

PROCEDIMIENTOS DE CONTROL Y MANTENIMIENTO PARA TORRES Y MÁSTILES ESTRUCTURALES Y/O TUBULARES

Adriana PERNICH, Sergio PAGANINI, Ricardo ECHEVARRIA y Julio A. VIVAS HOHL
Universidad Nacional del Comahue - Facultad Ingeniería - Dpto. Mecánica Aplicada.



PROCEDIMIENTO DE CONTROL Y MANTENIMIENTO PARA TORRES Y MÁSTILES ESTRUCTURALES Y/O TUBULARES

1.- INTRODUCCIÓN

Un procedimiento actualizado de control de torres y mástiles estructurales y/o tubulares utilizados *in situ* en los procesos del campo de la industria petrolera debe considerar criterios modernos de análisis y monitoreo de materiales, en concordancia con los procedimientos API *recommended practice 8C* (III EDICIÓN 12/97) Y 8B (VI EDICIÓN 12/97).

Por esta razón, y considerando que estas estructuras trabajan en ambientes agresivos, es posible que luego de un período de utilización se encuentren desgastadas por fatiga o corrosión.

Estas estructuras ingenieriles cuentan con características definidas que permiten ser caracterizadas y monitoreadas durante su período de vida útil y admiten ser reparadas de acuerdo a un programa de mantenimiento y control.

Los criterios ingenieriles de monitoreo son:

- 1)- De la carga admisible σ_y
- 2)- De la razón K_{IC}/σ_y "Deformación antes de ruptura"
- 3)- De la razón K_{IC}^2/σ_y "Fisura antes de ruptura"

2.- PROCEDIMIENTO

El procedimiento de control y mantenimiento para torres y mástiles se basa en ensayos metrológicos, dinámicos y no destructivos para controlar permanentemente el estado en que se encuentra cada equipo. Esta información se almacenará en una base de datos de cada equipo, que será simultáneamente "simulado" mediante software estructural. Lo que permitirá llevar el estado de cada equipo mes a mes.

3.- ENSAYOS METROLÓGICOS

Partiendo del segundo criterio es factible establecer si ha habido variaciones en las dimensiones iniciales de la estructura, desde el momento en que fue habilitada.

Realizando periódicamente mediciones de la estructura, se puede observar si ha ocurrido alguna deformación indicativa de inicio de fatiga en el equipo. Estas mediciones se deben realizar al inicio de la habilitación del equipo y ser cargadas a su vez en el software estructural para ser posible el seguimiento del equipo.

Personal preparado para hacerlas, puede realizarlas aunque el equipo esté en operación, de acuerdo al protocolo generado en la periodicidad de las mediciones. Cada seis meses.

4.- ENSAYOS DINÁMICOS PARA EVALUACIÓN DE ESTADO DE DAÑO

El ensayo dinámico de propagación de ondas de compresión y/o de corte es de tipo no destructivo, sensible a cambios en la rigidez y en la masa de la estructura. Esto permite detectar si la estructura esta sufriendo daño estructural.

Estos ensayos, que se realizan periódicamente se comparan con un “ensayo patrón”, que consiste en una señal de respuesta que corresponde al estado en el cual se habilitó la estructura. El patrón puede provenir de un ensayo *in situ* de la estructura cuando es puesta en servicio, ser el resultado de una simulación numérica calibrada a las condiciones reales de la estructura o ambos. El cambio en la frecuencia de respuesta indica que se han producido cambios en la estructura. Esto da lugar a estudios exploratorios para la determinación de las causas de daño, al inicio y cada tres años.

5.- ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos no destructivos a realizar son:

- Líquidos penetrantes
- Ultrasonido
- Rayos x o radiografía

5.1.- Líquidos penetrantes

Este ensayo se debe realizar cada dos años (24 meses), mediante la técnica vía Magnaflux u otra de acuerdo a recomendaciones API (ver anexo II).

5.2.- Ultrasonido

Este ensayo permite decretar fallas locales, cuando hay indicaciones relevantes, permite localizar zonas, soldaduras o nodos dañados. Se recomienda realizar este ensayo entre 48 y 54 meses de habilitada la estructura, de acuerdo a las prácticas API (ver anexo II).

