



**Facultad de Ingeniería Mecánica
Colectivo de Mecánica Aplicada**

TRABAJO DE DIPLOMA

**Evaluación de la resistencia de los
pernos de anclaje de los gasómetros de
hidrógeno de la Refinería de Petróleo
"Camilo Cienfuegos" y diseño de
estructura rigidizadora para evitar el
vuelco en caso de huracanes**

Autor: Iván Castellanos Castresana

**Tutores: Dr.C. Rafael Antonio Goytisoló Espinosa
Ing. Willian Beltrán Rodríguez**

**Junio 2014
"Año 56 de la Revolución"**

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS



Sistema de Documentación y Proyecto. Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez" como parte de la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Universidad de Cienfuegos para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de la Universidad de Cienfuegos.

Firma del autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico
Nombre y Apellidos. Firma

Vicedecano

Firma del Tutor
Nombre y Apellidos. Firma

Sistema de Documentación y Proyecto
Nombre y Apellido. Firma

Pensamiento

“La confianza en uno mismo es el primer peldaño para ascender por la escalera del éxito”

Ralph Waldo Emerson

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres: a mi papá por lo que me ha ayudado en mi formación como persona y como estudiante y especialmente a mi mamá, Alida Castresana García, quien se encuentra fuera del país, para asegurar que yo disponga de los medios y las condiciones necesarias para terminar mis estudios; quien además ha dedicado su vida y sus sueños a mí, para que yo pueda estudiar una carrera universitaria, de lo que estoy seguro se sentirá muy orgullosa. Gracias Mami y Papi. Los Amo.

Agradecimientos

A mis maestros y profesores que han contribuido con su dedicación a formarme y prepararme como ingeniero; a mis compañeros que han estado junto a mí, en todos los momentos de la carrera; a la Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez" que como institución contribuyó a mi formación, no sólo como ingeniero, sino también como persona; a la revolución y todos los que con su trabajo han hecho posible que yo estudiara una carrera universitaria, sin costo alguno; a mi familia que siempre me dio apoyo y estímulo para realizar estos estudios; y especialmente a Goytisoló y Willian, a quienes no tengo palabras para agradecerles que como tutores de este trabajo, me hayan permitido graduarme como ingeniero y realizar un trabajo útil para el país.

Resumen

El efecto del medioambiente, por las consecuencias negativas de su propia actividad ha adquirido una importancia social, ya que la amenaza es válida, no sólo para la salud humana, sino para la existencia de toda la humanidad. En particular la Refinería de Petróleo ha sido una industria muy golpeada por este fenómeno en diversos equipos y en particular los gasómetros de hidrógeno. En el año 2007 se le realizaron las inspecciones correspondientes a los gasómetros del Título 17, dentro de los aspectos estaba la situación que presentaba la corrosión en un número determinado de sus pernos de anclajes. Esta situación se ha ido agravando desde esa fecha hasta la actualidad, en que la situación de los pernos de anclaje se ha convertido en crítica, pues ya incluso, no se pueden desenroscar para poner unos nuevos pues se parten. En el presente trabajo se evalúan las cargas que provoca un huracán de gran intensidad sobre los gasómetros y el diseño y cálculo de una estructura rigidizadora del conjunto de los ocho gasómetros para evitar su vuelco.

Palabras Claves: Gasómetros, Pernos, Zuncho

Abstract

The effect of environment, due to the negative consequences of its activity, has achieved social importance because the hazard is valid not only to human health, but also to the existence of mankind. Particularly, the Oil Refinery has been an industry quite affected by this phenomenon in various, particularly in the hydrogen's gas meters. In 2007, the corresponding inspections to the gas meters of the Title 17 were carried out, and the corrosion in certain foundation bolts was within the inspected aspects. This situation has worsened since that date until today because the foundation bolts are in critical conditions. They cannot be unscrewed to replace them for new ones because they break. In this project, the charges that cause high-intensity hurricanes are evaluated because those meteorological phenomena worsen the gas meters. The design and calculation of a rigid structure for the set of the eight gas meters are studied to avoid overturns.

Key words: Gas meters, Bolts, Metal hoop

Índice

Introducción	1
Capítulo I Determinación de las cargas producidas por el viento sobre los gasómetros de la Refinería de Petróleo "Camilo Cienfuegos"	5
1.1 Normativas relacionadas con la determinación de las cargas producidas por el viento sobre las construcciones industriales y civiles.....	5
1.3 Consideraciones generales para determinar las cargas del viento.....	6
1.4 Dimensiones, parámetros de trabajo y especificaciones técnicas de los gasómetros	13
1.5 Carga transversal distribuida y momento de vuelco provocadas por el viento.....	14
1.6 Conclusiones Parciales del Capítulo I	17
Capítulo II Evaluación de la resistencia de los pernos de anclaje de los gasómetros en presencia de huracanes	18
2.1 Teoría sobre el cálculo de uniones roscadas pretensadas	18
2.1.1 Uniones pretensadas sometidas a carga axial	18
2.1.2 Uniones pretensadas sometidas a carga transversal.....	25
2.1.3 Cálculo del torque de apriete.....	26
2.2 Cálculo de los tornillos de anclaje.....	27
2.3 Conclusiones Parciales del Capítulo II	29
Capítulo III Diseño y cálculo de la estructura rigidizadora contra el vuelco de los gasómetros	30
3.1 Cálculo de la carga sobre la columna de refuerzo entre dos gasómetros contiguos	30
3.2 Diseño de una columna armada para la estructura rigidizadora	31
3.3 Cálculo del diámetro mínimo necesario efectivo que deberían tener los tornillos corroídos para soportar la carga de tracción que se provoca durante el vuelco de la pareja de gasómetros	35
3.4 Cálculo de Columnas Armadas.....	36
3.5 Cálculo de la columna armada de la estructura rigidizadora de los gasómetros .	43
3.5.1 Comprobación de la resistencia de los perfiles canales	43
3.5.2 Cálculo de la razón de esbeltez de la columna en el eje x.....	44
3.5.3 Comprobación de la soldadura.....	45

3.6	Cálculo del Cable Tensor	45
3.7	Cálculo del zuncho.....	48
3.8	Cantidad de materiales a emplear en la ejecución de la estructura rigizadora	51
3.9	Análisis del Costo de fabricación y montaje de la estructura rigidizadora de los Gasómetros de Hidrógeno de la Refinería de Petróleo "Camilo Cienfuegos"	51
3.10	Conclusiones Parciales del Capítulo III	56
	Conclusiones generales	58
	Recomendaciones	60
	Bibliografía.....	61
	Anexos.....	63
	Anexo 1 Diseño y fotos de los gasómetros en la Refinería de Cienfuegos.	63
	Anexo 2 Tablas	66

Introducción

En el proceso de Reactivación de la Refinería “Camilo Cienfuegos” en el año 2007 se le realizan las inspecciones correspondientes a los gasómetros del Título-17, dentro de los aspectos encontrados en dicha inspección, estaba la situación que presentaban un número determinados de los pernos de anclaje.

Para dar solución a esta problemática se realiza la Recomendación No-286/2007 donde se mandan a fabricar un número determinado de pernos de anclaje para proceder a la sustitución de los mismos. Se planteó la situación que por el modo de fabricación de esos pernos en esta empresa no se podía ejecutar ese trabajo, o sea, que se hacía necesario contratarlo, con Planta Mecánica en Santa Clara. Para minimizar en algo la velocidad de corrosión de los pernos se emitió una recomendación para el tratamiento anticorrosivo de los mismos. En la Figura 1 se muestra la vista de uno de los pernos corroído con la pintura anticorrosiva.

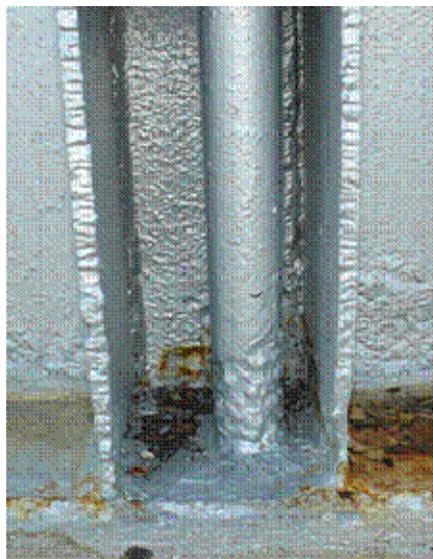


Figura 1 Vista de uno de los pernos de anclaje corroído con la pintura anticorrosiva

Con el paso del tiempo (marzo 2010) la situación de los pernos se ha agravado (Ver fotos Figura 2 a, b, c y d). En trabajo combinado con los compañeros del departamento de piezas de repuesto, se activa nuevamente el proyecto para la fabricación de los pernos e incluso la posible compra de los mismos.

Sería bueno destacar que esta situación no estaba aun totalmente generalizada sino que se encontraba localizada en un área en particular de los gasómetros por lo que técnicamente en esos momentos no pudiera considerarse una situación crítica, pero si una situación de alarma si tenemos en cuenta el equipo del que hablamos y de su contenido.

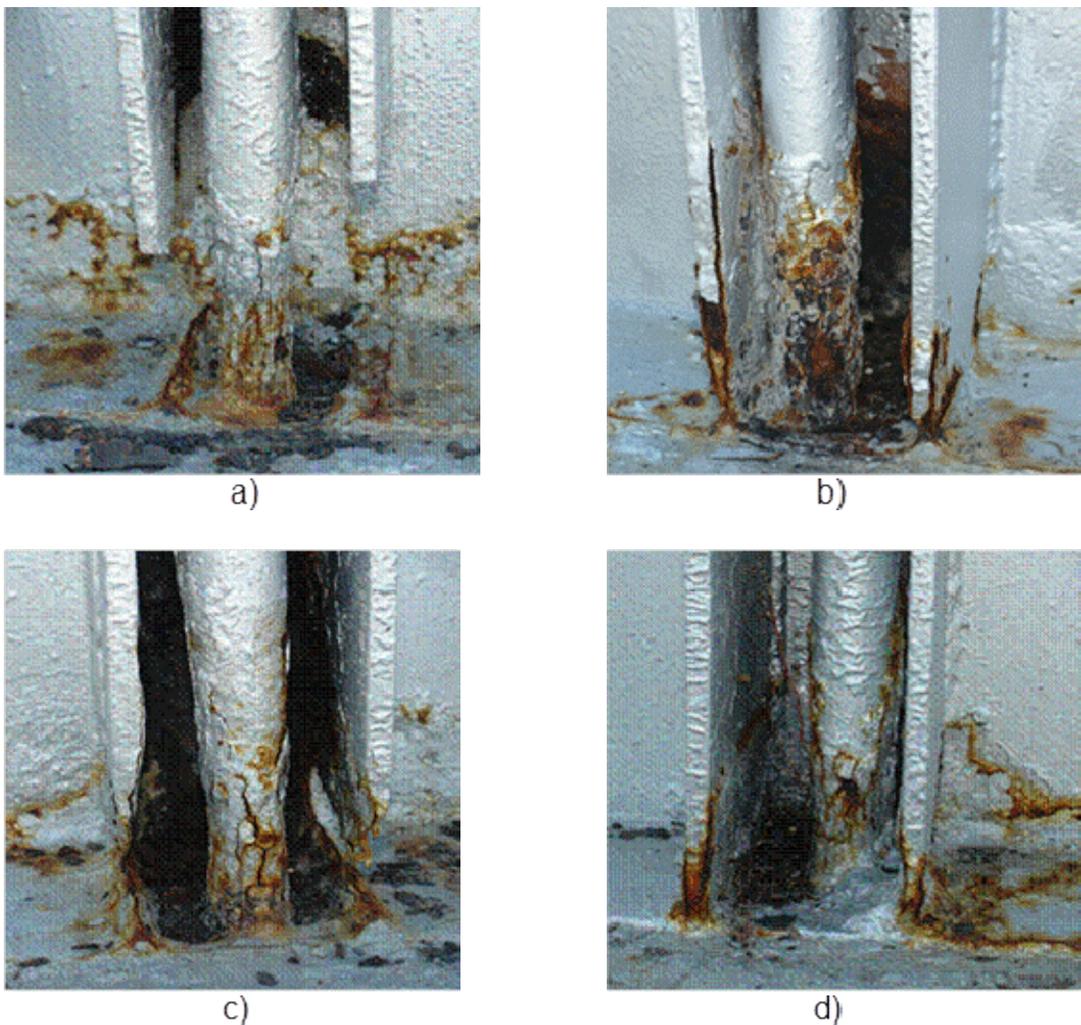


Figura 2 Estado de los pernos que continuaron deteriorándose a pesar del tratamiento anticorrosivo

Dada esta situación y teniendo en cuenta el tiempo que necesariamente hay que esperar a que se fabriquen o se compren dichos pernos, se emitió una nueva recomendación de limpieza y tratamiento anticorrosivo de los mismos, para mitigar la velocidad de corrosión y así evitar que estos se partan cuando sean extraídos para su cambio.

Dando seguimiento a esta problemática y realizando nuevamente una inspección (febrero 2012) a los elementos de sujeción de estos equipos nos encontramos que la situación se va volviendo crítica si partimos que antes era localizada en una zona de los gasómetros y ya en estos momentos esa zona se ha ido ampliando y casi tenemos la situación en todo el diámetro de estos, aunque no en todos es así de crítica. (Ver fotos Figura 3 a, b, c y d).



a)



b)



c)



d)

Figura 3 Pernos de anclaje en estado muy crítico

La **Situación Problemática Actual** es tan crítica que ya los pernos no se pueden extraer para colocar en su posición unos nuevos, pues se parten al extraerlos y por lo tanto se hace necesario diseñar un sistema de protección contra el vuelco de los gasómetros en caso de huracanes.

Esa investigación nunca se ha realizado y por el gran riesgo que existe por tratarse de ocho grandes recipientes, cada uno de ellos que contiene un volumen de 185 m^3 de hidrógeno entonces la situación adquiere una importancia muy singular y ha dado origen precisamente a esta investigación. (Pankratz T.M., 2001)

Ante esta **Situación Problemática** se ha planteado la **Hipótesis** de que es posible rigidizar el conjunto de los ocho gasómetros para de esta manera evitar el vuelco en caso de huracanes.

El **Objetivo General** es evaluar la resistencia mecánica de los pernos de anclaje para poder pronosticar su posible comportamiento en caso de huracanes y diseñar y calcular una estructura rigidizadora que impida el vuelco de los gasómetros.

Se han planteado entonces los siguientes **Objetivos Específicos**:

1. Investigar en las Normas Técnicas Vinculadas la presión provocada por la acción del viento en función de la altura, ya que los gasómetros poseen casi 30 m de altura, en el caso de huracanes de gran intensidad.
2. Obtener la carga transversal distribuida provocada por el viento, que es la carga que trata de provocar el desplazamiento lateral y el momento de vuelco provocado por la misma.
3. Evaluar la resistencia mecánica de los pernos de anclaje en las condiciones iniciales del material y en las condiciones del actual deterioro.
4. Diseñar una estructura rigidizadora que impida el vuelco en caso de huracanes y evaluar su resistencia mecánica.
5. Determinar los materiales necesarios para la estructura rigidizadora y realizar un estimado de los costos de fabricación de la misma.

Capítulo I Determinación de las cargas producidas por el viento sobre los gasómetros de la Refinería de Petróleo "Camilo Cienfuegos".

1.1 Normativas relacionadas con la determinación de las cargas producidas por el viento sobre las construcciones industriales y civiles

La (Norma Cubana 285, 2003), CARGA DE VIENTO. MÉTODO DE CÁLCULO establece el método de cálculo para determinar la carga de viento que debe utilizarse en los cálculos estáticos y dinámicos de los edificios y obras de ingeniería, o de sus partes y elementos, para los cuales el viento resulta ser una sobrecarga de uso. Se aplicará a todas las construcciones terrestres y marítimas, con excepción de edificaciones e instalaciones de forma no usual y no consideradas en la presente norma. Sobre estos Métodos de cálculo Hernández Delgado P. y Blanco Heredia R. dictaron en Cienfuegos una conferencia en el año 2013 (Hernández y Blanco, 2013)

1.2 Referencias normativas

Las siguientes normas contienen disposiciones que, al ser citadas en este texto, constituyen disposiciones de la Norma Cubana 285 del año 2003. Las ediciones indicadas estaban en vigencia en el momento de la publicación de esta Norma y no fueron derogadas. Como toda norma está sujeta a revisión, se recomienda aquellos que realicen acuerdos sobre la base de ellas, que analicen la conveniencia de usar las ediciones más recientes de las normas citadas seguidamente. La Oficina Nacional de Normalización posee la información de las Normas Cubanas en vigencia en todo momento.

- (NC 46: 1999) Construcciones sismo resistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción.
- (NC 120: 2001) Hormigón hidráulico. Especificaciones.

En el caso Objeto de Estudio de esta tesis, no se considera necesario emplearlas.

1.3 Consideraciones generales para determinar las cargas del viento

Dirección del viento

Se supondrá, salvo condiciones excepcionales, que el viento actúa horizontalmente y en cualquier dirección. En el caso de la ciudad de Cienfuegos se considerará la dirección preponderante de los vientos que provienen del sur.

Presión del viento

Cuando se tengan observaciones directas de las velocidades básicas del viento, se podrán calcular las presiones básicas características del viento (en lo adelante “presión básica”) en una superficie normal a su dirección, mediante la fórmula:

$$q_{10} = \frac{V_{10}^2}{1,6 \times 10^3} [kN / m^2] \quad (1.1)$$

Donde:

q_{10} presión básica característica del viento correspondiente a velocidades del aire en terrenos llanos y abiertos a una altura de 10 m sobre el terreno, (kN /m²)

V_{10} velocidad característica del viento para un período básico de recurrencia y a una altura de 10 m sobre el terreno, (m/s), esta se tomará con referencia a la mayor ráfaga de viento registrada en Cuba, 340 km/h = 94.44m/s y a la registrada en huracanes de categoría V, 250 km/h = 69.44m/s.

