



---

---

---

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS PARA EL IZAJE VERTICAL  
DE LA SUBESTRUCTURA PARA UNA  
PLATAFORMA MARINA FIJA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A

**CARLOS ZURIEL BÁEZ AGUIRRE**



DIRECTOR DE TESIS:  
M.I. MIGUEL ÁNGEL RODRÍGUEZ VEGA

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/014/16

Señor  
CARLOS ZURIEL BÁEZ AGUIRRE  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. MIGUEL ÁNGEL RODRÍGUEZ VEGA, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"ANÁLISIS PARA EL IZAJE VERTICAL DE LA SUBESTRUCTURA PARA UNA PLATAFORMA  
MARINA FIJA"**

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN DE UNA ESTRUCTURA COSTA AFUERA
- III. DESCRIPCIÓN DE LA MANIOBRA DE IZAJE
- IV. CONSIDERACIONES PARA EL ANÁLISIS
- V. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL
- VI. CONCLUSIONES
- GLOSARIO
- BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 17 de febrero del 2016.  
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH\*gar.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente el apoyo que he recibido por parte de todas las personas que de un modo u otro se han acercado a mí tocando un poco las fibras sensibles en mi ser. A Dios por permitirme llegar hasta este punto de mi carrera, brindándome fortaleza, esperanza, paciencia y sabiduría. Gracias por no mover la montaña, gracias por acompañarme a treparla y cruzar del otro lado conmigo.

A mi mamá por enseñarme cómo ser un ingeniero, a mi papá por su fe en mí, por tener siempre la certeza de que podía conseguirlo. Gracias a mis papás por proveer todo lo necesario para formar a esta persona que hoy me orgullezco de ser.

A mis hermanos que son la fuente de inspiración más grande y profusa que pueda haber, gracias por estar a mi lado y por ser tan ingentes en su bondad y en su talento; estoy muy feliz y orgulloso por todos ustedes.

A mi esposa, que hombro a hombro lucha conmigo desde nuestra trinchera, para poder cambiar un poco nuestro mundo. Gracias por creer que es posible, por no mirar atrás y sobre todo por ser tan fuerte y tan dulce al mismo tiempo.

A mi director de tesis que ha sido más que un asesor, un amigo sincero, que me ha apoyado sin condiciones, fortaleciendo mis aptitudes y haciéndome ver las debilidades que debo superar. Gracias por su esfuerzo y el trabajo que, como a mí, también ha inspirado a tantos compañeros en los años de su impecable trayectoria.

Dedico este trabajo a mi hermano Andrei por enseñarme con su alegría a sonreírle a la vida y a poner el mejor empeño a mi trabajo y a saber que todo es mejor si se ve con ojos de niño. Y lo dedico también a mi hijo Damián, el “motorcito” que me empuja todos los días; te amo mucho.

*Cada uno de nosotros tiene un lugar, un primordial talento y la libertad,  
para cada quien, siempre hay una misión;  
por siempre nuestro lugar sigue listo y vacío para empezar  
a hacer lo que venimos a hacer aquí,  
a vivir lo que más vale de vivir; la causa de este viaje existe...  
Siempre hay algo que hacer, algo que intentar.  
No te pares, no te rindas, no te dejes vencer.  
(De vuelos y de sol)*

**Fernando Delgadillo**

## ÍNDICE

Introducción.....	1
1. Antecedentes.....	3
1.1 Objetivo.....	3
1.2 Definiciones y alcances correspondientes al proyecto.....	3
1.3 Clasificación y principales tipos de plataformas marinas.....	5
2. Procedimiento de instalación de una estructura costa afuera.....	16
2.1 Componentes principales de una plataforma marina fija (tipo jacket).....	16
2.2 Descripción de las etapas de instalación.....	18
2.3 Consideraciones de diseño para plataformas marinas.....	29
3. Descripción de la maniobra de izaje.....	31
3.1 Consideraciones generales para el diseño del izaje.....	31
3.2 Altura del gancho y longitud de los cables.....	33
3.3 Control de peso.....	38
3.4 Selección del cable y grillete.....	44
4. Consideraciones para el análisis.....	48
4.1 Modelo de análisis estructural.....	48
4.2 Consideraciones de carga.....	59
4.3 Factores de carga (de acuerdo a la normatividad aplicable).....	64
4.4 Condiciones de frontera.....	69
4.5 Breve descripción de las consideraciones para el diseño de orejas de izaje.....	71
5. Resultados del análisis estructural.....	84
5.1 Peso de la subestructura.....	84
5.2 Reacciones en apoyos.....	87
5.3 Tensión en cables.....	88
5.4 Relaciones de interacción de esfuerzos.....	89
5.5 Soldaduras recomendadas para los puntos de izaje.....	102
6. Conclusiones.....	127
Glosario.....	129
Bibliografía.....	133

## Introducción

El diseño y construcción de plataformas marinas tiene una gran preponderancia, pues las consecuencias de falla de estas estructuras, se traducen en la pérdida de muchas vidas, graves daños ambientales y pérdidas materiales muy cuantiosas, dentro de las cuales están las pérdidas económicas debido al cese de la producción. El grado de exposición que poseen es muy elevado, pues dentro de una plataforma podemos encontrar todo tipo de riesgos. Desde la exposición a niveles de ruido muy altos (el cual es un riesgo que se puede mitigar de manera simple con equipo de seguridad) hasta la exposición a materiales radioactivos, sin olvidar los riesgos propios que implica la perforación de pozos para la extracción de los hidrocarburos. Aunado a todos estos factores, está el ambiente salino, húmedo y las condiciones muy particulares del clima al nivel del mar. Todas estas variables exigen que el diseño de estas estructuras se realice con los estándares más altos de calidad y seguridad.

Es por ello que el diseño de estas estructuras se lleva a cabo evaluando con especial cuidado, etapa por etapa, la integridad estructural de la plataforma; desde su instalación y puesta en marcha hasta su proceso de culminación y abandono o desmantelamiento, pasando por su etapa de operación, en la cual a veces también se considera el crecimiento de las instalaciones. Cada etapa tiene una consideración de cargas y de apoyos diferentes, incluso la geometría puede variar pues en diferentes etapas se utilizan aditamentos para realizar las maniobras de instalación. Los elementos estructurales deben estar preparados para resistir las solicitaciones de carga en todas las etapas de vida de la plataforma y todo lo que pueda anticiparse dentro del diseño puede contribuir a elevar el nivel de seguridad de las operaciones en altamar.

El principal uso que se le ha dado a las plataformas se ha concebido en la industria petrolera y por ello las investigaciones y normas referentes a los criterios estructurales han surgido de los institutos dedicados a la investigación del petróleo. Sin embargo, me parece importante señalar que los conceptos descritos en esta tesis no son limitativos al entorno petrolero. Pues también podrían ser utilizados en las soluciones para energías renovables. La colocación de campos eólicos pudiera tener más eficiencia en mar abierto (por ejemplo), pues en tierra la rugosidad del terreno disminuye la velocidad del viento.

El presente trabajo se enfoca en la parte de instalación de las plataformas marinas fijas, específicamente en la etapa de la colocación de la subestructura en el sitio definitivo que tendrá costa afuera. Para entender un poco más acerca de estos conceptos, en el primer capítulo se define qué es una plataforma fija y qué otro tipo de plataformas existen así como la descripción de los conceptos básicos de las estructuras costa afuera.

El segundo capítulo (Procedimiento de instalación de una estructura costa afuera) se centra en las plataformas fijas y describe con detalle sus principales componentes y cómo se llevan a cabo las etapas para la instalación de las plataformas; lo cual será útil para entender los criterios necesarios a tomar en cuenta en la planeación y diseño del izaje.

En el tercer capítulo (Descripción de la maniobra de izaje) se detallan los componentes y accesorios estructurales que intervienen para el desarrollo del izaje. De esta manera tendremos claras las recomendaciones técnicas y el procedimiento de cálculo que viene más adelante.

El capítulo cuatro (Consideraciones para el análisis) es el desarrollo de un ejemplo práctico, donde aparece la configuración típica de una subestructura octópoda para un tirante de 20 m. y en el cual se definen las consideraciones de diseño para esta etapa de instalación; las cargas involucradas, los factores que deben afectarlas según las recomendaciones de las normas aplicables, las condiciones de apoyo, y al final se describe cómo pueden dimensionarse y/o evaluarse los accesorios que sirven como puntos de sujeción para el levantamiento de la estructura.

En el capítulo cinco se muestran los resultados de este ejemplo y se ilustra el modo en que se pueden analizar para que la estructura tenga un comportamiento adecuado bajo las solicitaciones de carga descritas. El subcapítulo 5.5 es un resumen de soldaduras que es útil para la interpretación y dibujo de planos así como para realizar algún cálculo simplificado de su resistencia. Para el diseño de orejas y muñones de izaje, las soldaduras juegan un papel fundamental.

Al final se presentan las conclusiones (capítulo 6), un glosario que nos ayuda a entender los términos empleados en el ambiente de la ingeniería costa afuera y la bibliografía con las referencias que se han tomado de apoyo para el desarrollo de este trabajo.

# *Capítulo I*

## Antecedentes

## 1. Antecedentes

### 1.1 Objetivo

El presente análisis pretende describir, de manera puntual, el procedimiento de análisis estructural para llevar a cabo el izaje vertical de una estructura costa afuera; abordando de manera general, las consideraciones necesarias para desarrollar la maniobra y verificar que los elementos que conforman a la estructura cumplan con los requisitos de diseño establecidos.

Para ejemplificar de manera simplificada la maniobra de izaje, se desarrolló un modelo estructural en el cual se aplicaran de manera general los aspectos de diseño requeridos para efectuar la maniobra. Los aspectos generales del modelo estructural se enlistan a continuación:

- Tipo de estructura.
- Geometría general (Topología).
- Consideraciones de diseño.
- Consideraciones de carga.
- Aplicación de normas y recomendaciones prácticas.
- Análisis del modelo estructural.
- Selección de accesorios para realizar la maniobra.

### Propósito

Que el Ingeniero Civil recién egresado (o de poca experiencia en el ramo) con interés de incursionar en la especialidad de las estructuras costa afuera, tenga una guía para introducirse de manera general a los conceptos y el desarrollo de este tipo de análisis, y que a través de la experiencia que vaya adquiriendo pueda aplicar estos conocimientos y/o desarrollar nuevas soluciones para el diseño y construcción de obras marinas; y de ese modo confrontar los retos que la ingeniería costa afuera mexicana tiene por delante en un futuro no muy lejano: las aguas profundas.

### 1.2 Definiciones y alcances correspondientes al proyecto

Primero se darán a conocer ciertas definiciones que nos sitúen en el problema que se pretende describir y nos dé un panorama general del contexto empleado para el diseño y desarrollo de este tipo de proyectos.

El procedimiento aquí descrito pretende mostrar de la una manera simple cómo se realiza una maniobra de izaje y qué aspectos deben considerarse para el diseño de la misma. Sin embargo,

puede tomarse como base para el desarrollo de izajes más complejos como pueden ser el de estructuras en forma horizontal, con dos ganchos, con contrapesos, con elementos flotados, etc.

Se efectuará un análisis estático lineal usando un modelo tridimensional, en el cual se representarán las condiciones a las cuales se expone la estructura durante el izaje. El modelo estructural incluirá todos los miembros primarios y secundarios que compongan a la estructura. La entrada de las cargas en el modelo representará las cargas muertas estructurales de elementos no modelados, equipos, tuberías y accesorios propios de una subestructura.

Dicho análisis se desarrollará mediante las consideraciones de diseño de esfuerzos permisibles (Allowable Stress Design, ASD por sus siglas en inglés). Por lo que los rangos de esfuerzos en la estructura no rebasará el esfuerzo de fluencia de los materiales empleados.

Todo este proceso se llevará a cabo observando la normatividad vigente aplicable y siguiendo algunas recomendaciones de práctica común en el diseño y construcción de este tipo de estructuras. Durante el desarrollo del análisis se harán las referencias de las normas utilizadas y/o de la literatura donde se exponga los conceptos utilizados para los fines de esta tesis.

Como se describe más adelante, en el capítulo 2, debido a la geometría, tamaño y peso de las estructuras, a veces es necesario transportarlas de manera horizontal y lanzarlas al mar para después acomodarlas. Lo cual requiere de una maniobra de posicionamiento que consiste en rotar a la estructura cuando se ha sumergido una parte de ella y guiarla a la posición vertical que adoptará finalmente sobre el lecho marino. Esta tesis aborda únicamente aquellas estructuras que no requieren dicha maniobra de posicionamiento. Es decir, que para los fines de este análisis no se tomará en cuenta las cargas debidas a la flotación de la estructura, pues se entiende que durante toda la maniobra de izaje, la estructura permanecerá fuera del agua. El procedimiento se desarrolla de manera plena en el capítulo 3, Descripción de la maniobra de izaje.

También se considera que el izaje se realizará con un solo gancho y que la estructura se asirá a través de los accesorios (orejas o muñones) en cuatro puntos, sin necesidad de contrapesos u otro tipo de aditamento.

### 1.3 Clasificación y principales tipos de plataformas marinas

Las plataformas marinas pueden clasificarse de acuerdo a su uso, por su exposición de riesgos, su estructuración, etc. Cabe señalar que las clasificaciones aquí mencionadas no son las únicas, ni son todas, y se utilizan únicamente con el fin de ayudar a comprender los conceptos que posteriormente se explicarán.

#### Clasificación de plataformas de acuerdo a su uso

El propósito más común que se le da a una plataforma marina es la extracción de hidrocarburos que yacen bajo el suelo marino. Siguiendo este propósito se diseñan plataformas que sirven para la exploración, perforación, producción, almacenamiento y transportación de petróleo y gas natural.

De ese modo existen plataformas de perforación de pozos, separación y bombeo de crudo, de enlace de ductos, para compresión de gas, habitacionales, de pre-estabilización y re-bombeo de crudo, asimismo se han construido oleoductos y gasoductos requeridos para recolección, distribución entre plataformas y el transporte del gas y aceite a tierra y boyas. En la figura 1.1 se muestra un conjunto con varios tipos de plataformas.



**Figura 1.1** Fotografía aérea de un complejo de extracción en la sonda de Campeche

Clasificación de plataformas de acuerdo a su exposición de riesgos

PEMEX establece la categoría de cada plataforma en función de su producción manejada y de su consecuencia de falla. En términos generales, esta consecuencia se establece de acuerdo a la pérdida de vidas humanas, del impacto ambiental y del impacto económico que representa la falla estructural de la plataforma. Sin embargo, la filosofía de operación de PEMEX establece el cierre temporal de la producción y la evacuación del personal de las plataformas cuando se prevé la presencia de un evento ambiental extremo. Por lo tanto, el efecto predominante en la estimación de la consecuencia de falla es el impacto económico correspondiente al cese de la producción manejada durante el período de rehabilitación, incluyendo los costos de reparación, retiro y reemplazo de la estructura. En la tabla 1.1 se muestran los parámetros que se consideran para la categorización de plataformas de acuerdo a la norma NRF-003-PEMEX-2007.

**Tabla 1.1 Categorización de las estructuras principales (NRF-003-PEMEX-2007).**

Servicio	Volumen de producción manejado (MBPD)	Categoría de exposición (Consecuencia de falla)	
		Evaluación	Diseño
Enlace	-	Muy alta	Muy alta
Medición	-	Muy alta	
Compresión	-	Alta	
Habitacional	-	Moderada	
Inyección	-	Alta	
Mixto	> 100	Muy alta	
	50 - 100	Alta	
	< 50	Moderada	
Perforación	> 100	Muy alta	
	50 - 100	Alta	
	20 - 50	Moderada	
	< 20	Baja	
Producción temporal	> 100	Muy alta	
	< 100	Alta	
Producción permanente	-	Muy alta	
Rebombeo	-	Muy alta	
Recuperación de pozos	50 - 100	Alta	
	20 - 50	Moderada	
	< 20	Baja	
Telecomunicación	-	Moderada	

\*(MBPD): Miles de barriles por día.

Fuera de la industria petrolera, existen otras plataformas con distintas formas y propósitos, como torres de transmisión de microondas, instalaciones para generación de energía, sistemas de tuberías para la minería del suelo marino, y algunas plataformas e islas flotantes sobre las que se construyen hoteles de lujo.

### Clasificación de plataformas de acuerdo a su estructuración

Tomando en cuenta el diseño estructural de las plataformas, se pueden mencionar dos grandes grupos, las plataformas móviles por un lado y por otro, las plataformas fijas.

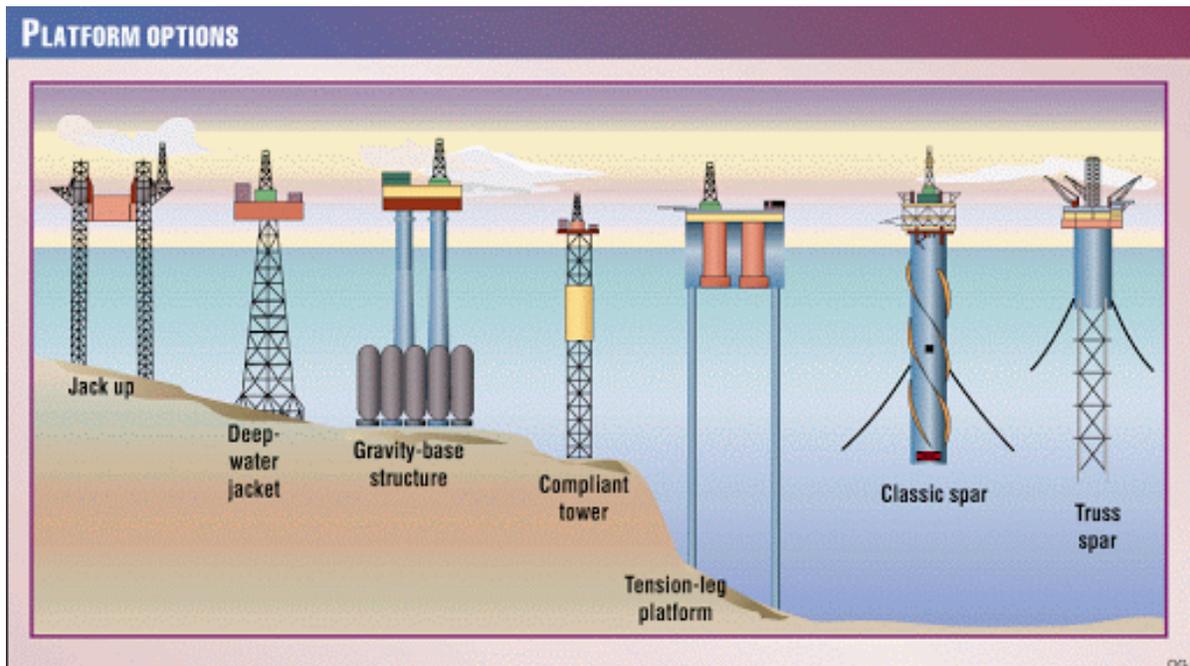
La perforación para exploración se hace con plataformas móviles o con barcos cuidadosamente posicionados. La plataforma auto-elevable comúnmente llamada “Jackup”, es la estructura móvil más utilizada en estas operaciones y consiste en una cubierta apoyada generalmente en tres piernas, por lo que en México se les conoce como trípodes, aunque también hay jackups con seis piernas; las cuales están acopladas a una zapata de acero que se asienta en el suelo marino. En suelos blandos, las piernas agujeran al suelo con la zapata y pueden llegar a penetrarlo bastantes metros. La altura de la plataforma, por encima del lecho marino, rebasa los 100 m y puede ser ajustada a través de motores los cuales se acoplan en cada pierna. En la figura 1.2 se ilustra una plataforma común tipo jackup, de tres piernas. La cubierta está diseñada de tal modo que, al levantarse las piernas, esta queda libre para flotar y desplazarse como lo haría normalmente un barco.



**Figura 1.2 Portada del manual de lineamientos para el diseño de jackups (Sociedad de arquitectos navales e ingenieros marinos USA)**

Una vez que los yacimientos son descubiertos, a través de la perforación de pozos exploratorios con plataformas móviles o barcos, se realizan pruebas para reclasificar las posibles reservas y verificar que sea factible la explotación de crudo en ese lugar. Si los resultados son favorables, se implementa una estrategia de explotación mediante la instalación de plataformas fijas.

En cuanto a plataformas fijas se pueden distinguir seis principales tipos. En la figura 1.3 se muestra en primer lugar, de izquierda a derecha, una plataforma móvil tipo jackup, luego los seis principales tipos de plataformas fijas; los primeros tres son diseñados para profundidades de hasta 500 m y los últimos tres para tirantes de hasta 2,000 m.



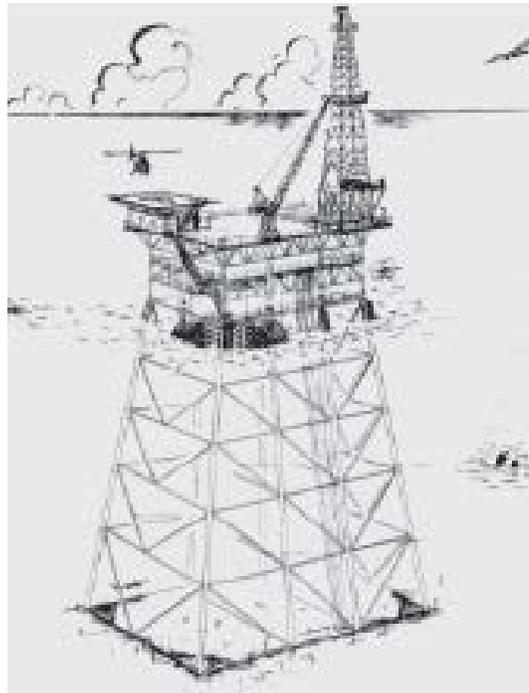
**Figura 1.3 Principales tipos de plataformas marinas  
(Dynamics of offshore structures. James F. Wilson)**

Una plataforma fija se define como aquella que se extiende por encima de la superficie del agua y se apoya en el lecho marino a través de pilotes, zapatas o algún otro medio con la finalidad de permanecer estacionaria durante un gran periodo de tiempo. A continuación se describe brevemente cada tipo principal de plataformas fijas.

## Plataformas tipo Jacket

Este tipo de plataformas consiste en lo siguiente:

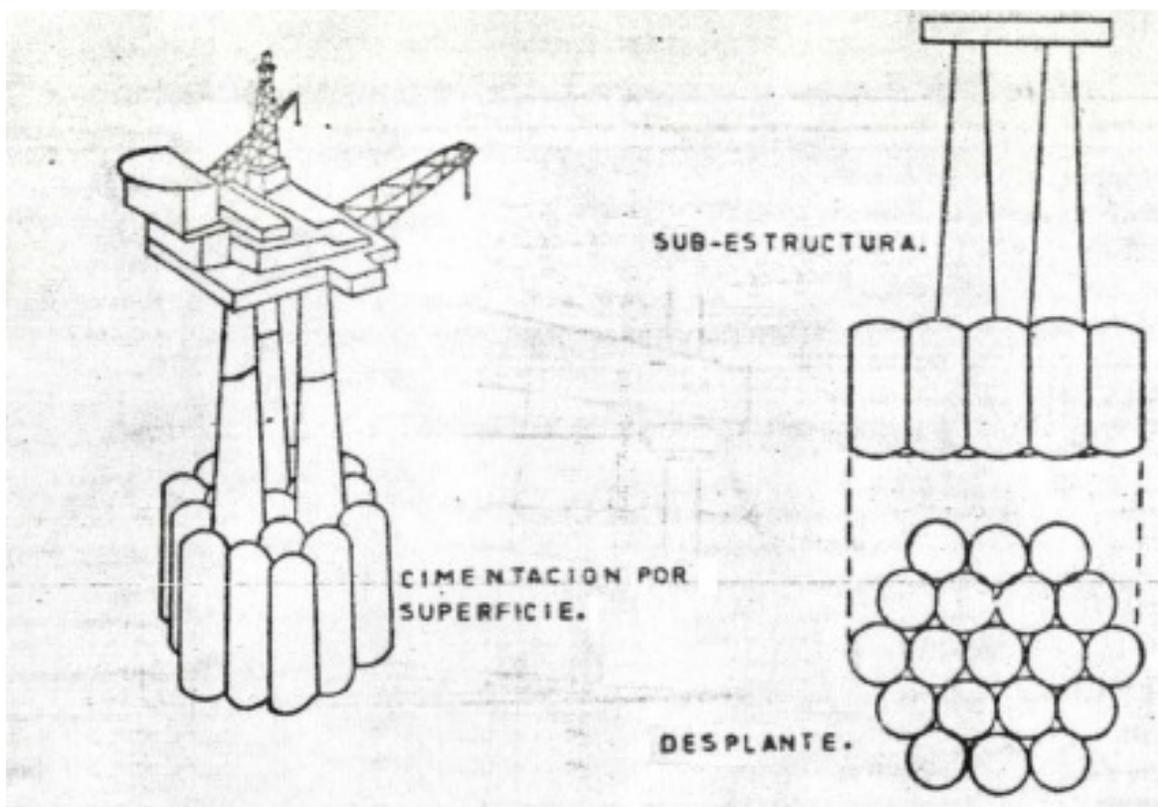
1. Están integradas con una Subestructura la cual se define como aquella estructura formada por marcos o armaduras redundantemente arriostrados (horizontales y verticales) con tubos soldados que se extienden desde el lecho marino, o una elevación cercana, hasta por encima de la superficie del agua, la cual es diseñada para servir como el elemento principal de la plataforma, transmitiendo las cargas laterales y verticales hacia la cimentación. En la siguiente 1.4 se muestra un esquema con este tipo de plataforma.
2. La cimentación está compuesta por pilotes u otros elementos de cimentación que anclan de manera permanente la plataforma al fondo del océano y transmiten las cargas laterales y verticales hacia el suelo.
3. Una superestructura que proporciona un espacio de cubierta donde se apoyarán las cargas de operación y otras más.