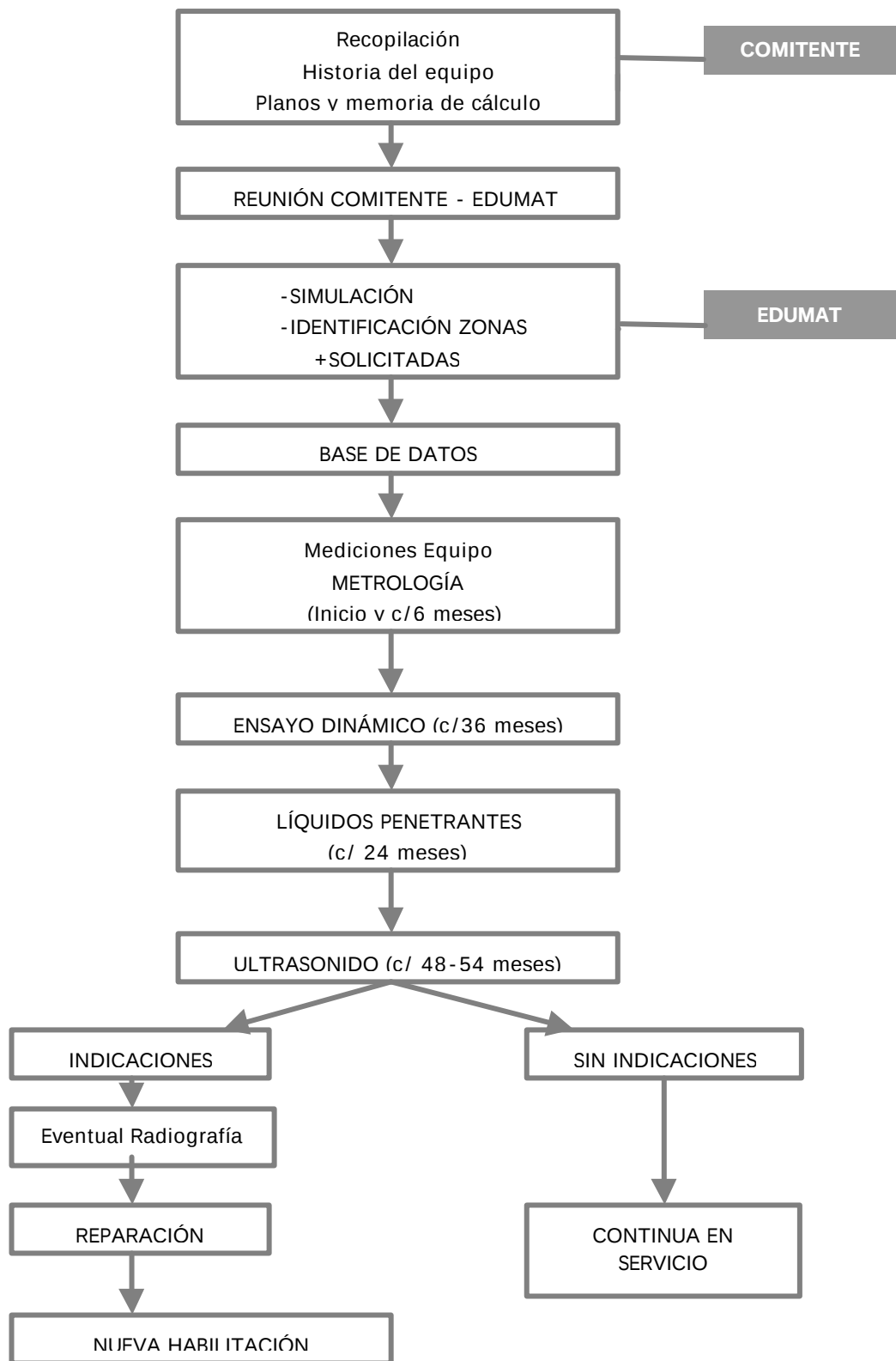
5.3.- Radiografía - Gamagrafía

Este ensayo es adecuado cuando existen dudas sobre indicaciones del ultrasonido y las mediciones metrológicas muestran alguna deformación en la zona de indicación. Permite confirmar y cuantificar el daño. Relevante en caso de responsabilidad compartida o ajena de daño.

En general, se recomienda para casos dilucidatorios. De haber indicaciones de ultrasonido y metrológicas, se recomienda a priori reemplazar la parte comprometida. Sobre todo si el ensayo dinámico está indicando daños.

La aplicación de esta metodología será de acuerdo a las normas API (ver anexo II).

El diagrama de Procedimiento por equipo se puede esquematizar:



6.- BIBLIOGRAFÍA

- 1- Recommended Practice for procedures respectives, Maintenance, Repair and remanufacture of Hoisting equipment- API Recommended practice 8B, 6^{TA} edición, Diciembre 1997 fecha efectiva: Mayo 1998).
- 2- Specification for drilling and Production Hoisting equipment (PSL1 y PSL2) - API Recommended practice 8C, 3^{ra} edición Diciembre 1997 (fecha efectiva: Mayo 1998).
- 3- "Materials in Mechanical Design", M.F. Ashby, Edición 1995, Oxford, Butterworth - Heineman, ISBN 0 7506 2727 1.
- 4- "Taschenbuch der Erdöl - Industrie", M. Merkel, K. Thomas, edición 1994, Leipzig, Fachbuchverlag, ISBN 3-343-00845-1.

TRADUCCIONES

INGLÉS - CASTELLANO

CASTELLANO - INGLÉS

ENZO F. GULLO

ALEMÁN - CASTELLANO

JULIO A. VIVAS HOHL

ANEXO I

1. - ANÁLISIS DE CRITERIOS DE MATERIALES EN ESTRUCTURAS

Como regla general, la resistencia a la fractura de polímeros es menor que la de cerámicos. Todavía los polímeros son ampliamente usados en estructuras de ingeniería, porque los cerámicos son "frágiles" y son tratados con mayor cuidado. La figura 1 ayuda a resolver esta aparente contradicción. Esta nos muestra la dureza de fractura, K_{IC} trazada en función de un nuevo módulo E . Las restricciones descritas anteriormente corresponden a los valores de K_{IC} , cuanto más pequeños son bien definidos; cuanto más grandes solamente son útiles como tabla de selección de materiales.