$1,6 \times 10^3$ factor empírico

Períodos de recurrencia media de las velocidades de los vientos

La velocidad básica del viento se tomará con un período básico de recurrencia de 50 años para todas las estructuras permanentes y que además presenten características normales de sensibilidad al viento, importancia económica y duración.

Coefficiente de recurrencia

Las presiones de base señaladas para la recurrencia de 50 años, serán afectadas por el coeficiente de recurrencia (C_r) que se establecen en la Tabla 1.1, para ser utilizado en períodos de recurrencia de 5 a 100 años.

Tabla 1.1 Coeficientes de recurrencia	
Tiempo de recurrencia Años	Coficiente de recurrencia C_t
100	1,15
50	1,00
25	0,90
10	0,75
5	0,70

Coeficientes dependientes de la ubicación de elementos u obras (región, topografía y altura)

La presión básica sobre una superficie, depende de la ubicación del elemento u obra, de la región y topografía del lugar, así como de la altura sobre el nivel medio del terreno circundante. Por lo tanto, en la presente determinación de la presión básica, se tendrá en cuenta el factor de región o provincia, de topografía o sitio y de altura. Los anteriores factores modificarán la presión básica.

Factor de región o provincia

Las presiones básicas (q_{10}) por provincias o regiones, para una recurrencia de 50 años son:

- Zona I - Que comprende las provincias: Pinar del Río, La Habana, Ciudad de la Habana, Isla de la Juventud, Matanzas, Villa Clara y Cienfuegos.

$q = 1,3 \text{ kN/m}^2 \text{ (130 kgf/m}^2\text{)}$



Figura 1.1 Regionalización según la ubicación de la construcción

Coefficiente de topografía o de sitio

La influencia de caracteres topográficos definidos, permitirá variar la presión mediante el coeficiente de topografía o sitio (C_s) que tendrá valores que se establecen en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 - Coeficientes de sitio	
Topografía	Coefficiente de sitio, C_s
Sitio normal	1,00
Sitio expuesto	1,10

Para elementos y proyectos típicos de uso múltiple y nacional se usará el coeficiente correspondiente a sitio normal; excepto en obras cuya ubicación normal es siempre en sitio expuesto. En el caso de este proyecto se tomará sitio expuesto ya que los cálculos están dirigidos a las condiciones límites de riesgos y realmente los gasómetros están en una pequeña llanura del terreno completamente expuesta.

Categorías de terreno

La influencia que reflejan las grandes variaciones de la rugosidad del terreno que varía según la topografía natural, la vegetación y edificaciones existentes determina las tres categorías de terreno en la cual el edificio o estructura estará ubicado.

- **Terreno Tipo A:** estos serán terrenos abiertos (llanuras, costas, orillas de laguna y represas, etc.). También en terrenos con obstáculos y edificaciones que no superen los 10 m. Se considera costa una distancia hasta 500 metros a partir de la línea del mar.
- **Terreno Tipo B:** estos serán terrenos cubiertos con obstáculos y edificaciones que superen los 10 m. (ciudades, zonas boscosas, etc.). Se considera representativo de este tipo de terreno, cuando las condiciones señaladas se mantengan en una distancia de 500m o más, a partir de la edificación u obra.
- **Terreno Tipo C:** estos serán los centros de grandes ciudades, en los que al menos el 50 % de las edificaciones tengan una altura promedio mayor de 22 m o más. Esta condición debe prevalecer en la dirección analizada, en al menos una distancia de 800 m de construcciones o 10 veces la altura del edificio u obra (el mayor de los dos). Se debe tener en cuenta un posible efecto de túnel o

incremento de la presión, por un aumento de la velocidad del viento debido a que el edificio o estructura se encuentre ubicado en la zona de excitación o influencia de otros edificios o construcciones adyacentes.

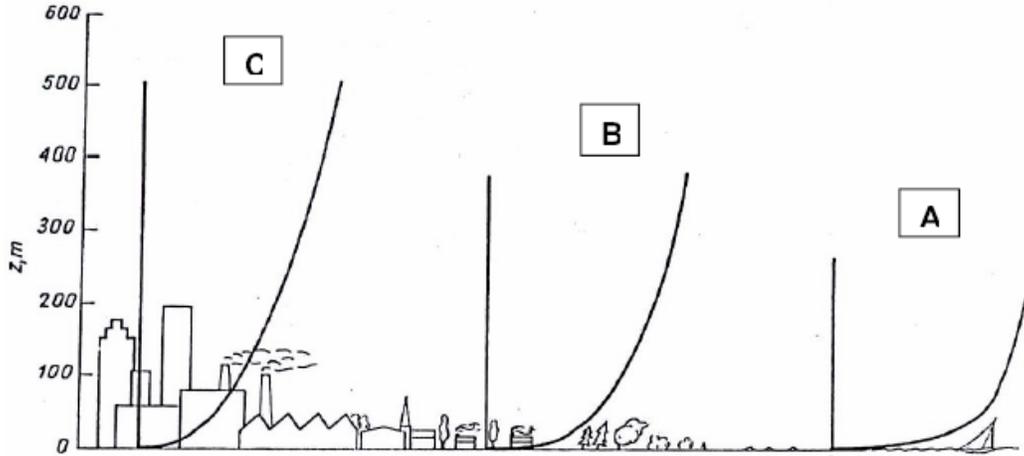


Figura 1.2 Gradientes de velocidad en función del tipo de terreno

En el caso de los gasómetros se consideró Terreno Tipo A ya que están ubicados en una llanura próxima a la costa.

Variación de la presión básica con la altura. Altura de gradiente. Coeficiente de altura

Altura de gradiente (Z_g). Esta es la altura a la cual la velocidad del viento alcanza su valor máximo, dependiendo la misma de la rugosidad del terreno, manteniéndose constante la velocidad a partir de dicha altura.

El coeficiente de altura (C_h), según la categoría del tipo de terreno vendrá dado por las siguientes expresiones:

Tabla 1.3 Gradiente del coeficiente de altura		
Tipo de Terreno	C_h	Z_g (m)
A	$(Z/10)^{0,32}$	300
B	$0,65 (Z/10)^{0,44}$	400
C	$0,30 (Z/10)^{0,66}$	500

A partir de la altura de gradiente (Z_g) los coeficientes de altura se mantienen constantes. Los anteriores coeficientes de altura son señalados en la Tabla 1.4 hasta una altura de 50 m.

Tabla 1.4 Coeficiente de altura (C_h)

Altura(m)	Tipos de Terreno		
	A	B	C
De 0 a 5	0,80	0,48	0,19
10	1,00	0,65	0,30
20	1,25	0,88	0,47
30	1,42	1,05	0,62
40	1,56	1,20	0,75
50	1,67	1,32	0,87

Coeficientes de ráfaga (C_r)

Los coeficientes de ráfagas (C_r) son empleados para tener en cuenta la naturaleza fluctuante de los vientos y su interacción con edificaciones y otras construcciones.

El coeficiente de ráfaga (C_r) será utilizado en el cálculo de los elementos resistentes a la carga de viento, su valor se determina según la Tabla 1.5, en función del tipo de terreno y para la altura total del edificio o estructura H.

Tabla 1.5 Coeficiente de ráfaga (C_r)

Altura (m)	Tipos de terreno		
	A	B	C
<10	1,22	1,46	1,90
10	1,18	1,36	1,72
20	1,14	1,28	1,54
30	1,12	1,24	1,44
40	1,10	1,21	1,38
50	1,09	1,18	1,32

Reducciones de la acción del viento por superficies grandes expuestas

El coeficiente de reducción C_{ra} tendrá un valor único para el edificio u obra correspondiente a la altura máxima del mismo. Las presiones del viento que actúan sobre los elementos constituyentes de una edificación u obra (paneles, vigas, columnas y otros), deben ser afectadas de un coeficiente de reducción en función de la mayor dimensión (horizontal o vertical) de la superficie o área que expuesta al viento actúa o trasmite carga sobre el elemento considerado. La reducción sólo se usará cuando la mayor dimensión señalada sea igual o mayor que 15 m. El coeficiente de reducción C_{ra} se obtiene en la Figura 1.3.

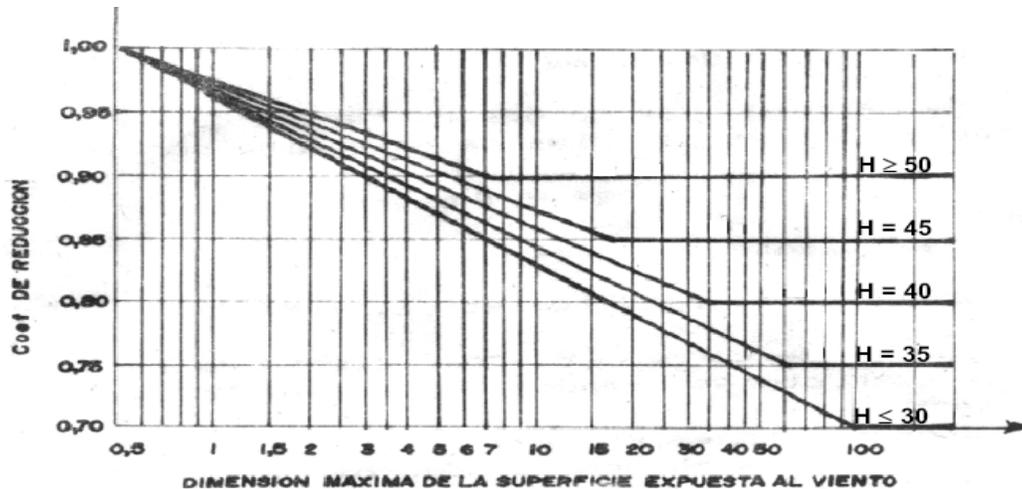


Figura 1.3 Coeficiente de reducción por área expuesta

Para la determinación de la más grande dimensión (horizontal o vertical) de la superficie o área expuesta, se tendrá en consideración la indeformabilidad de los elementos estructurales constitutivos (entrepisos y cubiertas). Los entrepisos y cubiertas constituidos por hormigón celular (Siporex) y láminas de asbesto cemento u otros similares, son considerados deformables. La reducción sólo se usará cuando la mayor dimensión señalada sea igual o mayor que 15 m (Ver Figura 1.3).

Coeficientes de forma o aerodinámicos de las acciones exteriores de las edificaciones

Las presiones básicas de viento están afectadas por el coeficiente de forma o aerodinámico (C_f) para tener en cuenta la forma, los volúmenes, el ángulo de las superficies expuestas al viento, es decir, el carácter aerodinámico de la estructura. Las edificaciones u obras sin ningún tipo de abertura en las paredes y en el techo, (o abertura de fácil y garantizado cierre) y sin posibilidades de tenerlo, se consideran perfectamente impermeables, estancas y no existirán en ellas acciones interiores.

Dentro de esta sección se incluirán el grupo de estructuras casi siempre de predominio vertical, fundamentalmente industriales y de almacenamiento, con una estructura constituida por superficies continuas de características especiales. Las chimeneas, torres, tanques, silos y estructuras similares caen en la anterior clasificación. Se contemplan igualmente estructuras de superficies esféricas, por su característica de poseer superficie continua. En estas estructuras de carácter generalmente vertical, es

importante la relación de altura a diámetro o base, por lo que se señalarán en los coeficientes las variaciones que producen en base a lo anterior.

En estas estructuras hay que tener en cuenta el cálculo por el efecto local sobre la superficie y el efecto por el conjunto de la estructura, para el diseño y cálculo de su resistencia y estabilidad.

Para las diferentes superficies de las edificaciones y obras con las características señaladas, los coeficientes de forma (C_f) que deben tomar, al determinar la presión básica del viento normal, con respecto a la superficie y que corresponde a la unidad de área de dicha superficie, se establecen en los diferentes casos que se presentan en la Norma 285, para el presente trabajo se tomará el caso 4.

Caso 4. Esquema que se emplea para cubiertas tipo bóveda y similares por la forma (por ejemplo: cerchas de arco).

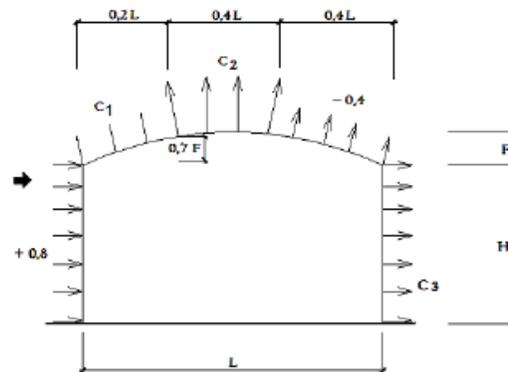


Figura 1.4 Esquema de una construcción con cubierta tipo bóveda similar a los gasómetros

Tabla 1.6 Valores de C_1 , C_2 y C_3						
Coeficiente	H/L	f/L				
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
C_1	0	+0.1	+0.2	+0.5	+0.6	+0.7
	0.2	-0.2	-0.1	+0.2	+0.5	+0.7
	1	-0.8	-0.7	-0.3	+0.3	+0.7
C_2		-0.8	-0.9	-1	-1.1	-1.2
				H/L		
C_3				≤ 0.5	1	≥ 2
		≤ 1		-0.4	-0.5	-0.6
		≥ 2		-0.5	-0.6	-0.6

Capítulo I

Carga unitaria total

Carga unitaria característica total. Las cargas unitarias características totales por unidad de área (q) a considerar en los cálculos se determinan por la expresión:

$$q = q_{10} * C_t * C_s * C_h * C_r * C_{ra} * C_f \quad [\text{kN/m}^2] \quad (1.2)$$

Donde:

q_{10} : presión básica del viento, $[\text{kN/m}^2]$

C_t : coeficiente de recurrencia

C_s : coeficiente de topografía o sitio

C_h : coeficiente de altura

C_r : coeficiente de ráfaga

C_{ra} : coeficiente de reducción

C_f : coeficiente de forma

1.4 Dimensiones, parámetros de trabajo y especificaciones técnicas de los gasómetros

Recipiente cilíndrico de fondo abombado (Mijalev, 1986); (Pavlov, 1981); (Laschinski, 1983)

Diámetro exterior del recipiente (D): 3 000 mm

Radio exterior del cuerpo (R_e): 1500 mm

Radio medio del cuerpo (R): 1470 mm

Espesor de la pared (h): 60 mm

Altura (H): 28.00 m

Temperatura de explotación, $t = 38 \text{ }^\circ\text{C}$

Presión máxima de explotación $p = 55 \text{ atm} = 56,86 \text{ kgf/cm}^2 = 0,558 \text{ kN/cm}^2$

El peso de un gasómetro es: $W = 131\,597 \text{ kg} = 1\,291 \text{ kN}$

1.5 Carga transversal distribuida y momento de vuelco provocadas por el viento

Para la obtención de la carga transversal distribuida provocada por el viento, que es la carga que trata de provocar el desplazamiento lateral y el momento de vuelco provocado por el mismo, es necesario resolver algunas incógnitas, como el cálculo de la carga del viento.

Presión básica

Se supondrá, salvo condiciones excepcionales, que el viento actúa horizontalmente y en cualquier dirección.

La presión básica se calcula por la expresión 1.1, en la cual se asume V_{10} para:

Ráfaga de viento (340 km/h = 94.44 m/s)

$$q_{10} = \frac{94.44^2}{1.6 \times 10^3} = 5.57 \text{ KN/m}^2$$

Factores que modifican la presión básica

Se asume un período de recurrencia de 50 años

- Coeficiente de recurrencia (C_t) para 50 años es igual a 1
- Coeficiente de topografía o sitio (C_s), se toma para las condiciones límites de riesgo, Sitio expuesto:

$$C_s = 1.1$$

- Coeficiente de altura (C_h) que depende del tipo de terreno, el cual cumple con las condiciones de terrenos abiertos categoría A, para el cual la altura de gradiente (Z_g): altura a la cual la velocidad del viento alcanza su valor máximo, de 300 m y $C_h (Z/10)^{0.32}$. A partir de la altura de gradiente los coeficientes de altura se mantienen constantes, cuyos valores son:

No.	Altura (m)	C_h
1	5	0.8
2	10	1
3	15	1.125
4	20	1.25
5	25	1.335
6	30	1.42

- Coeficiente de ráfaga (C_r) para tener en cuenta la naturaleza fluctuante de los vientos y su interacción se utiliza la Tabla 1.8:

No.	Altura m	C_r
1	5	1.22
2	10	1.18
3	15	1.16
4	20	1.14
5	25	1.13
6	30	1.12

- El coeficiente de reducción por área expuesta (C_{ra}) se busca con la ayuda de la Figura 1.3.

