, casi siempre ocurren cuando se gira la sarta de perforación mientras está doblada o pandeada. Lamentablemente este tipo de daño no es reparable, en consecuencia el tubo deberá ser rechazado.

### **2. Corrosión en forma de Hoyos.**

Esta condición es causada por los agentes corrosivos que están presentes en el entorno en el cual trabaja la tubería de perforación. Este tipo de corrosión es nociva para la tubería, pues es causante de la reducción del espesor de la pared del cuerpo, y puede ser el punto focal para la iniciación de una fatiga.

### **3. Desgaste por abrasión en las uniones.**

El desgaste ocasionado en la tubería, es a causa de la rotación de la tubería de perforación, la cual roza contra las paredes del pozo; Este tipo de daño reduce considerablemente la superficie exterior de la tubería en la región de las uniones. Para reducir el efecto de este desgaste se coloca la banda de metal duro alrededor de las uniones.

### **4. Desgaste por abrasión en la tubería.**

Este daño suele darse a causa del rozamiento de la tubería con la tubería de revestimiento (casing) cuando se realiza perforaciones horizontales, puesto que el tubo al ubicarse en posición horizontal o inclinada el hardband de los tool joints reducen considerablemente la protección que suele dar en las perforaciones verticales. Este problema a menudo reduce peligrosamente el espesor de las paredes del tubo. Por eso es importante medir espesores utilizando el método de ultrasonido. Especialmente en el centro de la tubería para detectar este tipo de daño.

### **5. Ensanchamiento del diámetro externo.**

Este tipo de daño suele presentarse cuando se estalla explosivos dentro de la tubería con lo cual se expande considerablemente el diámetro en la unión.

### **6. Daños en el área de las cuñas.**

El manejo brusco al cual es necesariamente sujeta la tubería de perforación frecuentemente, produce daños mecánicos en la tubería. En el área de las cuñas, estas presionan a la tubería para poder sujetarla durante la subida o bajada de la

sarta de perforación, por lo cual esta zona particularmente es susceptible para estos daños.

**CAPÍTULO 2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES Y PRINCIPALES  
ESFUERZOS A LOS QUE ESTÁ SOMETIDA LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN**

**CAPÍTULO 2**

**PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES Y PRINCIPALES ESFUERZOS  
A LOS QUE SE ENCUENTRA SOMETIDA LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN**

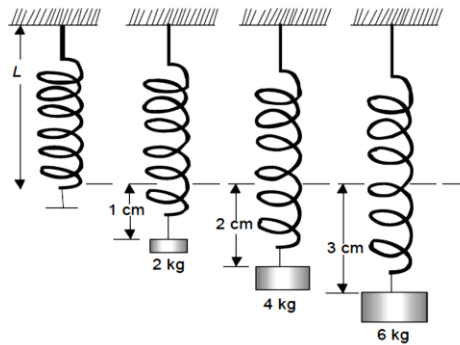
## 2.1. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Sabemos bien que los materiales u objetos supuestamente son rígidos y totalmente sólidos. Sin embargo, hemos comprobado que los cables y tuberías pueden alargarse o romperse, que los elastómeros se comprimen y algunos pernos se rompen, etc. Por lo tanto, es necesario estudiar las propiedades mecánicas de la materia, para tener un entendimiento más completo de éstos efectos, por lo que a continuación se expondrá y analizara algunos conceptos básicos de dichas propiedades.

### 2.1.1. LÍMITE ELÁSTICO Y PUNTO DE CEDENCIA

Se define como cuerpo elástico, a aquel que recobra su tamaño y su forma original después de actuar sobre él una fuerza deformante. Es conveniente establecer relaciones de causa y efecto entre la deformación y las fuerzas deformantes para todos los cuerpos elásticos.

Robert Hooke fue el primero en establecer esta relación por medio de la invención de un volante de resorte para reloj. En términos generales, Hooke descubrió que cuando una fuerza (F) actúa sobre un resorte produce en él un alargamiento (s) que es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza, este concepto lo representamos con la siguiente figura:



#### Deformación longitudinal de un resorte.

La ley de Hooke se representa en forma matemática como:

$$F = k s$$

Dónde:

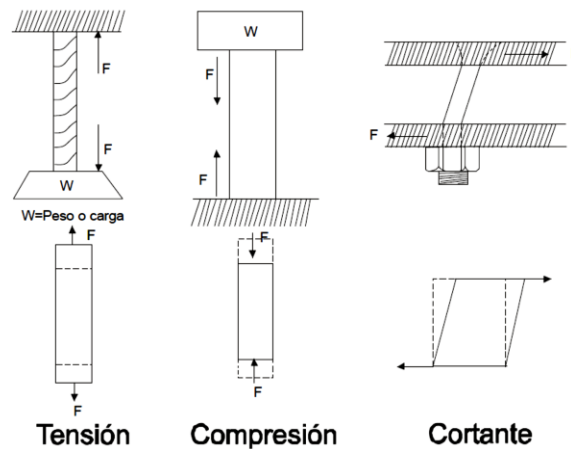
- F = Fuerza aplicada
- s = alargamiento
- K = Constante de proporcionalidad (varía de acuerdo con el tipo de material)

## CAPÍTULO 2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES Y PRINCIPALES ESFUERZOS A LOS QUE ESTÁ SOMETIDA LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

La ley de Hooke no se limita al caso de los resortes en espiral; de hecho, se aplica a la deformación de todos los cuerpos elásticos. Para que la ley se pueda aplicar de un modo más general, es conveniente definir los términos esfuerzo y deformación.

El esfuerzo se refiere a la causa de una deformación elástica, mientras que la deformación, se refiere a su efecto, en otras palabras, a la deformación en sí misma.

En la figura se muestran tres tipos comunes de esfuerzos y sus correspondientes deformaciones, a saber:



### Esfuerzos más comunes en los materiales.

- Esfuerzo de tensión.- Se presenta cuando las fuerzas iguales y opuestas se apartan entre sí.
- Esfuerzo de compresión.- Las fuerzas son iguales y opuestas y se acercan entre sí.
- Esfuerzo cortante.- Ocurre cuando las fuerzas iguales y opuestas no tienen la misma línea de acción.

Las fuerzas internas de un elemento están ubicadas dentro del material por lo que se distribuyen en toda el área; justamente se denomina esfuerzo a la fuerza por unidad de área, la cual se denota con la letra griega sigma ( $\sigma$ ) y es un parámetro que permite comparar la resistencia de dos materiales, ya que establece una base común de referencia.

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Dónde:

## CAPÍTULO 2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES Y PRINCIPALES ESFUERZOS A LOS QUE ESTÁ SOMETIDA LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

- $P \equiv$  Fuerza axial
- $A \equiv$  Área de la sección transversal.

Cabe destacar que la fuerza empleada en esta ecuación debe ser perpendicular al área analizada y aplicada en el centroide del área para así tener un valor de  $\sigma$  constante que se distribuye uniformemente en el área aplicada

El esfuerzo utiliza unidades de fuerza sobre unidades de área, en el sistema internacional (*SI*) la fuerza es en Newton (*N*) y el área en metros cuadrados (*m<sup>2</sup>*), el esfuerzo se expresa por *N/m<sup>2</sup>* o pascal (*Pa*). Esta unidad es pequeña por lo que se emplean múltiplos como él es el Kilopascal (*kPa*), Megapascal (*MPa*) o Gigapascal (*GPa*). En el sistema americano, la fuerza es en libras y el área en pulgadas cuadradas, así el esfuerzo queda en libras sobre pulgadas cuadradas (*psi*).

La resistencia del material no es el único parámetro que debe utilizarse al diseñar o analizar una estructura; controlar las deformaciones para que la estructura cumpla con el propósito para el cual se diseñó tiene la misma o mayor importancia. El análisis de las deformaciones se relaciona con los cambios en la forma de la estructura que generan las cargas aplicadas.

Una tubería sometida a una fuerza axial de tracción aumentara su longitud inicial; se puede observar que bajo la misma carga pero con una longitud mayor este aumento o alargamiento se incrementará también. Por ello definir la deformación ( $\epsilon$ ) como el cociente entre el alargamiento  $\delta$  y la longitud inicial  $L$ , indica que sobre la barra la deformación es la misma porque si aumenta  $L$  también aumentaría  $\delta$ . Matemáticamente la deformación sería:

$$\epsilon = \delta/L$$

En el caso de un esfuerzo de tensión o de compresión, la deformación puede considerarse como un cambio en la longitud por unidad de longitud. Un esfuerzo cortante, por otra parte, puede alterar únicamente la forma de un cuerpo sin cambiar sus dimensiones. Generalmente el esfuerzo cortante se mide en términos de un desplazamiento angular.

Teniendo como base los conceptos anteriores, podemos definir el límite elástico como el esfuerzo máximo que puede sufrir un cuerpo sin que la deformación sea permanente. Por ejemplo si a una tubería de acero se le proporciona un esfuerzo mayor que su límite elástico, esto no significa que la tubería se romperá en ese punto, sino únicamente que la tubería de acero no recuperará su tamaño original. Asimismo, podemos decir que el punto de cedencia o fluencia es el valor que se

## CAPÍTULO 2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES Y PRINCIPALES ESFUERZOS A LOS QUE ESTÁ SOMETIDA LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

alcanza de un esfuerzo, mayor del límite elástico, al cual el material continúa deformándose sin que haya incremento de la carga.

El mayor esfuerzo al que se puede someter una tubería de acero sin que se rompa, se le denomina límite de rotura. De acuerdo al experimento de R. Hooke y los conceptos estudiados de esfuerzo, deformación y límite elástica. La ley de

Hooke establece:

“Siempre que no se exceda el límite elástico, una deformación elástica es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza aplicada por unidad de área (esfuerzo).”

### 2.1.2. DUCTILIDAD Y MÓDULO DE ELASTICIDAD.

Los metales, que es nuestro estudio, tienen otras propiedades importantes, además de las anteriormente descritas, como:

- Dureza.- Resistencia del metal a la penetración o la deformación.
- Ductilidad.- Capacidad del metal para deformarse plásticamente sin fracturarse, medida por elongación o reducción de área en una prueba tensil.
- Maleabilidad.- Característica de los metales que permite una deformación plástica en compresión sin rotura.

Es preciso conocer todas estas propiedades antes de elegir metales para aplicaciones específicas. El módulo de elasticidad (longitudinal), se puede definir como la medida de rigidez de un metal, o en otras palabras, como la razón del esfuerzo, dentro del límite proporcional, a una deformación correspondiente.

También se le puede denominar como módulo de Young y se expresa con la siguiente ecuación:

$$Y = \frac{F * L}{A * \Delta L}$$

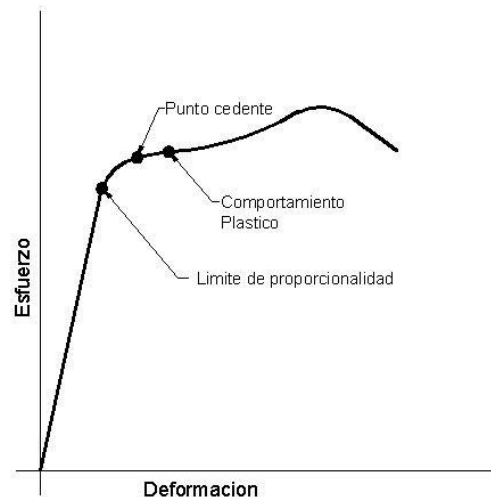
Dónde:

- F=fuerza aplicada
- L=longitud inicial
- A=área transversal
- $\Delta L$ = cambio de longitud debido a la deformación



## CAPÍTULO 2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES Y PRINCIPALES ESFUERZOS A LOS QUE ESTÁ SOMETIDA LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

Las unidades del módulo de Young son las mismas que las unidades de esfuerzo:  $\text{kg/cm}^2$ ,  $\text{lb/pg}^2$ , etc. Teniendo presente que la deformación longitudinal es una cantidad que no tiene unidades (adimensional).



**Diagrama esfuerzo vs deformación del acero.**

### 2.1.3. PRUEBAS DE DUREZA

Las propiedades mecánicas de los materiales se determinan por medio de pruebas en el laboratorio, el material estructural, como en el caso del acero, se somete a una serie de exámenes en los que se obtiene su resistencia.

La prueba de dureza puede medirse por varias pruebas como Brinell, Rockwell o microdureza.

Una forma práctica para probar la dureza del material puede ser con una lima de dureza estandarizada, suponiendo que un material que no puede ser cortado por la lima es tan duro como la lima o más que ella, en donde se utilizan limas que abarcan gran variedad de durezas.

En la siguiente tabla se muestran valores estimados de la dureza de algunas tuberías:

**CAPÍTULO 2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES Y PRINCIPALES  
ESFUERZOS A LOS QUE ESTÁ SOMETIDA LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN**

Grado	Resistencia a la cedencia (lb/pl <sup>2</sup> )	Dureza	
		Brinell	Rockwell-C
Tubería de perforación			
E	75000	220-260	19-27
X-95	95000	240-290	22-30
G(X-105)	105000	250-310	24-32

**2.1.4. ELIPSE DE ESFUERZOS BIAXIALES**

Un modelo simplificado a partir de la teoría de la distorsión máxima de deformación y trabajando en dos dimensiones fue desarrollado por Nadia y aceptada por el API para representar la resistencia al colapso y el estallamiento de las tuberías sujetas a un esfuerzo axial variable (diferente de 0). El modelo considera la acción de los esfuerzos axiales y tangenciales mayores a los radiales.

Su forma matemática es la siguiente:

$$\sigma_{Ae} = [1 - 0.75 (\sigma_A / \sigma_y)^2 - 0.5 \sigma_A \sigma_y] / \sigma_y$$

Dónde:

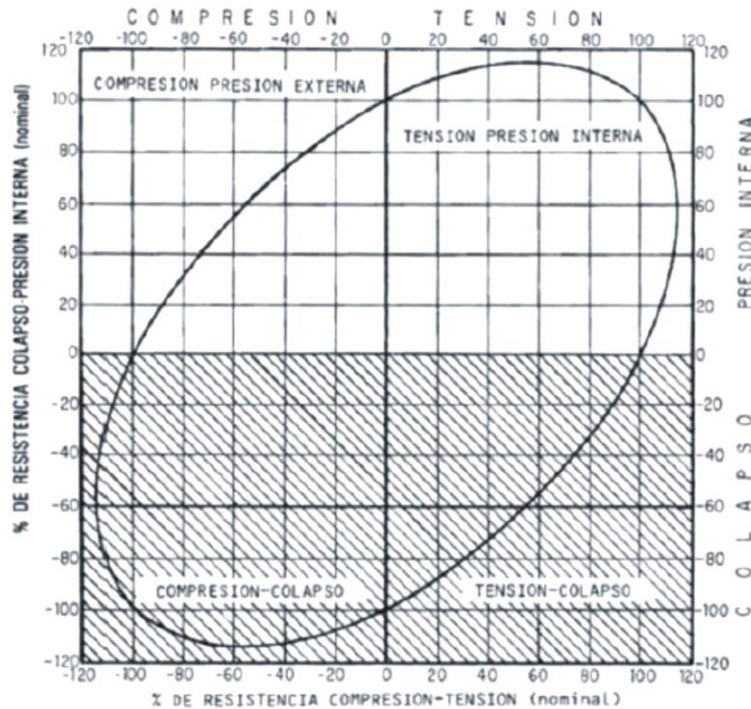
- $\sigma_{Ae}$  = Esfuerzo axial equivalente (psi)
- $\sigma_y$  = Cedencia (psi)
- $\sigma_y$  = Esfuerzo axial (psi)

Su aplicación ha sido orientada más a la representación del colapso bajo la carga axial variable. Y se utiliza asignando en las ecuaciones de colapso una cedencia equivalente calculada a partir de la ecuación anterior.

La gráfica biaxial presentada en la gráfica muestra el comportamiento de disminución de la resistencia al colapso para tuberías sujetas a un esfuerzo axial mayor a cero (tensión en cuarto cuadrante), situación que cambia en esfuerzos axiales menores a cero (compresión tercer cuadrante). El resultado de esta predicción de pérdida o ganancia de resistencia ha estado sujeto a controversia,

## CAPÍTULO 2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES Y PRINCIPALES ESFUERZOS A LOS QUE ESTÁ SOMETIDA LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

en virtud de no contar con pruebas exhaustivas que corroboren lo anterior. Se considera que un solo +10% en resistencia se puede obtener bajo compresión. Y por tensión puede considerarse una pérdida total en resistencia.



**Elipse de esfuerzos biaxiales.**

### 2.2. ANÁLISIS DE ESFUERZOS A QUE SOMETEN LAS TUBERÍAS PORTENSIÓN, COLAPSO Y TORSIÓN.

El Instituto Americano del Petróleo (API) tiene establecido que para el diseño de sartas de trabajo sean considerados los tres esfuerzos principales a que son sometidas:

- Por Tensión
- Por Colapso
- Por Torsión

Es importante señalar que para el diseño se aplicará el método gráfico, el cual está basado en ecuaciones matemáticas.

A continuación se detallan cada uno de los esfuerzos, exponiéndose inicialmente algunos conceptos generales.

### 2.2.1. TENSIÓN.

Una sarta de trabajo al estar suspendida verticalmente, sufrirá un esfuerzo axial llamado tensión, producto de su propio peso. Cada junta debe soportar el peso de la sarta suspendida en ella.

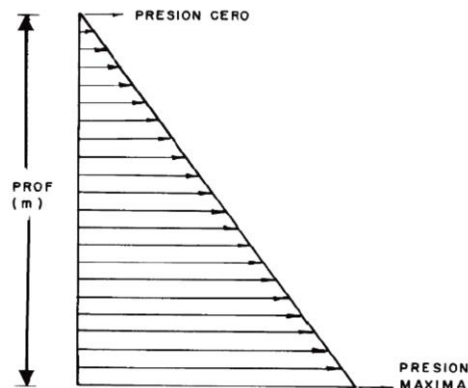
El valor de este esfuerzo varía de cero en el punto neutro hasta un máximo en el punto de apoyo, es decir en la superficie.

Si la tubería estuviera suspendida en el aire soportaría todo su peso muerto. Si está sumergida en el fluido, disminuye su peso por efecto del empuje del empuje en función de la densidad del fluido; cambiando los esfuerzos de tensión a compresión a partir del punto neutro.

### 2.2.2. COLAPSO.

Este esfuerzo se debe principalmente al efecto de la presión exterior que ejerce la columna hidrostática de los fluidos de perforación o de control en los pozos. La magnitud de la presión depende de la densidad del fluido. El colapso o aplastamiento también puede ocurrir al aplicar una presión externa que sumada con la presión hidrostática, incrementa la presión externa.

El valor de la presión exterior aumenta en función de la profundidad y su valor máximo estará en el extremo inferior de la sarta de tubería, como se aprecia en la figura.



#### **Aumento de la presión vs aumento de la profundidad.**

Cuando un tubo está sometido a una presión exterior uniforme, el metal está sujeto a esfuerzos de compresión, al aumentar la presión en condiciones de equilibrio, se contraerá uniformemente como cualquier cuerpo elástico, hasta una presión crítica donde el tubo es inestable y ocurre la falla plástica o colapso.

## CAPÍTULO 2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES Y PRINCIPALES ESFUERZOS A LOS QUE ESTÁ SOMETIDA LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

El diseño de colapso por tensión consiste en determinar la reducción en la capacidad de la tubería para resistir presión externa como resultado de la tensión aplicada. Esto debe efectuarse en los extremos de cada sección de tubería diseñada previamente por tensión, de acuerdo a las siguientes deducciones:

- Al tensionar una tubería se incrementa la capacidad a la presión interna.
- Al tensionar una tubería, disminuye la capacidad de resistencia al colapso.
- Al comprimir una tubería, disminuye la capacidad de resistencia a la presión interna.
- Al comprimir una tubería, aumenta la capacidad de resistencia al colapso.
- Con estos conceptos fue elaborada la gráfica de Elipse de esfuerzos biaxiales.

El procedimiento para calcular el colapso por tensión es el siguiente:

1. Contando con el peso en los extremos de cada una de las secciones diseñadas, se procede a calcular la constante adimensional ( $r$ ) en los extremos de cada sección, definida con la siguiente expresión.

$$r = \frac{\text{tension aplicada} * k_b + M_{op}}{0.454 * A_t * PCP}$$

Dónde:

- $r$  = Constante adimensional
- Tensión aplicada = Tensión originada por el peso de la tubería en el aire, en Kg
- $M_{op}$  = Margen para tensionar, en Kg
- $A_t$  = Área transversal del tubo, en  $\text{pg}^2$
- $K_b$  = Factor de flotación
- $PCP$  = Punto de cedencia promedio, en  $\text{lb/pg}^2$

El punto de cedencia promedio ( $PCP$ ), es la media aritmética de la mínima y máxima resistencia cedente, para cada calidad de acero, como se aprecia en la siguiente tabla:

CAPÍTULO 2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES Y PRINCIPALES ESFUERZOS A LOS QUE ESTÁ SOMETIDA LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

RESISTENCIA A LA CEDENCIA			
GRADO	PCP lb/pg <sup>2</sup>	PC min. Lb/pg <sup>2</sup>	PC max. Lb/pg <sup>2</sup>
E	85000	75000	95000
X	110000	95000	125000
G	120000	105000	135000
S-135	145000	135000	155000

2. Con el valor de  $r$  se entra a la Elipse de Esfuerzos sobre el eje de tensión encontrando un punto. Se baja una vertical hasta intersectar la curva, obteniendo el por ciento de resistencias al colapso ( $Z$ ) que tiene la tubería cuando se tiene sometida a una cierta tensión.

Este valor encontrado se multiplica por el valor del colapso dado en tablas y se obtiene el valor al colapso en el punto deseado ( $R_{cbt}$ ).

3. Este valor se compara con la presión que ejerce el fluido en ese punto. Si es menor, la tubería de trabajo no es recomendable por presión externa.

Por lo tanto, se tendrá que acudir al siguiente grado de tubería y volver a hacer el diseño por colapso.

Hasta que los valores de presión sean cercanos o iguales, nuestra sarta estará en condiciones favorables por colapso.

### 2.2.3. TORSIÓN.

La cantidad de esfuerzo por torsión que resiste una tubería bajo tensión debe calcularse en cada cambio de grado, diámetro y peso de tubería. El valor mínimo que resulte en cualquiera de los puntos analizados será la condición de frontera en operaciones reales de campo.

En el caso de herramientas que se operan con torsión como es el de algunas herramientas de percusión, el valor de torsión obtenido por diseño deberá ser superior a la torsión necesaria, de lo contrario deberá cambiarse el diseño de la sarta.

Se debe de tomar en cuenta, al trabajar con las tuberías, que a medida que aumente la tensión el esfuerzo de torsión disminuye.

**CAPÍTULO 3**

**MATERIALES METÁLICOS. FUNDAMENTOS, PROPIEDADES FÍSICAS,  
MECÁNICAS Y CORROSIÓN. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS  
DESTRUCTIVOS**

### 3.1. ACEROS AL CARBONO.

La fundición del hierro para poder extraer el mineral (Fe) se cree comenzó alrededor del año 1300 antes de Cristo en Palestina. Las herramientas de hierro aparecieron al mismo tiempo y hornos de hierro también han sido encontrados. El acero es básicamente una aleación de hierro y carbono, cuyo contenido de carbono está aproximadamente por encima del 2% del porcentaje total en peso.

Debido a su resistencia, formación, abundancia y bajo costo, el acero es un metal primario usado para aplicaciones estructurales, además de tener otras varias.

La sociedad de ingenieros automotrices (SAE) identifica los aceros al carbono por medio de cuatro dígitos numéricos. Los primeros dos dígitos son (1 y 0) y los siguientes dos dígitos indican el porcentaje en peso del contenido de carbono. Por ejemplo un acero 1045, significa que tenemos una aleación de acero al carbono cuyo contenido de carbono en porcentaje total de peso es del 0.45%. El equivalente en el Sistema Numérico Unificado (UNS) es G10450. En el sistema numérico del Instituto Americano de Hierro y Acero (AISI) se identifica de la siguiente manera 11XX, 12XX y 15XX. Una mejor descripción de cada tipo de aleación se da de la manera siguiente:

10XX Carbono, Mn 1.00% max.

11XX Carbono, resultirizado

12XX Carbono, resultirizado y refosforizado

15XX Carbono, Mn 1.00-1.65% max.

Como resultado del método de producción los siguientes elementos están siempre presentes en el acero: carbono, manganeso, fósforo, silicio y partes de nitrógeno, oxígeno y aluminio.

El más importante de estos es el carbono, es importante comprender el efecto del carbono en la estructura interna del acero para entender los tratamientos térmicos del acero al carbono. Hay numerosos términos que describen las fases, microestructuras y los constituyentes microestructurales, por ejemplo la fase sólida posee un arreglo específico de átomos que solo puede ser visto por medio de rayos-x, mientras que una microestructura es un arreglo particular de una fase o fases que puede ser visto con la ayuda de un microscopio. La siguiente figura es una forma abreviada del diagrama hierro – carbono hasta un porcentaje en peso de carbono del 6.7%.



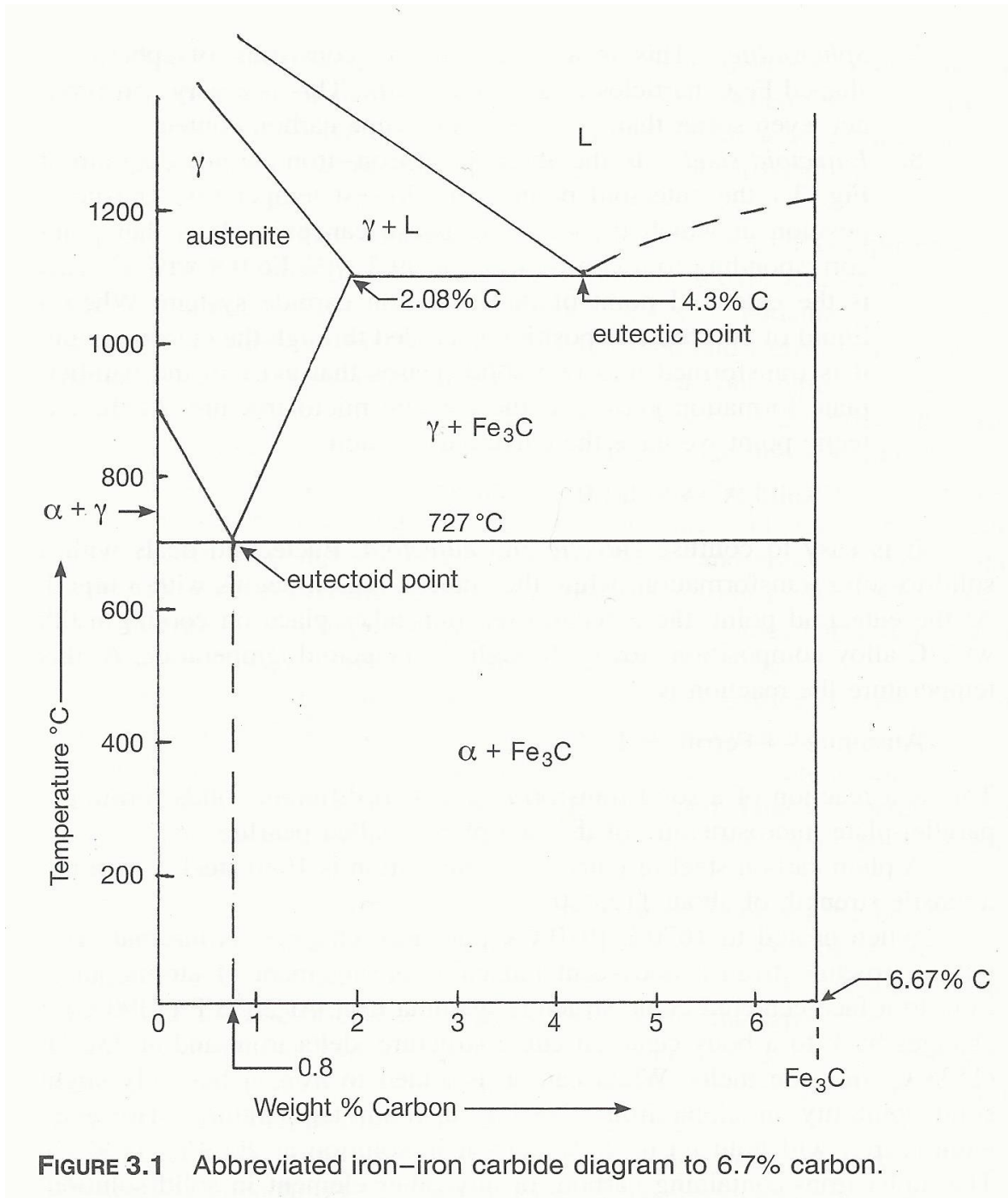


FIGURE 3.1 Abbreviated iron–iron carbide diagram to 6.7% carbon.

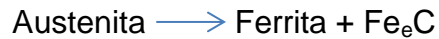
1. **Ferrita.** Llamada la fase alfa. Extremo izquierdo del diagrama. Es una solución sólida intersticial de carbono en un arreglo cúbico centrado de hierro, es decir, el átomo de carbono se encuentra en el centro de la estructura cúbica cuyos vértices son átomos de hierro. Llamado hierro débil pues solo contiene un máximo de 0.022% del peso total en carbono a 727°C (Temperatura eutectoide).

2. **Austenita.** Es la fase gama. Solución sólida intersticial de carbono en un arreglo de hierro cúbico centrado, en este arreglo se observa que existe un átomo de carbono en el centro de cada una de las caras de la estructura cúbica. Lo anterior propicia que exista más carbono en la composición final, por encima del 2.11% del peso total en carbono a 1148°C y por encima del 0.8% a 727°C. Bajo condiciones de equilibrio esta fase no puede existir debajo de los 727°C.
3. **Cementita.** Esta fase es un carburo de hierro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Posee una estructura cristalina ortorrómbica. Dura y quebradiza.
4. **Martensita.** Una fase metaestable que resulta de un enfriamiento rápido de un acero que se encuentra en la región gama. No se puede encontrar un equilibrio para ella en el diagrama. La martensita es considerada para ser supersaturada con carbón, sería más estable si los átomos de carbón no estuvieran presentes. Dura y quebradiza y no se presenta como un producto terminado. Es un paso intermedio en un proceso de tratamiento térmico cuyo objetivo es obtener microestructuras deseables.
5. **Perlita.** Una microestructura que consiste en plaquetas paralelas de ferrita y cementita. Resulta de un enfriamiento lento de austenita con un 0.8% de carbono. Posee una alta dureza más que la fase ferrita pero mucho menos que la fase martensita.
6. **Bainita.** Es una microestructura que consiste de partículas pequeñas de cementita en una matriz de ferrita. Se obtiene por enfriamiento de la fase austenítica a rangos moderados. Esta microestructura posee muchas propiedades mecánicas deseadas. Su dureza se encuentra entre la perlita y la martensita. Tiene buena ductibilidad y resistencia.
7. **Esferoidita.** Microestructura que consiste de una forma esférica de la cementita dentro de una matriz de ferrita. Es un producto muy suave.
8. **Acero Eutectoide.** En la figura anterior el punto eutectoide tiene la temperatura más baja y respectiva composición a las que la fase austenita puede existir. En este punto corresponde la siguiente composición 99.2%pt de hierro y 0.8%pt en carbono. Cuando un líquido de composición eutéctica es enfriado a través del punto eutéctico es transformado en dos fases sólidas que existen como una formación de placas paralelas conocido como una microestructura eutéctica. En el punto eutéctico tenemos la reacción eutectoide:



Es fácil confundirse con los términos eutectoide y eutéctico. Eutectoide hace referencia a una transformación sólido-sólido, mientras que la región eutéctica comienza con un líquido. En el punto eutectoide toma lugar la siguiente

reacción cuando tenemos una aleación cuyo porcentaje de carbono es el siguiente 0.8%pt y la temperatura se encuentra ligeramente cercana a la temperatura eutectoide. A esta temperatura la reacción es:



Esta es la reacción que nos indica como un sólido se transforma en dos sólidos distintos formando una microestructura de placas paralelas de dos fases llamada perlita. El proceso de fabricación del acero se lleva a cabo con la finalidad de obtener microestructuras que tengan diversas propiedades y que a su vez estas se propaguen por todo el cuerpo de acero, tales como dureza, resistencia, entre otras.

### 3.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.

Las propiedades físicas y mecánicas del acero al carbono son determinadas por el contenido de carbono, la operación final y algún tratamiento térmico. Se enlista a continuación una serie de compuestos químicos para seleccionar aceros al carbono. El enfriamiento es comúnmente usado para mejorar el acabado de la superficie ya sea maquinado o acabado en frío. Los aceros disponibles más comunes acabados por enfriamiento en barra son:

1018	1137
1020	1141
1045	1212
1050	1213
1017	1215

Las barras de acero al carbón terminadas por enfriamiento son usadas para pernos, motores y transmisiones de potencia, pistones, bombas de aceite, entre otros.

Los aceros acabados por enfriamiento poseen mejores propiedades de mecanizado. El acabado de la superficie y las dimensiones son mejorados en gran manera debido al proceso de enfriamiento.

La tabla 3.2 muestra un promedio de propiedades mecánicas del acero tratados por enfriamiento. La tabla 3.3 muestra un listado de propiedades mecánicas de un acero al carbono 1020 con tratamiento térmico. Las propiedades de los aceros al carbono pueden ser varias dependiendo del tipo de tratamiento térmico al que están sujetos.

**TABLE 3.1** Chemical Composition of Selected Carbon Steels

AISI no.	Chemical composition ranges and limits (%)			
	C	Mn	P	S
1010	0.08–0.13	0.30–0.60	0.04 max.	0.05 max.
1020	0.18–0.23	0.30–0.60	0.04 max.	0.05 max.
1030	0.28–0.34	0.60–0.90	0.04 max.	0.05 max.
1035	0.32–0.38	0.60–0.90	0.04 max.	0.05 max.
1040	0.37–0.44	0.60–0.90	0.04 max.	0.05 max.
1045	0.43–0.50	0.60–0.90	0.04 max.	0.05 max.
1050	0.48–0.55	0.60–0.90	0.04 max.	0.05 max.
1055	0.50–0.60	0.06–0.90	0.04 max.	0.05 max.
1060	0.55–0.65	0.60–0.90	0.04 max.	0.05 max.
1070	0.65–0.75	0.60–0.90	0.04 max.	0.05 max.
1080	0.75–0.85	0.60–0.90	0.04 max.	0.05 max.
1090	0.85–0.98	0.60–0.90	0.04 max.	0.05 max.
1095	0.90–1.03	0.30–0.50	0.04 max.	0.05 max.
1137	0.32–0.37	1.35–1.65	0.04 max.	0.08–0.13
1144	0.40–0.44	0.70–1.00	0.04 max.	0.08–0.13

**Composición química de aceros al carbono.**

**TABLE 3.2** Average Mechanical Properties of Cold-Drawn Steel

AISI no.	Tensile strength (psi)	Yield strength (psi)	Elongation in 2 in. (%)	Brinell hardness	Reduction of area (%)
1010	67,000	55,000	25.0	137	57
1015	71,000	60,300	22.0	149	55
1020	75,000	63,700	20.0	156	52
1025	80,000	68,000	18.5	163	50
1030	87,000	73,900	17.5	179	48
1035	92,000	78,200	17.0	187	45
1040	97,000	82,400	16.0	197	40
1045	102,000	86,200	15.0	207	35
1120	78,000	66,300	19.5	159	49
1137	105,000	89,200	16.0	217	35

**Propiedades mecánicas promedio de aceros al carbono enfriados.**

El límite de fatiga de los aceros es fuertemente dependiente del tipo de microestructura, con las microestructuras que dan alta resistencia también tendremos altos límites de fatiga. En muchos especímenes la fatiga se hace presente en esfuerzos superiores a 87,000 [psi], valor que puede decrecer cuando es sometido a varios esfuerzos. Estos niveles de fatiga pueden ser incrementados con un tratamiento superficial como son la carburización, nitruración y granallado.

**TABLE 3.4** Mechanical Properties of Selected Carbon Steels in the Quenched and Tempered Condition

AISI no.	Tempering temperature		Yield strength (psi)	Elongation (%)	Hardness (RB)
	°C	°F			
1040	315	600	86,000	20	255
	540	1000	71,000	26	212
1060	315	600	113,000	13	321
	540	1000	97,000	17	277
1080	315	600	142,000	12	388
	540	1000	117,000	16	321
1095	315	600	118,000	10	375
	540	1000	98,000	15	321
1137	315	600	122,000	10	285
	540	1000	88,000	24	229

**Propiedades mecánicas de aceros al carbono.**

Los aceros se ven afectados principalmente por la corrosión y sus distintos tipos. El hierro se encuentra en la naturaleza en forma de óxidos, los minerales son refinados para obtener el acero. A condiciones atmosféricas estos minerales procesados tienden a volver a su forma de oxidación. La corrosión del acero es muy compleja, existiendo varias docenas de tipos de corrosión. El agua es el solvente corrosivo más común. Algunos sistemas orgánicos son también capaces de causar corrosión severa. La corrosión atmosférica del acero depende de su localización. En contacto con el aire los productos de corrosión son óxidos y carbonatos. En atmosferas industriales el ácido sulfúrico está presente y cerca de los océanos sales y el aire. La corrosión es más rápida en áreas industriales, cerca del océano o cerca de las ciudades por la alta conductividad eléctrica, la lluvia y la tendencia a formar cloruros o sulfatos, lo anterior causa la remoción de

CAPÍTULO 3. MATERIALES METÁLICOS. FUNDAMENTOS, PROPIEDADES FÍSICAS,  
MECÁNICAS Y CORROSIÓN. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DESTRUCTIVOS

la capa protectora. En atmosferas no contaminadas la iniciación de la corrosión en una superficie de metal limpia es un proceso muy lento, incluso si la atmosfera está saturada con vapor de agua. Bajo estas condiciones la iniciación de la corrosión puede ocurrir por inclusiones en la superficie de MnS, que se disuelve cuando la superficie llega a ser humectada. Sin embargo la presencia de partículas sólidas en la superficie es un factor importante para el comienzo de la corrosión. Dioxido de azufre puede ser absorbido por la superficie del acero bajo condiciones atmosféricas. El rango de absorción depende de la humedad, altas concentraciones de este compuesto provocan un pH bajo en la película de la superficie.

Los aceros al carbono no deberían de ser usados en presencia de ácidos diluidos. En concentraciones de ácido sulfúrico que van del 90-95%, el acero puede ser usado encima del punto de ebullición. El acero normalmente no es usado con ácido hiperclórico, fosfórico o nítrico. El acero es susceptible de corrosión por esfuerzo en presencia de hidróxidos, gases de hidrógeno, gases de cloro, cloruros, bromuros de hidrógeno y soluciones acuosas de nitruros, incluso a bajas concentraciones. Hay 4 tipos de compuestos orgánicos que pueden ser corrosivos para el acero al carbono.

1. Ácidos orgánicos.
2. Componentes que al hidrolizarse producen ácidos. Incluyen los hidrocarburos clorados, los cuales reaccionan con el agua produciendo ácido hidroclicórico.
3. Agentes quelantes que se combinan con elementos de transición.
4. Disolventes corrosivos inorgánicos.

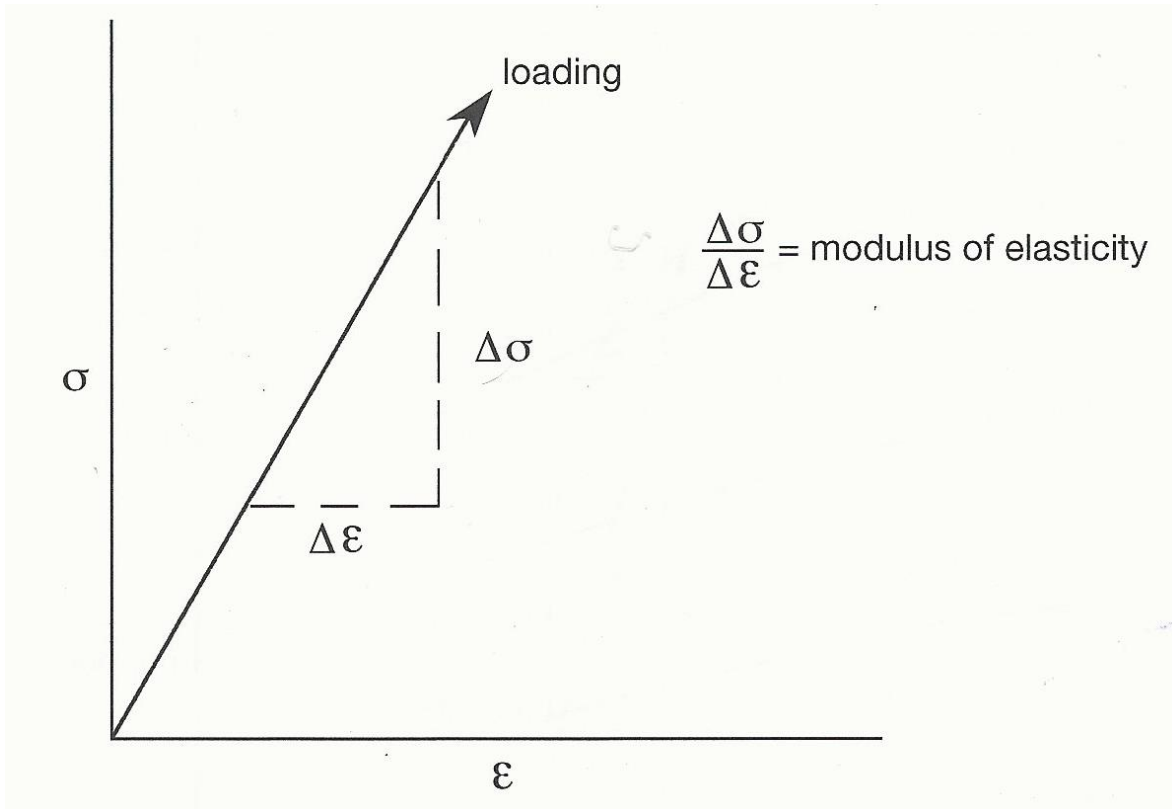
**TABLE 3.4** Mechanical Properties of Selected Carbon Steels in the Quenched and Tempered Condition

AISI no.	Tempering temperature		Yield strength (psi)	Elongation (%)	Hardness (RB)
	°C	°F			
1040	315	600	86,000	20	255
	540	1000	71,000	26	212
1060	315	600	113,000	13	321
	540	1000	97,000	17	277
1080	315	600	142,000	12	388
	540	1000	117,000	16	321
1095	315	600	118,000	10	375
	540	1000	98,000	15	321
1137	315	600	122,000	10	285
	540	1000	88,000	24	229

**Propiedades mecánicas de aceros al carbono, enfriados y a condiciones de templado.**

### 3.2.1. MÓDULO DE ELASTICIDAD.

Es una medida de la rigidez del metal, una relación esfuerzo y deformación de un material en la región elástica. La siguiente figura como se determina esta propiedad.



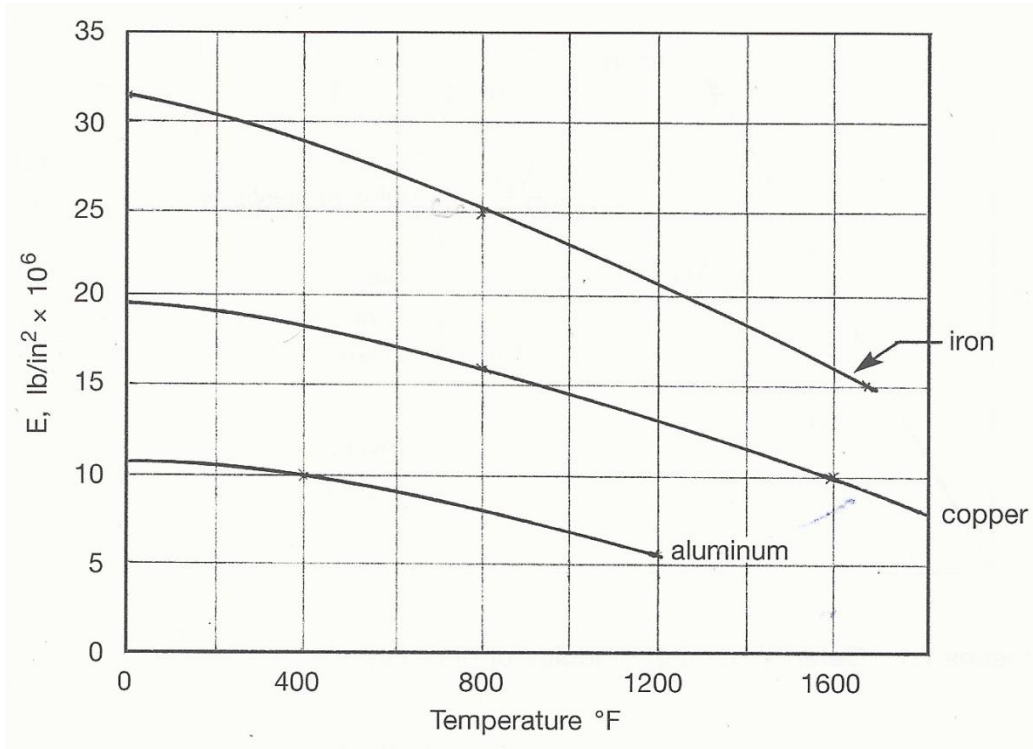
#### Determinación del módulo de elasticidad.

La pendiente de la línea representa la porción elástica del diagrama esfuerzo deformación (esfuerzo requerido para producir una unidad de deformación). El módulo uniaxial de elasticidad se refiere al módulo de Young y está representado por la letra E. El módulo tiene las mismas dimensiones que el esfuerzo [psi].

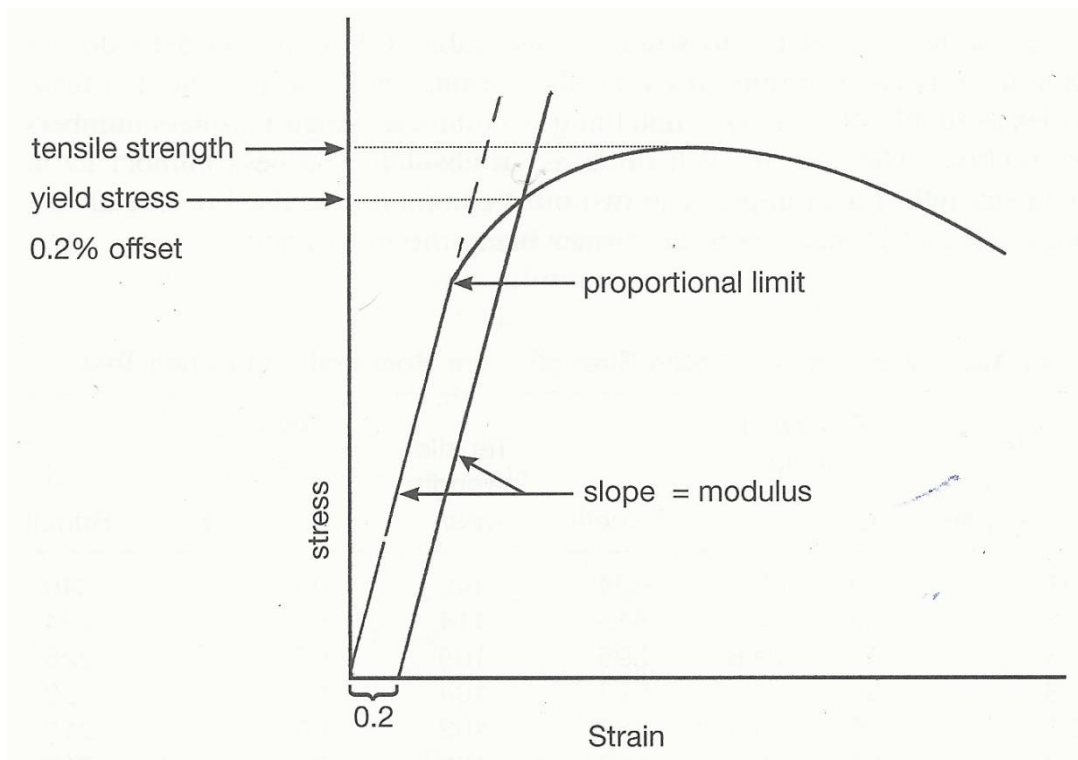
### 3.2.2. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN.

Es la máxima resistencia de un material a ser deformado en una prueba de tracción realizada hasta la ruptura. El esfuerzo es aplicado continuamente al cuerpo. Se busca un punto en el que el esfuerzo y la deformación no se comporten de manera lineal. Si la fuerza se retira la barra no regresara a su forma original tendrá una deformación permanente. La siguiente figura muestra una curva esfuerzo contra deformación de un metal fácilmente deformable.