Considerando primeramente la condición necesaria de fractura. Suficiente trabajo externo debe ser realizado, o energía elástica liberada, para suplir la energía de la superficie (2γ por unidad de área) de las dos nuevas superficies creadas. Lo escribimos como:

$$G \geq 2\gamma$$

En donde G es la cantidad de energía liberada. Usando la relación estándar $K \approx (EG)^{1/2}$ entre G y la intensidad de carga K , obtenemos:

$$K \geq (2 E \gamma)^{1/2}$$

2. - LA RESISTENCIA A LA FRACTURA

La concentración de carga al extremo de la ruptura genera una "*zona de proceso*": una zona plástica en los sólidos dúctiles, una zona de microparticiones en cerámicos, una zona de delaminación decapado y

expulsión de fibras en materiales compuestos. Dentro de la zona de proceso el trabajo es realizado entre el plástico y las fuerzas de fricción; y es esto lo que cuenta en la diferencia entre la energía de fractura medida G_{IC} y la verdadera energía de la superficie 2γ . La cantidad de energía disipada debe ser gradualmente aproximada con la resistencia del material, con la zona de proceso y con su tamaño d_y . Este tamaño se obtiene igualando el campo de carga de la ruptura ($\sigma = K / (2\pi r)^{1/2}$), donde $r = d_y/2$ a la resistencia del material σ_f lo que nos da:

$$d_y = \frac{K_{IC}^2}{\pi \sigma_f^2}$$

Figura 2 - Resistencia a la fractura en función de resistencia - muestra que el tamaño de la zona d_y (líneas de ruptura) varía enormemente, desde dimensiones atómicas para los frágiles cerámicos y vidrios hasta casi un metro para el más dúctil de los metales. En un tamaño de zona constante, la resistencia a la fractura tiende a incrementarse con la resistencia (como se espera), esto es lo que causa que los datos trazados en la figura 2 se agrupen alrededor de la diagonal del gráfico.

El diagrama tiene aplicación en la selección de materiales para un diseño seguro de estructuras de soporte de cargas.

3.- CRITERIO DE RESISTENCIA A LA FRACTURA

Resistencia a la fractura, K_{IC} , en función de la resistencia σ_f .

El gráfico de diseño seguro en función de fractura. El contorno muestra el diámetro de la zona de proceso dada aproximadamente por $K_{IC}^2 / \pi \sigma_f^2$. Las clasificaciones de "resistencia" dadas por los gráficos 2 y 4 se aplican también aquí. El gráfico guía la selección de materiales encontrándose en él los criterios de diseño de rendimiento antes de ruptura y filtración antes de ruptura; la determinación de los tamaños de zonas plásticas o de proceso y en el diseño de muestras para pruebas válidas de resistencia a la

fractura. Las líneas guía muestran los lugares geométricos de los puntos para los cuales:

$$(a) \quad K_{IC} / \sigma_f = \mathbf{C} \text{ (deformación antes de fractura)}$$

$$(b) \quad K_{IC}^2 / \sigma_f = \mathbf{C} \text{ (fisura antes de ruptura)}$$

El valor de la constante $\mathbf{C}$ se incrementa a medida que las líneas se desplazan hacia arriba y hacia la izquierda.