No.	Altura m	C_{ra}
1	5	0.87
2	10	0.83
3	15	0.81
4	20	0.79
5	25	0.775
6	30	0.76

- Coeficiente de forma o aerodinámicos (C_f) Tabla 1.6

$$C_1 = 0.8, C_2 = -1.2, C_3 = -0.6$$

- Cálculo de la carga unitaria total

La carga unitaria por unidad de área transversal se calcula por la expresión 1.2, con esta se calcula q_1 y q_2 , con la ayuda del Excel (Ver anexos 2 Tabla 1 y 2)

Para obtener la función matemática que representa la variación de la presión con la altura se realizó el ajuste de la curva, con el programa Curve Expert para los valores de altura y presiones resultantes ($P = q_1 + q_2$) calculadas con ayuda del Excel (Ver tabla 1.10). Y se obtuvo el ajuste según una función racional mostrado en la Figura 1.5

Tabla 1.10 Valores de la presión del viento con la altura		
No.	Presión Resultante (kN/cm ²)	Altura
1	10,40511648	5
2	12,0015676	10
3	12,9530907	15
4	13,7949405	20
5	14,32647307	25
6	14,81145882	30

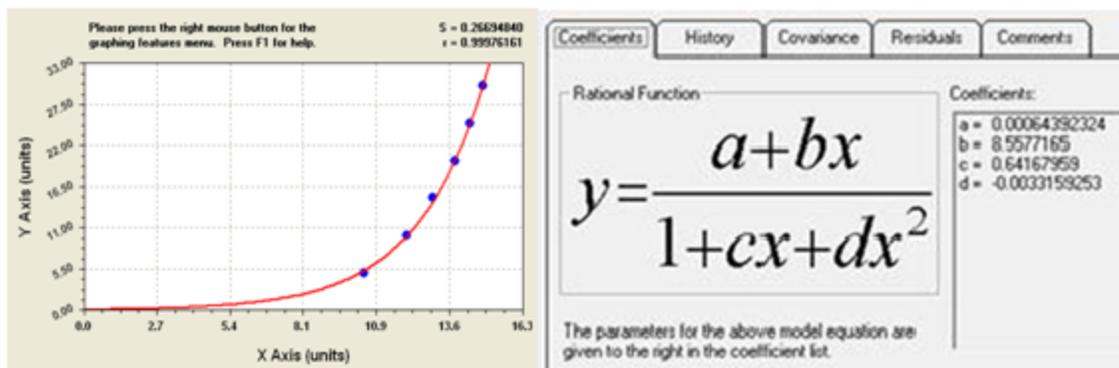


Figura 1.5 Ajuste en una función racional, donde a, b, c y d son las constantes de la función.

- **Cálculo de la carga transversal del viento y del momento de vuelco**

Con la ecuación anteriormente determinada, se obtiene integrando dicha expresión, la fuerza total provocada por la presión o Carga Transversal del Viento sobre los gasómetros y el momento resultante de dicha presión.

- **Carga transversal del viento.**

$$P_v = \int_0^A P_z \cdot dz = \int P_z \cdot D \cdot dz = D \int_0^H P_z \cdot dz \quad (1.3)$$

Se multiplica por D para obtener la carga uniformemente distribuida por unidad de longitud $D = 3 \text{ m}$.

$$P_z = \frac{a+bz}{1+cz+dz^2} \text{ (Función obtenida con el programa Curve Expert)} \quad (1.4)$$

Sustituyendo ecuación 1.6 en 1.5

$$P_v = D \int_0^{28.45} P_z \cdot dz = 1030.46 \text{ kN}$$

- **Momento de vuelco provocado por la presión del viento**

$$M_v = D \int_0^H P_z \cdot z \cdot dz = D \int_0^{28.45} P_z \cdot z \cdot dz = 16225.91 \text{ kN} \cdot m \quad (1.5)$$

Con estas cargas se puede realizar el cálculo de las tensiones provocadas por el viento en los cordones de soldadura más peligrosos del mismo.

1.6 Conclusiones Parciales del Capítulo I

1. Se profundizó en la literatura sobre lo referente a las metodologías existentes para determinar las cargas sobre el viento. En la bibliografía relacionada con la resistencia del viento tuvimos en cuenta los criterios expresados en la conferencia: Criterios para el diseño de estructuras resistentes a huracanes, dictada en Cienfuegos en enero de 2013 por los ingenieros Pedro A. Hernández Delgado y René Blanco Heredia, también se estudiaron otras fuentes, sin embargo, fue en la Norma Cubana NC 285:2003: Carga de Viento, Método de Cálculo, donde se encontró toda la información necesaria para establecer las cargas del viento sobre los gasómetros.
2. Se utilizó una metodología de cálculo donde intervienen todos los factores a considerar en la carga frontal del viento y en la carga de vacío creada por el viento en la parte posterior de los gasómetros mediante la cual se calculó la carga transversal y el momento de vuelco provocado sobre los gasómetros para el caso de la mayor ráfaga de viento registrada en Cuba, 340 km/h = 94.44m/s.

Capítulo II Evaluación de la resistencia de los pernos de anclaje de los gasómetros en presencia de huracanes

2.1 Teoría sobre el cálculo de uniones roscadas pretensadas

2.1.1 Uniones pretensadas sometidas a carga axial

Las uniones roscadas montadas con tensado previo están caracterizadas por la aplicación de una pretensión en los tornillos que garantiza el trabajo seguro de la unión. Un ejemplo clásico de estas son los espárragos que unen la tapa del block al block en los motores de combustión interna, si estas uniones se montaran sin tensado previo al comenzar a funcionar el motor y actuar la presión de los gases sobre la tapa los espárragos se estirarían provocando la deshermetización de la unión, sin embargo mediante el pretensado se garantiza una fuerza inicial de compresión entre la tapa y el block, que permite que al estirarse los tornillos por el trabajo del motor quede al final un apriete remanente entre la tapa y el block que garantiza que no haya escape de gases.

El cálculo de estas uniones consta de dos aspectos fundamentales, la determinación de diámetro de los tornillos necesario para soportar las cargas actuantes y la determinación de la fuerza de tensado previo requerida para garantizar el trabajo de la unión. En este tipo de uniones se presentan dos casos diferentes de cargas, uniones sometidas a carga axial y uniones sometidas a carga transversal. (Ivanov M.N. 1991); (Orlov P. 1985); (Shigley and Mischkie, 2005).

El primer caso se analizará a través del ejemplo mostrado en la Figura 2.1. En la Figura 2.1 a, se representa la unión antes de aplicar la fuerza de tensado previo, o sea: $V = 0$, la carga sobre los tornillos $P = 0$ y la unión no ha sufrido aún ninguna deformación.

Al aplicar la fuerza de tensado previo V (Figura 2.1 b), ocurrirá una deformación elástica λ_1 en el tornillo y una similar λ_2 en las piezas. Como la carga P sobre la unión aún no ha sido aplicada, la fuerza sobre los tornillos y sobre las piezas será la carga de tensado previo V que actúa simultáneamente entre las dos tapas de la unión.

$$\lambda_1 = \frac{V}{C_t} \quad \lambda_2 = \frac{V}{C_p} \quad (2.1)$$

Donde λ_1, λ_2 – Deformación elástica en el tornillo y la piezas respectivamente, cm.

Ct, Cp – Constantes de rigidez del tornillo y de las piezas respectivamente, kN/cm.

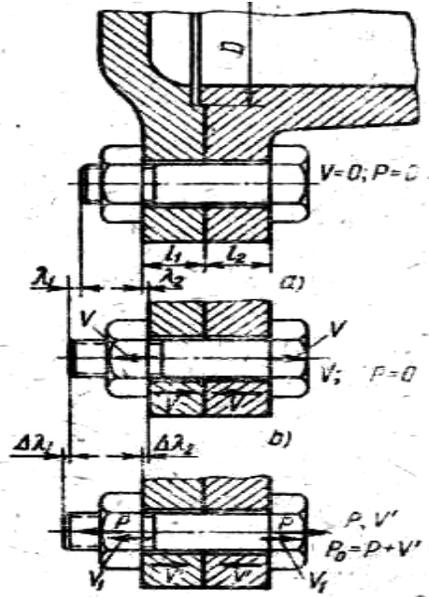


Figura 2.1 Unión roscada montada con tensado previo y sometida a carga axial

Cuando se aplica la carga de trabajo P (Figura 2.1 c) se produce una deformación adicional en el tornillo $\Delta\lambda_1$ y una reducción de la deformación de las piezas $\Delta\lambda_2$, teniendo que cuenta la condición de compatibilidad de las deformaciones:

$$\Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2 \quad (2.2)$$

Producto de la descarga de la junta la fuerza que actúa entre las tapas de esta disminuye hasta un valor V' denominado fuerza de compresión residual mientras que y la fuerza que actúa sobre los tornillos se incrementa hasta un valor Po denominado carga de cálculo o carga máxima sobre el tornillo y que a partir del análisis del equilibrio de la unión se determina como:

$$P_o = P + V' \quad (2.3)$$

Como la disminución de la fuerza de tensado entre los elementos unidos es:

$$\Delta P = V - V' \quad (2.4)$$

Las deformaciones $\Delta\lambda_1$ y $\Delta\lambda_2$ se pueden expresar en función de la variación de la fuerza que actúa sobre los elementos deformados de la siguiente forma:

$$\Delta\lambda_1 = \frac{P_0 - V}{C_t} \quad \Delta\lambda_2 = \frac{V - V'}{C_p}$$

Pero:

$$P_0 - V = P - (V - V') = P - \Delta P$$

Por lo que:

$$\Delta\lambda_1 = \frac{P - \Delta P}{C_t} = \Delta\lambda_2 = \frac{\Delta P}{C_p}$$

y la disminución de la fuerza de tensado se determina como:

$$\Delta P = P \cdot \frac{C_p}{C_p + C_t}$$

Y el esfuerzo de tensado previo requerido será:

$$V = V' + \Delta P = V' + P \cdot \frac{C_p}{C_p + C_t} \tag{2.5}$$

En la literatura (Dobrovolski, 1991) se plantea:

$$V' = \gamma \cdot P$$

Donde γ es un coeficiente experimental que se toma en los siguientes rangos de acuerdo al nivel de seguridad que se requiera en la unión:

$\gamma = (0,2 \text{ a } 1,3)$, para uniones de fuerza

$\gamma = (1,3 \text{ a } 1,6)$, si se requiere garantizar la hermeticidad de la unión sin el empleo de junta.

El diámetro necesario para los tornillos se calcula en función de la carga de cálculo P_0 y para tomar en cuenta el efecto del momento torsor producido por la fricción entre las espiras de las roscas durante el proceso de pretensado previo se incrementa un 30 %.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,3 \cdot P_0}{\pi \cdot [\sigma]_t}} = 1,287 \sqrt{\frac{P_0}{[\sigma]_t}} \tag{2.6}$$

Para la determinación de las tensiones admisibles se utilizan en general las siguientes recomendaciones para el caso de tornillos de acero al carbono (Dobrovolski, 1991).

$[\sigma]_t = (0,25 \text{ a } 0,4) \sigma_f$ para tornillos de diámetro entre 16 y 30 mm.

$[\sigma]_t = (0,4 \text{ a } 0,6) \sigma_f$ para tornillos de diámetro entre 30 y 60 mm.

σ_f Tensión en el límite de fluencia del material del tornillo, MPa.

Las menores tensiones admisibles se toman para los tornillos de menor diámetro por el riesgo de rotura durante el apriete previo.

Para calcular la fuerza de tensado previo y por lo tanto el torque de apriete necesario, se requiere calcular las constantes de rigidez del tornillo y de las piezas.

La constante de rigidez elástica de un tornillo se determina a partir de la ley de Hooke, un perno roscado generalmente tiene dos secciones diferentes, la roscada y la no roscada o espiga, por lo que la rigidez de un perno equivale a la de dos resortes conectados en serie.

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_e} + \frac{1}{C_r} = \frac{C_e + C_r}{C_e \cdot C_r} \quad C_t = \frac{C_e \cdot C_r}{C_e + C_r} \quad (2.7)$$

Donde:

C_t – Constante de rigidez del tornillo, kN/cm

C_e – Constante de rigidez de la espiga no roscada, kN/cm

C_r – Constante de rigidez de la zona roscada, kN/cm

Determinándose entonces C_e y C_r como:

$$C_r = \frac{A_r \cdot E}{L_r} \quad \text{y} \quad C_e = \frac{A_e \cdot E}{L_e} \quad (2.8)$$

Donde:

E – Módulo de elasticidad del material, kN/cm²

A_e, A_r – Área de la sección transversal de la espiga o cuerpo del tornillo y del fondo de la rosca respectivamente, cm²

L_r, L_e – Longitud de la espiga y de la zona roscada respectivamente, mm

Sustituyendo 2.8 en 2.7 se obtiene:

$$C_t = \frac{A_r \cdot A_e \cdot E}{A_r \cdot L_r + A_e \cdot L_e} \quad (2.9)$$

Para tornillos cortos en que la zona no roscada es pequeña se puede despreciar su influencia y calcular la rigidez del tornillo como:

$$C_t = \frac{E \cdot A_t}{L_t} \quad (2.10)$$

Donde:

A_t – Área de la sección transversal de la parte roscada del tornillo, cm^2

L_t – Longitud de cálculo del tornillo, cm

$L_t = L_1 + L_2 + 0,5 L_C + 0,5 L_T$

L_1 y L_2 – Espesor de las piezas a unir, cm.

L_C y L_T – Altura de la cabeza y altura de la tuerca del tornillo respectivamente, cm.

Para tornillos escalonados la constante de rigidez se puede determinar por la siguiente ecuación:

$$C_t = \frac{E_t}{\frac{L_1}{A_{t1}} + \frac{L_2}{A_{t2}} + \dots + \frac{L_n}{A_{tn}}} \quad (2.11)$$

Donde:

L_1, L_2, \dots, L_n – Longitud de cada uno de los tramos del tornillo, cm.

Para determinar la constante de rigidez de las piezas hay que tener en cuenta que pueden haber más de dos elementos unidos, todos ellos actúan como resortes de compresión en serie y por lo tanto la rigidez de la unión se puede determinar como:

$$\frac{1}{C_p} = \frac{1}{C_{p_1}} + \frac{1}{C_{p_2}} + \dots + \frac{1}{C_{p_n}} \quad (2.12)$$

La rigidez de las juntas y empaquetaduras es mucho menor que la de las piezas mecánicas, la rigidez del conjunto de las piezas será siempre menor que la de la pieza de menor rigidez. Piezas poco rígidas son muy perjudiciales para la resistencia de la unión a cargas cíclicas.

La determinación exacta de la rigidez de los elementos de la unión solo puede ser hecha a través de métodos experimentales, debido a que la compresión se extiende progresivamente entre la cabeza del perno y la tuerca y el área de la sección

transversal de la zona de influencia no es uniforme. Sin embargo, se realiza una aproximación bastante certera al considerar que la carga de apriete se transmite de la cabeza del tornillo y la tuerca a los elementos unidos por una zona de influencia cónica que es conocida en la literatura como conos de influencia y se muestra en la Figura 2.3.

Para simplificar los cálculos usualmente los conos se sustituyen por cilindros huecos que tengan igual área de sección que el área de la sección media de los conos de influencia, y en este caso la rigidez de las piezas se determina por las siguientes ecuaciones cuyos parámetros se explican en la Figura 2.3.

Para el caso de dos piezas comprimidas entre la cabeza y la tuerca:

$$\frac{1}{C_p} = \left(\frac{l_1}{E_{p1} \cdot A_{pC}} + \frac{l_2}{E_{p2} \cdot A_{pT}} \right) \quad (2.13)$$

$$A_{p1} = \frac{\pi}{4} [(a_1 + 0,5 \cdot l_1)^2 - d_o^2] \quad (2.14)$$

$$A_{p2} = \frac{\pi}{4} [(a_2 + 0,5 \cdot l_2)^2 - d_o^2] \quad (2.15)$$

Donde:

A_{p1} — Área de compresión de la pieza 1 en cm^2

A_{p2} — Área de compresión de la pieza 2 en cm^2

l_1 y l_2 — Espesores de la pieza 1 y 2 respectivamente en cm

a_1 y a_2 — Distancia entre caras del hexágono de la tuerca o la cabeza del tornillo en función de la que esté en contacto con la pieza 1 o la pieza 2 respectivamente.

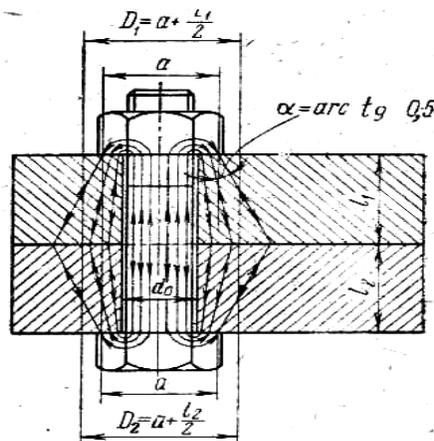


Figura 2.2 Conos de influencia durante la compresión de las piezas

Si se trata de más de dos piezas o de una junta entre las dos piezas. El área de compresión de todas las piezas intermedias se toma constante e igual al área promedio entre la pieza 1 y la pieza 2, o sea:

$$A_{p_i} = (A_{p_1} + A_{p_2})/2 \tag{2.16}$$

El comportamiento del tornillo y de las piezas en una unión roscada pretensada se representa comúnmente mediante los gráficos de la carga deformación del tornillo y de las piezas (Figura 2.3), mediante la unión de los cuales se representa el gráfico de la carga deformación de la unión (Figura 2.4).

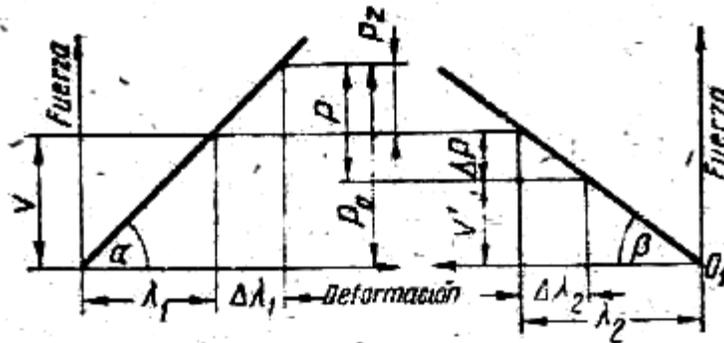


Figura 2.3 Gráfico carga deformación del tornillo y de las piezas en una unión roscada pretensada sometida a carga axial

En los gráficos se traza por el eje de las ordenadas las cargas y por el de las abscisas las deformaciones que estas originan en el tornillo y en las piezas, por lo que $C_t = \tan(\alpha)$ y $C_p = \tan(\beta)$ y simultaneando ambos gráficos de forma que se corten en el valor de la fuerza de tensado previo se representa el gráfico de la unión, tal como se muestra en la Figura 2.4.