**Figura 1.4** Esquema de plataforma tipo jacket

### Plataformas tipo gravitacionales

Es una plataforma diseñada como unidad de producción y utiliza el peso de la subestructura en lugar de pilotes para resistir las cargas ambientales, por lo que se forma con un grupo de tanques de concreto para almacenamiento de aceite en la base, alrededor de las columnas que son cónicas, también de concreto, como puede apreciarse en el siguiente esquema de la figura 1.5, y se extienden hasta llegar fuera de la superficie del agua para recibir a la superestructura que es de acero. En el fondo de los tanques de concreto tienen un contrapeso de arena y el agua de mar, dentro las columnas, tiene la misma función. Estas estructuras dependen sólo de su peso propio para mantener su posición erguida y son diseñadas con periodos de retorno de hasta 100 años con olas que pueden alcanzar los 28 m de altura.



**Figura 1.5** Esquema de plataforma tipo gravitacional

### Plataformas tipo torre flexible

Su subestructura es una torre utilizada para solucionar tirantes entre 300 y 800 m, algunas están sujetas con líneas de anclaje, como se muestra en la figura 1.6 Está cimentada con pilotes y construida con armaduras de acero, diseñada para permitir y resistir la flexión que le imponen las olas y es considerablemente más esbelta que la plataforma tipo jacket.

Es una estructura de cimentación profunda que tiene gran flexibilidad. Es flexible por encima de las fuerzas aplicadas que consisten principalmente en fuerzas inerciales. El resultado es una reducción de la transmisión de fuerzas desde la plataforma hacia la cimentación. Las torres arriostradas son normalmente flexibles, a menos que el sistema de arriostamiento sea muy rígido.

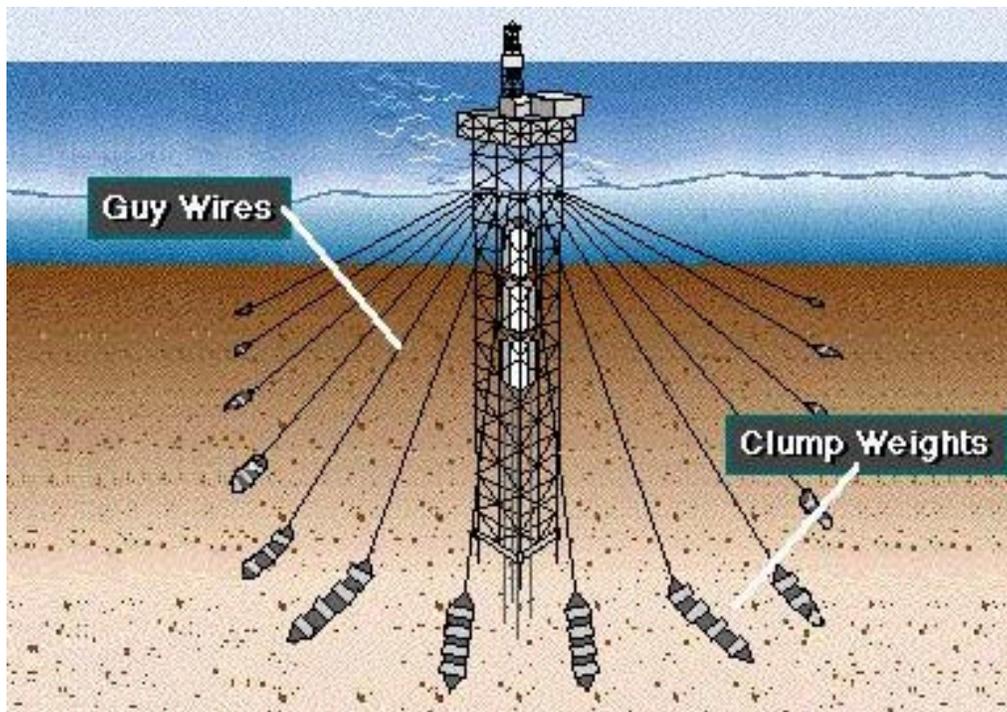
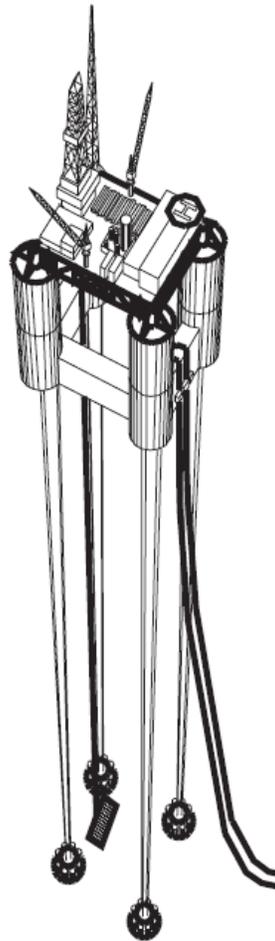


Figura 1.6 Esquema de plataforma tipo torre flexible

### Plataformas con piernas tensadas (Tension leg platform TLP)

Este tipo de plataforma puede competir económicamente con las de tipo torre flexible para profundidades entre 300 m y 1200 m. En estos diseños, la fuerza total de flotación que le brindan los elementos flotantes, excede la carga total gravitatoria o peso muerto de la estructura. Como se muestra a continuación en la figura 1.7, consta de tensores, tirantes verticales, que se extienden desde las columnas y están anclados a las zapatas de cimentación en el suelo marino y mantienen a la estructura en su posición durante cualquier condición climática. Los movimientos rotacionales (heave, pitch y roll) están bien restringidos por los tirantes; pero los movimientos en el plano horizontal (surge, sway y yaw) quedan bastante libres con el movimiento de las olas. Estas plataformas son instaladas desde los años 80 en Noruega. El diámetro de sus tirantes llega a medir más de un metro.



**Figura 1.7 Esquema de plataforma piernas tensadas (TLP)**

## Sistemas de producción flotantes

Para tirantes de agua de alrededor de 1,500 m y más, un sistema de producción submarino es una excelente alternativa para una instalación de superficie fija. Algunos de estos sistemas submarinos se tienden sobre el suelo marino, y su producción de aceite y gas es controlada por computadora desde un barco u otra estructura flotante encima de la unidad submarina. En la figura 1.8 se ilustra una plataforma semi-sumergible. La estructura flotante y la unidad submarina son comúnmente conectadas por ductos ascendentes.

Las estructuras flotantes más populares para este tipo de sistemas son las plataformas flotantes (TPL, Spars, semi-sumergibles, etc.). Estas estructuras son prácticas para profundidades de hasta 3,000 m. Los primeros tres proyectos con cajones de flotación, o *spars*, fueron instalados para usarse en una profundidad de 180 m, en la década de los 90.

Las Spars son cilindros verticales flotantes, en los que se apoyan las cubiertas de producción y las colocan por encima de las olas de tormenta. Estas estructuras son controladas para permanecer esencialmente en mares tormentosos. Algunos necesitan ser remolcados y algunos otros tienen sistemas de autopropulsión. Durante las operaciones de perforación y producción, estas estructuras se mantienen en su lugar con líneas de anclaje y propulsores. Los propulsores, controlados por computadora, supervisan las fuerzas de tensión en las líneas de anclaje y posicionan a la estructura exactamente sobre la boca del pozo en el que se está trabajando.



**Figura 1.8** Fotografía de una plataforma semi-sumergible

En el siguiente esquema, de la figura 1.9, se muestra un arreglo típico para el anclaje de plataformas flotantes al lecho marino. Consta de un cilindro sellado en la parte superior, por donde se le aplica succión para hacer entrar al suelo por la parte de abajo.

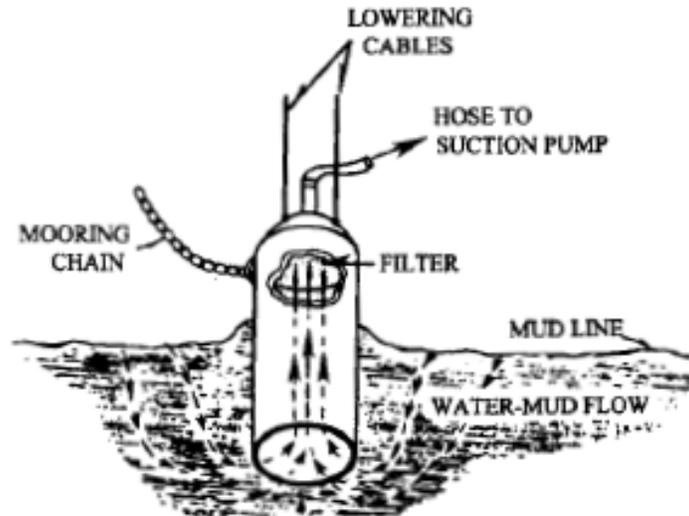


Figura 1.9 Esquema de anclaje

## Otros tipos de Plataforma

### Plataformas tipo Torre

Una plataforma tipo torre es la modificación de una plataforma tipo jacket que tiene, relativamente, pocas piernas de gran diámetro (alrededor de 15 ft (5 m)), como se muestra en la figura 1.10 Una parte de la torre puede estar flotada para ayudar a colocarla en su posición correcta, a través de una flotación selectiva. Las plataformas tipo torre pueden o no estar cimentadas por pilotaje. Cuando se utilizan pilotes, estos son dirigidos a través de camisas o conectados por afuera de las piernas con faldones. El pilotaje también puede servir como conductores. Si el apoyo de la torre es proporcionado por zapatas en lugar de pilotes, los conductores pueden ser instalados dentro o fuera de las piernas.



**Figura 1.10 Subestructura para una plataforma tipo torre**

### **Plataformas de estructura mínima o sin jacket**

Algunas estructuras han sido instaladas y funcionan satisfactoriamente aunque no cumplen con la definición de plataformas tipo jacket, como se ha descrito anteriormente. En general estas estructuras no tienen la reserva de fuerza o redundancia que tienen las plataformas tipo jacket. Por esta razón, deben tomarse en consideración ciertas recomendaciones para realizar un diseño más seguro.

Las plataformas tipo de estructura mínima o sin jacket son definidas como las estructuras que cumplen con uno o más de los siguientes atributos:

- 1.-Marcos estructurales que proporcionan menor reserva de fuerza y redundancia que una plataforma convencional tipo jacket.
- 2.-Una sola (independiente) columna, que puede ser arriostrada o autosoportada, la cual consiste en un elemento tubular largo asentado en uno o más apoyos articulados.
- 3.-El conductor o columna independiente, el cual es utilizado como estructura y/o elemento de carga axial para la cimentación por lo que las uniones soldadas son con soldaduras no convencionales o de una sola pieza.
- 4.-Conexiones roscadas, articuladas o ancladas a los elementos de la cimentación que pueden ser pilas o pilotes.
- 5.-Pilares arriostrados u otras estructuras donde un simple elemento es el sistema estructural como componente principal y en el cual se apoya una sola cubierta (sobre una columna o pierna).

# *Capítulo II*

Procedimiento de instalación  
de una estructura costa afuera

## **2. Procedimiento de instalación de una estructura costa afuera**

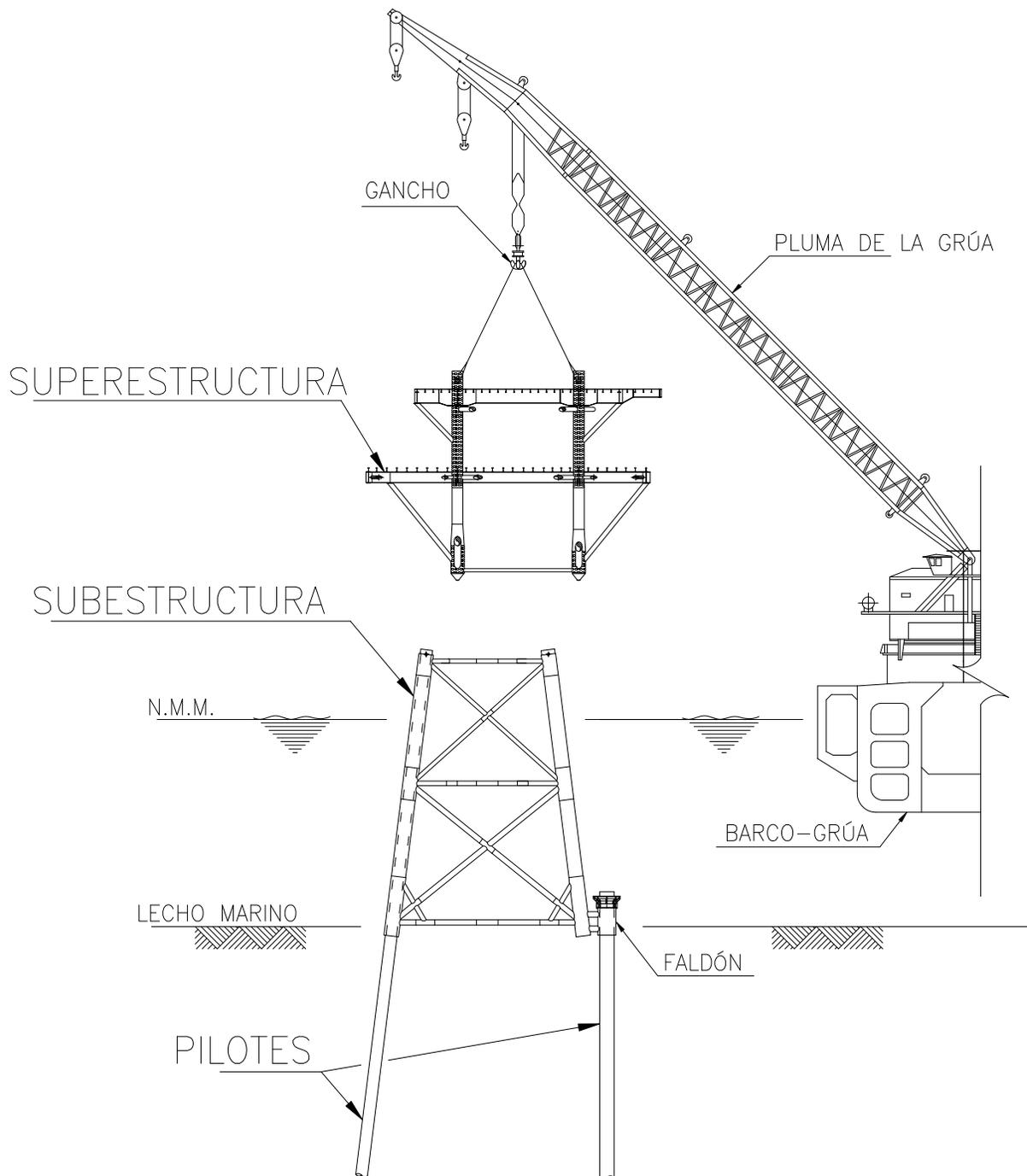
En México existen cerca de 230 plataformas marinas (Anuario estadístico Pemex 2013), de las cuales 36 son auto-elevables y 5 son semi-sumergibles, con lo cual más del 80% de las plataformas marinas en México son plataformas fijas tipo jacket. Esta solución estructural para aguas someras, dada su importancia es motivo de un análisis específico.

La zona productora más importante en México es la Sonda de Campeche, que contiene cerca del 46% de las reservas probadas y aporta el 70% de la producción total de crudo, el 75% de condensados y el 31% del gas. Los principales campos productores de la Sonda de Campeche se encuentran distribuidos en una superficie de aproximadamente 2,500 km<sup>2</sup>; el tirante de agua en donde se localizan las plataformas y las tuberías está comprendido entre los 15 y 80 m, con tirantes máximos de hasta 200 m.

### **2.1 Componentes principales de una plataforma marina fija (tipo jacket)**

Para el desarrollo de los recursos petroleros costa afuera, las decisiones están basadas en métodos de evaluación de inversiones similares a los empleados en otras industrias, que a su vez se respaldan en la información obtenida por las perforaciones de exploración. Sin embargo, no se requiere un método de evaluación especial puesto que éste debe adaptarse a las características únicas de la industria petrolera, es decir, a la oferta y la demanda. Con base en lo anterior, debe verificarse la rentabilidad del proyecto utilizando al máximo los recursos nacionales.

La ingeniería de detalle de las plataformas se inicia una vez determinadas las características de los equipos que se montarán en ellas. Como se ha definido en el capítulo anterior, una plataforma marina fija consta de 3 componentes principales: superestructura, subestructura y pilotes (cimentación), los cuales pueden apreciarse en la figura 2.1



**Figura 2.1** Esquema de instalación de una plataforma fija tipo jacket

Superestructura. Es la parte de la estructura ubicada arriba del nivel medio del mar, que se apoya sobre la subestructura. Sus elementos estructurales principales son vigas armadas, perfiles laminados y tubos. En ella se alojan todos los equipos requeridos para la perforación, extracción, separación y almacenamiento, así como las instalaciones habitacionales (si es el caso) y el helipuerto.

Subestructura. Es aquella que da apoyo a la superestructura y se extiende desde el nivel medio del mar hasta el fondo, apoyándose en el lecho marino. Se compone principalmente de elementos tubulares. En ella se fijan los accesorios que le dan protección a la plataforma de los embates que pudiera recibir de embarcaciones y los accesorios requeridos para el acceso a la plataforma cuando se llega a ella a través del medio marino. Estos accesorios se describen con más detalle adelante, en la descripción de cargas de la subestructura.

Cimentación. Los pilotes son todos aquellos elementos tubulares embebidos (hincados) en el suelo marino, que se prolongan a partir de él, a lo largo de la parte interior de las piernas de la subestructura, hasta hacer contacto con la superestructura (pilotes principales), o bien por fuera de las piernas, guiados a través de faldones unidos a la subestructura (pilotes faldón). El número de pilotes principales, faldón, plantas, dimensiones de elementos estructurales, etc., dependerá de la profundidad del fondo marino, las características del suelo, y las condiciones ambientales del sitio particular en el cual se requiera instalar la estructura, así como la función de ésta; ya que los pilotes transmiten las cargas que se le imponen a la plataforma hacia el suelo.

## 2.2 Descripción de las etapas de instalación

### 1ª Etapa: Fabricación

Cada componente, descrito en el subcapítulo anterior, es fabricado por separado en tierra, dentro de patios de construcción, habilitados para el manejo de estructuras robustas y pesadas. Los patios de fabricación de plataformas marinas, se fueron localizando en las márgenes del río Pánuco, en Tampico, y el río Pantepec, en Tuxpan, hasta llegar a disponer de la amplia capacidad de fabricación que ofrecen en la actualidad también en Campeche y Tabasco. Este procedimiento pretende minimizar el tiempo de construcción en el mar y evitar pérdidas operacionales debidas a las condiciones de altamar o debidas al mal tiempo.

Todos los materiales se ordenan con bastante anticipación al primer día de construcción, la cual puede durar de 4 a 12 meses, en promedio dependiendo de la complejidad y el tamaño de la estructura.



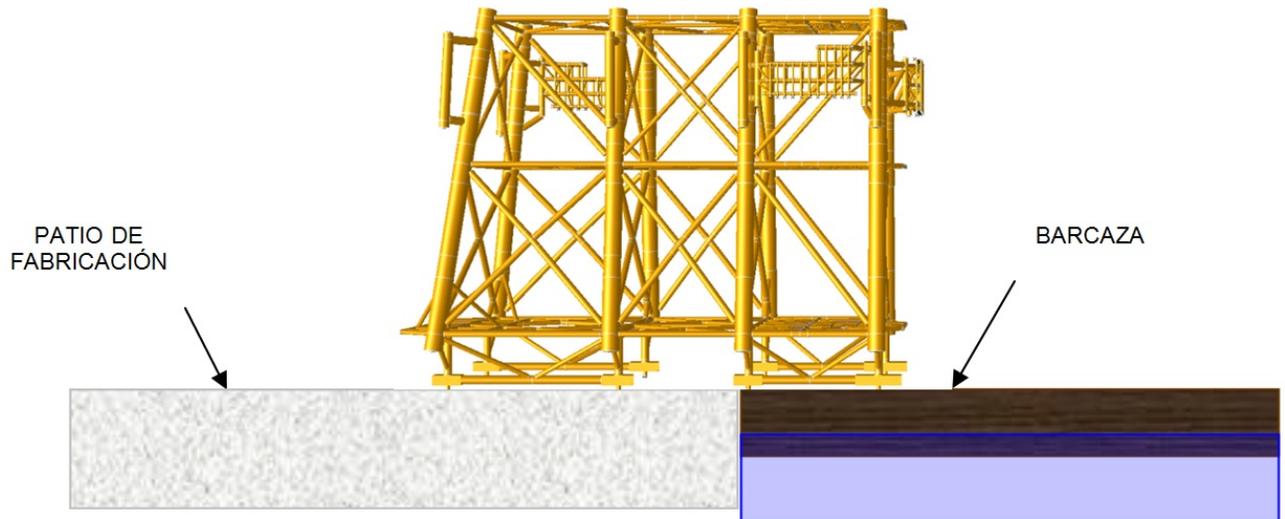
**Figura 2.2 Fabricación de marco para subestructura**

Las estructuras normalmente se ensamblan, construyendo en primer orden, los marcos con la dimensión más estrecha (ver figura 2.2), para luego ser asentados sobre el piso. Éstos son rotados por grúas hacia su posición vertical y después se añaden los soportes transversales, diagonales, guías y otros miembros que unen a los marcos que finalmente conforman a las estructuras. Así, cuando se termina, la estructura se asienta en sus lados más largos sobre marcos (o zapatos) de arrastre, los cuales se deslizan sobre las vigas de lanzamiento usadas para guiar a la estructura desde el patio hacia la barcaza que la transportará al sitio costa afuera donde se posicionará finalmente.

Como apoyo a las actividades que se realizan, se tiene una variedad de embarcaciones; para construcción: barcos grúa de gran capacidad de carga y embarcaciones para apoyo topográfico; para transporte: chalanes y remolcadores, así como barcos abastecedores y lanchas rápidas. Se cuenta también con una flota de helicópteros y, para servicios, barcos de inspección y mantenimiento.

## 2ª Etapa: Arrastre y embarque

Una vez que son completadas y armadas todas las secciones de la estructura, la barcaza (o chalán de transportación) se "acodera" al muelle de carga del patio, entonces los componentes son jalados, por medio cables asidos a las orejas soldadas al marco de arrastre, que se desliza sobre un par de vigas aceitadas, con la potencia impuesta de tractores o gatos hidráulicos. Esta operación, aparentemente simple (como se ve en la figura 2.3), tiene el riesgo de que en algún momento, al ir abordando la estructura sobre la barcaza, ésta se sumerja demasiado por un mal deslastrado, y la estructura pierda soporte en la barcaza, o bien, debido a un pequeño oleaje la barcaza tienda a subir de su nivel normal y trate de cargarse a toda la estructura. En ambos casos se forma un pequeño "escalón" (hacia arriba o hacia abajo), por el cual debe pasar la estructura.



**Figura 2.3 Esquema de embarque de una subestructura**

La norma de referencia NRF-041-PEMEX-2014, establece los siguientes lineamientos que deben ser considerados durante las maniobras de carga para garantizar que se realice de manera segura:

Las velocidades limitantes del viento, altura de ola y velocidad de la corriente en el sitio, para la operación de carga, deben ser definidas y acordadas para poder garantizar la seguridad de la operación propuesta. La selección de las condiciones limitantes dependerá de varios parámetros, tales como el sitio, la duración de la operación, el rango de mareas y el tipo de carga que está llevando a cabo.

Donde el muelle de carga está protegido, se puede considerar que los efectos de las olas son despreciables. Se debe considerar la posible exposición del muelle de carga a marejadas de periodos largos.

Generalmente, para operaciones de carga deslizadas o con tráiler, la velocidad límite del viento debe ser equivalente a 10 m/s. El pronóstico debe ser de una duración igual al tiempo planeado de la operación más tolerancias de tiempo por contingencia y en su caso, el movimiento del chalán a una posición de atraque seguro después de la carga.

Para cargas izadas pueden ser apropiados otros valores, dependiendo del equipo utilizado y las dimensiones de la estructura a izar.

Antes del comienzo de las maniobras de carga, se debe obtener un pronóstico meteorológico favorable emitido por una agencia meteorológica reconocida, el cual debe ser de duración suficiente para cubrir la maniobra de carga, instalación de los seguros marinos provisionales y si es aplicable, el movimiento del chalán a una posición de atraque seguro.

Los pronósticos del tiempo deben ser obtenidos a intervalos de 12 horas durante las operaciones de carga y hasta que el chalán haya sido colocado en posición de atraque seguro.

### 3ª Etapa: Transportación

Después de que la estructura es arrastrada sobre la barcaza, se sujeta con elementos tubulares que se sueldan a la cubierta, llamados seguros marinos. Estos proporcionan las restricciones necesarias para la estabilidad durante las maniobras correspondientes a ésta etapa de instalación.

Generalmente los pilotes y la subestructura viajan en la misma barcaza, pues una vez colocada la subestructura en el lugar indicado, se comenzará el hincado de pilotes tan pronto como sea posible. La superestructura viaja en una segunda barcaza cuando se han concluido las etapas de instalación de la subestructura y el hincado de pilotes (después de la 5ª etapa descrita en este capítulo).

Antes del comienzo de las maniobras de transportación, de acuerdo con la NRF-041-PEMEX-2014, debe obtenerse un pronóstico meteorológico favorable emitido por una agencia meteorológica reconocida, el cual debe ser de duración suficiente para cubrir el periodo de transportación. Para remolques largos podría ser necesario emplear los servicios de más de una de tales agencias. La salida de un remolcador debe aprobarse después de recibir un pronóstico meteorológico favorable de 48 horas cubriendo la ruta proyectada. Durante un remolque, se deben contar con los medios para que durante la travesía se reciban a bordo los pronósticos meteorológicos.

Deben proporcionarse pronósticos meteorológicos a intervalos de 12 horas, y deben contener pronósticos de las próximas 24 y 48 horas, con la perspectiva del clima para un periodo de los próximos 3 a 5 días.

Las operaciones deben ser planeadas para que sean desarrolladas dentro de niveles reconocidos de seguridad y contar con procedimientos que sean seguros, prácticos y adecuados para el propósito. La planeación debe estar basada en el uso de principios, técnicas, sistemas y equipos probados para asegurar que los riesgos para el personal, el ambiente y la carga están en un nivel aceptable. Toda la planeación debe considerar que el transporte se puede suspender o modificar durante el proceso. Los puertos que puedan ser usados como refugio durante el remolque deben ser identificados y, si es necesario, inspeccionados para revisar si son adecuados antes de la operación. En el área de plataformas el capitán del remolcador debe proceder con los requisitos establecidos en la norma de referencia NRF-043-PEMEX-2014, para notificar el inicio de tránsito hacia el área de instalación de la estructura.