CAPÍTULO 3. MATERIALES METÁLICOS. FUNDAMENTOS, PROPIEDADES FÍSICAS, MECÁNICAS Y CORROSIÓN. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DESTRUCTIVOS



**Módulo de Young contra temperatura para algunos metales comunes.**



**Curva típica de esfuerzo – deformación para un metal ductil.**



### **3.2.3. LÍMITE ELÁSTICO.**

Es el esfuerzo que da lugar a una deformación plástica totalmente desarrollada en alguna porción del material. Algunos tipos de materiales metálicos como recocidos o aceros al carbono normalizados, muestran una repentina transición al pasar del comportamiento elástico al plástico aplicando un determinado valor de esfuerzo. Esto proporciona un verdadero punto de rendimiento. Un fenómeno físico observable de como el esfuerzo puede ser determinado. En otros metales la transición es gradual. Para estos materiales la resistencia está definida como la cantidad de esfuerzo necesaria para causar una deformación plástica.

### **3.2.4. ELONGACIÓN.**

Es una medida de ductilidad, como medida del porcentaje de elongación. Incrementando la longitud del espécimen decrecerá el porcentaje de elongación para fracturar. Durante la prueba de elongación una fracción grande del espécimen es deformado. Una pequeña parte del espécimen contribuye a la deformación total. Es necesario comparar los porcentajes de elongación de varios metales.

### **3.2.5. DUREZA.**

La prueba de dureza es la propiedad mecánica más utilizada de todos los métodos disponibles. Esta prueba no requiere mucho tiempo y nos proporciona mucha información de la dureza relacionada con el esfuerzo. La prueba de dureza no tiene la precisión de otras pruebas. De varias pruebas de dureza y escalas de dureza disponibles todos tienen una cosa en común, sus números de dureza son relativos. No hay términos como dureza absoluta o límite elástico por ejemplo. Dos de las pruebas más comunes usadas para metales son la Rockwell y la Brinell.

La prueba básica Rockwell tiene un número de escalas que consisten en varios penetradores usados en combinación con una variedad de cargas. Las escalas empleadas más comunes son 1/16-pg diámetro de la bola de acero, 1/8-pg diámetro de la bola o un penetrador de diamante. Cada penetrador puede ser usado con una cara de 60, 100 o 150 [Kg], dando un total de nueve escalas comunes.

La escala Rockwell C, 150[Kg] con penetrador de pirámide de diamante, y la escala Rockwell A, 60[Kg] con penetrador de diamante, son usados normalmente para aceros y aleaciones duras similares.

Las medidas de la prueba de dureza Brinell resultan de la penetración de un acero duro o carburo de tungsteno, que ha sido apretado en la superficie bajo una carga específica usualmente 500 o 3000 [Kg].

CAPÍTULO 3. MATERIALES METÁLICOS. FUNDAMENTOS, PROPIEDADES FÍSICAS, MECÁNICAS Y CORROSIÓN. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DESTRUCTIVOS

Tensile strength $\times 10^3$ (psi)	Rockwell scale		Brinell	Tensile strength (psi)	Rockwell scale		Brinell
	C	A			B	F	
351	59	80.7	634	146	100		240
358	58	80.1	615	114	99		234
325	57	79.6	595	109	95		228
313	56	79	577	104	97		222
301	55	78.5	560	102	96		216
292	54	78.0	543	100	95		210
293	53	77.4	525	98	94		205
273	52	76.8	512	94	93		200
264	51	76.3	496	92	92		195
255	50	75.9	481	90	91		190
246	49	75.2	469	89	90		185
238	48	74.5	451	88	89		180
229	47	74.1	442	86	88	75.1	176
221	46	73.6	432	84	87		172
215	45	73.1	421	83	86		169
208	44	72.5	409	82	85		165
194	42	71.5	390	81	84		162
182	40	70.4	371	80	83		159
171	38	69.4	353	77	82		156
161	36	68.4	336	73	81		153
152	34	67.4	319	72	80		150
146	32	66.3	301	70	79		147
138	30	65.3	286	69	78		144
131	28	64.3	271	68	77		141
125	26	63.3	258	67	76		139
119	24	62.4	247	66	75	99.6	137
115	22	61.5	237	65	74	99.1	135
110	20	60.5	226	63	72	98.0	130
				61	70	96.8	125
				59	68	95.6	121

**Distintos resultados de pruebas Rockwell y Brinell.**

**3.2.6. DENSIDAD.**

La densidad de un metal es su masa por unidad de volumen. Las unidades utilizadas son [lb/pie<sup>3</sup>].

### 3.2.7. GRAVEDAD ESPECÍFICA.

Es la relación de la densidad de un metal con la densidad de un material de referencia, usualmente el agua a una presión y temperatura determinada. La gravedad específica es adimensional.

### 3.2.8. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.

Es la cantidad de flujo de calor bajo condiciones de estado estacionario a través de una unidad de área por unidad de gradiente de temperatura en la dirección perpendicular a esa área. El flujo de calor por la pared por unidad de área es llamado flujo térmico, J, es proporcional al gradiente térmico, siendo la constante de proporcionalidad la conductividad térmica.

$$J = K \frac{\Delta T}{\Delta X}$$

Donde la relación de incrementos  $[dT/dX]$  es el gradiente térmico (cambio de temperatura) por unidad de espesor X y K es la conductividad térmica. La conductividad térmica es expresada en BTU [pie/hora] °F en el sistema inglés de unidades, Kcal m/s m<sup>2</sup> °K en el sistema métrico. Estos valores son usados cuando se calcula el calor transferido a través de la superficie de un metal.

### 3.2.9. COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA.

Este coeficiente representa un cambio en dimensión por un cambio en unidad de temperatura. Los valores son usualmente entregados en [pg/pg] °F o [cm/cm] °C. La expansión térmica puede ser expresada como un cambio en el volumen, área o longitud siendo esta última la que más frecuentemente se utiliza.

Los datos de expansión térmica son reportados usualmente en tres figuras significativas y pueden ser medidos con exactitud por un número con significado.

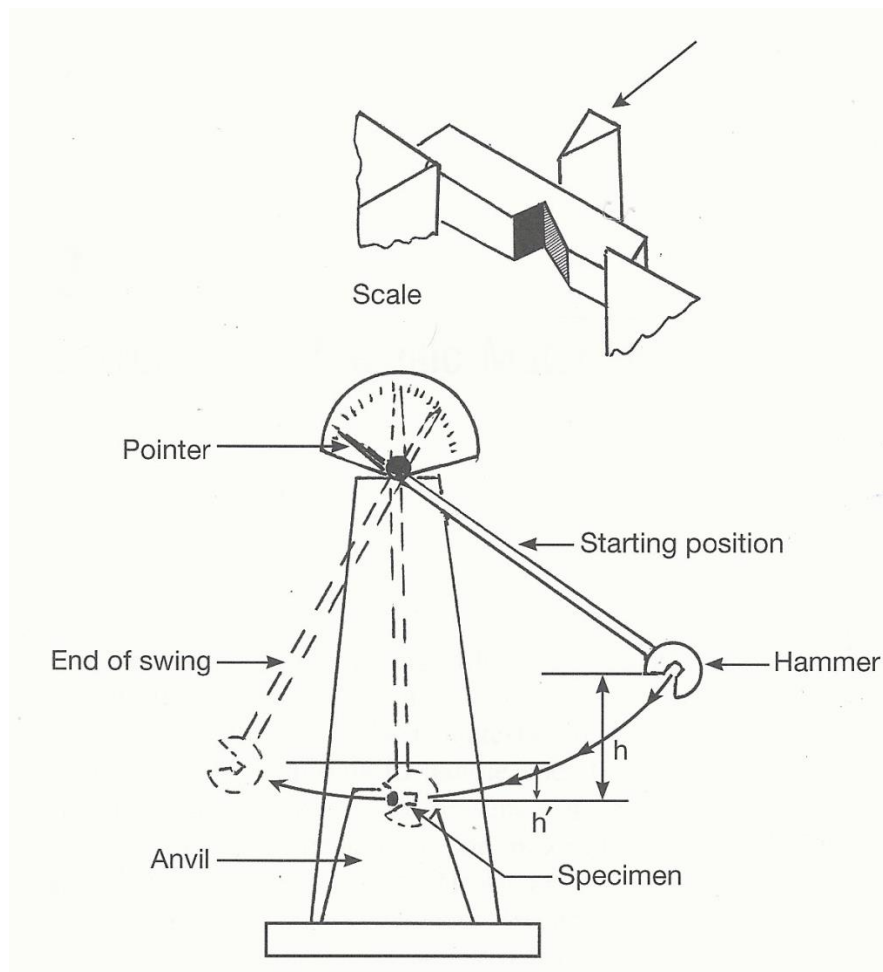
### 3.2.10. IMPACTO.

Las pruebas de impacto Charpy e Izod determinan la cantidad de energía absorbida en la deformación y fracturamiento de un espécimen estándar debido a una carga de impacto con un martillo.

La prueba Charpy es usada comúnmente para metales en América y la prueba de impacto Izod es utilizada para plásticos y metales en Europa. El espécimen es colocado en el lugar de impacto de la máquina y el martillo péndulo es puesto en una posición inicial impactando el espécimen y causándole una fractura. La fractura puede ser frágil o dúctil o una combinación de ambas.

Esta prueba provee datos para comparar la habilidad relativa de los materiales para resistir fallas frágiles cuando el servicio de temperatura decrece. Las pruebas de impacto pueden detectar la transición de temperatura.

Estas pruebas son un indicador de la dureza de los metales. Estas pruebas indican a que temperatura es seguro utilizar un material en particular. No provee datos que puedan ser usados para propósitos de diseño.



**Diagrama esquemático de la máquina para realizar la prueba de impacto Charpy.**

### 3.3. CORROSIÓN.

Una amplia variedad de metales y aleaciones está disponible: estas incluyen familias de aleaciones ferrosas y no ferrosas y numerosos metales puros. Con el paso del tiempo estos materiales han sido producidos por necesidad industrial, para trabajos en ambientes corrosivos y a temperaturas elevadas.

Se puede esperar que el material no sea completamente resistente a la corrosión. Sin embargo, cuando se incrementa la resistencia a la corrosión de un material su precio también incrementa. Esto no puede ser beneficioso para algún tipo de decisiones.

Aunque otras formas de ataque se pueden considerar en circunstancias especiales, un ataque uniforme se presenta en metales y aleaciones.

La corrosión es el ataque destructivo de un metal por medio de una reacción química o electroquímica. Deterioro por causas físicas no es llamado corrosión pero puede ser descrito como erosión y desgaste. En algunas ocasiones la corrosión puede ir acompañada con deterioro físico y puede describirse como erosión corrosión o desgaste corrosivo.

Metal	Density (g/cc)	$\frac{0.00144}{\text{density}} (\times 10^{-3})$	$696 \times \text{density}$
Aluminum	2.72	0.529	1890
Brass (red)	8.75	0.164	6100
Brass (yellow)	8.47	0.170	5880
Cadmium	8.65	0.167	6020
Columbium	8.4	0.171	5850
Copper	8.92	0.161	6210
Copper-nickel (70/30)	8.95	0.161	6210
Iron	7.87	0.183	5480
Duriron	7.0	0.205	4870
Lead (chemical)	11.35	0.127	7900
Magnesium	1.74	0.826	1210
Nickel	8.89	0.162	6180
Monel	8.84	0.163	6140
Silver	10.50	0.137	7300
Tantalum	16.6	0.0868	11550
Titanium	4.54	0.317	3160
Tin	7.29	0.198	5070
Zinc	7.14	0.202	4970
Zirconium	6.45	0.223	4490

*Note:* Multiply ipy by  $(696 \times \text{density})$  to obtain mdd. Multiply mdd by  $(0.00144/\text{density})$  to obtain ipy.

### Factores de conversión de pulgadas por año a miligramos por decímetro cuadrado por año.

El hierro y el acero son corroídos en presencia de oxígeno y agua. Si estos elementos están ausentes la corrosión no tiene lugar. La corrosión tiene lugar en el agua y si en ella esta disuelta algún tipo de ácido esta se incrementa en velocidad de ataque. La corrosión se retarda por el uso de capas protectoras. Alta alcalinidad del agua retarda el nivel de corrosión en las superficies de acero.

Hay nueve formas básicas de corrosión en materiales metálicos:

1. Corrosión Uniforme.
2. Corrosión intergranular.
3. Corrosión galvánica.
4. Corrosión en grietas.
5. Picaduras.
6. Erosión, corrosión.
7. Corrosión por esfuerzo y fisuramiento.
8. Corrosión biológica.
9. Lixiviación selectiva.

### **3.3.1. CORROSIÓN UNIFORME.**

Un metal resiste la corrosión por medio de una capa sobre su superficie. Esta película protectora se forma de manera natural cuando el metal es expuesto al aire por un periodo de tiempo. Se puede formar más rápidamente por medio de un tratamiento químico. Por ejemplo es ácido nítrico es aplicable al acero inoxidable austenítico y esto formará su película protectora. Esta capa protectora es una forma de corrosión pero funciona para detener futuras degradaciones del metal. No dará esto una resistencia general a la corrosión pues puede estar sujeto a un ataque químico. La inmunidad es función de la composición de la película, la temperatura y la agresividad de los químicos.

### **3.3.2. CORROSIÓN INTERGRANULAR.**

La corrosión intergranular es una corrosión que toma lugar en los límites del grano de un metal. Resulta en una pérdida de esfuerzo y ductilidad. El ataque es rápido y provoca fisuras dentro de la pieza metálica.

En el caso de los aceros inoxidables austeníticos el ataque es resultado de una precipitación de carburos durante los procesos de soldadura.

### **3.3.3. CORROSIÓN GALVÁNICA.**

Es comúnmente referida a un tipo de corrosión distinta y se encuentra en muchos lugares inusuales. Profesionalmente hablando causa muchos dolores de cabeza. La corrosión galvánica es experimentada en los hogares. Causa corrosión en las

CAPÍTULO 3. MATERIALES METÁLICOS. FUNDAMENTOS, PROPIEDADES FÍSICAS,  
MECÁNICAS Y CORROSIÓN. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DESTRUCTIVOS

estructuras de acero. Cuando dos materiales metálicos se encuentran eléctricamente conectados en una solución conductiva existe un potencial eléctrico. Esta diferencia de potencial proveerá una fuerte fuerza que disolverá el material más electronegativo. Los metales preciosos como el oro y el platino son más nobles. Esta es una de las razones por las cuales se utiliza zinc como material de sacrificio protegiendo los aceros inoxidable.

---

*Corroded end (anodic)*

Magnesium	Muntz metal
Magnesium alloys	Naval bronze
Zinc	Nickel (active)
Galvanized steel	Inconel (active)
Aluminum 6053	Hastelloy C (active)
Aluminum 3003	Yellow brass
Aluminum 2024	Admiralty brass
Aluminum	Aluminum bronze
Alclad	Red brass
Cadmium	Copper
Mild steel	Silicon bronze
Wrought iron	70/30 Cupro-nickel
Cast iron	Nickel (passive)
Ni-resist	Inconel (passive)
13% chromium stainless steel (active)	Monel
50/50 lead tin solder	18-8 Stainless steel type 304 (passive)
Ferretic stainless steel 400 series	18-8-3 stainless steel type 316 (passive)
18-8 stainless steel type 304 (active)	Silver
18-8-3 Stainless steel type 316 (active)	Graphite
Lead	Gold
Tin	Platinum
	<i>Protected end (cathodic)</i>

---

**Series galvánicas de metales y aleaciones.**

**3.3.4. CORROSIÓN EN GRIETAS.**

Es una corrosión del tipo localizada que ocurre dentro o adyacente a las grietas u orificios entre metal-metal o un metal-no metal. Resulta de diferencias locales en la concentración de oxígeno, se asocia con depósitos de metal en la superficie, bordos, juntas a lo largo de la pieza.

El material responsable de la formación de grietas no necesariamente tiene que ser un metal. Plástico, caucho, vidrio, concreto, asbesto y organismos vivos han sido reportados como la causa de la corrosión por fisuras. El ataque es progresivo y rápido y muy intenso. La protección se lleva a cabo mediante un diseño adecuado y se siguen procedimientos.

### 3.3.5. PICADURAS.

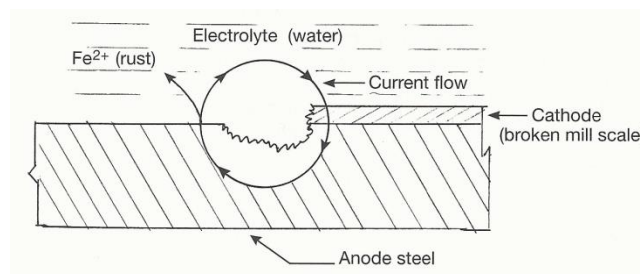
Es una forma de corrosión localizada que es responsable de las fallas del hierro y el acero en las estructuras hidráulicas. Resulta de la perforación de tubería por agua y el correspondiente proceso de oxidación. Las picaduras son causa principalmente de fallas estructurales y de su debilitamiento. La iniciación de una picadura está asociada con el desgaste de la película protectora en la superficie. El factor principal que causa y acelera la picadura es el contacto eléctrico entre metales distintos. Se tiene una diferencia de potencial que resulta en una corriente eléctrica que fluye a través del agua o a través del acero.

### 3.3.6. EROSIÓN, CORROSIÓN.

Resulta del movimiento de un corrosivo a lo largo de la superficie de un metal. El movimiento está asociado con el desgaste mecánico. El incremento en la localización de la corrosión resulta del proceso de erosión, usualmente relacionado con daño o remoción de la película protectora. El mecanismo regularmente es identificado por corrosión localizada. También se refiere este tipo de corrosión a un ataque por picadura y es causado por el contacto con líquidos a altas velocidades. La prevención puede completarse de la siguiente manera:

1. Reduciendo la velocidad.
2. Selección de un material resistente.
3. Diseño adecuado de los sistemas de tubería o de condensados.

Este tipo de corrosión ocurre también cuando materiales abrasivos destruyen o dañan la película protectora de la superficie del metal permitiendo así una acción rápida.



### Formación de grietas.



### 3.3.7. CORROSIÓN POR DESGASTE Y FISURAMIENTO.

Ciertas aleaciones pueden estar sujetas a este proceso o tipo de corrosión. Ocurre en puntos que se encuentran sometidos a esfuerzo. Usualmente el metal o aleación es libre de corrosión alrededor de toda su superficie. Pequeñas fisuras penetran a través de la superficie en los puntos de esfuerzo. Dependiendo del sistema aleado y combinación de corrosivos, el fisuramiento puede ser intergranular o transgranular. El rango de propagación es afectado por los niveles de esfuerzo, temperatura y concentración del corrosivo. Este tipo de ataque toma lugar en ciertos medios y todos los metales están sujetos a ella. Las condiciones necesarias para la corrosión por esfuerzo son:

1. Medio ambiente adecuado.
2. Esfuerzo de tracción.
3. Metal sensible.
4. Valores adecuados de pH y temperatura.

Alloy	Environment
Carbon steel	Anhydrous liquid ammonia, HCN, ammonium nitrate, sodium nitrite, sodium hydroxide
Aluminum base Magnesium base	Air, seawater, salt and chemical combination Nitric acid, caustic, HF solutions, salts, coastal atmospheres
Copper base	Primarily ammonia and ammonium hydroxide, amines, mercury
Martensitic and precipitation hardening stainless steels	Seawater, chlorides, H <sub>2</sub> S solutions
Austenitic stainless steels	Chlorides (organic and inorganic), caustic solutions, sulfurous and polythiuric acids
Nickel base	Caustic above 600°F (315°C) fused caustic, hydrofluoric acid
Titanium Zirconium	Seawater, salt atmosphere, fused salt FeCl <sub>3</sub> or CuCl <sub>2</sub> solutions

#### **Sistemas de aleaciones sujetos a la corrosión por esfuerzo y fisuramiento.**

El diseño de la protección de los metales y las aleaciones debería de reducir este tipo de corrosión al estudiar las zonas sujetas a mayor esfuerzo. Ejemplos de corrosión por fisuramiento son muy comunes en los aceros austeníticos en presencia de cloruros, soluciones causticas, entre otras.

### 3.3.8. CORROSIÓN BIOLÓGICA.

Las condiciones de corrosión pueden ser desarrolladas por microorganismos influyendo en las reacciones catódicas y anódicas. Esta actividad metabólica puede causar directa o indirectamente deterioro de un metal por medio del proceso de corrosión. Esta actividad puede:

1. Producir un ambiente corrosivo.
2. Crear celdas de concentración electrolítica en la superficie del metal.
3. Alterar la resistencia de la película protectora en las superficies.
4. Influencia sobre las reacciones catódicas y anódicas.
5. Alterar la composición del ambiente.

Este tipo de corrosión tiene la apariencia de picaduras, sin embargo, es conveniente primero identificar la bacteria. Se hace referencia a esto como corrosión microbiana.

### 3.3.9. LIXIVIACIÓN SELECTIVA.

Cuando un elemento es retirado de un sólido aleado por corrosión el proceso es conocido como lixiviación selectiva. Un ejemplo común es la remoción del zinc de un sistema aleado. La parte corroída generalmente mantiene su forma original y puede parecer sin daño. Sin embargo propiedades como la ductilidad se ven seriamente afectadas. Las condiciones que propician este tipo de corrosión son:

1. Alta temperatura.
2. Soluciones estancadas, especialmente ácidos.
3. Formación de una escala inorgánica de porosidad.

Materiales con un contenido de zinc igual o menor al 15% son usualmente inmunes.



**Ejemplo de corrosión.**

### **3.4. FRACTURAS.**

Fractura es la separación o fragmentación de un cuerpo sólido en dos o más partes bajo la acción de un esfuerzo. El proceso de fractura puede considerarse para hacerse de dos maneras, fractura inicial y la propagación de la misma. Las fracturas pueden clasificarse dentro de dos categorías, fractura dúctil y fractura frágil. La fractura dúctil está caracterizada por una apreciable deformación plástica anterior y durante la propagación de la fractura. Una apreciable cantidad de espesor deformado se presenta usualmente en la superficie de la fractura. La fractura frágil en metales está caracterizada por la propagación rápida de la fractura sin espesor deformado y con muy pequeña microdeformación. La tendencia a la fractura frágil se incrementa con el decremento de la temperatura, incremento en el rango de deformación y condiciones de esfuerzo triaxial. La fractura frágil es también de alto costo, ocurre sin peligro y usualmente produce consecuencias desastrosas.

#### **3.4.2. TIPOS DE FRACTURA EN METALES.**

Los metales pueden exhibir muchos diferentes tipos de fracturas, dependiendo del material, de la temperatura, estado de esfuerzo y rango de carga. Las dos categorías anteriores de fractura dúctil y frágil han sido consideradas también. Una fractura frágil está caracterizada por la separación normal debido al esfuerzo de tracción. No hay evidencia de deformación, aunque con el uso de rayos x es posible detectar una delgada capa de metal deformado en la fractura superficial.

Las fracturas dúctiles pueden tomar varias formas. Los especímenes de metales muy dúctiles policristalinos, como el oro y el plomo pueden estar dispuestos en un punto antes de su ruptura. En la fractura por tensión de metales moderadamente dúctiles la deformación plástica eventualmente produce una zona de transición.

Las fracturas son clasificadas con respecto a varias características. Tales como tensión a la fractura, modo cristalográfico de fractura y la apariencia de la fractura.

La fractura de cizalla ocurre como el resultado de un deslizamiento excesivo sobre un plano activo deslizante. Este tipo de fractura es promovida por esfuerzos de cizalla. Una fractura superficial puede ser causada por esfuerzos de cizalla a baja magnitud de apariencia gris y fibrosa, la rotura por fractura es brillante o granular. Las fracturas superficiales frecuentemente consisten de una mezcla de fracturas fibrosas y granulares, se acostumbra reportar el porcentaje de superficie representada por una de estas categorías.

Una fractura dúctil exhibe un grado considerable de deformación. Los límites entre la fractura dúctil y frágil son arbitrarios y dependen de las consideraciones que se

hagan. Por ejemplo una fundición nodular es dúctil cuando se compara con el hierro gris; aun esto sería considerado frágil cuando es comparado con un acero dulce.

### **3.4.3. FRACTURA BAJO ESFUERZOS COMBINADOS.**

El enfoque fenomenológico de la fractura le concierne a leyes microscópicas generales, las cuales describen la fractura de los metales bajo todos los posibles estados y esfuerzos. El problema de determinar las leyes generales para el esfuerzo de fractura de metales es bastante difícil, porque la fractura es muy sensible al esfuerzo plástico y a la temperatura. Podemos identificar tres dimensiones de fractura superficial en términos de tres esfuerzos principales.

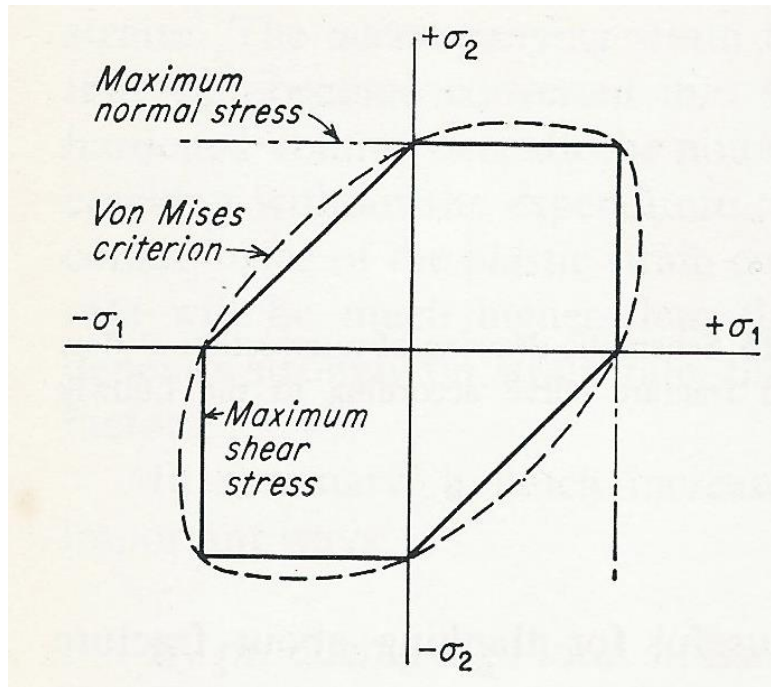
Muchos experimentos en el campo han sido bajo estados biaxiales de esfuerzo donde uno de los principales esfuerzos es cero. Los especímenes tubulares se encuentran sujetos al esfuerzo axial o a la carga de compresión. Esto hace difícil obtener datos en el caso de los metales dúctiles. La fractura está controlada por el esfuerzo principal. Datos disponibles sobre metales dúctiles como el aluminio y aleaciones de magnesio y acero indican que el criterio de esfuerzo máximo para la fractura resulta muy conveniente.

### **3.4.4. ALTA PRESIÓN HIDROSTÁTICA Y SU EFECTO SOBRE LA FRACTURA.**

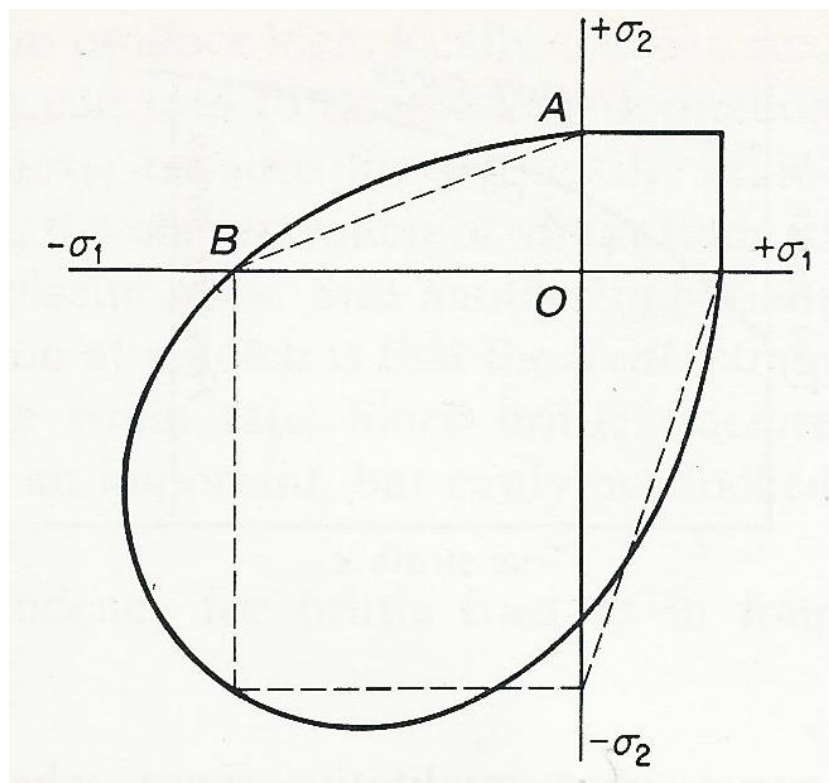
La importancia de los esfuerzos triaxiales en el inicio de la fractura frágil son de suma importancia. No debería de ser sorpresa el aprender el esfuerzo compresivo triaxial (presión hidrostática) resiste la fractura e incrementa la ductibilidad. La presión hidrostática es utilizada en muchas operaciones y puede producir una gran deformación plástica, esta deformación no sería posible en ausencia de una presión hidrostática alta.

El primer trabajo relacionado a este tema fue elaborado por Bridgman quién utilizó metales para pruebas de tensión con grandes presiones hidrostáticas superiores a 450,000 [psi]. Más recientemente las pruebas mecánicas a alta presión y estudios metalúrgicos de extrusión hidrostática han estado activas en cuanto a investigación. La presión hidrostática tiene efectos sobre la ductilidad. Los metales son normalmente dúctiles a presión atmosférica. El esfuerzo de compresión hidrostático actúa cerca de los poros de la fractura y hace que el proceso de propagación de la fractura sea más difícil.

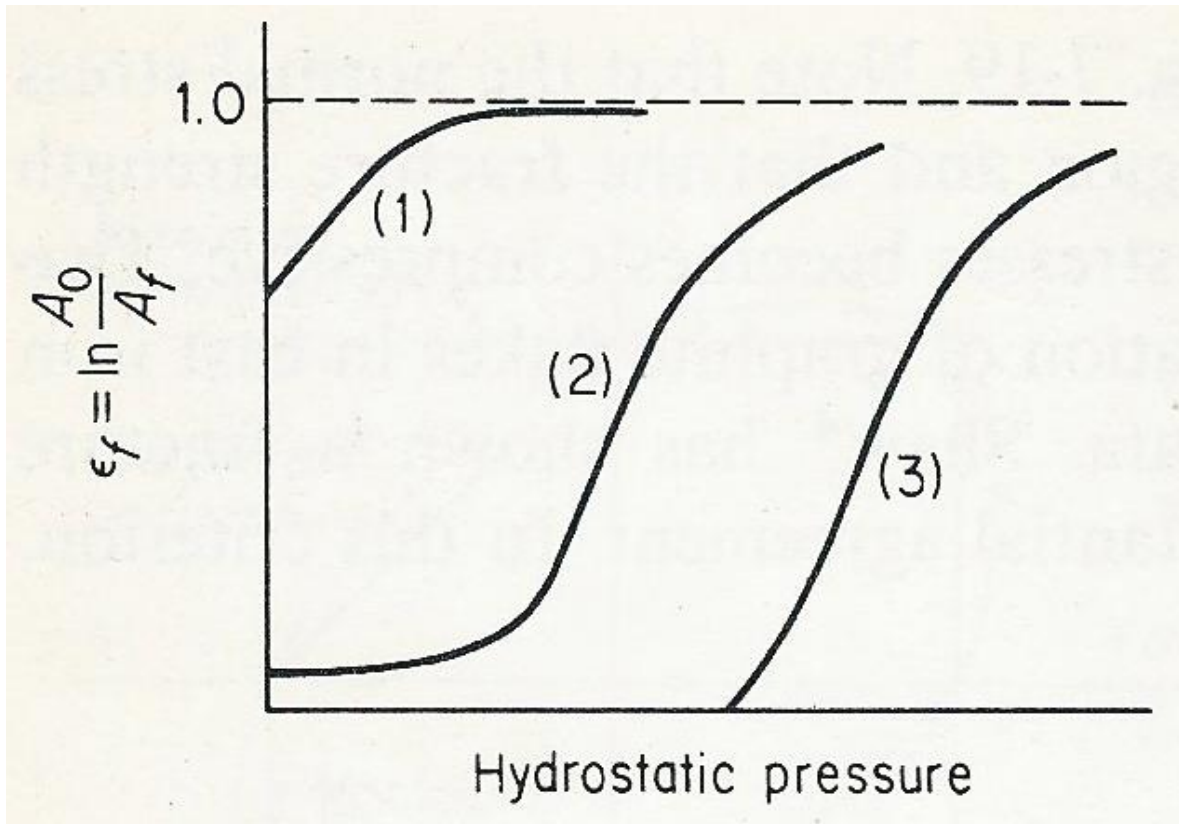
Estudios de fractura en aleaciones de acero han mostrado que la alta presión hidrostática no suprime la fractura de los carburos.



**Criterio de fractura propuesto para estado de esfuerzo biaxial en metales dúctiles.**



**Criterio de fractura biaxial para el hierro. Criterio para materiales frágiles.**



**Efecto de la presión hidrostática sobre la ductilidad en la fractura por tensión. En el caso 1 tenemos la ductilidad de un material normal. El caso 2 es un material de baja ductilidad. El caso 3 es un material frágil.**

### **3.5. CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS; UNA PROPIEDAD INHERENTE A LA ESTRUCTURA CRISTALINA.**

La solución de problemas asociados con un incremento en la resistencia de partes y estructuras de objetos en operaciones ingenieriles, cuando estos sufren desgaste y debilitamiento, puede comprenderse mejor con la premisa de que están siendo sometidos a campos de fuerza externos. Es importante el estudio de la naturaleza de las manifestaciones microscópicas de los materiales seguida de una detallada descripción de las propiedades macroscópicas. La ingeniería por fortuna nos provee estos dos caminos sin muchas complicaciones.

La fractura debería de ser comprendida como la etapa final de un proceso de cambio irreversible en el estado termodinámico de un sólido asociado a un decremento catastrófico en el número de enlaces atómicos en las secciones críticas de los miembros estructurales. El evento principal de la fractura es la transformación molecular y el cese de la interacción atómica. La desintegración atómica toma lugar bajo el efecto de diversos factores externos. Esto nos conduce a una dependencia térmica de todas las propiedades macroscópicas.

De acuerdo con lo anterior podemos distinguir tres mecanismos diferentes de fractura. El primero es a baja temperatura, se denomina fractura frágil. Tipo de fractura presente en metales y aleaciones.

El segundo mecanismo es a alta temperatura, de deformación, o dúctil. Se da bajo condiciones de excesiva energía térmica. Casi todos los materiales fallan bajo estas condiciones, es un proceso que está acompañado por altos niveles de deformación.

Finalmente el tercer tipo es la fractura por dislocación. Es la más característica en la mayoría de los materiales estructurales. Resultado de una carga externa distribuida no uniforme.

La concentración de esfuerzos se incrementa y el gradiente de temperatura causa flujos de calor locales. Durante la deformación este proceso muestra una propagación de dislocaciones. Si la temperatura localizada se incrementa irremediamente existirá un cambio en la dilatación del material lo que producirá una ruptura en los enlaces atómicos y en su estructura química repercutiendo directamente en su forma y aspecto físico.

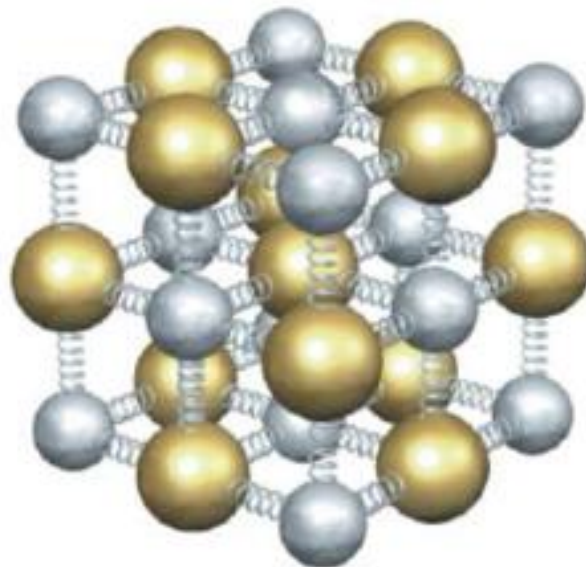
Estos mecanismos de fractura suelen actuar de manera separada, en intervalos de temperatura substanciales como una regla. Dependiendo de la temperatura el material puede seguir alguno de estos tres mecanismos de fractura. Sin embargo bajo ciertas condiciones de esfuerzo y temperatura, pueden ocurrir

simultáneamente, lo que conduce a consecuencias catastróficas. Por ejemplo la combinación de los dos primeros mecanismos puede conducir a que ocurran fallas en materiales de acero principalmente.

La fractura tipo Debye tiene dos etapas de desarrollo. La primera etapa es de orientación llamada también elástica o reversible. La segunda etapa es la destructiva o irreversible. La deformación comienza solo en la segunda etapa. En cualquier cuerpo sólido el estado de los enlaces atómicos está siempre caracterizado por la energía del espectro: el largo de la porción de componentes potenciales de energía en un momento dado, es muy probable que predomine el componente cinético provocando una fase de dilatación. La estructura cristalina de los materiales sólidos debe de cumplir con un arreglo determinado para que las propiedades del material no se vean afectadas por la variabilidad de distribución cristalina.

Si se cuenta con una distribución cristalina uniforme o semiuniforme las propiedades del material serán homogéneas y no existirá el esfuerzo localizado. Sin embargo cuando los arreglos cristalinos moleculares son irregulares en su distribución se tendrán distintos gradientes de esfuerzo localizado lo que causara grietas y diversas fracturas a lo largo del material o de la pieza en cuestión

El análisis físico químico previo a la elaboración, durante y después de la misma debe de ser desarrollado bajo normas específicas y vigentes que garanticen el buen funcionamiento operacional de las estructuras sólidas.



**Ejemplo de estructura cristalina.**



### 3.6. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DESTRUCTIVOS.

A la hora de trabajar un material debemos de conocer sus propiedades mecánicas, y saber que estas propiedades mecánicas varían en función de la velocidad de deformación y de la temperatura a que se encuentra el cuerpo a ensayar. Los ensayos utilizados para medir estas propiedades mecánicas son los ensayos destructivos de propiedades mecánicas, que determinan las características mecánicas de los materiales en condiciones de esfuerzo y deformación de las piezas o elementos que estarán sometidos durante su funcionamiento real.

Un ensayo destructivo es aquel que deteriora la pieza que inspecciona, pero dependiendo del tipo de ensayo, la pieza experimenta desde una leve marca, a una deformación permanente o incluso su rotura parcial o total.



Las propiedades mecánicas las definiremos como la forma en que un material soporta fuerzas aplicadas, incluyendo fuerza de tensión, compresión, impacto, cíclicas o de fatiga o fuerzas a altas temperaturas. Las principales propiedades son: dureza, tenacidad, fragilidad, cohesión, elasticidad, plasticidad, resiliencia y fatiga.

. Dureza: Es la resistencia que ponen los cuerpos a ser rayados o penetrados por otros.

. Tenacidad: Es la resistencia que tiene un cuerpo a la rotura.

. Fragilidad: Propiedad contraria a la tenacidad, es la facilidad de romperse de un cuerpo.

. Cohesión: Es la resistencia que oponen los átomos de los materiales a separarse entre sí.

### CAPÍTULO 3. MATERIALES METÁLICOS. FUNDAMENTOS, PROPIEDADES FÍSICAS, MECÁNICAS Y CORROSIÓN. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DESTRUCTIVOS

- . Elasticidad: Es la propiedad que tiene un cuerpo de ser deformado por fuerzas exteriores, y al cesar dichas fuerzas, este recobra su forma original.
- . Plasticidad: Es la capacidad de los cuerpos para adquirir deformaciones permanentes sin llegar a la rotura. (Ductilidad y maleabilidad)
- . Resiliencia: Es la energía que absorbe una probeta por unidad de sección antes de romperse.
- . Fatiga: Es la capacidad que tiene un cuerpo de resistir esfuerzos repetitivos y variables en magnitud y sentido. Para el análisis de las propiedades mecánicas de los materiales podemos utilizar tres tipos de cargas diferentes: estáticas, dinámicas o cíclicas.
- . Carga estática: Es aquella que es invariable o su magnitud crece de forma lenta.
- . Carga dinámica: Es aquella que actúa de forma inmediata o aumenta su magnitud de forma rápida.
- . Carga cíclica o alternada: Es aquella que cambia de dirección o magnitud de forma cíclica o alternada.

Los ensayos destructivos se utilizan normalmente para:

1. Efectuar un control de calidad durante el proceso de fabricación.
2. Demostrar que este cumple con la normativa vigente y/o estándares sectoriales que le son aplicables.
3. Determinar el tipo de material, tratamiento o composición más apropiados.
4. Contrastar los modelos de simulación utilizados para el diseño de dicho producto.
5. Investigar nuevos procesos de fabricación.
6. Estudiar nuevos tipos de materiales.
7. Resolver problemas o incidencias aparecidas durante el uso de los productos y no previstas durante el diseño del mismo.
8. Determinar las propiedades mecánicas y de conformación de los materiales y fijar su utilización.
9. Conocer experimentalmente las características técnicas del producto más allá de las incertidumbres obtenidas mediante los procesos de diseño habituales.

### CAPÍTULO 3. MATERIALES METÁLICOS. FUNDAMENTOS, PROPIEDADES FÍSICAS, MECÁNICAS Y CORROSIÓN. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DESTRUCTIVOS

Algunas de las ventajas que tienen los ensayos destructivos son:

1. Reproducir condiciones del uso de los productos con el objeto de resolver problemas de funcionamiento de los cuales no se conoce su origen.
2. Calibración de los modelos de comportamiento utilizados para simulación de componentes y desarrollo de productos.
3. Obtención de información detallada acerca del comportamiento estructural de un elemento o producto y extracción de conclusiones de sus factores críticos.

Dentro de los ensayos destructivos de propiedades mecánicas podemos diferenciar: los ensayos destructivos estáticos, ensayos destructivos dinámicos y los ensayos tecnológicos.

Los ensayos destructivos estáticos tienen la carga estática o progresiva.

Los ensayos destructivos dinámicos su carga no es estática ni progresiva.

Los ensayos tecnológicos se utilizan para comprobar si un material es útil o no para una aplicación en concreto, cuando por medio de los ensayos científicos no es posible realizar estas comprobaciones o resultan demasiado caras.



**Tubería de perforación.**

## CAPÍTULO 3. MATERIALES METÁLICOS. FUNDAMENTOS, PROPIEDADES FÍSICAS, MECÁNICAS Y CORROSIÓN. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DESTRUCTIVOS

Dentro de los ensayos estáticos tenemos:

- Dureza.
- Tensión.
- Compresión.
- Flexión.
- Torsión.

Dentro de los ensayos dinámicos tenemos:

- Dureza.
- Impacto.
- Fatiga.

### **3.6.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES.**

La industria moderna ha cimentado su desarrollo en un conjunto de reglas que determinan las características que deben de cumplir los materiales, los productos, la maquinaria o los procedimientos.

Dichas reglas implementadas adecuadamente, constituyen los estándares o normas industriales, cuya aplicación ha sido factor determinante del desarrollo científico y tecnológico, solo alcanzado por algunos países de nuestro planeta.

Las normas establecen con precisión el reconocimiento de calidad, estimulando la confianza del consumidor, dan prestigio al fabricante, fomentan la organización de estructuras sólidas para el incremento de una producción masiva, simplificando los procesos y aumentando la eficiencia del trabajo, reducen los costos y aumentan los beneficios.

En general se dice que una norma (una regla) es la que determina dimensiones, composición y demás características que debe poseer un material, producto u objeto industrial; establecido de común acuerdo con la autoridad gubernamental competente y los principales usuarios. La cual se usará como base comparativa durante un tiempo determinado.

### **3.6.2. NORMAS: A.I.S.I., A.S.M.E., A.S.T.M., A.W.S., D.I.N., S.A.E., A.S.N.T., D.G.N.**

En los Estados Unidos de América se establecieron las bases para el desarrollo industrial por medio de asociaciones o sociedades, las cuales son agrupaciones

### CAPÍTULO 3. MATERIALES METÁLICOS. FUNDAMENTOS, PROPIEDADES FÍSICAS, MECÁNICAS Y CORROSIÓN. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DESTRUCTIVOS

científicas y técnicas. Científicos expertos que a través de comités o grupos de trabajo desarrollan las normas, teniendo por objetivo suministrar los conocimientos, experiencias y habilidades de sus miembros relativas a los materiales, productos, componentes, sistemas, servicios y múltiples actividades, de tal manera que resulten efectivamente útiles a la industria, gobierno, instituciones educativas, profesionales y público en general, a través de acciones cooperativas y especializadas. A continuación se mencionan algunas:

A.I.S.I.- (American Iron and Steel Institute) Instituto Americano del Hierro y el Acero.

A.S.M.E.- (American Society of Mechanical Engineers) Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos.

A.S.T.M.- (American Society of Testing Materials) Sociedad Americana para Pruebas de Materiales.

A.W.S.- (American Welding Society) Sociedad Americana de Soldadura.

S.A.E.- (Society American of Engineers) Sociedad Americana de Ingenieros.

A.N.S.I.- (American National Standards Institute) Instituto Nacional Americano de Estándares.

#### **3.6.3. DEPENDENCIAS NACIONALES E INTERNACIONALES.**

Debido a la necesidad de producir materiales y equipos de la mejor calidad que sean competitivos mundialmente. Cada país cuenta con un departamento gubernamental de normalización, como ejemplo tenemos:

<b>D.G.N.- Dirección General de Normas</b>	<b>MÉXICO</b>
<b>A.N.S.I.- Instituto Nacional Americano de Estándares</b>	<b>E.U.A.</b>
<b>D.I.N.- Normas Industriales de Alemania</b>	<b>ALEMANIA</b>
<b>A.B.N.T.- Asociación Brasileña de Normas Técnicas</b>	<b>BRASIL</b>
<b>N.C.- Dirección de Normas y Metrología</b>	<b>CUBA</b>
<b>B.S.- Instituto Británico de Estándares</b>	<b>INGLATERRA</b>
<b>E.N.- Comité Europeo de Normalización</b>	<b>EUROPA</b>

A nivel mundial tenemos varias organizaciones y/o comisiones como:

**I.S.O.- Organización Internacional de Estandarización.**

**I.E.C.- Comisión Electrotécnica Internacional.**

**C.E.E.- Comunidad Económica Europea.**

**C.O.P.A.N.T.- Comisión Panamericana de Normas Técnicas.**

### **3.6.3.1. N.O.M. (Norma Oficial Mexicana)**

La DGN de la secretaria de comercio e industria de México, emite las normas y recomendaciones para los fabricantes y usuarios; además cualquier fabricante de algún producto puede conseguir un número NOM, con el cual se indica que el material o producto cubre una serie de normas.

El ostentar el número NOM incrementa la confiabilidad del usuario al adquirir dicho producto.

En ingeniería se utilizan las normas NMX (Norma Mexicana). Todas las normas contienen las siglas iniciales seguidas de un guión con una letra mayúscula, seguida de un guión y un número progresivo continuo, con un guión y el año en que se emite o actualiza.

1. NORMA INDUSTRIAL.
2. NORMA DE PROCESO.
3. NORMA DE MATERIAL.
4. NORMA DE CALIDAD.
5. NORMA DE SEGURIDAD.
6. NORMA DE DIBUJO.

### **3.6.3.2. A.S.T.M. (Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales)**

De gran interés o importancia para quienes efectúan ensayos o inspección de materiales la ASTM desempeña doble función:

a) Normalización de las especificaciones y los métodos de prueba o ensayo de los materiales, los cuales se realizan por comités permanentes.

b) Mejoramiento de los materiales de ingeniería, la cual se logra a través de investigaciones de comités y miembros individuales, los resultados obtenidos se hacen públicos en la revista de la asociación.

### **3.6.3.3. I.S.O. (Organización Internacional de Estándares)**

La DGN pertenece a esta organización y toda la documentación que emite ISO puede ser adaptada por el país. En México la DGN adaptó las normas ISO 9000 y les puso el distintivo **NMX - CC - número progresivo – año de emisión** y las siglas **IMNC**.

**NOTA:** En este trabajo se estudiarán los siguientes ensayos destructivos ya que son los más comunes en materiales metálicos utilizados en la industria petrolera.