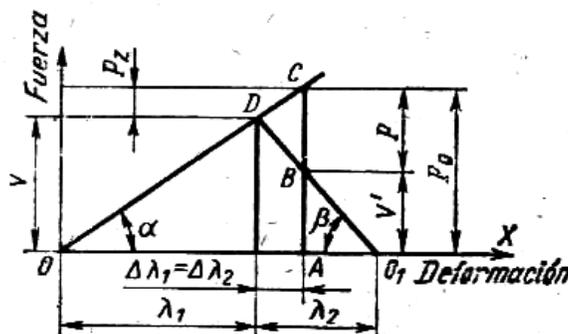


Figura 2.4 Diagrama carga deformación de la unión roscada pretensada

En un punto arbitrario A del eje de deformación, perpendicularmente a este se traza el segmento AC que representa a una escala elegida la fuerza $P_0 = V' + P$. Por el punto C se traza una recta inclinada un ángulo $\alpha = \arctan(C_t)$ respecto al eje X y el punto de intersección con el eje X se toma como el origen de coordenadas O. A través del punto B de la perpendicular AC (AB representa la fuerza de compresión residual requerida V') trazamos una recta inclinada un ángulo $\beta = \arctan(C_p)$ el punto D de intersección entre las rectas OC y O1B determina la fuerza de tensado previa indispensable para garantizar el trabajo conjunto de la unión.

En la Figura 2.4 se puede apreciar para iguales valores de P_0 ($P; V'$) y β como varía el esfuerzo de tensado previo requerido $V_1 < V$ siendo $\alpha_1 > \alpha$ o sea incrementando la rigidez del tornillo, igualmente el incremento de la rigidez de las piezas a unir demandará un incremento de la fuerza de tensado previo requerida.

2.1.2 Uniones pretensadas sometidas a carga transversal

En la Figura 2.5 se muestra una unión roscada con tensado previo y sometida a carga transversal. En ella se puede apreciar como existe un juego entre las paredes del tornillo y las paredes del agujero por lo que la carga transversal es soportada por la fuerza de fricción que se origina entre las superficies conjugadas de las piezas unida como resultado del apriete previo aplicado a los tornillos.

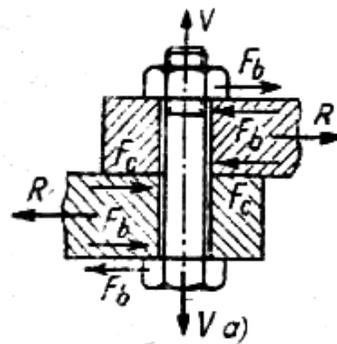


Figura 2.5 Unión roscada con tensado previo y sometida a carga transversal

Por lo que para garantizar que no haya deslizamiento entre las piezas debe cumplirse que:

$$F_r > 1,2 \cdot R \tag{2.17}$$

Capítulo II

$$f \cdot N > 1,2 \cdot R \quad (2.18)$$

$$N > \frac{1,2 \cdot R}{f} \quad (2.19)$$

Donde:

Fr – Fuerza de rozamiento entre las planchas, kN

N – Fuerza que aprieta las planchas, kN

f – Coeficiente de fricción entre las planchas, si son de acero se puede estimar como:
f = 0,15.

La fuerza normal entre las superficies se logra a partir de la fuerza de tensado previo V por lo que si no existe una fuerza axial que descargue la unión:

$$V = N$$

$$V = \frac{1,2 \cdot R}{f} \quad y \quad P_0 = V \quad (2.20)$$

Si existe alguna fuerza axial P, entonces:

$$V' = N = \frac{1,2 \cdot R}{f} \quad y \quad P_0 = P + V' \quad (2.21)$$

Siendo la fuerza de tensado previo se determinará como:

$$V = V' + P \quad (2.22)$$

Continuando del cálculo igual que el caso anterior.

Un aspecto de suma importancia en estas uniones es cómo garantizar durante el montaje que la fuerza de tensado previo sea la requerida, esto se alcanza por dos vías:

1 – Controlando el alargamiento que sufre el tornillo como resultado del apriete.

$$\lambda = \frac{V}{C_t} \quad (2.23)$$

Esto tiene como desventaja el hecho de que el alargamiento del tornillo como resultado del apriete debe ser medido con un micrómetro lo que complica el trabajo.

2 – Controlando el torque de apriete mediante una llave de torque.

2.1.3 Cálculo del torque de apriete

$$M_T = C \cdot d \cdot V \text{ kN-cm} \quad (2.24)$$

Donde M_T Torque de apriete en kN –cm

d– diámetro del tornillo en cm.

C – Constante de proporcionalidad que para acero con acero es $C = 0,2$

2.2 Cálculo de los tornillos de anclaje

Para realizar este cálculo debemos encontrar la magnitud de la fuerza que actúa sobre el tornillo más cargado que es el que tiene mayor brazo con respecto a un punto A.

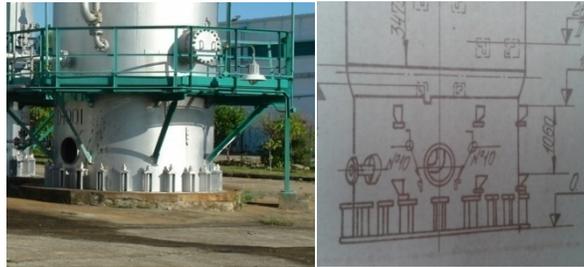


Figura 2.6 Vista de la base de los gasómetros

A partir del siguiente esquema

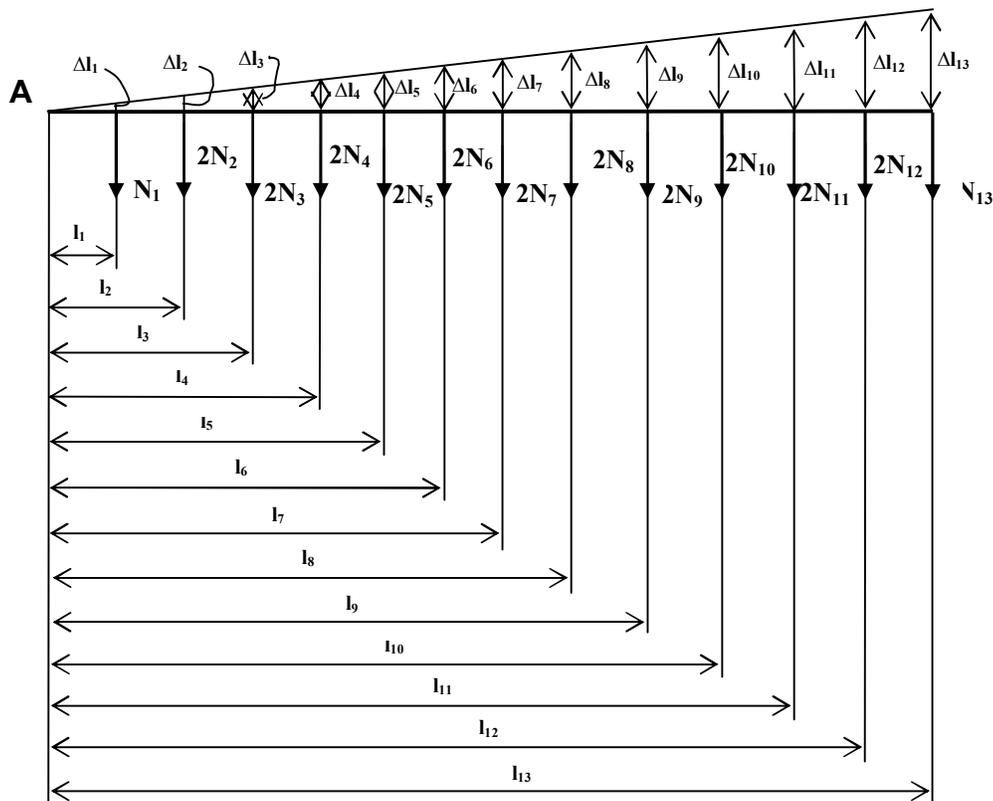


Figura 2.7 Esquema de análisis de los tornillos de anclaje

Se realiza momento con respecto A y se obtiene la siguiente ecuación:

$$\sum M_A = N_1 \cdot l_1 + 2 * N_2 \cdot l_2 + 2 * N_3 \cdot l_3 + 2 * N_4 \cdot l_4 + 2 * N_5 \cdot l_5 + 2 * N_6 \cdot l_6 + 2 * N_7 \cdot l_7 + 2 * N_8 \cdot l_8 + 2 * N_9 \cdot l_9 + 2 * N_{10} \cdot l_{10} + 2 * N_{11} \cdot l_{11} + 2 * N_{12} \cdot l_{12} + 2 * N_{13} \cdot l_{13} - M_v = 0 \quad (2.25)$$

Partiendo de la siguiente Ecuación de Compatibilidad del Método de las Deformaciones (Feodosiev, 1985), Pisarenko, 1989); Fitzgerald, 1988); (Fogie M. 1988); (Goytisoló, 1999); (Mott R.L., 1996) se despeja la fuerza que actúa en cada tornillo en función de N_{13} .

$$\frac{\Delta l_1}{l_1} = \frac{\Delta l_{13}}{l_{13}} \quad (2.26)$$

$$\frac{N_1 * l_{t1}}{E * A_1 * l_1} = \frac{N_{13} * l_{t13}}{E * A_{13} * l_{13}}$$

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{N_{13} * l_1}{l_{13}} & N_2 &= \frac{N_{13} * l_2}{l_{13}} & N_3 &= \frac{N_{13} * l_3}{l_{13}} & N_4 &= \frac{N_{13} * l_4}{l_{13}} & N_5 &= \frac{N_{13} * l_5}{l_{13}} \\ N_6 &= \frac{N_{13} * l_6}{l_{13}} & N_7 &= \frac{N_{13} * l_7}{l_{13}} & N_8 &= \frac{N_{13} * l_8}{l_{13}} & N_9 &= \frac{N_{13} * l_9}{l_{13}} & N_{10} &= \frac{N_{13} * l_{10}}{l_{13}} \\ N_{11} &= \frac{N_{13} * l_{11}}{l_{13}} & N_{12} &= \frac{N_{13} * l_{12}}{l_{13}} \end{aligned}$$

Las ecuaciones anteriores se despejan en la ecuación 2.25 y se obtiene:

$$\sum M_A = \frac{N_{13} * l_1^2}{l_{13}} + 2 * \frac{N_{13} * l_2^2}{l_{13}} + 2 * \frac{N_{13} * l_3^2}{l_{13}} + 2 * \frac{N_{13} * l_4^2}{l_{13}} + 2 * \frac{N_{13} * l_5^2}{l_{13}} + 2 * \frac{N_{13} * l_6^2}{l_{13}} + 2 * \frac{N_{13} * l_7^2}{l_{13}} + 2 * N_{13} * l_8 + 2 * N_{13} * l_9 + 2 * N_{13} * l_{10} + 2 * N_{13} * l_{11} + 2 * N_{13} * l_{12} + N_{13} * l_{13} - M_v = 0 \quad (2.27)$$

Donde:

$l_{1...13}$ -----Longitud del punto (A) a cada tornillos de anclaje

$l_1 = 0.065$ m; $l_2 = 0.119$ m; $l_3 = 0.2932$ m; $l_4 = 0.5366$ m; $l_5 = 0.87$ m; $l_6 = 1.2583$ m; $l_7 = 1.675$ m; $l_8 = 2.0917$ m; $l_9 = 2.48$ m; $l_{10} = 2.8134$ m; $l_{11} = 3.0568$ m; $l_{12} = 3.23$ m; $l_{13} = 3.285$ m.

De la ecuación 2.27 se despeja N_{13} y se obtiene:

$$N_{13} = \frac{M_v}{\left[\frac{l_1^2}{l_{13}} + \frac{2 * l_2^2}{l_{13}} + \frac{2 * l_3^2}{l_{13}} + \frac{2 * l_4^2}{l_{13}} + \frac{2 * l_5^2}{l_{13}} + \frac{2 * l_6^2}{l_{13}} + \dots + \frac{2 * l_{11}^2}{l_{13}} + \frac{2 * l_{12}^2}{l_{13}} + l_{13} \right]} \quad (2.28)$$

$$N_{13} = 542.37 \text{ kN}$$

Después de calculada N_{13} hay que comprobar si los tornillos actuales son capaces de resistir dicha fuerza y determinar el diámetro de los nuevos tornillos.

Utilizando la expresión 2.6 se obtiene que:

$$d = 1.287 \sqrt{\frac{P_0}{[\sigma]_t}} = 6.45 \text{ cm} = 65 \text{ mm}$$

El material de los tornillos actuales es Acero 45 y $\sigma_f = 36 \text{ kN/cm}^2$

$[\sigma]_t = (0,4 \text{ a } 0,6) \sigma_f$ para tornillos de diámetro entre 30 y 60 mm.

$$[\sigma]_t = 21.6 \text{ kN/cm}^2$$

$$P_0 = N_{13} = 542.37 \text{ kN}$$

El diámetro de los pernos de sujeción es 40mm y el teórico calculado 65mm por lo que para las condiciones de carga seleccionadas estos gasómetros necesitan un refuerzo adicional ya que los pernos por sí solos no resistirán el embate de los vientos sin tener en cuenta el deterioro de los mismos.

2.3 Conclusiones Parciales del Capítulo II

1. Se revisó en la literatura consultada todo lo referente a las Uniones Roscadas Pretensadas, en particular todo lo referente a la evaluación de la resistencia de los tornillos.
2. Se elaboró un Esquema de Análisis para resolver el Sistema Hiperestático compuesto por los 24 tornillos de anclaje. El Sistema posee 13 grados de Hiperestaticidad y se resolvió por el Método de las Deformaciones.
3. Para el tornillo más cargado se evaluó la resistencia estática y se pudo concluir que el diámetro necesario para soportar las cargas del viento de un huracán de gran intensidad se requiere en los mismos un diámetro mayor que el de los tornillos nuevos. Evidentemente los rusos no tomaron en cuenta la acción del viento. Se requiere el diseño de una Estructura Rigidizadora que impida el vuelco de los Gasómetros.

Capítulo III Diseño y cálculo de la estructura rigidizadora contra el vuelco de los gasómetros

3.1 Cálculo de la carga sobre la columna de refuerzo entre dos gasómetros contiguos

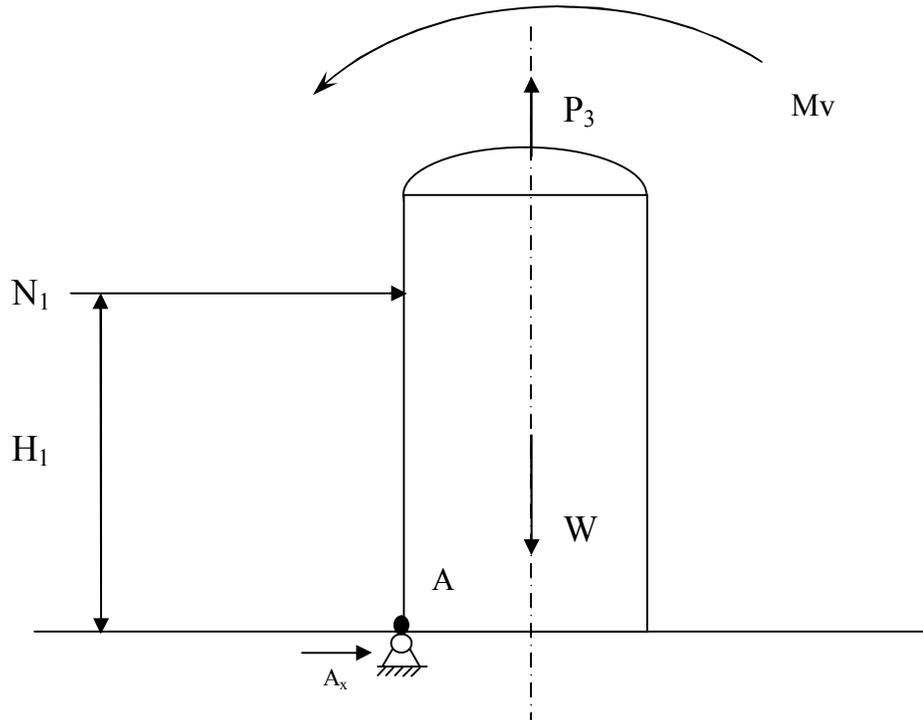


Figura 3.1 Esquema de las cargas actuantes sobre el gasómetro del extremo

En la Figura 3.1 se muestra el Esquema de Análisis del primer gasómetro del extremo suponiendo que actúa sobre el mismo el viento del sur. La columna rigidizadora se colocará a una altura H_1 . En la figura se muestra el momento de vuelco provocado por el viento y se determinará qué fuerza tiene que soportar la columna rigidizadora N_1 en el momento en que el gasómetro pivotea en el punto A un instante antes del vuelco. Se está considerando que los tornillos de anclaje están tan deteriorados que no contribuyen durante el vuelco.

Sumatoria de momento con respecto al punto A (Beer and Jonhston, 1993)

$$\sum M_A = N_1 \cdot H_1 - M_v + W \frac{D}{2} - P_3 \cdot \frac{D}{2} = 0 \quad (3.1)$$

Capítulo III

Para este cálculo se asume:

$H_1 = 19$ m ya que físicamente en los gasómetros a esta altura no existe ningún obstáculo para colocar la columna rigidizadora.