Durante su viaje, la estructura estará sujeta a movimientos de balanceo (giros alrededor del eje longitudinal de la barcaza, o roll en inglés), de cabeceo (giros alrededor del eje transversal de la barcaza, o pitch en inglés), y de sustentación (oscilaciones verticales, o heave en inglés), principalmente. El origen de estos ejes está considerado en el centro de gravedad de la embarcación. Estos movimientos, a su vez, serán mayores o menores dependiendo de las condiciones del mar. De cualquier manera, es evidente que si éstos son grandes, originarán grandes fuerzas de inercia debidas a la masa de la estructura en movimiento. En todo momento de la transportación y la instalación in situ, se encontrará a bordo un Inspector de Garantía Marino (IGM), quien está a cargo de verificar que los procedimientos se realicen conforme a los preparativos, revisiones y manuales que procuran las condiciones técnicas y ambientales más favorables y seguras para la realización de estos trabajos.

#### 4ª Etapa: Lanzamiento e izaje

De una manera simple, se puede explicar que el izaje consiste en levantar a la estructura, mediante un arreglo de cables y conectores sujetos al gancho de un barco grúa, para retirarla del chalán y posicionarla en su localización final en el mar. En el caso de subestructuras, que por su peso y dimensiones, su izaje resulta impráctico se utiliza un proceso de lanzamiento para bajarla de la barcaza y posicionarla en su ubicación correcta. Esto dependerá principalmente del tirante, pues mientras más grande sea, resultará más difícil transportar al jacket en posición vertical. El lanzamiento consiste en provocar la inclinación de la barcaza, lastrando los compartimentos de

enfrente y que la estructura se deslice hacia el mar para después recuperarla y guiarla con el barco grúa. La operación puede apreciarse esquemáticamente en la figura 2.5

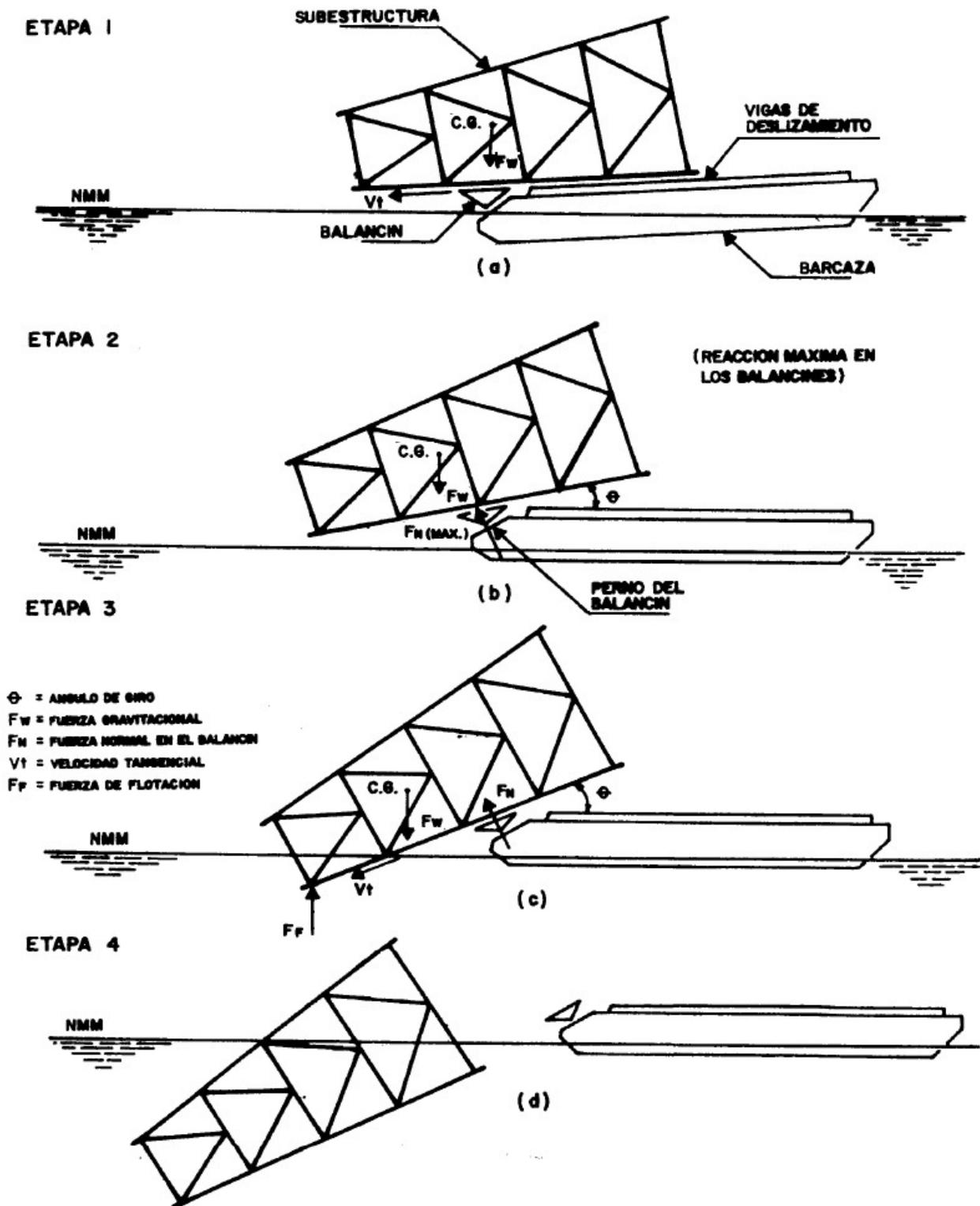


Figura 2.4 Esquema, secuencia de lanzamiento de una subestructura

Una vez que el chalán que transporta la estructura se reporta en el área, listo para iniciar la actividad de instalación, se debe inspeccionar la estructura a bordo del chalán.

Como parte de los preparativos, la zona de lanzamiento y el canal de tránsito para el remolque húmedo, debe ser inspeccionado para verificar la profundidad y la presencia de obstáculos, tales como líneas submarinas, irregularidades del fondo marino o desechos relevantes. La anticipación de esta inspección debe ser limitada a un máximo de 2 días. El canal de tránsito debe tener como mínimo un ancho de tres veces el ancho de la estructura.

Se debe realizar una inspección submarina en el lugar de asentamiento de la subestructura y demostrar que no existen obstrucciones submarinas y que el tirante es el adecuado. El área a cubrir en la inspección debe considerar las dimensiones de la base mas una franja perimetral de 25 m de ancho. Se debe mantener un claro bajo quilla (del barco grúa) equivalente al 10% del tirante de agua durante la operación de puesta en pie.

En caso de que la subestructura sea posicionada sobre una plantilla de perforación, debe haber una inspección completa del área, con énfasis en revisar que no existan obstrucciones durante el posicionamiento de la subestructura o que hagan contacto con los elementos estructurales de la elevación inferior. El área a cubrir debe considerar aparte de las provisiones del párrafo anterior, los desplazamientos laterales que se tengan que hacer con la subestructura para su acoplamiento con la plantilla. El reporte de la inspección debe contener la metrología y orientación de conductores, plantilla y guías de acoplamiento.

Una vez que se inspeccione la carga y el lecho marino se debe realizar el corte de seguros marinos de la subestructura a bordo del chalán. Deben estar disponibles a bordo del chalán, sistemas para monitorear el asiento y los niveles en los tanques.

En el caso de lanzamiento:

Antes de comenzar el lastrado, los seguros marinos deben ser removidos, tiempo durante el cual, el chalán se debe mantener en la posición de lanzamiento por los remolcadores. La estructura se lanza en dirección de la corriente dominante. Durante el lastrado final del chalán el número de personas a bordo debe ser reducido al mínimo necesario para controlar la operación de lanzamiento.

Antes de iniciar cualquier preparativo es esencial que el pronóstico meteorológico indique que se esté desarrollando un patrón ambiental estable y que prevalecerá durante el tiempo programado de la operación. La subestructura debe ser lanzada únicamente en un estado del mar con altura de ola significativa ( $h_s$ ) no mayor de 2 m.

Se debe designar un centro de control para las operaciones, de manera que todas las instrucciones y controles puedan ser realizados desde un punto central. Este centro debe estar equipado para poder manejar toda la información relacionada con las operaciones. Si la falla de cualquier equipo puede arriesgar la operación, el equipo debe estar duplicado, o se deben proporcionar sistemas alternos.

Antes del lanzamiento de la subestructura, se debe requerir una revisión del sistema de puesta en posición vertical y hacerse una inspección de la subestructura para confirmar que no han ocurrido daños durante el remolque. En esta etapa de los preparativos, el sistema de lastrado del chalán debe ser revisado y los resultados de la revisión confirmados con el centro de control.

Entonces comienzan a inundarse los compartimentos de la barcaza por popa, de tal forma que se genera un ángulo inicial de lanzamiento el cual es estimado durante el diseño; se tira de las orejas de botadura del jacket, por medio de un par de malacates colocados en la proa de la barcaza; cuando la estructura rompe la resistencia de fricción estática entre sus correderas y vigas de deslizamiento, inicia su movimiento hacia el agua. El tiempo de lanzamiento y recuperación a la flotación libre de la estructura también se estima previamente, durante la etapa de diseño.

Esto implica una operación bastante crítica para la estructura, que es el momento en que su centro de gravedad pasa sobre los pernos de giro de las vigas/balancín; éstas son un par de vigas móviles colocadas en la popa de la barcaza, que tienen por objetivo suavizar la entrada del jacket al agua.

Cuando llega este instante, la estructura está a punto de girar y abandonar la barcaza, y cuando esto pase, prácticamente todo su peso estará soportado sólo sobre las dos vigas/balancín. El procedimiento puede visualizarse en el esquema de la figura 2.4

El siguiente paso después de que la estructura flote libremente, es el giro que ésta habrá de experimentar desde su posición horizontal hasta la vertical. Esta operación se aprecia esquemáticamente en la figura 2.5 Con el objeto de que la estructura no salga mucho del agua, para no demandar tanta carga a la grúa, se utiliza un sistema de inundación controlada, para que mediante la inyección de agua en las secciones más bajas de las piernas de la subestructura y con el tiro vertical del gancho de la grúa, aquélla pueda ir cobrando poco a poco la posición vertical.

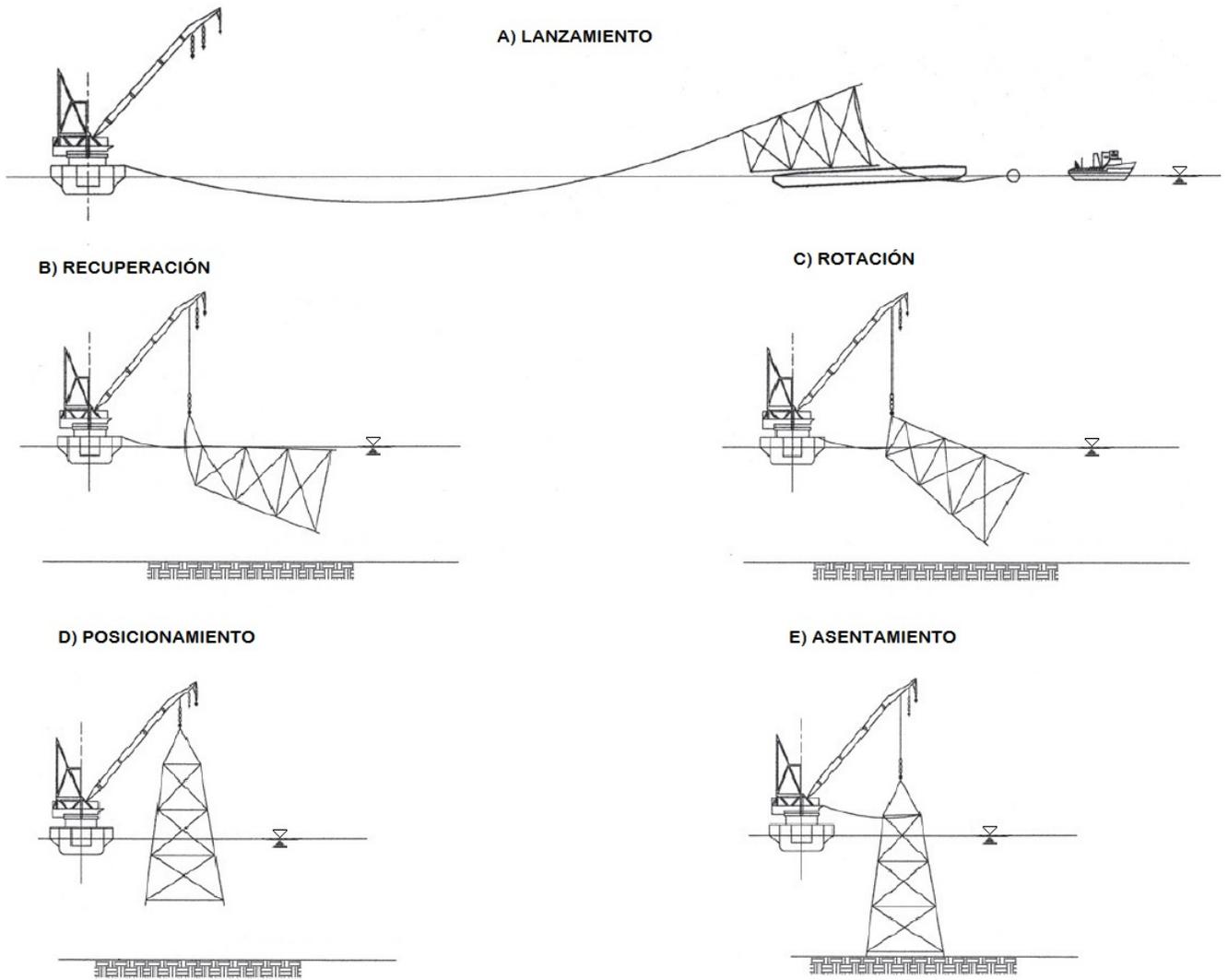
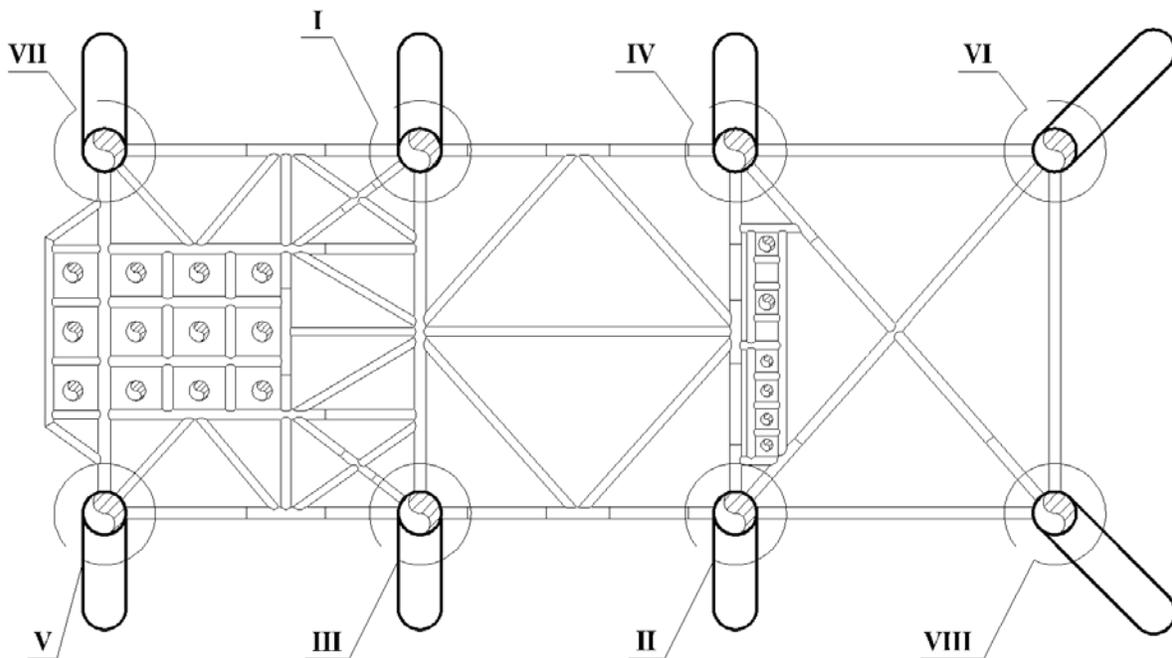


Figura 2.5 Esquema, secuencia de posicionamiento de una subestructura

## 5ª Etapa: Hincado de pilotes

Con la ayuda de barco grúa, los pilotes son llevados a través de las piernas de la subestructura (en el caso de pilotes principales) y/o a través de los faldones de tubos guías (en el caso de pilotes faldón), si llegan a ser usados.

Cuando el primer tramo de pilote es introducido en la pierna de la subestructura y se asienta en el suelo marino comienza la primera estación de hincado en la cual el pilote penetrará al suelo con el impulso de su peso propio; el peso del martillo también inducirá cierta penetración en el suelo. La colocación de pilotes se inicia por las piernas interiores y prosigue en la pierna a contra-esquina. En la figura 2.6 se ilustra de mejor manera el procedimiento.



**Figura 2.6 Secuencia de colocación de pilotes (croquis, vista en planta de una subestructura octópoda)**

La segunda estación de hincado comienza cuando se ha instalado el martillo y comienza a golpear para penetrar el primer tramo de pilote. La siguiente estación estará marcada cuando la cabeza del primer tramo alcance casi el punto de trabajo. Entonces se corta y se suelda el siguiente tramo para volver a acomodar el martillo y seguir el hincado. El número de estaciones, las características de los martillos y la penetración de diseño que habrán de alcanzar los pilotes dependen de los resultados obtenidos en los análisis en sitio, de operación y tormenta, y son definidos durante la etapa de diseño con la ayuda de los estudios geotécnicos y los análisis de hincado de pilotes.

La etapa de hincado termina cuando el último tramo de pilote, de la última pierna, alcanza su penetración de diseño.

#### 6ª Etapa: Izaje y colocación de la Superestructura

Al terminar el hincado de pilotes, estos se descabezan y esmerilan para dejarlos al nivel del punto de trabajo, que es el punto donde se unirá la subestructura con la superestructura. A continuación se retiran los estobos y accesorios utilizados durante el izaje que interfieren con la colocación de la superestructura.

Las columnas de la superestructura son entonces montadas sobre la punta de los pilotes, a través de una guía de acoplamiento, y ahí son soldadas con ayuda de los espaciadores y placas de relleno; a estos elementos se les conoce como detalles misceláneos de la subestructura. Los módulos prefabricados con los cuartos habitacionales, bombas ensambladas y otros equipos son traídos por medio de una barcaza y elevados al lugar donde serán colocados sobre la cubierta superior de la plataforma para completar la instalación.

La empresa encargada de la instalación, antes de comenzar con estas labores, debe preparar un programa indicando la duración de cada etapa de la instalación. El programa debe mostrar que la estructura puede estar segura dentro de un periodo con pronóstico meteorológico favorable, o ventana meteorológica esto de acuerdo a los puntos de no retorno o límites. La duración de este periodo variará dependiendo del tipo de operación y debe incluir el tiempo de contingencia. Se debe señalar en el programa el punto de inicio para la ventana meteorológica. Por consiguiente, como lineamiento, el programa debe preferentemente demostrar que las condiciones extremas pueden ser resistidas dentro de la ventana meteorológica. El involucramiento del inspector de aseguramiento marino normalmente termina cuando la condición “segura” ha sido alcanzada en cada etapa, la cual será definida de acuerdo a la operación marina que se esté realizando.

Las listas de revisión para el control de la maniobra deben ser redactadas detallando todas las condiciones requeridas que deben cubrirse antes de proceder a la siguiente etapa de operación.

Toda la planeación de las operaciones marinas está basada, cuando es posible, en el principio de que puede ser necesario suspender o revertir la operación. Cuando no sea posible, se deben definir en la planeación y en los manuales, “puntos de no-retorno” o límites.

### 2.3 Consideraciones de diseño para plataformas marinas

Durante el diseño de una estructura de esta naturaleza deben considerarse todos los tipos de carga probable, así como sus combinaciones más desfavorables. Podría pensarse que las cargas que se presentan en la condición de olaje de tormenta rigen por sí solas el diseño global de la estructura, o aquellas presentes en la condición de transportación. Sin embargo, podría no ser así, puesto que el diseño global de la estructura es regido por las cargas que se habrán de presentar en todas y cada una de las condiciones por las que pasará la estructura a lo largo de su vida. Las consecuencias por la falla o colapso de estas estructuras tienen implicaciones muy grandes, tanto económicas como de recursos humanos y ambientales.

Por lo tanto, todas las fases de la vida de la estructura que deben considerarse se pueden clasificar en las siguientes fases o condiciones de diseño.

Fase de operación normal. Es aquella que se define cuando la estructura queda instalada. Sus condiciones principales son durabilidad (vida por fatiga) y supervivencia (tormenta y sismo extremos). Para esta fase deben considerarse como mínimo los siguientes análisis:

Análisis en sitio:

1. Modelo de suelo.
2. Análisis de operación y tormenta.
3. Análisis de tormenta dinámico.
4. Análisis de resistencia última (Colapso).
5. Análisis sísmico nivel resistencia.
6. Análisis sísmico nivel de ductilidad.
7. Análisis de fatiga.
8. Análisis de hincado de pilotes.

Fases temporales. Son aquellas condiciones que se presentan de una manera temporal en la estructura, durante las etapas de instalación descritas anteriormente; fabricación (elevación de marcos principales), carga a la barcaza de las estructuras, transportación de las estructuras, lanzamiento de subestructura, izaje de las estructuras y pilotaje e inyección de concreto para pilotes faldón y principales. Para esta fase deben considerarse los siguientes análisis:

Análisis de embarque, transportación e instalación:

9. Análisis de arrastre de la subestructura.
10. Análisis de arrastre de la superestructura.
11. Análisis de embarque de la subestructura.
12. Análisis de embarque de la superestructura.
13. Análisis de transportación de la subestructura.
14. Análisis de transportación de la superestructura.
15. Análisis de transportación de pilotes.
16. Análisis de lanzamiento y posicionamiento de la subestructura.
17. Análisis de estabilidad de placa base.

Análisis de izaje:

18. Análisis de izaje de la subestructura.
19. Análisis de izaje de la superestructura.

Análisis y diseño de accesorios para el arrastre e izaje:

20. Análisis de oreja de arrastre en elemento finito de la subestructura.
21. Análisis de oreja de arrastre en elemento finito de la superestructura.
22. Análisis de oreja de izaje en elemento finito de la subestructura.
23. Análisis de muñones de izaje en elemento finito de la superestructura.

Análisis y diseño de otros accesorios estructurales:

24. Análisis de protector de ducto ascendente.
25. Análisis de monorriel.
26. Análisis de mesa de estrobos.

# *Capítulo III*

Descripción de la maniobra de izaje

### 3. Descripción de la maniobra de izaje

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, la maniobra de izaje es parte de las etapas de la instalación de una plataforma en su ubicación final en mar abierto. Consiste en levantar a la estructura con la ayuda de un barco grúa, a través de un sistema de aparejos conectados a los puntos de izaje, que a su vez, estos puntos están soldados a los elementos principales de la subestructura (regularmente en las piernas). En el capítulo anterior se ha descrito la manera como se desarrolla la maniobra constructivamente. En esta parte nos concentraremos un poco más en los parámetros necesarios para el desarrollo del diseño estructural. Todas las consideraciones y recomendaciones están basadas en las normas NRF-041-PEMEX-2014, NRF-173-PEMEX-2009 y API RP 2A-WSD. Así que, en adelante, cuando se haga referencia “a las normas” o simplemente “a la norma”, nos estaremos refiriendo a las normas aquí citadas.

#### 3.1 Consideraciones generales para el diseño del izaje

En el análisis de un izaje se pueden distinguir cuatro componentes estructurales principales: los aparejos, los puntos de izaje, los elementos principales de la estructura y los elementos secundarios de la estructura.

Los aparejos son el sistema de cables y accesorios que se sujetan del gancho de la grúa hacia los puntos de izaje para realizar la maniobra, incluye grilletes, estrobos o grommets y barras espaciadoras. Estos elementos no son parte del diseño sino que se seleccionan de acuerdo a las características que ofrece el mercado y que cumplan con los requerimientos de trabajo para realizar la maniobra; al final de este capítulo (en el subcapítulo 3.4) se explica cómo se realiza esta selección de acuerdo a la normatividad aplicable. Regularmente se construye, a la altura de los puntos de izaje, una plataforma o mesa de estrobos, que se utiliza para auxiliar a las maniobras de acomodo de los cables, para la colocación de los grilletes, etc. La mesa de estrobos normalmente esta fija a la estructura y se retira cuando se completa la maniobra del izaje, o puede ser parte de los aparejos cuando se utilizan barras espaciadoras. En la figura 3.1 se ilustra un arreglo de aparejos con eslingas, grilletes y una barra espaciadora en color amarillo. En la parte más alta se observa el gancho de la grúa.