. **Prueba de Tensión.**

. **Prueba de Compresión.**

. **Prueba de Torsión.**

. **Prueba de Dureza.**

**CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN**

**CAPÍTULO 4**

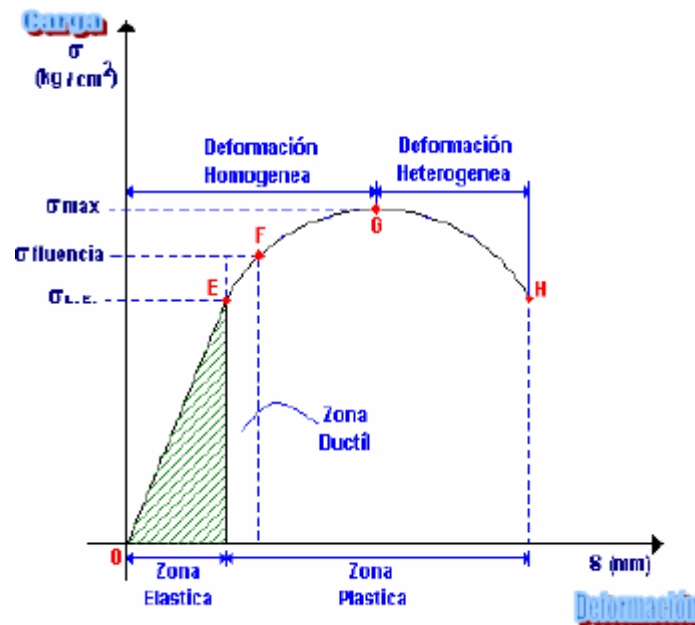
**MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL  
ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN**



## 4.1. PRUEBA DE TENSIÓN.

### 4.1.1. CURVA DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN NOMINAL.

La prueba de tensión es sumamente utilizada para dar información básica de diseño sobre la resistencia de los materiales y como una prueba aceptable para la especificación de materiales. En la prueba de tensión un espécimen es sujetado a un incremento de fuerza de tensión uniaxial mientras se observa simultáneamente la elongación del espécimen. Por medio de esta muestra se determinan las propiedades del material en la cual se busca determinar hasta su última resistencia implicando con esto su deterioro o destrucción.



Curva de carga contra deformación.

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

**Sección OE.** Línea recta que indica el alargamiento proporcional a la carga aplicada. Entre estos límites la pieza recuperará su tamaño y forma original cuando se retire la carga, por esto la zona se llama elástica.

**Sección EF.** Muestra un alargamiento grande en comparación a la carga aplicada. La zona se denomina dúctil. En el punto F llamado de cedencia o de fluencia nos indica que cargas adicionales causarán deformaciones mayores hasta que llegue al punto máximo de carga que es el G.

**Sección FG.** Representa la zona plástica. Al rebasar el punto G que representa la carga máxima o esfuerzo máximo se presenta la estricción (cuello de botella). La probeta sufre mayor deformación aunque la carga decrece automáticamente debido a que no encuentra resistencia, la deformación es heterogénea hasta llegar a la ruptura H.

#### 4.1.2. DEFORMACIÓN ELÁSTICA Y PLÁSTICA.

Cuando se aplica una fuerza a una probeta los enlaces entre los átomos se estiran y el material se alarga, cuando se retira la fuerza los enlaces regresan a su longitud y la probeta recobra su tamaño normal, esta deformación se denomina elástica.

Si incrementamos la fuerza el material se comporta de manera plástica, esto es, se producen dislocaciones y ocurre un deslizamiento, por lo tanto, al retirar la fuerza, el material ya no recobra sus dimensiones y forma originales; esto es deformación plástica permanente.

#### 4.1.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD O MÓDULO DE YOUNG.

Es la primera parte del ensayo de tensión, el material se deformará elásticamente, para metales la máxima deformación elástica es menor a 0.2%.

Por medio de la Ley de Hooke se puede calcular:

$E =$  modulo de Elasticidad (PSI,  $\text{kg}/\text{cm}^2$ , Pa, Mpa)

$\sigma =$  Esfuerzo.

$\epsilon =$  Deformación.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{PSI (lb/pulg}^2\text{), kg/cm}^2\text{, Pa, Mpa}$$

$\sigma =$  SIGMA

$\epsilon =$  EPSILÓN

Este módulo está relacionado con la fuerza de enlace entre los átomos que forman el metal.

#### 4.1.4. ESFUERZO DE CEDENCIA (FLUENCIA).

Es aquel en el que el deslizamiento se hace notorio, este esfuerzo provoca deformación plástica. En cálculos se considera en área original.

#### 4.1.5. ESFUERZO DE CEDENCIA O CONVENCIONAL.

En algunos materiales el esfuerzo en el cual cambia de comportamiento elástico a plástico no se detecta con facilidad. Esto se determina a partir del diagrama esfuerzo-deformación.

#### 4.1.6. ESFUERZO A LA TENSIÓN.

Es la resistencia máxima al material observada en la curva carga deformación como el punto más alto. La resistencia máxima a la tensión no es tan utilizada en el diseño de ingeniería para aleaciones dúctiles, puesto que tiene lugar demasiada deformación plástica antes de que se alcance. Sin embargo la resistencia máxima a la tensión puede dar alguna indicación de la presencia de defectos. Si el material contiene porosidades o inclusiones, estos defectos pueden causar un decremento mayor al normal de la resistencia máxima del material.

$$\sigma_t = \frac{P}{A_1}$$

$\sigma$  = Es la letra griega llamada sigma = esfuerzo a la tensión

$P$  = Carga máxima

$A_1$  = Área inicial

#### 4.1.7. ESFUERZO REAL O DEFORMACIÓN REAL.

La reducción del esfuerzo más allá del punto de resistencia a la tensión ocurre debido a la disminución de resistencia que opone el material, en este caso se utiliza el área final en los cálculos definiendo el esfuerzo real y la deformación real como sigue:

$$\text{Esfuerzo Real } \sigma = \frac{F}{A_f}$$

$$\text{Deformación Real } \delta = \ln\left(\frac{A_i}{A_f}\right)$$

$\delta$  = Es la letra griega delta minúscula  
 $\ln$  = Logaritmo natural

$A_i$  ó  $A_f$  = Área Instantánea donde se aplica la fuerza

La expresión  $\ln\left(\frac{A_i}{A_f}\right)$  debe de ser expresada después de indicada la extricción o cuello de botella, esto sucede poco antes de la ruptura (para medir el diámetro final se toma, la probeta quebrada y se efectúa la medición).

#### 4.1.8. DUCTILIDAD.

Mide el grado de deformación que un material puede soportar sin romperse, existen dos procedimientos para determinar la ductilidad.

1. Se miden las distancias entre las marcas hechas a las probetas antes y después del ensayo. El porcentaje de alargamiento o de elongación es la distancia que se estira la probeta antes de la ruptura.

$$\% \varepsilon = \left(\frac{L_f - L_i}{L_i}\right)(100)$$

2. Consiste en medir el área de la sección transversal en el punto de fractura obteniendo el porcentaje de reducción o disminución del área de la sección transversal que sufrió deformación durante el ensayo llegando generalmente a la ruptura.

$$\% \theta = \left(\frac{A_i - A_f}{A_i}\right)(100)$$

#### 4.1.9. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES, ESFUERZOS UNITARIOS, ÍNDICES DE DUCTILIDAD Y MODULOS.

Las propiedades mecánicas de los metales y aleaciones son importantes en ingeniería, podemos obtenerlas mediante un ensayo de tensión y son las siguientes:

CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| a) Esfuerzo en el límite Elástico | i) Deformación total                   |
| b) Modulo elástico                | j) deformación unitaria longitudinal   |
| c) Resilencia                     | k) % de alargamiento o elongación      |
| d) Modulo de resilencia           | l) Deformación unitaria transversal    |
| e) Esfuerzo de fluencia           | m) % de estriccion o reducción de área |
| f) Esfuerzo máximo a la tensión   | n) % de carbono                        |
| g) Esfuerzo a la ruptura          | o) Tenacidad                           |
| h) Esfuerzo real                  | p) Modulo de tenacidad                 |

A continuación se indican todas las fórmulas que se utilizan en un ensayo de tensión:

- a) Esfuerzo en el límite elástico.

$$\sigma = \frac{P_{L.E.}}{A_1} \quad \text{Kg. /cm}^2, \text{ lb/plg}^2$$

$P_{L.E.}$  = Carga en el Limite Elástico.  
 $A_1$  = Área original o inicial de la probeta.

- b) Módulo de elasticidad.

$$E = \frac{PL_i}{\delta A_1} \quad \text{Kg. /cm}^2, \text{ lb / plg}^2$$

$P$  y  $\delta$  = Se toman los valores de la zona elástica.  
 $L_i$  y  $A_1$  = Son las medidas iniciales.

- c) Resilencia: Capacidad del material de absorber energía hasta el límite elástico.

$$R = \frac{1}{2} P\delta \quad \text{Kg-mm, lb-pulg.}$$

$\delta$  = Deformación correspondiente a la última carga  $P$  dentro del Limite Elástico

- d) Módulo de resilencia.

$$M = \frac{R}{V_1} = \frac{R}{A_1 L_1} \quad \text{Kg - cm/cm}^3, \text{ lb - plg/plg}^3$$

$L_1$  y  $A_1$  = Son las medidas iniciales.

CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

e) Esfuerzo de cedencia (fluencia).

$$\sigma_{CED} = \frac{P_{CED}}{A_1}$$

En general el esfuerzo de cedencia siempre esta abajo del 60% del esfuerzo máximo.

f) Esfuerzo máximo.

$$\sigma_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{A_1}$$

g) Esfuerzo de ruptura.

$$\sigma_{RUP} = \frac{P_{RUP}}{A_1}$$

h) Esfuerzo real.

$$\sigma_R = \frac{P_{RUP}}{A_f} \quad \text{kg /cm}^2, \text{ lb./plg}^2$$

$A_f$  = Área reducida, área en la ruptura

i) Deformación total.

$$\delta = L_f - L_1 \quad \text{mm, cm, plg}$$

$L_1$  = Longitud original

$L_f$  = Después de la ruptura, para obtener  $L_f$  es necesario juntar los dos tramos y medir entre las marcas.

j) Deformación unitaria longitudinal.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_1}$$

$\delta$  = es la deformación total

CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

k) Porcentaje de alargamiento o elongación.

$$\% \varepsilon = \left( \frac{\delta}{L_1} \right) (100)$$

l) Deformación unitaria transversal.

$$\theta = \frac{A_1 - A_f}{A_1} \quad (\text{es adimensional})$$

m) Porcentaje de estricción o reducción del área.

$$\% \theta = \left( \frac{A_1 - A_2}{A_1} \right) (100)$$

n) Porcentaje de carbono.

$$\% C = \frac{\sigma_t - 40000}{100000}$$

$\sigma_t$  = Esfuerzo a la tensión calculado con la Ley de Dohmer en lb. / pulg<sup>2</sup>

$$40000 = \text{esfuerzo del hierro puro lb / pulg}^2$$

o) Tenacidad: Capacidad del material de absorber energía hasta la ruptura (área bajo la curva carga-deformación). La capacidad de un material de resistir cargas de impacto, a menudo se le conoce como tenacidad del material, para el cálculo se requiere trazar la gráfica.

$$T = P\delta = R + A_A + A_B + A_C + \dots + A_N \quad \text{Kg.*mm, Kg.*cm., lb.*plg}$$

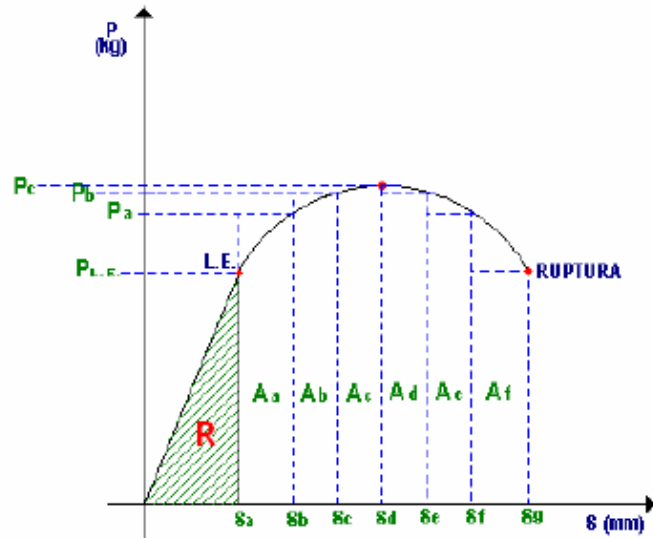
R = Resiliencia

Aa = Pa ( $\delta b - \delta a$ )

Ab = Pb ( $\delta c - \delta b$ )

Ac = Pc ( $\delta d - \delta c$ )

CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN



p) Módulo de tenacidad.

$$M_T = \frac{T}{V_1} = \frac{T}{A_1 L_1} \text{ Kg-mm/mm}^3, \text{ lb.-plg/plg}^3$$

A = Área inicial en mm<sup>2</sup> ; L = longitud inicial en mm

#### 4.1.10. ENSAYO ESTÁTICO DE TENSIÓN.

Las normas que rigen este ensayo son **NMX-B-172-1988-SCFI** (Métodos de prueba mecánicos para productos de acero doblado, dureza Brinell, Rockwell, de impacto Charpy) y la **NMX-B-310-1981-SCFI** (Método de prueba a la tensión para productos de acero).

El término de ensayo de tensión, se refiere a ensayos en los cuales previamente una probeta preparada es sometida a una carga monoaxial gradualmente creciente (estática), hasta que ocurre la falla. En un ensayo de tensión simple la operación se realiza sujetando los extremos de la probeta, los cuales se irán separando conforme se incrementa la carga. La probeta se alarga en direcciones paralelas a la carga. Este tipo de ensayo se aplica a metales, aleaciones no ferrosas, fundidas, láminas, forjados, polímeros, etc.

#### 4.1.11. REQUERIMIENTOS PARA PROBETAS DE TENSIÓN.

Se acostumbra usar para tipos particulares de ensayos, probetas que tengan sección transversal redonda, cuadrada o rectangular.

Una probeta debe de ser simétrica con respecto a su eje longitudinal, para evitar flexión durante la aplicación de la carga.

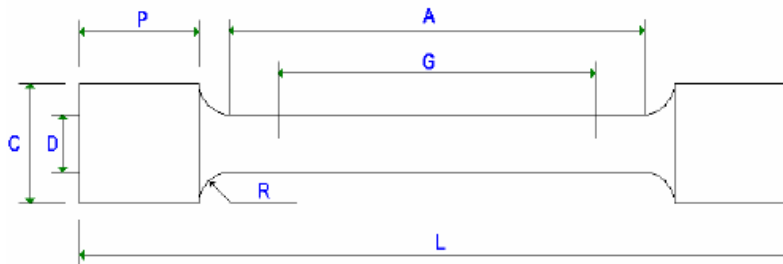


CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

Las probetas circulares según la norma deben de cumplir con los siguientes parámetros.

**DIMENSIONES GENERALES:**

	NORMAL	MAS PEQUEÑAS PROPORCIONALES A LA NORMA			
G = Longitud Calibrada	50 ± 0.10mm	35 ± 0.10	25 ± 0.10mm	16 ± 0.10mm	10 ± 0.10mm
D = Diámetro Seccion Calibrada	13 ± 0.25mm	8.8 ± 0.18mm	6.0 ± 0.10mm	4.0 ± 0.8mm	2.5 ± 0.05mm
R = Radio zona de Transicion	10mm	6mm	5mm	4mm	2mm
A = Longitud de la Seccion Reducida	60mm	45mm	32mm	19mm	16mm
L = Longitud total Aproximada	125mm	DEBE PENETRAR 2/3 O MAS EN LA MORDAZA			
P = Longitud zona de Sujecion	35mm APROX.				
C = Diámetro zona de Sujecion	20mm				



**4.1.12. FRACTURAS.**

Las fracturas por tensión se clasifican en cuanto a su forma, textura y color. Con respecto a su forma pueden ser simétricas, de cono o cráter, planas o rectangulares, por su textura pueden ser sedosas, grano fino, grano grueso, granular, fibrosas o astilladas. Por su color pueden ser cristalinas, vidriosas o mate.

**Como ejemplo tenemos que una probeta de acero suave cilíndrico presenta un tipo de fractura de cono y cráter, de textura SEDOSO. El Hierro forjado presenta una fractura DENTADA y FIBROSO mientras que la fractura típica del hierro fundido es GRIS, PLANO Y GRANULADA.**

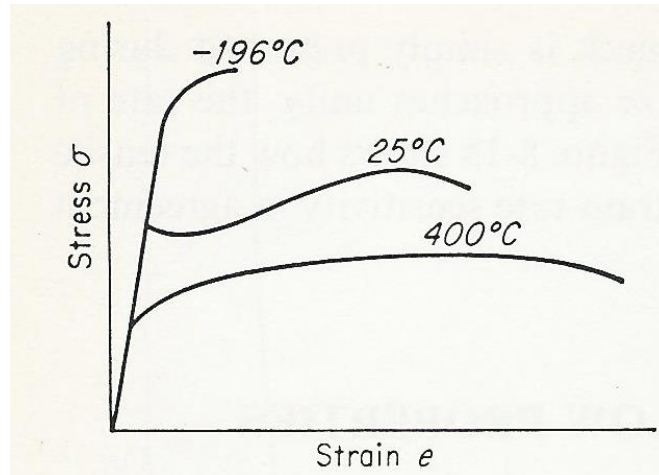
**4.1.13. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LAS PROPIEDADES DE FLUJO.**

La curva de esfuerzo deformación y las propiedades de esfuerzo y de fractura derivadas de la prueba de tensión son fuertemente dependientes de la temperatura a la que fue realizada la prueba. En general el esfuerzo decrece y la ductilidad se incrementa como la temperatura en la prueba se incrementa. Sin embargo, los cambios estructurales como la precipitación o recristalización pueden ocurrir en ciertos rangos de temperatura alterando el comportamiento general.

## CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

El cambio con la temperatura en la curva de esfuerzo deformación se muestra sistemáticamente en la siguiente figura. Se muestra la variación del esfuerzo de tensión con la temperatura.

La mejor manera de comparar las propiedades mecánicas de diferentes materiales a varias temperaturas es en términos de la relación de temperatura en el punto de fusión, en grados kelvin. Esta relación se refiere a la temperatura homóloga.



### **Cambios en la curva de esfuerzo deformación del acero con la temperatura.**

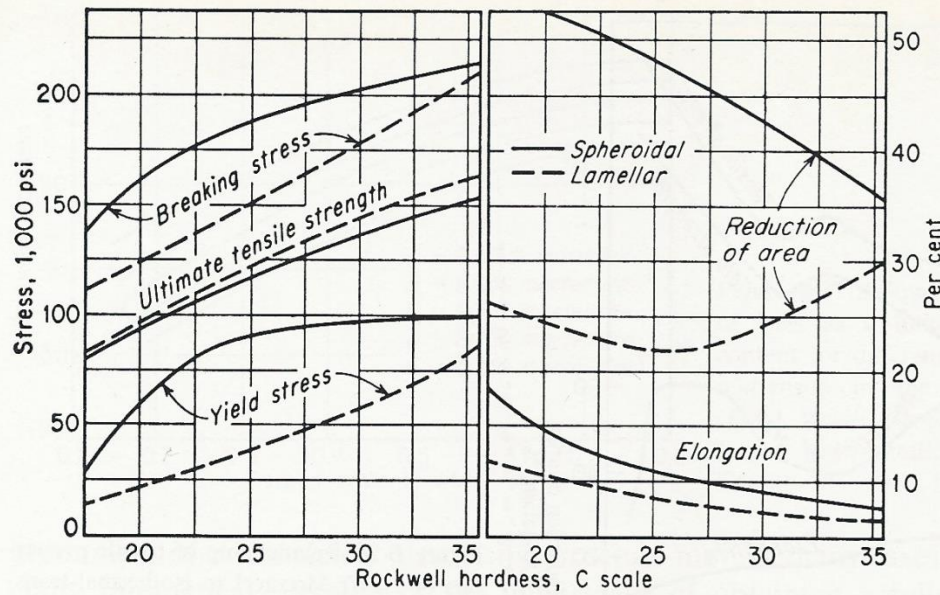
#### **4.1.14. PROPIEDADES DE TENSIÓN EN EL ACERO.**

La importancia de los materiales ferrosos es muy grande. Muchos de los trabajos de ingeniería son realizados con estos materiales y es necesario analizar sus propiedades de tensión, composición y microestructura. Desde un punto de vista científico los sistemas hierro carbono exhiben una gran versatilidad en estructura y propiedades. Esto ha sido claramente demostrado, la estructura y las propiedades del acero pueden ser controladas.

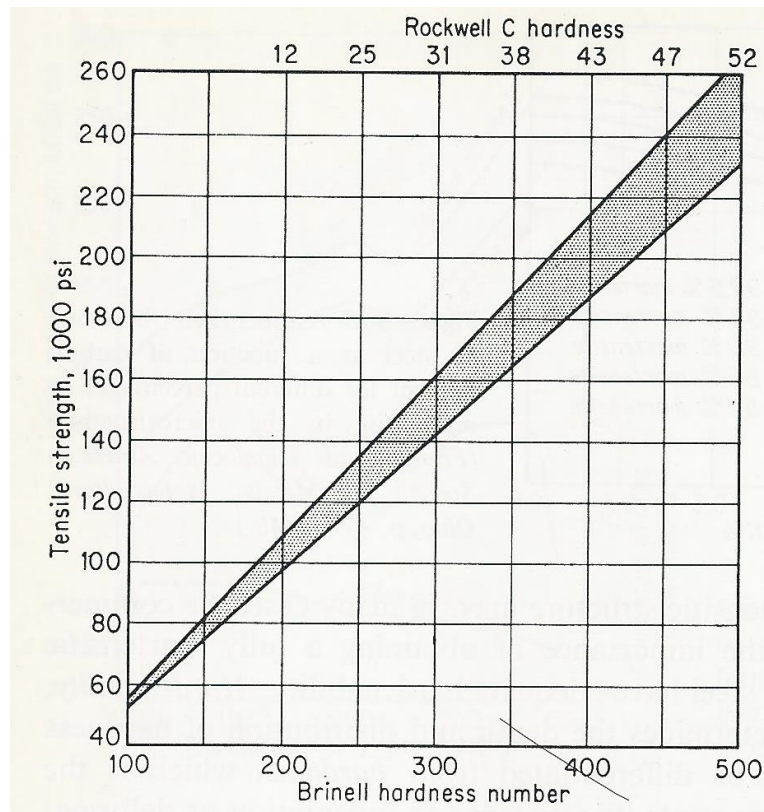
Las propiedades de tensión de los aceros son controladas por las características de flujo y de fractura de la ferrita y por el volumen, forma y distribución de la cementita. La fuerza de la ferrita depende del volumen de elementos sólidos en solución y del tamaño de grano de la ferrita. El contenido de carbono tiene un efecto fuerte ya que controla el volumen de cementita presente. La resistencia se incrementa y la ductilidad decrece con un incremento en el contenido de carbón ya que se eleva el volumen de cementita en la microestructura. Un acero normalizado tendrá alta resistencia debido a un rápido tratamiento de enfriamiento. Existen diferencias en las propiedades de tensión debido a la forma de las partículas de cementita como se muestra en la siguiente figura, donde las propiedades de tensión de una estructura esferoidal son comparadas con las de una estructura

CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

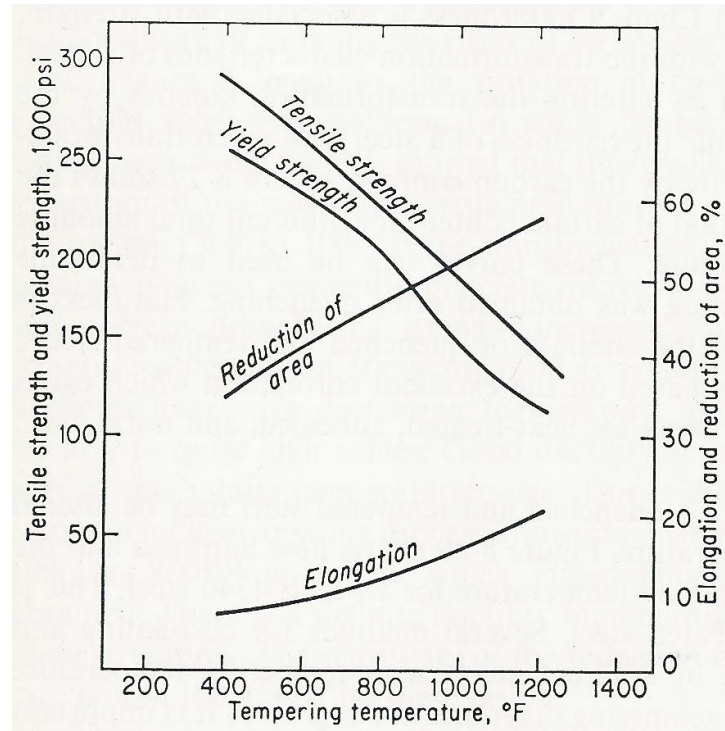
perlítica para un acero con el mismo contenido de carbón. Se ha trabajado en correlaciones empíricas que tienen que ver con la composición y el tratamiento térmico con el motivo de predecir las propiedades de tensión de aceros con estructuras perlíticas.



Propiedades de tensión de la perlita y la esferoidita en un acero.



### Relación del esfuerzo de tensión y la dureza.



### Propiedades de tensión del acero en función de la temperatura de templeado.

#### 4.1.15. DISTRIBUCIÓN DEL ESFUERZO.

La formación de un cuello en la probeta de tensión nos introduce a un complejo estado triaxial de esfuerzo en esa región. Se produce una especie de muesca. Bajo tensión se producen esfuerzos radiales y transversales. El promedio de esfuerzos verdaderos en el cuello, está determinado por la carga de tensión axial entre el área transversal de la sección de la probeta en el cuello. La siguiente figura muestra la geometría de la región llamada cuello y el esfuerzo localizado en esta deformación. R es el radio de curvatura en el cuello y puede ser medido. Se realizó una corrección para el promedio de esfuerzo axial y así compensar la introducción de esfuerzos transversales análisis que estuvo basado en los siguientes términos:

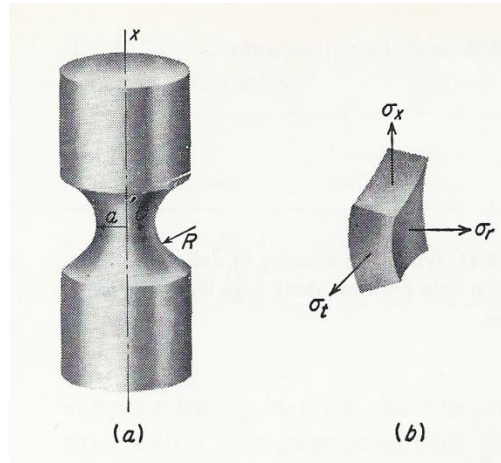
- El contorno del cuello es aproximado de un arco a un círculo.
- La sección transversal en la región del cuello permanece circular a lo largo de la prueba.
- Se utiliza el criterio de Mises para la aplicación de tensión.
- El esfuerzo es constante en toda la sección del cuello.

## CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

De acuerdo con este análisis el flujo de esfuerzo uniaxial correspondiente existiría en la prueba de tensión si en el cuello no hubo esfuerzos triaxiales:

$$\sigma = \frac{(\sigma_x)_{avg}}{(1 + 2R/a)[\ln(1 + a/2R)]}$$

Donde sigma representa la medida del esfuerzo dirección axial (carga dividida entre mínima sección transversal).



**(a) Geometría en la región del cuello; (b) Esfuerzos que actúan en un punto del elemento.**

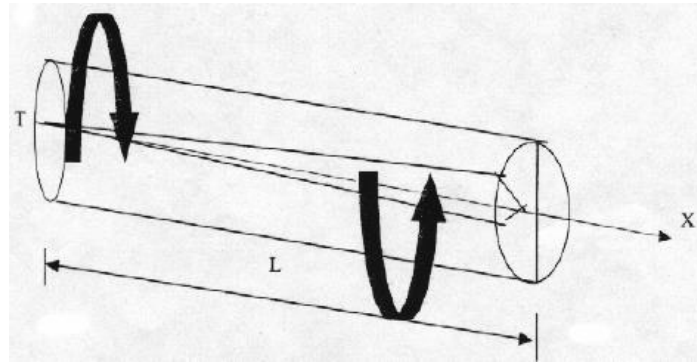
### 4.2. PRUEBA DE TORSIÓN.

#### 4.2.1. INTRODUCCIÓN.

Utilizado en muchas aplicaciones ingenieriles así como también en estudios teóricos de flujo plástico. Las pruebas de torsión se hacen en materiales para determinar propiedades como el módulo de elasticidad, esfuerzo de torsión y el módulo de ruptura. Las pruebas de torsión están sujetas a la carga torsional en servicio. Esta prueba frecuentemente es utilizada para materiales frágiles como los aceros, ha sido implementada en ensayos a alta temperatura para evaluar la forjabilidad de algunos materiales. Esta prueba no ha sido estandarizada como en el caso de la prueba de tensión y raramente es requerida en especificaciones de materiales.

Cualquier vector momento que sea colineal con el eje geométrico de un elemento mecánico se llama vector de momento torsionante debido a que la acción de tal carga hace que el elemento experimente una torcedura alrededor o con respecto a ese eje. Una barra sometida a tal momento se dice que está en torsión.

## CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN



En la figura se muestra un momento torsionante  $T$  aplicado a una barra. El momento de torsión es representado con las flechas negras. El ángulo de torsión de una barra de sección circular se calcula con la siguiente fórmula.

$$\theta = \frac{TL}{GJ}$$

En donde:  $\theta$  = ángulo de torsión (rad)

$T$  = momento torsionante (kg - cm)

$L$  = longitud de la barra (cm)

$G$  = modulo de rigidez (Kg./cm<sup>2</sup>)

$J$  = momento polar de inercia del área transversal (cm<sup>4</sup>)

El momento torsionante " $T$ " se calcula considerando el valor de la fuerza y el radio.

$$T = F \cdot R$$

El modulo de rigidez " $G$ " se calcula considerando el modulo de elasticidad " $E$ " por una constante de valor de 0.385:

$$G = 0.385 E$$

### 4.2.2. ELEMENTOS CONCEPTUALES.

Para el análisis de torsión se consideran las siguientes hipótesis:

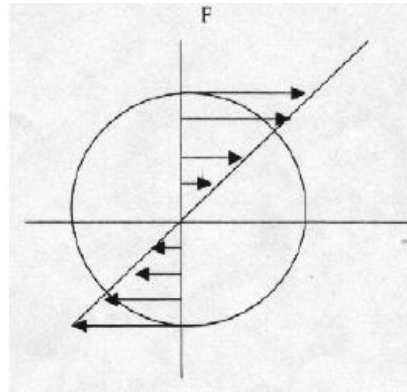
Sobre la probeta actúa un momento de torsión puro y las secciones transversales analizadas están alejadas del punto de aplicación de la carga y de un cambio de diámetro.

Las secciones transversales adyacentes, originalmente planas y paralelas, permanecen en este estado después de la torsión, además toda la línea radial permanece recta.

El material cumple con la ley de Hooke.

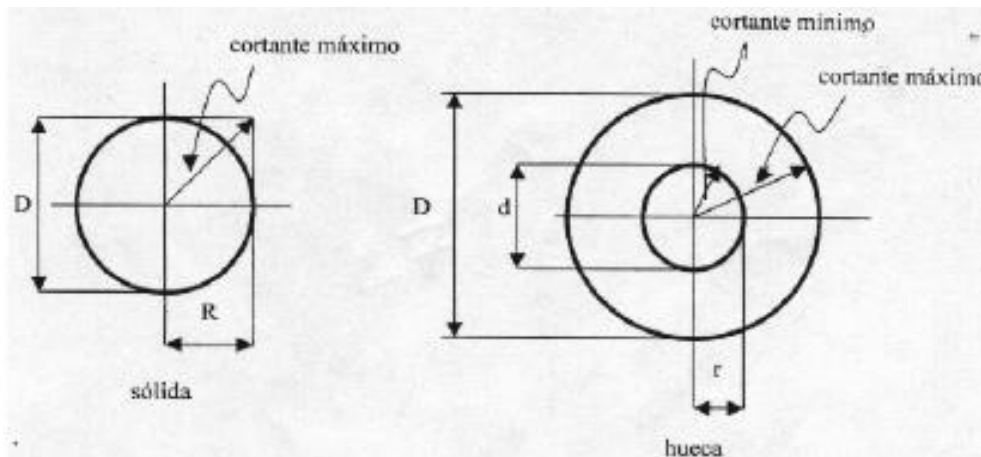
Conociendo las deformaciones en el rango elástico al diseñar una pieza que se someterá a torsión; se tomará como máximo el esfuerzo de fluencia.

CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN



**4.2.3. CALCULO DEL ENSAYO DE TORSIÓN.**

En esta prueba se utilizan probetas cilíndricas macizas o huecas. La deformación que resulta indica el ángulo de torsión de la probeta. Es la esfuerzo cortante máximo de la flecha cilíndrica maciza o hueca se calcula como sigue.



En el caso de una barra maciza, el esfuerzo vale cero en el centro y es máximo en la superficie. La distribución es proporcional al radio, por lo tanto el esfuerzo cortante máximo se calcula:

$$\sigma_{\max} = \frac{2T}{\pi R^3} = \frac{16T}{\pi D^3} = 5.1 \frac{T}{D^3}$$

$\sigma$  = Esfuerzo cortante (Kg. / cm<sup>2</sup>)  
 T = Momento torsionante.  
 D = Diámetro de la barra.

El momento polar de inercia (J), depende de la sección transversal:

$$J = \frac{\pi R^4}{2} = \frac{\pi D^4}{32} [cm^4]$$

#### 4.2.4. PROPIEDADES MECÁNICAS EN LA TORSIÓN.

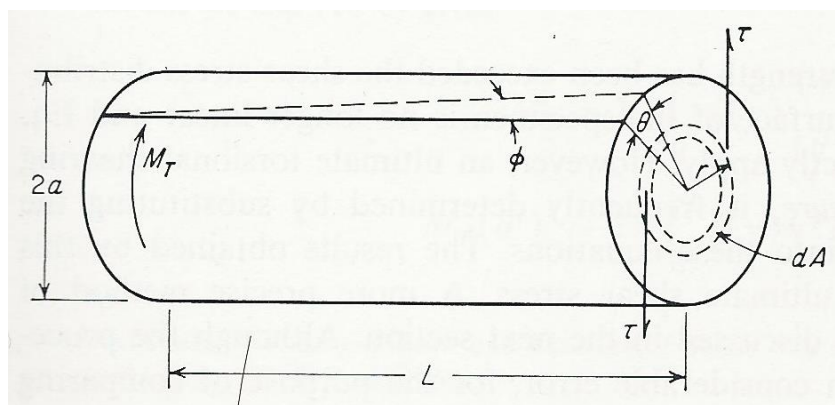
Consideraremos una barra cilíndrica que está sujeta a un momento de torsión. El momento de torsión es resistido por el esfuerzo cortante en la sección transversal de la barra. El esfuerzo cortante es cero en el centro de la barra y se incrementa linealmente con el radio.

$$\tau_{\max} = \frac{M_T D/2}{\pi D^4/32} = \frac{16M_T}{\pi D^3}$$

**Ecuación para el cálculo de la torsión en una barra sólida.**

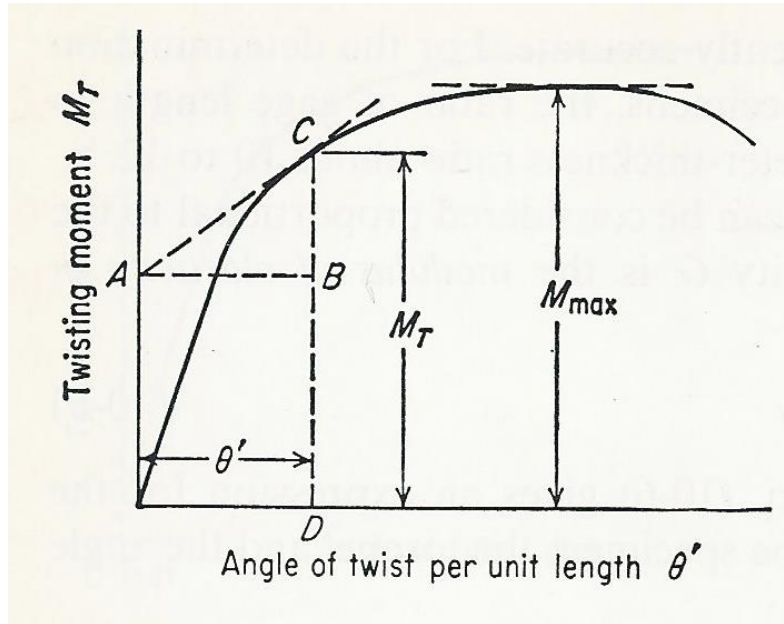
$$\tau = \frac{16M_T D_1}{\pi(D_1^4 - D_2^4)}$$

**Ecuación para el cálculo de la torsión en una barra hueca.**



**Torsión en una barra sólida.**





**Diagrama de torque vs torsión.**

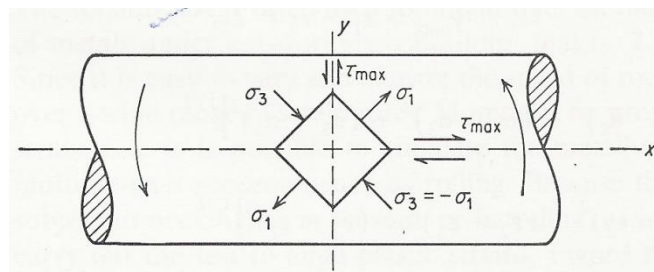
El esfuerzo cortante torsional o módulo de ruptura puede ser expresado por:

$$\tau_u = \frac{3M_{\max}}{2\pi a^3}$$

Grandes esfuerzos plásticos en la torsión pueden resultar en cambios considerables en cuanto a la longitud de la probeta. La longitud cambia de acuerdo con la magnitud del esfuerzo. Es importante la influencia del esfuerzo de torsión en la fractura.

#### 4.2.5. TIPOS DE FALLAS EN LA TORSIÓN.

La siguiente figura ilustra el estado de esfuerzo en un punto de la superficie de una barra sujeta a torsión.



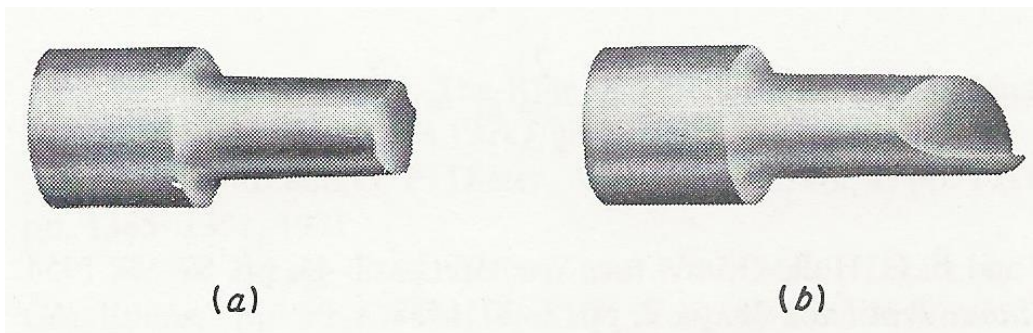
**Estado de esfuerzo en la torsión.**

#### CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

El esfuerzo máximo ocurre en dos planos perpendiculares, el esfuerzo principal hace un ángulo de  $45^\circ$  con la longitudinal y son iguales en magnitud al esfuerzo de corte.

Las fallas en la torsión son distintas a las fallas de tensión, hay una pequeña reducción localizada de área o elongación. Normalmente el plano de fractura es normal al eje longitudinal. Un material frágil falla en la torsión a lo largo del plano perpendicular en la dirección del máximo esfuerzo de tensión.

Las fracturas algunas veces se observan en la prueba de sección del espécimen roto. En estos casos puede ser determinado que la fractura comenzó en un plano de máximo esfuerzo de corte paralelo al eje del espécimen. Un estudio de las fallas de torsión en una herramienta de acero como función de la dureza mostro que la fractura comenzó en planos de máximo esfuerzo de corte para una dureza Vickers de 720, por encima de esta dureza los esfuerzos de tensión fueron los responsables de la fractura.



**Fallas típicas en la torsión. (a) Fractura Dúctil; (b) Fractura frágil.**

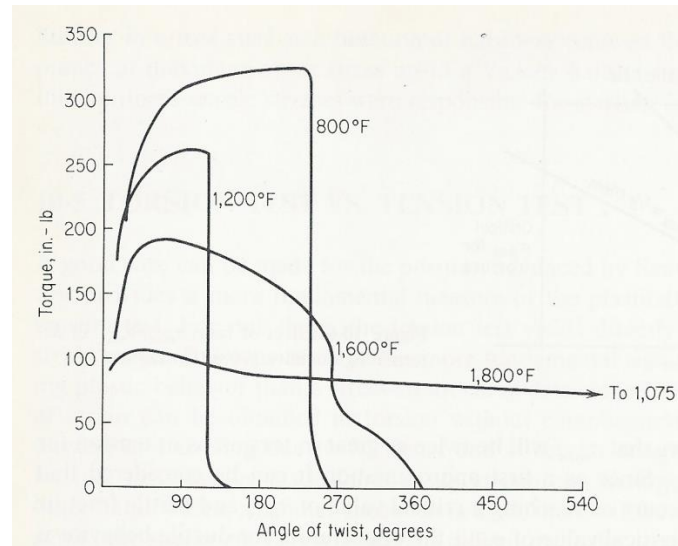
#### **4.2.6. PRUEBA DE TORSIÓN CON INCREMENTO DE LA TEMPERATURA.**

La prueba de torsión es muy comúnmente utilizada para obtener información sobre las propiedades de flujo y sobre la fractura de los metales bajo condiciones de sobrecalentamiento. En este tipo de pruebas es fácil de cierto modo controlar las variaciones de carga en la torsión y de la temperatura logrando la simulación de distintas estructuras metalúrgicas.

El espécimen de la prueba de torsión no está sujeto a un cuello, como en la tensión. La siguiente figura muestra las curvas típicas de torque torsión obtenidas en una de estas pruebas.

La curva de ( $800^\circ\text{F}$ ) es para una deformación por enfriamiento en la que el torque se incrementa continuamente hasta la fractura. La curva de ( $1800^\circ\text{F}$ ) es característica de la deformación a alta temperatura.

## CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN



**Curvas de torque-torsión a diferentes temperaturas.**

### 4.3. PRUEBA DE COMPRESIÓN.

#### 4.3.1. INTRODUCCIÓN.

Trabajo que se debe desarrollar para aproximar las partículas del material. Una probeta es sometida a una carga monoaxial gradualmente creciente (casi estática) hasta que ocurre la falla o se llega a la condición deseada, por lo que respecta al sentido o dirección de la fuerza de compresión es meramente contraria a la tensión.

Existen varios factores que se toman en cuenta para llevar a cabo la prueba de compresión, las más importantes son:

- a) El comportamiento de material bajo una carga dada.
- b) La diferencia de las propiedades del material bajo las cargas de tensión o compresión.
- c) La dificultad y complicaciones para la sujeción o apoyos de los extremos de la pieza a ensayar.

**Nota: En compresión se unen o se acercan las partículas de la probeta. Generalmente los materiales frágiles son los que se someten a pruebas de compresión.**

Las limitaciones especiales para iniciar la prueba de compresión son:

- 1) Dificultad para aplicar la carga verdaderamente concéntrica y axial.
- 2) Carácter relativamente inestable de este tipo de carga en contraste con la carga de tensión.

CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

- 3) La fricción entre los puentes de las máquinas de pruebas o las placas de apoyo y la superficie de los extremos de la probeta debido a la expansión lateral de estos.
- 4) Las áreas seleccionadas de la probeta que son relativamente mayores para obtener un grado apropiado de la estabilidad de la pieza.

El ensayo de compresión es poco frecuente en los metales y consiste en aplicar a la probeta, en la dirección de su eje longitudinal, una carga estática que tiende a provocar un acortamiento de la misma y cuyo valor se irá incrementando hasta la rotura o suspensión del ensayo.

El diagrama obtenido en un ensayo de compresión para los aceros presenta al igual que el de tensión un periodo elástico y otro plástico. En los gráficos de metales sometidos a compresión que indica la figura siguiente obtenidas sobre probetas cilíndricas de una altura doble con respecto al diámetro, se verifica lo expuesto anteriormente, siendo además posible deducir que los materiales frágiles rompen prácticamente sin deformarse, y los dúctiles, en estos materiales el ensayo carece de importancia, ya que se deforman continuamente hasta la suspensión de la aplicación de la carga, siendo posible determinar únicamente, a los efectos comparativos la tensión al límite de proporcionalidad.

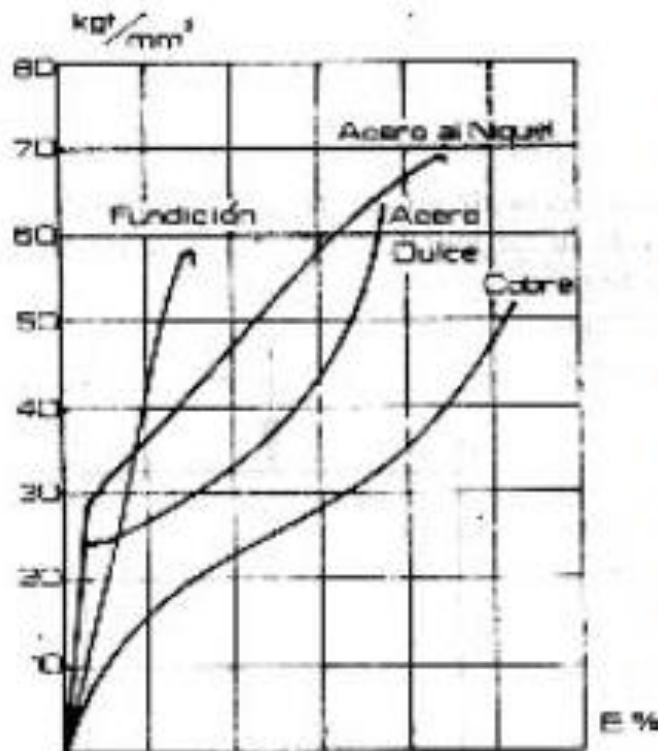


Diagrama de compresión para los aceros.

## CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

Las propiedades que generalmente se calculan son las siguientes:

- 1) Coeficiente de elasticidad o módulo de Young.
- 2) Esfuerzo en el límite elástico.
- 3) Esfuerzo de cedencia.
- 4) Resistencia o esfuerzo máximo a la compresión.

Los materiales frágiles casi no tienen zona elástica y puede ocurrir que concida el esfuerzo máximo con el punto de ruptura. Las fórmulas son similares a las utilizadas en la prueba de tensión o la de compresión en materiales dúctiles.

### 1) Coeficiente de elasticidad.

$$E = \frac{PH_1}{\delta A_1}$$

Para calcular el coeficiente se considera la deformación correspondiente a la carga P seleccionada en el límite elástico. Recordando que dentro de la zona elástica se puede elegir la carga y la deformación. Así mismo se considera el área transversal de la probeta.

### 2) Esfuerzo en el límite elástico.

$$\sigma = \frac{P_{LE}}{A_1}$$

El esfuerzo en el límite elástico se obtiene con la fórmula que se utiliza en la tensión. Recordando que la carga y la tensión son las correspondientes al límite elástico o límite de proporcionalidad.

### 3) Esfuerzo de cedencia.

$$\sigma_{CED} = \frac{P_{CED}}{A_1}$$

### 4) Resistencia o esfuerzo máximo a la compresión.

$$\sigma_c = \frac{P_{MAX}}{A_1}$$

## CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

El esfuerzo máximo o última resistencia de compresión en un material frágil es cuando la carga máxima con la carga de ruptura coincidan.

**Nota:** La prueba de compresión está fuertemente ligada a las propiedades del material. En el caso de los aceros es implementada para analizar distintos tipos de probetas, entre las cuales están, los prismas rectangulares, cúbicos y cilíndricos. En el caso de la industria petrolera se analizan los distintos tipos de tuberías simulando fuerzas externas que actúan sobre ellas.

El análisis es de suma importancia ya que se comprueba la resistencia de la tubería y en caso de no cumplir con las especificaciones se puede desechar una línea completa de fabricación, comenzando de nuevo incluso desde las especificaciones del material (acero).

### 4.4. PRUEBA DE DUREZA.

#### 4.4.1. INTRODUCCIÓN.

La dureza de un material se define de manera muy simple pues tiene distintos significados dependiendo de la experiencia de la persona que la define. En general la dureza implica una resistencia a la deformación y para los metales es una medida de su resistencia a la deformación permanente o plástica. Existen tres tipos generales para medir la dureza y son: (1) Dureza al rayado; (2) Dureza por penetración; (3) Dureza por rebote o dureza dinámica.

La dureza al rayado es ampliamente utilizada con minerales. Con esta medida de dureza varios minerales y otros materiales son clasificados de acuerdo a su resistencia al rayado. La dureza al rayado es medida de acuerdo con la escala de Mhos. Consiste en un arreglo de 10 minerales estándar cuyo orden consiste en su habilidad para ser rayados o rayar. El mineral número uno de la escala es el talco mientras que el diamante es el número diez. Esta escala no es muy utilizada en los metales pero se pueden incluir en el siguiente rango de dureza [4,8].

La dureza es una cualidad de la materia que tiene que ver con la solidez y firmeza del material y es la propiedad que tienen los materiales de resistirse a ser rayados o penetrados. Esta propiedad no constituye una característica específica de los materiales si no que está íntimamente ligada con las propiedades elásticas y plásticas. El ensayo se desarrolla para conocer características del material por medio de una muestra o probeta.