El peso de un gasómetro es:

$$W = 131597 \text{ kg} = 1290.967 \text{ kN}$$

De la ecuación 3.1 se despeja N_1 :

$$N_1 \cdot H_1 - M_v + W \frac{D}{2} - P_3 \cdot \frac{D}{2} = 0$$

$$N_1 \cdot H_1 = M_v - W \frac{D}{2} + P_3 \cdot \frac{D}{2}$$

$$N_1 = \frac{M_v - W \frac{D}{2} + P_3 \cdot \frac{D}{2}}{H_1}$$

$$N_1 = 755.8 \text{ kN}$$

$$\text{Donde } P_3 = q_3 \cdot A = q_3 \cdot \pi \cdot \left[\frac{D}{2} \right]^2$$

$q_3 = 6.665 \text{ kN/m}^2$, esta presión es calculada en el Excel, Ver tabla 3, Anexo 2

$$P_3 = 47.112 \text{ kN}$$

3.2 Diseño de una columna armada para la estructura rigidizadora

Comprobación de la posible pérdida de la estabilidad del equilibrio de la columna rigidizadora bajo la carga N_1

Como la resistencia a la estabilidad de las barras depende fundamentalmente de la razón de esbeltez y la magnitud de esta, a su vez, en función del radio de giro mínimo de sección será importante no solo tener en cuenta el valor del área, sino también la forma de la sección transversal. Para resolver económicamente este problema habría que construir la sección de tal modo que la magnitud de su radio de giro sea el mayor posible, a fin de que se reduzca el valor de la esbeltez ($\lambda = \frac{v \cdot l}{i_{min}}$), y aumente σ_{cr} .

Para lograr el valor óptimo es necesario que los radios de giro mínimo y máximo de inercia de sección transversal tenga el mismo valor, es decir, lograr que todos los momentos de inercia centroidales de la sección sean iguales; en cuyo caso, la elipse de

inercia se convertirá en un círculo. Tal barra tendrá igual resistencia a la pérdida de la estabilidad en cualquier dirección.

Si la longitud libre de la barra con la curvatura posible fuera diferente en ambos planos principales, entonces sería racional escoger una sección que tuviera diferentes valores en los momentos principales de inercia de esos planos para que los coeficientes fueran iguales en ambos casos. Si se quisiera que los momentos principales y centroidales fueran iguales, sería necesaria una sección en la cual el área estuviese alejada del centroide a la misma distancia en todo el contorno; esta distancia debe ser la mayor posible, a fin de obtener mayores valores de los momentos de inercia. Estas condiciones las satisfacen completamente la sección tubular que se usan a menudo para columnas y en las secciones cuadradas huecas. Esta última se puede lograr relativamente fácilmente con dos vigas canales o cuatro perfiles angulares.

El límite inferior del espesor de pared de la sección tubular debe ser tal que pueda fundirse sin que se produzca deformaciones locales de la pared delgada (alabeo) al trabajar la barra. Para prevenir las deformaciones locales y asegurar la conservación de la forma de la sección (circular) cuando la barra trabaja a compresión suelen colocarse en su interior un diafragma a cierta distancia uno de otro, que den rigidez al perfil.

Algunos tipos de secciones que resisten perfectamente la flexión en un plano como sucede cuando trabajan como viga, resultan ineficaces como barra comprimida. Tales perfiles son, por ejemplo, perfil I y la sección de doble perfil canal cuyas paredes son adyacentes, los perfiles canales se ubican de manera que sus almas estén lo más alejadas del centroide. La principal desventaja en el uso de estas secciones como barras comprimidas se debe a la gran diferencia que existe entre las magnitudes de los momentos de inercia respecto a sus ejes principales. Para evitar este defecto se pueden separar ambas mitades de la sección formada por dos canales, tal como se representa en la Figura 3.2.

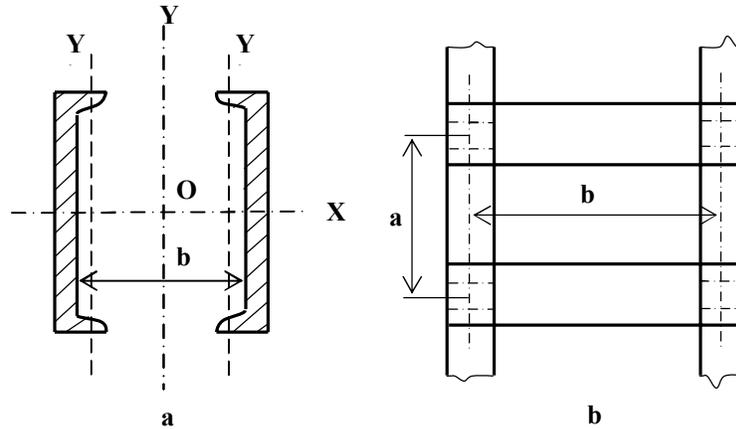


Figura 3.2 Esquema de la sección a emplear unidas entre sí por placas de unión

Para que la sección compuesta trabaje como un solo elemento, ambas partes se unen mediante un conjunto de placas de unión. Una condición necesaria para el trabajo seguro de estas barras compuestas consiste en la instalación de un sistema de sujeción lo suficientemente fuerte (placas de unión, celosías de angulares o de planchuela etc.), como para lograr que ambas mitades se comporten como una sola barra. Solo cuando esto esté asegurado es que será factible introducir en el cálculo el momento de inercia respecto al eje y . Si la unión de los dos perfiles canales es débil, esta no podrá asegurar que ambos perfiles trabajen conjuntamente. Entonces cada mitad de la barra trabajará independientemente y su estabilidad será muchas veces menor que la del conjunto; de esta forma se corre el riesgo de que se reproduzca un cambio en el estado de equilibrio del sistema.

Al construir una columna armada, la distancia b a la que deben separarse ambas mitades, se determina de la condición de que los momentos de inercia respecto a ambas ejes principales x e y sean aproximadamente iguales. No obstante, por el hecho de la unión no puede asegurar el trabajo del conjunto como si se tratara de una sola barra, generalmente se hace que el momento de inercia respecto al eje perpendicular a la superficie de la red sea algo mayor.

En cuanto a la elección del material de la barra comprimida se parte de los razonamientos siguientes: antes que la tensiones críticas superen el límite proporcional del material, es decir, en el rango correspondiente al dominio de la fórmula de Euler, la

Capítulo III

única propiedad mecánica del material que determina la pérdida de la estabilidad de la barra es el módulo de elasticidad.

Mientras tanto, para las barras de esbeltez media y pequeña, la magnitud de las tensiones críticas depende en mayor grado del límite de fluencia o del límite de resistencia al material. Estas razones tendrán que ser tomadas en cuenta a la hora de elegir el material para una barra de esbeltez media o pequeña que vaya a estar sometida a compresión.

Se deduce, por lo antes dicho, que el uso de acero de alta calidad, o sea, que por su elevada resistencia pueda utilizarse en barras de gran esbeltez dentro del dominio de la fórmula de Euler, sería totalmente absurdo, ya que el módulo de elasticidad E es el mismo cualquiera que sea la calidad del acero.

Por el contrario, si la esbeltez es media o pequeña, es recomendable el uso de acero de alta calidad con el objetivo de aumentar las tensiones críticas.

Cálculo de la razón de esbeltez

$$\lambda = \frac{\nu \cdot l}{i_{min}} = 108 \quad (3.2)$$

Donde:

$\nu = 1$ (extremos articulados)

$l = 1300$ cm

$i_{min} = 12$ (viga canal 30) (Ver Anexo 2 figura 5)

$E = 2 \cdot 10^4$ KN/cm²

$\sigma_p = 20$ KN/cm²

$$\lambda_{lim} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_p}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 2 \cdot 10^4}{20}} = 99.35 \quad (3.3)$$

$\lambda > \lambda_{lim}$ (Condición de miembro esbelto. Se aplica Euler)

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{min}}{(\nu \cdot l)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 5810}{(1 \cdot 1300)^2} = 1357.217 \text{ kN} \quad (3.4)$$

$P_{crit} > N_1$

$P_{crit} = 1357.217 \text{ kN} > 755.8 \text{ kN}$

La columna no pierde la estabilidad del equilibrio

Cálculo del factor de Seguridad

$$\eta = \frac{P_{crit}}{N_1} = 1.8 \quad (3.5)$$

3.3 Cálculo del diámetro mínimo necesario efectivo que deberían tener los tornillos corroídos para soportar la carga de tracción que se provoca durante el vuelco de la pareja de gasómetros

En la Figura 3.3 se muestran las cargas que actúan en la pareja de gasómetros contiguos bajo la acción de vientos del sur.

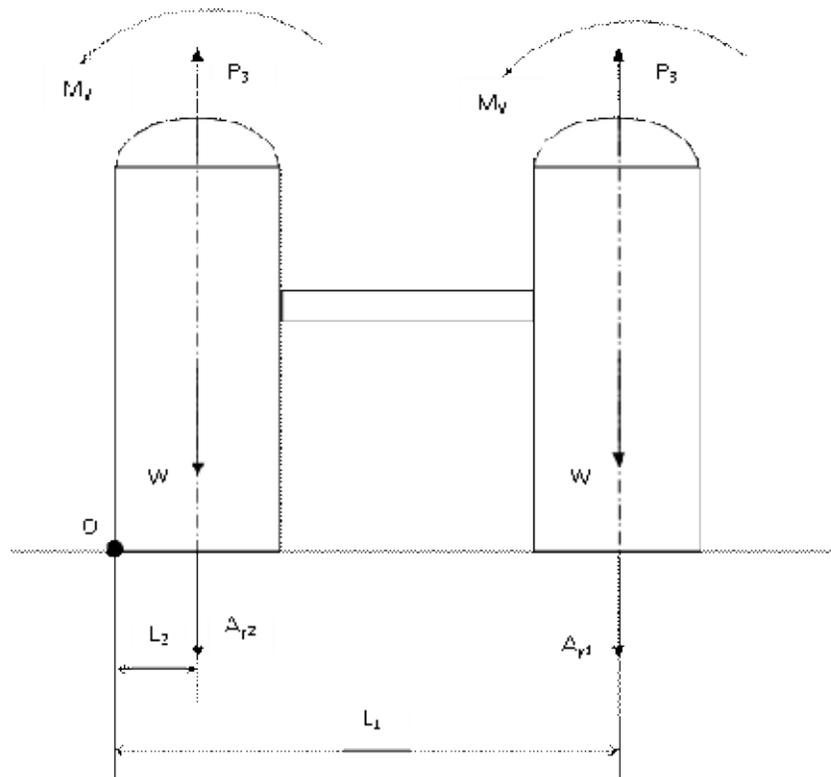


Figura 3.3 Sistema de cargas sobre una pareja de gasómetros

Durante la acción de vuelco de una pareja de gasómetros el conjunto se apoya en el punto O, pero en el gasómetro de la derecha se debe generar una reacción A_{y1} . Si esta fuerza fuera hacia arriba no hay posibilidad ninguna de vuelco, pero puede suceder que esa fuerza sea hacia abajo y entonces la misma sería de tracción sobre los tornillos y estos debían tener capacidad para soportarla.

Capítulo III

Planteando la ecuación de equilibrio de momentos con relación al punto O.

$$\sum M_O = 2M_V + P_3 \cdot L_2 + P_3 \cdot L_1 - W \cdot L_2 - W \cdot L_1 - A_{y2} \cdot L_2 - A_{y1} \cdot L_1 = 0 \quad (3.6)$$

Donde:

$$A_{y2} = A_{y1} \cdot \frac{L_2}{L_1}; \quad L_2 = \frac{D}{2}; \quad L_1 = \frac{D}{2} + l + D$$

$$A_{y1} = \frac{2M_V + P_3 \cdot L_2 + P_3 \cdot L_1 - W \cdot L_2 - W \cdot L_1}{L_1 + L_2}$$

$$A_{y1} = 500.2 \text{ kN}$$

Como se aprecia la reacción A_{y1} da positiva y es a favor de la dirección de la Figura 3.3. Esto implica que los tornillos de anclaje de ese gasómetro tendrían que ser capaces de soportar esa carga a tracción. Se verá a continuación qué diámetro efectivo tendrían que tener aún los tornillos corroídos para soportar esa carga, ya que son 24 tornillos. Según (Dobrovolski, 1991) para uniones roscadas pretensadas:

$$d = 1.29 \sqrt{\frac{A_y/24}{[\sigma]_t}} = 1.55 \text{ cm} \quad (3.7)$$

Donde:

$$[\sigma]_t = 0.4\sigma_f \text{ para tornillos de diámetro hasta 30 mm.}$$

$$\text{Para acero 45 } \sigma_f = 36 \text{ kN/cm}^2$$

$$[\sigma]_t = 14.4 \text{ kN/cm}^2$$

El diámetro efectivo de los tornillos es mucho menor que el de los tornillos nuevos, pero se requiere que tengan un diámetro efectivo de casi 15 mm y de la observación visual se aprecia que algunos tornillos están en el límite. Se recomienda entonces colocar algunos cables tensores que ayuden al conjunto a descargar aún más los tornillos.

3.4 Cálculo de Columnas Armadas

Las columnas armadas son elementos estructurales, construidos para soportar carga de compresión, las cuales están compuestas por dos o más perfiles laminados que están unidos entre sí por placas de unión o celosías. El objetivo de la construcción de las columnas armadas es el de elevar la racionalidad de las secciones transversales de las columnas empleando perfiles laminados normalizados, pero procurando que la sección

se asemeje, lo más posible a una sección de cajón de paredes delgadas en la cual el radio de giro sea el mismo con relación a los dos ejes centroidales principales de inercia. (Goytisoló R. 1999); (Solecki y Jay, 2003); (Den Hartog J.P. 1992).

Las secciones más usadas en las columnas armadas se muestran en la Figura 3.4

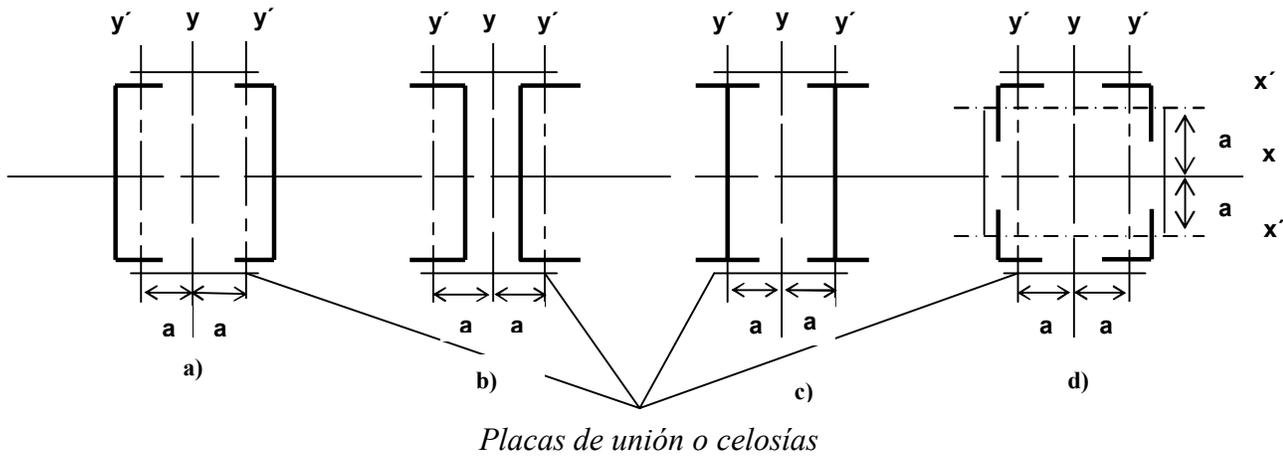


Figura 3.4 Secciones más usadas en las columnas armadas

Los perfiles se conectan entre sí mediante placas de unión o celosías. Las formas típicas de esta conexión se muestran en la Figura 3.5. Cuando se utiliza la celosía generalmente se emplean angulares para conformar la misma.

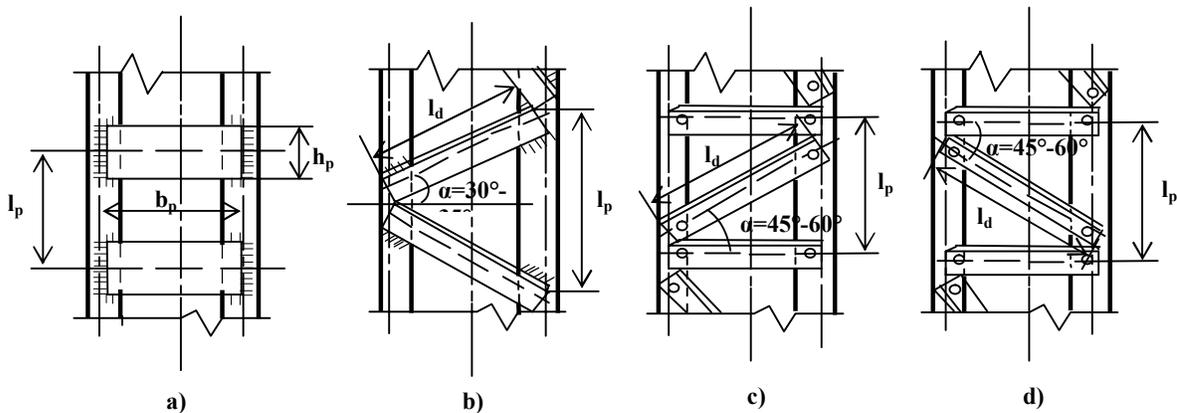


Figura 3.5 Formas de conexión entre los perfiles mediante placas de unión o celosías

Para el caso de las secciones compuestas por dos perfiles como los mostrados en las Figuras 3.4 a, b y c. Se tiene que

Capítulo III

$$i_x = \sqrt{\frac{2I_x}{2A}} = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad (\text{cm}) \quad (3.8)$$

Donde: $I_x - \text{cm}^4$ y $A - \text{cm}^4$ son el momento de inercia con relación al eje centroidal principal de inercia x y el área de la sección transversal de uno de los dos perfiles.

Con relación al eje y en este caso se cumple que:

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (\text{cm}) \quad (3.9)$$

Pero donde:

$$I_y = I'_y + A * a^2 \quad (\text{cm}^4) \quad (3.10)$$

Donde: $I'_y - \text{cm}^4$ es el momento de inercia de unos de los perfiles con relación a su eje centroidal principal de inercia y' y a la distancia entre los ejes y' e y .