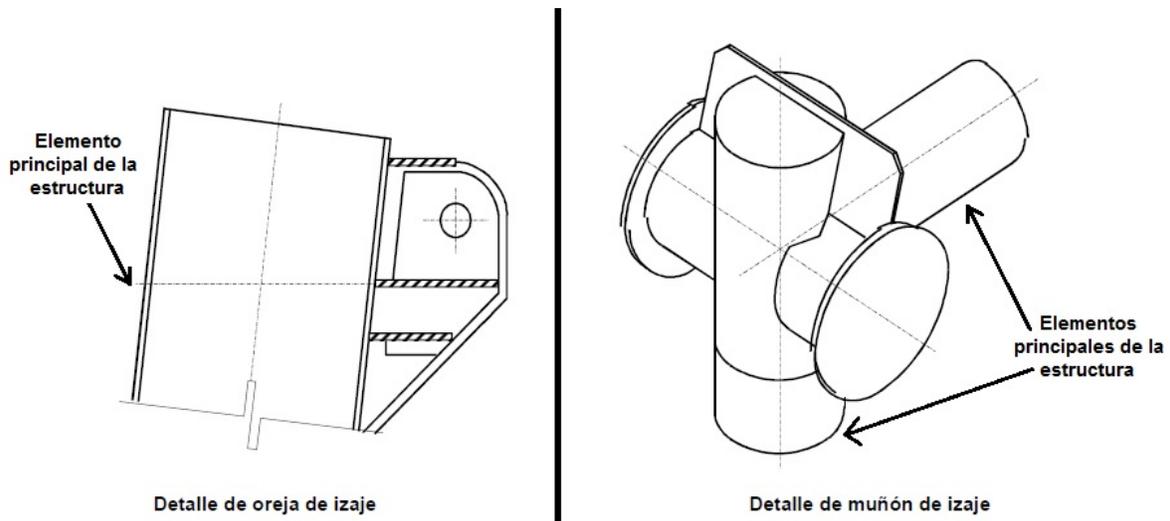
**Figura 3.1 Fotografía de una prueba de carga**

Las normas consideran como puntos de izaje a las orejas y muñones (algunas veces llamados accesorios estructurales), estos elementos son los que están conectados a los aparejos, y se sueldan directamente a los elementos principales de la estructura. En la figura 3.2 se muestra un esquema de estos elementos. También, aquellos extremos de las barras espaciadoras donde se conectan eslingas y grommets son considerados como puntos de izaje. Los puntos de izaje no son evaluados dentro del análisis de izaje; para las orejas y muñones se desarrolla una revisión local a base de elementos finitos, la cual se describe brevemente al final del capítulo cuatro, en la sección 4.5

La diferencia principal entre una oreja y un muñón de izaje, radica en que la oreja requiere la incorporación de un grillete para ser izada. La oreja está formada por un conjunto de placas planas que cuentan con un agujero en el centro, y en el cual se introduce el perno del grillete. El grillete es el medio de conexión entre el cable y la oreja.

El muñón está formado principalmente de elementos tubulares y al centro suele llevar una placa plana que se diseña para resistir las fuerzas de cortante que le inducirá la eslinga.

Antes de comenzar con el análisis es importante contar con un pre diseño de los puntos de izaje. Pues estos elementos son relevantes para la determinación de la configuración de los cables; sobre todo en los offsets y el ángulo vertical para determinar la altura del gancho.



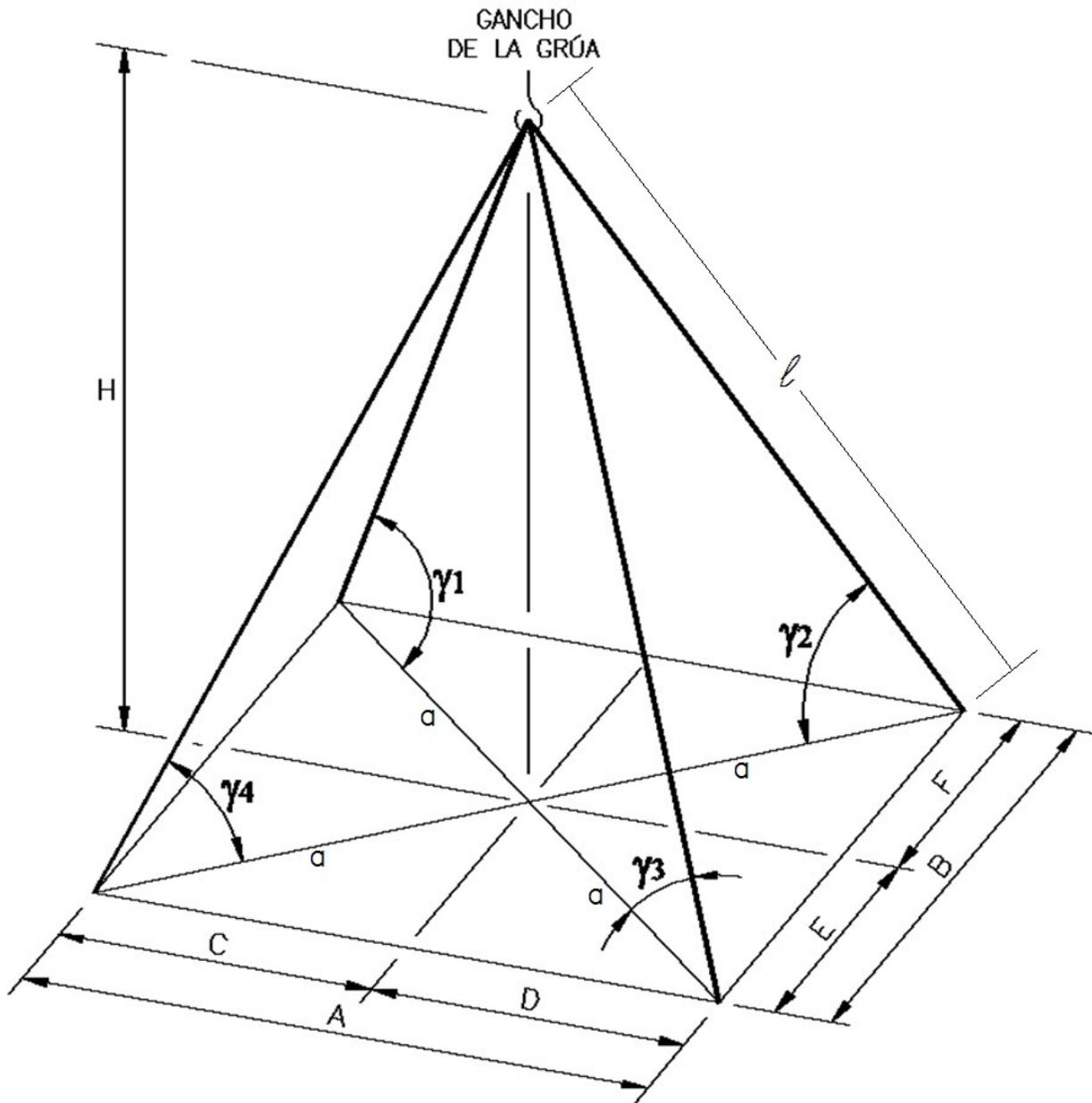
**Figura 3.2 Esquema de puntos de izaje**

Un miembro (o elemento estructural) se considera como primario o principal cuando el colapso de la estructura completa pueda ser resultado de la falla de este elemento. Generalmente, los puntos de izaje son directamente conectados a los miembros primarios. Todos los demás elementos que conforman la estructura son definidos como secundarios.

### 3.2 Altura del gancho y longitud de los cables

En la figura 3.3 se muestra un esquema con el arreglo típico de aparejos que se utiliza para analizar el izaje de una estructura. El gancho de la grúa regularmente se considera como un punto, del cual parten todas las eslingas hacia los puntos de izaje.

Para evitar movimientos abruptos durante el levantamiento de la estructura, el centro de gravedad de la estructura debe coincidir con la posición del gancho en su proyección sobre el plano horizontal. Por lo cual siempre asumiremos que las coordenadas horizontales del centro de gravedad (C.G.) son las mismas que la posición del gancho. De esa manera la línea de acción de la fuerza que la grúa aplica para levantar a la estructura, coincidirá con el centro de gravedad, evitando la generación de momentos.



**Figura 3.3 Esquema de arreglo de eslingas**

La norma indica que si se desconoce la longitud real de la eslinga, para determinar las fuerzas de tensión que ésta transmite, se recomienda considerar un ángulo vertical  $\gamma = 67.5^\circ$  con una tolerancia de diseño de más o menos 7.5 grados. Los cables son fabricados regularmente en tramos de 20, 40 y 60 m. Entonces para determinar la altura del gancho se debe tomar en cuenta un ángulo vertical comprendido entre  $60^\circ$  y  $75^\circ$ , con una longitud del cable  $l = 20, 40$  ó  $60$  m.

A veces no es posible cumplir con ambas recomendaciones de manera simultánea. En tal caso se debe buscar la configuración que más se aproxime a los parámetros recomendados, de tal manera que se evite utilizar contrapesos, más grúas o ganchos o y/o barras espaciadoras flotantes; aditamentos que elevan el número de variables a considerar para el desarrollo del análisis, y que no son contraladas y/o no pueden ser definidas con toda certeza en la etapa de diseño. No se debe perder de vista que el contratista de instalación, antes de comenzar sus labores, deberá revisar la ingeniería de diseño y verificar el peso de la estructura, su centro de gravedad y los aparejos contemplados; y que en base a esto decidirá el modo en que desarrollará la maniobra y si utiliza o no otros aditamentos, pudiendo incluso, desarrollar una ingeniería diferente.

Dado que se conoce las dimensiones de la estructura y los elementos principales donde se sujetarán los puntos de izaje, como primera aproximación, y considerando nuevamente el esquema de la figura 3.3, la longitud ( $a$ ) que hay entre el punto de izaje y la posición del gancho, sobre el plano horizontal, puede definirse como se muestra a continuación:

$$a = \sqrt{(A/2)^2 + (B/2)^2}$$

Como primera aproximación, conviene que el gancho de la grúa se posicione sobre el centro geométrico del arreglo de los aparejos. Regularmente esto no ocurre así, pues el centro de gravedad difícilmente coincidirá con el centro geométrico.

Con estos datos se puede determinar el ángulo vertical de los cables y el altura del gancho como se indica a continuación:

$$\sec \gamma = \frac{l}{a}$$

$$\gamma = \text{ang sec } \frac{l}{a}$$

$$\gamma = \text{ang sec } \frac{l}{\sqrt{(A/2)^2 + (B/2)^2}}$$

Donde la longitud ( $l$ ) puede ser 20, 40 ó 60 m de modo que:

$$60^\circ < \gamma < 75^\circ$$

Una vez determinado el ángulo a utilizar, podremos determinar el altura H, con la siguiente expresión:

$$H = a \times \tan \gamma$$

Se debe tomar en cuenta que para esta primera aproximación, todos los ángulos  $\gamma$  y todas las diagonales (a) tienen el mismo valor, pues estamos considerando la posición del gancho en el centro geométrico del arreglo.

Una vez que determinemos el centro de gravedad de la estructura C.G. podemos colocar al gancho en sus coordenadas horizontales. Para determinar el C.G. podemos correr el programa de análisis con el peso propio de la estructura y las cargas de la estructura no modelada. Regularmente los programas de diseño hacen el cálculo del peso de la estructura y del centro de gravedad. En la figura 3.4 se muestra el arreglo de los aparejos con la nueva ubicación del gancho.

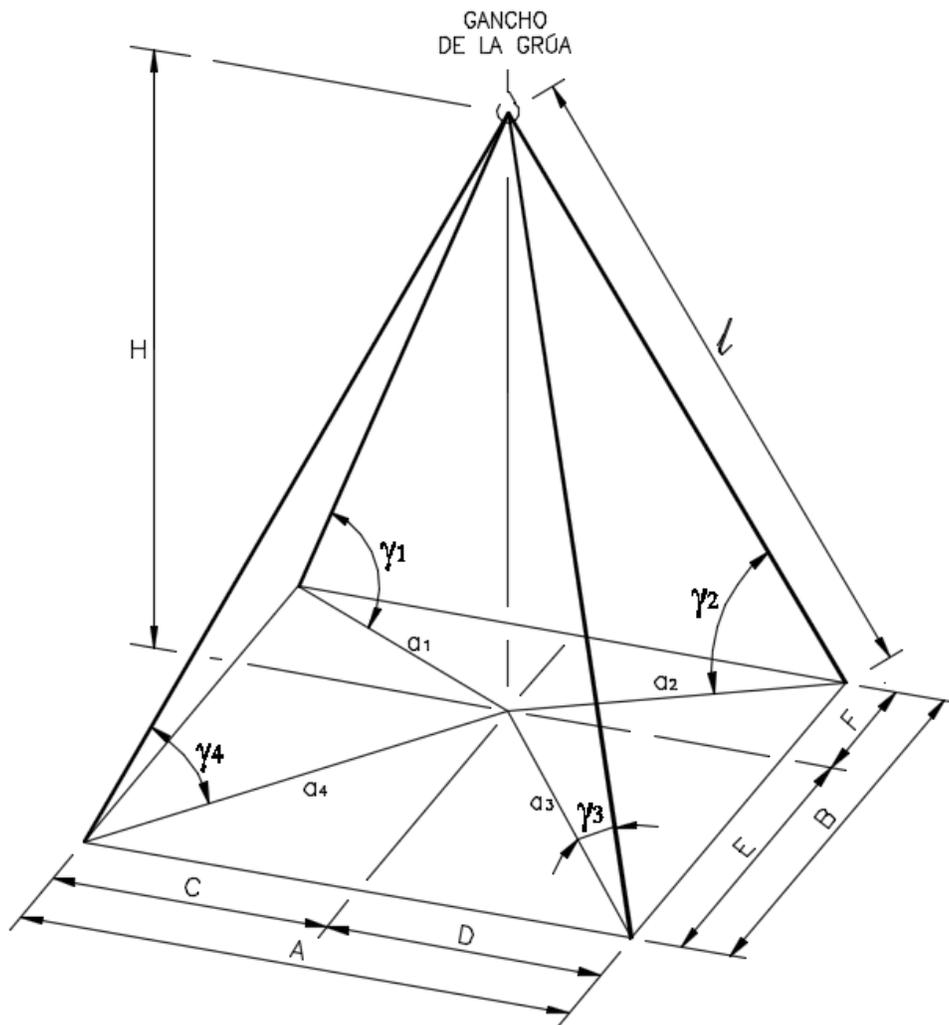


Figura 3.4 Esquema de arreglo de eslingas, donde el gancho coincide con el C.G.

Como puede apreciarse en el esquema de la figura 3.4, ahora el valor de los ángulos  $\gamma$  y el de las diagonales ( $a$ ) será distinto para todos los puntos de izaje. Sin embargo, todos tendrán el mismo valor para la altura  $H$ . También se puede apreciar que para todos los puntos de izaje se cumple que:

$$\tan \gamma_n = \frac{H}{a_n}$$

Como ya se mencionó antes, la norma recomienda utilizar ángulos verticales  $\gamma$  entre  $60^\circ$  y  $75^\circ$  para lo que entonces se debe de cumplir que:

$$1.732 \leq \tan \gamma_n \leq 3.732$$

Y la longitud de los cables puede determinarse con la expresión:

$$l_n = \sqrt{H^2 + a_n^2}$$

Tomando en cuenta estos parámetros, nos podemos apoyar en la tabla que a continuación se presenta para determinar el altura  $H$  que más se aproxime a las recomendaciones indicadas en la norma. En este ejemplo el C.G. se localiza al centro del arreglo pero desfasado en la dirección longitudinal por lo que las diagonales serán simétricas, de modo que  $a_1 = a_2$  y  $a_3 = a_4$ . Por lo tanto, en la tabla sólo aparecen los valores correspondientes a  $a_1$  y  $a_4$ .  $a_1 = 274.1877$  in y  $a_4 = 386.4517$  in.

**Tabla 3.1 Determinación de la altura de gancho H.**

H [in]	$\tan \gamma_1$	$\tan \gamma_4$	$\gamma_1$ [°]	$\gamma_4$ [°]	$l_1$ [m]	$l_4$ [m]
669.334	2.441	1.732	67.7	60.0	18.372	19.631
675.334	2.463	1.748	67.9	60.2	18.513	19.763
681.334	2.485	1.763	68.1	60.4	18.655	19.896
686.043	2.502	1.775	68.2	60.6	18.766	20.000
687.334	2.507	1.779	68.3	60.7	18.796	20.029
693.334	2.529	1.794	68.4	60.9	18.938	20.162
699.334	2.551	1.810	68.6	61.1	19.080	20.295
705.334	2.572	1.825	68.8	61.3	19.222	20.428
711.334	2.594	1.841	68.9	61.5	19.364	20.562
717.334	2.616	1.856	69.1	61.7	19.506	20.696
723.334	2.638	1.872	69.2	61.9	19.648	20.830
729.334	2.660	1.887	69.4	62.1	19.791	20.965
735.334	2.682	1.903	69.6	62.3	19.934	21.100
741.334	2.704	1.918	69.7	62.5	20.077	21.235

Se ha comenzado desde un ángulo  $\gamma_4 = 60^\circ$  y se ha ido incrementando el altura  $H$  cada 6 in hasta encontrar un altura para la cual los ángulos sean apropiados y la altura  $\leq 20$  m.

### 3.3 Control de peso

El peso y centro de gravedad de las estructuras tienen una gran relevancia para el desarrollo de la instalación durante todas sus etapas, por ello deben ser estimados a través de un Sistema de Control de Peso; el cual debe ser conducido durante el proceso de diseño y sobre todo, durante el proceso de fabricación. El peso y centro de gravedad se deben predecir para cada una de las operaciones a las que se someterá la estructura (carga, transporte, instalación). Se puede incurrir en un error al pensar que el peso y centro de gravedad de una estructura será el mismo para todas las etapas. Por ejemplo, durante el arrastre se requiere de un marco de arrastre, que se suelda a la base de las estructuras para deslizarlas sobre las vigas correderas. Sin embargo, el peso de este marco no debe ser considerado para el análisis de izaje, pues se separa de la estructura y se queda en el chalán de transportación cuando se va a comenzar la maniobra de izaje.

El control de peso tiene dos objetivos principales. Por un lado, contar con una mayor certidumbre al momento de evaluar la integridad de la estructura en cualquier etapa del diseño y durante la construcción. Y por otra parte, anticipar los efectos en la integridad estructural al confirmarse o al variar el peso de los elementos al concluir la etapa de fabricación en patio; pues siempre existirán ciertas variaciones, por mínimas que sean, entre la configuración de la estructura desarrollada durante la ingeniería de diseño y la etapa de fabricación. A veces pueden presentarse interferencias entre elementos que no se observaron durante la etapa de diseño; o a veces lo propuesto por el diseñador resulta más difícil para el contratista de instalación, el cual realiza modificaciones que le ayuden a desarrollar las maniobras con más eficiencia, de acuerdo a su experiencia. Por ello el control adecuado de los elementos que conforman a las estructuras impacta en el desarrollo de las operaciones.

Durante la etapa de diseño el control de peso se realiza a través de dos procedimientos, por medio de los análisis desarrollados en computadora y a través de la cuantificación de cada elemento que compone a la estructura. El modelo de análisis estructural revela (casi de manera directa) el peso de las estructuras y la ubicación del centro de gravedad a través de coordenadas cartesianas (x, y, z). La cuantificación se realiza tomando en cuenta la longitud (o área) de cada elemento que compone a las estructuras. En la figura 3.5 se presenta una tabla que se utiliza como apoyo para llevar a cabo la cuantificación del peso de las estructuras. El peso obtenido por ambos casos se compara entre sí para detectar errores.

Cabe mencionar que dentro del software hay accesorios que únicamente se modelan como peso (cargas puntuales, cargas uniformemente distribuidas, etc.) y no se genera una pieza tridimensional



Una vez que la fabricación de la estructura esté concluida, se deberá realizar un pesaje electrónico de la misma, con el cual se realizará la revisión del diseño verificando el control de peso llevado durante esta etapa. La norma indica que es obligatorio este pesaje si el ensamble de la plataforma se realiza por izaje en aire con un peso mayor a 1,000 ton. o cuando el peso sea menor a 1,000 ton. pero supere el 75% de la capacidad de izaje de la grúa a emplear.

El pesaje electrónico se realiza a través de celdas de carga instrumentadas en los apoyos de las estructuras. Las celdas convierten la fuerza en una señal eléctrica. Esta conversión es indirecta pues mediante un dispositivo mecánico, la fuerza que se desea medir deforma un extensómetro y el extensómetro convierte el desplazamiento o deformación en señales eléctricas, las cuales son procesadas por un convertidor analógico/digital, a esta conversión se le aplica un algoritmo adecuado y se consigue así calcular la fuerza aplicada al transductor (celda de carga).

El procedimiento de pesaje debe incluir datos como la entidad responsable de quien lo realice, descripción y método utilizados, certificados de calibración, lista de partes de repuesto que estarán disponibles durante el procedimiento, esquemas para la distribución y montaje de los equipos, la carga esperada que se presentará en cada punto de pesaje y la organización que llevará a cabo el contratista para realizar el procedimiento; el contratista deberá preparar esta información 24 horas antes de la operación. Se debe asegurar que los puntos donde se dispongan las celdas, soporten adecuadamente las cargas que estas imponen. De ser necesario, estas zonas deben ser reforzadas con elementos adicionales.

Antes del pesaje se deberán retirar contenedores de basura, equipo de construcción, acumulaciones de agua, nieve o hielo, personal que no esté involucrado en el pesaje, andamiaje que no se ocupe, fluidos de tuberías y recipientes empleados en pruebas hidrostáticas, y todos aquellos elementos que causen cargas ajenas al procedimiento de instalación. El peso de todos los elementos temporales no debe exceder el 1% del valor del peso de elementos permanentes al momento del pesaje.

Para casos especiales como pudieran ser los módulos, paquetes de equipos, entre otros, la definición o comprobación de su peso y centro de gravedad se podrían realizar por medio de un pesaje directo.

El contratista presentará un reporte del pesaje electrónico dentro de los siguientes siete días calendario, posteriores al pesaje. En las siguientes figuras (3.6, 3.7 y 3.8), se ilustra un ejemplo de control de peso para una subestructura. La figura 3.6 es una tabla con el peso de los elementos y la localización de sus centros de gravedad, y las otras dos, figura 3.7 y 3.8 corresponden a los croquis de localización del C.G. de la subestructura completa.

ITEM	EQUIPMENT	CONTINGENCIA	PESO ESTIMADO		COORDENADAS			MOMENTOS DE IZAJE			
			PESO (Kg)	PESO FACTORIZADO (Kgf)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Σ X <sup>2</sup> Y <sup>2</sup> (Kilogramo-mm)	Σ Y <sup>2</sup> X <sup>2</sup> (Kilogramo-mm)	Σ Z <sup>2</sup> Y <sup>2</sup> (Kilogramo-mm)	
1	DESCRIPCION										
2	MARCO EJE 1	5%	708.815.41	744.256.18	4.16	-29563.37	-65972.75	3096105.711	-220027208.39	-48877350079	
3	MARCO EJE 2	5%	502.404.57	547.524.60	1893.16	-6687.95	-66119.20	1793816048	-649807692	-68645681657	
4	MARCO EJE 3	5%	881.696.34	925.781.16	2011.04	6858.03	-66485.95	1861765277	6345034360	-6134776957	
5	MARCO EJE 4	5%	676.641.72	710.473.81	-9.19	29550.27	-65643.18	-462946517.23	20994651942	-46566711973	
6	MARCO EJE A (ARRIOSTRAMIENTOS Y LARGUEROS)	5%	517.141.86	542.998.95	20359.51	-49.58	-77360.42	110551926.14	-26621888.09	-4184372379	
7	MARCO EJE B (ARRIOSTRAMIENTOS Y LARGUEROS)	5%	515.033.29	540.784.95	-20396.55	-81.88	-77300.42	-1103014736.4	-27633887.95	-41813736035	
8	ARRIOSTRAMIENTOS Y LARGUEROS +6.096	5%	30.776.85	32.315.69	-59.52	-4377.18	6.161.69	-1923443.439	-141451603.6	199119167.8	
9	ARRIOSTRAMIENTOS Y LARGUEROS -9.500	5%	44.804.02	47.044.22	14.83	-3773.91	-9499.69	689256.9532	-177540656.1	-446905515.9	
10	ARRIOSTRAMIENTOS Y LARGUEROS -30.000	5%	54.381.80	57.066.39	22.98	-6598.32	-29999.82	1287575.847	-319492734.9	-1712071764	
11	ARRIOSTRAMIENTOS Y LARGUEROS -52.000	5%	75.145.81	78.903.10	-10.17	-5615.17	-51999.35	-802444.5321	-443054322.8	-4102909939	
12	ARRIOSTRAMIENTOS Y LARGUEROS -76.000	5%	116.879.57	122.723.55	-29.97	-4671.61	-75999.17	-3678024.749	-573316556.4	-6326687825	
13	ARRIOSTRAMIENTOS Y LARGUEROS -102.000	5%	228.603.50	240.033.78	43.57	-1277.42	-102000.11	1045827.179	-306623951.2	-24483471964	
14	ARRIOSTRAMIENTOS Y LARGUEROS -115.000	5%	237.476.96	249.950.70	-6.56	-350.39	-116814.72	-1636562.728	-87370933.96	-28828611524	
15	ELEMENTOS INTERMEDIOS ENTRE ELEV. -102.000 Y -115.600	5%	13.043.70	13.695.89	0.00	-0.28	-108900.00	0	-3934.8478	-1490112289	
16	PLACA BASE DE LLECHO MARINO Y REFUERZOS	5%	140.199.14	147.205.10	11.08	40.39	-118940.54	1631573.78	5945336.462	-11067501654	
17	EMBARCADERO 1 (ESCALERA, REJILLA, BARRANDALES, PLACAS, ABRAZADERAS, Y ELEMENTOS ESTRUCTURALES) OESTE	5%	33.144.14	34.801.34	10222.57	-15990.00	-32.28	355759123	-656125448.9	-1123475.301	
18	EMBARCADERO 2 (ESCALERA, REJILLA, BARRANDALES, PLACAS, ABRAZADERAS Y ELEMENTOS ESTRUCTURALES) ESTE	5%	34.095.46	35.800.23	-10224.25	15905.62	-36.56	-366030443.8	668432110.9	-1309030.229	
19	DEFENSAS (PLACAS Y ELEMENTOS ESTRUCTURALES) 3 DIF.	5%	21.325.05	22.391.30	-3462.14	-7714.60	969.37	-172739912.6	2215334.14	-38124729.12	
20	CAMISAS DE SUCCION DE AGUA DE MAR (PLACAS Y ELEMENTOS ESTRUCTURALES)	5%	20.403.91	21.424.00	2186.05	11434.57	-1719.53	47026808.29	244974209.1	-587702950	
21	ANILLOS INTERNOS (PLACAS)	5%	74.454.84	78.187.87	3971.03	91.56	-75165.40	310486524.6	7159139.939	-274102675	
22	ANILLOS POR COLAPSO HIDROSTATICO (PLACAS)	5%	39.037.54	40.989.41	-1997.19	2965.87	-66073.29	-81863825.56	121569297.2	-474102675	
23	PASILLO DE ACCESO +6.096 (REJILLA, PLACAS, BARRANDALES Y ELEMENTOS ESTRUCTURALES)	5%	16.670.20	17.503.71	-1.57	2.04	6685.31	-27403.60838	3576770021	12142754.1	
24	GREAS DE POSICIONAMIENTO VERTICAL	5%	8.198.39	8.608.31	0.83	0.63	9963.96	7144.896885	7144.896885	85686766.43	
25	TUBO J (PLACAS Y ELEMENTOS ESTRUCTURALES)	5%	14.787.80	15.527.19	-4825.98	10711.73	-60008.06	-74933936.87	166320028.6	-10249196853	
26	ANODOS DE SACRIFICIO	5%	274.266.96	287.979.88	623.85	-1927.37	-70406.99	179656347	-555044056.4	-20275796865	
27	MESA DE ESTROBOS	5%	7.045.68	7.397.96	-9371.97	-0.56	2963.75	-69333475.86	-4142.656996	2192570.22	
			<b>5,686,453.80</b>	<b>5,970,776.49</b>	<b>654.26</b>	<b>-574.33</b>	<b>-70,353.68</b>	<b>3,906,462,959</b>	<b>-3,429,209,924</b>	<b>-420,066,113,900</b>	
ITEM	DESCRIPCION										
1	PILOTES	5%	2,395,733.53	2,515,620.21	30.79	-43.38	-150,625.00				
			<b>2,395,733.53</b>	<b>2,515,620.21</b>							