#### **4.4.2. EQUIPOS Y MATERIALES DE PRUEBA.**

##### **4.4.2.1. DURÓMETROS.**

Existe gran variedad en lo que respecta a durómetros pues lo hay para probar polímeros, cerámicos, metales y materiales compuestos. El durómetro tipo A2 se utiliza para probar hule y plásticos suaves. El tipo D para probar hules y plásticos duros. Estos durómetros difieren principalmente por el punto de penetración, la magnitud de la carga aplicada al penetrador por medio de un resorte calibrado.

El durómetro tipo D tiene el penetrador más agudo y más fuertemente cargado, el resorte que acciona la penetración de la punta. La dureza obtenida con estos durómetros es una medida de la profundidad de penetración. Dependiendo de la profundidad de penetración la dureza se indicará automáticamente en la escala de la caratula, la máxima penetración de cien milésimas.

El ensayo se puede aplicar a materiales ferrosos y no ferrosos, aleaciones, por ejemplo:

- Hierro maleable
- Aceros
- Aluminio
- Cobre
- Zinc
- Bronce fosforado
- Cobre al berilio
- Plomo

##### **4.4.3. DUREZA BRINELL.**

La primera prueba de dureza por penetración estandarizada y ampliamente aceptada fue propuesta por J. A. Brinell en 1900. La prueba de dureza Brinell consiste en penetrar la superficie de un metal con una bola de acero de 10mm de diámetro con una carga de 3,000Kg.

Para algunos de los metales la carga es reducida a 500Kg y para metales muy duros una bola de carburo de tungsteno se utiliza para minimizar la distorsión del penetrador.

La carga es aplicada por un periodo de tiempo estandarizado, usualmente 30s, el diámetro del penetrador es medido con un microscopio de potencia después de remover la carga.

CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

El número de dureza Brinell (BHN) está expresado como la carga P dividida por el área de la superficie de penetración. Esto es expresado de la siguiente manera:

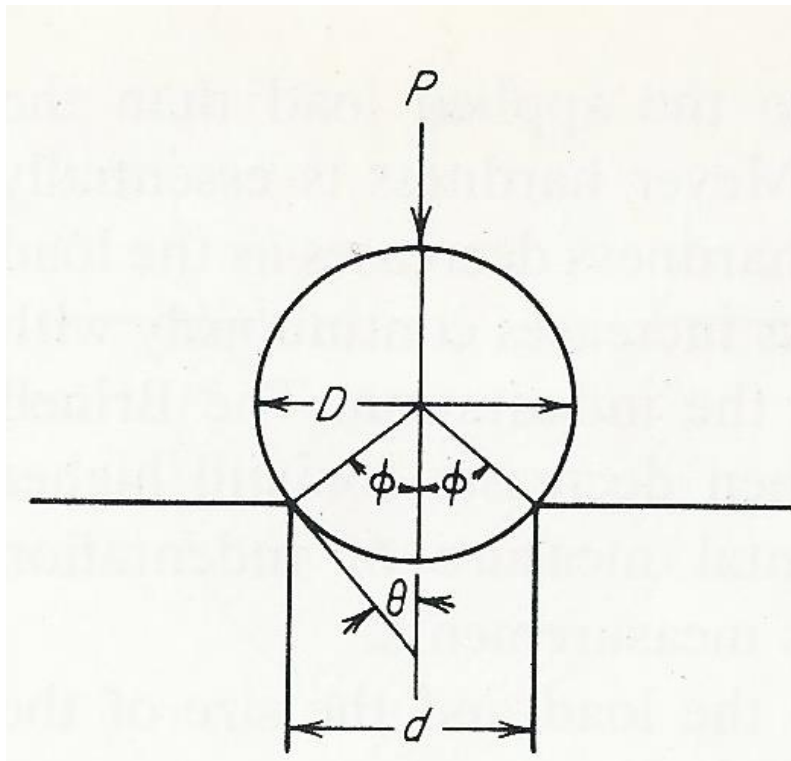
$$\text{BHN} = \frac{P}{(\pi D/2)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{P}{\pi D t}$$

Dónde:

- P=carga aplicada, Kg
- D=diámetro de la bola, mm
- d=diámetro del penetrador, mm
- t=profundidad de penetración, mm

Resultado obtenido en  $[\text{Kg}/\text{mm}^2]$ . Sin embargo la ecuación anterior no es un concepto físico satisfactorio. Existe una ecuación alterna para poder dar el número de dureza Brinell.

$$\text{BHN} = \frac{P}{(\pi/2) D^2 (1 - \cos \phi)}$$



**Parámetros básicos en la prueba Brinell.**



#### 4.4.4. DUREZA MEYER.

Meyer sugirió una definición más racional que la de Brinell acerca de la dureza y se basaría en el área proyectada de la impresión. La penetración es igual a la carga dividida por el área proyectada.

$$P_m = \frac{P}{\pi r^2}$$

Meyer propuso que la presión debería de ser tomada como la medida de la dureza. Esto hace referencia a la dureza Meyer.

$$\text{Meyer hardness} = \frac{4P}{\pi d^2}$$

La dureza Meyer es menos sensible a la aplicación de la carga. Para un material tratado por enfriamiento la dureza Meyer es esencialmente constante e independiente de la carga, mientras que la dureza Brinell decrece cuando la carga se incrementa. Para un metal templado la dureza Meyer se incrementa continuamente con la carga. La dureza Brinell, sin embargo, primero se incrementa con la carga y luego decrece al aplicársele altas cargas. La dureza Meyer es más una medida fundamental de la dureza del penetrador, es raramente utilizada para medidas de dureza prácticas.

Meyer propuso una relación empírica entre la carga y el tamaño del penetrador. Esta relación es comúnmente llamada La ley de Meyer.

$$P = kd^{n'}$$

Dónde:

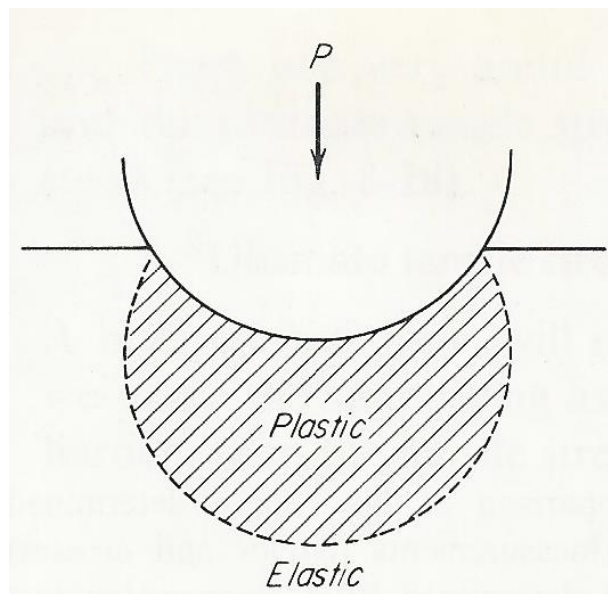
- P=carga aplicada, Kg
- d=diámetro del penetrador, mm
- n'=constante del material relacionado a la dureza de deformación del metal
- k=constante del material que expresa la resistencia del metal a la penetración

#### 4.4.5. ANÁLISIS DE PENETRACIÓN Y PENETRADOR.

La zona plástica debajo de la dureza de penetración es rodeada por el material elástico que actúa dificultando el flujo plástico de manera similar a las fuerzas de contraste. La predicción de la carga requerida para penetrar un sólido es uno de los problemas clásicos en la plasticidad. Prandtl aplicó en el campo teórico una línea recta para mostrar que el factor de contraste para un plano de esfuerzo y compresión fue de 2.57.

$$\frac{p_m}{\sigma} = 1 + \frac{\pi}{2} = 2.57$$

En este modelo idealizado el material rodeando la zona deformada es rígido y compensado por el material desplazado. Sin embargo, la geometría de la prueba Brinell es asimétrica opuesta al plano de esfuerzo. El análisis plástico elástico resulta en un factor de contraste  $C=3.0$  para una penetración con una bola esférica.



**Zona plástica bajo un penetrador Brinell.**

$$p_m = C\sigma_0 = 3\sigma_0$$

**Penetración con una bola esférica.**

#### 4.4.6. DUREZA VICKERS.

La prueba de dureza Vickers utiliza un diamante piramidal como penetrador. El ángulo incluido entre caras opuestas de la pirámide es de  $136^\circ$ . Este ángulo fue elegido por que es más aproximado al radio deseable el cual proporcionara un específico diámetro de penetración. Debido a la forma del penetrador muy comúnmente es llamada prueba de dureza con penetrador de diamante. El número de dureza de pirámide-diamante (DHP), o número de dureza Vickers (VHN, VPH), está definido como la carga dividida por el área de la superficie de penetración. En la práctica esta área es calculada mediante el microscópio. El DHP puede ser determinado por medio de la siguiente ecuación.

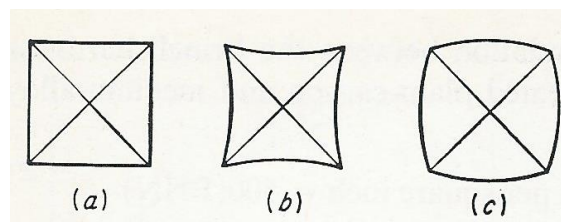
$$\text{DPH} = \frac{2P \sin(\theta/2)}{L^2} = \frac{1.854P}{L^2}$$

Dónde:

- $P$ =carga aplicada, Kg
- $L$ =promedio de longitud de diagonales, mm
- $\theta$ :=ángulo entre las caras opuestas del diamante =  $136^\circ$

La prueba de dureza Vickers ha recibido gran aceptación ya que provee una escala de dureza continua, para cierta carga. La prueba de dureza Rockwell o Brinell son necesarias para cambiar de carga o de penetrador en el algún punto de la escala de dureza. Estas mediciones en un extremo de la escala no pueden ser estrictamente comparadas por que son utilizadas para otros fines.

Las cargas aplicadas en este tipo de prueba están en el rango de 1 a 120Kg, dependiendo de la dureza del metal que será probado. La prueba de dureza Vickers no tiene amplia aceptación como una prueba de rutina por ser lenta, requiere de cuidado en la preparación superficial de la probeta permitiendo errores en la determinación de la longitud diagonal. La prueba de dureza Vickers es descrita en la norma estandarizada ASTM E92-72.



**Tipos de diamante. (a) Penetración perfecta; (b) Penetración en acero; (c) Penetración redondeada.**

#### **4.4.7. PRUEBA DE DUREZA ROCKWELL.**

La prueba de dureza más utilizada en los Estados Unidos de Norteamérica es la prueba de dureza Rockwell. Su aceptación se debe a su velocidad, libre de errores personales, habilidad para distinguir variaciones de dureza en el acero, posibilidad de usar penetradores pequeños y sin daño a las piezas bajo tratamiento térmico.

Esta prueba utiliza la profundidad de penetración, bajo una carga constante, como medida de dureza. La carga más pequeña aplicada en la probeta son 10Kg. Una combinación de carga y penetrador no producirá resultados satisfactorios para materiales con amplios rangos de dureza. Las cargas comúnmente utilizadas son de 60, 100 y 150Kg. La dureza Rockwell es dependiente de la carga puesta sobre el penetrador y es necesario especificar la combinación utilizada.

La prueba de dureza Rockwell es muy común y fácil de realizar y solo se observan un número muy bajo de precauciones. Muchos de los puntos que se enlistan a continuación pueden ser aplicados a otras pruebas de dureza.

- 1) El penetrador y el yunque deberían ser limpiados y bien colocados.
- 2) La superficie a ser probada deberá estar limpia y libre de óxido.
- 3) La superficie deberá estar colocada perpendicularmente al penetrador.
- 4) Pruebas en superficies cilíndricas darán resultados bajos, el error depende de la curvatura, carga, penetrador y dureza del material. Correcciones teóricas y empíricas para este problema han sido publicadas.
- 5) Es importante el espesor de la probeta. Se recomienda que el espesor sea 10 veces más grande que el penetrador. La prueba debería realizarse con un espesor sencillo del material a probarse.
- 6) El espaciamiento entre las penetraciones debería de ser tres o cinco veces el diámetro de la penetración.
- 7) La velocidad de aplicación de la carga deberá estandarizarse. Las variaciones de dureza pueden apreciarse en muchos materiales bajo el rango de carga aplicable y tomando las debidas precauciones.

#### **4.4.8. DUREZA A ELEVADAS TEMPERATURAS.**

Existe el interés de medir la dureza de los metales a elevadas temperaturas y este interés se ha ido incrementando en nuestros días. La razón es la mejora continua del comportamiento de las aleaciones en presencia de altas temperaturas.

La dureza en caliente nos da buenas indicaciones del potencial de un metal o aleación para poder ser aplicable a estas temperaturas. Se han logrado éxitos con esta correlación analizando las propiedades de los materiales y su dureza a altas temperaturas.

CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

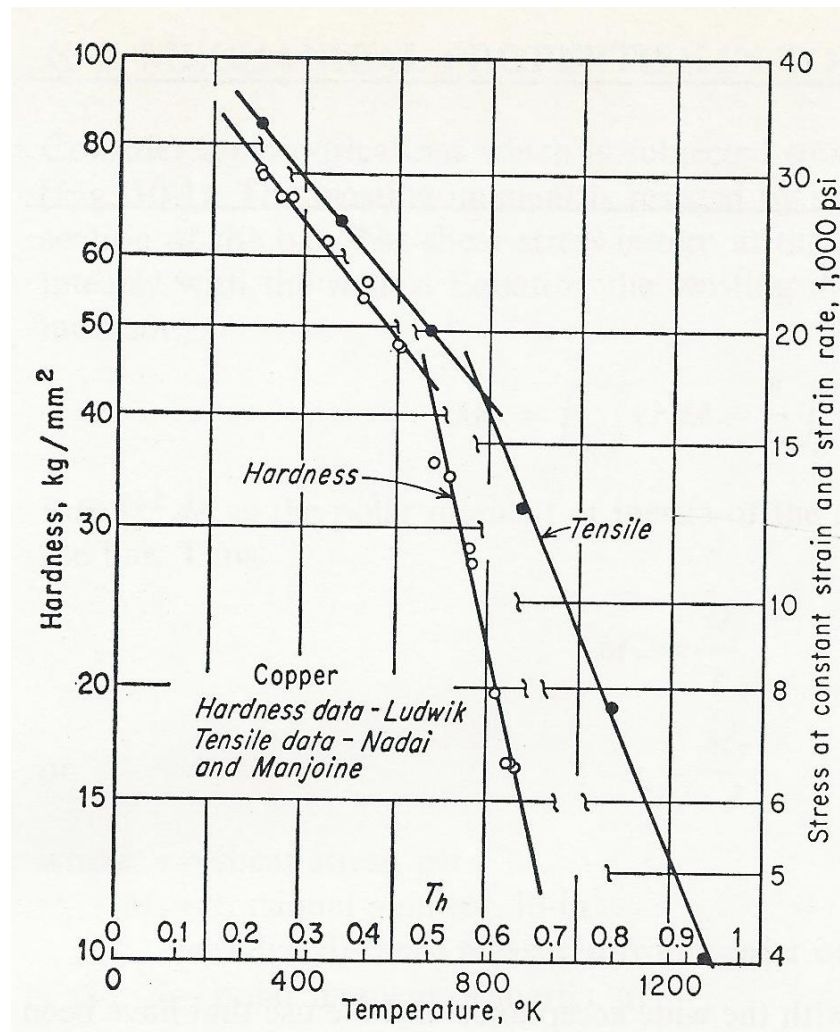
La prueba de dureza Vickers ha sido utilizada en este tipo de entornos. Una revisión extensiva de los datos de dureza a diferentes temperaturas, muestra que la dureza depende de la temperatura y puede ser expresada como:

$$H = Ae^{-BT}$$

Dónde:

- H=dureza, Kg/mm<sup>2</sup>
- T=temperatura, °K
- A,B=constantes

La dureza se mide como función de la temperatura y mostrara un cambio abrupto a la temperatura en la que ocurre un cambio alotrópico.



**Dureza dependiente de la temperatura.**

## 4.5. NORMATIVIDAD A.S.T.M. Y A.P.I. APLICADA EN EL ANÁLISIS DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN.

### 4.5.1. INTRODUCCIÓN.

Los productos utilizados en las diferentes industrias del mundo deben de cumplir con ciertos códigos de calidad con el objetivo de tener un buen funcionamiento durante las operaciones en las que se requieren.

La tubería de perforación tiene un papel fundamental en la industria petrolera y es analizada y evaluada de acuerdo a una normatividad. En el siguiente subtema estudiaremos dicha normatividad y destacaremos los aspectos importantes en cuanto a las pruebas mecánicas realizadas a la tubería.

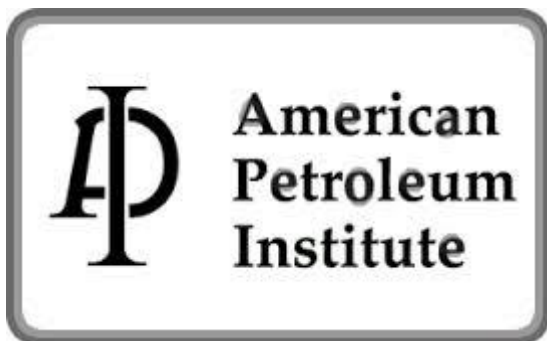
Los principales organismos en américa encargados de regular esta normatividad son:

- American Petroleum Institute (A.P.I.)
- American Society for Testing Materials (A.S.T.M.)

El Instituto Americano del Petróleo provee la norma API 5D llamada *Especificaciones para Tubería de Perforación* en la cual se especifican definiciones, procedimientos y pruebas con las que debe de cumplir la tubería de perforación.

La Sociedad Americana para Pruebas de Materiales entre sus normas contiene la ASTM A370 encargada de especificar las pruebas mecánicas que se deben realizar a productos tubulares de acero.

Con las dos normas anteriores podemos desarrollar un estudio extenso acerca de las propiedades físicoquímicas con las que tienen que cumplir las tuberías de perforación, garantizando así el buen desempeño de estas durante las operaciones que llevan a cabo.



#### 4.5.2. NORMA (API 5D), ESPECIFICACIONES PARA LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN.

Especificación para los grupos 1 y 3 de tubería de perforación con las características debajo descritas.

Group 1—Grade E drill pipe.

Group 3—All high strength grades of drill pipe.  
(Grades X-95, G-105, and S-135)

Size	Weight Designation	Calculated Plain-End Weight		Outside Diameter		Wall Thickness		Grade	Upset Ends, for Weld-on Tool Joints
		lb/ft	kg/m	in.	mm	in.	mm		
		$W_{pe}$		$D$		$t$			
2 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	6.65	6.27	9.33	2.375	60.3	0.280	7.11	E, X, G, S	Ext. Upset
2 <sup>7</sup> / <sub>8</sub>	10.40	9.72	14.47	2.875	73.0	0.362	9.19	E, X, G, S	Int. Upset or Ext. Upset
3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	9.50	8.81	13.12	3.500	88.9	0.254	6.45	E	Int. Upset or Ext. Upset
3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	13.30	12.32	18.34	3.500	88.9	0.368	9.35	E, X, G, S	Int. Upset or Ext. Upset
3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	15.50	14.64	21.79	3.500	88.9	0.449	11.40	E	Int. Upset or Ext. Upset
3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	15.50	14.64	21.79	3.500	88.9	0.449	11.40	X, G, S	Ext. Upset or Int.-Ext. Upset
4	14.00	12.95	19.27	4.000	101.6	0.330	8.38	E, X, G, S	Int. Upset or Ext. Upset
4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	13.75	12.25	18.23	4.500	114.3	0.271	6.88	E	Int. Upset or Ext. Upset
4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	16.60	15.00	22.32	4.500	114.3	0.337	8.56	E, X, G, S	Ext. Upset or Int.-Ext. Upset
4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	20.00	18.71	27.84	4.500	114.3	0.430	10.92	E, X, G, S	Ext. Upset or Int.-Ext. Upset
5	16.25	14.88	22.16	5.000	127.0	0.296	7.52	X, G, S	Int. Upset
5	19.50	17.95	26.70	5.000	127.0	0.362	9.19	E	Int.-Ext. Upset
5	19.50	17.95	26.70	5.000	127.0	0.362	9.19	X, G, S	Ext. Upset or Int.-Ext. Upset
5	25.60	24.05	35.80	5.000	127.0	0.500	12.70	E	Int.-Ext. Upset
5	25.60	24.05	35.80	5.000	127.0	0.500	12.70	X, G, S	Ext. Upset or Int.-Ext. Upset
5 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	21.90	19.83	29.52	5.500	139.7	0.361	9.17	E, X, G, S	Int.-Ext. Upset
5 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	24.70	22.56	33.57	5.500	139.7	0.415	10.54	E, X, G, S	Int.-Ext. Upset
6 <sup>5</sup> / <sub>8</sub>	25.20	22.21	33.04	6.625	168.3	0.330	8.38	E, X, G, S	Int.-Ext. Upset
6 <sup>5</sup> / <sub>8</sub>	27.72	24.24	36.06	6.625	168.3	0.362	9.19	E, X, G, S	Int.-Ext. Upset

#### Lista de tubería de perforación.

**Equipo de prueba.** El equipo de prueba, calibración y verificación es requerido bajo ciertas especificaciones, sujeto a inusuales y severas condiciones lo que provocaría su exactitud cuestionable, la calibración o revisión se desarrollara antes del uso del equipo.

**Procesos especiales.** Los procesos especiales son las operaciones finales, se desarrollan durante el proceso de fabricación. La aplicación de procesos especiales comprenden, tratamiento térmico, pruebas no destructivas y tratamientos de enfriado.

CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

**Certificación.** El fabricante certificará que el producto ha sido fabricado, ensamblado, probado e inspeccionado de acuerdo con la especificación correspondiente. El reporte de prueba de materiales, certificación y conformidad, deberá dar a conocer los requerimientos correspondientes. Se tendrán que conservar los siguientes registros:

Table 2—Retention of Records

Requirement	Reference
<b>Chemical Properties</b>	
Heat Analysis	5.2
Product Analysis	5.3
<b>Mechanical Properties</b>	
Tensile Tests	6.1
Control Tests	7.1.5
<b>Calibration</b>	<b>Various Sections</b>

**Conservación de registros.**

**4.5.2.1. PROCESO DE FABRICACIÓN.**

El proceso de fabricación sin costura se define como sigue:

- a. **Tubería sin costura.** Producto tubular de acero fabricado sin cordón de soldadura. Fabricado a partir de un acero bajo tratamiento térmico. El producto tubular trabajado en caliente tiene forma, dimensiones y propiedades deseadas.
- b. **Tubería terminada por enfriamiento.** Sin tratamiento térmico apropiado esta tubería no es aceptada.

El tratamiento térmico se desarrollara de acuerdo a procesos documentados.

- a. La tubería de perforación del grupo 1 será normalizada y templada.
- b. La tubería de perforación del grupo 3 será normalizada o templada bajo tratamientos de larga duración. Se llegará a un acuerdo previo entre comprador y fabricante.



CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

Los distintos grupos y grados de acero deberán de cumplir en esta especificación con granos finos. El acero elaborado mediante esta práctica contiene uno o más elementos refinados como aluminio, colombio, vanadio o titanio, en cantidades destinadas para tener un acero austenítico de grano fino.

#### 4.5.2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA.

En esta especificación la tubería de perforación deberá contar con los requerimientos siguientes.

Table 3—Chemical Requirements

Steel	Phosphorus Max. Percent	Sulfur Max. Percent
All Groups	0.030	0.030

#### Requerimientos químicos.

**Análisis térmicos.** El fabricante deberá dar al comprador los análisis térmicos realizados durante la fabricación de la tubería. El comprador analizará cuantitativamente la presencia de otros elementos, como son fósforo y azufre, usados normalmente en la fabricación para controlar las propiedades mecánicas.

**Análisis del producto.** Se deberá llevar a cabo un análisis del producto por cada calentamiento realizado. Los análisis del producto estarán disponibles para el comprador. Los análisis del producto incluirán la determinación cuantitativa de fósforo y azufre. Se escogerán dos elementos para realizar el análisis de producto.

#### 4.5.2.3. REQUERIMIENTOS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS.

##### 4.5.2.3.1. PROPIEDADES DE TENSIÓN.

La tubería cumplirá con las propiedades de tensión mostrados en la siguiente tabla.

Table 4—Tensile Requirements

1	2	3				4		5		6
		Yield Strength				Tensile Strength		Elongation, Min. Percent in 2 in. (50.80 mm)		
		Minimum		Maximum		Min.				
Group	Grade	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa			
1	E-75	75,000	517	105,000	724	100,000	689		See footnote <sup>a</sup>	
3	X-95	95,000	655	125,000	862	105,000	724		See footnote <sup>a</sup>	
	G-105	105,000	724	135,000	931	115,000	793		See footnote <sup>a</sup>	
	S-135	135,000	931	165,000	1138	145,000	1000		See footnote <sup>a</sup>	

<sup>a</sup>The minimum elongation in 2 in. (50.80 mm) shall be that determined by the following formula:

$$e = 625,000 \frac{\Lambda^{0.2}}{U^{0.9}}$$

CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

Dónde:

- e=elongación mínima, pg
- A=área transversal, pg<sup>2</sup>
- U=esfuerzo de tensión especificado, psi

1	2	3	4	5	6	7	8								
								Tensile Test Specimen				Elongation in 2 in., Minimum, Percent			
								Specified Wall Thickness, in.				Grade			
								Area A in. <sup>2</sup>	3/4 in. Strip Specimen	1 in. Strip Specimen	1 1/2 in. Strip Specimen	E-75	X-95	G-105	S-135
Specified Tensile Strength, psi															
				100,000	105,000	115,000	145,000								
0.75 and Greater	.994 and Greater	.746 and Greater	.497 and Greater	18.5	18.0	16.5	13.5								
0.74	.980-.993	.735-.745	.490-.496	18.5	18.0	16.5	13.5								
0.73	.967-.979	.726-.734	.484-.489	18.5	18.0	16.5	13.5								
0.72	.954-.966	.715-.725	.477-.483	18.5	17.5	16.5	13.0								
0.71	.941-.953	.706-.714	.471-.476	18.5	17.5	16.5	13.0								
0.70	.927-.940	.695-.705	.464-.470	18.5	17.5	16.0	13.0								
0.69	.914-.926	.686-.694	.457-.463	18.5	17.5	16.0	13.0								
0.68	.900-.913	.675-.685	.450-.456	18.5	17.5	16.0	13.0								
0.67	.887-.899	.666-.674	.444-.449	18.0	17.5	16.0	13.0								
0.66	.874-.886	.655-.665	.437-.443	18.0	17.5	16.0	13.0								
0.65	.861-.873	.646-.654	.431-.436	18.0	17.5	16.0	13.0								
0.64	.847-.860	.635-.645	.424-.430	18.0	17.5	16.0	13.0								
0.63	.834-.846	.626-.634	.417-.423	18.0	17.0	16.0	13.0								
0.62	.820-.833	.615-.625	.410-.416	18.0	17.0	16.0	13.0								
0.61	.807-.819	.606-.614	.404-.409	18.0	17.0	16.0	13.0								
0.60	.794-.806	.595-.605	.397-.403	18.0	17.0	15.5	13.0								
0.59	.781-.793	.586-.594	.391-.396	18.0	17.0	15.5	12.5								
0.58	.767-.780	.575-.585	.384-.390	17.5	17.0	15.5	12.5								
0.57	.754-.766	.566-.574	.377-.383	17.5	17.0	15.5	12.5								
0.56	.740-.753	.555-.565	.370-.376	17.5	17.0	15.5	12.5								

1	2	3	4	5	6	7	8								
								Tensile Test Specimen				Elongation in 2 in., Minimum, Percent			
								Specified Wall Thickness, in.				Grade			
								Area A in. <sup>2</sup>	3/4 in. Strip Specimen	1 in. Strip Specimen	1 1/2 in. Strip Specimen	E-75	X-95	G-105	S-135
Specified Tensile Strength, psi															
				100,000	105,000	115,000	145,000								
0.54	.714-.726	.535-.545	.357-.363	17.5	16.5	15.5	12.5								
0.53	.701-.713	.526-.534	.351-.356	17.5	16.5	15.5	12.5								
0.52	.687-.700	.515-.525	.344-.350	17.5	16.5	15.5	12.5								
0.51	.674-.686	.506-.514	.337-.343	17.5	16.5	15.0	12.5								
0.50	.660-.673	.495-.505	.330-.336	17.0	16.5	15.0	12.5								
0.49	.647-.659	.486-.494	.324-.329	17.0	16.5	15.0	12.5								
0.48	.634-.646	.475-.485	.317-.323	17.0	16.5	15.0	12.0								
0.47	.621-.633	.466-.474	.311-.316	17.0	16.5	15.0	12.0								
0.46	.607-.620	.455-.465	.304-.310	17.0	16.0	15.0	12.0								
0.45	.594-.606	.446-.454	.297-.303	17.0	16.0	15.0	12.0								
0.44	.580-.593	.435-.445	.290-.296	17.0	16.0	15.0	12.0								
0.43	.567-.579	.426-.434	.284-.289	16.5	16.0	14.5	12.0								
0.42	.554-.566	.415-.425	.277-.283	16.5	16.0	14.5	12.0								
0.41	.541-.553	.406-.414	.271-.276	16.5	16.0	14.5	12.0								
0.40	.527-.540	.395-.405	.264-.270	16.5	15.5	14.5	12.0								
0.39	.514-.526	.386-.394	.257-.263	16.5	15.5	14.5	11.5								
0.38	.500-.513	.375-.385	.250-.256	16.5	15.5	14.5	11.5								
0.37	.487-.499	.366-.374	.244-.249	16.0	15.5	14.5	11.5								
0.36	.474-.486	.355-.365	.237-.243	16.0	15.5	14.0	11.5								
0.35	.461-.473	.346-.354	.231-.236	16.0	15.5	14.0	11.5								

**CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN**

0.34	.447-.460	.335-.345	.224-.230	16.0	15.0	14.0	11.5
0.33	.434-.446	.326-.334	.217-.223	16.0	15.0	14.0	11.5
0.32	.420-.433	.315-.325	.210-.216	15.5	15.0	14.0	11.5
0.31	.407-.419	.306-.314	.204-.209	15.5	15.0	14.0	11.0
0.30	.394-.406	.295-.305	.197-.203	15.5	15.0	13.5	11.0
0.29	.381-.393	.286-.294	.191-.196	15.5	15.0	13.5	11.0
0.28	.367-.380	.275-.285	.184-.190	15.5	14.5	13.5	11.0
0.27	.354-.366	.266-.274	.177-.183	15.0	14.5	13.5	11.0
0.26	.340-.353	.255-.265	.170-.176	15.0	14.5	13.5	11.0
0.25	.327-.339	.246-.254	.164-.169	15.0	14.5	13.0	10.5
0.24	.314-.326	.235-.245	.157-.163	15.0	14.0	13.0	10.5
0.23	.301-.313	.223-.234	.151-.156	14.5	14.0	13.0	10.5
0.22	.287-.300	.215-.225	.144-.150	14.5	14.0	13.0	10.5
0.21	.274-.286	.206-.214	.137-.143	14.5	14.0	13.0	10.5
0.20	.260-.273	.195-.205	.130-.136	14.5	13.5	12.5	10.5
0.19	.247-.259	.186-.194	.124-.129	14.0	13.5	12.5	10.0
0.18	.234-.246	.175-.185	.117-.123	14.0	13.5	12.5	10.0
0.17	.221-.233	.166-.174	.111-.116	14.0	13.5	12.0	10.0
0.16	.207-.220	.155-.165	.104-.110	13.5	13.0	12.0	10.0
0.15	.194-.206	.146-.154	.097-.103	13.5	13.0	12.0	9.5
0.14	.180-.193	.135-.145	.091-.096	13.5	13.0	12.0	9.5

**Tabla de elongación.**

**Límite elástico.** El límite elástico será el esfuerzo de tensión requerido para producir una elongación total determinada por medio de un extensómetro.

Grade	Total Extension of Gauge Length, Percent
E-75	0.5
X-95	0.5
G-105	0.6
S-135	0.7

**Porcentaje de extensión total.**

**Requerimientos de energía en la prueba de impacto longitudinal Charpy.** El estándar de las probetas es de 10 x 10 mm en su área transversal, sin embargo deberá de realizarse la prueba con probetas que contengan el espesor correspondiente y deseado.

Table 6—Impact Energy Requirements

1	2	3
Specimen Size mm x mm	Minimum Average Charpy V-notch Impact Energy of Each Set of Three Specimens ft/lb (J)	Minimum Charpy V-notch Impact Energy of Any Specimen of a Set ft/lb (J)
10 x 10.0	40 (54)	35 (47)
10 x 7.5	32 (43)	28 (38)
10 x 5.0	22 (30)	19 (26)

**Requerimientos de energía en el impacto.**

#### 4.5.2.4. PRUEBAS MECÁNICAS.

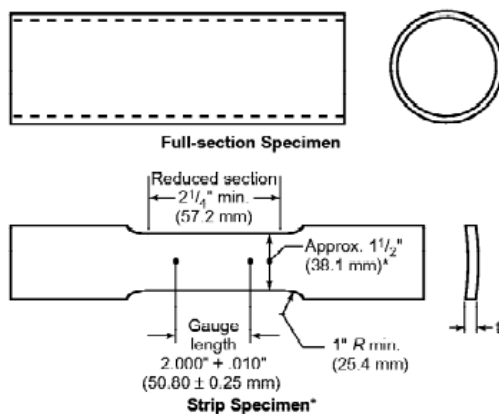
##### 4.5.2.4.1. PRUEBAS DE TENSIÓN.

Las propiedades de tensión del cuerpo de la tubería serán determinadas utilizando probetas conforme a lo requerido en la norma **ASTM A370**. Las pruebas serán desarrolladas a la temperatura del laboratorio. El tipo y el tamaño de las probetas tendrá que ser reportado por el fabricante. Las probetas para la prueba de tensión deberán de ser tomadas de la tubería, subsecuentes a un tratamiento térmico final en la línea de producción.

El número de pruebas de tensión deberá de tomar en cuenta lo siguiente.

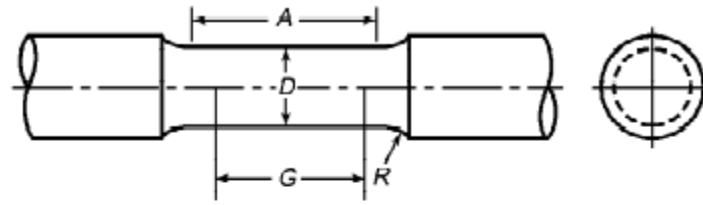
- Para el grupo 1. Una prueba de tensión deberá realizarse en una longitud determinada de tubería de perforación, tomando en cuenta 400 longitudes para un diámetro de 5 ½ pg. Para el caso de una tubería de 6 5/8 pg se tomarán en cuenta 200 longitudes. En caso de tratamiento térmico las longitudes de cada lote deberán de recibir el mismo tratamiento térmico. Para múltiples longitudes de tubería sin costura una longitud será considerada como particular.
- Para el grupo 3. Una prueba de tensión será hecha en una longitud de tubería de perforación de cada lote de 200 longitudes o menos con un diámetro de 5 ½ pg y más pequeñas. Por cada lote de 100 longitudes o menos de diámetro de 6 5/8 pg y largo. En caso de tratamiento térmico todas las longitudes de cada lote deberán de recibir el mismo tratamiento térmico.

Una prueba de tensión será hecha como un control sobre cada colada de acero utilizado en la fabricación de la tubería. Un reporte de cada prueba deberá estar disponible para el comprador.



**Probeta para la prueba de tensión.**

CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN



Round Bar Specimen

	0.500 in. Diameter		0.350 in. Diameter	
	in.	mm	in.	mm
<i>G</i> Gauge length	2.000 ±0.005	50.0 ±0.10	1.400 ±0.005	35.0 ±0.10
<i>D</i> Diameter	0.500 ±0.010	12.5 ±0.25	0.350 ±0.007	8.75 ±0.18
<i>R</i> Radius of fillet, min.	3/8	10	1/4	6
<i>A</i> Length of reduced section, min.	2 1/4	60	1 3/4	45

Round Bar Specimen

### Probeta para la prueba de tensión.

**Probetas defectuosas.** Si alguna de las probetas de tensión es defectuosa se descartara y será substituida por otra.

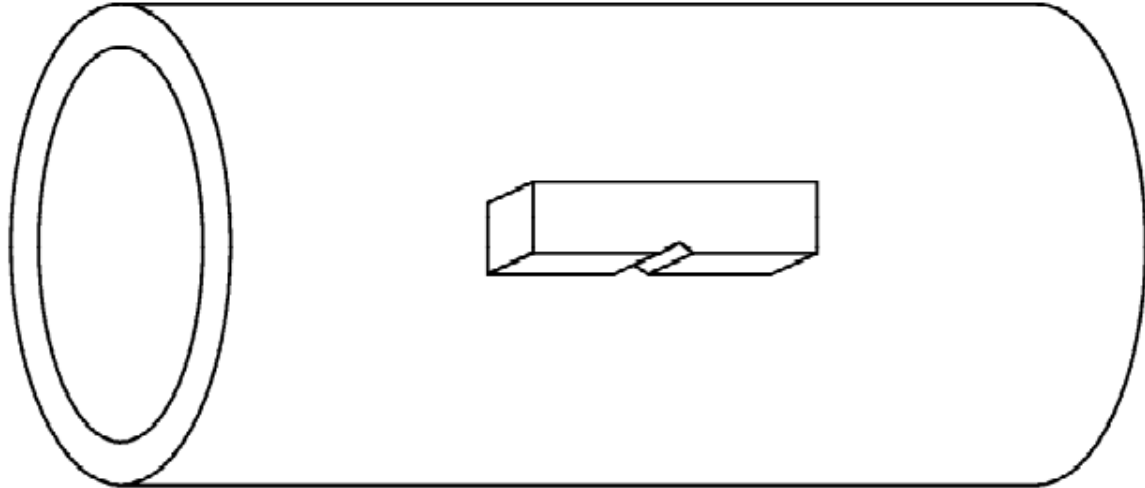
**Análisis químico.** Serán determinados por alguno de los procedimientos comúnmente usados para la determinación de la composición química como son, emisión espectroscópica, emisión de rayos X, absorción atómica, técnicas de combustión o procedimientos de humedad analíticos. La calibración de estos métodos se encuentra normalizada. Todos los análisis químicos se desarrollan de acuerdo a la norma **ASTM A751**.

#### 4.5.2.5. PRUEBA DE IMPACTO LONGITUDINAL.

**Procedimiento.** La prueba de impacto Charpy tipo A será desarrollada dentro del siguiente rango de temperatura (21°C ± 2.8°C). La prueba se llevara a cabo siguiendo la normatividad correspondiente, **ASTM A370**.

Tres probetas serán tomadas paralelas al eje de la tubería. Los materiales que muestren imperfecciones serán descartados.

Tres probetas de impacto Charpy representan una prueba, serán tomadas de una longitud de tubería de perforación de cada lote de 200 longitudes o menos con diámetros de 5 1/2 pg o menores, por cada lote de 100 longitudes o menos de diámetro de 6 5/8 pg. En caso de tuberías con tratamiento térmico todas las longitudes han recibido el mismo tratamiento térmico.



**Orientación de la probeta en la prueba de impacto. Probetas longitudinales.**

Las pruebas mecánicas de inspección de tubería de perforación está orientada principalmente a los laboratorios de los fabricantes. El proveedor de tubería tiene que someter su producto a las normas de calidad vigente, así como también a las normas de los organismo reguladores.

El análisis de la tubería de perforación después de su fabricación cubre dos aspectos de manera general, el mecánico y el químico.

Por orden cronológico los análisis químicos son los que se realizan de primera instancia puesto que se tiene que definir la calidad y el tipo del acero, el cual posteriormente es verificado mediante diversos procesos regulados.

Los análisis mecánicos hacen intervenir procesos de ingeniería de materiales los cuales están orientados a dar a conocer propiedades mecánicas del material con que fue elaborado el producto. Estas pruebas se desarrollan de manera micro y macroscópica antes y después de la fabricación de los lotes de tubería de perforación con la finalidad de evaluar la calidad del producto.

Existen regulaciones que permiten distintos tipos de pruebas antes y después de la fabricación. La normatividad vigente es muy estricta en cuanto a los procesos de evaluación de materiales y exige a los fabricantes se basen en ella para poder facilitar los procesos de inspección y satisfacer las necesidades de los consumidores.

La tubería de perforación tiene un papel fundamental en la industria petrolera y debido a ello su calidad, eficiencia y durabilidad deben de ser evaluadas antes y después de su operación para así poder mejorar y optimizar la perforación de pozos petroleros en México y alrededor del mundo.

### **4.5.3. NORMA (ASTM A370), MÉTODOS NORMALIZADOS Y DEFINICIONES PARA PRUEBAS MECÁNICAS DE PRODUCTOS DE ACERO.**

Estos métodos cubren procedimientos y definiciones para pruebas mecánicas de productos de acero forjado y fundido. Varias pruebas mecánicas son usadas para determinar propiedades dispuestas en las especificaciones correspondientes. Esta norma describe las siguientes pruebas mecánicas.

- Tensión
- Flexión
- Dureza
- Impacto

Dentro de esta norma existe un anexo dedicado especialmente a los productos tubulares de acero.

#### **4.5.3.1. PRUEBA DE TENSIÓN.**

Realizada a productos de acero. Los materiales son sometidos a una carga de tensión hasta la ruptura.

**Selección de la probeta.** Será de acuerdo a las especificaciones del producto correspondiente. Los aceros forjados son probados principalmente en direcciones longitudinales, en algunos casos en los cuales el tamaño lo permite, la prueba se elabora de manera transversal, radial o tangencial.

**Acero forjado.** Son probados usualmente en dirección longitudinal, en algunos casos cuando el tamaño lo permite y el servicio es justificado, la prueba puede ser en dirección transversal, radial o longitudinal.

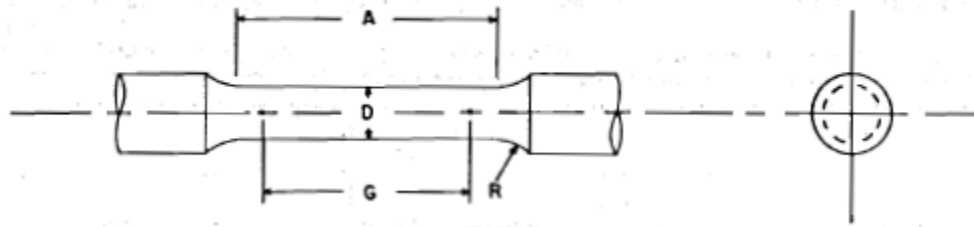
**Acero forjado 2.** El metal para la prueba de tensión bajo extensiones o prolongaciones de uno o ambos extremos finales.

**Acero fundido.** Se llevara a cabo bajo especificaciones para aceros fundidos. A prueba se llevara a cabo en bloques.

**Tamaño y tolerancia.** La selección y el tipo de probeta se encuentran en las especificaciones del producto. Deberá ser probada la sección completa de la probeta.

**Probetas circulares.** El diámetro estándar es de 12.5mm, se usan generalmente para probar materiales metálicos.

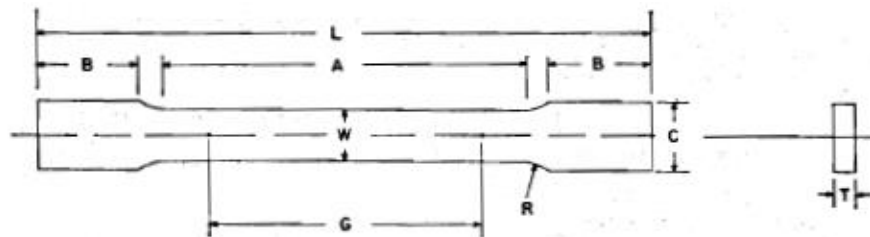
CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN



Nominal Diameter	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional to Standard							
	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm
	0.500	12.5	0.350	8.75	0.250	6.25	0.160	4.00	0.113	2.50
<i>G</i> —Gage length	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	1.400 ± 0.005	35.0 ± 0.10	1.000 ± 0.005	25.0 ± 0.10	0.640 ± 0.005	16.0 ± 0.10	0.450 ± 0.005	10.0 ± 0.10
—Diameter (Note 1)	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.350 ± 0.007	8.75 ± 0.18	0.250 ± 0.005	6.25 ± 0.12	0.160 ± 0.003	4.00 ± 0.08	0.113 ± 0.002	2.50 ± 0.05
<i>R</i> —Radius of fillet, min	3/8	10	1/4	6	3/16	5	3/32	4	3/32	2
<i>A</i> —Length of reduced section, min (Note 2)	2 1/4	60	1 3/4	45	1 1/4	32	3/4	20	3/8	16

**Probeta circular estándar para prueba de tensión.**

Se muestra que las probetas de tamaño pequeño son proporcionales a las probetas estandarizadas. Estas probetas pueden ser utilizadas para distintas pruebas. Se pueden utilizar otros tamaños. Es importante que la longitud calibrada para la medida de la elongación sea cuatro veces el diámetro de la probeta.



	Standard Specimens				Subsize Specimen	
	Plate-Type, 1 1/2-in. Wide		Sheet-Type, 1/2-in. Wide		1/4-in. Wide	
	in.	mm	in.	mm	in.	mm
<i>G</i> —Gage length (Notes 1 and 2)	8.00 ± 0.01	200 ± 0.25	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	1.000 ± 0.003	25.0 ± 0.08
<i>W</i> —Width (Notes 3, 4, and 5)	1 1/2 + 1/8 - 3/4	40 + 3 - 6	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.250 ± 0.002	6.25 ± 0.05
<i>T</i> —Thickness (Note 6)				thickness of material		
<i>R</i> —Radius of fillet, min	1/2	13	1/2	13	1/4	6
<i>L</i> —Over-all length, min (Notes 2 and 7)	18	450	8	200	4	100
<i>A</i> —Length of reduced section, min	9	225	2 1/4	60	1 1/4	32
<i>B</i> —Length of grip section, min (Note 8)	3	75	2	50	1 1/4	32
<i>C</i> —Width of grip section, approximate (Notes 4, 9, and 10)	2	50	3/4	20	3/8	10

**Probetas rectangulares para prueba de tensión.**



## CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

La forma de las probetas deberá de cumplir con las especificaciones correspondientes.

**Determinación de las propiedades de tensión.** Punto de fluencia. Es el primer esfuerzo en el material, menor al máximo esfuerzo obtenido. Un incremento en la deformación ocurre sin un incremento en el esfuerzo. El punto de fluencia es una característica de los materiales que muestran un incremento en la deformación sin un incremento en el esfuerzo.

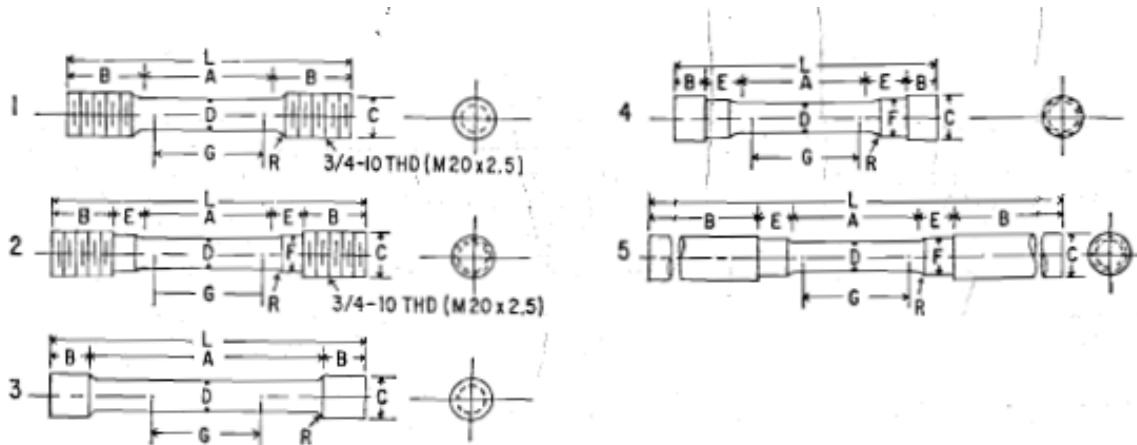
- Punto de fluencia
- Caída de la viga
- Método del diagrama autográfico
- Método de extensión total bajo carga

**Límite elástico.** Es el esfuerzo en el que un material exhibe un específico límite de desviación entre el esfuerzo y la deformación. La desviación se expresa en términos de deformación, porciento compensado, extensión total bajo carga, etc. Se utilizan los siguientes métodos para determinar el límite elástico.