Para el caso de las secciones compuestas por cuatro perfiles Figura 3.4 d), se cumple que:

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad (\text{cm}) \quad \text{donde} \quad I_x = I'_x + A * a^2 \quad , \quad (\text{cm}^4) \quad (3.11)$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (\text{cm}) \quad \text{donde} \quad I_y = I'_y + A * a^2 \quad , \quad (\text{cm}^4) \quad (3.12)$$

El cálculo se inicia eligiendo un perfil utilizando el método del coeficiente y de reducción de las tensiones admisibles.

Para columnas de dos perfiles

$$A \geq \frac{P}{2\phi[\sigma]_c} \quad (3.13)$$

Y para columnas de cuatro perfiles

$$A \geq \frac{P}{4\phi[\sigma]_c} \quad (3.14)$$

Se comienza el cálculo asumiendo $\phi = 0,7 \div 0,9$

En el caso de las columnas compuestas por dos perfiles, como se conoce el radio de giro de la columna completa con relación al eje X. O sea

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad (\text{cm}) \quad (3.15)$$

Se puede calcular la razón de esbeltez de la columna de este eje

$$\lambda_x = \frac{v_x L}{i_x} \quad (\text{cm}) \quad (3.16)$$

Capítulo III

L – Longitud de la columna y v_x – factor de relación de la longitud con relación al eje x y buscar en la Tabla de valores de $\varphi = f(\lambda)$ para el material de la columna y obtener el valor de φ' para el perfil seleccionado.

Si se cumple que:

$$\% dif = \left| \frac{\varphi - \varphi'}{\varphi} \right| * 100 \leq 6\% \quad (3.17)$$

El perfil elegido es adecuado

En caso contrario se asume un nuevo valor de

$$\varphi_1 = \frac{\varphi + \varphi'}{2} \quad (3.18)$$

Y se repite el proceso hasta obtener un perfil adecuado.

En el caso de columnas compuestas por 4 perfiles, para poder calcular las razones de esbeltez de la columna completa λ_x o λ_y , se hace necesario asumir los valores de a y a_1 (Figura 3.4 d) que nos permita calcular los momentos de inercia correspondientes y los radios de giro (expresión 3.11 y 3.12) y de esta manera podemos desarrollar el proceso de elegir el perfil a partir de la expresión (3.16) el cual se verá más adelante.

Para el perfil elegido debe comprobarse la razón de esbeltez en el plano donde la columna es armada o sea, por ejemplo, en el caso de columnas compuestas por dos perfiles, debe garantizar que la razón de esbeltez reducida con relación al eje y de toda la columna, sea menor o igual que λ_x

Para columnas con placas de unión (Figura 3.4 a), b), c) y Figura 3.5 a)

$$\lambda_{red} = \sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_p^2} \leq \lambda_x \quad (3.19)$$

Y para columnas con celosías por dos planos (Figura 3.4 a), b), c) y Figura 3.5 b), c), d)).

$$\lambda_{red} = \sqrt{\lambda_y^2 + \zeta_\alpha \frac{2A}{A_d}} \leq \lambda_x \quad (3.20)$$

En las expresiones (3.19) y (3.20) se tiene que:

$$\lambda_y = \frac{v_y L}{i_y} \quad (3.21)$$

L – Longitud de la columna

v_y - Factor de reducción de la longitud con relación al eje y

i_y – radio de giro con relación al eje y (expresión 3.9)

$$\lambda_p = \frac{l_p}{i_{min}} \tag{3.22}$$

Razón de esbeltez del tramo entre placas o entre celosías. Si se elige entre 30 a 40 para evitar la posible pérdida de la estabilidad local de estos tramos de las columnas.

l_p – longitud entre placas o celosías (Figura 3.5)

i'_{min} – radio de giro mínimo de uno de los perfiles de la columna

A – área de la sección transversal de uno de los perfiles de la columna

A_d – área de la sección transversal de las diagonales de las celosías

C_α – Coeficiente que depende de la inclinación de las diagonales de la celosía

Tablas 3.1 Valores de C_α			
α	30^0	40^0	$45^0 - 60^0$
C_α	45	31	27

De la condición que $\lambda_p = (30 \text{ a } 40)$, se puede calcular la longitud l_p máxima requerida y de las condiciones (3.19) o (3.20) se puede despejar el valor de **a** necesario.

Para las columnas de cuatro perfiles, después de elegido un perfil tentativamente debe verificarse para la razón de esbeltez λ_{red} que las tensiones de trabajo son menores que las admisibles. O sea

$$\sigma = \frac{P}{4A} \leq \varphi[\sigma]_c \tag{3.23}$$

Donde φ se halla de la tabla de valores de φ correspondientes para la razón de esbeltez reducida λ_{red} .

$$\lambda_{red} = \sqrt{\lambda^2 + 4A \left(\frac{C_{\alpha 1}}{A_{d1}} + \frac{C_{\alpha 2}}{A_{d2}} \right)} \tag{3.24}$$

En la expresión (3.24)

λ es la mayor razón de esbeltez de la columna entre las razones λ_x y λ_y . Donde

$$\lambda_x = \frac{v_x L}{i_x} \text{ y } \lambda_y = \frac{v_y L}{i_y} \tag{3.25}$$

Donde C_x e i_y se calculan por las expresiones (3.11) y (3.12)

A – Área de la sección transversal de uno de los perfiles de la columna

A_{d1} y A_{d2} – Área de las secciones transversales de las diagonales de las celosías en los planos perpendiculares al eje x y al eje y respectivamente.

Capítulo III

$C_{\alpha 1}$ y $C_{\alpha 2}$ – Coeficientes que dependen de de la inclinación de la diagonal en cada plano (Tabla 3.1)

El cálculo de las placas de unión y de las celosías se realiza partiendo del supuesto que el pandeo de la columna genera una fuerza transversal ficticia Q que se calcula por las siguientes expresiones.

Para acero de bajo carbono $Q = 20A_t \quad \text{kgf} \quad (3.26)$

Para acero de medio carbono o de baja aleación $Q = 40A_t \quad \text{kgf} \quad (3.27)$

Donde A_t es igual al arco de la sección transversal de la columna completa en cm^2 .

El esquema de análisis para el cálculo de las placas de unión es el siguiente:

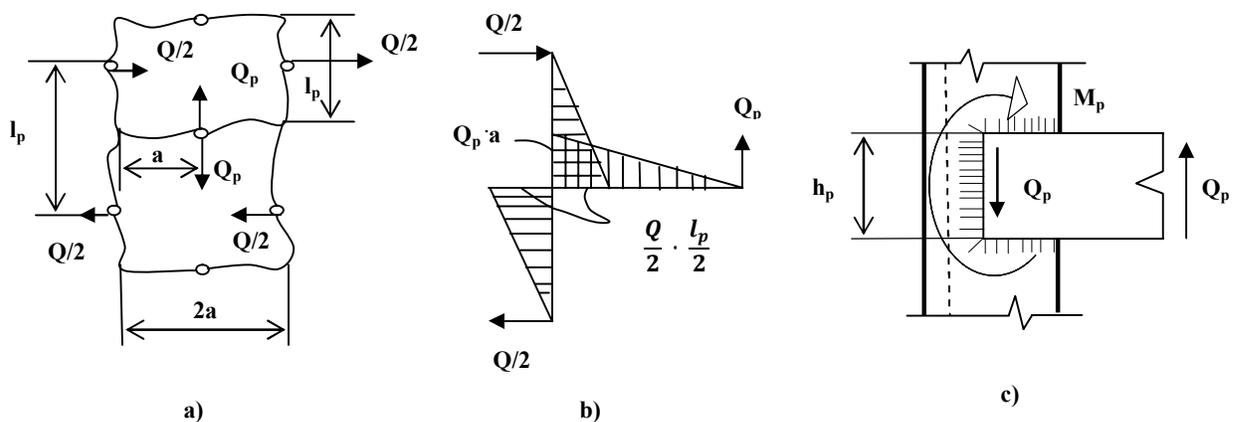


Figura 3.6 Esquema de análisis para el cálculo de placas de unión

La placa de unión soporta una fuerza de cortante Q_p y un momento flector M_p , cuyos valores son:

$$\sum M_0 = Q_p * a - 2 \frac{Q}{2} * \frac{l_p}{2} = 0$$

$$Q_p = \frac{Q * l_p}{2a} \quad \text{Kgf} \quad (3.28)$$

y

$$M_p = Q_p * a = \frac{Q * l_p}{2} \quad \text{Kgf-cm} \quad (3.29)$$

Donde:

Q es la fuerza transversal ficticia calculada por las expresiones (3.26) y (3.27) en Kgf

l_p – distancia entre placas en cm

a – distancia entre el centroide del perfil y el centroide de la columna en cm

La resistencia de la placa se comprueba a flexión o sea

$$\sigma_p = \frac{M_p}{W_p} \leq [\sigma]_t \tag{3.30}$$

$$W_p = \frac{1}{6} S_p * h_p^2 \tag{5.134}$$

S_p – espesor de la placa en cm, h_p – altura de la placa en cm

La soldadura se comprueba a la combinación de tensiones provocada por el momento flector y por la fuerza de cortante. En el cálculo se considera a modo simplificación solo el cordón vertical.

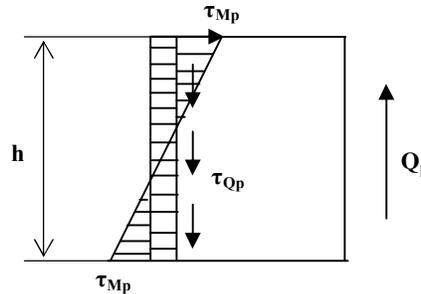


Figura 3.7 Tensiones en el cordón de soldadura

$$\tau_{Qp} = \frac{Q_p}{0,7 * C * h_p^2} = \frac{Q * l_p}{1,4 a * c * h_p} \tag{3.31}$$

$$\tau_{Mp} = \frac{M_p}{\frac{1}{6} * 0,7 * C * h_p^2} = \frac{6 Q l_p}{0,7 * C * h_p^2} \tag{3.32}$$

La tensión resultante debe ser menor que la admisible de la soldadura

$$\tau_r = \sqrt{\tau_{Qp}^2 + \tau_{Mp}^2} \leq [\tau]_s \tag{3.33}$$

En el caso de las celosías, el esquema de análisis es el mostrado en la figura 3.8.

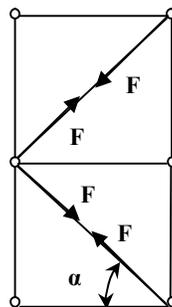


Figura 3.8 Esquema de análisis en el caso de celosías

La fuerza transversal Q genera sobre el elemento diagonal de la celosía una fuerza F_d

$$F_d = \frac{Q}{2 \text{sen} \alpha} \text{kgf} \tag{3.34}$$

Y para esa fuerza debe cumplirse que

$$\sigma = \frac{F_d}{A_d} \leq \varphi [\sigma]_c \tag{3.35}$$

Capítulo III

Donde ϕ se haya de la tabla de valores de ϕ para la razón de esbeltez

$$\lambda_d = \frac{l_d}{l_{min_d}} \quad (3.36)$$

En las celosías generalmente se emplean angulares y las soldaduras se calculan entonces como:

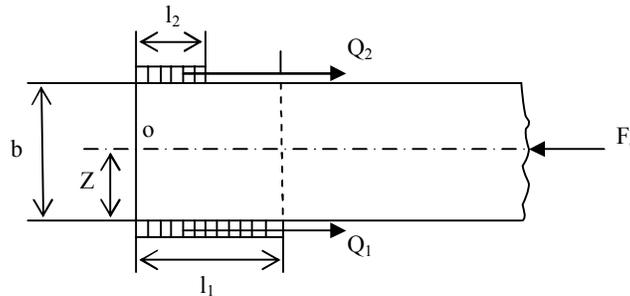


Figura 3.9 Fuerzas sobre los cordones en caso de celosías

Por sumatoria de momentos con relación a O en la Figura 3.9

$$Q_1 * Z_0 = Q_2(b - z_0) \quad (3.37)$$

Y por sumatoria de fuerzas

$$Q_1 + Q_2 = F_d \quad (3.38)$$

De donde:

$$Q_1 = F_d * \left(\frac{b * z_0}{b}\right) \text{kgf} \quad (3.39)$$

$$Q_2 = F_d * \left(\frac{z_0}{b}\right) \text{kgf} \quad (3.40)$$

Las tensiones tangenciales en los cordones debe ser menor que la admisible para la soldadura.

$$\tau_1 = \frac{Q_1}{0.7 * c * l_1} \leq [\tau]_s \quad (3.41)$$

$$\tau_2 = \frac{Q_2}{0.7 * c * l_2} \leq [\tau]_s \quad (3.42)$$

3.5 Cálculo de la columna armada de la estructura rigidizadora de los gasómetros

3.5.1 Comprobación de la resistencia de los perfiles canales

Para esta columna armada se asumen dos vigas canal Perfil N°30

Datos de Viga Canal N°30 (Ver tabla de la página 579 Feodosiev)

- $h = 300 \text{ mm} = 30\text{cm}$
- $b = 100 \text{ mm} = 10\text{cm}$

Capítulo III

- $A = 40,5 \text{ cm}^2$
- $i_x = 12 \text{ cm}$
- $I'_y = 327 \text{ cm}^4$
- $i_y = 2,84 \text{ cm}$

$$i_y = \sqrt{\frac{I'_y}{A}} = 20,20 \text{ cm} \quad I_y = I'_y + A * a^2 = 16527 \text{ cm}^4 \text{ donde } a = 12 \text{ m}$$

$$A \geq \frac{P}{2\varphi[\sigma]_c} \quad \text{donde: } P = N_1 = 755,8 \text{ kN}; \varphi = 0,53, [\sigma]_c = 21 \text{ kN/cm}^2$$

$$A \geq 32,13 \text{ cm}^2$$

$40,5 \text{ cm}^2 \geq 32,13 \text{ cm}^2$ Por lo tanto se cumple esa condición

3.5.2 Cálculo de la razón de esbeltez de la columna en el eje x

$$\lambda_x = \frac{v_x L}{i_x} = 108,33 \quad \text{Donde: } v_x = 1, L = 1300 \text{ cm}$$

$$\% \text{ dif} = \left| \frac{\varphi - \varphi'}{\varphi} \right| * 100 \leq 6\%$$

$4,76\% \leq 6\%$ Se cumple por lo tanto el perfil seleccionado es adecuado

Donde:

$$\varphi' = 0,533 \text{ (Ver tabla 12 Feodosiev pág. 459)}$$

$$\lambda_{red} = \sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_p^2} \leq \lambda_x$$

$$\lambda_{red} = 108,26$$

$$108,26 \leq 108,33$$

Donde:

$$\lambda_y = \frac{v_y L}{i_y} = 105,42$$

$$\lambda_p = \frac{l_p}{i_{min}} = 24,65 \text{ donde: } l_p = 70 \text{ cm}; i_{min} = 2,84 \text{ cm}$$

Para acero de bajo carbono

$$Q = 20A_t$$

$$Q = 1620 \text{ kgf para } A_t = 2 * A = 81 \text{ cm}^2$$

$$Q_p = \frac{Q * l_p}{2a} = 810 \text{ kgf} = 15,89 \text{ kN} \text{ Donde } l_p = 70 \text{ cm}; a = 12 \text{ cm}$$

$$M_p = Q_p * a = 556,23 \text{ kNcm}$$

$$\sigma_p = \frac{M_p}{W_p} \leq [\sigma]_t W_p = \frac{1}{6} S_p * h_p^2 = 104,17 \text{ cm}^3 \text{ Donde } S_p = 1 \text{ cm}; h_p = 25 \text{ cm}$$

Capítulo III

$$\sigma_p = 5,34 \text{ kN/cm} \leq [\sigma]_t \text{ Donde: } [\sigma]_t = 8 \text{ kN/cm}^2$$

$$5,34 \text{ kN/cm}^2 \leq 8 \text{ kN/cm}^2$$

Se cumple la condición de resistencia

3.5.3 Comprobación de la soldadura

$$\tau_{Qp} = \frac{Q_p}{0,7 * C * h_p^2} = \frac{Q * l_p}{1,4 a * C * h_p^2} = 1,09 \text{ kN/cm}^2 \text{ Donde } c = 1 \text{ cm; } h_p \text{ (soldadura)} = 61 \text{ cm}$$

$$\tau_{Mp} = \frac{M_p}{\frac{1}{6} * 0,7 * C * h_p^2} = \frac{6 Q l_p}{0,7 * C * h_p^2} = 1,28 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_r = \sqrt{\tau_{Qp}^2 + \tau_{Mp}^2} \leq [\tau]_s [\tau]_s = 4 \text{ kN/cm}^2$$

$$1,68 \text{ kN/cm}^2 \leq 4 \text{ kN/cm}^2$$

Se cumple la condición de resistencia

3.6 Cálculo del Cable Tensor

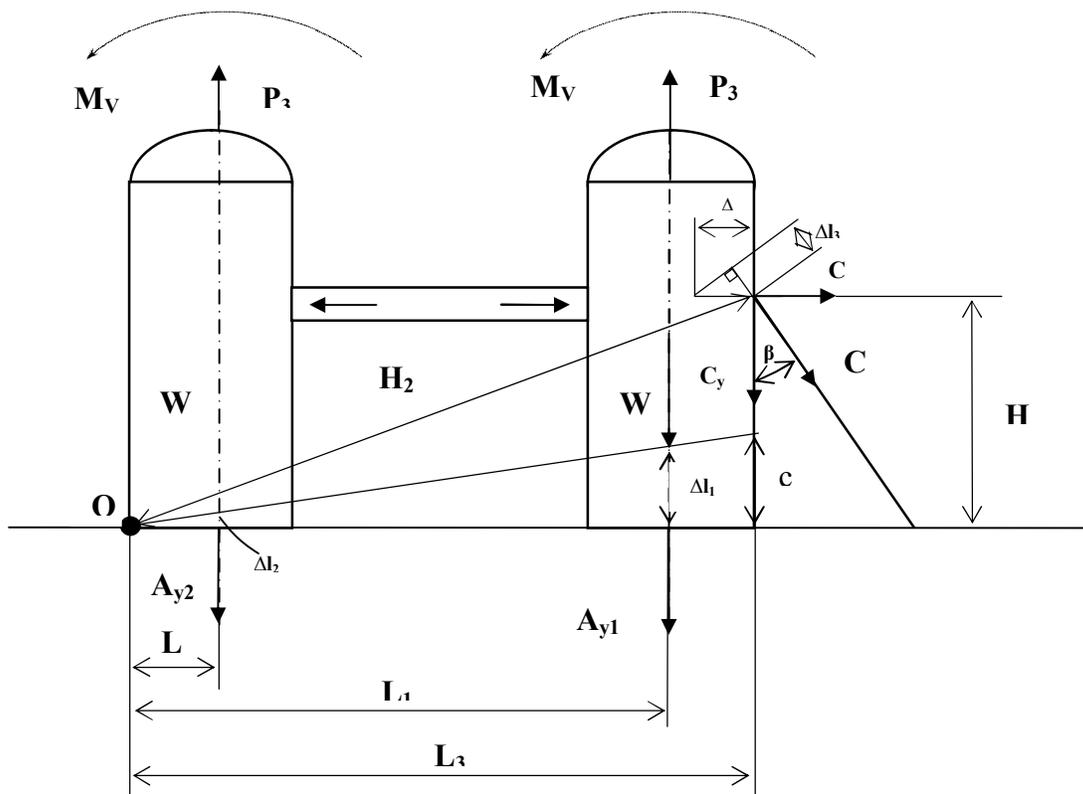


Figura 3.10 Esquema de fuerzas sobre dos gasómetros contiguos incluyendo el cable