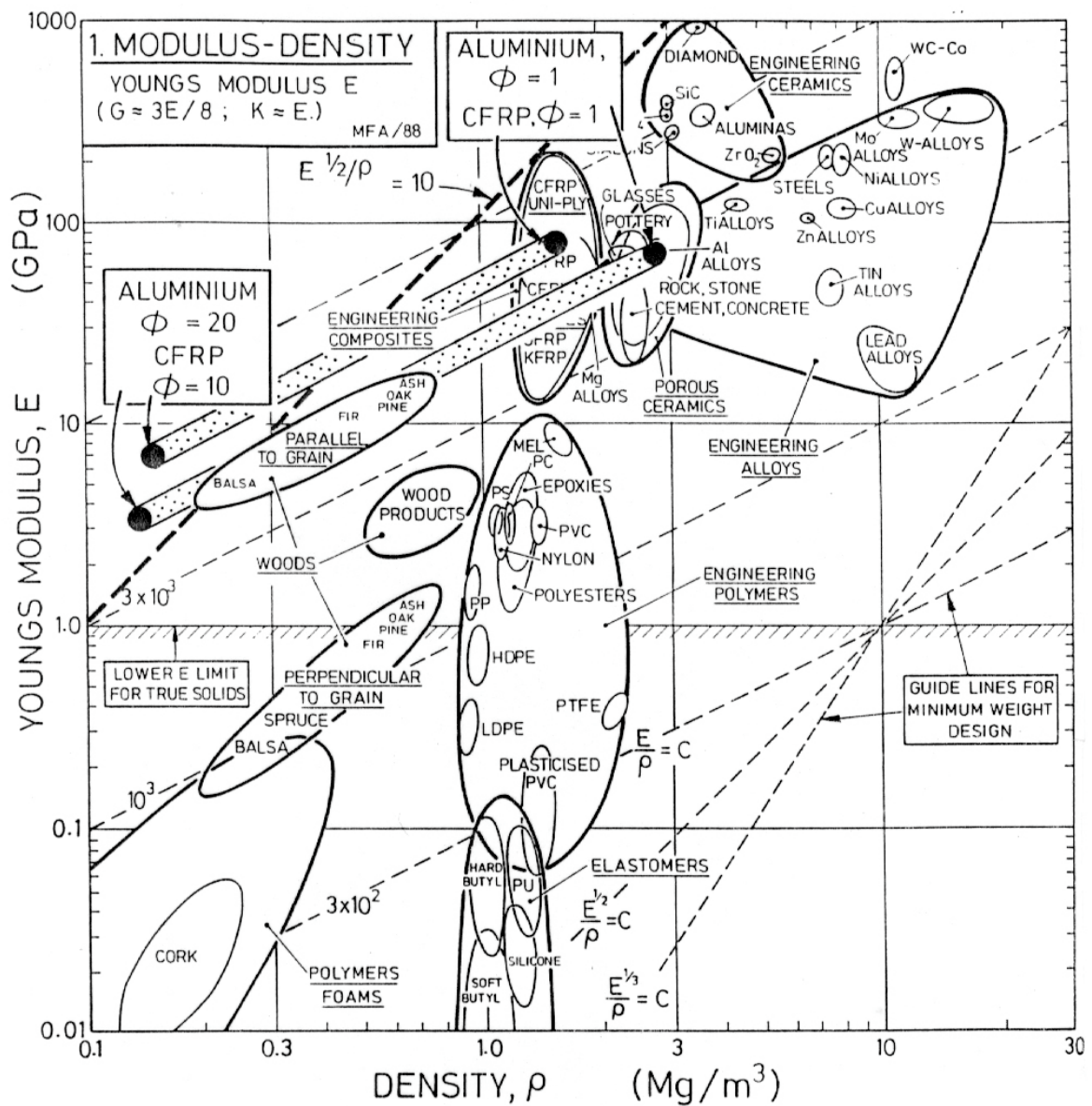


FIGURA 2

Criterio de relación peso/módulo para perfiles y estructurales con distintos parámetros de forma geométrica.

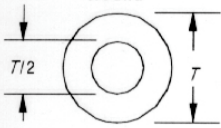
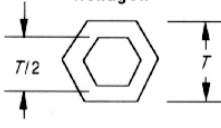
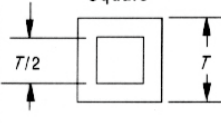
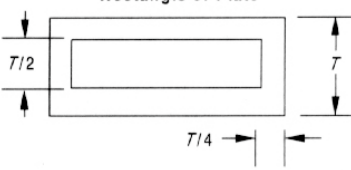
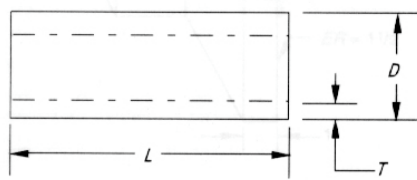
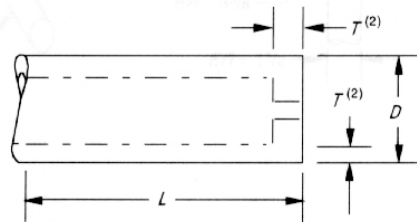
SOLIDS, LENGTH L			
 Round $ER^{(1)} = T$	 Hexagon $ER = 1.1 T$	 Square $ER = 1.25 T$	 Rectangle or Plate $ER = 1.5 T$
When L is Less Than T, Consider Section as a Plate of L Thickness			
TUBE (ANY SECTION)			
Open Both Ends  $ER = 2 T$ Note: When L is Less than D, Consider as a Plate of T Thickness when L is Less than T, Consider Section as a Plate of L Thickness.	Restricted or Closed at One or Both Ends  $ER = 2.5 T$ When D is Less than 2.5 in. (63.5 mm) $ER = 2.5 T$ When D is Greater than 2.5 in. (63.5 mm)		

FIGURA 5

Consideraciones de los parámetros de forma en tubo de cualquier sección de acuerdo a API specification 8C

ANEXO II

1- TUBULARS - TUBULARES (7.9.4 recommended practice 8C)

La soldadura para reparar elementos tubulares forjados no está permitida.

2- MEASURING AND TEST EQUIPMENT- MEDICIONES Y PRUEBA DE EQUIPOS (8.3 API recommended practice 8C)

El equipamiento usado para inspeccionar probar o examinar materiales u otro equipamiento deberá ser identificado controlado calibrado y ajustado en intervalos específicos de acuerdo con las instrucciones documentadas del fabricante, y concordar con una reconocida industria estándar (ej. MIL Std 120, BS 5781) para mantener el nivel de exactitud y precisión.

3- RADIOGRAPHY - RADIOGRAFÍA (8.4.7.3.1 recommended practice 8C)

Los criterios de aceptación de los exámenes radiográficos están basados en el código de referencia estándar de radiografía de las normas ASTM E445, ASTM A186, o ASTM E280, dependiendo del espesor de la pared examinada.

En todos los casos rupturas desgarramientos por calor e insertos (defectos de tipo D, E, y F, respectivamente) no están permitidos.

Los tipos de indicaciones restantes, mostrados en las Radiografías de Referencia, deberán unirse al "Nivel de exactitud 2" en todas las áreas críticas y al "Nivel de exactitud 3" en las áreas no críticas. Si las áreas críticas no son identificadas en los gráficos de éstas, todas las áreas de la superficie del componente serán consideradas como críticas.

En las áreas de componentes en las que la carga es compresiva, y/o donde el nivel de carga es menor al valor de σ_e las cargas menores estarán exentas del examen volumétrico.

4- ULTRASONIC EXAMINATION - EXAMEN DE ULTRASONIDO (8.4.7.3.2 recommended practice 8C)

Los criterios de aceptación para los dos exámenes de ultrasonido de fundiciones, de rayo recto y de rayo angular, están basados en la norma SA-609 en el código ASME artículo 23, sección V, subsección B.