- Método de compensación
- Método de extensión total bajo carga

La prueba de tensión nos puede dar a conocer otros parámetros y propiedades como son:

- Elongación
- Fractura
- Reducción del área

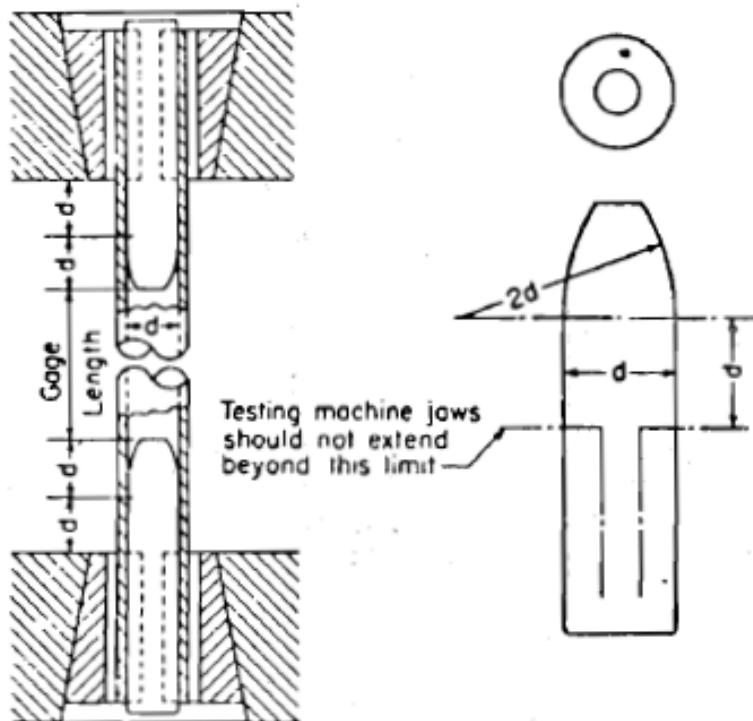


**Forma de los extremos finales en las probetas de la prueba de tensión.**

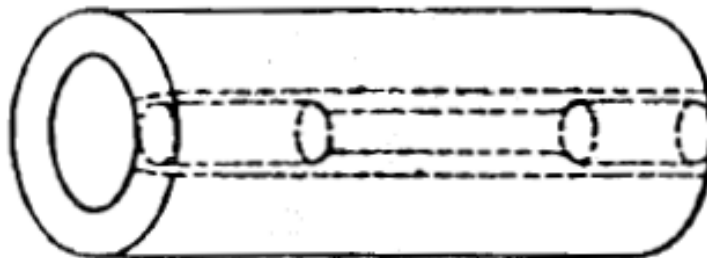
**CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN**

	Specimen 1		Specimen 2		Specimen 3		Specimen 4		Specimen 5	
	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm
<i>G</i> —Gage length	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10
<i>D</i> —Diameter (Note 1)	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25
<i>R</i> —Radius of fillet, min	$\frac{1}{8}$	10	$\frac{1}{8}$	10	$\frac{1}{16}$	2	$\frac{1}{8}$	10	$\frac{1}{8}$	10
<i>A</i> —Length of reduced section	$2\frac{1}{4}$ , min	60, min	$2\frac{1}{4}$ , min	60, min	4, approximately	100, approximately	$2\frac{1}{4}$ , min	60, min	$2\frac{1}{4}$ , min	60, min
<i>L</i> —Over-all length, approximate	5	125	$5\frac{1}{2}$	140	$5\frac{1}{2}$	140	$4\frac{1}{2}$	120	$9\frac{1}{2}$	240
<i>B</i> —Length of end section (Note 2)	$1\frac{1}{2}$ , approximately	35, approximately	1, approximately	25, approximately	$\frac{3}{8}$ , approximately	20, approximately	$\frac{1}{2}$ , approximately	13, approximately	3, min	75, min
<i>C</i> —Diameter of end section	$\frac{3}{8}$	20	$\frac{3}{8}$	20	$2\frac{1}{2}$	18	$\frac{3}{8}$	22	$\frac{3}{8}$	20
<i>E</i> —Length of shoulder and fillet section, approximate	...	...	$\frac{1}{8}$	16	...	...	$\frac{1}{8}$	20	$\frac{1}{8}$	16
<i>F</i> —Diameter of shoulder	...	...	$\frac{1}{8}$	16	...	...	$\frac{1}{8}$	16	$1\frac{1}{2}$	15

**Extremos finales de las probetas para las pruebas de tensión.**

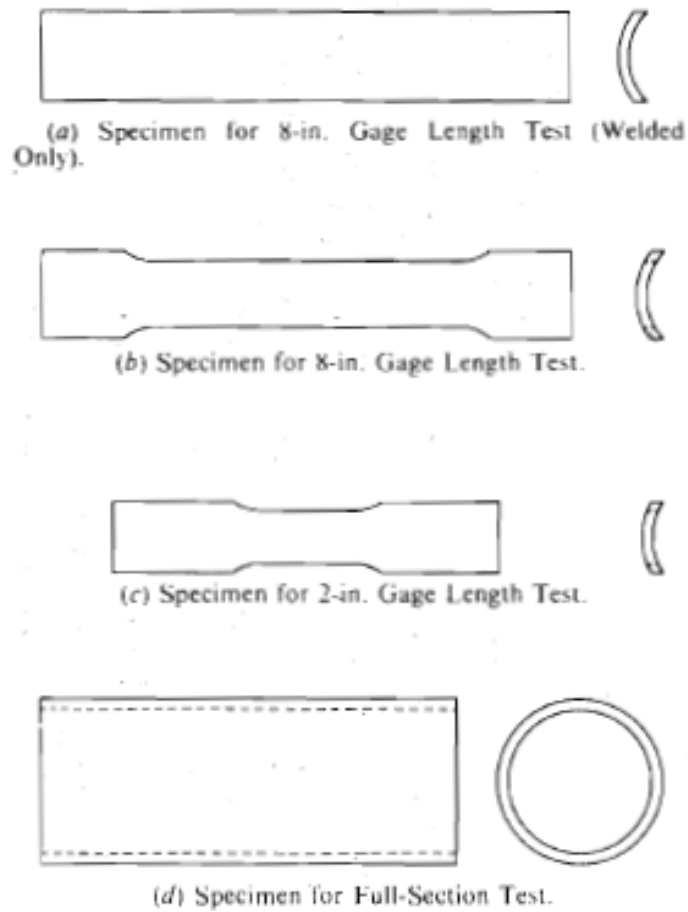


**Probetas tubulares en la prueba de tensión.**

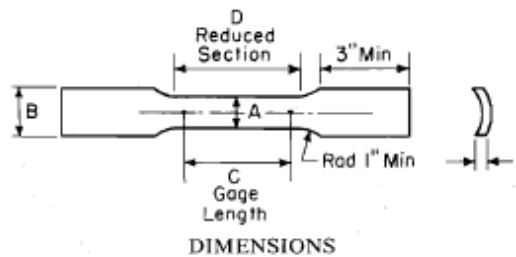


**Colocación de las probetas de tipo tubular en la prueba de tensión longitudinal.**

CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN



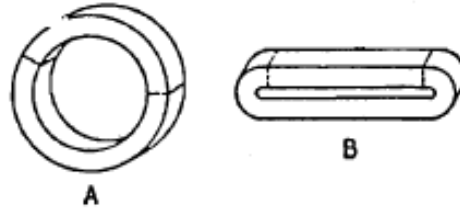
**Probetas para la prueba de tensión longitudinal.**



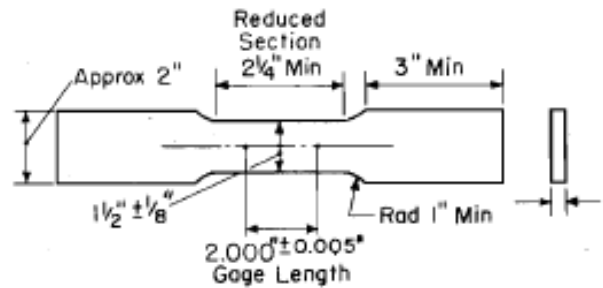
Specimen No.	Dimensions, in.			
	A	B	C	D
1	$\frac{1}{2} \pm 0.015$	$\frac{1}{2}$ approximately	$2 \pm 0.005$	2 $\frac{1}{4}$ min
2	$\frac{3}{4} \pm 0.031$	1 approximately	$2 \pm 0.005$	2 $\frac{1}{4}$ min
3	$1 \pm 0.062$	1 $\frac{1}{2}$ approximately	$4 \pm 0.005$	4 $\frac{1}{2}$ min
			$2 \pm 0.005$	2 $\frac{1}{4}$ min
4	$1 \frac{1}{2} \pm \frac{1}{8}$	2 approximately	$4 \pm 0.005$	4 $\frac{1}{2}$ min
			$2 \pm 0.010$	2 $\frac{1}{4}$ min
			$4 \pm 0.015$	4 $\frac{1}{2}$ min
			$8 \pm 0.020$	9 min

**Dimensiones y tolerancias para las probetas de la prueba de tensión longitudinal.**

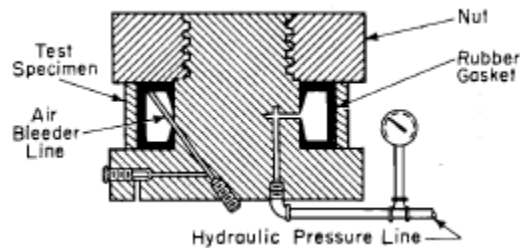
CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN



Visualización de las probetas de la prueba de tensión longitudinal antes y después de la realización de la misma.



Probeta utilizada en la prueba de tensión transversal.



Máquina de prueba para determinar el límite elástico transversal.



Extensómetro.

#### 4.5.3.2. PRUEBA DE FLEXIÓN.

La prueba de tensión es un método para evaluar la ductilidad, no puede considerarse un significado cuantitativo cuando se está llevando a cabo la prueba. La severidad de la prueba de doblaje es función del ángulo de doblaje y del diámetro interno con el que la probeta es doblada así como también de la sección transversal de la probeta.

El ciclo de tiempo y temperatura empleados son efecto de un proceso previo y no harán que el material cambie. La probeta de la prueba de tensión debe de estar diseñada bajo las debidas especificaciones.

Los ciclos de temperatura de la prueba pueden variar de 24 a 48h. Los tratamientos térmicos se llevaran a cabo bajo las debidas especificaciones. Si un lote de producto requiere tratamiento térmico este se aplicará a todos los elementos de la línea de producción.

#### 4.5.3.3. PRUEBA DE DUREZA.

Es una medida de la resistencia a la penetración y es utilizada principalmente para obtener una aproximación rápida de las propiedades de tensión. Existen conversiones para el cambio de una escala de dureza a otra.

Estos valores de conversión han sido obtenidos a partir de gráficos generados en computadora y son presentados muy cercanos a 0.1. Todos los valores de dureza convertidos de una escala a otra son considerados aproximados, sin embargo, todos los números convertidos al número de dureza Rockwell serán redondeados al número entero correspondiente.

#### 4.5.3.4. PRUEBA DE DUREZA BRINELL.

Una carga específica es aplicada a la superficie de la probeta a ser probada, la carga es transmitida a la superficie de esta probeta a través de una bola de diámetro especificado. El diámetro promedio del penetrador es usado como base para calcular el número de dureza Brinell.

El cociente de la carga aplicada dividida entre el área de la superficie del penetrador, asumiendo que este es esférico, es llamado *Número de Dureza Brinell (HB)*, se puede expresar por medio de la siguiente ecuación.

$$HB = P / [(\pi D / 2)(D - \sqrt{D^2 - d^2})]$$

## CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

Dónde:

- HB = número de dureza Brinell
- P = Carga aplicada, Kgf
- D = diámetro de la bola de acero, mm
- d = diámetro promedio del penetrador, mm

La prueba de dureza Brinell emplea una bola de 10mm con una carga de 3000 Kgf para materiales duros y 1500 o 500 Kgf para secciones delgadas o materiales blandos. Se pueden utilizar cargas y tamaños de penetrador diferentes solo cuando esto es especificado.

Se puede especificar un rango de dureza único para materiales con tratamientos térmicos previos o posteriores a la prueba. Para materiales aleados o altamente aleados se tienen que seguir las especificaciones correctas. De manera general no se llevan a cabo las pruebas de dureza en materiales con tratamiento térmico.

La prueba de dureza Brinell se puede requerir cuando las propiedades de tensión no son especificadas. La prueba de dureza Brinell puede ser substituida por la prueba de tensión.

La máquina de prueba deberá cumplir con los siguientes requerimientos:

- Máquina de prueba
- Micrómetro microscópico
- Bola estándar
- Probeta

**Pruebas portables de dureza Brinell.** Bajo ciertas circunstancias puede ser deseable tener un instrumento de dureza Brinell portable. Se calibra para dar resultados equivalentes a los de la máquina de dureza Brinell estándar.

### 4.5.3.5. PRUEBA DE DUREZA ROCKWELL.

En esta prueba un valor de dureza es obtenido a partir de una lectura directa en la máquina, determinando la profundidad de penetración en un punto por un diamante o una bola de acero dentro de una probeta bajo ciertas condiciones. La carga inicial es de 10 Kgf lo que causa una penetración inicial. La aplicación de una carga mayor depende de la escala que se esté utilizando, esto causará una mayor penetración por parte del penetrador. La mayor carga es removida cuando la carga mínima está actuando.

El número Rockwell es proporcional a la diferencia de la penetración entre la máxima o mínima carga y se lee directamente del medidor. Es un número

CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

arbitrario que se incrementa conforme la dureza también lo hace. Las escalas usadas frecuentemente son:

Scale Symbol	Penetrator	Major Load, kgf	Minor Load, kgf
B	1/16-in. steel ball	100	10
C	Diamond brale	150	10

**Escalas de dureza Rockwell más utilizadas.**

Las máquinas de dureza superficial Rockwell son utilizadas para la prueba en aceros muy delgados o en placas superficiales muy delgadas. Las escalas de dureza superficial son las siguientes:

Scale Symbol	Penetrator	Major Load, kgf	Minor Load, kgf
15T	1/16-in. steel ball	15	3
30T	1/16-in. steel ball	30	3
45T	1/16-in. steel ball	45	3
15N	Diamond brale	15	3
30N	Diamond brale	30	3
45N	Diamond brale	45	3

**Escalas de dureza superficial.**

**4.5.3.6. PRUEBA DE IMPACTO CHARPY.**

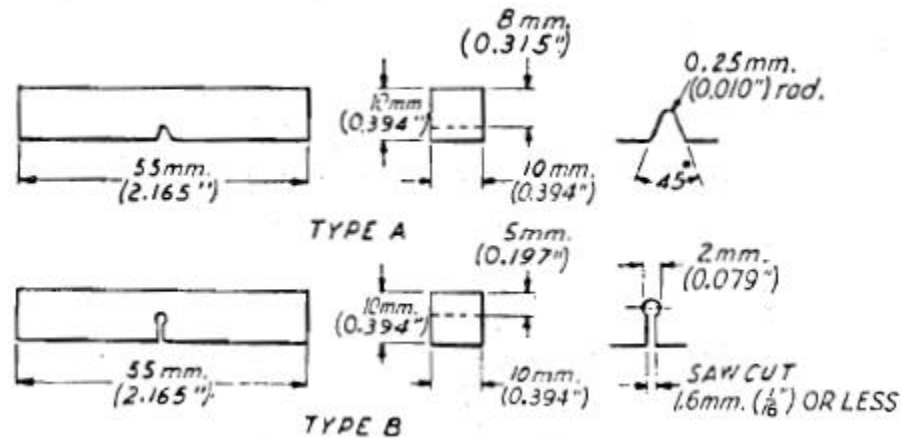
La prueba de impacto Charpy es una prueba dinámica en la que se selecciona una probeta, la cual es golpeada y rota mediante un golpe sencillo y utilizando una máquina diseñada especialmente para ello.

La energía requerida para fracturar la probeta es medida. Los valores de energía determinados son cualitativos y se comparan con una probeta base, comúnmente llamado criterio de aceptación, lo anterior sirve para cálculos ingenieriles. El

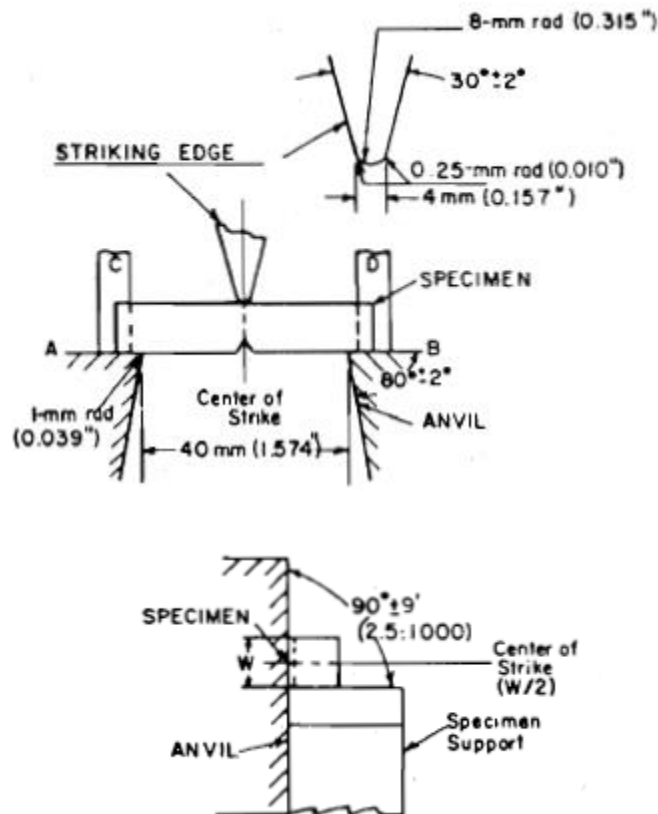
CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

porcentaje en la fractura de cizallamiento es uno más de los criterios de aceptación de la prueba.

La temperatura de la prueba suele ser a temperatura ambiente a menos que se requieran especificaciones de temperatura, las probetas deberán recibir el adecuado tratamiento térmico.



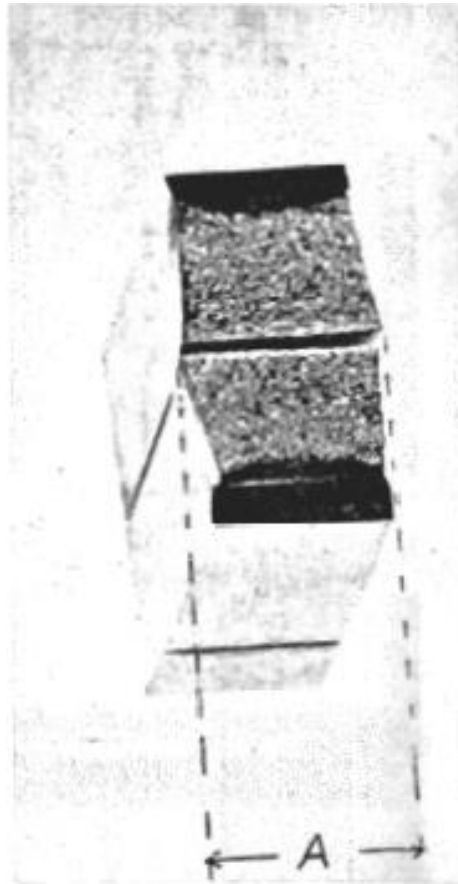
**Tipos de probeta para la prueba de impacto Charpy.**



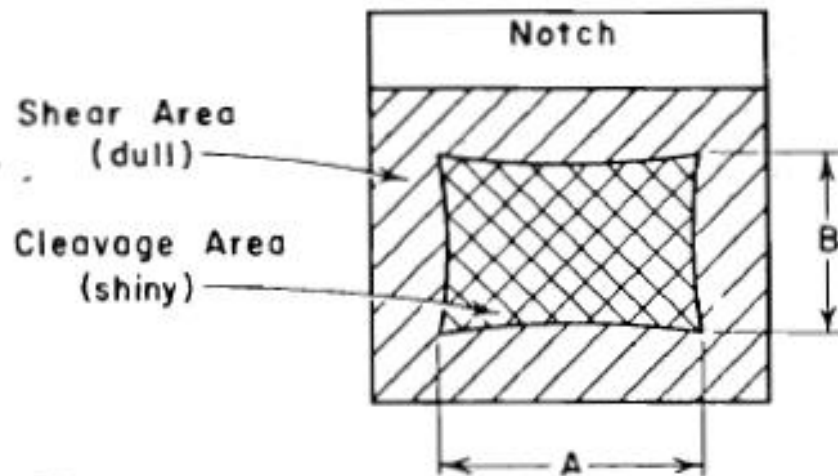
**Prueba de impacto. Viga simple.**



CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

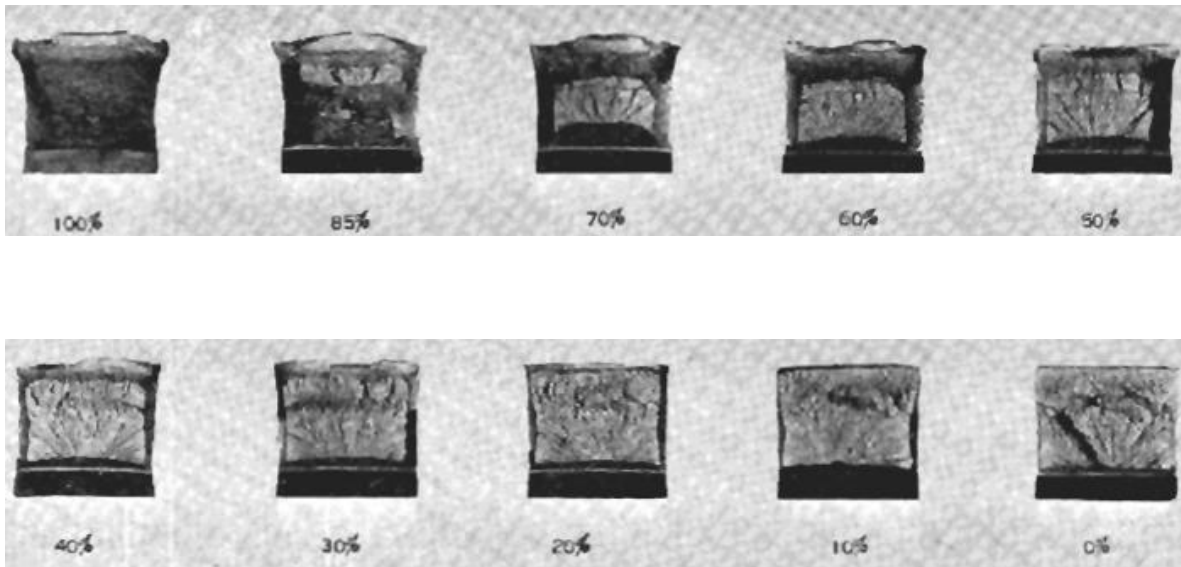


Mitad de una probeta rota por la prueba de impacto Charpy. Expansión lateral.

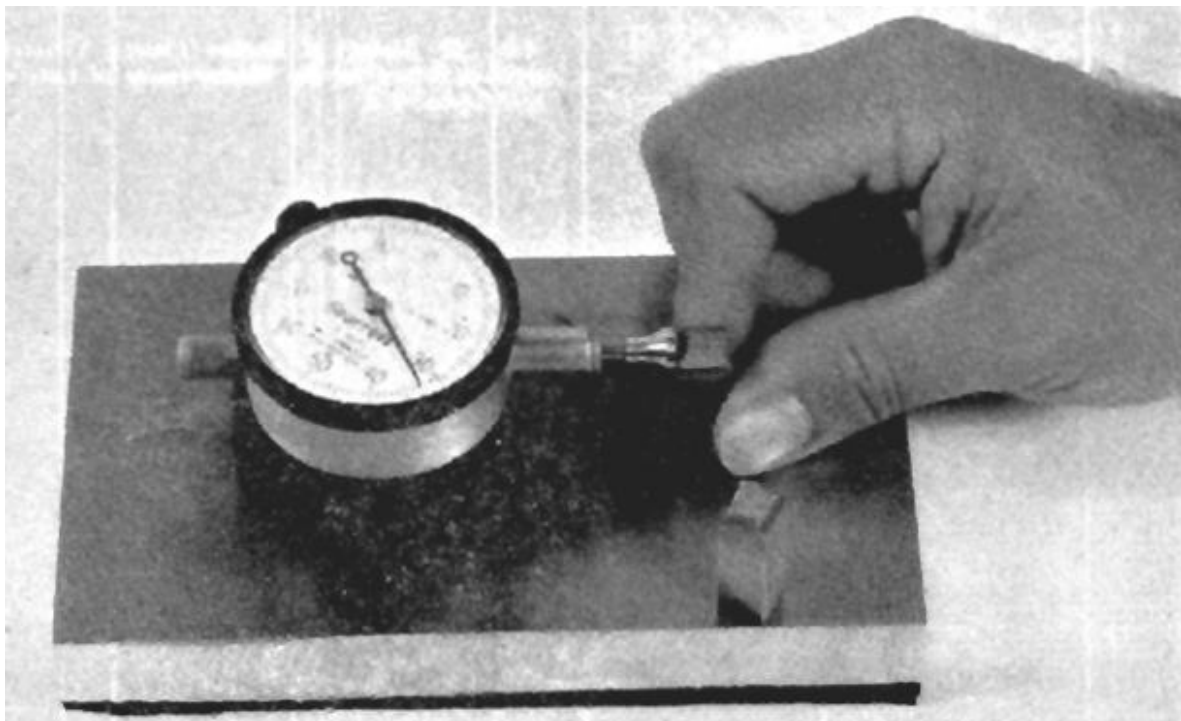


Determinación del porcentaje de cizallamiento.

**CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN**



**Apariencia de las fracturas.**



**Calibrador de expansión lateral para probetas de la prueba de impacto Charpy.**

**Condiciones y aparato de prueba.** Es una máquina mediante la cual se rompe una probeta por medio de un impacto simple utilizando un péndulo. Al péndulo le es colocado un peso. Se conoce la energía del impacto. Se mide la altura del péndulo después de la ruptura del espécimen y es usada para determinar la energía residual del péndulo. Una viga simple es sujeta horizontalmente. Las máquinas de impacto Charpy generalmente golpean el espécimen con una energía de 258 a 359 J y la velocidad lineal en el punto de impacto es de 16 a 19 ft/s.

**Resultados de la prueba.** El resultado de una prueba de impacto será el promedio aritmético de los resultados de tres probetas. El criterio de aceptación será la cantidad de energía absorbida. No más de una probeta puede exhibir un valor menor al mínimo especificado. El criterio de aceptación también puede estar basado en la expansión lateral. El valor de cada una de las probetas sometidas a la prueba debe de ser igual o exceder el mínimo valor especificado. Sin embargo existen distintos criterios de aceptación.

- Resistencia al impacto
- Temperatura de transición Frágil-Dúctil
- Nivel de energía
- Apariencia de la fractura y temperatura de transición
- Determinación del porcentaje de cizallamiento
- Determinación de la temperatura de transición
- Expansión lateral

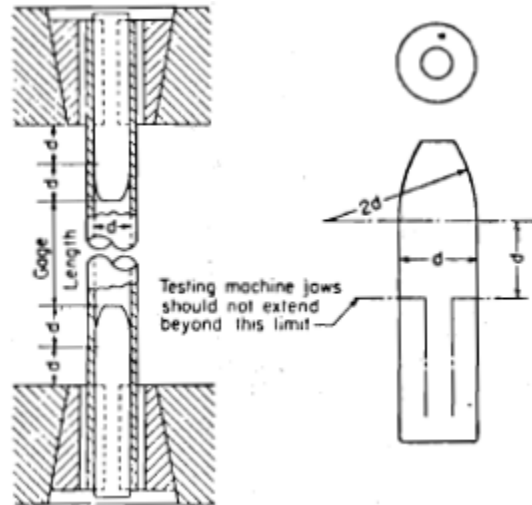
#### 4.5.3.7. PRODUCTOS DE ACERO TUBULARES.

**Alcance.** Se cubren definiciones y métodos peculiares para productos tubulares que no son tratados con anterioridad en la norma.

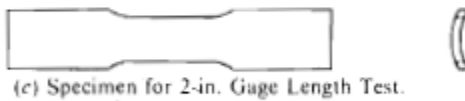
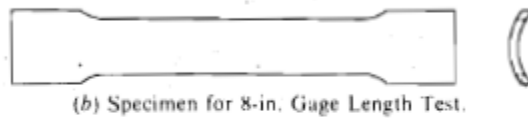
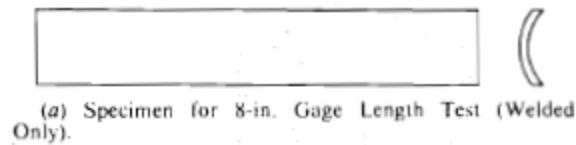
**Probetas para la prueba de tensión longitudinal.** En la práctica estandarizada se utilizan probetas tubulares de tamaño completo acoplándose siempre a las dimensiones del equipo. La probeta debe de permitir a la máquina el buen funcionamiento y desarrollo de la prueba. La longitud de la sección completa de la probeta depende de la previa calibración para poder medir la elongación. Por otra parte se requiere la especificación individual del producto. La longitud calibrada para tubería soldada es normalmente 8 pg (200mm). Para los tamaños nominales de  $\frac{3}{4}$  pg y más pequeños la calibración será como sigue:

Nominal Size, in.	Gage Length, in. (mm)
$\frac{3}{4}$ and $\frac{1}{2}$	6 (150)
$\frac{3}{8}$ and $\frac{1}{4}$	4 (100)
$\frac{1}{8}$	2 (50)

CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN



**Probetas tubulares para la prueba de tensión.**



**Especificaciones para las probetas en la prueba de tensión longitudinal.**

Para los tubos soldados eléctricamente y sin costura la calibración será de 2 pg. Sin embargo para tubería que tiene un diámetro externo de 3/8 pg o menor, la calibración será igual a cuatro veces el diámetro externo cuando se requiera comparar los valores de elongación con el largo de las probetas.

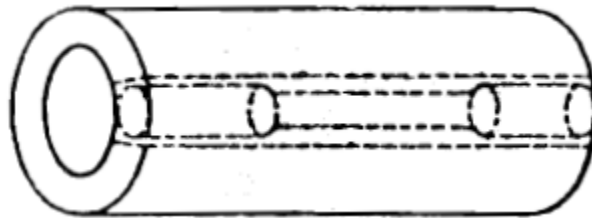
Para determinar el área de la sección transversal de la probeta utilizamos la siguiente ecuación:

$$A = 3.1416t(D - t)$$

Dónde:

- A = área de la sección transversal,  $\text{pg}^2$
- D = diámetro externo,  $\text{pg}$
- t = espesor de pared de la tubería,  $\text{pg}$

**Probetas para la prueba de tensión con tiras longitudinales.** Para productos tubulares de longitud grande que no pueden ser probados de manera completa, se cortan tiras de la tubería como se indica en la siguiente figura.



#### **Posición de las probetas en la prueba de tensión longitudinal.**

Las probetas de tubería sin costura y soldada se pueden utilizar de manera alternada. Las superficies pueden ser probadas siempre y cuando cumplan con las especificaciones debidas. Las probetas estándar para la prueba de tensión son de  $1 \frac{1}{2}$   $\text{pg}$ . En ocasiones especiales se consideran probetas de menor tamaño, en estos casos la medida de las probetas será de  $\frac{3}{4}$   $\text{pg}$ . El ancho de cada probeta debería de ser medido para comprobar el paralelismo que guarda la tubería con su eje longitudinal de igual manera el espesor de pared.

**Probetas para la prueba transversal.** La prueba de tensión transversal no se recomienda para productos tubulares que tengan un diámetro menor a 8  $\text{pg}$ . Cuando esta prueba es requerida se cortan anillos de los extremos finales de los tubos.

La prueba se puede realizar en frío o en caliente, subsecuentemente a esto las probetas pueden ser normalizadas. Si las piezas a ser probadas requieren de tratamientos térmicos estos se llevaran a cabo de manera especificada y bajo las debidas especificaciones.

La prueba de tensión transversal en tubería de acero soldada o tubería normal funciona para determinar la resistencia de la soldadura. El espesor de las probetas debe de ser medido y utilizado para determinar el área de la sección transversal.

#### CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

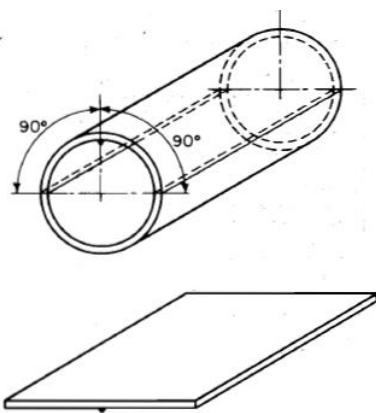
**Prueba de dureza.** Las pruebas de dureza son hechas sobre superficies externa e internas más apropiadamente al final de la tubería. La carga Brinell estándar de 3000-Kgf causa una mayor deformación en probetas tubulares delgadas. En estos casos deberá de aplicarse una carga de 500-Kgf. La prueba de dureza Brinell no será aplicada a productos tubulares con diámetros externos menores a 2 pg o con espesores de pared menores a 0.2 pg.

La prueba de dureza Rockwell se hace normalmente sobre superficies internas. Esta prueba no puede desarrollarse en tubería menor a 5/16 pg. Esta prueba tampoco podrá ser desarrollada en materiales con tratamiento térmico como templado o enfriamiento con espesores menores a 0.065 pg. Para tubería con espesores menores a los permitidos en la prueba de dureza Rockwell convencional, en algunas ocasiones puede ser substituida por la prueba de dureza Rockwell superficial. Posterior a la prueba se hace una comparación de los resultados obtenidos para ambas superficies la externa y la interna. Se hacen los ajustes necesarios para compensar los efectos de la curvatura. La prueba de dureza Rockwell es normalmente desarrollada en superficies externas. La prueba de dureza Rockwell superficial no se desarrollara en tubería que cuente con un diámetro interno menor a ¼ pg.

**Pruebas manipulables.** Las siguientes pruebas se desarrollan para probar la ductilidad de ciertos productos tubulares.

**Prueba de aplastamiento.** Se realiza comúnmente con probetas obtenidas de productos tubulares. Se mide la severidad de la prueba de aplastamiento por la distancia de las placas paralelas y varía de acuerdo a la dimensión del tubo o tubería. La probeta para la prueba no debe de ser menor a las 2 ½ pg.

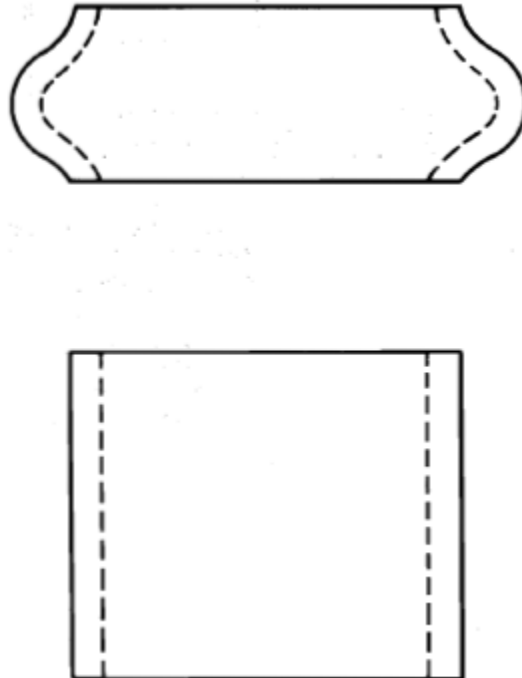
**Prueba de aplastamiento invertida.** Prueba que está diseñada para realizarse sobre tubería soldada eléctricamente. Las probetas consisten en tuberías de aproximadamente 4 pg.



**Probetas para pruebas de aplastamiento.**

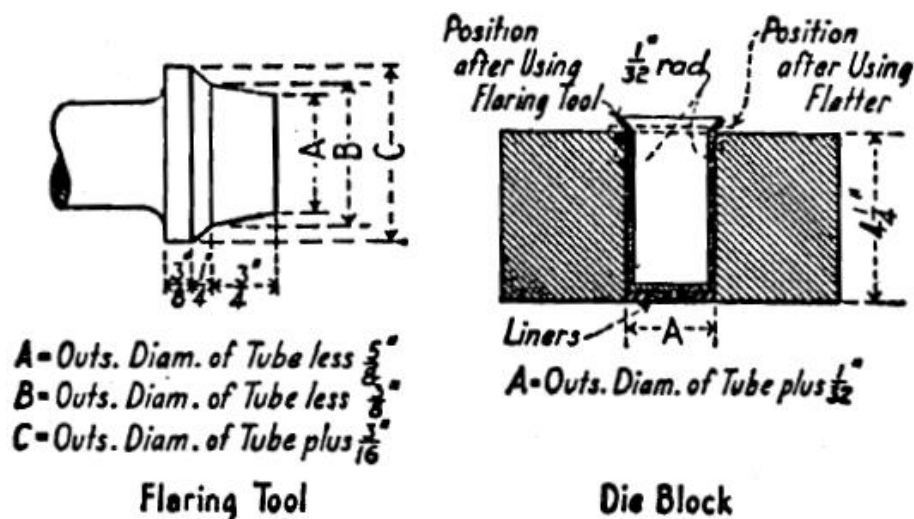
CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

**Prueba de aplastamiento 2.** Se refiere a una prueba de aplastamiento alterada y usada para evaluar la ductilidad. La probeta se corta de un tubo usualmente de 2 ½ pg. La prueba se realiza de acuerdo con algunas especificaciones.



Probetas de la prueba de aplastamiento modificada.

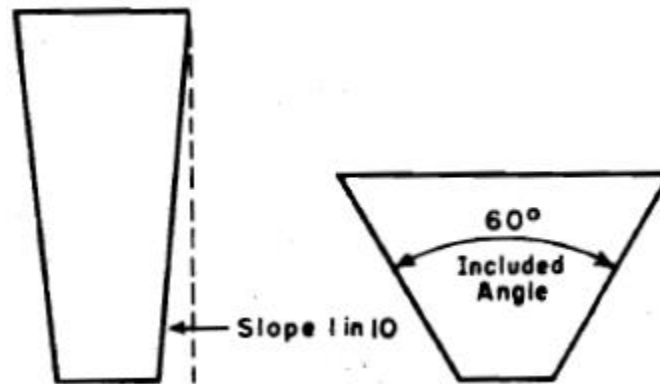
**Prueba de Brida.** Utilizada para determinar la ductilidad y se realiza con una probeta en forma de anillo que se obtiene de la tubería o tubo no menor a las 4 pg. Está prueba es ampliamente recomendada en el análisis de productos tubulares.



Herramientas para la prueba de brida.

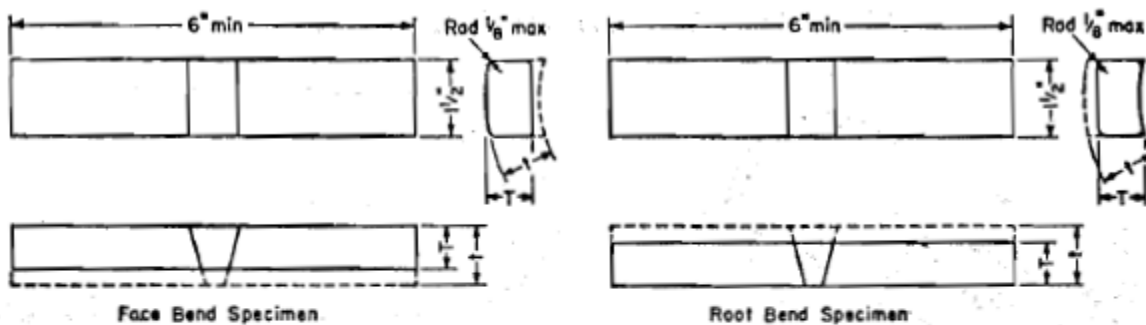
CAPÍTULO 4. MÉTODOS DESTRUCTIVOS. NORMATIVIDAD ASTM Y API APLICADA  
PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

**Prueba de extensión.** Para ciertos tubos sometidos a presión, existe una prueba alterna a la de brida. Consiste en expandir la probeta hasta que el diámetro interno sea incrementado a la dimensión requerida de acuerdo a las especificaciones.



**Herramientas utilizadas en la prueba de encendido.**

**Prueba de flexión.** La prueba de flexión es usada para determinar la ductilidad de una probeta. La tubería es doblada y en base a eso se determinan múltiples propiedades de utilidad. La naturaleza de esta prueba radica en las especificaciones de la probeta.



NOTE—Metric equivalent: 1 in. = 25.4 mm.

Pipe Wall Thickness ( $t$ ), in.	Test Specimen Thickness, in.
Up to $\frac{3}{8}$ , incl	$t$
Over $\frac{3}{8}$	$\frac{3}{8}$

**Características de las probetas para la prueba de flexión.**



## **CAPÍTULO 5**

### **INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS Y PRINCIPIOS BÁSICOS SOBRE INSPECCIÓN VISUAL APLICADA A LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN**

## **5.1. INTRODUCCIÓN A LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

Los ensayos no destructivos (END) son métodos de inspección que se emplean para la detección y evaluación de discontinuidades superficiales, subsuperficiales e internas de los materiales sin destruirlos, sin alterar o afectar su utilidad futura.

Los END son un campo de la ingeniería que se aplica en la fabricación y/o construcción de sus componentes, subensambles, equipos de instalaciones donde intervienen varias actividades.

### **5.1.1. APLICACIONES**

- Recepción de materia prima
- Procesos de fabricación
- Maquinado o ensamble final
- Procesos de reparación
- Servicios y paros de mantenimiento preventivo

Campos de Aplicación:

Los END son métodos de inspección que pueden ser aplicados en los diferentes sectores de la industria entre ellos.

- Industria Aeronáutica
- Industria Metalmeccánica
- Industria Naval
- Industria Petrolera
- Industria Alimentaria
- Industria Farmacéutica
- Industria Aeroespacial

### **5.1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS END SEGÚN EL ALCANCE DEL MÉTODO**

Los métodos de ensayos no destructivos según la ASNT (American Society of Nondestructive Testing) son:

1. Inspección Visual (VT)
2. Líquidos Penetrantes (PT)
3. Partículas Magnéticas (MT)
4. Electromagnetismo (Corriente de Eddy) (ET)

5. Ultrasonido (UT)
6. Radiografía (RT)
7. Emisión Acústica (AET)
8. Radiografía con neutrones (NRT)
9. Termografía Infrarroja (TIR)
10. Análisis de Vibraciones (V A)
11. Prueba de Fuga (LT)
12. Método Láser (LM)

**NOTA:** En el presente trabajo se analizarán los métodos de inspección visuales, líquidos penetrantes, partículas magnéticas y ultrasonido, ya que son los más usados actualmente en la industria petrolera en México.

Cabe destacar que otro método usado pero usualmente en taller y no en campo es la radiografía industrial, ya que se necesita un isótopo radioactivo como fuente generadora de rayos gamma para detectar las discontinuidades internas en la tubería, debido a su peligrosidad se usa más en control de calidad en fabricación de tubería, por lo que no se analizara.

### **TÉCNICAS DE INSPECCIÓN SUPERFICIAL**

Se emplean para detectar y evaluar las discontinuidades abiertas a la superficie (VT y PT) y/o muy cercanas a ella (MT y ET).

### **MÉTODOS DE INSPECCIÓN VOLUMÉTRICA**

Se emplean para verificar la sanidad interna de los materiales. Comprueban el grado de integridad de un material en todo su espesor. (UT, RT, NRT, AET)

### **5.1.3. MÉTODOS DE INSPECCIÓN DE LA INTEGRIDAD O DE HERMETICIDAD.**

Son las técnicas de inspección que se emplean para determinar la hermeticidad de un equipo o sistema que contiene un fluido (Líquido o Gas) a una presión superior, igual o inferior a la atmosférica: Se tienen dos grupos:

#### **a) Pruebas por cambio de Presión**

Hidroestática

Neumática

## **b) Pruebas por pérdidas de Fluido**

Espectro de masas

Detector de halógenos

(Gases compuestos que contienen Cl, F, Br, I)

Prueba de burbuja

### **5.1.4. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS MÉTODOS DE LOS END**

Todos los métodos tienen ventajas y limitaciones y su principal ventaja es que se complementan entre sí. Las parejas clásicas son:

- MT Vs. PT
- UT Vs. RT
- NRT Vs. RT

VENTAJAS:

- El material inspeccionado sigue siendo útil
  - Son rápidos de aplicar
  - Aumentan la seguridad y confiabilidad de un producto
  - Se pueden emplear en cualquier parte del procedimiento de producción:
- Recepción de materia prima
  - Proceso de fabricación (Fundición, Forja, Soldadura y Tratamientos Térmicos.)
  - Producto terminado
  - Durante el servicio de la pieza.

LIMITACIONES:

- Sus determinaciones solo son cualitativas
- Sus resultados siempre dependen del patrón de referencia empleado en la calibración
- La confiabilidad de los resultados dependen de gran medida de la habilidad del inspector.

### **5.1.5. BENEFICIOS DE LOS END EN MANTENIMIENTO**

- Ayudan a predecir el estado del equipo o material inspeccionado

## CAPÍTULO 5. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS Y PRINCIPIOS BÁSICOS SOBRE INSPECCIÓN VISUAL APLICADA A LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

- Ayudan a programar las fechas más convenientes de reparación
- Aumentan la seguridad de las reparaciones
- Permiten monitorear la vida permanente de los materiales.
- Reducción de costos

### 5.1.6. RAZONES PARA SELECCIONAR UN MÉTODO DE END.

- En la inspección de recepción, determina si la materia prima cumple con los requisitos de calidad solicitados por el cliente
- En la inspección de proceso, determina si un objeto es aceptable después de cada etapa de fabricación.
- El material inspeccionado jamás se dañara debido a la inspección
- Se pueden aplicar en casi cualquier material, lugar y espacio

### 5.1.7. PROCEDIMIENTOS PARA INSPECCIÓN DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN.

La inspección de la Tubería de Perforación es por medio de los diferentes métodos de inspección no destructivos, definiendo los equipos y materiales, sistemas de calibración, certificación y calificación del personal y criterios de aceptación y rechazo.

### 5.1.8. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

API: Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute).

ASNT: Sociedad Americana de Ensayos No Destructivos (American Society for Nondestructive Testing).

ASTM: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials).

Armacor: Marca de un electrodo especial de características duras, utilizado en la soldadura del hardband.

Black Light: Luz ultravioleta cuya longitud de onda esta entre el rango de 320 a 420 nanómetros.

Clase Premium, Clase 1, Clase 2: Una clasificación de servicio API para la tubería de perforación en uso.

Categoría de Servicio: Clasificación de la severidad de las condiciones de

## CAPÍTULO 5. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS Y PRINCIPIOS BÁSICOS SOBRE INSPECCIÓN VISUAL APLICADA A LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

perforación que se hace con el propósito de definir el programa de inspección a seguir.

Drift: Calibrador usado para chequear el diámetro interno de la tubería de perforación.

Inspección: Proceso de examinación de la tubería para detectar posibles defectos o para detectar desviaciones de los estándares establecidos.

Inspector: Empleado de la compañía de inspección, calificada y responsable de una o más de las inspecciones o pruebas especificadas en el contrato.

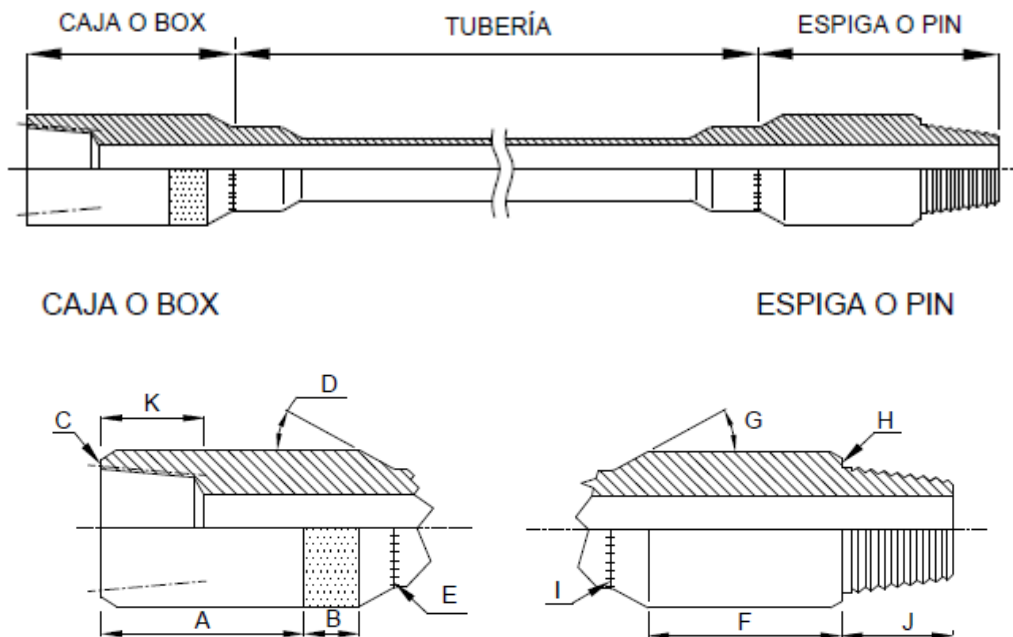
Instrucción y Entrenamiento: Es la capacitación que debe recibir todo empleado al ingresar a la empresa y dentro de un periodo razonable.