Capítulo III

Del esquema de análisis anterior se obtiene la siguiente ecuación

$$\sum M_O = 2 * M_v + P_3 * L_2 + P_3 * L_1 - W * L_2 - W * L_1 - A_{y_1} * L_1 - A_{y_2} * L_2 - C * H_2 = 0 \quad (3.43)$$

$$2 * M_v + P_3 * (L_2 + L_1) - W * (L_2 + L_1) = A_{y_1} * L_1 + A_{y_2} * L_2 + C * H_2$$

$$2 * M_v + P_3 * (L_2 + L_1) - W * (L_2 + L_1) = A_{y_1} * L_1 + A_{y_1} * \frac{L_2^2}{L_1} + C * H_2$$

$$2 * M_v + P_3 * (L_2 + L_1) - W * (L_2 + L_1) = A_{y_1} * L_1 + A_{y_1} * \frac{L_2^2}{L_1} + \frac{A_{y_1} * l_T * A_c * \cos \beta * H_2^2 * H}{A_t * L_1 * l_c}$$

$$A_{y_1} = \frac{2 * M_v + P_3 * (L_2 + L_1) - W * (L_2 + L_1)}{L_1 + \frac{L_2^2}{L_1} + \frac{l_T * A_c * \cos \beta * H_2^2 * H}{A_t * L_1 * l_c}} \quad (3.44)$$

$$A_{y_1} = 207,93 \text{ kN}$$

Datos:

E_c ----- (Módulo de elasticidad del cable)

E_t ----- (Módulo de elasticidad de los tornillos)

$M_v = 16225.91 \text{ kN*m}$

$P_3 = 47.11 \text{ kN}$

$W = 1290.97 \text{ kN}$

$D = 3\text{m}$ ----- (Diámetro exterior de los gasómetros)

$H = 19\text{m}$

$l = 13\text{m}$ ----- (Longitud de la columna armada)

$l_t = 1.2\text{m}$ ----- (Longitud de de tornillos)

$L_2 = D/2 = 1.5\text{m}$

$L_1 = D + D/2 + l = 17.5\text{m}$

$L_3 = 2D + l = 19 \text{ m}$

$$\cos \beta = \frac{H}{l_c} \quad (\text{Ver figura 3.11}) \quad (3.45)$$

Se despeja l_c en la expresión 3.45

$$l_c = \frac{H}{\cos 15^\circ}$$

$$l_c = 19.67m \quad (\text{Longitud del cable})$$

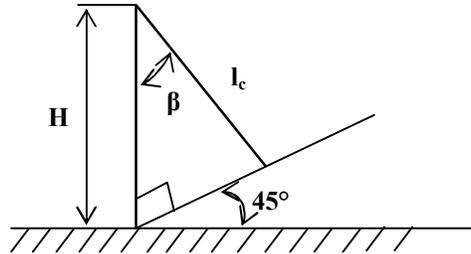


Figura 3.11 Cálculo de la longitud del cable tensor

$$H_2 = \sqrt{L_3^2 + H^2} \quad (3.46)$$

$$H_2 = 26.87m$$

$$\frac{A_{y2}}{A_{y1}} = \frac{l_2}{l_1} \quad (3.47)$$

Despejando A_{y2} en la expresión 3.47

$$A_{y2} = A_{y1} * \frac{l_2}{l_1}$$

$$A_t = 24 * \frac{\pi * (d_t)^2}{4} = 4.71cm^2 = 0.000471m^2 \quad (3.48)$$

Se asume que los tornillos sólo tendrán un diámetro efectivo de $d_t = 0.5cm$, suponiendo que los cables van a soportar los gasómetros.

$$A_c = \frac{\pi * (d_c)^2}{4} = \pi cm^2 = \frac{\pi}{10000} m^2 \quad \text{donde } d_c = 2 cm \quad (3.49)$$

$$\frac{\Delta l_1}{L_1} = \frac{\Delta}{H} \quad (3.50)$$

donde

$$\Delta = \frac{\Delta l_3}{\cos \beta} \quad (3.51)$$

$$\Delta l_3 = \frac{C * l_c}{E_c * A_c} \quad (3.52)$$

$$\Delta l_1 = \frac{A_{y1} * l_t}{E_t * A_t} \tag{3.53}$$

Despejando las expresiones (3.51), (3.52) y (3.53) se obtiene:

$$\frac{\Delta l_1}{L_1} = \frac{\frac{\Delta l_3}{\cos \beta}}{H}$$

$$\frac{A_{y1} * l_t}{E_t * A_t * L_1} = \frac{C * l_c}{E_c * A_c * \cos \beta * H} \quad \text{donde } E_t = E_c \text{ (aceros)}$$

$$\frac{A_{y1} * l_t}{A_t * L_1} = \frac{C * l_c}{A_c * \cos \beta * H}$$

$$C = \frac{A_{y1} * l_t * A_c * \cos \beta * H}{A_t * L_1 * l_c} = 8,87 \text{ kN} \tag{3.54}$$

3.7 Cálculo del zuncho

Tentativamente se elige un espesor del zuncho $h = 2 \text{ cm}$ para poder calcular el peso propio del zuncho y las columnas armadas en Autodesk Inventor, se eligió uno de los gasómetros intermedios por contener el mayor número de barras, tres barras como se observa en la Figura 3.11. Una de 13m y las otras de 5m, solo se considerará el peso de la mitad de las columnas ya que estas estarán entre dos apoyos, (dos zunchos).

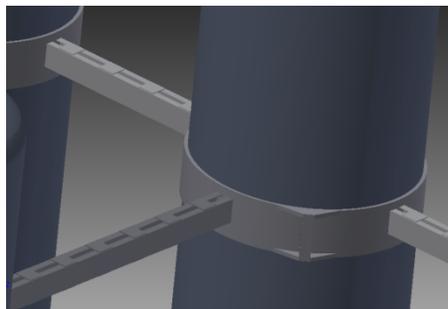


Figura 3.11 Esquema para el cálculo de la carga que debe soportar un zuncho a fricción

- **Cálculo de la masa y peso total de las vigas y el zuncho**

$$M_t = M_{v6.5} + M_{v2.5} + M_{v2.5} + M_s \tag{3.55}$$

$$M_t = 495.1 + 190.42 + 190.42 + 1064.92$$

$$M_t = 1940.86 \text{ Kgf}$$

$$M_t = 19039.84 \text{ N} = 19,04 \text{ kN}$$

Donde:

$$M_{v6.5} = 495.1 \text{ Kgf} \quad \text{Masa de una viga de 6.5 m}$$

Capítulo III

$M_{v2.5} = 190.42$ Kgf Masa de una viga de 6.5 m

$M_s = 1064.92$ Kgf Masa del suncho de sujeción

- **Cálculo de la fuerza necesaria para que el zuncho no se deslice**

$$N = \frac{Mt \cdot 1.5}{f} \quad (3.56)$$

$$N = 142,8 \text{ kN}$$

Donde:

$f = 0.2$ Coeficiente de fricción (acero-acero)

Se toma 1.5 como factor de seguridad

- **Cálculo de la fuerza máxima admisible sobre los tornillos**

$$P = p_{ap_{max}} \cdot d \cdot l \cdot \frac{\pi}{4} \text{ (Birger, 1966)} \quad (3.57)$$

$$p_{ap_{max}} = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot l} \leq [\sigma]_{ap} \quad (3.58)$$

Despejando P en la expresión 3.58

$$P \leq \frac{[\sigma]_{ap} \pi \cdot d \cdot l}{4} = 2P_t$$

$$P_t = \frac{[\sigma]_{ap} \pi \cdot d \cdot l}{8} > N \text{ donde } [\sigma]_{ap} = 2[\sigma]_t = 16 \text{ kN/cm}^2$$

$$P_t = 94247,78 \text{ kN} > 142,8 \text{ kN}$$

Siendo $[P_t]$ mayor que N se cumple la condición de resistencia

- **Cálculo de la $p_{ap_{max}}$:**

Empleando la expresión 3.57 se obtiene que:

$$p_{ap_{max}} = \frac{4 \cdot N}{\pi \cdot d \cdot l} = 0.012 \text{ kN/cm}^2$$

Donde:

$d = 300$ cm Diámetro interior del suncho

$l = 50$ cm Longitud del suncho

- **Cálculo del espesor mínimo del suncho**

$$h \geq \frac{p_{ap_{max}} \cdot d}{2[\sigma]_t} \quad (3.59)$$

Capítulo III

$$h \geq 0,225 \text{ cm}$$

$$\text{Donde: } [\sigma]_t = 8 \text{ kN/cm}^2$$

El valor admisible del espesor (h) es 0.225 cm y el elegido para el diseño 2cm por tanto resiste. Partiendo de esta condición recalculamos $p_{ap_{max}}$ con espesor $h=2$ cm.

Se recalcula $p_{ap_{max}}$

$$p_{ap_{max}} = \frac{[\sigma]_t * h}{R} \quad \text{Donde } R = 150 \text{ cm} \quad (3.60)$$

$$p_{ap_{max}} = 0,11 \text{ kN/cm}^2$$

Con esta $p_{ap_{max}}$ calculamos P en la expresión 3.57:

$$P = \frac{p_{ap_{max}} * \pi * d * l}{4}$$

$$P = 1295,9 \text{ kN}$$

- **Cálculo del diámetro mínimo necesario de los tornillos**

La carga máxima sobre el tornillo (P_0) va a tomar en cuenta el efecto del pretensado previo que la incrementa en un 20 %. Además se divide en 8 ya que el suncho va a tener 4 tornillos por cada lado.

$$P_0 = 0,2 * \frac{P}{2} + \frac{P}{2} = 777,54 \text{ kN}$$

Empleando la expresión 2.6 se obtiene que:

$$d \geq 1,287 \sqrt{\frac{P_0/8}{[\sigma]_t}}$$

$$d \geq 2,71 \text{ cm}$$

$$d \approx 3 \text{ cm} = 30 \text{ mm}$$

3.8 Cantidad de materiales a emplear en la ejecución de la estructura rigizadora

El costo total de los materiales se determina teniendo en cuenta el precio de adquisición, su peso específico y el consumo de unidades. En la Tabla 3.1 se dan estos gastos.

Tabla 3.2 Cantidad de materiales			
Componentes	Material	Long (m) o area (m²)	Peso bruto (t)
Viga canal n° 30	Ac. 30	164 m	5,22
Planchas = 100 mm 50x240x1200	Ac. 30		
Planchas = 200 mm 30x240x1200	Ac. 30		
Cable d = 20 mm		158 m	

3.9 Análisis del Costo de fabricación y montaje de la estructura rigidizadora de los Gasómetros de Hidrógeno de la Refinería de Petróleo "Camilo Cienfuegos"

Componentes del Costo de Fabricación y Montaje

El costo de fabricación y montaje de una Instalación cualquiera, es la expresión monetaria de los gastos de ejecución de la misma, es decir los gastos en que la Empresa incurre durante su fabricación y el montaje. La determinación y evaluación de este costo facilita los análisis para las posibles soluciones a un diseño determinado, permitiendo la toma de decisiones a la alta Dirección para evaluar su realización.

Es importante para el diseñador, tener en cuenta en su propuesta, los gastos en que debe incurrir la Empresa, a partir de la situación actual del mercado, para la ejecución del trabajo, que le permita incorporar en sus planes de mantenimiento o de inversión el valor de la fabricación y el montaje de la estructura rigidizadora de los gasómetros de la Refinería de Petróleo de Cienfuegos.

Para la determinación del costo de fabricación y montaje se tuvieron en cuenta los precios actuales de los materiales e insumos del proceso de fabricación y montaje; los

costos de la mano de obra y equipos; los costos directos e indirectos de la fabricación y el montaje; y otros presupuestos independientes usados en la actualidad.

Para la determinación del costo de fabricación y montaje de la estructura rigidizadora se usó el Sistema Presupuestario de la Construcción en Cuba (PRECONS II) y se usaron las tablas mecánicas para la determinación del peso específico de los laminados.

El costo de fabricación y montaje consta de los siguientes elementos:

- Costo de los materiales e insumos para la fabricación y el montaje
- Costo de la mano de obra necesaria para la realización de los trabajos
- Costo del uso de equipos de la construcción
- Otros costos directos de obra que incluyen los costos de transferencia de materiales, los costos del trabajo técnico y especializado y otros costos incluidos en este acápite.
- Costos indirectos de Empresa
- Costos de los presupuestos independientes asociados a la alimentación y el transporte de los trabajadores que realizan los trabajos y otros gastos que se incluyen en esta partida.

Gastos en materiales durante la ejecución

Este elemento del costo es uno de los más importantes y determinantes para la realización de los trabajos. Para determinar el precio de los materiales se calculó la cantidad de vigas y planchuelas necesarias para el trabajo y usando las tablas mecánicas se determinó el peso en toneladas, así como las necesidades de electrodos, discos de corte y desbaste y gases industriales. El precio de estos materiales e insumos se determinó usando los precios actuales de ACINOX, la Empresa de Gases Industriales y la Comercializadora Almacenes Universales.

Tabla 3.3 Gasto en materiales						
Material	U/m	Cant.	Peso en kg	Peso total en ton	Precio x ton/u	Importe total
Viga canal de 300 mm	M	164	31,8	5,22	1.508,69	7.868,12
Plancha de acero al carbono de 250x240x10 mm	U	228	4,71	1,07	1.422,56	1.527,66
Planchas de acero al carbono 5400x500x20 mm	U	16	417	6,67	1.422,56	9.491,32
Electrodos e-7018 de 4 mm	Kg	120			1,80	216,00
Costo de materiales directos						19.103,10

Dentro de estos costos serán incluidos también aquellos que serán generados por la soldadura y corte del material.

Tabla 3.4 gastos en materiales de soldadura				
Material	U/m	Cant.	Precio unitario	Importe total
Oxígeno industrial	M ³	66,7	1,66	110,72
Acetileno	M ³	68	9,51	646,68
Disco de corte de 180 mm	U	10	1,65	16,50
Disco de desbaste de 180 mm	U	20	1,89	37,80
Costo de total de insumos				811,70

El importe total de los materiales e insumos del proceso de fabricación y montaje de la estructura rigidizadora de los gasómetros de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” asciende a **19. 914,80 pesos**.

Gastos en Salarios

El gasto en salarios se calculó sobre las normas de tiempo establecidas en el Sistema Presupuestario de la Construcción (PRECONS II) que incluyen los incrementos de salario, los aportes al presupuesto del Estado y el 9.09 % de acumulado de vacaciones.

En la Tabla 3.5 se muestran estos gastos.

Tabla 3.5 Gastos en salarios				
Calificación	U/m	Cantidad	Precio unitario	Importe
Ayudante de construcción del grupo salarial II	hh	1002,24	\$3,05	\$3.056,85
Armador de estructuras del grupo salarial V	hh	310,14	\$3,59	\$1.114,01
Carpintero encofrador del grupo salarial V	hh	0,15	\$3,59	\$0,54
Mecánico de mantenimiento del grupo salarial IX	hh	487,47	\$4,23	\$2.064,06
Pailero del grupo salarial VI	hh	684,57	\$3,63	\$2.487,32
Soldador del grupo salarial VII	hh	909,45	\$2,93	\$2.664,69
Soldador del grupo salarial VI	hh	255,20	\$3,80	\$969,55
Importe total				\$12 357,01

Costos de Equipos

El costo de equipos se calculó sobre la base del Sistema Presupuestario de la Construcción, cuyas tarifas incluyen el gasto de salario de los operadores con sus incrementos, los gastos de combustibles, los gastos de amortización y otros gastos indirectos como grasas, lubricantes, etc.

Tabla 3.6 Gastos de equipos				
Tipo de equipo	U/m	Cant.	Precio unit.	Importe
Camión plancha 3.1-4.0 ton	he	6,34	\$14,58	\$92,38
Remolque plataforma p/barra de tiro de 5.0-10 ton	he	1,30	\$2,14	\$2,80
Cuña tractora 9.0-13.0 ton	he	1,30	\$28,68	\$37,43
Grúa de izaje sobre camión de 3-8 ton	he	1,30	\$16,77	\$21,89
Grua de izaje sobre camión de 9-14 ton	he	12,03	\$20,63	\$248,30
Soldador eléctrico arco por transformador 70-390 amperes	he	1164,65	\$6,78	\$7.896,33
Importe total				\$8.299,13

Costo total del servicio de fabricación y montaje de la estructura rigidizadora de los gasómetros.