Los requerimientos son:

- a- Para PSL 1: Nivel de calidad 3.
- b- Para PSL 2: Nivel de calidad 1: para espesores de piezas fundidas de hasta 2 pulgadas (50 milímetros);

Nivel de calidad 2: para espesores de piezas fundidas desde 2 a 4 pulgadas (50 a 100 milímetros);

Nivel de calidad 3: para espesores de piezas fundidas mayores a 4 pulgadas (mayores a 100 milímetros)

Además, deberán aplicarse las siguientes condiciones:

- a- Sin considerar la selección de espesor, el Nivel de calidad 1 debe aplicarse dentro de las 2 pulgadas (50 milímetros) de la superficie de selección.
- b- Las discontinuidades indicadas para obtener un cambio de profundidad de 1 pulgada (25 milímetros) o de la mitad de su espesor, por menores que sean, no están permitidas.

5- ENSAYO NO DESTRUCTIVO (END) DE SOLDADURAS

Cuando se requiere un examen las variables esenciales de soldadura y equipamiento deben monitorearse y los conjuntos de piezas soldadas (incluyendo un mínimo de 1/2 pulgada de material de base circundante) y la soldadura íntegra accesible, serán examinados de acuerdo con los correspondientes métodos y criterios de aceptación de esta sección.

El END requerido en esta sección debe ser extraído después del tratamiento de calor final.

6- SURFACE NDE - END (Ensayo No Destructivo) de SUPERFICIE (8.4.8.2.2 recommended practice 8C)

Todos los soportes y soldaduras de contenedores de presión cargados directamente, así como soldaduras de fijación de soportes de carga primaria y de componentes contenedores de presión, serán examinadas de acuerdo a los procedimientos.

Se aplicarán los siguientes criterios de aceptación:

- a- Indicación lineal no relevante.
- b- Indicaciones no circulares mayores que 1/8 pulgadas (3 milímetros) para soldaduras cuya profundidad sea de 5/8 pulgadas (16 milímetros) o menor; ó 3/16 pulgadas (4.8 milímetros) para soldaduras cuya profundidad sea mayor que 5/8 pulgadas (16 milímetros).
- c- No mas de tres indicaciones relevantes en una línea separada por menos de 1/16 pulgadas (1.6 milímetros) entre bordes.

7- VOLUMETRIC NDE - END VOLUMÉTRICO 8.4.8.2.3

Los soportes primarios de carga y soldaduras de contención de presión serán examinados por los dos métodos, ultrasonido y radiografía de acuerdo con el código de normas ASME, artículos 2 y 5, sección V, subsección A, respectivamente.

Para PSL 1, se aplica solamente para soldaduras de penetración total.

Para PSL 2, se aplica a todas las soldaduras.

Los criterios de aceptación deben estar de acuerdo con los requerimientos del Código ASME, sección VIII, División I, UW-51, apéndice 12.

Tabla 1- INSPECCIÓN PERIÓDICA Y CATEGORÍAS DE MANTENIMIENTO Y FRECUENCIA (API RECOMMENDED PRACTICE 8B)

Equipamiento	Diario	Semanal	Mensual	Semestral	Anual	otra frecuencia
Guinche (además del guinche de succión)	I	II		III		IV (5 años)
Plataformas portátiles de guinche, plataforma para adaptador del guinche roldanas y cojinetes de la plataforma de la corona	I	II		III		IV (5 años)
Conectores y adaptadores de unión	I	II		III		IV (5años)
Guinche de succión	I	II		III	IV	
Acoples de elevador	I			III	IV	

Cubiertas, tuberías, tubo de taladro y elevadores de collar de taladro	II			III	IV	
Elevadores de guinche de succión.	II			III	IV	
Adaptadores de soporte de pivote.	I	II		III	IV	
Alacranes giratorios	I	II		III		IV (5 años)
Alacranes de fuerza	I	II		III		IV (5 años)
Subestación de fuerza	I	II		III		IV (5 años)
Arañas capaces de ser usadas como elevadores	II			III	IV	
Sujetadores de fin de línea / línea de cableado del anclaje	I	II		III		IV (5 años)
Compensadores de movimiento de cuerda del perforador	II			III		IV (5 años)
Tubería de elevación y herramientas de fuente corriente, capaces de ser usadas como equipo elevador de polea.	II			III	IV	
Abrazaderas de seguridad Capaces de ser usados como equipamiento para elevación.	I	II		III	IV	

ANEXO III

INFLUENCIA DE LA FORMA / GEOMETRÍA

1- Introducción y sinopsis

2- Factores de forma

1.- ASPECTOS GENERALES

Esta sección extiende el concepto de los índices de rendimiento para incluir forma (fig. 1). La importancia de las ideas aquí expresadas recae en la conexión entre la selección de materiales y los diseños mecánicos. Cuando dos materiales se encuentran con diferente parámetro de forma en el diseño importa realmente la forma (p.ej. una viga en flexión) el problema más notable aparece:

-¿ Cómo elegir entre tan vasto rango de materiales y de parámetros de forma? Entre cuales se encuentran, o pueden potencialmente estar hechos, para maximizar el rendimiento. Tomando el ejemplo de una bicicleta, la mayor parte de su cuadro está en flexión. Si este fuera de madera, liviano y rígido, no sería tan resistente como uno hecho de un tubo de metal. La eficiencia mecánica es frecuentemente obtenida combinando la forma con el material. ¿Cuál es la mejor combinación material-forma en una determinada aplicación?