Figura 3.6 Ejemplo de control de peso de una subestructura

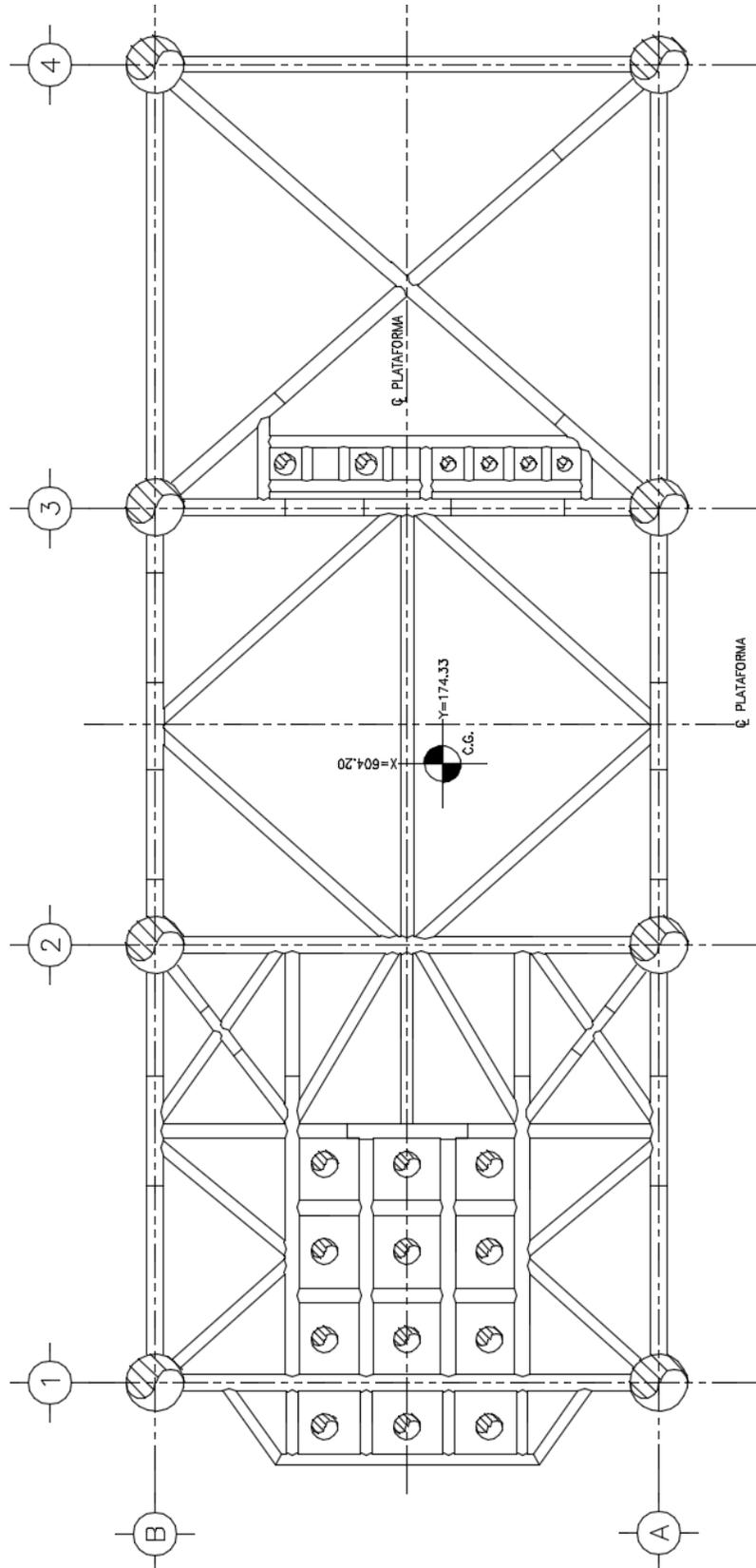
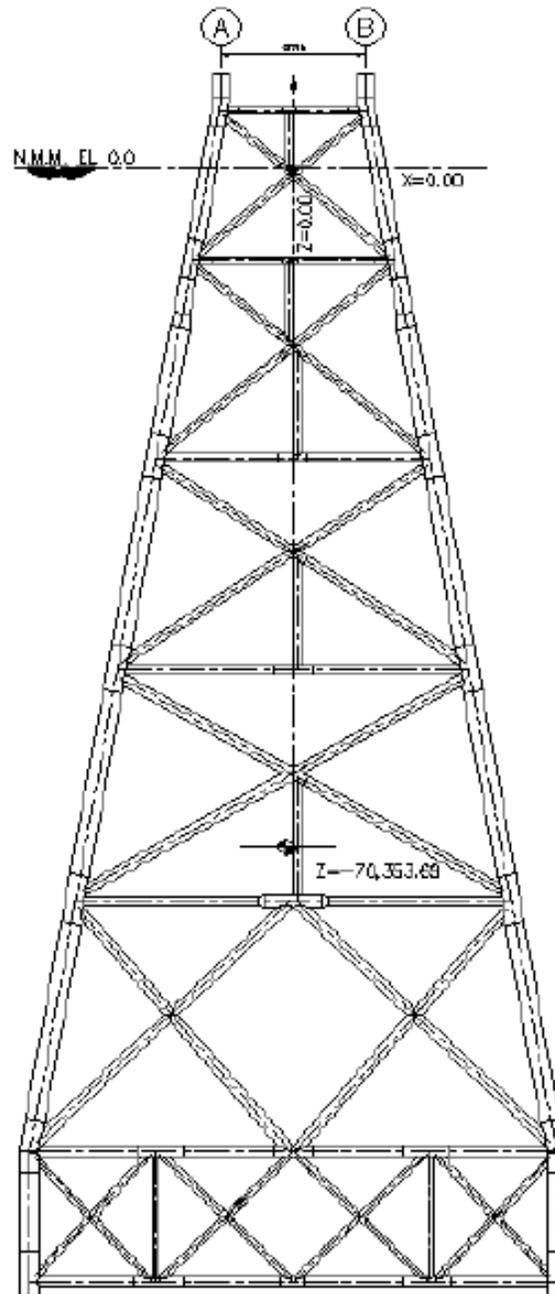


Figura 3.7 Localización del centro de gravedad, croquis en planta



LOCALIZACIÓN DE CENTRO DE GRAVEDAD EN ELEVACIÓN

Figura 3.8 Croquis en elevación de centro de gravedad

### 3.4 Selección del cable y grillete

En la norma API RP 2A-WSD, se indica que en maniobras de instalación costa-afuera para condiciones normales, las eslingas deben ser seleccionadas a partir del valor correspondiente a la fuerza mínima de ruptura nominal asignada por el fabricante del cable considerando un factor de seguridad de 4.0. Es decir, que la eslinga seleccionada deberá tener una capacidad cuatro veces mayor a la fuerza de tensión que el izaje demande.

De acuerdo con lo indicado en el párrafo anterior, se debe considerar la tensión máxima ( $T_{max}$ ) en los cables de izaje para la combinación de carga que considera el peso de la estructura y las cargas de los elementos no modelados afectados con un factor de contingencia, por lo tanto, la fuerza de ruptura ( $F_r$ ) para la selección del cable a emplearse durante el izaje se obtiene multiplicando por el factor de seguridad de 4.00 esta tensión máxima:

$$F_r = T_{max} \times 4.0$$

El API RP 2A-WSD indica que los grilletes y los pernos deben ser seleccionados con la carga de trabajo evaluada por el fabricante la cual será igual o más grande que la carga estática de trabajo, siempre que las especificaciones del fabricante incluyan un factor de seguridad mínimo de 3.0 comparado con la carga mínima de ruptura. Es decir, que el grillete seleccionado deberá tener una capacidad de carga tres veces mayor a la fuerza de tensión que el izaje demande.

Cabe mencionar que los fabricantes normalmente consideran la carga máxima del grillete con un factor de 4.0 a 5.0, por lo que al seleccionar el grillete, se toma en cuenta la tensión máxima del cable ( $T_{max}$ ), sin factor de seguridad, pero siempre verificando que la carga límite de trabajo especificada por el fabricante considere este factor y que el fabricante especifique qué factor está tomando en cuenta.

A continuación se presentan una tabla de catálogo para la selección del cable y otra para la selección del grillete. Con el recuadro rojo se está indicando la selección de cada accesorio tomando en cuenta una tensión máxima en el cable de  $T_{max} = 769.45$  kips (349.02 ton.) ya con el factor de contingencia ( $FC = 1.1$ ).

De acuerdo con lo indicado, la tensión máxima ( $T_{max}$ ) en los cables de izaje es de 767.34 kips (348.06 ton.), por lo tanto, la fuerza de ruptura ( $F_r$ ) para la selección del cable a emplearse durante el izaje se obtiene multiplicando por el factor de seguridad de 4.00:

$$F_r = (T_{max}) * F.S.$$

$$F_r = 769.45 \text{ kips} * 4.0$$

$$F_r = 3,077.8 \text{ kips}$$

Por lo tanto debe seleccionarse una eslinga cuyo valor de fuerza de ruptura sea como mínimo 3,077.8 kips (1396.08 ton).

**Tabla 3.2 Listado de cables de la compañía Hendrik Veder.**

Nominal diameter		Approximate weight		Minimum Calculated Rope Breaking Load (CRBL)	
inch	mm	kg/m	lb/ft	metric tons 1,000 kg	short tons 2,000 lbs
3 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	82	24	16	300	330
3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	89	27	18	345	380
3 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	96	30	20	395	425
4	102	31	21	470	515
4 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	108	38	25	505	555
4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	114	44	30	575	630
4 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	120	48	33	640	705
5	127	53	35	710	780
5 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	133	58	39	775	850
5 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	139	67	45	860	945
6	152	80	54	1,030	1,135
6 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	159	82	55	1,140	1,255
7	178	100	68	1,425	1,570
7 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	197	122	82	1,780	1,960
8 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	216	151	101	2,125	2,340
9 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	241	196	131	2,540	2,800
10 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	260	215	144	2,785	3,070
11	280	260	175	3,235	3,565
11 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	298	295	198	3,630	4,000
12 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	318	340	228	4,140	4,560
13 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	336	380	255	4,485	4,940
14	356	425	285	4,940	5,445
14 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	374	475	320	5,495	6,055
15 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	400	530	356	6,065	6,685
16 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	419	590	396	6,670	7,350
17 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	438	640	430	7,185	7,920
18	457	695	467	7,700	8,485

Recordemos que la utilización de grilletes es necesaria únicamente cuando se emplean orejas para la realización del izaje. Como se mencionó anteriormente, en este ejemplo se considera una carga estática de trabajo igual a 767.34 kips (348.06 ton.), por lo tanto, se propone un grillete “tipo Crosby” con capacidad de 400 ton, ver figura siguiente. Cabe mencionar que el fabricante, para este caso, considera la carga máxima del cable con un factor de 4.0, por lo que se toma la tensión máxima del cable, sin factor de seguridad, para seleccionar el grillete.

Tabla 3.3 Listado del manual de grilletes Crosby.

**Load Rated**

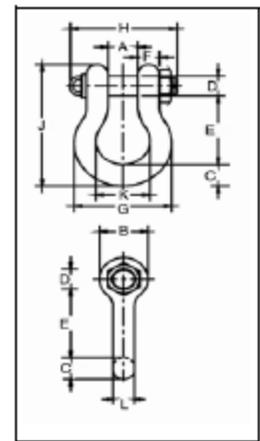


**G-2140 / S-2140  
GRILLETE TIPO  
ANCLA CON PERNO**



G-2140 cumple la Especificación Federal RR-C-271D, Tipo IVA, Grado B, Clase 3, excepto por las provisiones exigidas del contratista.

- La carga límite de trabajo está indicada en cada grillete.
- Cuerpo y perno de aleación.
- Templado y revenido.
- Todos los tamaños son probados con carga individualmente a 2.0 veces la carga límite de trabajo.
- Los grilletes para 200 tons métricas y más grandes se entregan con:
  - Prueba no destructiva
  - Perno y cuerpo con No. de serie.
  - Certificación de material (química)
- La certificación se debe solicitar al hacer el pedido.
- Acero de aleación forjado de 30 a 175 tons. Acero de aleación de fundición de 200 a 400 tons métricas.
- Pernos galvanizados y de color rojo.



AVISO: Todos los grilletes de 200 tons métricas y mayores, son inspeccionados con partículas magnéticas y ultrasonido. Prueba a plena carga disponible a solicitud del cliente.

Tamaño nominal (plg)	Carga límite de trabajo (t)*	No. de parte		Peso de c/u (lbs.)	Dimensiones (plg)											Tolerancia +/-	
		G-2140	S-2140		A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	A	E
1-1/2	30	1021110	1021129	20.8	2.38	3.62	1.62	1.63	5.75	1.39	6.88	7.75	10.00	3.88	1.54	.13	.25
1-3/4	40	1021138	1021147	33.9	2.88	4.19	2.25	2.00	7.00	1.75	8.86	9.06	12.34	5.00	1.84	.13	.25
2	55	1021156	1021165	52.0	3.25	4.81	2.40	2.25	7.75	2.00	9.97	10.41	13.68	5.75	2.08	.13	.25
2-1/2	85	1021174	1021183	96.0	4.12	5.69	3.12	2.75	10.50	2.62	12.87	13.56	17.84	7.25	2.71	.25	.25
3	120	1021192	-	178.0	5.00	6.50	3.62	3.25	13.00	3.00	14.36	16.50	21.50	7.88	3.11	.25	.25
3-1/2	† 150	1021218	-	265.0	5.25	8.00	4.12	3.75	14.63	3.75	16.50	19.00	24.62	9.00	3.62	.25	.25
4	† 175	1021236	-	338.0	5.50	9.00	4.56	4.25	14.50	4.00	18.42	19.75	25.69	10.00	4.10	.25	.25
4-3/4**	† 200	1021414	-	450.0	7.25	10.50	6.00	4.75	15.62	3.75	21.00	20.50	29.25	11.00	4.50	.25	.25
5**	† 250	1021432	-	600.0	8.50	12.00	6.50	5.00	20.00	3.88	24.50	21.97	35.00	13.00	4.50	.25	.25
6**	† 300	1021450	-	775.0	8.38	12.00	6.75	6.00	19.50	4.75	25.00	24.35	35.25	13.00	5.00	.25	.25
7**	† 400	1021478	-	1102.0	8.25	14.00	7.25	7.00	22.50	6.50	26.00	27.97	40.25	13.00	6.00	.25	.25

\* Nota: La máxima carga probada es 2.0 veces la carga límite de trabajo. La carga de ruptura es 4 veces la carga límite de trabajo de 200 a 400 tons métricas. Para los tamaños de 30 a 175 tons métricas, la carga de ruptura es 5.4 veces la carga límite de trabajo.

\*\* Acero de aleación de fundición.

† Se entregan con pernos de cabeza redonda y agarradera.

Para la selección del grillete, además de lo anteriormente descrito, se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones que indica la NRF-041-PEMEX-2014:

- El grillete debe tener al menos la misma Carga de Trabajo Seguro (CTS) de la eslinga al cual está unido, para evitar doblamiento del ojo de la eslinga en un diámetro muy pequeño.
- No se deben usar grilletes diferentes a los de “cuerpo ancho” en combinación con grommets, para evitar doblamiento del grommet en un diámetro muy pequeño.
- Se debe tener consideración en las tolerancias de fabricación o en las dimensiones ‘as built’ de los grilletes.
- En caso de los grilletes Crosby se debe considerar una reducción del CTS del grillete cuando el espesor total de la oreja de izaje sea menor a 80% de la apertura del grillete (referencia a las especificaciones del fabricante).

60% - 80% de la apertura del grillete	Reducción del 13%
---------------------------------------	-------------------

40% - 60% de la apertura del grillete	Reducción del 20%
---------------------------------------	-------------------

Carga de punto de 40% de la apertura del grillete	Reducción del 30%
---------------------------------------------------	-------------------

- No se permite ninguna placa espaciadora de soporte para contribuir con el espesor total de la oreja de izaje.
- Cuando se conectan dos grilletes, estos, deben de preferencia, ser posicionados lazo a lazo.

# *Capítulo IV*

Consideraciones para el análisis

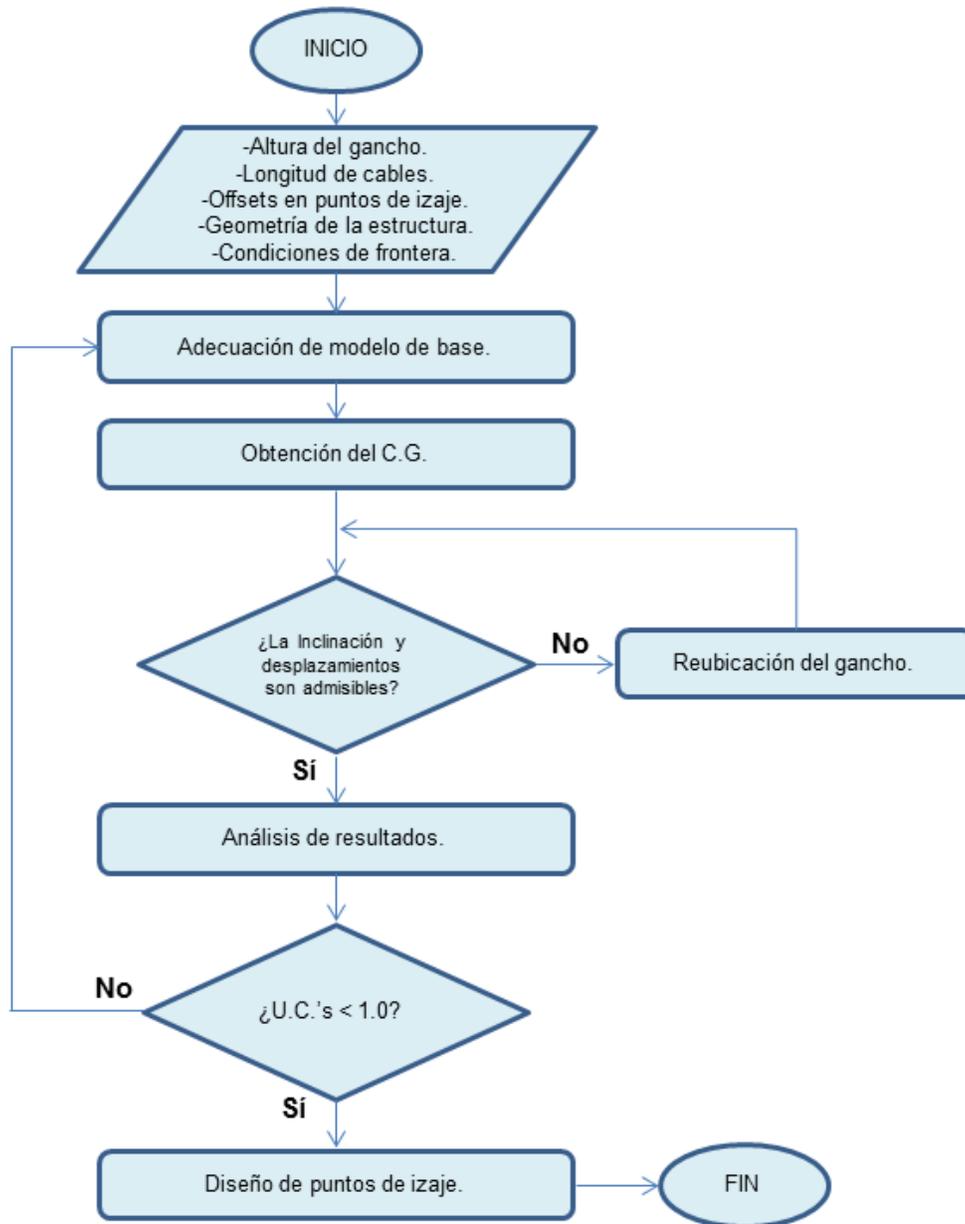
## 4. Consideraciones para el análisis

En el presente capítulo se hablará sobre el desarrollo del modelo estructural para la revisión de la subestructura durante el procedimiento de izaje. El análisis tiene por objeto verificar que el comportamiento de la estructura izada cumpla con los requisitos estructurales establecidos por las características intrínsecas del proyecto y que tiene la capacidad estructural, bajo las cargas inducidas en la condición de instalación, garantizando la integridad de la misma estructura durante esa etapa de la instalación, y así mismo, la integridad de las personas que estén involucradas en el desarrollo de estas labores. Para estos fines se verificará que los elementos que conforman a la estructura cumplan con los requisitos de diseño establecidos y se determinarán los esfuerzos en los elementos que conforman a la estructura, los cuales no deberán exceder los valores máximos permisibles establecidos en los códigos aplicables a este análisis.

### 4.1 Modelo de análisis estructural

El presente análisis considera las solicitaciones de carga como constantes y el comportamiento del material de la estructura en el rango elástico lineal, es decir que el método de análisis empleado es el ASD (Allowable Stress Design, por sus siglas en inglés). El modelo es desarrollado en el programa de cálculo estructural STAAD Pro y se desarrolla bajo el sistema inglés de unidades. Las unidades de longitud estarán dadas en pulgadas (in), las unidades de fuerza en kilo libras (kips) y las unidades de esfuerzo estarán dadas en kilo libras sobre pulgada cuadrada (ksi). Se recurrirá en ocasiones y cuando así se indique al sistema métrico decimal y al sistema internacional. En la figura 4.1 se muestra un diagrama de flujo con el que se indica el procedimiento a seguir para el desarrollo del análisis. El alcance de este análisis no incluye el diseño de los puntos de izaje. Sin embargo, al final de este capítulo, se muestra una breve descripción para su pre dimensionamiento y evaluación estructural.

En el diseño de una plataforma, generalmente los análisis en sitio se realizan antes de los análisis de instalación, pues normalmente las cargas más significativas que actúan sobre las estructuras se presentan en las condiciones de operación y tormenta. Por lo que se considera al modelo de operación y tormenta como base para el desarrollo del izaje, adecuándolo de tal modo que se retiren los elementos barra, los nodos y las cargas, todos con sus respectivas cargas, que no intervienen o que no deben ser considerados en el análisis para el izaje de la subestructura. Así mismo, se deben integrar todos los elementos necesarios para el izaje, el nodo que representará al gancho, los cables con los offsets respectivos debidos a los puntos de izaje y sus restricciones de apoyo, la mesa de estrobos, combinaciones de carga, etc.; para los fines de esta tesis no es así.



**Figura 4.1 Diagrama de flujo para el análisis de izaje**

Para modelar los cables, se pueden considerar elementos tubulares con un espesor muy grande, casi igual al radio de la sección transversal y con una densidad muy baja. De manera preliminar puede considerarse una sección arbitraria pues no es relevante conocer su peso o su comportamiento estructural, sino la carga axial que transmite. De hecho, lo conveniente es que se desprecie el peso de las eslingas; pues en los resultados se reflejará de manera directa el peso de la estructura.

En las siguientes figuras se muestran los croquis a partir de los cuales se desarrolló el modelo estructural para representar a la subestructura.