Para calcular el costo total se tuvieron en cuenta los gastos directos conformados por las partidas costos de materiales, costo de mano de obra y costos de equipos y se adicionaron otros gastos directos que incluyen la transferencia horizontal y vertical, los servicios técnicos y otros gastos en que incurre la ejecución de los trabajos. Estos gastos representan el 18 % de los costos directos.

Se calcularon los gastos indirectos de los trabajos, que incluyen los gastos de Empresa y representan el 12 % de los costos directos de los trabajos de fabricación y montaje.

Se calculó como gastos los servicios a los trabajadores que realizan los trabajos e incluyen la alimentación, la transportación diaria al área de los trabajos y otros gastos en que incurre la Empresa que realiza el Servicio, que son alrededor del 24 % del costo directo de los trabajos.

Se incluyó además el 20 % de utilidad si los servicios son contratados a un tercero.

En la Tabla 3.6 se muestran estos gastos.

Tabla 3.6 gastos totales en la ejecución de los trabajos	
Costos directos de obra	\$40.570,94
Gastos directos de obra (18 %)	\$7.302,77
Costos indirectos (12 %)	\$4.868,51
Presupuestos independientes (24 %)	\$9.737,03
Utilidad (20 %)	\$8.114,19
Precio total de los trabajos	\$70.593,43

Este costo es realmente insignificante. Cada gasómetro está valorado en más de un millón de USD, solamente en acero, teniendo en cuenta que el acero más barato cuesta más de 2 000 USD/t y cada gasómetro pesa 130 t el valor del gasómetro es mayor que un cuarto de millón de pesos, más los enormes gastos de fabricación, transportación etc., hacen que la inversión más que rentable es necesaria.

3.10 Conclusiones Parciales del Capítulo III

1. Se calculó la fuerza de compresión que soporta la columna rigidizadora entre dos gasómetros contiguos en el plano de mayor separación entre los gasómetros que es cuando el viento incide desde el sur y se logró diseñar una columna armada con dos vigas canales No. 30 armada con placas de unión que garantiza no se pierda la estabilidad del equilibrio de ese elemento durante la acción del huracán.
2. Se evaluó el posible vuelco de dos gasómetros contiguos y se concluyó que para evitar el vuelco del conjunto los tornillos de anclaje del gasómetro posterior tienen que soportar una carga que hace que se mantenga el riesgo.
3. Se concluye por lo tanto que además de la estructura rigidizadora hay que ponerle 8 cables tensores a la misma.

4. El costo total de fabricación de la estructura rigidizadora con los cables tensores es de: 70.593,43 pesos. Este costo es realmente insignificante. Cada gasómetro está valorado es más de un millón de USD y son ocho gasómetros. Solamente en acero, teniendo en cuenta que el acero más barato cuesta más de 2 000 USD/t y cada gasómetro pesa 130 t el valor del gasómetro es mayor que un cuarto de millón de pesos, más los enormes gastos de fabricación, transportación etc., hacen que la inversión más que rentable es necesaria, a lo que hay que sumarle lo más importante lo catastrófica que sería una avería.

Conclusiones generales

1. De la revisión bibliográfica realizada se lograron localizar todas las Normas existentes en Cuba que establecen metodologías para calcular las fuerzas del viento sobre las construcciones civiles e industriales. Partiendo de dichas normativas se calcularon las presiones que actúan sobre los gasómetros de la Refinería de Petróleo "Camilo Cienfuegos" y se ajustó esa función para mediante su integración obtener el momento que trata de volcar los gasómetros en caso de un huracán de gran intensidad.
2. Se concibió una estructura rigidizadora que conecta entre sí a todos los gasómetros (ver Anexo A) y se logró diseñar una columna armada formada por dos canales No. 30 que se calculó a la esbeltez con la mayor longitud posible entre los gasómetros (13 m) suponiendo vientos provenientes del sur. Esa columna se puede utilizar como elemento de conexión rigidizador entre todos los gasómetros ya que en el otro plano la separación es menor (5 m)
3. Se calculó la fuerza de compresión que soporta la columna rigidizadora entre dos gasómetros contiguos en el plano de mayor separación entre los gasómetros que es cuando el viento incide desde el sur y se logró diseñar una columna armada con dos vigas canales No. 30 unidas entre sí con placas de unión garantizando que no se pierda la estabilidad del equilibrio de ese elemento durante el huracán.
4. Se evaluó el posible vuelco de dos gasómetros contiguos y se concluyó que para evitar el vuelco del conjunto los tornillos de anclaje del gasómetro posterior tienen que soportar una carga que al estar muy corroídos hace que su resistencia pueda estar comprometida. Se concluye por lo tanto que además de la estructura rigidizadora hay que ponerle ocho cables tensores.
5. El costo total de fabricación de la estructura rigidizadora con los cables tensores es de: 70.593,43 pesos. Este costo es realmente insignificante. Cada gasómetro está valorado es más de un millón de USD y son ocho gasómetros. Solamente en acero, teniendo en cuenta que el acero más barato cuesta más de 2 000 USD/t y cada gasómetro pesa 130 t el valor del gasómetro es mayor que un cuarto de millón de pesos, más los enormes gastos de fabricación, transportación

etc., hacen que la inversión más que rentable es necesaria, a lo que hay que sumarle lo más importante lo catastrófica que sería una avería.

Recomendaciones

1. Continuar la investigación diseñando cuatro patas suplementarias para cada gasómetro para impedir el vuelco, para el caso que los pernos de anclaje continúen agravando su estado de corrosión.
2. Realizar las comprobaciones ultrasónicas de las uniones soldadas de los gasómetros para evaluar su estado en las condiciones actuales.

Bibliografía

- Beer F.P., Jonhston E.R. (1993). *Mecánica de los Materiales* (2º ed.). Colombia: Mc Graw – Hill.
- Birger J.A., Schorr B.F., Schneiderovhich R.M. (1966). *Cálculo de la resistencia de las piezas de máquinas*. Moscú: Mashinostroenie.
- Den Hartog J.P. (1992). *Advanced Strength of Materials*. New York: Mc Graw: Hill Book Company,
- Dobrovolski V. (1991). *Elementos de Máquinas*. Moscú: MIR.
- Faires V.M. (1985). *Diseño de Elementos de Máquinas*. Editorial UTEHA.
- Feodosiev, V. I. (1985). *Resistencia de Materiales* (Tercera Edición.). Moscú: MIR.
- Fitzgerald F. (1996). *Mecánica de Materiales*. México: Alfaomega S.A. de C.V.
- Fogiel M. (1988). *Problem solver in Strength of Materials and Mechanics of Solids*. New Jersey: REA.
- Goytisoló R. (1999). *Resistencia de Materiales Avanzada*.
- Goytisoló R. (1999). *Resistencia de Materiales Superior*.
- Hernández Delgado, P. y Blanco Heredia, R. (2013). Criterio para el diseño de estructuras resistentes a huracanes. Presented at the Criterio para el diseño de estructuras resistentes a huracanes. Cienfuegos.
- Ivanov, M. N. (1991). *Elementos de Máquinas*. Moscú: Vichaya Schkola.
- Laschinnski, A. (1983). *Construcción de aparatos químicos soldados. Manual del Ingeniero*. Moscú.: Eneshtorgizdat.
- Mc Cabe W.L. et al. (1998). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Madrid.: Mc. Graw Hill.
- Mijalev. (1986). *Cálculos y diseño de máquinas y aparatos de la industria química*. GIZDAT.
- Mott R.L. (1996). *Resistencia de Materiales Aplicada*. México: Prentice- Hall.

Norma Cubana 285. (2003). Carga de Viento. Método de cálculo.

Orlov, P. (1985). *Ingeniería del Diseño*. Moscú: Editorial MIR.

Osita D. Yildirin H. (2002). *Mechanical Systems Design Handbook*. New York.: CRC Press.

Pankratz T.M. (2001). *Environmental engineering dictionary and directory*. Boca de Ratón, Florida.: Lewis Publishers. CRC Press.

Pavlov, K.F. et. al. (1981). *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química*. Moscú: MIR.

Pisarenko, G. S.; Yákovlev, A. P.; Matveév V. V. (1989). *Manual de Resistencia de Materiales*. Moscú: MIR.

Roman Solecki, R. Jay Conant. (2003). *Advanced Mechanics of Materials*. New York: Oxford University Press.

Schwartz, Mel. (2002). *Materials, Parts and Finisher*. Washington D.C. CRC Press.

Shigley, J.E, Mischkie. (2005). *Diseño en Ingeniería Mecánica*. México: Mc Graw Hill Interamericana.

Anexos

Anexo 1 Diseño y fotos de los gasómetros en la Refinería de Cienfuegos.

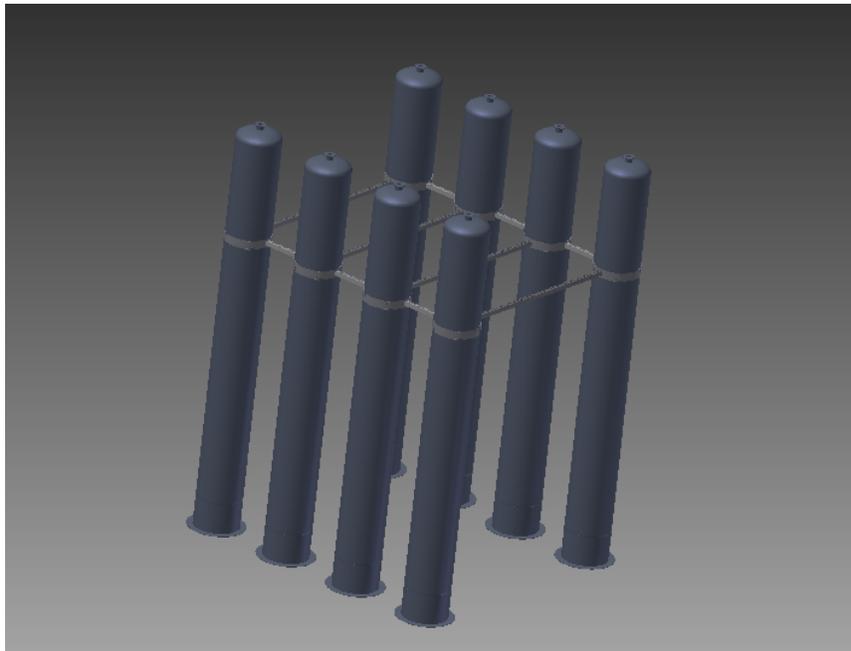


Figura 1 Estructura rigizadora

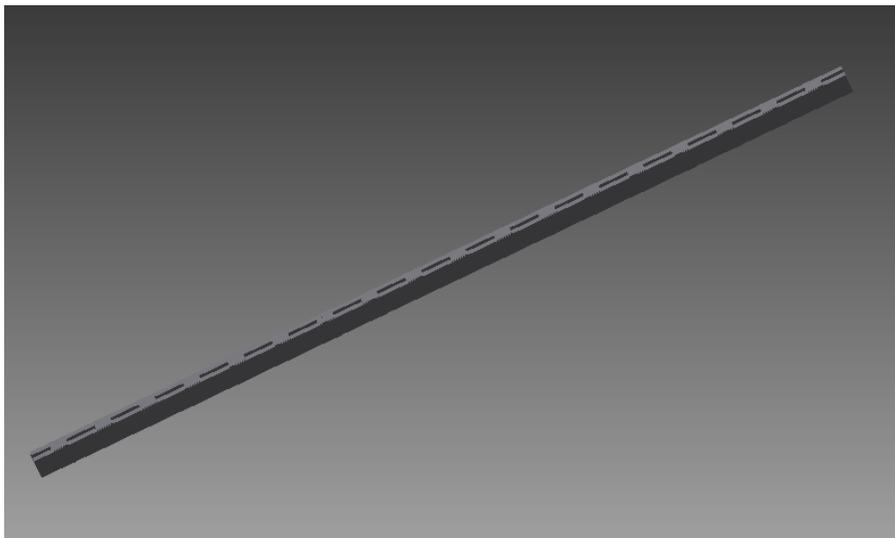


Figura 2 Diseño de la columna armada



Figura 3 Vista lateral de los gasómetros



Figura 4 Vista frontal de los gasómetros

Anexo 2 Tablas

Tabla 1 Valores de Presiones (q_1) vs altura

Altura(H)	q_{10} kN/m ²	Periodo de recurrencia de 50 a la velocidad de 340Km/h					$C_f - C_1$	q_1
		C_t (50)	C_s	C_h	C_r	C_{ra}		
0	5.57	1	1.1	0		1	0.8	0
5	5.57	1	1.1	0.8	1.22	0.87	0.8	4.16204659
10	5.57	1	1.1	1	1.18	0.83	0.8	4.80062704
15	5.57	1	1.1	1.125	1.16	0.81	0.8	5.18123628
20	5.57	1	1.1	1.25	1.14	0.79	0.8	5.5179762
25	5.57	1	1.1	1.335	1.13	0.775	0.8	5.73058923
30	5.57	1	1.1	1.42	1.12	0.76	0.8	5.92458353

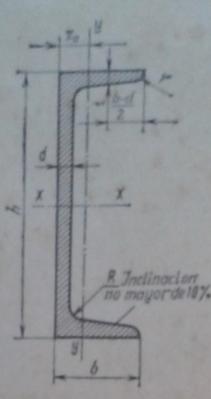
Tabla 2 Valores de Presiones (q_2) vs altura

Altura(H)	q_{10} kN/m ²	C_t (50)	C_s	C_h	C_r	C_{ra}	$C_f - C_2$	q_2
0	5.57	1	1.1	0		1	-1.2	0
5	5.57	1	1.1	0.8	1.22	0.87	-1.2	-6.24306989
10	5.57	1	1.1	1	1.18	0.83	-1.2	-7.20094056
15	5.57	1	1.1	1.125	1.16	0.81	-1.2	-7.77185442
20	5.57	1	1.1	1.25	1.14	0.79	-1.2	-8.2769643
25	5.57	1	1.1	1.335	1.13	0.775	-1.2	-8.59588384
30	5.57	1	1.1	1.42	1.12	0.76	-1.2	-8.88687529

Tabla 3 Valores de Presiones (q_3)

Altura(H)	q_{10} kN/m ²	C_t (50)	C_s	C_h	C_r	C_{ra}	$C_f - C_3$	q_3
30	5.57	1	1.1	1.42	1.12	0.76	-0.9	-6.66515647

Acero laminado. Perfil canal. GOST 8240-56



Número del perfil	Peso por metro lineal en kg/l	Tamaño en mm						Área de la sección en cm ²	Datos respecto a los ejes								
		h	b	a	r	R	r		x-x				y-y				z ₀
									I _x en cm ⁴	W _x en cm ³	I _x en cm ⁴	S _x en cm ³	I _y en cm ⁴	W _y en cm ³	I _y en cm ⁴		
5	4,84	50	32	4,4	7,0	6	2,5	6,16	22,8	9,10	1,92	5,59	5,61	2,75	0,954	1,16	
6,5	5,90	65	36	4,4	7,2	6	2,5	7,51	48,6	15,0	2,54	9,00	8,70	3,68	1,08	1,24	
8	7,05	80	40	4,5	7,4	6,5	2,5	8,98	89,4	22,4	3,16	13,3	12,8	4,75	1,19	1,31	
10	8,59	100	46	4,5	7,6	7	3	10,9	174	34,8	3,99	20,4	20,4	6,46	1,37	1,44	
12	10,4	120	52	4,8	7,8	7,8	3	13,3	304	50,6	4,87	29,6	31,2	8,52	1,53	1,54	
14	12,3	140	58	4,9	8,1	8	3	15,6	491	70,2	5,60	40,8	45,4	11,0	1,70	1,67	
14a	13,3	140	62	4,9	8,7	8	3	17,0	545	77,8	5,66	45,1	57,5	13,3	1,84	1,87	
16	14,2	160	64	5,0	8,4	8,5	3,5	18,1	747	93,4	6,42	54,1	63,3	13,8	1,87	1,80	
16a	15,3	160	68	5,0	9,0	8,5	3,5	19,5	823	103	6,49	59,4	78,8	16,4	2,01	2,00	
18	16,3	180	70	5,1	8,7	9	3,5	20,7	1090	121	7,24	69,8	86,0	17,0	2,04	1,94	
18a	17,4	180	74	5,1	9,3	9	3,5	22,2	1190	132	7,32	76,1	105	20,0	2,18	2,13	
20	18,4	200	76	5,2	9,0	9,5	4	23,4	1520	152	8,07	87,8	113	20,5	2,20	2,07	
20a	19,8	200	80	5,2	9,7	9,5	4	25,2	1670	167	8,15	95,9	139	24,2	2,35	2,28	
22	21,0	220	82	5,4	9,5	10	4	26,7	2110	192	8,89	110	151	25,1	2,37	2,21	
22a	22,6	220	87	5,4	10,2	10	4	28,8	2330	212	8,99	121	187	30,0	2,55	2,46	
24	24,0	240	90	5,6	10,0	10,5	4	30,6	2900	242	9,73	139	208	31,6	2,60	2,42	
24a	25,8	240	95	5,6	10,7	10,5	4	32,9	3180	265	9,84	151	254	37,2	2,78	2,67	
27	27,7	270	95	6,0	10,5	11	4,5	35,2	4160	308	10,9	178	262	37,3	2,73	2,47	
30	31,8	300	100	6,5	11,0	12	5	40,5	5810	387	12,0	224	327	43,6	2,84	2,52	
33	36,5	330	105	7,0	11,7	13	5	46,5	7980	484	13,1	281	410	51,8	2,97	2,59	
36	41,9	360	110	7,5	12,6	14	6	53,4	10820	601	14,2	350	513	61,7	3,10	2,68	
40	48,3	400	115	8,0	13,5	15	6	61,5	15220	761	15,7	444	642	73,4	3,23	2,75	

Figura 5 Selección del perfil canal