La respuesta a estas preguntas se encuentra en el procedimiento que nos conduce a los índices de rendimiento, que están relacionados con los que ahora incluyen la forma. Cuando la forma es constante, los índices se reducen exactamente hasta los índices de rendimiento, pero cuando la forma es una variable un nuevo término (el factor de forma) aparece en la fórmula para los índices.

La carga en un componente es generalmente axial, de flexión o de torsión. Los tirantes llevan cargas axiales, las vigas tienen asociados momentos flectores, los ejes van asociados a torques y las columnas traen cargas axiales compresivas. La figura 2 nos muestra estos modelos de carga, aplicados a formas que los resisten perfectamente. Lo que hace que

la mejor combinación material-forma dependa del modo de carga. A continuación se detallan cada uno de los modos por separado.

En el esfuerzo axial el área de sección transversal es importante pero no su forma, todas las secciones con el mismo área soportarán la misma carga. No así en la flexión, las vigas que sostienen cajas o tramos de viga "I" son mejores que los tramos de vigas sólidas de la misma sección transversal de área. La torsión también tiene sus mejores formas, los tubos circulares, por ejemplo, son mejores que los tramos de viga "I" o los tramos de viga maciza. Es por esto que, definimos un factor de forma (ϕ) para cada modo de carga. Un factor de forma es dimensionable, depende de la forma pero no de la escala y mide la eficiencia estructural de la sección. Los factores de forma son definidos y tabulados en tabla 3.

Aquí se indica el procedimiento para la selección del mejor material cuando la forma no es una variable. Para cada modo de carga se identifican una combinación limitante de rendimiento de las propiedades del material o "índice de rendimiento". El rendimiento se maximiza realizando que esta combinación sea lo más grande posible. Para una viga liviana y rígida la combinación $E^{1/2} = \rho$ (donde "E" es el módulo de Young y "p" es la densidad del material) se transforma en $(E \phi)^{1/2} / \rho$ cuando la forma descrita por ϕ es una variable. Los índices para vigas livianas y fuertes y para columnas y ejes son modificados de una forma similar; y también son aquellos para disminuir peso o aumentar el almacenamiento de energía elástica.

Los resultados importantes son resumidos en la sección final. Las siguientes secciones definen los factores de forma y los índices de rendimiento que estos que contienen. Las secciones restantes introducen la idea de forma microscópica y de su uso.

2- SHAPE FACTORS - FACTORES DE FORMA

Se puede pensar que un material tiene propiedades pero no forma, el componente o la estructura es un material con forma (fig. 3). Un factor de forma es un número dimensionable que caracteriza la eficiencia de una zona de forma, a pesar de la escala, en un modo de carga dado. También

existe un factor de forma ϕ_B^e para flexión elástica de vigas y otro ϕ_T^e para torsión elástica de ejes (e = "elástico"). Estos son los factores de forma apropiados cuando el diseño se basa en la rigidez. Cuando, en cambio se basa en la resistencia (la primera puesta de la flexibilidad plástica o en la fractura). Además se necesitan también dos factores de forma: ϕ_B^f y ϕ_T^f (el superíndice " f " indica falla). Los cuatro factores fueron definidos, entonces son igual a 1 para una barra sólida con una sección transversal circular.

Extensión elástica. La extensión elástica o acortamiento de un tirante o poste bajo una determinada carga (fig. 2 a) dependiendo del área "A" de su sección, pero no de su forma. No se necesita factor de forma.

Flexión y torsión elástica. En la flexión elástica de vigas (fig. 2 b) la forma entra en el segundo momento de área, I, acerca del eje de flexión (x = eje).

$$I_{xx} = \int_{\text{sección}} y^2 dA \quad (1)$$

En donde "y" es medida normal al eje de flexión y donde dA es el elemento diferencial del área en "y". Los valores de "I" y de "A" de secciones comunes se encuentran en la tabla 1. Los valores para formas más complejas, son aproximados pero adecuados para las necesidades aquí planteadas.

El primer factor de forma (para flexión elástica) está dado por:

$$\phi_B^e = \frac{4\pi I}{A^2} \quad (2)$$

Es dimensionable y depende solamente de la forma grande y pequeñas vigas poseen el mismo valor de ϕ_B^e si sus secciones de forma son las mismas (fig. 4). Las tres secciones rectangulares de madera tienen el mismo factor de forma $\phi_B^e = 2$; los tres tramos de viga "I" también tienen el mismo factor de forma $\phi_B^e = 10$. En cada uno de los grupos la escala cambia pero no así la forma. Cada una es una versión aumentada o disminuida de su forma vecina. Los factores de forma ϕ_B^e , para formas comunes, calculadas de la expresión dada por valores de tabla 1, se encuentran en la primer columna de la tabla 2. Las secciones

equidimensionales (círculos, cuadrados, hexágonos, octógonos) todos tienen valores cercanos a 1. Pero si la sección es alargada, hueca, tramo de viga "I", ó coarrugada, los valores cambian: un tubo de pared delgada o una débil viga "I" puede tener un valor $\phi_B^e = 30$ o más. Algunas formas son eficientes en el poco material que se necesita para alcanzar la rigidez de flexión (de bajo peso).

Las formas que resisten bien a la flexión pueden no hacerlo a la torsión. En la torsión elástica de ejes (fig. 2 c), la forma entra en el momento torsor de la sección, K. Para secciones circulares es idéntico que para el momento polar de la sección área, J:

$$J = \int_{\text{sección}} r^2 dA$$

(3)

En donde dA es el elemento diferencial del área a la distancia radial "r" medida desde el centro de la sección. Para las secciones no circulares, "K" es menor que "J" y está definido como la relación entre el ángulo de torsión " θ " y el torque T:

$$\theta = \frac{T l}{K G}$$

En donde "l" es la longitud del eje y "G" el módulo elástico transversal del material que está hecho. Los valores aproximados para "K" se encuentran en la tabla 7.1.