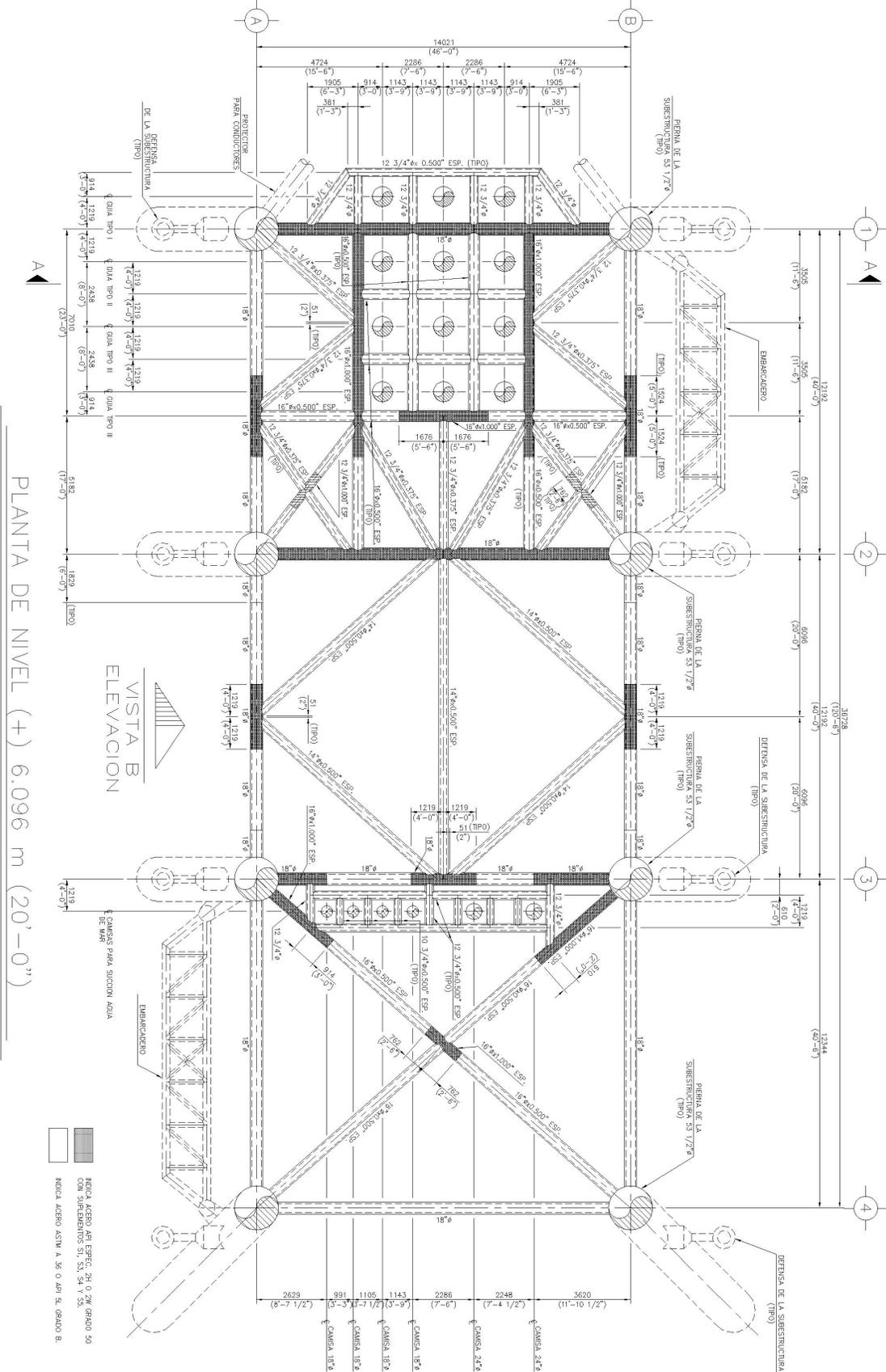


Figura 4.2 Croquis de nivel de arriostramiento superior, en planta

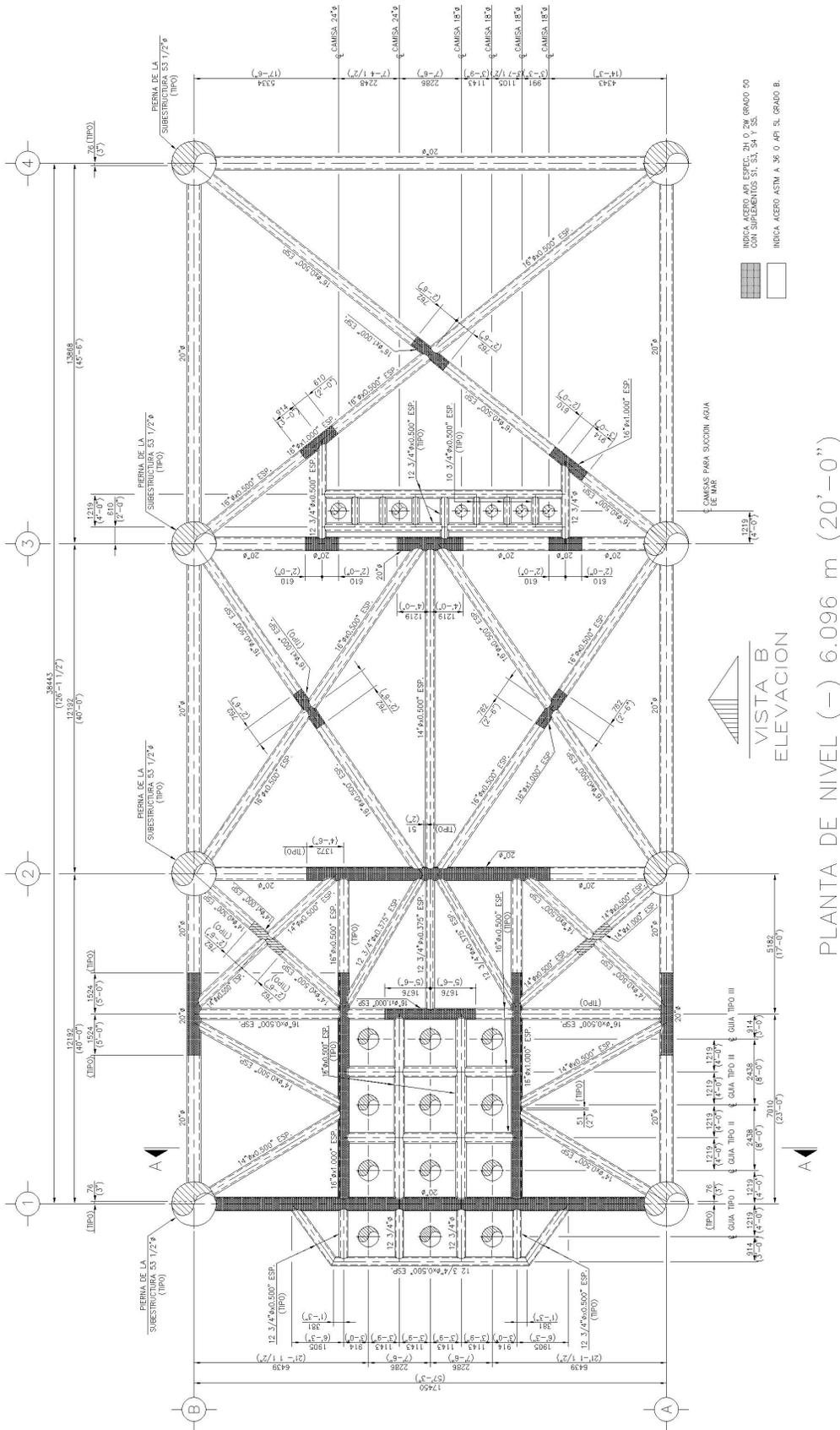


Figura 4.3 Croquis de nivel de arriostramiento intermedio, en planta

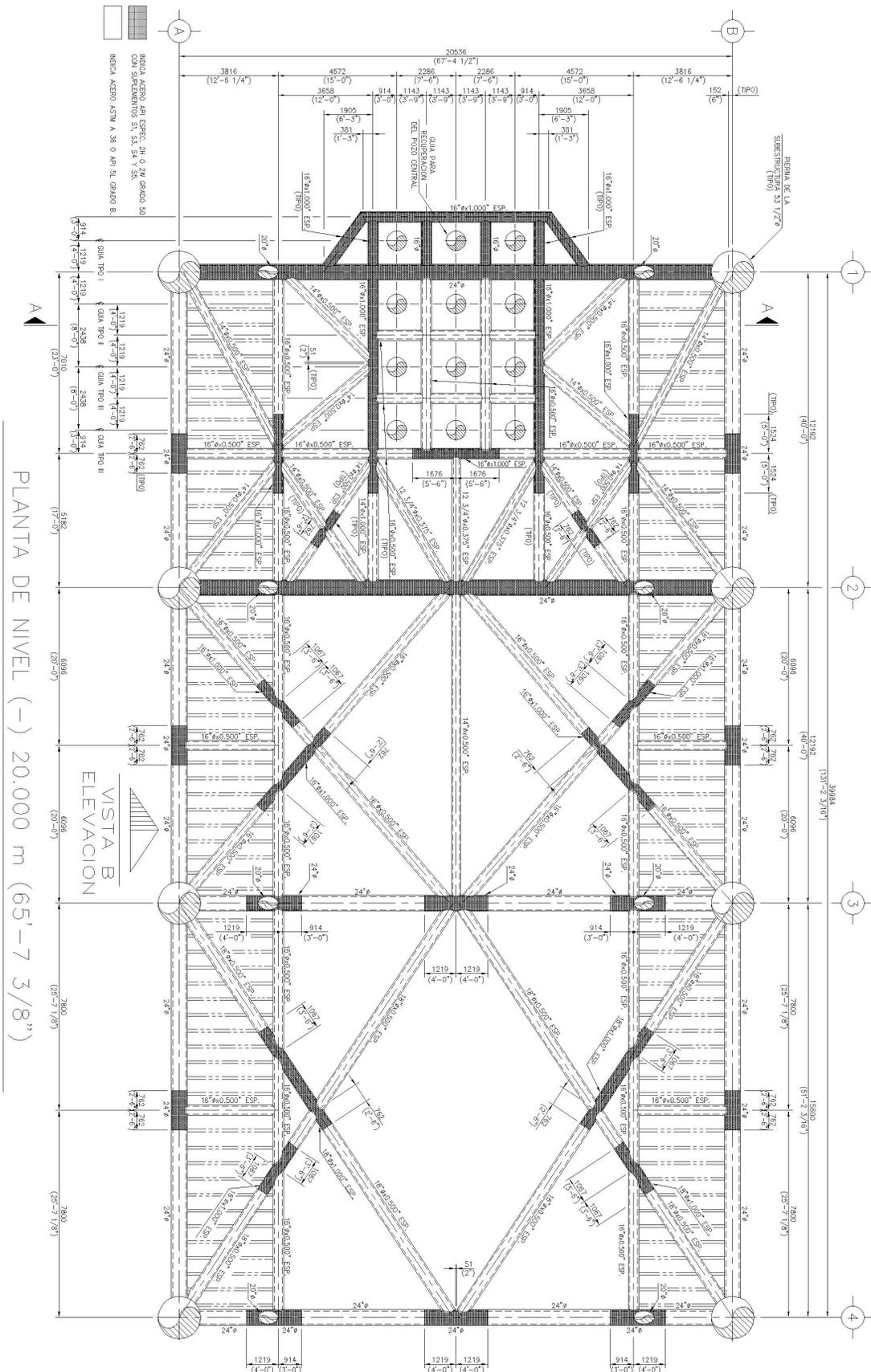
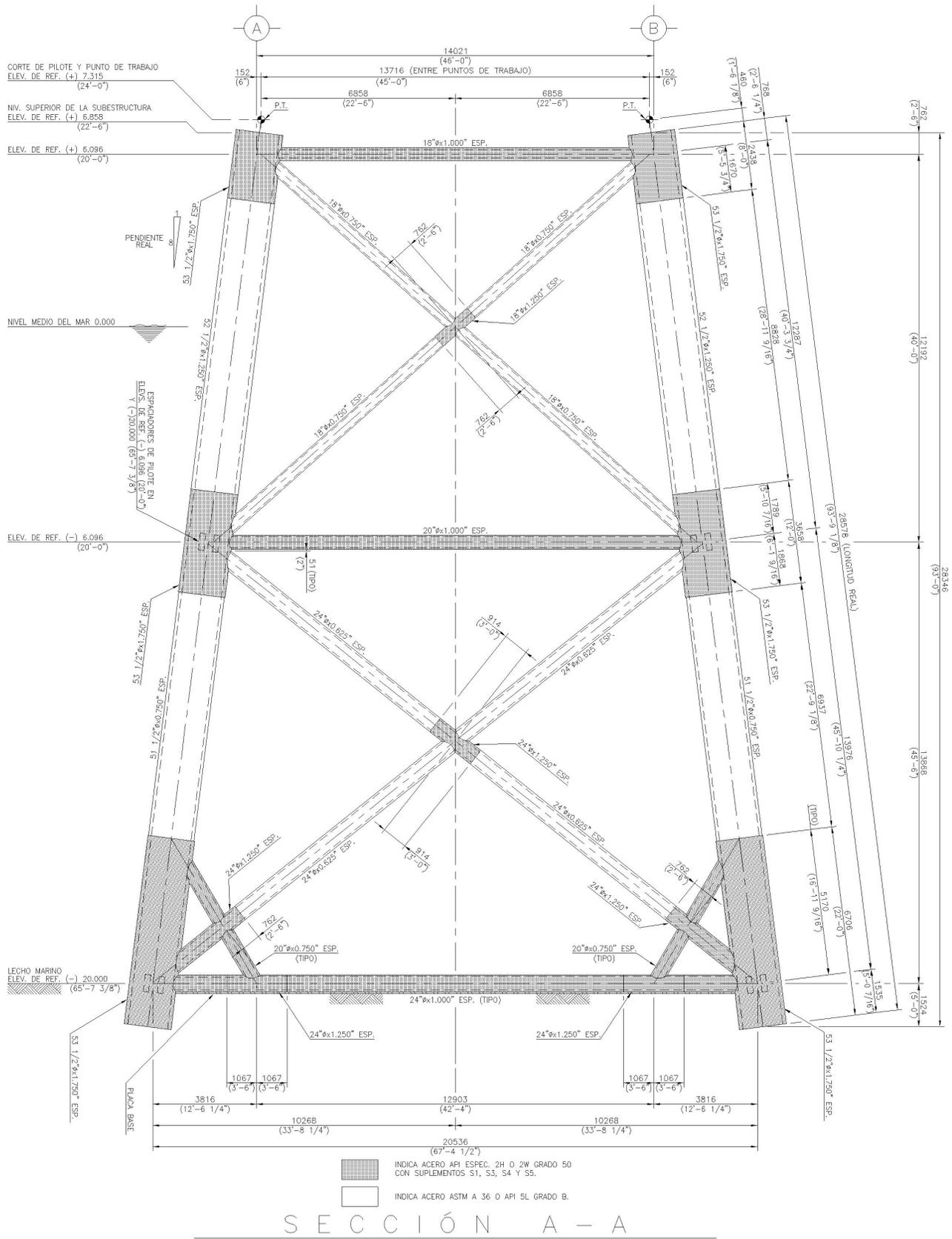
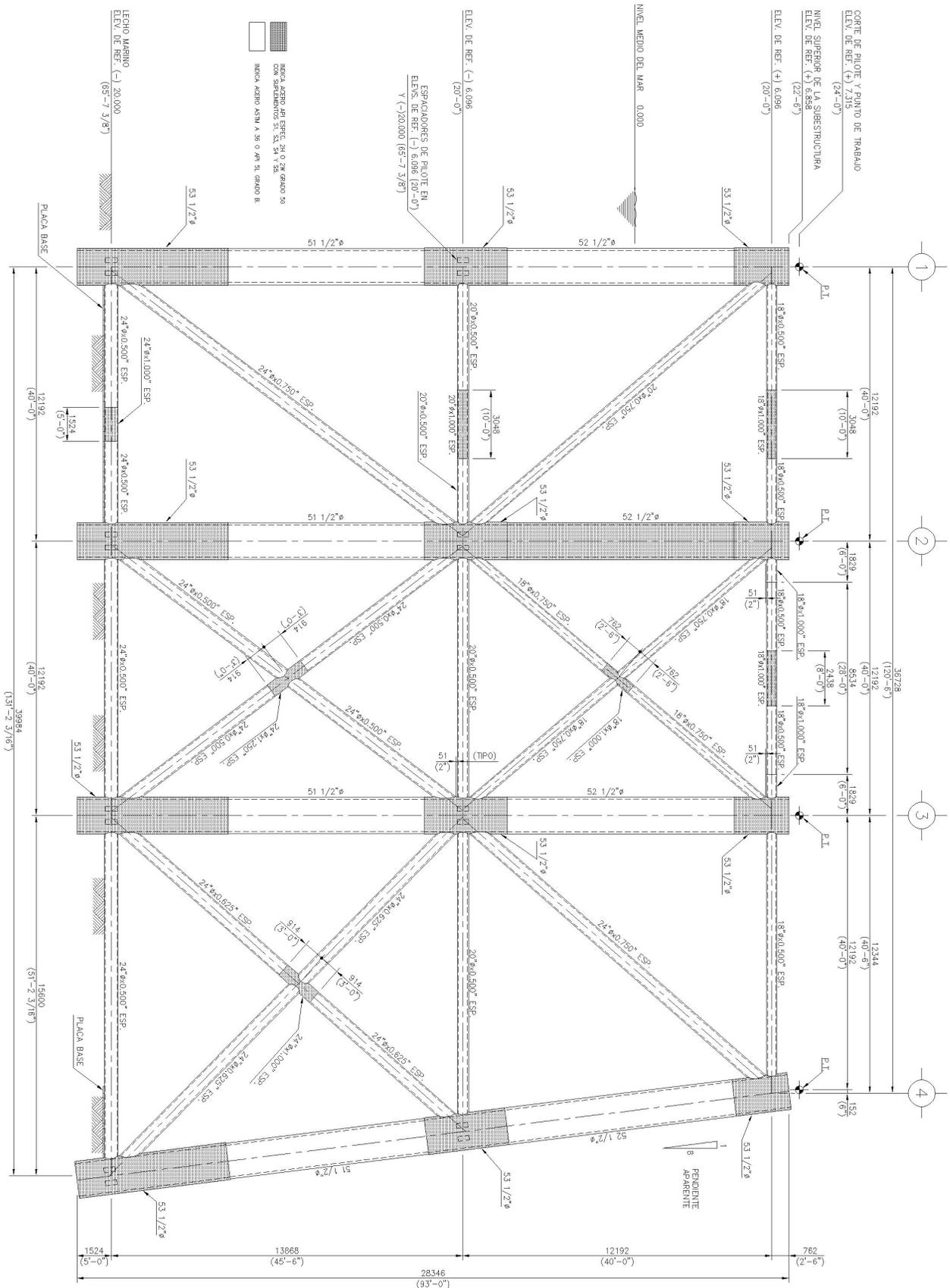
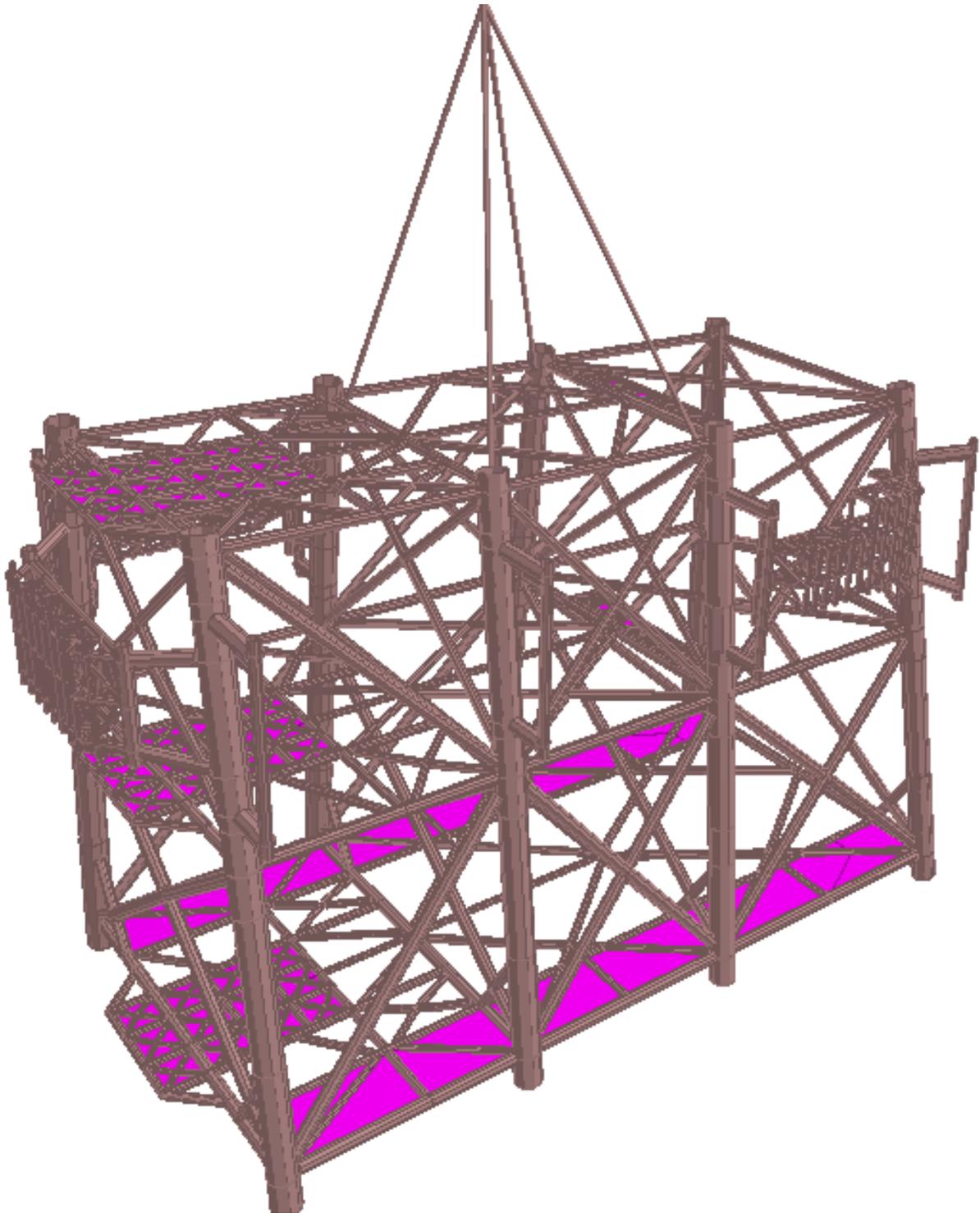


Figura 4.4 Croquis de nivel de arriostramiento inferior (Placa base), en planta





En la figura 4.7 se presenta una imagen que ilustra los detalles del modelo estructural, la geometría general de la subestructura y el arreglo de los cables.



**Figura 4.7** Isométrico tridimensional de la subestructura

En la figura 4.8 se muestra la identificación de grupos y estructuración correspondiente al modelo para el análisis de Izaje. En la tabla 4.1 se presentan la sección transversal de los elementos considerados para el análisis, por grupo.

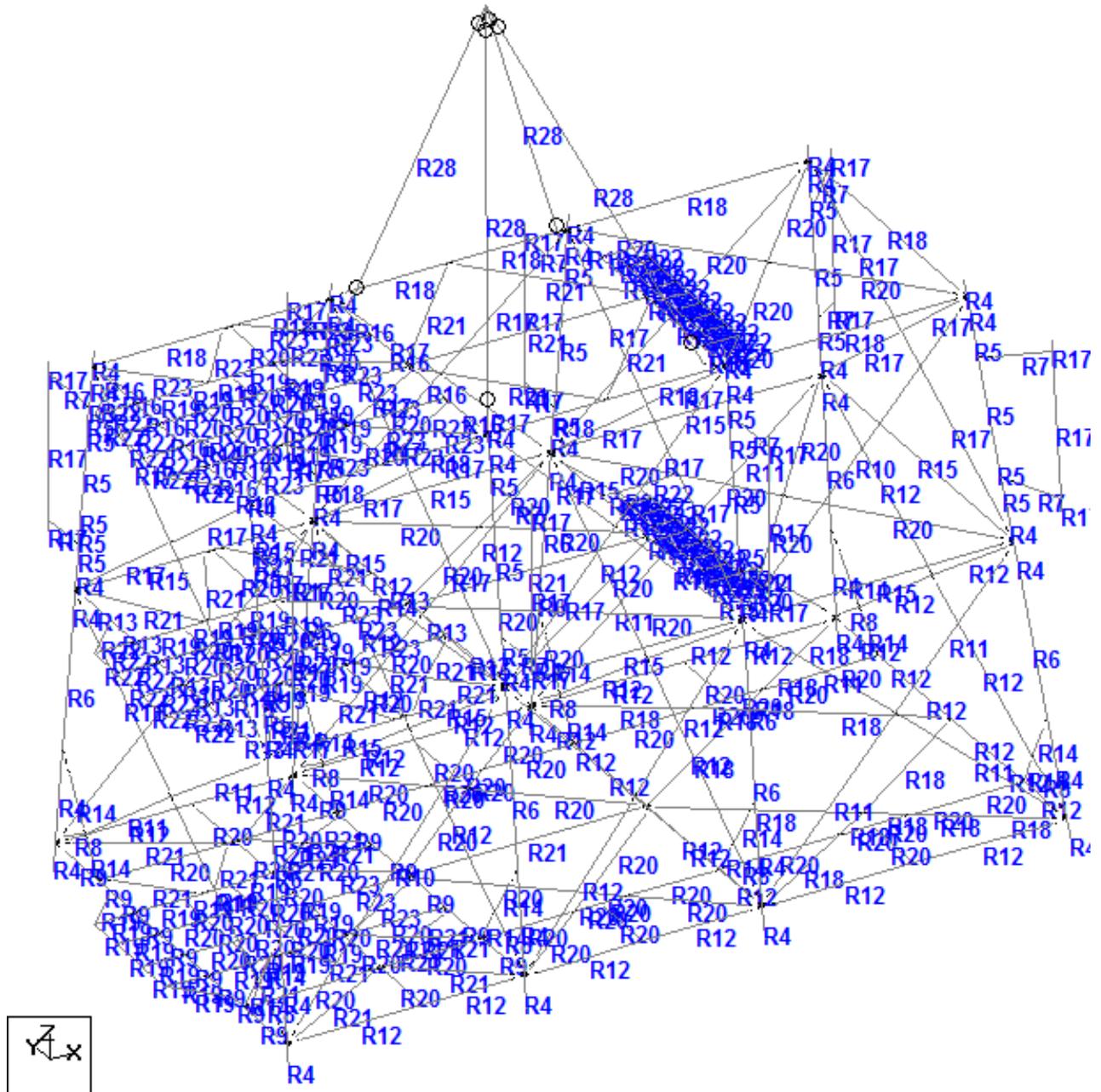
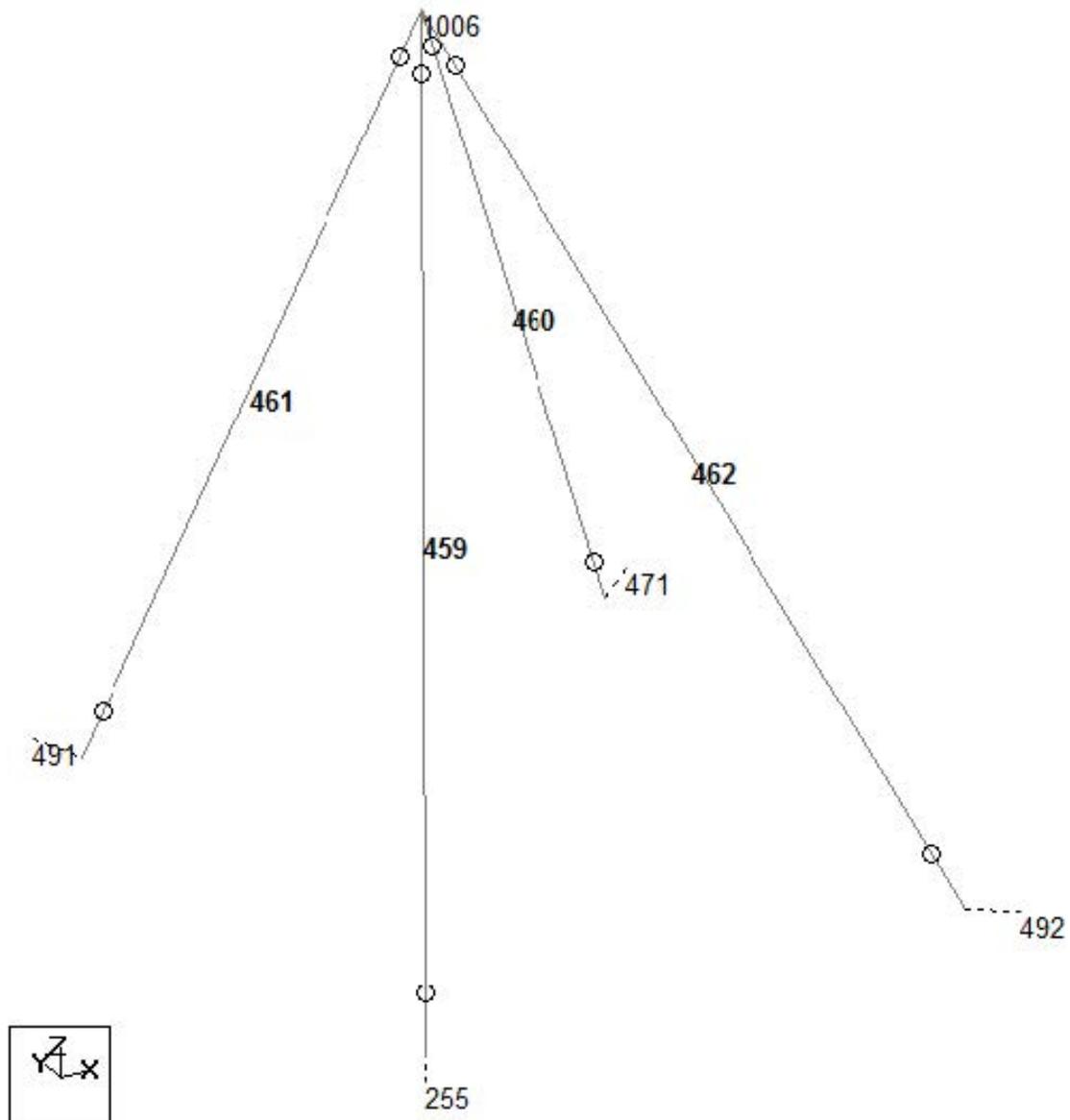


Figura 4.8 Identificación de los grupos de los perfiles estructurales

Tabla 4.1 Perfiles utilizados para la estructuración de la subestructura.