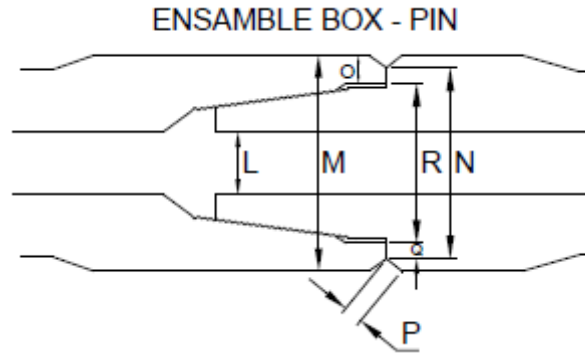
Luz Negra: Término empleado por SAPS para referirse al método de partículas magnéticas húmedo fluorescentes.

OCTG: Tubería de especificaciones API (Oil Country Tubular Goods).

Upset: Extremo forjado de la tubería con un incremento en el espesor de pared y en el diámetro, es usado para el roscado o soldadura.

### 5.1.9. ESQUEMA GENERAL DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN





- |                                      |                                     |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| A.- Área de llave en la caja         | J.- Zona roscada en espiga          |
| B.- Área de material duro (Hardband) | K.- Zona roscada en caja            |
| C.- Sello en la caja                 | L.- Diámetro interno de la espiga   |
| D.- Hombro de elevador               | M.- Diámetro externo de la caja     |
| E.- Soldadura en caja                | N.- Diámetro del bisel              |
| F.- Área de llave en espiga          | O.- Ancho de hombro en caja         |
| G.- Hombro de espiga                 | P.- Ancho de bisel                  |
| H.- Sello en la espiga               | Q.- Ancho de sello en caja          |
| I.- Soldadura en la espiga           | R.- Diámetro del abocardado en caja |

#### 5.1.10. CERTIFICACIÓN Y CALIFICACIÓN DEL PERSONAL.

El personal que efectúe la inspección, evaluación e interpretación del método de END del procedimiento debe estar calificado y certificado de acuerdo al procedimiento de Calificación y Certificación del personal de END de la compañía de inspección.

El personal Nivel I debe ser calificado por un nivel III ASNT y efectuará:

- Preparar y operar los equipos y materiales necesarios.
- Verificar la calibración adecuada de los equipos.
- Ejecutar la inspección.
- Llenar el registro de inspección.

## CAPÍTULO 5. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS Y PRINCIPIOS BÁSICOS SOBRE INSPECCIÓN VISUAL APLICADA A LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

El personal Nivel II debe ser calificado por un nivel III ASNT y efectuará:

- Interpretar y evaluar los resultados que se dieran en el transcurso de la inspección.

El personal Nivel III debe ser certificado ASNT y efectuará:

- Aprobación de procedimientos a realizar.
- Calificación y certificación de personal.

### **5.1.11. EQUIPO DE SEGURIDAD INDUSTRIAL.**

Un equipo de seguridad industrial es importante e indispensable para la inspección de materiales, elaboración de productos o prestación de servicios industriales, ya que las condiciones de trabajo adecuadas y el resguardo de la salud y la vida del personal son esenciales, por lo que para cumplir con éste propósito es necesario de la existencia y utilización de equipos de seguridad industrial. Para las necesidades del área de inspección los principales equipos de seguridad industrial se tienen las siguientes:

Elementos de protección para la piel y el cuerpo

- Overoles
- Guantes
- Zapatos de seguridad
- Botas impermeables
- Cascos
- Barbiquejos

Elementos de protección respiratorios

- Mascarillas
- Filtros

Elementos de protección auditivos

- Tapones de oídos
- Orejeras

Elementos de protección visuales

- Gafas
- Máscaras protectoras



### **5.1.12. PROGRAMA DE INSPECCIÓN.**

Un programa de inspección típico consiste en seleccionar uno o más de los métodos de END listados a continuación, y su aplicación a los componentes de la sarta de perforación, utilizando los procedimientos de inspección paso por paso.

### **5.1.13. CATEGORÍAS DE SERVICIO PARA TUBERÍAS.**

El programa de inspección de la sarta de perforación varía con: la severidad de las condiciones de perforación, con la seguridad que esta implica, riesgos tanto ambientales como económicos que están asociados a una posible falla.

Cuando las condiciones de trabajo resultan ser más severas lo cual implica mayores riesgos, la tubería demanda más y minuciosas inspecciones con criterios de aceptación mucho más estrictos.

Si las condiciones de perforación son severas, varios factores se combinan para hacer que los costos de una posible falla sean muy elevados.

Las normas ASNT, para aquellos operadores que deseen amoldar su programa de inspección para varias condiciones de perforación y riesgo establece dos categorías de servicio que a continuación se describe:

#### **CATEGORÍA DE SERVICIO 1**

Se aplica a perforaciones de poca profundidad, pozos de rutina en áreas bien desarrolladas. Cuando ocurren fallas en la sarta de perforación, los costos de la falla son tan mínimos que no justifican el costo de una inspección detallada.

#### **CATEGORÍA DE SERVICIO 2**

Se lleva a cabo un análisis completo de las tuberías, juntas, posibles daños con un programa estructurado de inspección e interpretación de las discontinuidades.

Actualmente la mayoría de los pozos petroleros siguen la categoría 2, por lo que el inspector y la compañía responsable, deben de diseñar un programa para los procedimientos y criterios de aceptación de la inspección a los que serán sometidas las tuberías de perforación.

### **5.2. INSPECCIÓN VISUAL.**

Dentro de los diferentes métodos de control mediante técnicas no destructivas nos encontramos con el más básico y no por ello menos importante, la Inspección Visual.

La inspección visual es el primer control de componentes nuevos y también durante y después de su ciclo de vida. Consiste en revisar la calidad de las superficies, revelando defectos de superficie durante la manufactura y posteriormente en la operación. Su objetivo es detectar y examinar una gran variedad de fallas superficiales tales como: abrasión, daños mecánicos, procesos de fabricación, corrosión, contaminación, acabado y discontinuidades en uniones, como soldaduras, sellados, conexiones soldadas etc.

### **5.2.1. REQUISITOS DE LA INSPECCIÓN VISUAL.**

Antes de iniciar una inspección visual, es conveniente conocer lo siguiente:

Este método, aparentemente fácil, requiere de competencias específicas por parte del inspector, procedimientos de trabajo determinados y en algunos casos, el uso de tecnología.

Los métodos de inspección visual pueden incluir una gran variedad de equipamientos que permiten desde la inspección visual propiamente dicha hasta la utilización de microscopios para medición de la profundidad de raspaduras en la terminación de superficies pulidas.

### **5.2.2. APLICACIONES.**

Las aplicaciones son muy amplias y el control mediante la inspección visual se pone en marcha como primer elemento de juicio para dar la aceptación de una pieza individualmente o de un sistema en su conjunto, previo a la puesta en funcionamiento del mismo o bien como primer control para posteriormente realizar.

Los siguientes ensayos concluyentes que darán el visto bueno para su operabilidad. En general se aplican para:

- Proporcionar una evaluación general de la condición de un elemento tubular, herramienta o componente.
- Detectar tempranamente los defectos antes de que alcancen el tamaño crítico.
- Detectar los errores de manufactura.
- Obtener información adicional sobre la condición de un componente que muestra evidencia de algún defecto.

### **5.2.3. VENTAJAS GENERALES DE LA INSPECCIÓN VISUAL.**

- La inspección visual se puede realizar en forma directa o indirecta. En forma indirecta se hace utilizando diferentes equipos como espejos, Videoscopio y/o Boroscopio.
- La geometría de las piezas a inspeccionar no representa un problema para la inspección.
- Es un método de inspección económico.
- Se realiza en forma rápida y sencilla.
- La inspección visual es un suplemento útil.

### **5.2.4. LIMITACIONES GENERALES DE LA INSPECCIÓN VISUAL.**

La principal limitación de este método es cuanto se refiere a la detección de fisuras, pues como es comprensible, la visión humana tiene sus limitaciones.

Se requiere de personal capacitado y experimentado que utilice los procedimientos válidos y los estándares apropiados de calibración con equipos efectivos, en buen estado y dentro de un ambiente adecuado para las tareas de inspección y mantenimiento.

Se requiere de una buena limpieza previa a la inspección.

## **5.3. INSPECCIÓN VISUAL DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN.**

Este procedimiento cubre la inspección visual para determinar tanto las condiciones internas como externas del tubo de perforación y poder analizar visualmente daños en la tubería y su condición en general.

### **5.3.1. EQUIPO NECESARIO EN ESTE PROCEDIMIENTO.**

Se debe usar un calibrador de profundidad (Pit Gauge) en escala de milésimas de pulgadas (0.001" - 1"), marcador metálico o crayolas de cera, una linterna de alta intensidad capaz de iluminar la superficie interna del tubo o un espejo de inspección para aprovechar la luz solar.

### **5.3.2. PREPARACIÓN DE LA TUBERÍA A INSPECCIONAR.**

Todos los tubos tienen que ser esparcidos en los racks de inspección, para luego proceder a enumerarlos en el centro en orden correlativa. La tubería tiene que estar libre de contaminación de restos de fluido de perforación, arena, de tal forma que permita una buena visibilidad, para poder determinar los daños a encontrar.

### 5.3.3. PROCEDIMIENTO Y CRITERIO DE ACEPTACIÓN.

Todos los tubos tienen que ser examinados del extremo del pin al extremo del box, para poder determinar torceduras, aplastamientos, picaduras (pittings) por corrosión tanto en la superficie externa como en la interna, daños en el revestimiento interno (coating).

a. Los tubos con daños severos en el área de cuñas, deberán separarse y comunicar al cliente para luego evaluar y cuantificar la profundidad de los defectos encontrados. Recuerde que esta zona es un área crítica y de alto esfuerzo, y los cortes y/o arrancaduras en el metal actúan como un concentrador de esfuerzos.

b. Cuando en una sarta se encuentran más del 10% de tubos torcidos se deberá comunicar al cliente respecto a este hallazgo para que se tomen medidas correctivas en la operación de Perforación debido al mal uso y manipuleo de la sarta.

c. Las imperfecciones que penetren la superficie normal del tubo con una profundidad superior al criterio de aceptación y rechazo en las tablas deben ser causa de rechazo. Cualquier metal sobresaliente de la superficie normal debe ser removido para medir la profundidad de la penetración.

CLASIFICACIÓN DE LOS TUBOS Y UNIONES EN TUBERÍAS DE PERFORACIÓN USADA			
	CONDICIÓN	CLASE PREMIUN	CLASE 2
<b>TUBOS</b>			
I.	Mínimo espesor de pared remanente	≥ 80%	≥ 70% <sup>1</sup>
II.	Cortes y desgarraduras en áreas de cuñas (profundidad) <sup>2</sup>	≤ 10% del promedio de espesor adyacente <sup>3</sup>	≤ 20% del promedio de espesor adyacente <sup>3</sup>
III.	Reducción de diámetro	≤ 3% del DE especificado	≤ 4% del DE especificado
IV.	Aumento de diámetro	≤ 3% del DE especificado	≤ 4% del DE especificado
V	Grietas	Ninguna	Ninguna
<b>UNIONES</b>			
I.	Fuerza de Torsión	≥ 80% de un tubo Clase Premium	≥ 80% de un tubo Clase 2
II.	Elongación de la espiga	≤ 0.006" en 2"	≤ 0.006" en 2"
III.	Grietas	Ninguna	Ninguna

<sup>1</sup> El mínimo espesor de pared remanente por debajo de cortes y desgarraduras debe ser 80%

<sup>2</sup> Los cortes y desgarraduras de metal pueden ser eliminados, siempre y cuando la pared remanente no sea inferior al mínimo espesor de pared mencionado en esta tabla

<sup>3</sup> El promedio de pared adyacente se determina al sacar el promedio del espesor de pared a cada lado de la imperfección y adyacente a la penetración más profunda.

DE = Diámetro exterior

d. La superficie interior iluminada debe ser examinada visualmente desde cada extremo. Las picaduras en el interior no deben exceder 1/8" de pulgada de profundidad medido o estimado visualmente para clase Premium y 3/16" para clase 2.

e. La superficie interior con revestimiento de los tubos de perforación deben ser examinados y determinar si existen señales de deterioro en el revestimiento. De existir esta condición, el cliente debe ser notificado.

#### **5.4. INSPECCIÓN VISUAL DE LAS UNIONES (TOOL JOINTS).**

Este procedimiento cubre la inspección visual de las roscas, sellos, hardband, e inspección de las uniones (tool joints) para determinar el grado de acero y peso que corresponde al tubo, también incluye la inspección visual de las conexiones para determinar cajas con acampanamiento, pines estirados.

##### **5.4.1. EQUIPO NECESARIO PARA LA INSPECCIÓN VISUAL DE UNIONES.**

Se debe usar un instrumento para medir el paso de la rosca (Lead gauge) y la barrita de calibración (Setting Block), con las puntas de contacto apropiadas según la norma API SPEC 7.

Existen herramientas que pueden ser usadas para evaluar la magnitud del daño establecido. Entre ellas tenemos.

a. Indicador de profundidad.- Sirve para determinar las profundidades del daño.

b. Regla metálica.- De 12" con divisiones de 1/64" y sirve para determinar correctamente:

- Longitud del roscado
- Longitud del Hardband
- Longitud del área de llave tanto de la espiga como de la caja.
- Calibrar los compases metálicos

c. Compás para diámetro externo e interno.- Sirve para determinar los diámetros externos e internos en la unión de herramienta .

d. Calibradores de perfil de roscas, un instrumento para medir el paso de la rosca.



**Medidor de perfil de rosca.**

#### **5.4.2. PREPARACIÓN DE LAS UNIONES.**

Remover los protectores de rosca y apilarlos. De aquí hasta que los protectores de rosca sean reinstalados, se debe tener mucho cuidado con el manejo de los tubos, porque puede dañarse las roscas al golpearse un tubo con otro. El tubo nunca será cargado, descargado o removido a otra percha sin que tenga los protectores de rosca instalados. Remover únicamente los protectores de rosca de los tubos que se puedan inspeccionar en un día. Nunca dejar las roscas expuestas en la noche.

Limpiar completamente todas las roscas y sellos que están sin sus protectores. Asegurarse que deben estar totalmente limpias y libres de contaminación de lodo de perforación, grasa, suciedad, o materiales remanentes de limpieza en las roscas.

Pintar o marcar con secuencia numérica a 700 mm (2 pies) de la caja de cada tubo, si todavía no se lo ha hecho.

#### **5.4.3. PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN.**

A cada tubo girarle despacio, en por lo menos una vuelta completa mientras se inspecciona visualmente las roscas externas (usar el medidor de perfil de rosca indicado). A cada tubo girarle otra vez, mientras se inspecciona visualmente las roscas internas. El medidor de profundidades será usado para medir la profundidad de las irregularidades donde sea posible. Identificar al tubo después de una inspección visual de la rosca.

CAPÍTULO 5. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS Y PRINCIPIOS BÁSICOS SOBRE INSPECCIÓN VISUAL APLICADA A LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

Después de la inspección asegurarse de que las roscas estén limpias y secas. Lubricar las roscas con una grasa que cumple con la norma API Bul 5A2; sin embargo el propietario de los tubos debe especificar el tipo de grasa a usar. Lubricar totalmente el área de las roscas, incluyendo los sellos y las raíces de las roscas en toda la circunferencia. En climas muy fríos se debe calentar la grasa antes de aplicar.

Reinstalar los protectores de rosca limpios en los extremos tanto a los tubos aceptados como a los rechazados, a los mismos que se les debe dar apriete.

**5.4.4. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN Y/O RECHAZO.**

a. Verificación de grado y peso: El grado y peso del tubo tiene que estar estampado en las muescas ubicadas en la superficie externa del extremo de la espiga (Tool joint Pin) de acuerdo a lo establecido en la norma API RP 7G, asimismo debe tener estampado en la base de la espiga (pin) cerca al sello, el grado de acero del tubo, fecha de unión de la espiga y caja (tool joint) con el cuerpo del tubo, y nomenclatura del fabricante de la tubería y tool joint, que en algunos casos pueden ser distintos. Cualquier tubo que no tenga estas características, deberá ser separado del resto de tubos, porque estos componentes no pasarían alguna auditoria, realizada por alguna entidad tercera parte.



Ejemplo de marcas en la base de la espiga o pin

1	2	3	4	5
ZZ	6	90	N	E

- 1 Símbolo de la Fábrica de la unión de herramienta:  
Compañía ZZ (por ejemplo)
- 2 Mes que se hizo la Soldadura:  
6—Junio
- 3 Año que se hizo la Soldadura:  
90—1990
- 4 Símbolo de la Fábrica de la Tubería:  
N—Compañía de Tubos Grand Prideco (por ejemplo)
- 5 Grado al cual pertenece la tubería: E—  
—Tubería de Perforación de Grado F75

**Ejemplo del significado de la marca en la base la espiga.**

## CAPÍTULO 5. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS Y PRINCIPIOS BÁSICOS SOBRE INSPECCIÓN VISUAL APLICADA A LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

b. Inspección de sellos de las uniones: Los sellos de las uniones se inspeccionaran para verificar que no tenga ralladuras, engranamientos, picaduras por corrosión, cualquier daño en el sello cuya profundidad sea de 1/32" y que afecte más del 20% de la superficie sellante será motivo de rechazo, para su posterior reparación , durante esta reparación no se deberá remover más de 1/32" del material.

c. Geometría de las roscas: Las roscas deben de mantener la forma, y estar libres de desgaste, corrosión, arrancaduras, y engranamientos. Para tal efecto no se permitirán como roscas operativas, aquellas que tengan picaduras por corrosión, que afecte la raíz de las mismas, cuya profundidad sea mayor de 1/16" y 1/8" de diámetro. Cualquier ligero engranamiento deberá ser corregido utilizando una fibra blanda (no metálica) para pulir roscas, siempre y cuando no afecte o comprometa el desgaste de las mismas. Después de esta operación debemos de inspeccionar el perfil de rosca, para verificar desgaste de los flancos o un posible estiramiento del pin. En caso de haber una sospecha de separación de los flancos verificar esta sospecha con el uso del pasimetro (Lead gauge)

Según la norma API Spec 5A5 las causas por las que las roscas pueden ser rechazadas son las siguientes:

- Roscas rotas
- Cortados
- Pulidos
- Filos o gradas
- Grietas o Fisuras
- Roscas con crestas Incompletas
- Roscas rasgadas
- Roscas gruesas
- Roscas delgadas
- Rozaduras
- Altura inapropiada de las roscas
- Agujeros



## CAPÍTULO 5. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS Y PRINCIPIOS BÁSICOS SOBRE INSPECCIÓN VISUAL APLICADA A LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

- Golpeados
- Con marcas de herramientas
- Filos delgados
- Alguna otra que rompe la continuidad

d. Estiramiento del Pin: Si verificamos el perfil de la rosca y comprobamos que hay estiramiento, debemos usar el pasimetro para comprobar el grado de estiramiento, que no debe ser mayor a 0.006" en un intervalo de medición de cada 2". Estas mediciones deberán tomarse cada 90 grados en la circunferencia del pin, empezando desde el primer hilo completo cerca al hombro o sello.

e. Acampanamiento del Box: Colocar la regla metálica de 12" a lo largo del eje longitudinal de la caja; si existiera alguna separación entre la superficie de la caja y la regla metálica, medir con el compás externo. Si la medida de esta separación es mayor de 1/32" la conexión deberá ser rechazada y pintar con una banda de pintura roja para enviar a reparación en el torno

f. Inspección de Tool Joints (Box) con Hardband: El Hardband o metal duro en un Tool joint, no deberá exceder 1/8"  $\pm$  1/32" sobre la superficie del diámetro del Tool Joint. No se permiten bandas duras mal aplicadas,

Las fisuras pueden ser transversales a las bandas de soldadura. Esas fisuras pueden propagarse a través de los cordones en un ángulo entre 30° y 45°. Ocasionalmente, estas se pueden interconectar. Pueden ser aceptables tan largas como sean, siempre y cuando no se salgan del Hard Band, no comprometan el metal base del Tool Joint y teniendo en cuenta lo siguiente:

- Que su ancho sea menor a 1/16".
- Que estén espaciadas entre sí por lo menos 1/2".

Las fisuras pueden ser paralelas a las bandas, siempre dentro de la región del Hardband. Si estas fisuras son de una longitud mayor de 3" son inaceptables, ya que ellas pueden ser causa de una prematura falla por fatiga. En tal circunstancia el Hardband deberá ser completamente removido y se debe volver a aplicar un Hardband nuevo.

Cualquier fisura en el metal base ó en la zona afectada térmicamente adyacente al Hardband es inaceptable. La indicación debe ser completamente removida.

Si hay defectos no lineales (socavaduras, poros, etc.) sobre los cordones de Hardband mayores de 1/8" de diámetro ó 1/16" de profundidad deben ser rellenados mediante el proceso de soldadura SMAW, empleando electrodo AWS E-312-16 de 1/8" de diámetro, teniendo en cuenta que, en el sitio a soldar debe tener la temperatura de precalentamiento estipulada en esta instrucción.

### **5.5. CALIBRACIÓN DEL DIÁMETRO EXTERNO DEL CUERPO DEL TUBO (O.D GAUGE).**

Este procedimiento cubre la inspección mecánica, de toda la longitud del cuerpo del tubo para verificación de variaciones del diámetro externo en la tubería de perforación (Drill Pipe).

#### **5.5.1. EQUIPO A UTILIZAR EN LA CALIBRACIÓN DEL DIÁMETRO EXTERNO DEL TUBO.**

Se empleara para este procedimiento un calibrador mecánico con lectura de dial con aguja, que es un instrumento para verificar cualquier variación de diámetro externo en el cuerpo de la tubería de perforación. Dicho instrumento arroja lecturas en fracciones de disminución y/o aumento de 1/32" de pulgada. Este calibrador consta de una barrita calibradora con una disminución de 1/32" con referencia al diámetro de tubo que se va a inspeccionar.

#### **5.5.2. CALIBRACIÓN DEL INSTRUMENTO.**

a. El primer paso es calibrar el instrumento, con la barrita calibradora cuya longitud es siempre 1/32" menos del diámetro de la tubería a inspeccionar.

b. La calibración del instrumento deberá realizarse:

- Al inicio del trabajo.
- Después de cada 25 tubos.
- Cuando se encuentre una variación de diámetro que exceda los límites permitidos según las tablas de tolerancias para clase Premium y clase 2 para tubería usada.
- Cuando se sospeche que el instrumento puede haberse dañado o esta descalibrado de cualquier forma.
- Y al final del trabajo.

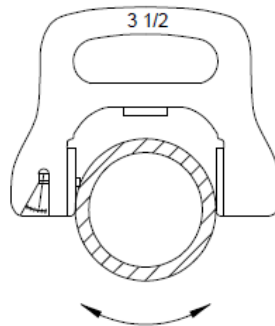
c. Si al verificar de nuevo la calibración se encuentra que el instrumento debe ser ajustado por más de  $\pm 0,002$ ", todos los tubos calibrados después de la última verificación deben ser recalibrados.

### 5.5.3. PREPARACIÓN DE LA TUBERÍA PARA LA CALIBRACIÓN DEL DIÁMETRO EXTERNO DEL TUBO.

- a. Toda la superficie externa del tubo tiene que estar completamente limpia, libre de toda suciedad y de todo material suelto en la superficie del tubo.
- b. Todos los tubos tienen que ser numerados en orden correlativo.

### 5.5.4. PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN.

La superficie del tubo debe ser calibrada del extremo del upset de la espiga al extremo del upset de la caja o viceversa, manteniendo el calibrador de diámetro externo (O.D GAUGE) firme y perpendicular al eje del tubo mientras éste está rotando. El tubo debe ser rotado como mínimo una revolución por cada 5 pies de longitud inspeccionada.



**Empleo del OD gauge en la tubería.**

Existe una fórmula para la calibración con el O.D GAUGE:

(Lectura Máxima – 1/2 Lectura Mínima) x Constante de Desgaste x

(100/Diámetro Externo) = Porcentaje de Reducción o Aumento del O.D.

Nota: La constante del desgaste del O.D es 1/32" para todos los diámetros. Este valor es 0.03125".

### 5.5.5. CRITERIO DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO.

Los tubos que tengan un incremento o reducción mayor al 3% del diámetro externo deben ser rechazados, y pasan a clasificarse como clase 2 y mayor del

4%	clase	3.
----	-------	----

**CAPÍTULO 6**  
**MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS**

### **CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS.**

#### **6.1. MÉTODO DE INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES.**

La inspección por Líquidos Penetrantes es un ensayo no destructivo empleado para detectar e indicar discontinuidades que afloran a la superficie de los materiales examinados, dentro de la ingeniería petrolera es un método utilizado para detectar estos problemas en la tubería de perforación.

En principio un líquido penetrante es aplicado a la superficie que va a ser examinada y se deja que entre en las discontinuidades. Todo el exceso de penetrante es posteriormente removido, la parte es secada y se aplica un revelador. Las funciones del revelador son la de extraer el penetrante de las discontinuidades y de proporcionar un fondo de contraste que mejore la visibilidad de las indicaciones producidas por el penetrante.

La capacidad de penetración (capilaridad) de los líquidos depende principalmente de las propiedades de mojabilidad (ángulo de contacto entre líquido y sólido), tensión superficial (T) y viscosidad ( ). Un buen poder de penetración se consigue con un líquido de elevada tensión superficial, pequeño ángulo de contacto (menor a 90°) y baja viscosidad.

##### **6.1.1. REQUISITOS DE LA INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES.**

Antes de iniciar la inspección por Líquidos Penetrantes, es conveniente tomar en cuenta los siguientes datos:

1. Definir las características de las discontinuidades y el nivel de sensibilidad con que se las quiere detectar.
2. Verificar la condición de la superficie a inspeccionar.
3. Una vez seleccionado uno o varios proveedores, nunca se deben mezclar sus productos; como por ejemplo, emplear el revelador del proveedor A con un penetrante del proveedor B.

##### **6.1.2. ETAPAS DEL MÉTODO DE INSPECCIÓN.**

1. Limpieza y eliminación de recubrimientos
2. Aplicación y permanencia del penetrante
3. Eliminación del exceso de penetrante de la superficie con medios como: pulverización con agua, trapos húmedos, solventes, emulsificador-agua.
4. Aplicación del revelador que generalmente puede ser talco o sustancia

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

mineral fina como polvo seco o en suspensión acuosa, alcohólica o en solvente.

5. Observación.- El revelador absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades y lo esparce en la superficie, amplificando la información de la discontinuidad.

6. Interpretación de discontinuidades y elaboración de reporte de inspección.

### 6.1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS LÍQUIDOS PENETRANTES.

Según la norma ASTM E-165, los líquidos penetrantes se clasifican en:

METODO	TIPO	PROCESO	PIGMENTO	REMOCION DEL PENETRANTE
A	1	A1	Fluorescente	Lavable con agua
A	2	A2	Fluorescente	Post-emulsificante
A	3	A3	Fluorescente	Removible con solvente
B	1	B1	Coloreada	Lavable con agua
B	2	B2	Coloreada	Post-emulsificante
B	3	B2	Coloreada	Removible con solvente

Los materiales para la inspección con líquidos penetrantes consiste de penetrantes fluorescentes y visibles, emulsificadores (base de agua, base de aceite; de acción rápida o lenta), solventes, removedores y reveladores.

El juego de materiales para la inspección con líquidos penetrantes consta de penetrante, emulsificador, removedor y revelador. No se recomienda un el mezclado de materiales de materiales de distintos fabricantes.

### 6.1.4. APLICACIONES.

Las aplicaciones de los Líquidos Penetrantes son amplias y por su gran versatilidad se utilizan para la inspección en procesos de fabricación, inspección de materia prima, elementos de máquinas, tubería y componentes aeronáuticos.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Muchas de las aplicaciones descritas son sobre metales, pero esto no es un limitante, ya que se pueden inspeccionar otros materiales, por ejemplo cerámicos vidriados, plásticos, porcelanas, recubrimientos electroquímicos, etc.

### **6.1.5. VENTAJAS GENERALES DE LOS LÍQUIDOS PENETRANTES.**

La inspección por Líquidos Penetrantes es extremadamente sensible a las discontinuidades abiertas a la superficie.

- La geometría de las piezas a inspeccionar no representa un problema para la inspección.
- Son relativamente fáciles de emplear.
- Brindan muy buena sensibilidad.
- Son económicos.
- Son razonablemente rápidos en cuanto a la aplicación, además de que el equipo puede ser portátil.

### **6.1.6. LIMITACIONES GENERALES DE LOS LÍQUIDOS PENETRANTES.**

- Sólo son aplicables a defectos superficiales y a materiales no porosos.
- Se requiere de una buena limpieza previa a la inspección.
- No se proporciona un registro permanente de la prueba no destructiva.
- Los inspectores deben tener una amplia experiencia, habilidad y minuciosidad para la aplicación e interpretación.
- Una selección incorrecta de la combinación de revelador y penetrante puede ocasionar falta de sensibilidad en el método.
- Es difícil quitarlo de roscas, ranuras, huecos escondidos y superficies ásperas.

### **6.1.7. ALCANCE.**

Cuando se especifique por la sección de referencia de código, se deben emplear las técnicas de líquidos penetrantes. En general este artículo está en conformidad con la norma SE-165 y NMX-B-133-1-1988 método para la inspección por líquidos penetrantes, en donde se proporcionan detalles adicionales a ser considerados en los procedimientos específicos a emplear.

### **6.1.8. PROCEDIMIENTO DE LA INSPECCION POR LIQUIDOS PENETRANTES.**

La re-examinación por líquidos penetrantes debe ser efectuada de acuerdo con un procedimiento para que se logre una inspección de manera adecuada y eficaz, por

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

está razón primeramente se plantea una revisión del procedimiento y será en los siguientes casos:

**A** -Siempre que exista un cambio o sustitución del tipo del tipo, familia o grupo de los materiales penetrantes o en las técnicas del procesado.

**B** -Siempre que se realice un cambio o sustitución del tipo de los materiales o el proceso de limpieza.

### **6.1.9. TIPOS DE PENETRANTES USADOS EN LOS METODOS DE INSPECCION POR LIQUIDOS PENETRANTES.**

Existen principalmente dos tipos básicos de procedimientos, estos se diferencian en el tipo de líquidos penetrantes que usaran, ya sean visibles o fluorescentes, los cuales serán descritos en esta sección.

**METODO "A":** Inspección con líquidos penetrantes fluorescentes.

Los procedimientos para la inspección con penetrantes fluorescentes son clasificados como:

- 1.- Lavables con agua (A-1)
- 2.- Post emulsificables (A-2)
- 3.- Removibles con solventes (A-3)

Para esto debe tomarse la siguiente precaución:

Después de una inspección con un penetrante fluorescente no debe efectuarse una inspección con un penetrante visible. La inspección con penetrantes fluorescentes hace uso de penetrantes que llevan un tinte que flúoresce brillantemente bajo la luz negra.

La sensibilidad de los penetrantes fluorescentes depende de su capacidad para ser retenido en las discontinuidades durante su aplicación, y de brotar a la superficie para producir indicaciones que fluorescen brillantemente. Las indicaciones fluorescentes son más brillantes que sus alrededores por lo que son fácilmente visibles.

Este primer procedimiento posee dos tipos de penetrantes:

**PENETRANTES LAVABLES CON AGUA:** se designan así por ser directamente lavables con agua de la superficie de la pieza que va a probarse, después de un tiempo adecuado de penetración, debido a que el emulsificador es parte del penetrante lavable con agua, es extremadamente importante hacer un control apropiado en el proceso de remoción del penetrante en la superficie para evitar sobre lavados. Los penetrantes lavables con agua pueden ser extraídos de las



## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

discontinuidades si el enjuague es demasiado largo o vigoroso. PENETRANTES POSTEMULSIFICABLES: se designa por ser insolubles en agua y no pueden removerse solo con agua están diseñados para ser removidos selectivamente de la superficie por el uso de emulscificante, para ayudar en la remoción del exceso de penetrante de la superficie. El emulscificante aplicado adecuadamente y cuando se da un tiempo de emulscificación apropiado, se combina con el exceso de penetrante en la superficie para formar una mezcla lavable con agua, la cual puede ser removida de la superficie, dejando esta libre de fluorescencia. E penetrante que permanece dentro de las discontinuidades no está sujeto a sobre lavados. El tiempo de emulscificación adecuado debe establecerse experimentalmente y mantenerlo para asegurar que no ocurra una sobre emulsificación, resultando en la pérdida de indicaciones. MÉTODO B “INSPECCION POR LIQUIDOS PENETRANTES VISIBLES” La inspección con líquidos penetrantes visibles emplea penetrantes que puedan ser observados a simple vista, el penetrante usualmente es de color rojo para que pueda notarse. El proceso con los líquidos penetrantes visibles no requiere de luz negra. Las indicaciones con líquidos penetrantes visibles se pueden ver bajo una luz blanca. El procedimiento se clasifica en:

- 1.- Lavables con agua (B-1)
- 2.- Postemulsificables (B-2)
- 3.- Removibles con solventes (B-3)

Esta se divide en 3 penetrantes:

PENETRANTES VISIBLES CON SOLVENTES  
PENETRANTES VISIBLES LAVABLES CON AGUA  
PENETRANTES VISIBLES POSTEMULSIFICADOS

PENETRANTES VISIBLES CON SOLVENTES: están diseñados para que el exceso de penetrante en la superficie pueda eliminarse frotándolo con un material que no deje pelusa y repitiendo la operación hasta que sea eliminado la mayoría del penetrante. Debe evitarse el exceso de solvente para minimizar la remoción del penetrante de las discontinuidades.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

### **6.1.10. PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE.**

En general, se pueden obtener resultados satisfactorios cuando la superficie de la parte está en la condición de cómo soldado, como rolado o como forjado. Puede ser necesaria la preparación de la superficie por esmerilado, maquinado o cualquier otro método cuando existan irregularidades superficiales que puedan enmascarar las indicaciones de discontinuidades que pueda tener la tubería.

Antes de cualquier examinación por líquidos penetrantes la superficie a ser examinada y en las áreas comprendidas a una pulgada a cada lado deben estar secas y libres de suciedad grasa oxido, fundente de soldadura, gotas de soldadura, aceite y cualquier otro material extraño que pueda tapar las aperturas superficiales e inferir con la inspección de la tubería de perforación.

Los agentes de limpieza comunes que pueden ser empleados son los detergentes, solventes orgánicos, soluciones desincrustantes y removedores de pintura. Los métodos de desengrasado y de limpieza ultrasónica también pueden ser empleados.

Los solventes de limpieza deben cumplir con los requisitos del control de contaminantes. El método de limpieza empleado es una parte importante del proceso de examinación.

### **6.1.11. SECADO DESPUÉS DE PREPARACIÓN.**

Después de la limpieza, el secado de las tuberías a ser examinadas debe estar acompañado de una evaporación normal o con corriente de aire normal como sea adecuado. Se debe establecer un periodo mínimo de tiempo para asegurar que a las soluciones limpiadoras se han evaporado antes de la aplicación del penetrante.

### **6.1.12. EXAMINACIÓN Y TÉCNICAS PARA TEMPERATURAS ESTÁNDAR.**

Como una técnica estándar, la temperatura del penetrante y de la superficie a procesar, no debe ser inferior a 15.5 °C ni superior a 52 °C, durante el periodo de la examinación. Se permite el calentamiento o el enfriamiento local para mantener la temperatura dentro de un ámbito de 15.5 a 52 °C durante la examinación. Cuando no sea practico cumplir con estas limitaciones de temperatura como se

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

pueden usar otros tiempos y temperaturas, demostrando que los procedimientos están calificados como se especifica en Aplicación del comparador.

### **6.1.13. APLICACIÓN DE PENETRANTE.**

El penetrante puede ser aplicado por cualquier medio adecuado tal como la inmersión, por brocha o rociados el penetrante es aplicado por rociado empleando aparatos compresores de aire, se deberán colocar filtros de lado de presión cercanos a la salida del aire para evitar la contaminación del penetrante con aceite, agua suciedad o sedimentos que se pueden juntar en la línea de aire.

### **6.1.14. REMOCIÓN DE EXCESO DE PENETRANTE.**

Después de que ha transcurrido el tiempo de penetración, cualquier exceso de penetrante que permanezca en la superficie debe de ser removido teniendo cuidado de minimizar la remoción del penetrante de las discontinuidades

### **6.1.15. SECADO DESPUÉS DE LA REMOCIÓN DEL EXCESO DE PENETRANTE.**

Para la técnica de penetrante removible con solvente, las superficies pueden secarse por evaporación normal, por frotado o por circulación de aire. Las piezas pueden secarse exponiéndolas al aire a la temperatura ambiente o bien empleando aire a presión libre de aceite. En dicho caso, la presión no debe exceder de 0.345MPa (50psi); también pueden emplearse secadores con recirculación de aire caliente.

Para la mayoría de las aplicaciones, la temperatura en el secador es mantenida entre 79° y 107° C. Sin embargo, La temperatura en la superficie de la pieza no debe exceder de 52° C. No se permite que las piezas permanezcan en la estufa de secado por un tiempo mayor que el necesario para secarlas. El tiempo de secado varía con el tamaño, naturaleza y el número de piezas. En el caso de penetrantes removibles con solvente, es recomendable permitir el secado por una evaporación normal, de 3 a 5 minutos; generalmente no se requiere de otra técnica de secado.

### 6.1.16. APLICACION DEL REVELADOR.

Los reveladores se deben aplicar después de que el exceso de penetrante haya sido removido de la superficie de la pieza. En el caso de los reveladores acuosos, éstos se deben aplicar antes de secar las piezas lavadas con agua, Los reveladores secos y en suspensión no acuosa deben aplicarse inmediatamente después de que la pieza haya sido secada.

No se permite el empleo de brochas o pinceles para aplicar los reveladores en suspensión o en solución.

El tamaño, forma, condición de la superficie, número de piezas que van a ser inspeccionadas, etc., determinan la selección de la aplicación del revelador, que se puede efectuar por baño, inmersión, atomización o espolvoreado.

Los reveladores de polvo seco siempre se aplican después del secado. Las piezas pueden ser sumergidas en un recipiente que contenga el revelador seco, también puede ser espolvoreado de forma manual o mecánica. El exceso de polvo puede eliminarse sacudiendo o golpeando la pieza ligera mente o soplándola con aire comprimido, seco y limpio a una presión entre 0.034 a 0.069 MPa (5 a 10 psi). No es recomendable el empleo de reveladores en polvo seco cuando el líquido penetrante sea del método B (penetrantes contrastantes o visibles).

Los reveladores acuosos se deben aplicar inmediatamente después de que el exceso de penetrante haya sido removido, pero antes del secado. Las condiciones para preparar y mantener el revelador acuoso deben ser conforme a las instrucciones del fabricante. Este tipo de revelador se puede aplicar por rocío o sumergiendo la pieza en el baño de revelador. Posteriormente se puede emplear aire a baja presión para eliminar todo el exceso del revelador de las secciones huecas o profundas para evitar la tendencia al encharcamiento; lo cual podría diluir las indicaciones.

El revelador en suspensión no acuosa se debe aplicar por rocío después de que el exceso de penetrante haya sido removido y la pieza esté seca. Este tipo de reveladores se evaporan rápidamente a temperatura ambiente y no requieren, por lo tanto, del uso de un secador. Sin embargo, debe usarse ventilación adecuada. No se permite sumergir la pieza en el revelador, ya que el solvente del revelador remueve y diluye el penetrante de las discontinuidades. Los reveladores líquidos tipo película se deben aplicar por rocío o inmersión, como lo recomienda el fabricante.

### **6.1.17. TIEMPO DE REVELADO.**

El tiempo que el revelador debe permanecer en la pieza antes de ser inspeccionada debe ser de 7 minutos o la mitad del tiempo de penetración, lo que sea mayor. El tiempo de revelado inicia inmediatamente después de que el revelador en polvo seco se aplica y tan pronto como el recubrimiento húmedo del revelador (acuoso y no acuoso) se seca. Si la absorción del penetrante no altera los resultados de la inspección o deforma las indicaciones, se permiten períodos de revelado hasta de 30 minutos.

### **6.1.18. REQUISITOS DE ILUMINACION.**

Para la iluminación con luz ultravioleta, se permite el empleo de lámparas fluorescentes y de vapor de mercurio; Cuando la inspección sea considerada crítica, sólo se permitirá el empleo de la lámpara de vapor de mercurio para la interpretación de las indicaciones.

La lámpara de vapor de mercurio se deberá dejar calentar por un lapso no menor de 5 minutos antes de iniciar el proceso de inspección o de verificar la intensidad de la fuente de iluminación. La intensidad de la luz ultravioleta debe medirse sobre la superficie de la pieza bajo inspección, debiendo obtenerse un mínimo de 800 MW/cm<sup>2</sup>. Para inspecciones críticas con penetrantes fluorescentes, se permite una luz ambiental máxima de 9.8 candelas/m. Pueden aceptarse niveles más altos de luz ambiental para inspecciones no críticas si la oscuridad total es difícil de obtener.

Las indicaciones de penetrantes con colorante visible pueden observarse con luz blanca natural o artificial. La calidad de la iluminación debe ser tal que permita distinguir de forma clara y nítida las indicaciones. En el sitio de la inspección la intensidad mínima de la luz blanca debe ser de 106.6 candelas/m. Las superficies deben observarse durante la aplicación del revelador para monitorear el desarrollo de indicaciones que tiendan a sangrar demasiado. La interpretación final debe efectuarse después de que haya transcurrido el tiempo de revelado. Toda indicación que sea confusa, poco definida o exista duda sobre su origen deberá ser reinspeccionada para determinar si es una indicación falsa, no relevante o verdadera.

La reinspección debe iniciarse desde el paso referente a la limpieza antes de la aplicación del penetrante.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

### 6.1.19. METODOS DE EVALUACION.

Se tomará en cuenta el tamaño de las indicaciones obtenidas durante el intervalo del tiempo después de la aplicación del revelador. La evaluación puede ser efectuada de dos formas distintas:

- Por comparación con las fotografías estándar de referencia ASTM E 433-71.
- Por dimensionamiento directo de las indicaciones obtenidas. En este caso, se registrarán todas las indicaciones relevantes iguales o mayores a 2mm, obteniéndose una réplica natural con cinta adhesiva transparente; o reproducida a mano empleando maskin tape; pero que muestre claramente tanto su dimensión como su localización.

Para fines de las prácticas, se considera la siguiente clasificación de las indicaciones:

#### INDICACIÓN RELEVANTE:

Es toda indicación que tenga un tamaño igual o mayor a 2mm.

#### INDICACIÓN LINEAL:

Es aquella indicación relevante que tiene una longitud mayor a 10mm.

#### INDICACIÓN REDONDA:

Es aquella indicación relevante de forma circular o elíptica, en la que su longitud es igual o menor 4mm.

#### LIMPIEZA POSTERIOR.

Puede emplearse una técnica adecuada, tal como un simple enjuague con agua, máquinas de lavado, desengrasado por vapor, con solvente, limpieza con ultrasonido, agua con detergente o flujo de aire (libre de aceite). Para mayores detalles, consultar el apéndice A de la NOM B-133.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

### 6.1.20. EVALUACIÓN.

(a) Todas las indicaciones deben ser evaluadas en los términos de las normas de aceptación de la sección de referencia del código.

(b) Las discontinuidades en la superficie serán indicadas por el sangrado del líquido penetrante; sin embargo las irregularidades localizadas en la superficie debidas a marcas de maquinado u otras condiciones de la superficie pueden producir falsas indicaciones.

(c) Son inaceptables áreas anchas de fluorescencia o de pigmentación que puedan enmascarar las discontinuidades, estas áreas deben ser limpiadas y reexaminadas.

### 6.1.21. REGISTRO DE LAS INDICACIONES.

Se registrarán todas las indicaciones relevantes igual o mayores a 2mm, conforme a lo indicado en el apéndice 8 del código ASME sec. VIII

Cualquier indicación confusa o poco definida debe ser reexaminada para determinar si es relevante o no relevante.

### 6.1.22. REPORTE DE RESULTADOS.

Los resultados obtenidos deben ser reportados en un formato que se anexa y se deberá elaborar una figura que muestre claramente las zonas examinada de interés, agregando las réplicas obtenidas. Se debe elaborar un reporte por cada método empleado.

El instructor evaluará los siguientes puntos:

- La ejecución del proceso de inspección para cada método.
- La limpieza y presentación del reporte escrito (sin borrones, tachaduras y/o enmendaduras)
- Las respuestas del cuestionario.
- La veracidad de las conclusiones.

### **6.2. MÉTODO DE INSPECCIÓN POR PARTICULAS MAGNÉTICAS.**

La inspección por Partículas Magnéticas es un ensayo no destructivo que permite detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos.

El principio del método es la formación de distorsiones del campo magnético o de polos cuando se genera o se induce un campo magnético en un material ferromagnético; es decir, cuando la pieza presenta una zona en la que existen discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnético, éste se deforma o produce polos. Las distorsiones o polos atraen a las partículas magnéticas, que fueron aplicadas en forma de polvo o suspensión en la superficie sujeta a inspección y que por acumulación revelan las discontinuidades que se observan visualmente de manera directa o bajo luz ultravioleta.



**Yugo de magnetización.**

#### **6.2.1. ELEMENTOS BASICOS DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO.**

La electricidad y el magnetismo están estrechamente relacionados y son temas de gran importancia en la física. Usamos electricidad para suministrar energía a las



## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

computadoras y para hacer que los motores funcionen. El magnetismo hace que un compás o brújula apunte hacia el norte.

La electricidad puede existir como carga estacionaria, conocida como electricidad estática; también puede estar en movimiento y fluyendo, conocida como corriente eléctrica. Las partículas subatómicas tales como los protones y electrones, poseen cargas eléctricas minúsculas

El magnetismo es primo hermano de la electricidad. Algunos materiales, tales como el hierro, son atraídos por imanes, mientras que otros, como el cobre, ignoran su influencia. Describimos el movimiento de objetos influenciados por imanes en términos de campos magnéticos. Sabemos que los imanes tienen polo norte y polo sur, y que polos iguales se rechazan entre sí, mientras que polos opuestos se atraen. La electricidad y el magnetismo son dos caras de una simple fuerza fundamental. Al acelerar un imán se producirá una corriente eléctrica, si varías el flujo de electricidad, se origina un campo magnético. Estos principios los usamos en la construcción de motores y generadores.

### 6.2.1.2. PERMEABILIDAD MAGNETICA.

La permeabilidad magnética es la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de sí los campos magnéticos, la cual está dada por la relación entre la inducción magnética existente y la intensidad de campo magnético que aparece en el interior de dicho material.

La magnitud así definida, el grado de magnetización de un material en respuesta a un campo magnético, se denomina permeabilidad absoluta y se suele representar por el símbolo  $M$ .

La densidad de flujo en cualquier punto de cualquier material depende de la fuerza magnética presente y de la permeabilidad de tal material.

$$B = MH \text{ ó } M = B/H$$

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Donde:

B = Densidad de flujo en telas

H = Fuerza imanadora en amperios por metro

M = Permeabilidad en henrios por metro

Para cualquier el valor de B ó H el valor de M es la pendiente de la curva que muestra la variación que se produce en M a medida que aumenta la fuerza magnética. La permeabilidad inicial es la pendiente de la curva B/H al comenzar a aplicar fuerza imanadora a un material no imanado.

### **6.2.2. HISTÉRESIS MAGNETICA.**

Cuando se imanar ciertos materiales ferromagnéticos, al retirarles la fuerza imanadora no vuelven completamente a su condición inicial. Para desimantar completamente el material se debe aplicar una cierta fuerza imanadora inversa, a menos que el material se caliente por encima del punto Curie correspondiente a dicho material o que se someta a un tratamiento mecánico.

### **6.2.3. RETENTIVIDAD.**

La retentividad es una expresión empleada para indicar la tendencia de un material al retener el magnetismo residual.

### **6.2.4. PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN.**

Cuando se emplea el método de inspección por partículas magnéticas, el examen satisfactorio de una pieza o una inspección de superficie, depende de la observación rigurosa de los requisitos siguientes en su orden lógico de aplicación.

Preparación de la superficie a inspeccionarse

Imanación de la superficie a inspeccionarse

Selección y aplicación del medio indicador

Interpretación de las discontinuidades

Desimanación

Limpieza final

### **6.2.5. VENTAJAS DE LAS PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.**

Con respecto a la inspección por líquidos penetrantes, este método tiene las siguientes ventajas:

- Requiere de un menor grado de limpieza.
- Generalmente es un método más rápido y económico.
- Puede revelar discontinuidades que no afloran a la superficie.
- Tiene una mayor cantidad de alternativas.

### **6.2.6. LIMITACIONES DE LAS PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.**

- Las películas delgadas de pintura y otros recubrimientos no magnéticos tales como los galvanostegicos, afectan adversamente la sensibilidad de la inspección.
- Son aplicables sólo en materiales ferromagnéticos.
- No tienen gran capacidad de penetración.
- El manejo del equipo en campo puede ser caro y lento.
- Generalmente requieren del empleo de energía eléctrica.
- Sólo detectan discontinuidades perpendiculares al campo.