El factor de forma para torsión elástica está dado por:

$$\phi_T^e = \frac{2\pi K}{A^2}$$

(4)

Este valor también es 1 para ejes circulares, y es cercano a 1 para cualquier sólido de sección equidimensional, pero para formas de paredes

delgadas puede ser mayor. Selecciones de valores con el mismo valor de ϕ_T^e , difieren en tamaño pero no en forma. Los valores derivados de las expresiones para "K" y "A" en la tabla 1, se encuentran en la tabla 2.

Falla en flexión y torsión. La plasticidad comienza cuando el esfuerzo, en algún punto, alcanza la resistencia de flexión σ_y la fractura ocurre cuando este esfuerzo excede por primera vez la resistencia a la fractura σ_{fr} . Cada uno de estos constituye una falla. Se usa " σ_f " para denominar el esfuerzo de falla, lo que significa: "El esfuerzo local que primero causa la flexión o fractura". Un factor de forma las cubre a ambas. La falla por pandeo elástico es diferente.

En la flexión, el esfuerzo es mayor en el punto Y_m en la superficie de la viga que está lejos del eje neutro y está dado por:

$$\sigma = \frac{MI}{Y_m} \quad (5)$$

En donde "M" es el momento flector. Por esto, en los problemas de fallas de vigas, la forma entra en el módulo de sección I/Y_m . El factor de forma para falla en flexión ϕ_B^f está definido de forma que a pesar de la apariencia, consiste en aquel factor para la deformación elástica:

$$\phi_B^f = \frac{16\pi I^2}{Y_m^2 A^2} \quad (6)$$

Como los otros factores de forma, éste es dimensionable y además independiente de la escala; su valor para una viga con una sección circular sólida es igual a 1. La tabla 2 indica expresiones para otras formas derivadas de los valores de modulo de sección I/Y_m , que se puede observar en la tabla 1. Las expresiones de ϕ_B^e y ϕ_B^f para la misma forma son de valores similares.

En torsión el problema es más complicado. Para secciones circulares (tubos y cilindros), el esfuerzo de corte τ es el máximo en la superficie exterior, a una distancia radial (r_m) del eje de flexión.

$$\tau = \frac{Tr_m}{J} \quad (7)$$

En donde r_m es el radio externo del tubo y T es el torque. La cantidad J/r_m en torsión tiene las mismas características que I/Y_m en flexión. Para las secciones no circulares cuyos extremos están expuestos a curvarse, el esfuerzo máximo de superficie está dado por:

$$\tau = \frac{T}{Q} \quad (8)$$

En donde Q [m^3] en el lugar de I/Y_m en flexión. Esto permite la definición de un factor de forma σ_T^f para falla en torsión:

$$\sigma_T^f = \frac{4\pi Q^2}{A^3} \quad (9)$$

Los valores de Q y ϕ_T^f se encuentran en las tablas 1 y 2. Para un eje sección circular sólida el valor de ϕ_T^f es igual a 1. Su forma es como la de ϕ_T^e .

La flexión o torsión completa (en la que la resistencia de flexión excede la sección) envuelve también un par de factores de forma. Pero generalmente las formas que resisten el principio de plasticidad eficientemente, son también eficientes en resistir la plasticidad completa. En esta etapa no son necesarios nuevos factores de forma.

Carga axial y pandeo de columnas. Una columna cargada en compresión se flexiona lateralmente (pandeo) cuando la carga excede el valor de carga Euler.

$$F_c = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2}$$

(10)

En donde "n" es una constante que depende de las restricciones finales. La resistencia de pandeo depende de "L", y el factor de forma apropiado (ϕ_B^e) es el mismo que el de flexión elástica (ecuación 2).

Límites para factores de forma. El rango del factor de forma para un material dado es limitado también por restricciones de fabricación o por pandeo local. El acero, por ejemplo, puede ser transformado en tubos de paredes finas o puede transformarse (por laminado, plegado o soldadura) en otras formas eficientes; altos factores de forma, de hasta 30, son comunes.

Cuando las formas eficientes pueden ser fabricadas, el pandeo local o la falla plástica adquiere un límite superior al factor de forma. El máximo factor de forma usado para formas simples está relacionado con el radio del módulo E y con la resistencia de falla σ_f para el material. El máximo valor usado de ϕ_B^e para fundición de aluminio es próximo a 25. Para los polímeros rígidos, los cuales tienen valores de ϕ_B^e menores, el valor es menor (Apróx. 10). Para los elastómeros, el valor es todavía menor (cercano a 3).

Cuando el pandeo local es el modo de falla, el apuntalamiento o soporte pueden suplirlo. Esto permite un mayor incremento en los valores " ϕ " antes de la falla o pueden aparecer nuevos modos localizados o de pandeo. Estos también pueden suplirse por una mayor jerarquía de estructuración. Los

valores de " ϕ " están limitados solamente por las restricciones de fabricación.