Num.	Sección	Ø EXT [in]	ESP. [in]	OD [in]	ID [in]
1	PL		0.250		
2	PL		0.500		
3	PL		1.000		
4	OC	53.5	1.750	53.5	50
5	OC	52.5	1.250	52.5	50
6	OC	51.5	0.750	51.5	50
7	OC	30	0.625	30	28.75
8	OC	24	1.250	24	21.5
9	OC	24	1.000	24	22
10	OC	24	0.750	24	22.5
11	OC	24	0.625	24	22.75
12	OC	24	0.500	24	23
13	OC	20	1.000	20	18
14	OC	20	0.750	20	18.5
15	OC	20	0.500	20	19
16	OC	18	1.000	18	16
17	OC	18	0.750	18	16.5
18	OC	18	0.500	18	17
19	OC	16	1.000	16	14
20	OC	16	0.500	16	15
21	OC	14	0.500	14	13
22	OC	12.75	0.500	12.75	11.75
23	OC	12.75	0.375	12.75	12
24	OC	10.75	0.365	10.75	10.02
25	OC	8.625	0.500	8.625	7.625
26	OC	8.625	0.322	8.625	7.981
27	OC	6.625	0.280	6.625	6.065
28	OC	7	3.440	7	0.12

En la figura 4.9 se presenta la identificación de los nodos y la de los elementos que componen al arreglo de cables. Los cuáles serán útiles para reconocer con más facilidad los resultados obtenidos del análisis.



**Figura 4.9** Identificación de nodos y elementos de los aparejos

El nodo número 1006 corresponde al gancho de la grúa. Los elementos del 459 al 462 representan a los cables y están compuestos por los nodos que se indican en la tabla 4.2

**Tabla 4.2** Identificación de los aparejos

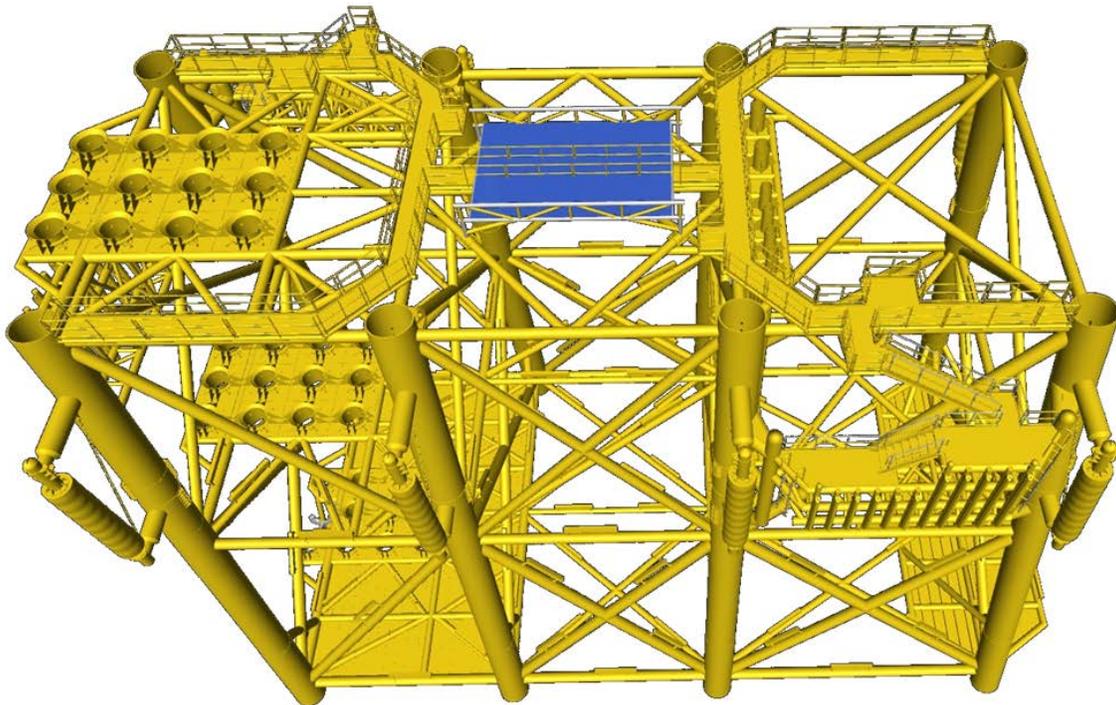
Elemento	Nodos	Ejes
459	255 - 1006	A2
461	491 - 1006	B2
460	471 - 1006	B3
462	492 - 1006	A3

## 4.2 Consideraciones de carga

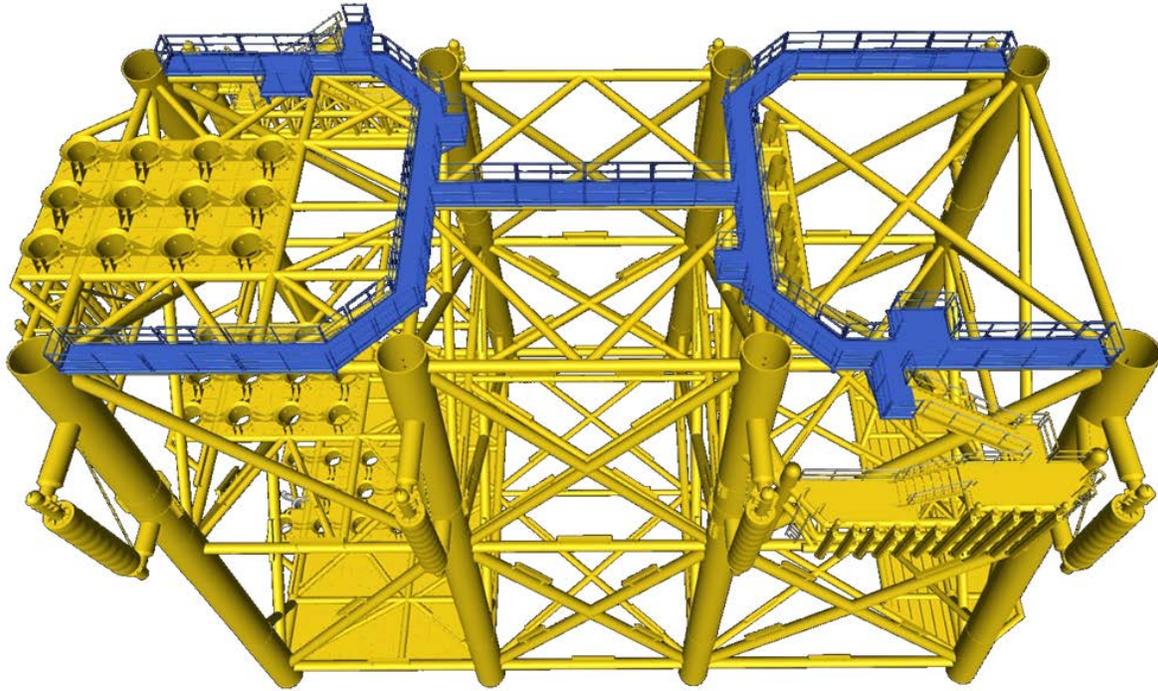
Dentro del análisis se deben contemplar todas las descargas gravitacionales de los accesorios y estructuras complementarias que se encuentran instalados durante el izaje. El peso propio de los elementos que se modelan tridimensionalmente, es calculado por el programa con la instrucción de peso propio (self weight, en inglés) y se le conoce como peso o carga de la estructura modelada y algunas veces es designada simplemente como peso propio. Debe evitarse confusiones pues el peso propio de la estructura lo componen el peso de la estructura modelada y las cargas que son introducidas por el usuario. Estas cargas (introducidas de modo manual) corresponden a la acción de todas cargas presentes durante la maniobra, el peso de todos los componentes estructurales que no son modelados, accesorios de la subestructura como embarcaderos, defensas de pierna, placa base, cunas de deslizamiento, sistema de inundación, puntos de izaje (orejas o muñones), ánodos de sacrificio, pasillos y escaleras, camisas para bombas de succión, vigas secundarias, rejilla y barandales.

Dichas cargas se verán afectadas de acuerdo con lo indicado en la normatividad aplicable a través de factores de carga correspondientes a las condiciones estática y dinámica de la maniobra.

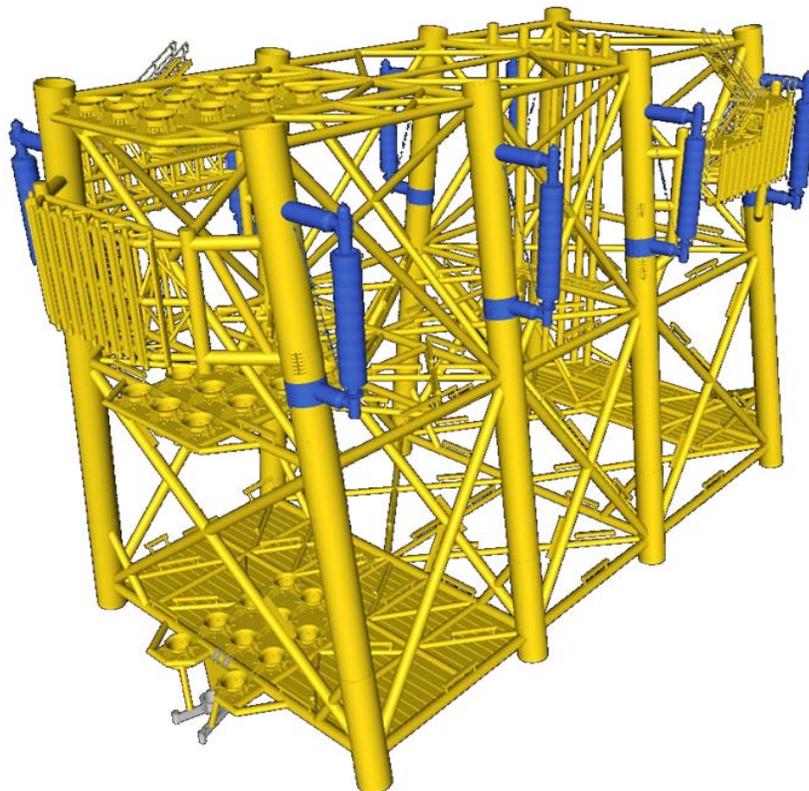
En las figuras siguientes se ilustra los accesorios típicos que son utilizados en subestructuras para plataformas marinas. En color azul se resalta el tipo de accesorio que se desea ilustrar.



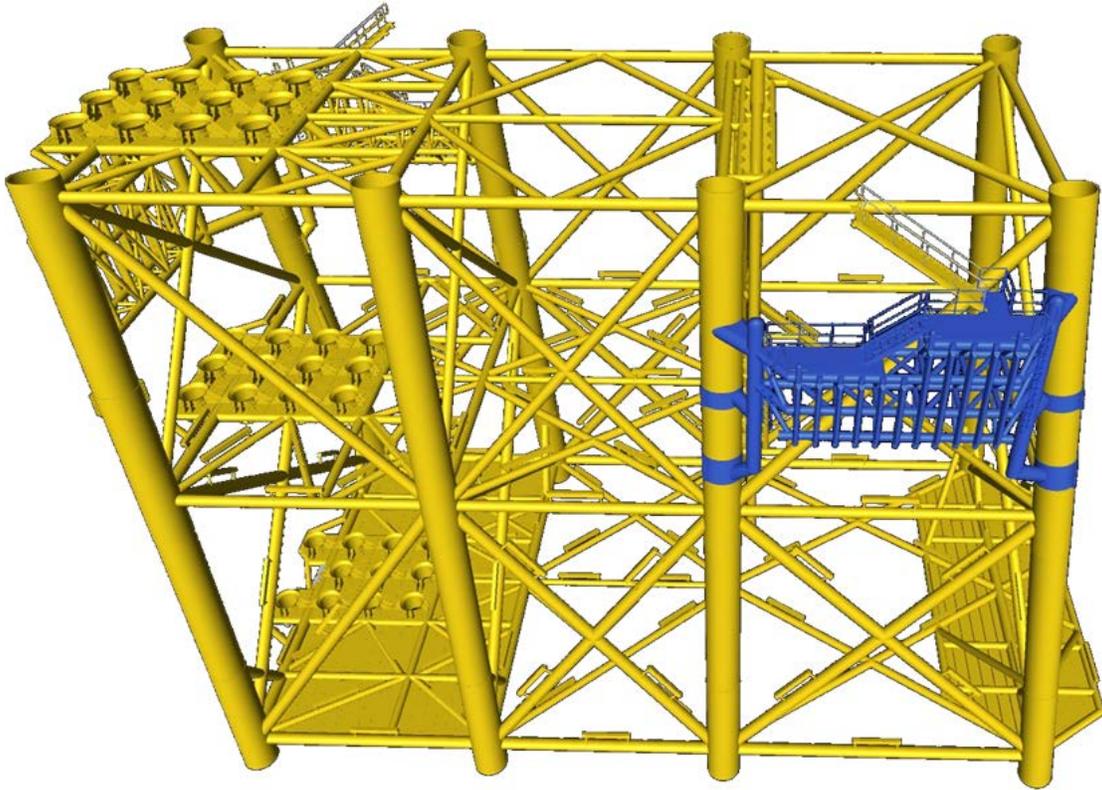
**Figura 4.10** Mesa para estrobos



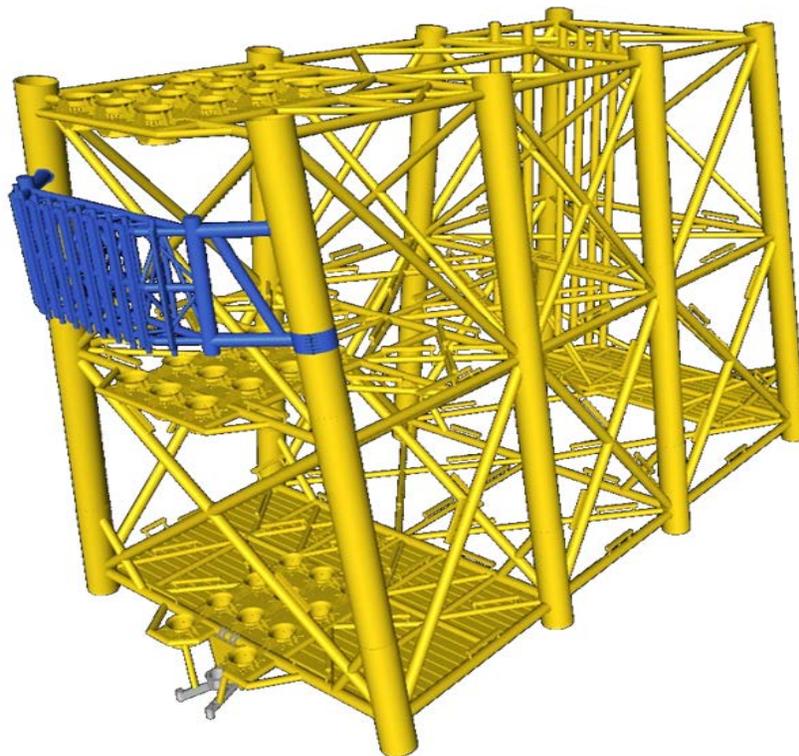
**Figura 4.11 Pasillos de la subestructura**



**Figura 4.12 Defensas de piernas**



**Figura 4.13 Embarcadero**



**Figura 4.14 Protector de conductores**

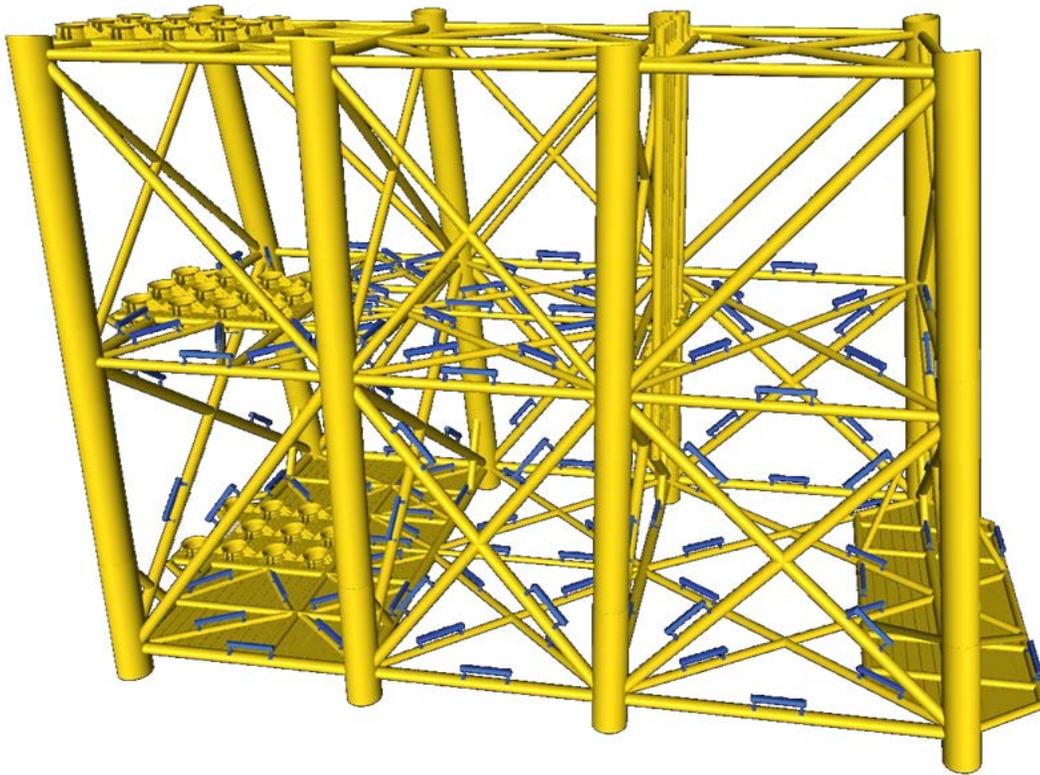


Figura 4.15 Ánodos de sacrificio

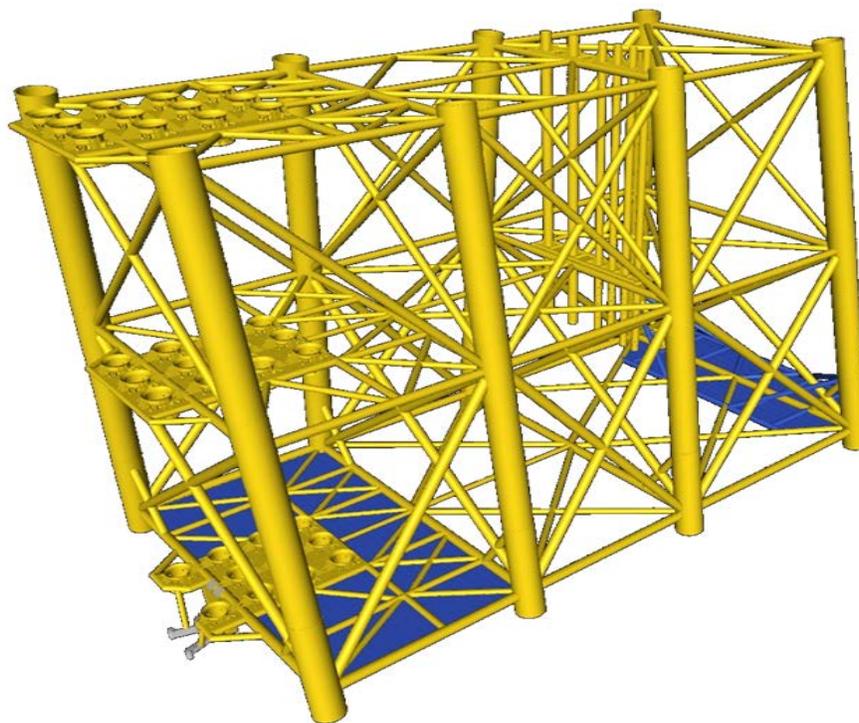
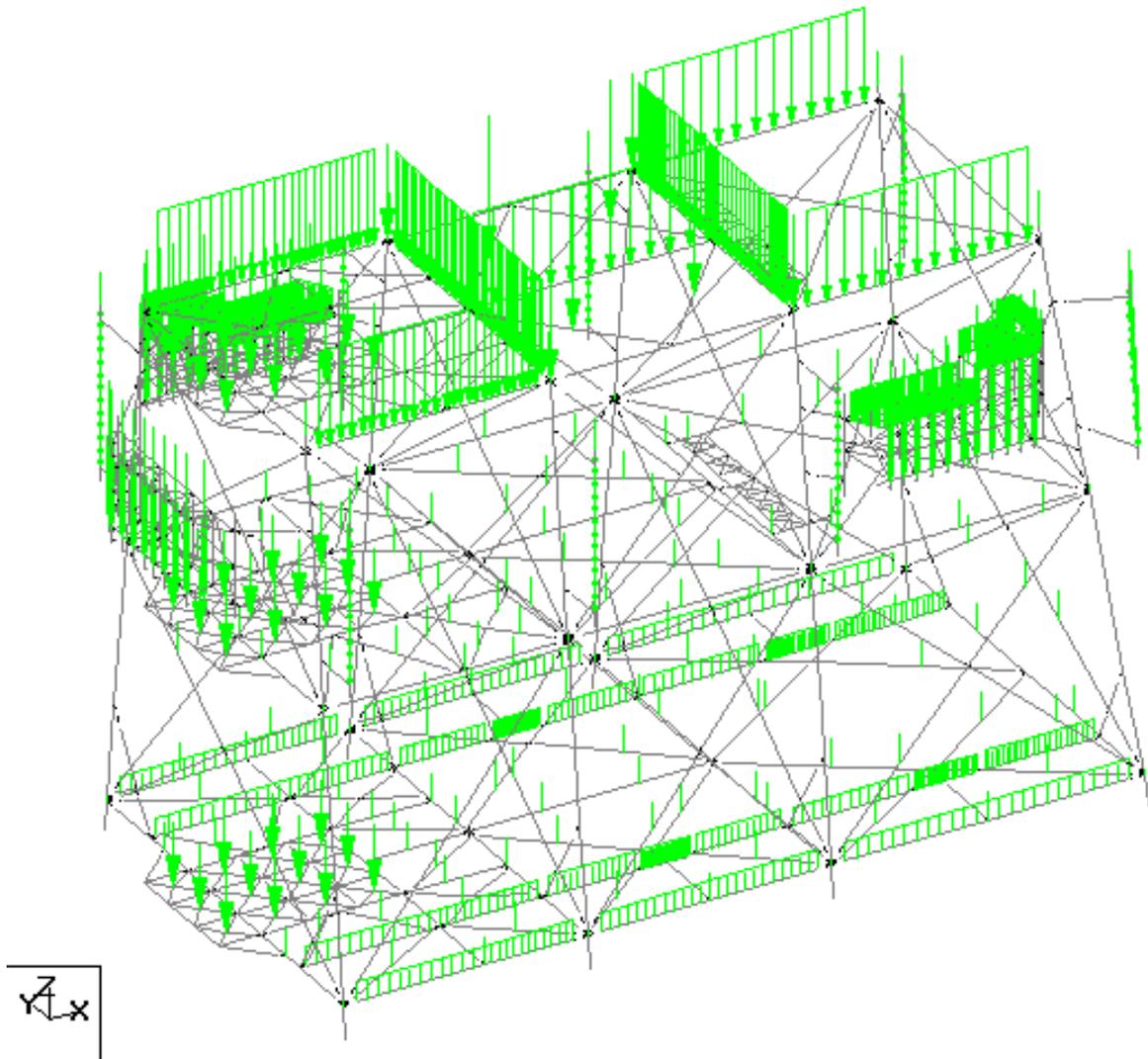


Figura 4.16 Placa base

En la figura 4.17 se muestra las cargas impuestas a la estructura dentro del modelo estructural. En la tabla 4.3 se presenta un resumen con la designación de todas estas cargas.