### **6.2.7. PREPARACIÓN DE LA PIEZA.**

Es requisito fundamental proveer una buena preparación a la pieza a inspeccionar en este caso la tubería de perforación, ya que de ello dependerá el éxito de esta operación.

### **6.2.8. PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE A INSPECCIONAR.**

La sensibilidad del método de inspección por partículas magnéticas es función de la condición superficial del espécimen. La rugosidad o aspereza de la superficie tiende a reducir la eficacia de la inspección por distorsión del campo magnético o

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

por dificultar el movimiento de las partículas para formar la indicación de un defecto. Por regla general, cuanto más lisa sea la superficie de la pieza y más uniforme el contraste de su color hacia el medio de inspección empleado, tanto mayor será la sensibilidad.

### **6.2.9. LIMPIEZA PREVIA A LA INSPECCIÓN.**

El procedimiento de limpieza previa tiene por finalidad corregir aquellas condiciones de la superficie que podrían afectar bien la ejecución de la inspección propiamente dicha o la detección eventual de las indicaciones de los defectos que se buscan. Por regla general, el proceso de limpieza previa debe eliminar toda sustancia extraña, contaminantes o residuos que pudieran impedir la aplicación adecuada de la corriente, la distribución o concentración de partículas, o la intensidad o definición de la indicación o señal de la partícula magnética.

No existe ningún método de limpieza que pueda garantizar la eliminación de todas las condiciones o contaminantes indeseables que se encuentren al emplear el método de inspección por partículas magnéticas. Además de ser inadaptable a diversas condiciones de inspección, el proceso podría afectar a ciertas aleaciones o a los terminados de la superficie.

### **6.2.10. MÉTODOS DE LIMPIEZA**

A continuación enunciamos algunos de los métodos de limpieza empleados en la preparación de la inspección.

#### **AGENTES ALCALINOS**

Los limpiadores alcalinos se emplean en solución acuosa que contenga una mezcla de los mismos con, en algunos casos, detergentes y eliminan cierta contaminación de aceites y grasas por medio de la saponificación o emulsión de estos contaminantes. Los agentes alcalinos por lo general se aplican por inmersión o rociado a temperatura ambiente o m elevada.

#### **AGENTES DISOLVENTES**

Los disolventes se emplean para eliminar aceite, cera y contaminantes de tipo

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

graso. Son similares en su función al desengrasado al vapor, si bien algo menos efectivos, y operan bajo el principio de la dilución por disolvente. En la mayoría de los casos estos agentes se emplean por rociado, con una bayeta o por inmersión.

### LIMPIEZA ULTRASÓNICA

La limpieza ultrasónica combina los agentes disolventes o detergentes con la vigorosa agitación mecánica inducida por un transductor ultrasónico de frecuencia apropiada que libera los contaminantes. Puede emplearse con agua y detergente cuando el material que se desea eliminar es inorgánico (óxido suciedad, materiales de corrosión, etc.) o con un disolvente orgánico si los materiales a eliminarse son orgánicos, (aceites, residuos de pintura, lubricantes, etc.).

### LIMPIEZA MECÁNICA

Los métodos mecánicos tales como cepillo de alambre o limpieza con chorro abrasivo pueden emplearse para eliminar óxidos u otros productos de corrosión. Como quiera que estos métodos pueden dañar las piezas que se inspeccionan y posiblemente ocultar discontinuidades diminutas, estos efectos deberán considerarse antes de programar su utilización.

### ELIMINACIÓN DE PINTURA

Los productos para eliminar la pintura se emplean cuando la presencia de una capa de pintura pudiera ocultar posibles indicaciones subyacentes o evitar el contacto eléctrico con la pieza.

#### **6.2.11. PRECAUCIONES CON RESPECTO A LA PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE.**

- (a) El polvo o la tierra contaminaran los baños fijos
- (b) El método de contacto requiere que las capas de recubrimiento no conductoras se eliminen para permitir el paso de la corriente por la pieza.
- (c) Los contaminantes pueden causar indicaciones erróneas u ocultar defectos.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Los recubrimientos o revestidos parciales o discontinuos, independientemente de si son conductores o no, tendrán tendencia a retener partículas indicadoras en sus bordes dando así la impresión de una discontinuidad.

### **6.2.12. SELECCION DEL METODO O TECNICA.**

En la inspección por partículas magnéticas existen numerosas variaciones en los procedimientos a emplearse que se hacen necesarios por el tipo y la geometría de los materiales ferromagnéticos que se examinan, por el tipo y localización de las discontinuidades buscadas, y por el grado de sensibilidad requerido, accesibilidad de la pieza y economías pertinentes. El técnico deberá conocer las diversas técnicas y el procedimiento para saber cual y en que grado afectara al resultado final.

Las principales variantes en técnica tratan de:

#### (a) Aplicación de Partículas

- \* Tipos de partículas
- \* Método de aplicación: Vía Húmeda ó Vía Seca
- \* Orden de operaciones: Método Continuo o Método Residual

#### (b) Imanación:

- \* Tipo de corriente imanadora empleada
- \* Dirección del campo magnético
- \* Selección de la corriente adecuada.

#### (c) Tipos de Equipo

### **6.2.13. REQUISITOS DE LA INSPECCIÓN POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.**

Antes de iniciar la inspección por Partículas Magnéticas, es conveniente tomar en cuenta los siguientes datos:

1. La planificación de este tipo de inspecciones se inicia al conocer cuál es la condición de la superficie del material y el tipo de discontinuidad a detectar, así

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

mismo deben conocerse las características metalúrgicas y magnéticas de la tubería a inspeccionar; ya que de esto dependerá el tipo de corriente, las partículas a emplear y, en caso necesario, el medio de eliminar el magnetismo residual que quede en la pieza.

2. Una vez seleccionado uno o varios proveedores, nunca se deben mezclar sus productos, como puede ser el caso de emplear las partículas del proveedor A con un agente humectante del proveedor B.

### **6.2.14. CORRIENTE DE MAGNETIZACIÓN.**

Se seleccionará en función de la localización probable de las discontinuidades; si se desea detectar sólo discontinuidades superficiales, debe emplearse la corriente alterna, ya que ésta proporciona una mayor densidad de flujo en la superficie y por lo tanto mayor sensibilidad para la detección de discontinuidades superficiales; pero es ineficiente para la detección de discontinuidades subsuperficiales.

Si lo que se espera es encontrar defectos superficiales y subsuperficiales, es necesario emplear la corriente rectificada de media onda; ya que ésta presenta una mayor penetración de flujo en la pieza, permitiendo la detección de discontinuidades por debajo de la superficie. Sin embargo, es probable que se susciten dificultades para desmagnetizar las piezas.

### **6.2.15. TÉCNICAS DE MAGNETIZACIÓN.**

Existen diversas técnicas de magnetización a la que puede ser sometida la tubería para llevar a cabo una inspección por partículas magnéticas.

### **6.2.16. MAGNETIZACIÓN LINEAL.**

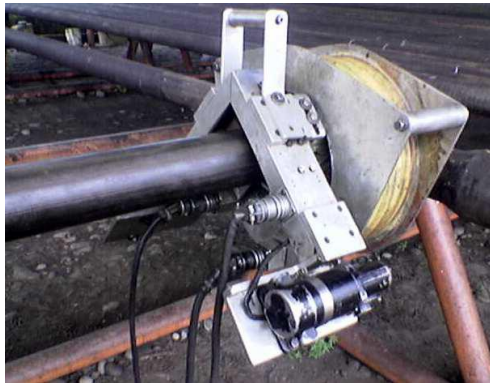
Esta forma de magnetización se refiere al largo de la tubería, la forma de magnetizar un material es muy importante, ya que conforme a las normas comúnmente adoptadas, la magnetización con yugo sólo se emplea para la detección de discontinuidades superficiales. Los yugos de AC o DC producen

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

campos lineales entre sus polos y por este motivo tienen poca penetración.

### 6.2.17. MAGNETIZACIÓN INDIRECTA POR MEDIO DE BOBINA.

Otra técnica de magnetización lineal es emplear una bobina (solenoides). Si se selecciona esta técnica, es importante procurar que la pieza llene lo más posible el diámetro interior de la bobina; problema que se elimina al enredar el cable de magnetización alrededor de la pieza. Entre mayor número de vueltas (espiras) tenga una bobina, presentará un mayor poder de magnetización.



**Magnetización indirecta por medio de una bobina.**

### 6.2.18. MAGNETIZACIÓN CIRCULAR.

Cuando la pieza es de forma regular (cilíndrica), se puede emplear la técnica de cabezales, que produce magnetización circular y permite la detección de defectos paralelos al eje mayor de la pieza. Se deben utilizar puntas de contacto de aluminio, acero o plomo para evitar los depósitos de cobre, que pudieran iniciar puntos de corrosión, esta es la forma más común de magnetizar una tubería de perforación.

Otra técnica de magnetización circular es la técnica de puntas, el cual se utiliza en piezas preferentemente planas. Para esto se emplea dos puntas o electrodos, conectados a una fuente de corriente alterna o continua. La pieza que se examina



## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

cierra el circuito. La corriente circula por las puntas y la pieza, generando un campo magnético alrededor de las puntas.

### **6.2.19. MÉTODO CONTINUO.**

Para la inspección de piezas con alta permeabilidad y baja retentividad, como es el caso de los aceros al carbono o sin tratamiento térmico de endurecimiento, es recomendada la técnica de magnetización continua; esto es, mantener el paso de la energía eléctrica mientras se efectúa la inspección.

### **6.2.20. MÉTODO RESIDUAL.**

Cuando las piezas son de alta retentividad, se acostumbra emplear técnica de magnetización residual. En este caso se hace pasar la corriente de magnetización y posteriormente se aplican las partículas. En este método se aplica un medio húmedo ya sea por baño o inmersión.

Generalmente se recomienda que la corriente de magnetización se mantenga durante el tiempo de aplicación de las partículas, ya que es cuando el campo magnético es más intenso y permite que las partículas sean atraídas hacia cualquier distorsión o fuga de campo, para así indicar la presencia de una posible discontinuidad

### **6.2.21. DESMAGNETIZACIÓN.**

Es la acción de reducir el campo magnético remanente de la pieza a un valor mínimo aceptable, de ser posible cero.

La desmagnetización de una pieza solo se logra si cumple lo siguiente:

"Aplicar un campo magnético con un valor pico mayor al usado durante la inspección, enseguida decrecerlo gradualmente e invirtiendo alternadamente su dirección; repitiendo este proceso hasta obtener un valor mínimo aceptable de magnetismo residual"

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Para lograr una desmagnetización adecuada es necesario observar lo siguiente:

- Se requieren de 10 a 30 pasos alternos de reducción e inversión de la corriente eléctrica.
- Usar el mismo tipo de corriente empleada durante la inspección.
- El flujo magnético producido debe ser cercanamente igual en la misma dirección que el empleado durante la inspección.

### **6.2.22. APLICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS.**

### **6.2.23. TIPO DE PARTÍCULAS.**

Para detectar discontinuidades relativamente grandes se prefieren las partículas secas. Las partículas en suspensión se emplean preferentemente para detectar discontinuidades muy pequeñas y cerradas.

Estas deben tener cumplir con las siguientes características:

- No ser tóxicas
- Estar finamente divididas y dentro del rango correcto de medida.
- Provenir de cualquier material ferromagnético que posea alta permeabilidad y baja retentividad
- Estar libre de contaminantes
- Tener un color apto para dar un buen contraste respecto a la superficie de la pieza

### **6.2.24. COLOR DE LAS PARTÍCULAS.**

Dependerá de contraste de fondo. De este modo se emplearán partículas de color oscuro (negras o azules) para piezas recién maquinadas y partículas de colores claros (grises o blancas) para piezas con superficies oscuras.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Cuando se desea una mayor sensibilidad en un método, es necesario emplear las partículas fluorescentes.

### **6.2.25. INSPECCIÓN CON PARTÍCULAS MAGNÉTICAS EN ÁREA DE CUÑAS Y UPSETS.**

Este procedimiento tiene la finalidad de detectar discontinuidades transversales, superficiales y subsuperficiales en los extremos finales del área no roscada del tubo mediante el método de partículas magnéticas, utilizando un campo activo de corriente alterna (A.C), específicamente en las últimas 36" desde el hombro del piñón (pin) y 48" desde el hombro de la caja (box).

### **6.2.26. EQUIPO NECESARIO PARA LA INSPECCIÓN.**

Para la inspección en el área de cuñas y upsets, se utilizará el siguiente equipo y accesorios:

- Un yugo (Yoke) de corriente alterna (campo magnético longitudinal).
- Partículas magnetizables de varios colores con más contraste con la superficie en inspección.
- Aspersor manual.
- Indicador de dirección de campo magnético (Gausímetro).
- Elementos de limpieza (cepillo, reactivos, agua, etc.).
- Pulidora de mano.

### **6.2.27. PREPARACIÓN DE LA TUBERÍA.**

La superficie externa de las áreas a inspeccionar deben estar completamente limpias, secas y pulidas, libre de partículas de óxido, grasas, fluidos de perforación para que las partículas hagan un buen contacto con la superficie del tubo, y no tener efectos perjudiciales en el movimiento de las partículas. La superficie también debe estar libre de recubrimientos pegajosos o que tienen un espesor excedente a 1/12" para así visualizar la presencia de fracturas.

### **6.2.28. PROCEDIMIENTOS DE INSPECCIÓN.**

a. Los extremos del tubo se inspeccionaran utilizando un campo magnético longitudinal activo con ayuda de un yugo (Yoke), la superficie de este deberá estar en contacto en todo momento con la superficie del tubo, simultáneamente se esparcirá el polvo magnético, con la finalidad de encontrar grietas por fatiga.

b. Cuando encontremos una indicación dudosa, se deberá limpiar nuevamente la superficie, y se repetirá la misma operación, con la finalidad de estar seguros de la presencia de la grieta.

c. Después de la inspección limpiar todas las partículas magnéticas espolvoreadas sobre el tubo.

### **6.2.29. INSPECCIÓN CON PARTÍCULAS MAGNÉTICAS HÚMEDAS (BLACK LIGHT).**

Este procedimiento tiene como objetivo detectar discontinuidades transversales en las roscas ferromagnéticas mediante el uso de partículas magnéticas fluorescentes húmedas (black light).

### **6.2.30. EQUIPO NECESARIO PARA LA INSPECCIÓN CON PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.**

a. Solución líquida para el baño de partículas magnéticas.

Los líquidos en base de agua, deberán humedecer y cubrir toda la superficie a inspeccionar, sin dejar espacios visibles. Si no cubre la superficie en su totalidad, será necesario efectuar una limpieza adicional, humedecer la superficie de nuevo con partículas o añadir otros agentes humectantes.

Los líquidos en base de aceite no deberán tener una fluorescencia natural bajo la luz negra. Se deberán usar para este caso keroseno o combustible de avión (JP-1), el uso de gasolina o diesel no son aceptables, por tener alta fluorescencia natural.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

- b. Equipo para luz negra (U.V.Ligth Meter): Medidor de intensidad de la luz negra de la lámpara.
- c. Lámpara de luz ultravioleta, con bombillo de mercurio de 100 vatios.
- d. Bobina de corriente directa, para inducir un campo magnético longitudinal, cuya capacidad no debe ser inferior a 1.200 amp/vueltas, por cada pulgada de diámetro externo de la conexión. Normalmente las bobinas de magnetización están diseñadas de 2000 vueltas.  
  
Se deberá de tener en cuenta que el amperaje de la bobina se calcula al multiplicar la cantidad de vueltas de la bobina por la lectura de amperios en el medidor de la consola o de la caja de disparos.  
  
Por ejemplo si nuestra lectura en el medidor de amperaje se lee 4 amperios, x 2.000 vueltas de nuestra bobina es igual a 8.000 amperios vueltas - corrientes.
- e. Gausímetro: Para determinar la orientación y magnitud del campo magnético.
- f. Manta oscura o lugares apropiados para obscurecer el área y componente a inspeccionar.
- g. Un espejo de inspección con aumento, para poder visualizar las fisuras en la raíz de las roscas de la caja.
- h. Un tubo centrifugo de 100 ml.

### **6.2.31. PREPARACIÓN DE LAS CONEXIONES.**

Para una adecuada sensibilidad de la inspección por partículas magnéticas todas las conexiones deberán de estar completamente limpias, libres de contaminación de grasa, fluido de perforación, las raíces de las roscas deben estar completamente pulidas y brillantes, para esto se deberá usar un disco blando no metálico. En el área de la caja se deberá limpiar completamente todas las roscas y

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

se limpiara en un mínimo de dos pulgadas más allá del área roscada.

### 6.2.32. PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN CON LUZ NEGRA.

a. El inspector tiene que medir la intensidad de luz negra de la lámpara con la ayuda de un instrumento para luz negra. Ésta se deberá medir al momento de iniciar el trabajo, cada 8 horas de trabajo continuo, y al terminar el trabajo. La intensidad mínima deberá ser de 1.000 microvatios/cm<sup>2</sup> a 15" de la lámpara o a la distancia en que se realiza el trabajo de inspección.

b. La concentración de las partículas magnéticas será de 0.2 y 0.4 ml / 100 ml, en un tubo centrifugo de 100 ml, el asentamiento de las partículas será de 30 minutos como mínimo en líquidos en base de agua y de 1 hora como mínimo en líquidos en base de aceite.

c. El inspector deberá tener cuidado con la polaridad y la magnitud del campo existente en la conexión, con la ayuda del Gausímetro.

d. La bobina de magnetización debe colocarse sobre la conexión para reforzar (no oponer) cualquier campo magnético ya existente. El baño de partículas y la activación del campo magnético deberán realizarse simultáneamente para mejores resultados. La aplicación de corriente magnética deberá permanecer activada 2-3 segundos después de ser aplicado el baño de partículas. La solución de partículas debe ser agitada antes de cada aplicación.

e. Las superficies de cada conexión deben ser inspeccionadas bajo la luz negra.

f. Todos los tubos deberán ser girados durante la inspección para así permitir una inspección a los 360 grados de la conexión y evitar acumulaciones de solución que puedan obstruir defectos en la raíz de la rosca.

g. Debe utilizarse un espejo de aumento para inspeccionar la raíz en la rosca de la caja, asimismo se debe de prestar mayor atención sobre los últimos hilos de la

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

espiga y de la caja ya que esta zona es sometida a mayores esfuerzos durante la rotación de la sarta de perforación.

### **6.2.33. CRITERIO DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO.**

Todas las fisuras encontradas deberán ser motivo para rechazar la conexión, inspector no deberá esmerilar estas fisuras, para tratar de borrarlas, cualquier duda de alguna indicación encontrada se deberá limpiar nuevamente con un disco suave no metálico, y realizar nuevamente la inspección, si la indicación aparece nuevamente la conexión deberá ser rechazada.

### **6.2.34. DISCONTINUIDADES INHERENTES QUE RESPONDEN AL MÉTODO DE INSPECCIÓN POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.**

#### INCLUSIONES

Las inclusiones son materiales no metálicos tales como óxidos y sulfuros presentes en la tubería. Las inclusiones son más prevalentes en ciertos tipos de acero y por lo general discurren paralelas a la orientación del grano en la pieza. Cuando se emplea la inspección por partículas magnéticas sobre piezas de máquinas, las inclusiones no metálicas tienden a producir indicaciones rectas y largas o continuas, mientras que las inclusiones no plásticas se presentan como masas grandes generalmente paralelas a las líneas de flujo. Las indicaciones o se de inclusiones internas por lo general son amplias y difusas, raramente continuas y de ancho irregular. Las inclusiones mayores, especialmente las que se hallan próximas a la superficie, serán más claramente definibles. Sin embargo, un examen más minucioso pudiera revelar falta de definición y varias líneas de indicación en lugar de una sola línea, lo que frecuentemente hace posible distinguir o diferenciar una inclusión mayor de una grieta.

#### SEGREGACIÓN

La segregación es una distribución no uniforme de los elementos que entran en la aleación, resultante de gradientes de concentración durante la solidificación. La

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

segregación en forma de bandeo en el acero puede producir una serie de indicaciones cortas y finas.

### RECHUPES

El rechupe es una cavidad central formada cuando el molde recibe una cantidad inadecuada de metal líquido. Debido a su alejamiento de la superficie, los rechupes por lo general no pueden detectarse por la inspección con partículas magnéticas, por lo que se inspeccionan más adecuadamente empleando técnicas ultrasónicas o radiográficas.

### MICRO-POROSIDAD

Los micro poros se forman durante el enfriamiento del metal, cuando los dendritas o formaciones ramificadas se unen, aislando pequeñas bolsas de metal líquido que finalmente se solidifican y dejan vacíos diminutos. Este defecto generalmente ocurre en materiales no ferrosos por lo que no es susceptible a la inspección por partículas-magnéticas.

### PLIEGUES

El pliegue puede ser debido a una aleta saliente de metal producida por el laminado o a una rebaba resultante del proceso de forja. Dado que en la mayoría de los casos un pliegue no es normal que sea superficial, las indicaciones serán gruesas e irregulares debido a que el defecto presente en el metal estará en ángulo. Si el pliegue contiene además cascarillas, la indicación principal contendrá también pequeñas indicaciones similares a hojas de helecho.



## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

### EXPLOSIONES

Las explosiones son cavidades internas que se desarrollan a ciertas temperaturas durante el proceso cuando el material no fluye suficientemente, al ser laminado, forjado o extraído. Estas cavidades generalmente corren paralelas a la granulometría de la pieza, pero pueden variar en tamaño formando discontinuidades que varían desde anchas a muy finas y compactas. La inspección por partículas magnéticas es un método eficaz de inspeccionar los materiales ferrosos para la detección de explosiones en la superficie o cerca de ésta. Producen indicaciones similares a las grietas por tratamiento térmico excepto que las líneas son menos quebradas o discontinuas.

### GRIETAS DE TRATAMIENTO TÉRMICO

El tratamiento térmico puede ocasionar tensiones internas, especialmente en áreas en que secciones transversales del material pudieran variar, y que pueden ser grandes hasta el punto de quebrar el material, dejando grietas debidas al tratamiento térmico. Estas forman una imagen clara bien definida y concreta en la inspección por partículas magnéticas, que característicamente pueden ser un grupo de líneas cortas o quebradas y agrupadas, frecuentemente en series curvas.

### **6.3. MÉTODO DE INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO.**

La inspección por Ultrasonido Industrial (UT) se basa en la impedancia acústica, la que se manifiesta como el producto de la velocidad máxima de propagación del sonido entre la densidad de un material.

Los equipos de ultrasonido que se emplea actualmente permiten detectar discontinuidades superficiales, subsuperficiales e internas, dependiendo del tipo de palpador utilizado y de las frecuencias que se seleccionen dentro de un ámbito de 0.25 hasta 25 MHz.

Las ondas ultrasónicas son generadas por un cristal o un cerámico piezoeléctrico dentro del palpador; este elemento, que llamaremos palpador, tiene la propiedad de transformar la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. Al ser

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

excitado eléctricamente, y por el efecto piezoeléctrico, el palpador vibra a altas frecuencias (lo que genera ultrasonido); estas vibraciones son transmitidas al material que se desea inspeccionar. Durante el trayecto en el material, la intensidad de la energía sónica sufre una atenuación, que es proporcional a la distancia del recorrido. Cuando el haz sónico alcanza la frontera del material, dicho haz es reflejado. Los ecos o reflexiones del sonido son recibidos por otro (o por el mismo) elemento piezoeléctrico y su señal es filtrada e incrementada para ser enviada a un osciloscopio de rayos catódicos, en donde la trayectoria del haz es indicada por las señales de la pantalla; también puede ser transmitida a un sistema de graficado, donde se obtiene un perfil acústico de la pieza a una pantalla digital o a una computadora, donde se leerá un valor para el análisis matemático de la información lograda.

En muchos aspectos la onda de ultrasonido es similar a las ondas de luz; ambas son ondas y obedecen a una ecuación general de onda.

### **6.3.1. PRINCIPIOS FÍSICOS.**

Para entender claramente el funcionamiento de la inspección por ultrasonido, es necesario conocer las definiciones de algunos conceptos que caracterizan a las ondas y su interacción con la materia:

**AMPLITUD (A).**

Es el desplazamiento máximo de una partícula desde su posición cero.

**FRECUENCIA (F).**

Se define como el número de veces que ocurre un evento repetitivo (ciclo) por unidad de tiempo. Su unidad de medición es ciclos/seg. (Hertz).

**LONGITUD DE ONDA**

Es la distancia ocupada por una onda completa y es igual a la distancia a través de la cual se mueve la onda por periodo o ciclo.

**VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN O VELOCIDAD ACÚSTICA (V).**

Es la velocidad de transmisión de la energía sonora a través de un medio en la dirección de propagación.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Las velocidades de los diversos tipos de onda pueden ser calculadas a partir de las constantes elásticas del material de que se trate. Estas constantes son:

### MÓDULO DE ELASTICIDAD.

Es la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo de tensión (o compresión) y la deformación unitaria experimentada por el material. Este módulo está dado por la ecuación:

$$\sigma = E \epsilon$$

### MÓDULO DE CORTE.

Es la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo de corte (C) y la deformación de corte unitaria experimentada por el material, el cual está definido por:

$$C = G \gamma$$

### COEFICIENTE DE POISSON.

Es la relación (negativa) entre la deformación perpendicular y paralela a la dirección de aplicación del esfuerzo, y se define mediante la siguiente ecuación;

$$\mu = - \frac{\epsilon_{\perp}}{\epsilon_{\parallel}}$$

### IMPEDANCIA ACÚSTICA (Z)

Otro factor importante en la inspección ultrasónica es la impedancia acústica, definida como la resistencia de un material a las vibraciones de las ondas ultrasónicas. La impedancia es el producto de la velocidad máxima de vibración en el material por la densidad del mismo, como se indica en la siguiente ecuación:

$$Z = \rho V_m$$

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Los materiales con impedancia acústica elevada se denominan acústicamente duros; siendo por ejemplo el agua ( $Z = 1.5 \times 10^7 \text{ Kg. / m s}$ ) menos dura acústicamente, que el acero ( $Z = 45 \times 10^7 \text{ Kg. / m s}$ ).

La impedancia es mayor en los cuerpos sólidos que en los líquidos y por lo tanto, mayor en líquidos que en gases.

### PRESIÓN ACÚSTICA.

La presión acústica es la fuerza por unidad de superficie normal a frente de la onda, y para las ondas transversales, es la fuerza cortante por unidad de superficie paralela al frente de la onda.

### ENERGÍA ACÚSTICA ESPECÍFICA.

La propagación de una onda se caracteriza por un transporte de energía y no de masa. La energía presente en la unidad de volumen del medio (que avanza con la velocidad acústica) se denomina energía específica de la onda.

### INTENSIDAD ACÚSTICA.

Es la cantidad de energía que pasa por unidad de área en la unidad de tiempo y viene dada por el producto de la energía específica y la velocidad acústica, obteniéndose para el caso de ondas planas y específicas las siguientes expresiones:

#### 6.3.2. TIPOS DE ONDA.

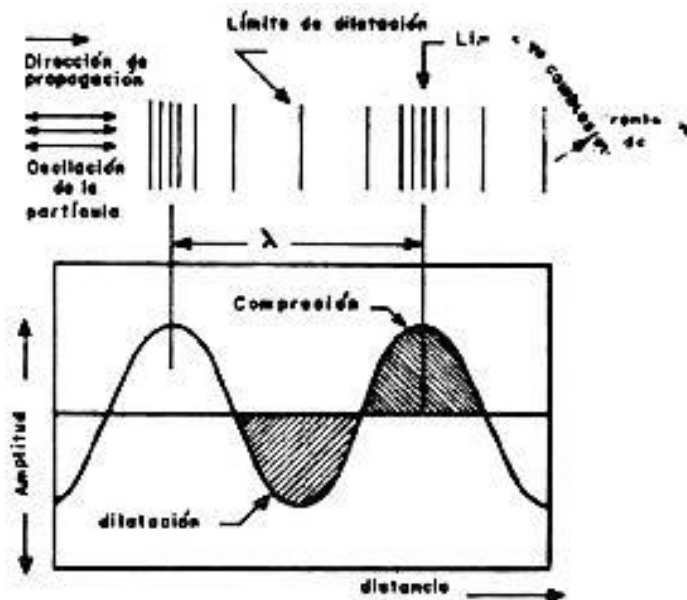
Las partículas de un medio en el que se propaga una onda ultrasónica experimentan diversos desplazamientos, lo que da lugar a diferentes tipos de ondas. Desde el punto de vista de los Ensayos no Destructivos, las más interesantes son: longitudinales o de compresión, transversales o de corte, superficiales o de Rayleigh y de placa o de Lamb.

### 6.3.3. ONDAS LONGITUDINALES O DE COMPRESIÓN.

Se caracterizan porque los desplazamientos de las partículas son paralelos a la dirección de propagación del ultrasonido, creando zonas de compresión y de dilatación (rarefacción), separadas entre sí media longitud de onda dentro del material en el que se propagan.

Pueden transmitirse a través de sólidos, líquidos y gases; su velocidad de viaje es la más alta respecto de los otros modos.

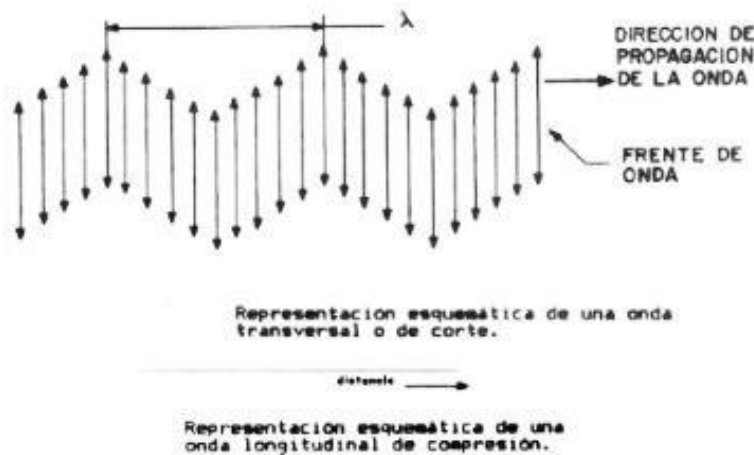
Prácticamente, todos los transductores emiten ondas longitudinales a partir de las cuales se generan otras de diferentes tipos, ya sea por un ángulo de incidencia diferente al normal, o bien, por la geometría del material sujeto a inspección.



Representación esquemática de una onda longitudinal de compresión.

### 6.3.4. ONDAS TRANSVERSALES O DE CORTE.

Son denominadas de esta manera, debido a que el movimiento de las partículas es transversal a la dirección de propagación para lo cual, es necesario que cada partícula exhiba una gran fuerza de atracción hacia sus vecinas, con lo que al moverse hacia atrás y hacia adelante provoca la oscilación de las demás.



Los gases y los líquidos son prácticamente incapaces de transmitir ondas transversales, pues sus moléculas ofrecen poca resistencia al deslizamiento transversal, y por lo tanto no existen vínculos elásticos que las ligan a su posición cero. En los casos prácticos de inspección sólo se pueden alcanzar distancias apreciables de propagación en los cuerpos sólidos.

Una onda de corte viaja aproximadamente a la mitad de la velocidad de una onda longitudinal cuando se desplazan en el mismo material, y por lo tanto tiene longitudes de onda más cortas que las ondas longitudinales de la misma frecuencia, lo que las hace más sensibles a los reflectores pequeños.

Por tales características, se utiliza en la inspección de uniones soldadas.

### **6.3.5. ONDAS DE SUPERFICIE O DE RAYLEIGH.**

Son aquellas que se desplazan sobre la superficie del material y penetran a una profundidad máxima de una longitud de onda, su trayectoria es elíptica y su velocidad es de aproximadamente el 90% de la velocidad de las de corte. Son muy sensibles y se atenúan cuando existe un segundo medio en su trayectoria; por ejemplo, un líquido o un sólido en contacto con la superficie. En la práctica, se emplean para detectar discontinuidades en superficies poco rugosas.

### **6.3.6. ONDAS DE PLACA O DE LAMB.**

Son aquellas que se generan cuando un material muy delgado se somete a una onda de superficie. Se clasifican en:

- Simétricas o de dilatación.
- Asimétricas o de flexión.

La velocidad de propagación de las ondas de Lamb no se puede considerar como una constante del material, ya que depende de su espesor de la frecuencia, Angulo de incidencia, del modo (longitudinal, transversal o superficial) y tipo de onda.

En general, la energía acústica se propaga en alguno de los modos o tipos de onda mencionados. Cuando una onda ultrasónica choca con la interface de dos materiales con diferente impedancia acústica, y la dirección de viaje del haz es diferente a la incidencia normal con respecto a la superficie, parte de la energía se convierte en otros modos de vibración. Este efecto se conoce como conversión de modo y puede generarse por la geometría del material, la divergencia del haz y por la incidencia angular.

### **6.3.7. COMPORTAMIENTO DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS EN SUPERFICIES LÍMITES Y USO DE ACOPLANTES.**

El análisis de una onda en un medio sólo es posible teóricamente, ya que en la práctica cualquier material presenta superficies límites o de contorno, con lo que la propagación de la onda se altera.

La propagación de una onda se caracteriza por un transporte de energía y no de masa. Con respecto a lo anterior debe considerarse que la ley de la conservación de la energía dice que ésta no se crea ni se destruye, sólo se transforma. Esto implica que cuando a un cuerpo o materia que se encuentra en equilibrio elástico (con todas sus partículas equilibradas por fuerzas elásticas) se le aplica una cierta cantidad de energía, las partículas superficiales comunicaran la energía recibida a las partículas vecinas y éstas, a su vez, a las siguientes produciéndose así una propagación de la energía exterior a través de todas las partículas del medio. Pero como normalmente todos los cuerpos tienen a su alrededor una superficie límite, la cual puede ser el aire, un sólido o un líquido, toda la energía incidente sobre un cuerpo no será transmitida a través de él, sino que una cierta cantidad de esta energía será reflejada por la superficie límite.

Dado que el aire, y en general los gases, atenúan fuertemente el sonido, se deduce la conveniencia del empleo de un medio acústicamente conductor, interpuesto entre el palpador y la muestra de ensayo; que desplace la fina película de aire existente y permita la transmisión de la presión acústica incidente. A este medio se le denomina acoplante.

Los medios de acoplamiento acústico son líquidos más o menos viscosos. En general se trata de compuestos orgánicos pastosos, los cuales deberán poseer las siguientes características:

a) Molar la superficie del material a examinar y también la del palpador para



## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

eliminar la capa de aire entre ambos.

b) Fácil aplicabilidad.

e) No escurrir demasiado rápido sobre la superficie.

d) Ser homogéneo y libre de burbujas o partículas sólidas que puedan reflejar o desviar el haz de U. S.

e) No ser corrosivo ni tóxico.

f) Tener una impedancia acústica intermedia entre el material del examen y el transductor.

### **6.3.8. INDEPENDENCIA PERPENDICULAR O NORMAL.**

Si una onda acústica plana incide perpendicularmente sobre una superficie plana y uniforme que separa dos medios diferentes, una parte de la energía de la onda se refleja y vuelve en la misma dirección de la incidente, mientras que la otra parte se propaga en el segundo medio manteniendo su dirección y su sentido.

### **6.3.9. INCIDENCIA ANGULAR.**

Cuando una onda sonora longitudinal o transversal cruza oblicuamente la interface entre dos materiales de diferente velocidad o impedancia acústica, una porción del sonido se refleja y la otra se refracta. Esta energía transmitida cambia su dirección de propagación de forma similar a lo que ocurre en óptica, al pasar un haz luminoso de un material a otro con diferentes índices de refracción.

En la figura se muestran los fenómenos de reflexión y de refracción de una onda en una superficie plana, en donde alfa es el ángulo de incidencia; beta, el ángulo de reflexión y teta, el ángulo de transmisión o de refracción. Este último está determinado por las velocidades del sonido en los diferentes materiales (impedancia acústica) y por el ángulo de incidencia.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS



Se ha observado que a diferencia de la luz, las ondas sonoras de cualquier tipo, por ejemplo las longitudinales, no sólo se refractan en el segundo material, sino que de acuerdo al ángulo de incidencia se transforman parcial o totalmente en otros modos de propagación, por ejemplo de corte, de superficie o de fondo. Puesto que estas ondas tienen diferentes velocidades en el mismo material, presentan distintos ángulos de refracción.

En la mayoría de las ocasiones, durante la inspección de cuerpos sólidos, es necesario eliminar la onda longitudinal transmitiendo exclusivamente la onda transversal para simplificar la inspección.

Dado que la velocidad de las ondas transversales es menor que la de las longitudinales, los ángulos de reflexión o de refracción de las ondas longitudinales serán mayores que los ángulos respectivos de reflexión o de refracción de las ondas transversales.

Si dos tipos de ondas están presentes al mismo tiempo en el material de inspección (con diferentes velocidades y ángulos de refracción), es prácticamente imposible evaluar de forma adecuada una discontinuidad, pues no se conoce cuál es el modo de onda que la está detectando. Por este motivo, antes de la

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

inspección debe verificarse que sólo exista un modo de propagación al calcular:

a) El primer ángulo crítico de incidencia, en el que únicamente existen ondas de corte en el segundo medio y el haz longitudinal es totalmente reflejado; esto es, su ángulo de refracción es igual o mayor a 90 grados.

b) El segundo ángulo crítico de incidencia, que es alcanzado cuando la onda de corte se refracta a 90 grados. En este punto todas las ondas transversales son reflejadas y quedan sólo las de superficie.

Si el primer ángulo crítico de incidencia es mayor al segundo, se tiene una reflexión total de los dos tipos de ondas reflejadas; lo que significa que el haz incidente no es transmitido a través del segundo medio.

En el proceso de reflexión y refracción, la transformación de un tipo de onda en otro se denomina “conversión de modo”, que permite obtener ondas transversales o superficiales si se emplea un transductor de haz longitudinal colocado sobre una zapata de plexiglass con un ángulo de incidencia adecuado.

### **6.3.10. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL HAZ ULTRASÓNICO.**

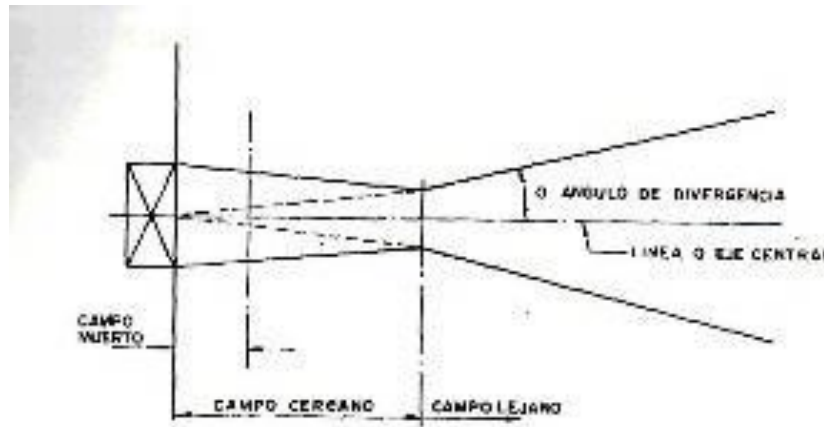
A continuación se describe el comportamiento del haz ultrasónico una vez que inicia su propagación en el medio que está siendo inspeccionado. Debe aclararse que la onda ultrasónica, al inicio de su desplazamiento no produce una compresión igual, pero conforme avanza en el medio, se homogeniza hasta obtener resultados repetitivos y confiables.

El comportamiento del haz ultrasónico puede modificarse en función de la geometría, frecuencia y características específicas del transductor; sin embargo. Independientemente de estas variables siempre presentará las siguientes características:

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

- Un eje central.
- Un campo o zona muerta.
- Un campo cercano o zona de Fresnel.
- Un campo lejano o zona de Fraunhofer.

Lo anterior esté representado gráficamente



Representación simplificada del haz ultrasónico.

### 6.3.11. CAMPO MUERTO.

Es la distancia frente al transductor (trayectoria previa) y su extensión es equivalente a la longitud de un pulso completo. En esta zona ninguna indicación puede detectarse, debido a que existe un lapso en el cual el transductor ha dejado de vibrar pero está saturado y en consecuencia no detecta la señal que pueda generarse en el material a inspeccionar; y también porque el tiempo de recorrido de la señal es menor al tiempo de excitación del cristal y esta es interferida por la emisión ultrasónica del transductor.

El campo muerto es importante porque limita ciertas aplicaciones del ultrasonido, especialmente cuando se están inspeccionando materiales muy delgados o se requiere localizar indicaciones muy cercanas a la superficie en la que se introduce el haz ultrasónico. Una forma de disminuir esta limitante es emplear un transductor de doble cristal; o bien, una línea de retardo.

### **6.3.12. CAMPO CERCANO O ZONA DE FRESNEL.**

Es una zona de interferencia originada por la vibración irregular del material que se encuentra frente al transductor. Su formación puede explicarse de la forma siguiente: la cara del cristal de un transductor ultrasónico no vibra uniformemente bajo la influencia del pulso eléctrico, sino que lo hace en forma compleja, ya que su estructura es la de un mosaico formado por cristales individuales que vibran en la misma dirección, pero ligeramente fuera de fase con sus vecinos. Por lo que cada uno actúa como una fuente puntual y emite una onda esférica hacia afuera desde el plano de la cara del cristal.

El material que está frente al transductor vibra, creando diferentes frentes de onda, cada uno de ellos tiene su propia oscilación originando una zona de presión acústica irregular que consiste en regiones de intensidades máximas y mínimas correspondientes a los nodos de interferencia de las ondas que están respectivamente en fase y fuera de fase.

En la zona de Fresnel, la presión acústica varía irregularmente y se puede detectar una discontinuidad, pero no se puede evaluar porque se tienen variaciones en la amplitud de la indicación. La amplitud en esta zona depende de la frecuencia, de la velocidad del sonido en el material y del diámetro del transductor

### **6.3.13. SENSIBILIDAD.**

Se define como la capacidad de un transductor para detectar discontinuidades pequeñas. Se mide por medio de la amplitud de la respuesta de una discontinuidad artificial en un bloque de referencia. Esta característica es particular de cada transductor y aun los del mismo tamaño, frecuencia y material no siempre producen señales idénticas en la pantalla del osciloscopio.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

### 6.3.14. RESOLUCIÓN.

Es la capacidad para separar dos señales cercanas en tiempo o profundidad.  
Puede dividirse en dos tipos:

Resolución en Superficie Cercana.

Es la habilidad para separar claramente una señal de un reflector en una distancia mínima cercana a la superficie, sin presentar interferencia de la señal de entrada inicial. Se puede verificar mediante un bloque patrón con orificios a diferentes profundidades a partir de la superficie de contacto.

Resolución en Superficie de Pared Posterior.

Es la capacidad de un transductor de proporcionar indicaciones separadas de discontinuidades con una profundidad muy cercana a la superficie de pared posterior, esta resolución depende del ancho del pulso y de la frecuencia. Se comprueba empleando el bloque de referencia IIW.

### 6.3.15. FRECUENCIA CENTRAL.

Los transductores deben utilizarse en su rango de frecuencia especificado para obtener una aplicación óptima.

### 6.3.16. ATENUACIÓN DEL HAZ.

Es la pérdida de energía de una onda ultrasónica al desplazarse a través de un material. Las causas principales pueden ser la dispersión y absorción.

La dispersión se debe a que los materiales no son estrictamente homogéneos. Contienen superficies límites o pequeñas interfases, en las que la impedancia

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

acústica cambia bruscamente por la diferente densidad o velocidad acústica de los materiales en dichas interfases. Estas pequeñas heterogeneidades pueden ser inclusiones, heterogeneidades originales naturales o intencionadas (la porosidad en materiales sinterizados), constituyentes precipitados de naturaleza distinta (el grafito en fundiciones grises cuyas propiedades elásticas son completamente distintas a las de la ferrita) y fases en la estructura cristalina de los metales con diferentes estructuras y composición (aceros, latones, etc.).

La dispersión producida por la estructura policristalina de los metales es de gran importancia en los END por ultrasonido. Los factores de mayor influencia en la dispersión son el tamaño del grano, la naturaleza del metal que determina su anisotropía elástica y la frecuencia de las ondas. La dispersión aumenta con el tamaño del grano y con la frecuencia; de aquí que el ensayo de estructuras de grano burdo, por ejemplo fundiciones, requiera bajas frecuencias del orden de 1MHz ó 2MHz. A igualdad de grano y longitud de onda, la anisotropía elástica determina la mayor o menor dispersión.

Desde este punto de vista, el cobre es, entre los metales más usuales, el más anisotrópico (más dispersante) y el aluminio el menos dispersante, en tanto que el acero se encuentra en un valor intermedio.

La absorción de las ondas ultrasónicas es el resultado de la conversión de la energía sonora en calor. Las causas que dan origen a este fenómeno son diversas, pero influyen el medio y la frecuencia de las ondas. La absorción es directamente proporcional a la frecuencia. En general para los metales, la atenuación por absorción es considerablemente menor que la producida por la del haz. Este fenómeno puede explicarse de forma como un efecto de frenado en la oscilación de las lo que también justifica que un movimiento rápido pierda más energía que un movimiento lento.

El movimiento rápido es producto de una alta frecuencia y por lo tanto, la

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

absorción es mayor; es decir, parte de la energía ultrasónica es absorbida en forma de calor. La absorción debilita la energía transmitida o la amplitud del eco, tanto de una heterogeneidad como de la pared posterior. Para contrarrestar este efecto, es recomendable el empleo de bajas frecuencias.

### **6.3.17. EQUIPO UTILIZADO EN LA INSPECCION POR ULTRASONIDO.**

### **6.3.18. TRANSDUCTORES.**

Una parte vital en el sistema de inspección por ultrasonido es el transductor. Por medio de éste, la energía eléctrica se convierte en energía mecánica (ondas sonoras) o viceversa. Opera debido al efecto piezoeléctrico, el cual consiste en que ciertos cristales cuando se tensionan, se polarizan eléctricamente y generan voltaje eléctrico entre las superficies opuestas. Esto es reversible en el sentido de que al aplicar un voltaje a través de las caras de un cristal, se produce una deformación del mismo. Este efecto microscópico se origina por las propiedades de simetría de algunos cristales.

Los cristales son átomos arreglados en un patrón tridimensional definido. Existen 32 clases diferentes y 20 de éstas son piezoeléctricas, de las cuales 10 se polarizan espontáneamente. En el último caso, algunos de los materiales cambian su dirección de polarización cuando se les aplica un campo eléctrico y son llamados ferroeléctricos por analogía con los materiales ferromagnéticos que se magnetizan espontáneamente.

La mayoría de los transductores usados en ultrasonido son del tipo ferroeléctrico y se conocen como cerámicos debido a que sus propiedades físicas y mecánicas son comparables a las del material del mismo nombre. Se emplean, por su alta eficiencia, en la conversión de la energía eléctrica en ondas ultrasónicas.

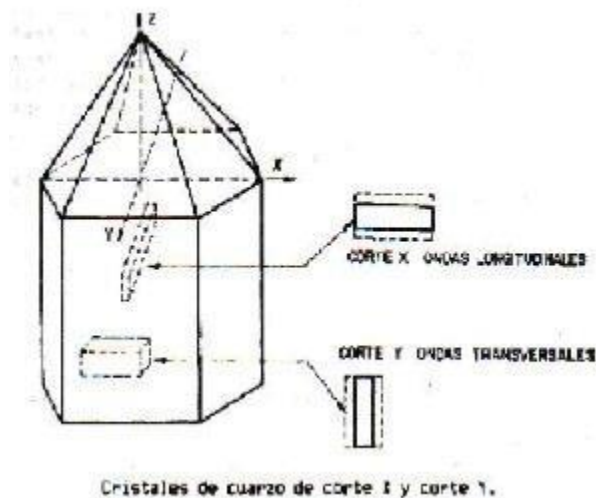
La generación de ondas ultrasónicas puede realizarse por diversos medios o



## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

efectos físicos. Sin embargo, se describirán sólo los principales: la piezoelectricidad, la electrostricción y la magnetostricción y el tercer eje Y, llamado también "eje mecánico", está definido por la perpendicular a los lados de dicho hexágono, habiendo por lo tanto, tres ejes Y.

Al cortar una lámina en dirección perpendicular a uno de los ejes X o Y, se obtienen cristales piezoeléctricos que son denominados "cristales de corte X" o "cristales de corte Y" respectivamente. La diferencia fundamental que existe entre estos dos cristales es que, mientras los cristales de corte X son generadores de ondas longitudinales, los cristales de corte Y son generadores de ondas transversales.



Cuando a esta molécula se aplica una presión mecánica (acústica en nuestro caso), en la dirección del eje X, los iones se desplazan dando lugar a la formación de un dipolo eléctrico, liberándose cargas eléctricas positivas y negativas en las superficies del cristal que son normales al eje del que han sido cortados. Este fenómeno es llamado "piezoeléctrico longitudinal directo".