Forma, rigidez y resistencia. Los factores de forma están relacionados con la eficiencia de la sección, de forma en resistir la deflexión y falla. Si en una viga de longitud " l " y factor de forma ϕ_B^e el esfuerzo de corte es despreciable, entonces la rigidez de flexión de la viga (una fuerza por unidad de desplazamiento) es:

$$S_B = \frac{C_1 EI}{l^3} \quad (11)$$

En donde C_1 es una constante que depende en los detalles de la carga. La viga de sección circular sólida con la misma longitud " l " y área de sección " A " (peso por unidad de longitud) posee rigidez:

$$S_0 = \frac{C_1 EI_0}{l^3}$$

El radio de ambos parámetros de rigidez (usando $I_0 = \pi r^4 l / 4 = A^2 / 4\pi$) es:

$$S / S_0 = I / I_0 = \frac{\pi r^4 l}{A^3} = \phi_B^e \quad (12)$$

Por esto, ϕ_B^e mide la rigidez obtenida conformando la sección una viga con $\phi_B^e = 9$ es nueve veces más rígida, para el mismo peso, que una de

sección circular sólida. Lo mismo se comprueba cuando la carga es de torsión. Los factores de forma miden el incremento de carga de falla obtenida al conformar la sección. La ocurrencia de pandeo local no ocurre primero. La carga de falla de una viga de longitud " l " y factor de forma ϕ_B^f es:

$$F_f = C_2 \frac{l}{Y_m} \frac{\sigma_f}{l}$$

(13)

En donde C_2 es de nuevo una constante que depende de los detalles de carga. Para una viga de sección circular con la misma longitud " l " y área de sección " A " es:

$$(F_f)_o = C_2 \frac{l_o}{Y_m} \frac{\sigma_f}{l}$$

El radio de las dos resistencias (usando $\frac{l_o}{Y_{mo}} = \frac{\pi r^3}{4} = \frac{A_o^{3/2}}{4\pi^{1/2}}$) es:

$$F_f / F_{fo} = \frac{4\pi^{1/2} l}{A^{3/2}} = \frac{\phi_B^f}{Y_m}$$

(14)

Una viga con $\phi_B^f = 9$ es tres veces más resistente que una con una sección circular. El mismo resultado se obtiene para cargas torsionales.

Pero el objeto aquí no es solo comparar formas sino seleccionar la mejor condición material-forma.

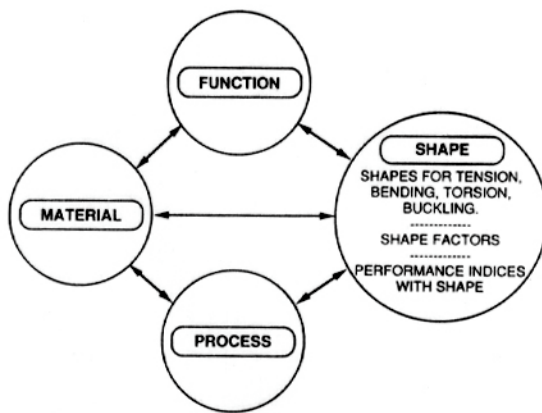


FIGURA 1: Rol de factor de forma en estructuras.

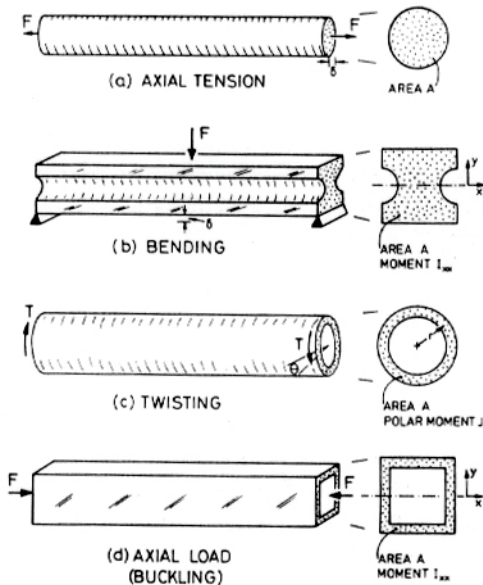


FIGURA 2: Formas de carga:
(a) en estructuras tensión axial, (b) pandeo, (c) torsión y (d) compresión axial.

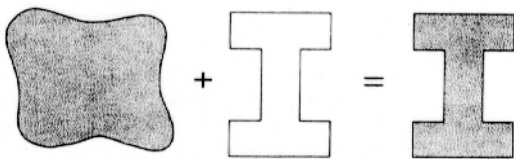


FIGURA 3: La eficiencia Mecánica **se obtiene** de la combinación del material con la forma macroscópica. El factor de forma ϕ es adimensional.

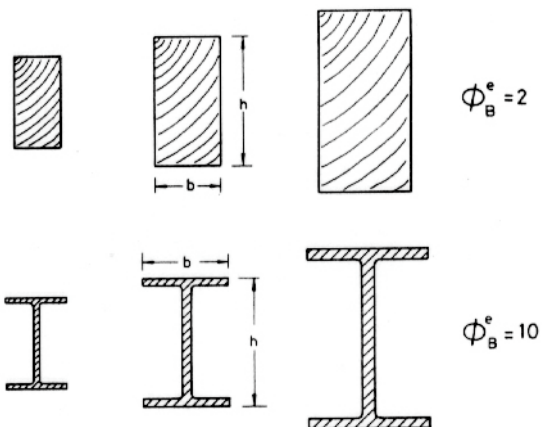


FIGURA 4: Un grupo de secciones rectangulares con $\phi_B^e = 2$ y un grupo de secciones "I" con $\phi_B^e = 10$. Cada grupo puede diferir en tamaño pero no en forma.