Si por el contrario, se ejerce la presión perpendicular al eje X, o lo que es igual, siguiendo la dirección del eje Y, se liberarán cargas eléctricas en las superficies del cristal con la polaridad opuesta al caso anterior, no apareciendo así cargas

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

libres en las caras donde se aplica la presión, por lo que se denomina a este fenómeno "efecto piezoeléctrico transversal directo".

Si las caras del cristal se recubren con películas conductoras, se obtiene, por efecto de las variaciones de presión, una determinada tensión eléctrica. Este "efecto piezoeléctrico directo" es el que se utiliza en la "recepción" de las ondas ultrasónicas.

### 6.3.19.MATERIALES-PIEZOÉLECTRICOS.

A) Cuarzo.- Se obtiene a partir de cristal excelentes características de estabilidad eléctrica. Es insoluble en la mayoría de los líquidos. Es muy duro y resistente al desgaste, así como desafortunadamente, así como al envejecimiento. Desafortunadamente sufre interferencias en el modo de conversión y es el menos eficiente de los generadores de energía acústica. Requiere alto voltaje para su manejo a bajas frecuencias. Se debe emplear a temperaturas menores a 550 pues arriba de esta pierde sus propiedades piezoeléctricas.

B) Sulfato de Litio.- Este material se considera como uno de los receptores más eficientes. Su ventaja principal reside en su facilidad de obtener una amortiguación acústica óptima lo que mejora el poder de resolución. No envejece y es poco afectado por la interferencia en el modo de conversión. Sus desventajas son que es muy frágil, soluble en agua y se debe emplear a temperaturas menores de 75 grados C.

C) Cerámicos Polarizados.- Se obtienen por sinterización y se polarizan durante el proceso de fabricación. Se consideran como los generadores más eficientes de energía ultrasónica cuando operan a bajos voltajes de excitación. Prácticamente no son afectados por la humedad y algunos pueden emplearse hasta temperaturas de 300 grados C. Sus principales limitaciones son: resistencia mecánica relativamente baja; en algunos casos existe interferencia en el modo de

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

conversión: presentan tendencia al envejecimiento. Además poseen menor dureza y resistencia al desgaste que el cuarzo.

Algunos emisores se elaboran con los siguientes materiales:

1) Titanato de Bario. Se considera buen emisor debido a su elevado módulo piezoeléctrico. Sus limitaciones más importantes son: problemas de acoplamiento y amortiguación: su empleo está limitado a frecuencias menores de 15MHz, debido a su baja resistencia mecánica y alta impedancia acústica; presenta interacción entre varios modos de vibración y la temperatura de su punto de Curie es de 115-150 grados C.

2) Metaniobato de Plomo. Presenta un módulo piezoeléctrico elevado, lo que lo califica como buen emisor. Posee excelente estabilidad térmica, similar al cuarzo, lo que le permite ser empleado a altas temperaturas. Otra ventaja es que posee un elevado coeficiente de amortiguación interna, por lo que se considera como el mejor material para generar impulsos cortos. Una de sus limitaciones es que presenta una baja frecuencia fundamental y una mala resistencia mecánica, por lo que se aplica principalmente a frecuencias altas. Otra limitante es que presenta interacción entre varios modos de vibración.

3) Zirconato Titanato de Plomo. Se considera como el mejor emisor por su alto módulo piezoeléctrico. Sin embargo, es el más difícil de amortiguar por su alto coeficiente de deformación. Se recomienda su empleo cuando existen problemas de penetración.

### **6.3.20. EL PALPADOR.**

Después de conocer los materiales piezoeléctricos y los efectos que intervienen en la generación del ultrasonido, corresponde enumerar y describir los elementos que conforman un palpador comúnmente empleado en la inspección ultrasónica.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Aunque es frecuente el uso de transductor y palpador como sinónimo, es recomendable conocer las definiciones establecidas para éstas dos palabras y el porqué de su uso en éste texto.

En la inspección ultrasónica se define como transductor a aquel elemento que tiene por función transformar energía mecánica (vibraciones) en energía eléctrica o viceversa, que es el caso de los cristales piezoeléctricos. Así mismo, se define como palpador (sonda o unidad de búsqueda) al arreglo que permite la manipulación del transductor para efectuar la inspección.

### **6.3.21. COMPONENTES DE UN PALPADOR.**

Las partes básicas de un palpador común pueden ser:

- a) Carcasa Metálica. Envolvente que sirve como blindaje y proporciona la resistencia mecánica.
- b) Cristal. Pequeña placa de un material piezoeléctrico y que es el elemento principal del palpador.
- c) Electrodo. Placas conductoras de la corriente eléctrica.

### **6.3.22. CLASIFICACIÓN DE LOS PALPADORES. EXISTEN DIFERENTES FORMAS DE CLASIFICAR LOS PALPADORES.**

A continuación se propone una forma de acuerdo a:

- a) El grado de amortiguamiento del transductor.
- b) La forma de propagación del haz.
- c) La técnica de inspección.
- d) El número de cristales.
- e) Por aplicaciones especiales.

En el caso del grado de amortiguamiento, éste determina si el transductor es de

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

banda ancha o de banda angosta. El ancho de la banda significa la gama de frecuencias que son iguales o mayores al 70% de la frecuencia central.

### **6.3.23. PALPADOR DE BANDA ANCHA.**

Las características principales de este tipo de palpadores son:

- Reducción del campo muerto.
- Pulsos acústicos de corta duración, de uno o dos ciclos de vibración.
- Elevado poder de resolución que permite realizar mediciones de tiempo de recorrido sumamente exactas.
- Menor sensibilidad.
- Menor poder de penetración.
- Mayor atenuación

### **6.3.24. DESCRIPCIÓN Y FUNCIÓN DE LOS CONTROLES EXISTENTES EN LOS EQUIPOS COMERCIALES DE ULTRASONIDO.**

### **6.3.25. SUMINISTRADOR DE ENERGÍA.**

Es el componente que suministra la energía eléctrica a los circuitos. Existen dos tipos de fuentes de energía y son:

- a) Línea comercial (corriente alterna).
- b) Baterías (corriente directa).

Los equipos que utilizan baterías recargables pueden usar baterías de níquel-cadmio o de ácido-plomo. Las de níquel-cadmio son las de mayor empleo; al usarlas debe agotarse completamente su carga antes de volverlas a cargar, debido a que tienen una memoria para que se usen en un determinado tiempo.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Las baterías de ácido-plomo (similar a las que usan los automóviles) tienen la desventaja de que son más voluminosas y pesadas, adicionalmente su vida útil es menor que las de níquel-cadmio.

### **6.3.26. CIRCUITO DE RELOJ O CONTADOR DE TIEMPO.**

Este circuito es la fuente de todas las señales de sincronización enviadas al circuito transmisor.

Sus funciones son las siguientes:

Genera el serial de sincronización para la emisión de pulsos eléctricos de alta frecuencia, por parte del circuito transmisor también conocido como generador de alta frecuencia. La frecuencia con que se envía el pulso eléctrico de excitación al transductor se denomina "frecuencia de repetición de pulsos" y se expresa en pulsos por segundo (p.p.s.). Interesa que la frecuencia de repetición de pulsos sea lo más alta posible, puesto que de esta forma se superpondrán más imágenes por unidad de tiempo; con lo que el oscilograma resultará con más brillo. Sin embargo, una frecuencia de repetición de pulsos excesiva puede dar lugar a la aparición de indicaciones de los llamados "ecos fantasmas".

Estas indicaciones de ecos perturbadores se identifican sin mucha dificultad, ya que en general no se mantienen fijas en sus posiciones, sino que oscilan ligeramente de derecha a izquierda, debido a las pequeñas variaciones inevitables de la frecuencia de repetición de pulsos. Otra forma eficaz de identificar los ecos fantasmas es disminuyendo la frecuencia de los pulsos por medio del control correspondiente.

### **6.3.27. CIRCUITO TRANSMISOR.**

El circuito transmisor, también conocido con el nombre de "generador de alta frecuencia", es la fuente de pulsos eléctricos cortos de alta energía que son generados al recibir la señal de sincronización producida por el circuito de reloj.

Los pulsos eléctricos de alta frecuencia (los cuales son producidos en los equipos más simples por medio un tubo que actúa abriendo y cerrando el circuito de un condensador cargado a varios cientos de voltios) son emitidos con un cierto potencial, entre 100 y 1000 volts). Este voltaje puede ser regulado en algunos equipos por medio de un control llamado "pulse energy".

### **6.3.28. CIRCUITO RECEPTOR.**

Las ondas acústicas que llegan al cristal receptor después de recorrer el material, generan pulsos eléctricos de voltajes que varían desde una milésima hasta un volt como máximo. El pulso eléctrico generado, es enviado a un subcircuito cuya función es rectificar la señal recibida, eliminando la mayor parte de la porción negativa y quedando sólo una pequeña cantidad de ésta.

Posteriormente es purificada por el subcircuito de filtro, que corrige la señal al eliminar la mayor parte de las señales secundarias que están por debajo de una frecuencia preestablecida.

A continuación, él pulso eléctrico es enviado al subcircuito amplificador, que incrementa la señal para obtener una indicación en la pantalla o en el graficador con una amplitud preestablecida.

El circuito amplificador, normalmente tiene la capacidad de incrementar la señal en una relación 1 a 10 000, lo que es equivalente a una relación de 100dB; esto es debido a que generalmente el tubo de rayos catódicos o el graficador requieren de un potencial de hasta 100 volts para su modulación completa.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Adicionalmente, es recomendable que el amplificador sea de banda ancha, con el fin de poder amplificar con un mínimo de distorsión los pulsos eléctricos cortos, cuyo espectro de frecuencias es muy amplio.

Al amplificar la señal de la discontinuidad, también se amplifican las señales parásitas conocidas como ruido de fondo (pasto), el cual se incrementa proporcionalmente con la raíz cuadrada del ancho de la banda del espectro ultrasónico; por lo que una banda más estrecha permitirá mayores niveles de amplificación, conservando a la vez una buena relación señal-ruido.

### **6.3.29. BLOQUES DE CALIBRACIÓN.**

En las inspecciones por ultrasonido todas las indicaciones de discontinuidades son comparadas con las de un patrón de referencia. Los patrones de referencia pueden ser un bloque o un juego de bloques específicos para una determinada prueba y se denominan "bloques de prueba" o "bloques de calibración"; éstos son empleados para calibrar el equipo ultrasónico y para evaluar las indicaciones de las discontinuidades de la muestra inspeccionada.

Por medio de la calibración con el bloque de prueba se puede:

- a) Verificar que el sistema compuesto por el transductor, el cable coaxial y el equipo funciona correctamente.
- b) Fijar la ganancia o sensibilidad con la cual se detectarán las discontinuidades equivalentes a un tamaño especificado o mayores.

En las piezas que se inspeccionan, la evaluación se realiza comparando las indicaciones de las discontinuidades detectadas con la indicación obtenida de una discontinuidad artificial, que posee una dimensión conocida y debe encontrarse aproximadamente a la misma profundidad que la indicación que se está



## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

evaluando. Las discontinuidades artificiales más comunes en estos bloques son:

- a) Agujeros de fondo plano.
- b) Barrenos laterales.
- c) Muestras.

Las discontinuidades artificiales son barrenadas o maquinadas cuidadosamente y de tal forma que únicamente se obtenga la indicación de la discontinuidad que ha sido creada intencionalmente.

Los bloques de prueba con agujeros de fondo plano se emplean principalmente para inspecciones con haz recto. El agujero de fondo plano es el más utilizado porque ofrece una superficie óptima de reflexión y presentan un área conocida. Los bloques de prueba con muescas o con barrenos laterales utilizan generalmente para la inspección con haz angular.

Las muescas son elaboradas por maquinado, procurando que sus paredes sean paralelas entre si perpendiculares a la superficie del bloque de prueba. En algunos casos es necesario maquinaslas con un ángulo de hasta 60 grados de inclinación con respecto a la superficie del bloque. Las dimensiones de la muesca (longitud, ancho y profundidad) estarán relacionadas con el tipo de inspección empleado. La profundidad normalmente se expresa como un porcentaje del espesor del bloque.

### **6.3.30. BLOQUES DE CALIBRACIÓN ESPECIALES.**

Existen bloques que no son considerados como de referencia, ya que la única función que tienen es la de verificar la operatividad del sistema ultrasónico (instrumento, cables, conectores y transductores) y de esta manera realizar los ajustes que sean necesarios para poder asegurar una inspección confiable, que no sea afectada por un mal funcionamiento del sistema ultrasónico.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

A continuación se dan algunos ejemplos:

- a) Bloque A 3
- b) Bloque DIN 54 122 y sus variantes.
- c) Bloque DSC.
- d) Bloque IOW para el perfil del haz.

### **6.3.31. DETECCIÓN DE DISCONTINUIDADES.**

En esta sección se resumen los efectos de las distintas variables que influyen en la inspección por ultrasonido, así como la definición de conceptos importantes para la evaluación e interpretación de resultados. También se definen algunas de las funciones del inspector, denotando que requiere experiencia para efectuar las pruebas y una absoluta honestidad en la evaluación e interpretación de las indicaciones.

En todos los métodos de Ensayos no Destructivos se producen indicaciones en forma directa o indirecta, las cuales deben ser correctamente interpretadas antes de obtener información útil.

Existe una gran tendencia por parte de los inspectores, de confundir los términos "interpretación" y "evaluación". Actualmente, éstos se refieren a dos etapas completamente diferentes en el proceso de inspección, por lo que requieren distintas categorías de conocimiento y de experiencia; particularmente en la técnica de ultrasonido es notable la diferencia entre los niveles I, II y III de calificación.

El término "interpretar" una indicación significa predecir que tipo de discontinuidad puede ser la causa que la origina. La "evaluación" es posterior a la interpretación y consiste en comparar las características de la indicación o de la posible discontinuidad con los requisitos establecidos por las normas de calidad

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

aplicables. Para interpretar las indicaciones correctamente, el inspector debe familiarizarse completamente con el proceso de inspección y fabricación que está empleando. También debe conocer el material de la pieza inspeccionada y en caso necesario, debe ser capaz de obtener toda la información posible acerca de la discontinuidad que produce la indicación y su posible efecto en la pieza.

Puesto que la evaluación correcta de las indicaciones obtenidas depende en gran parte de la interpretación de las mismas, el inspector es un elemento clave del proceso. En muchas ocasiones se espera que el inspector que observa e interpreta la indicación, también la evalúe, por lo que un inspector hábil y con experiencia es de gran utilidad para mejorar los métodos de inspección. Para iniciar la interpretación y evaluación de discontinuidades es necesario clarificar algunos conceptos importantes empleados en la inspección no destructiva.

### **6.3.32. SENSIBILIDAD.**

Para la inspección por ultrasonido, se puede definir que la sensibilidad es la capacidad del sistema ultrasónico para detectar discontinuidades que tienen una cierta dimensión establecida por un código, norma o especificación.

### **6.3.33. INDICACIÓN.**

Es una señal que puede ser producida por una alteración en el material o pieza sujeta a inspección y es generada por el método de inspección no destructivo empleado. Las indicaciones pueden ser:

- Falsas.
- No relevantes.
- Relevantes.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Una indicación falsa es aquella que aparece durante la inspección y que puede ser provocada por una mala aplicación del método.

La indicación no relevante, normalmente es producida por la estructura del material o por la configuración de la pieza. En general, esta indicación se produce por interrupciones de la configuración de la pieza y pueden ser los dientes, cuneros, condición de la superficie. También puede ser producida por cambios en algunas características del material como su tamaño de grano, los tratamientos de endurecimiento a que ha sido sometido o el acabado superficial.

Una indicación relevante es producida por una discontinuidad. Para determinar su importancia se debe interpretar la indicación y evaluar la discontinuidad.

### **6.3.34. DISCONTINUIDAD.**

Es la falta de homogeneidad o interrupción en la estructura física normal de un material, también puede ser una deficiencia en la configuración física de una pieza, parte o componente. Las discontinuidades pueden ser:

- No relevantes.
- Relevantes.

Una discontinuidad no relevante es aquella que por su tamaño, forma o localización requiere de ser interpretada, pero no es necesario evaluarla.

Una discontinuidad relevante es aquella que por su tamaño, forma o localización requiere de ser interpretada y evaluada.

### **6.3.35. DEFECTO.**

Es toda discontinuidad o indicación de una discontinuidad que por su tamaño, forma o localización ha excedido los límites de aceptación establecidos por el código, norma o especificación aplicable.

### **6.3.36. REQUISITOS DE LA INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO INDUSTRIAL.**

Antes de iniciar una inspección por UT, es necesario definir los siguientes parámetros, a fin de hacer una correcta selección del equipo de trabajo:

- Cuál es el tipo de discontinuidad que puede encontrarse.
- Qué extensión y orientación puede tener en la pieza.
- Qué tolerancias se pueden aplicar para aceptar o rechazar la indicación.

Todo instrumento de inspección ultrasónica debe ser revisado y, en caso necesario, recalibrado por un taller de servicio autorizado por el fabricante.

### **6.3.37. SELECCIÓN DEL PALPADOR Y DEL CABLE COAXIAL A SER EMPLEADOS.**

Los cables son del tipo coaxial para prevenir problemas de interferencia eléctrica y sus conexiones deben ser compatibles con las del instrumento y el palpador a emplear.

Los factores a ser tomados en cuenta para la selección de un palpador son:

- Número de cristales piezoeléctricos.
- El tipo de inspección (contacto, inmersión, alta temperatura).
- El diámetro del elemento piezoeléctrico.
- La frecuencia de emisión.
- En su caso, el ángulo de refracción.
- El tipo de banda.
- El tipo de protección de antidesgaste.

### **6.3.38. APLICACIONES.**

Es aplicable para la medición de espesores, detección de zonas de corrosión, detección de defectos en piezas que han sido fundidas, forjadas,

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

roladas o soldadas; en las aplicaciones de nuevos materiales como son los metal cerámicos y los materiales compuestos, ha tenido una gran aceptación, por lo sencillo y fácil de aplicar como método de inspección para el control de calidad.

### **6.3.39. VENTAJAS DEL ULTRASONIDO INDUSTRIAL.**

- Se detectan discontinuidades superficiales y subsuperficiales.
- Puede delinarse claramente el tamaño de la discontinuidad, su localización y su orientación.
- Sólo se requiere acceso por un lado del material a inspeccionar.
- Tiene alta capacidad de penetración y los resultados de prueba son conocidos inmediatamente.

### **6.3.40. LIMITACIONES DEL ULTRASONIDO INDUSTRIAL.**

- Está limitado por la geometría, estructura interna, espesor y acabado superficial de los materiales sujetos a inspección.
- Las partes pequeñas o delgadas son difíciles de inspeccionar por este método.
- El equipo puede tener un costo elevado, que depende del nivel de sensibilidad y de sofisticación requerido.

El personal debe estar calificado y generalmente requiere de mucho mayor entrenamiento y experiencia para este método que para cualquier otro de los métodos de inspección.

La interpretación de las indicaciones requiere de mucho entrenamiento y experiencia de parte del operador. Requiere de patrones de referencia y generalmente no proporciona un registro permanente.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

### **6.3.41. INSPECCIÓN DE ESPESORES DE PARED CON ULTRASONIDO.**

Esta inspección tiene como objetivo determinar pérdidas de espesores de pared en la tubería de perforación (Drill Pipe) por medio de un equipo portátil de ultrasonido.

### **6.3.42. EQUIPO NECESARIO PARA LA INSPECCIÓN ULTRASÓNICA DE ESPESORES DE PARED.**

Cables coaxiales: los cables coaxiales deben estar en buenas condiciones y hacer un buen contacto eléctrico entre el palpador y el aparato de ultrasonido la longitud del cable puede variar entre 1500 y 3000 mm, los cables a emplearse poseerán condiciones adecuadas al equipo y a los palpadores; en caso contrario se pueden emplear adaptadores.

Acoplantes: Es el medio lubricante utilizado durante la inspección, se debe tener en cuenta las siguientes indicaciones:

- a. Se permite el empleo de los siguientes acoplantes excepto que se indique algo diferente: pasta de celulosa diluida con agua, vaselina, glicerina o aceite.
- b. En caso de cambiar de acoplante durante la inspección se comprobará toda la calibración.
- c. Se debe emplear el mismo acoplante para calibrar y ajustar el instrumento para efectuar la inspección.

Instrumento Ultrasónico: El instrumento para este método de inspección deberá ser un ultrasonido de pulso y eco, cuyo indicador de lecturas puede ser digital o análogo. El equipo ultrasónico debe cumplir los siguientes requisitos:

- a. Este ultrasonido dispondrá de un palpador dual, que sirva para transmitir y receptar la onda ultrasónica en forma separada.
- b. El ultrasonido será calibrado linealmente cada seis meses, por el fabricante o alguna entidad autorizada.

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

c. El instrumento ultrasónico deberá tener una calcomanía o sticker de calibración, y debe de tener la siguiente información:

- Fecha de calibración.
- Fecha de expiración de dicha calibración.
- Nombre de la compañía que realizo la calibración.
- Firma de la persona que realizo la calibración.

d. El mismo acoplante que se usa para la calibración del instrumento, deberá ser usado para las mediciones de espesores de pared.

e. El patrón de calibración del instrumento ultrasónico en el campo debe ser Curvo y de acero, y tendrá dos secciones, una delgada y otra sección gruesa. La sección gruesa será semejante a la pared nominal del tubo a inspeccionar  $+ 0.050'' - 0''$  y la sección delgada será semejante al 70% de la pared nominal  $+ 0'' - 0.050''$ .

### **6.3.43. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO.**

- a. Fijar la lectura del medidor la cual, ésta debe ser exactamente igual a la del espesor del bloque de calibración, este espesor deberá ser verificado con un micrómetro. Este bloque estará dentro de las 0.05" del espesor nominal de la pared del tubo a ser inspeccionado.
- b. Chequear la exactitud de la lectura en un segundo espesor normado este es del 87 1/2 % o menos del espesor de la pared especificada del tubo a ser inspeccionado. La medida leída estará dentro de  $\pm 0.001''$ .
- c. Todos los espesores normados usados para calibración tendrán propiedades de velocidad y atenuación similares a la del tubo que está siendo inspeccionado. Antes de usar, ellos también serán expuestos a la misma temperatura ambiente del tubo por 30 minutos o más. Colocando el bloque de calibración sobre la superficie del tubo, y así maximizando el área de contacto con el tubo, puede permitir en un corto tiempo de exposición, pero no menos que 10 minutos para eliminar medidas erróneas debido a la diferencia de temperaturas.



## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

- d. Si el tubo ensayado es de 3 ½” de diámetro exterior o más pequeño, la norma en "a" y "b" tienen la misma primera superficie de curvatura que el diámetro exterior del tubo medida. Cuando el tubo ensayado es más grande que 3 ½” de diámetro exterior, puede usarse un bloque de superficie curva o plana.
- e. Si al encender el equipo, este indica que la batería está baja, ésta debe ser remplazada o cargada.
- f. Chequear periódicamente la superficie del palpador, que no este desgastada o curvada, y si está así, tiene que ser rectificada o remplazada.
- g. Si las lecturas no permanecen estables cuando el palpador es retenido firmemente e inmóvil en un bloque de calibración, el medidor está funcionando mal. Este será remplazado o reparado, y luego calibrado con los procedimientos anteriores.
- h. La temperatura del equipo y del palpador deben ser las del medio ambiente de trabajo.

### **6.3.44. VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DEL EQUIPO.**

La calibración del ultrasonido debe ser verificada en esta secuencia:

- Al inicio de cada inspección.
- Cada 25 tubos.
- Cuando se encuentre un bajo espesor de pared.
- Cada vez que se cambie de palpador o cable.
- Cuando se cambie de corriente directa (batería) a corriente alterna o viceversa.
- Cuando se cambie de operador.
- Cada vez que se cambie de diámetro y peso de la tubería a inspeccionar.
- Cuando se sospeche de un mal funcionamiento o anomalía del sistema de inspección.
- Al final de cada inspección.

### **6.3.45. PREPARACIÓN DE LA TUBERÍA PARA LAS MEDICIONES ULTRASÓNICAS.**

Todas las zonas a efectuarse las lecturas de ultrasonido deberán estar libres de toda suciedad, pintura, cascarilla, óxido y de cualquier material extraño en la superficie del tubo. Este proceso debe hacerse con una pulidora, con el fin de que la superficie externa esté limpia para la aplicación del acoplante y para que el palpador tenga un contacto sin ningún tipo de interferencia que pueda afectar la transmisión del sonido en la pieza, o que cause errores en la interpretación y evaluación de las indicaciones.

### **6.3.46. PROCEDIMIENTO PARA LAS LECTURAS CON ULTRASONIDO.**

- a. Escoger un punto para medir el espesor de pared. Las lecturas deben tomarse en el centro del tubo, a 3 pies del pin y del box, y en aquellas zonas donde se encontraron variaciones de diámetro con el O.D GAUGE y con la inspección electromagnética.
- b. Aplicar acoplante apropiado en el área a ser medida. Este acoplante será el mismo que se usó en la calibración del equipo y no debe dañar al material del tubo.
- c. Una vez aplicado el acoplante, se medirán los espesores de pared siguiendo la circunferencia del tubo, presionando el palpador firmemente a la superficie. La línea divisora del palpador (transducer dual) estará siempre perpendicular al eje longitudinal de la tubería para obtener una lectura más exacta.
- d. Permitir que la lectura se estabilice, luego comparar la lectura con el mínimo espesor de pared permitido. Una lectura estable es una que mantiene el mismo valor ( $\pm 0.001$  pulg) en por lo menos cada tres segundos.
- e. Recorrer el cuerpo del tubo midiendo el espesor de pared, con una velocidad de desplazamiento del palpador no superior a 150 mm/s (6 pulg./seg).

## CAPÍTULO 6. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

- f. Si una lectura es hecha clasificando al tubo como un rechazo, limpiar las superficies que cubren al tubo, raspar las escamas sueltas de la superficie, alisar la superficie, y rechequear la exactitud del medidor en el bloque de ensayo. No remover el metal base.
- g. Rechequear el espesor de la pared del tubo para confirmar o verificar algún aumento y/o disminución de pared cercana a la lectura encontrada.
- h. Si las lecturas son menos que las permitidas, inmediatamente bosquejar el sitio con pintura roja.
- i. Cuando es para evaluación de imperfecciones interiores, previamente bosquejar los pasos usados excepto que el palpador es movido de atrás para adelante sobre el tubo como una forma para examinar, buscando el espesor de pared delgado.
- j. Cuando se usa un medidor de alta sensibilidad, se debe tener cuidado para asegurar que la detección de una inclusión o laminación no sea interpretada como una medida del espesor de pared.

### **6.3.47. CRITERIO DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO.**

El tubo es aceptado si el espesor de pared es mayor o igual al espesor de pared especificado. El tubo es rechazado si el espesor de pared es menor al espesor de pared especificado. Si hubiere disputa la norma API Spec. 5D aconseja medir con calibrador mecánico.

Todos los tubos que tengan remanentes de espesores de pared menores al 80% de la pared nominal serán clasificados como clase 2 y serán identificados con una banda de pintura amarilla en el cuerpo del tubo a 3 pies del extremo del pin, los espesores remanentes de pared menores al 70% de la pared nominal serán clasificados como clase III, y serán identificados con una banda de pintura naranja a 3 pies del extremo del pin.

**CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE CÓDIGOS, NORMAS Y PROCEDIMIENTOS GENERALES  
UTILIZADOS EN TRABAJOS DE INSPECCIÓN DE TUBERÍA DE PERFORACIÓN**

**CAPÍTULO 7**

**ANÁLISIS DE CÓDIGOS, NORMAS Y PROCEDIMIENTOS GENERALES  
UTILIZADOS EN TRABAJOS DE INSPECCIÓN DE TUBERÍA DE PERFORACIÓN**

## **7.1. GENERALIDADES.**

### **7.1.1. DEFINICIONES.**

Norma.- Es un documento establecido por consenso y aprobado por un organismo reconocido que establece, para usos comunes y repetidos, reglas, criterios o características para las actividades o sus resultados, procurando obtener un nivel óptimo de ordenamiento en un determinado contexto.

Códigos.- Código es “un cuerpo de leyes, de una nación, ciudad, etc., arreglado sistemáticamente para fácil referencia. Cuando una estructura, es construida dentro de la jurisdicción de una ciudad o país, ésta, a menudo cumple con ciertos códigos de construcción.

Dado que los códigos consisten de leyes, tienen un status legal, por lo tanto son de carácter mandatorio. En términos generales, los trabajos deben realizarse de acuerdo a algún código.

Estándares.- Un estándar es tratado como un documento separado, sin embargo, el término estándar, aplica también a numerosos tipos de documentos, incluyendo códigos y especificaciones.

Algunos estándares, son considerados mandatorios, esto significa que la información, es un requerimiento absoluto.

Existen también, numerosos estándares, que proveen importante información, pero no son considerados mandatorios, un ejemplo de éstos, son las prácticas recomendadas.

Un estándar, es el resultado de una votación elaborada y procedimientos de revisión y son realizados de acuerdo a las reglas establecidas por la American National Standard Institute (ANSI).

Especificaciones.- La especificación, es una descripción detallada o listado de atributos requeridos en alguna operación, no únicamente están listados los requerimientos, usualmente, contempla la descripción de cómo deben ser

## CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE CÓDIGOS, NORMAS Y PROCEDIMIENTOS GENERALES UTILIZADOS EN TRABAJOS DE INSPECCIÓN DE TUBERÍA DE PERFORACIÓN

cuantificados.

De acuerdo a necesidades específicas, aparecen en diferentes formas que describen requerimientos específicos.

A menudo, las Compañías, desarrollan sus propias especificaciones, las cuales describen los atributos necesarios en un material o un proceso usado en las operaciones de fabricación.

Una especificación, puede ser para uso exclusivo de la Compañía, sin embargo, el interés común de algunas industrias, ha hecho que se unan esfuerzos, para desarrollar especificaciones comunes a éste grupo en particular.

La Organización Internacional para Estandarización (ISO), ha establecido estándares y especificaciones para el comercio internacional y el intercambio de servicios.

Normalización.- De acuerdo con la ISO la normalización es la actividad que tiene por objeto establecer, ante problemas reales o potenciales, disposiciones destinadas a usos comunes y repetidos, con el fin de obtener un nivel de ordenamiento óptimo en un contexto dado, que puede ser tecnológico, político o económico.

La normalización implica la participación de personas que representan a distintas organizaciones de los tres sectores involucrados: productores, consumidores e intereses generales. Estos representantes aportan su experiencia y sus conocimientos para establecer soluciones a problemas reales o potenciales.

La normalización persigue fundamentalmente tres objetivos:

- Simplificación: Se trata de reducir los modelos quedándose únicamente con los más necesarios.
- Unificación: Para permitir la intercambiabilidad a nivel internacional.
- Especificación: Se persigue evitar errores de identificación creando un lenguaje claro y preciso

### 7.1.2. CLASIFICACIÓN DE LAS NORMAS.

El presente esquema representa una clasificación general de las normas

I. Por el ámbito de aplicación:

1. Nacional

a. Normas para el sector industrial.

b. Normas para la empresa.

c. Normas para organismos nacionales.

2. Internacional

II. Por el contenido:

1. Científico

a. Definiciones de magnitudes, unidades y símbolos.

b. Designaciones de la simbología matemática.

c. Designaciones de notaciones científicas.

2. Industrial

a. Normas de calidad: Definen las características de un producto o proceso.

b. Normas dimensionales: Definen las dimensiones, tolerancias, formas, etc. de un producto.

c. Normas orgánicas: Afectan a aspectos generales (color de las pinturas, dibujos, acotaciones, etc.).

d. Normas de trabajo: Ordenan los procesos productivos.

III. Por la forma de aplicación:

## CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE CÓDIGOS, NORMAS Y PROCEDIMIENTOS GENERALES UTILIZADOS EN TRABAJOS DE INSPECCIÓN DE TUBERÍA DE PERFORACIÓN

1. Obligatorias
2. Voluntarias

### **7.2. NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES.**

Son los países con gran desarrollo a nivel mundial, los que han visto la necesidad de regular y unificar las actividades de la gran cantidad de sectores que conforman la industria, razón por la cual han conformado un gran número de organismos e instituciones encargados de editar normas técnicas para dicha regulación.

Estas organizaciones tienen conformadas internamente Comités Técnicos permanentes, con profesionales altamente calificados y de gran experiencia en la temática a tratarse, los mismos que se encargan de editar las normas técnicas que regulan el sin número de procedimientos industriales.

A continuación se cita algunos de los organismos e instituciones que dictan normas técnicas, y además se describe brevemente el perfil de algunas de estas, especialmente de los organismos que se relacionan directamente con el presente estudio.

ISO. International Organization for Standardization. (Organización Internacional de Normalización)

ASTM. American Society for Testing and Materials. (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales)

API. American Petroleum Institute. (Instituto Americano de Petróleos)

AWS. American Welding Society. (Sociedad Americana para Soldadura)

ASNT. American Society for Nondestructive Testing, Inc. (Sociedad Americana para Ensayos no Destructivos)



## CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE CÓDIGOS, NORMAS Y PROCEDIMIENTOS GENERALES UTILIZADOS EN TRABAJOS DE INSPECCIÓN DE TUBERÍA DE PERFORACIÓN

ASME. American Society of Mechanical Engineers. (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos)

ANSI. American National Standards Institute. (Instituto Nacional de Normas Americanas)

### **7.2.1. NORMAS ASTM.**

La Sociedad Americana para Ensayos y Materiales ASTM, es una organización científica y técnica formada para el desarrollo de normas respecto a las características y cualidades de los materiales, productos, sistemas y servicios. La ASTM está entre los mayores contribuyentes técnicos del ISO, y mantiene un sólido liderazgo en la definición de los materiales y métodos de prueba en casi todas las industrias.

En lo que concierne al tema que se está tratando la ASTM provee un amplia gama de normas y guías prácticas concernientes a ensayos no destructivos (END), los cuales incluyen un sin número de estándares, procedimientos y demás referencias que sirven de guía en el desarrollo de este trabajo.

Dentro del gran campo que involucra estas normas cabe recalcar que las de utilidad para este estudio son las siguientes:

- Ultrasonido                    ASTM - E 213
- Líquidos Penetrantes        ASTM - E165
- Partículas magnéticas        ASTM - E 709
- Corrientes Inducidas        ASTM - E 309

### **7.2.2. NORMAS API**

El Instituto Americano de Petróleos, API es una de las principales instituciones encargadas de normar gran parte de lo referente al sector petrolero, sirviendo de guía para un sin número de industrias que de una u otra forma están involucradas en este campo tan amplio.

En lo referente al tema que se está tratando, la API ha desarrollado para

## CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE CÓDIGOS, NORMAS Y PROCEDIMIENTOS GENERALES UTILIZADOS EN TRABAJOS DE INSPECCIÓN DE TUBERÍA DE PERFORACIÓN

elementos tubulares estándares los cuales han sido aceptados a nivel mundial por la industria productora de petróleo. La API define tanto para el elemento tubular como para accesorios y demás elementos, propiedades y estándares en lo referente a: esfuerzos, dimensiones físicas, fórmulas de cálculo, diseño de elementos y procedimientos que incluyen el control de calidad de los elementos.

Además de estos estándares, esta organización provee de boletines recomendando el mínimo desempeño de las propiedades, las cuales son empleadas para el diseño y control de la sarta de tubos, de tal manera que se minimice la posibilidad de falla.

Las normas API de utilidad para el presente estudio se analizan brevemente más adelante, dichas normas son las que se describen a continuación:

### **API SPEC 5D.**

“Especificación para Tubería de Perforación” (Specification for Drill Pipe)

### **API SPEC 5CT.**

”Especificación para Tubería de Revestimiento y Tubería Producción”

(Specification for Casing and Tubing)

### **API RP 5A5**

“Práctica Recomendada para Inspección de Campo para Tubería Nueva de Producción, Revestimiento y Perforación” (Recommended Practice for Field Inspection of New Casing, Tubing and Plain-End Drill Pipe)

### **API RP 7G**

“Práctica Recomendada para el Diseño y Límites de Operación de la Sarta de Perforación” (Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits)

## **API RP 5B1**

“Práctica Recomendada para la Calibración e Inspección de Roscas en Tuberías de Revestimiento, Producción y Tubería de Línea” (Recommended Practice for Gauging and Inspection of Casing, Tubing, and Line Pipe Threads).

### **7.2.3. NORMAS ASNT.**

La Sociedad Americana para Ensayos no Destructivos (ASNT) es una organización abierta para cualquiera persona interesada en el campo de los ensayos no destructivos END. Dentro de los objetivos que persigue la ASNT se pueden citar los siguientes:

- Proveer mediante foros el intercambio de la información técnica de END.
- Proporcionar materiales educativos y programas referentes a los END.
- Brindar capacitación, normas y servicio de calificación y certificación del personal que labora en END.
- Promover la disciplina de los END como una profesión.
- Facilitar y promover la investigación y aplicación de la tecnología de END.

En el estudio que se está desarrollando se hace referencia a inspectores calificados y certificados, dicha certificación es otorgada por la ASNT, razón por la cual se ha tomado en cuenta a este organismo internacional.

### **7.3. NORMAS DE INSPECCIÓN EN END.**

Con el fin de que el usuario cuente con un conjunto de referencias que respalden el desarrollo de las labores de inspección de los diferentes equipos, mediante los métodos de inspección visual, partículas magnetizables, ultrasonido; se han recopilado normas, especificaciones y recomendaciones, relacionados con estos métodos y que más utilidad tienen en nuestro medio.

Toda norma de aplicación a una inspección o un control mediante END debe contener la siguiente información:

## CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE CÓDIGOS, NORMAS Y PROCEDIMIENTOS GENERALES UTILIZADOS EN TRABAJOS DE INSPECCIÓN DE TUBERÍA DE PERFORACIÓN

- Identificación de las características del equipo y/o de los materiales de ensayo a emplear.
- Identificación del procedimiento de ensayo a aplicar.
- Especificación de interpretación de indicaciones obtenidas.
- Especificación de evaluación de las indicaciones, esto es, de los resultados del ensayo.

La identificación de los ensayos y/o materiales, consiste en especificar las características importantes del equipo y/o materiales a emplear en cada uno de los métodos ensayo, de manera que utilizando equipo y/o materiales de procedencias distintos se pueden obtener condiciones de ensayo análogas.

### **7.4. ANÁLISIS DE NORMAS, ESPECIFICACIONES Y RECOMENDACIONES.**

En la industria petrolera específicamente en las áreas de perforación y terminación de pozos se emplea a gran escala elementos tubulares como medio de transporte de los productos obtenidos y utilizados durante los procesos anteriormente indicados, estos elementos presentan características diferentes y su elección depende, a su vez de las especificaciones y condiciones de trabajo como son: temperaturas de operación, presión, profundidad de pozo, diferentes grados de corrosividad y gravedad API, etc..

Los parámetros anteriormente expuestos y además de varios procedimientos de trabajo que influyen de forma importante durante la operación de los pozos se encuentran normalizados y documentados por varios organismos que han impulsado a esta industria, por tal razón es necesario que en éste punto se detalle en forma general lo que tratan dichos documentos, que son editados en normas, códigos, especificaciones técnicas y recomendaciones prácticas que regulan y controlan esta extensa área .

#### **7.4.1. ANÁLISIS DE LA ESPECIFICACIÓN API 5D.**

Esta especificación titulada “Specification for Drill Pipe” (Especificación para

Tubería de Perforación) establece los requisitos necesarios la tubería de perforación.

#### **7.4.2. ANÁLISIS DE LA RECOMENDACIÓN PRÁCTICA API RP 5A5.**

Esta recomendación práctica por el Instituto Americano de Petróleos API tiene como título “Recommended Practice for Field Inspection of New Casing, Tubing and Drill Pipe” (Recomendación Práctica para Inspección de Campo para Tubería Nueva de Producción, Revestimiento y el tubo de perforación.

En esta práctica se incluye procedimientos recomendados para inspección de campo y pruebas del nuevo (OCTG). Para el propósito de este documento el OCTG se define como un grupo de elementos en los que se incluyen: tuberías de producción y revestimiento, nipples de manipulación, coples, conectores, y tuberías de revestimiento y perforación sin sus extremos roscado o uniones. Esta práctica recomendada ha sido preparada para dirigir las prácticas y tecnologías comúnmente usadas en la inspección de campo.

Las prácticas recomendadas dentro de este documento tienen como intención ser una guía de inspección y/o prueba, y nada en esta guía debe ser interpretado como una prohibición para que el inspector o la agencia de inspección utilicen criterios personales, suplementando la inspección con otras técnicas, extendiendo técnicas ya existentes o reinspeccionando detenidamente.

Además en esta práctica se cubre la calificación del personal de inspección, una descripción de métodos de inspección, calibración de aparatos y estandarización de procedimientos para varios métodos de inspección. Están incluidos la evaluación de imperfecciones, y señalamiento del nuevo OCTG inspeccionado.

Este documento debe ser usado como guía aplicable a los métodos de inspección de campo y no debe ser usado como una base de aceptación o rechazo. Aceptación o rechazo del nuevo API OCTG, debe estar basado en conformidad con la especificación API 5CT, la API 5D y la Norma API 5B.

### **7.4.3 ANÁLISIS DE LA RECOMENDACIÓN PRÁCTICA API RP 7 G**

La recomendación práctica de la API esta titulada como: “Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits” (Recomendación Práctica para el Diseño y Límites de Operación de la Sarta de Perforación).

Esta práctica recomendada envuelve no solamente la selección de los elementos de la sarta de perforación; sino también la consideración de todo el ángulo de control del agujero, fluidos de perforación, peso, velocidad de rotación y otros procedimientos operacionales.

Para un mejor manejo de esta práctica la API ha dividido en diferentes secciones las cuales se mencionan a continuación.

En las secciones 4, 5, 6 y 7 proveen procedimientos para el uso en la selección de los componentes de la sarta de perforación. Las secciones 8, 9, 10, 11, 12 y 15 están relacionadas las limitaciones de operación, las cuales pueden reducir la capacidad normal de la sarta de perforación.

La sección 13 contiene un sistema de clasificación para las tuberías de perforación y producción usadas, procedimientos de inspección e identificación para otros elementos de la sarta de perforación. La sección 14 contiene afirmaciones referidas a soldadura en herramientas de perforación.

### **7.4.4. ANÁLISIS DE LA NORMA ASTM E-709.**

Esta norma titulada “Standard Guide for Magnetic Particle Examination” (Norma Guía para Inspección por Partículas Magnéticas), este documento describe técnicas para la inspección utilizando tanto partículas secas como partículas húmedas, el cual es un método de ensayo no destructivo utilizado para la detección de fisuras y otras discontinuidades ubicadas cerca de la superficie en materiales ferromagnéticos, muy útil en el campo del mantenimiento preventivo.

En su contenido se encuentran lo referente a: preparación de procedimientos para la inspección de materiales y partes, describe el uso de varias técnicas para

## CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE CÓDIGOS, NORMAS Y PROCEDIMIENTOS GENERALES UTILIZADOS EN TRABAJOS DE INSPECCIÓN DE TUBERÍA DE PERFORACIÓN

la inspección con partículas magnéticas, el personal y la calificación que debe tener este para desempeñar la inspección, equipos y materiales requeridos para realizar la inspección; además de teoría del campo magnético, tipos de corrientes de magnetización, dirección del campo magnético, aplicación para los campos magnéticos secos y húmedos, desmagnetización, limpieza y post inspección.

Un dato muy importante es que esta guía no indica, sugiere o especifica normas de aceptación y/o rechazo para elementos examinados a través de estas técnicas.

### **7.4.5. ANÁLISIS DE LA RECOMENDACIÓN PRÁCTICA ASNT SNT-TC-1<sup>a</sup>.**

El sistema de certificación en uso hoy en Estados Unidos y la en la mayoría de países está basado en la especificación de la ASNT SNT-TC-1A cuyo título es: "Recommended Practice for Nondestructive Testing" (Práctica Recomendada para Ensayos no Destructivos).

Este documento provee una guía diseñada para asistir al empleador en el desarrollo de su propio procedimiento o práctica escrita. La práctica escrita se convierte entonces en un sistema para entrenar, calificar y certificar al personal de END por cada empleador individualmente.

El documento entonces provee una guía para establecer un programa de calificación y certificación del personal que labora en ensayos no destructivos, tales como:

- Inspección Visual
- Radiografía Industrial
- Ultrasonido
- Líquidos Penetrantes
- Partículas magnéticas
- Corrientes de Eddy

## CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE CÓDIGOS, NORMAS Y PROCEDIMIENTOS GENERALES UTILIZADOS EN TRABAJOS DE INSPECCIÓN DE TUBERÍA DE PERFORACIÓN

- Inspección Electromagnética

Esta norma proporciona gran información en cuanto a los conocimientos necesarios que un inspector que trabaja con ensayos no destructivos debe tener para alcanzar los niveles I, II y III respectivamente. Generalmente las personas interesadas en obtener uno de los tres niveles como inspector, deberán seguir una secuencia, necesaria para que sean calificados y certificados como inspectores de ensayos no destructivos para los métodos anteriormente manifestados.

Se hace énfasis en esta práctica recomendada puesto que un buen número de normas de utilidad para el presente estudio mencionan la necesidad de que el personal que va a trabajar en la inspección con END, sea calificado y certificado; la certificación que en dichas normas exigen se la hace con la ASNT SNT-TC-1A.



# CONCLUSIONES

La inspección en la tubería de perforación juega un papel fundamental antes, durante y después de la perforación petrolera, por esta razón es imprescindible llevar estos métodos de manera apegada a las normatividad existente asegurando que las operaciones sean exitosas. Con base a la información expuesta en este proyecto podemos concluir lo siguiente:

La tubería de perforación debe ser analizada de manera minuciosa tratando de detectar cualquier defecto, daño o discontinuidad generada en el proceso de fabricación y perforación, desde un pequeño poro, fisura o desgaste excesivo en las paredes de las tuberías.

La tubería de perforación se encuentra sometida a múltiples esfuerzos entre los principales encontramos Tensión, Compresión y Colapso, por esta razón se debe de cuidar que la tubería no este afectada mecánicamente.

Existen diversos métodos de inspección destructiva y no destructiva, los cuales no afectan las propiedades mecánicas de la tubería de perforación, se pueden utilizar en diferentes áreas y se seleccionaran según las necesidades del cliente y los costos.

Todas las prácticas y procedimientos de inspección destructiva y no destructiva se deben de realizar siguiendo todas las líneas de seguridad para evitar accidentes y enfermedades laborales dentro del área de trabajo.

El método de inspección destructivo o no destructivo será efectuado solo por personal altamente calificado, certificado y que conozca los criterios de aceptación de un examen.

Los métodos destructivos y no destructivos se encuentran estandarizados nacional e internacionalmente, una vez efectuado se debe de entregar un reporte con todas las observaciones y este dependerá de la compañía que efectuó la inspección.

# BIBLIOGRAFÍA

- . GEORGE E. DIETER: Metalurgia Mecánica, Tercera edición, Editorial McGraw-Hill, Estados Unidos 1986.
- . MC CRAY & COLE; Tecnología de Perforación de Pozos Petroleros; Tercera Edición; Editorial Continental; Oklahoma; 1970.
- . BOURGOYNE ADAM; Applied Drilling Engineering; Society of Petroleum Engineers; Texas; 1991.
- . THIELSH HELMUT; Defectos y Roturas en Recipientes a Presión y Tuberías; Editorial Urmo; Barcelona; 1982.
- . TAPIA LEONARDO; Elaboración de Procedimientos de Inspección Técnica para Tanques de Almacenamiento y Líneas de Flujo de la Industria Petrolera; EPN; Quito; 1994.
- . GALAMBOS, T.; LIN, F. Y JOHNSTON, B. (1999). Diseño de estructuras de acero con LRFD. Naucalpan de Juárez, México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- . POPOV, E. (1996). Introducción a la mecánica de sólidos. México, D.F., México: Editorial Limusa, S.A. de C.V.
- . American Petroleum Institute; API Specification 5D "Specification for Drill Pipe"; Sixteenth Edition; API Publish Service; Washington; 1998.
- . American Petroleum Institute; API Recommended Practice 5A5.
- . "Recommended Practice for Field Inspection of New Casing, Tubing and Plain-End Drill Pipe"; Sixth Edition; API Publish Service; Washington; 1997
- . American Petroleum Institute; API Recommended Practice 7G "Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits"; Sixteenth Edition; API Publish Service; Washington; 1998

# BIBLIOGRAFÍA

- . American Petroleum Institute; API Recommended Practice 5B1 “Recommended Practice for Gauging and Inspection of Casing, Tubing, and Line Pipe Threads”; Fifth Edition; API Publish Service; Washington; 1999
- . NORMA MEXICANA NMX-B-133-1-1988. Métodos de inspección con líquidos penetrantes.
- . NORMA MEXICANA NMX-B-462-1988. Métodos para controlar la cantidad de la prueba radiográfica.
- . ASTM E 94 – 04 Standard Guide for Radiographic Examination.
- . ASTM-E709 Examination Magnetic Particle.
- . ASTM E 165 – 02 Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination.
- . ASTM A 370 Mechanical Testing of Steel Products.