**Figura 4.17 Cargas introducidas al modelo estructural**

Tabla 4.3 Resumen de cargas consideradas para el análisis del izaje.

I.- Peso Propio		
Condición #	Concepto	Magnitud [kips]
1	Estructura modelada	1,595.79
II.- Peso de estructura no modelada		
Condición #	Concepto	Magnitud [kips]
2	Mesa de estrobos	14.25
3	Pasillos de la subestructura	36.71
4	Caucho en defensa de las piernas	12.95
5	Caucho y concreto en protector de conductores	11.54
6	Caucho y concreto en protector de embarcaderos	23.86
7	Guías de los conductores	60.06
8	Ángulos para la placa base	12.86
<b>Total de Estructura no modelada</b>		<b>172.22</b>
III.- Accesorios		
Condición #	Concepto	Magnitud [kips]
9	Ánodos de sacrificio	90.07
10	Rejilla y barandal de embarcaderos	8.17
11	Orejas de izaje	9.78
12	Placas de relleno	6.96
13	Placas centradoras de pilotes	2.61
14	Escaleras de embarcaderos	3.97
<b>Total de Accesorios</b>		<b>121.55</b>

**Peso Total de la subestructura 1,889.56 kips**

**Peso Total de la subestructura, con FC (1.1) 2,078.52 kips  
942.81 ton**

#### 4.3 Factores de carga (de acuerdo a la normatividad aplicable)

Se consideran tres tipos de factores de carga utilizados para el análisis de izaje, cuyos valores pueden variar de acuerdo al tipo de análisis que se esté realizando, si el análisis se realiza con el peso de las estructuras estimado de manera indirecta en la etapa de diseño o si el peso es real, después de que éstas se han medido en la etapa de fabricación. Los factores también varían de acuerdo a la norma que se utilice para la revisión del análisis. Para los alcances del presente procedimiento se considera un análisis desarrollado durante la etapa de diseño, para instalación de una plataforma nueva. Los factores de carga utilizados se describen a continuación, de acuerdo a las normas aplicables. Se resalta con recuadros rojos los factores considerados para el presente procedimiento.

### Factor de contingencia

Para obtener el peso de la estructura, de acuerdo a la norma NRF-041-PEMEX-2014, se le deben aplicar factores de contingencia al peso estimado de la estructura, accesorios, y equipos vacíos (donde aplique), y otros que cubran la incertidumbre del peso, los cuales se muestran en la tabla 4.4. Estos factores nos permiten considerar las variaciones de tolerancias de fabricación, pintura, soldadura, sustitución del tamaño de secciones y adiciones futuras.

**Tabla 4.4 Factores de contingencia para diseño de la carga, transporte e izaje, NRF-041-PEMEX-2014.**

Fuente de la estimación de peso	Código del estado del peso	Factor
Peso de componentes obtenidos por pesaje físico después de la fabricación.	A	Precisión equipo de medición +1%
Pesos certificados por proveedor.	B	3%
Planos aprobados para construcción. Listas de materiales. Planos de taller.	C	5%
Datos de proveedores preliminares, volumetrías preliminares, planos para aprobación.	D	10%
Equipos principales basados en catálogos o estimaciones de ingeniería. Ruteo preliminar de tubería y eléctrico e instrumentación. Planos estructurales preliminares.	E	15%
Tubería basada en diagramas de tubería e instrumentación preliminares.	F	20%

### Factor de amplificación dinámica (FAD)

Todos los izajes están expuestos a efectos dinámicos debido a variaciones en la velocidad con las cuales se lleve a cabo la maniobra, los movimientos de la grúa y de las embarcaciones que realicen las labores, los movimientos de los chalanes, movimientos de objetos izados, entre otros.

Estos efectos dinámicos podrían estar influenciados por los siguientes parámetros:

- Condiciones ambientales.
- Configuración de aparejos.
- Rigidez de la pluma de la grúa y aparejo de izaje.
- Tipo de chalán.
- Peso del objeto izado.
- Procedimiento de Izaje.
- Izaje en aire o sumergido (masa agregada).

En la tabla 4.5 se muestran los diversos valores del factor de amplificación dinámica que la NRF-041-PEMEX-2014 contempla para izajes costa afuera.

**Tabla 4.5 Factores de amplificación dinámica, según NRF-041-PEMEX-2014.**

Condición / Peso de la estructura	< 100 ton.	100 – 1000 ton.	> 1000 ton.
En aguas costeras / área de refugio.	1.3	1.2	1.15
Izaje costa afuera en cubierta de la embarcación.	1.3	1.2	1.15
Costa afuera en general.	1.5	1.4	1.3
Sumergido, costa afuera (Ver nota).	> 1.5	> 1.4	> 1.3

Nota: Los valores 1.3, 1.4 y 1.5 (factor en peso sumergido) mencionados en la tabla, deben ser considerados solamente como indicativos y no ser utilizados como un FAD estándar para estos casos. El FAD dependerá en gran medida del método de instalación, las circunstancias ambientales y la proporción entre la masa del objeto izado y el peso sumergido. La justificación del FAD aplicable en izajes críticos y/o no estándar, debe estar basada en un estudio o evaluación.

El API RP 2A-WSD indica que los elementos de izaje y los elementos internos de la estructura (elementos principales), conectados en el nodo donde los elementos transmitan las fuerzas de izaje a la estructura, deben ser diseñados con un factor de carga (FAD) mínimo de 2.0 aplicado a las cargas estáticas calculadas. Todos los elementos restantes (elementos secundarios) de la estructura deben ser diseñados usando un factor de carga (FAD) mínimo de 1.35.

**Factor de consecuencia (F.C.)**

Además de los factores de los efectos dinámicos y factores de contingencia, la NRF-041-PEMEX-2014 contempla un factor de consecuencia, el cual se utiliza para revisar los elementos estructurales primarios y secundarios durante la etapa de izaje, en la tabla 4.6 se muestran los valores que considera. Es decir, que este factor reduce las solicitaciones de carga para los elementos que no están directamente conectados a los puntos de izaje.

**Tabla 4.6 Factores de consecuencia, según NRF-041-PEMEX-2014.**

Elemento estructural	Factor de Consecuencia
Puntos de izaje, barras espaciadoras y elementos de aparejos	1,0
Miembros principales de transferencia de carga	1,0
Otros miembros secundarios	0,67

Para la realización del análisis de izaje, se revisarán los elementos principales, se consideran que estos elementos son aquellos que se conectan en el nodo donde la oreja transmite las fuerzas de izaje a la estructura (las piernas de la subestructura, para este caso), así mismo se revisarán los elementos secundarios, estos elementos son todos los elementos restantes de la estructura, tanto los elementos principales como los secundarios se evaluarán con distintos factores de carga, de acuerdo a lo descrito anteriormente. El empleo de dichos factores se consideró en las combinaciones de carga correspondientes, las cuales quedan descritas en la tabla 4.7

**Tabla 4.7 Combinaciones de carga.**

<b>COMBINACIÓN DE CARGA BÁSICA</b>		
<b>CONDICIÓN DE CARGA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>FACTOR DE CONTINGENCIA</b>
1	Peso propio	1.10
2	Estructura no modelada	1.10
3	Accesorios	1.10

<b>API-RP-2A-WSD</b>		
<b>COMBINACIÓN DE CARGA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>FACTOR DE CARGA</b>
4	Revisión de elementos secundarios	1.35
5	Revisión de elementos principales	2.00

<b>NRF-041-PEMEX-2014</b>		
<b>COMBINACIÓN DE CARGA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>FACTOR DE CARGA</b>
6	Revisión de elementos secundarios	1.40*
7	Revisión de elementos principales	0.938**

\* (F.A.D.) x (F.C.) = 1.4 x 1.0 = 1.40

\*\* (F.A.D.) x (F.C.) = 1.4 x 0.67 = 0.938

En la tabla 4.8 se describe el cálculo del factor de carga aplicado al peso total de la subestructura en cada combinación de carga utilizada para las diferentes revisiones.

**Tabla 4.8 Combinaciones de carga.**

Combinación	Factor utilizado	Cálculo
4	1.485	1.1 x 1.35
5	2.2	1.1 x 2.0
6	1.0318	1.1 x 0.67 x 1.4
7	1.54	1.1 x 1.0 x 1.4

Adicionalmente, la norma NRF-041-PEMEX-2014, indica que se deberá considerar una distribución de carga sobre los puntos de izaje, de tal forma que el 60% de la carga sea soportada por dos eslingas diagonales opuestas, por lo que se realizaron los siguientes análisis

- Revisión de primera diagonal (60%, 40%)
- Revisión de segunda diagonal (40%, 60%)

Para la realización del análisis de izaje con el criterio de la NRF-041-PEMEX-2014, se consideran los factores de amplificación dinámica (FAD) y factores de consecuencia (F.C.) para elementos principales y para elementos secundarios.

A continuación se ilustran las consideraciones para los análisis de izaje respectivos a la primera y segunda diagonal:

- Revisión de la primera diagonal (60%, 40%)

Revisión de elementos principales, considerando un (FAD) de 1.4 y un factor de consecuencia (F.C.) de 1.0

Revisión de elementos secundarios, considerando un (FAD) de 1.4 y un factor de consecuencia (F.C.) de 0.67

- Revisión de la segunda diagonal (40%, 60%)

Revisión de elementos principales, considerando un (FAD) de 1.4 y un factor de consecuencia (F.C.) de 1.0

Revisión de elementos secundarios, considerando un (FAD) de 1.4 y un factor de consecuencia (F.C.) de 0.67

#### 4.4 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera en el análisis de izaje, deben asemejarse lo más posible a las condiciones reales a las que va a estar sometida la estructura durante la maniobra, en la cual el único punto de apoyo con el que se cuenta es el gancho de la grúa (punto donde se sujetan los cables). Este nodo se restringe en sus direcciones (o grados de libertad) de traslación, tal como un apoyo articulado.

En ocasiones, debido a la inestabilidad del modelo estructural no es posible realizar el análisis con un solo apoyo; por lo cual con el objetivo de darle estabilidad al modelo se considera adicionalmente 2 apoyos elásticos (resortes) en las eslingas, los cuales tienen liberadas las rotaciones en los tres ejes coordenados y restringen parcialmente las traslaciones en el sentido horizontal (X y Y), permitiendo así a la estructura tener libertad de traslación en la dirección vertical (Z). Debido a que su función es únicamente la de hacer estable el modelo, se les asigna una rigidez lineal de magnitud pequeña. En la figura 4.18 se muestran las condiciones de frontera para el izaje de la subestructura.

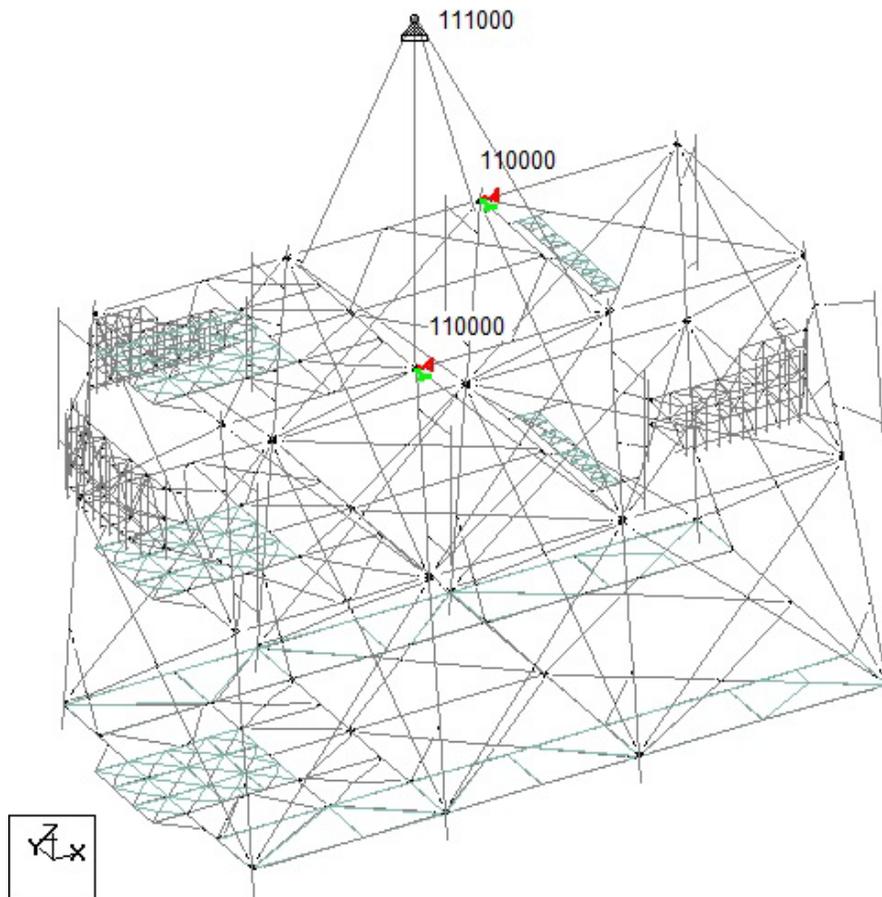


Figura 4.18 Condiciones de apoyo para el izaje

Los cables a utilizar en el izaje trabajan únicamente a tensión y no son capaces de absorber esfuerzos de flexión. Para poder representar estas condiciones en el modelo estructural, se liberaron las rotaciones en los tres ejes locales del elemento en el extremo de los cables, donde se conectará con la oreja de izaje, quedando restringidas las traslaciones y liberados los momentos en el extremo del cable. En la figura 4.19 se ilustra esta condición.

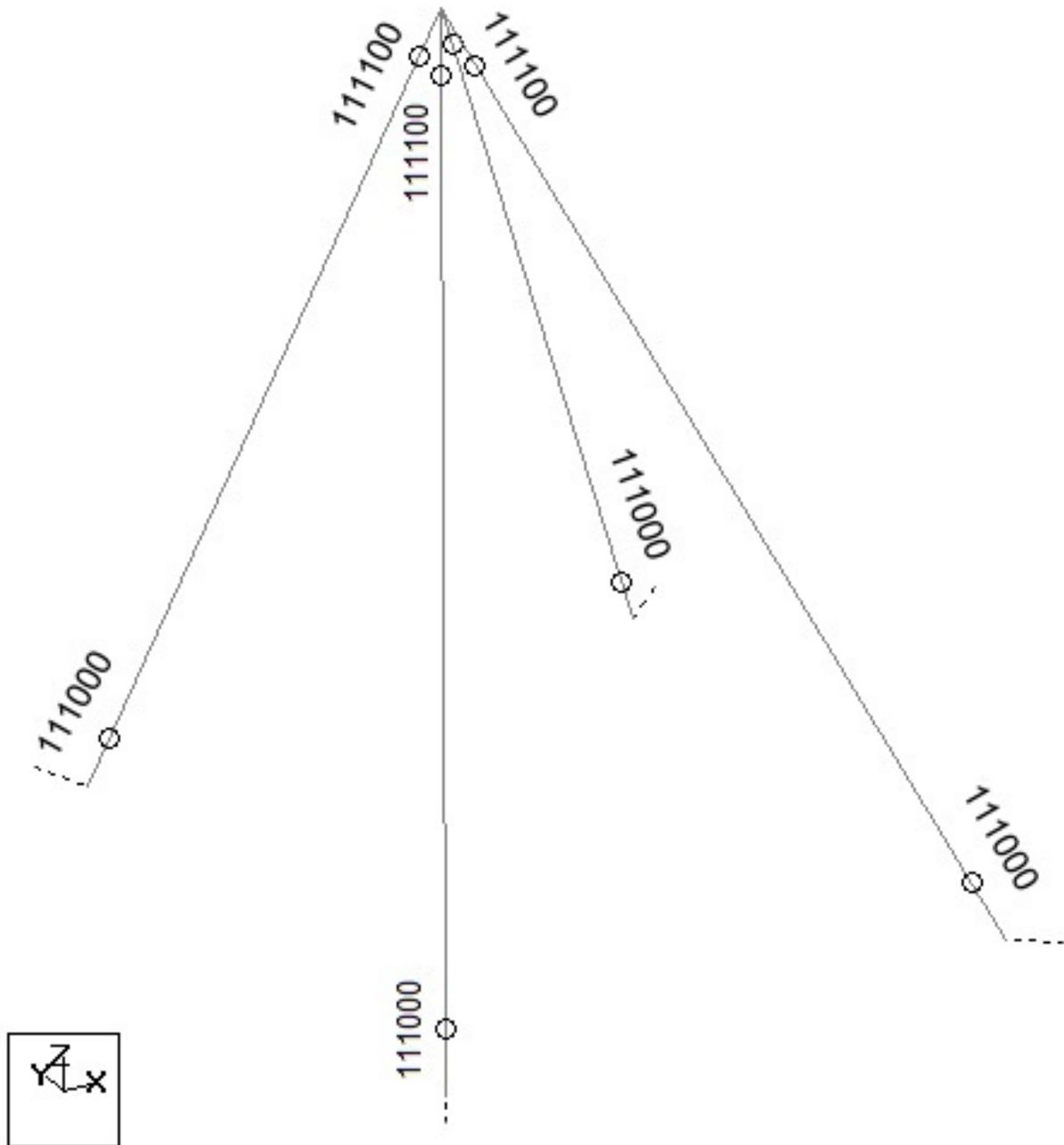


Figura 4.19 Condiciones de frontera en los cables

## 4.5 Breve descripción de las consideraciones para el diseño de orejas de izaje

A continuación se describe el procedimiento usual para el desarrollo de un análisis de los puntos de izaje (orejas o muñones) de una estructura, a base de elementos finitos. Los pasos o procedimientos se enuncian sin limitar el modo en el que estos puedan desarrollarse. Se considera el uso del software STAAD Pro para realizar el análisis.

Es deseable que al comenzar el diseño de Izaje se cuente con una aproximación de las dimensiones que tendrán las orejas, o muñones, para el izaje. Regularmente los cables se modelan conectados a algún punto de los elementos principales de la estructura con un offset que considera las dimensiones de estos puntos de izaje. Pues estos offsets inducen momentos adicionales al sistema que deben tenerse en cuenta.

### Pre dimensionamiento

Ya sea al inicio, o después del análisis de izaje, el pre dimensionamiento para las orejas debe considerar las siguientes revisiones:

### Aplastamiento

El esfuerzo de aplastamiento, es el esfuerzo de compresión desarrollado entre dos cuerpos en su superficie de contacto. La distribución real del esfuerzo sobre las superficies curvas varía desde cero en los lados, hasta un máximo en el centro de contacto entre el perno y la placa.

El valor del esfuerzo de aplastamiento se considera como la carga de trabajo actuante dividida entre la superficie de contacto entre el agujero y el perno, como se indica a continuación. En la figura 4.20 se pueden observar a qué se refiere cada variable.

$$f_p = \frac{T_D}{A} = \frac{T_D}{d \cdot t}$$

De acuerdo con el “Manual of steel construction” del AISC el esfuerzo de aplastamiento permisible es:

$$F_p = 0.9 \cdot F_y$$

donde:

$F_y$  =Esfuerzo de fluencia mínimo especificado del acero utilizado.

$F_p$  =Esfuerzo de aplastamiento permisible.

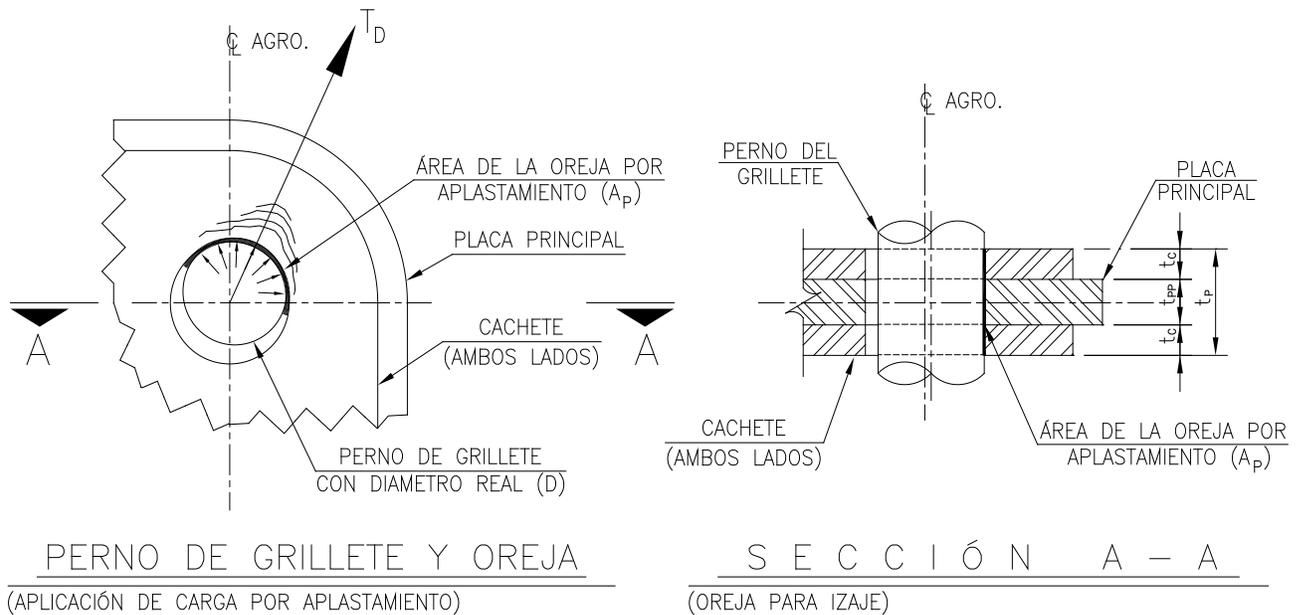
$f_p$  =Esfuerzo de trabajo por aplastamiento.

$T_D$ =Tensión máxima diseño de la oreja.

$A$  =Área proyectada, igual al diámetro del perno multiplicado por el espesor de la placa.

$d$  =Diámetro real del perno del grillete elegido.

$t$  =Espesor de la placa de la oreja.



**Figura 4.20 Croquis de la aplicación de carga en la oreja por aplastamiento**

Cálculo del espesor mínimo de la placa de la oreja, tomando en consideración la fórmula del esfuerzo actuante por aplastamiento.

$$f_p = \frac{T_D}{d \cdot t},$$

Despejado el espesor de la placa se tiene lo siguiente:

$$t = \frac{T_D}{f_p d}$$

Si consideramos el esfuerzo mínimo de fluencia igual al esfuerzo de aplastamiento actuante, obtenemos el espesor mínimo requerido por esfuerzo de aplastamiento.

## Cortante

Los esfuerzos cortantes se producen en la oreja cuando las fuerzas aplicadas tienden a hacer que una parte de la oreja se corte con respecto a otra, como puede apreciarse en la figura 4.21

El esfuerzo cortante promedio es igual a la fuerza cortante dividida entre el área de la sección transversal sobre la cual actúa, es decir:

$$f_v = \frac{T_D}{A_v}$$

De acuerdo con el “Manual of steel construction” del AISC el esfuerzo cortante permisible es:

$$F_v = 0.4 F_y$$

donde:

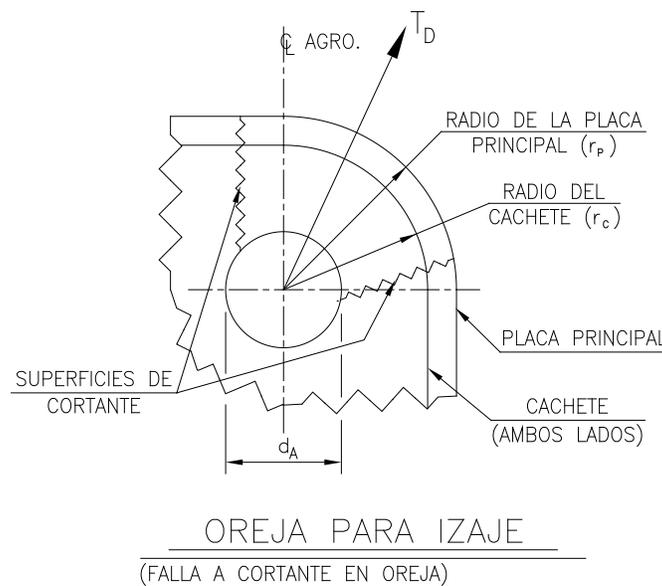
$F_y$  =Esfuerzo de fluencia mínimo especificado del acero utilizado.

$F_v$  =Esfuerzo cortante permisible.

$f_v$  =Esfuerzo cortante promedio.

$T_D$  =Tensión máxima de diseño.

$A_v$  =Área proyectada sobre la cual actúa la fuerza cortante.



**Figura 4.21 Croquis de aplicación de carga por esfuerzo cortante**

El esfuerzo cortante en la oreja de izaje se presenta en dos planos de falla, como se muestra en la figura anterior, por lo tanto el esfuerzo cortante debido a la carga estática del cable, será el siguiente:

$$f_v = \frac{T_D}{2A_v}$$

Despejando el área de cortante se tiene lo siguiente:

$$A_v = \frac{T_D}{2f_v}$$

Si consideramos el esfuerzo mínimo de fluencia igual al esfuerzo cortante actuante, obtenemos el área mínima requerida a cortante por esfuerzo cortante.

### Desprendimiento

El esfuerzo cortante en la placa principal de la oreja para izaje lo determina la componente vertical (fuerza cortante) de la fuerza de tensión máxima en los cables para izaje. En la figura 4.22 se puede apreciar la tendencia al desprendimiento de la oreja debida a la fuerza del levantamiento.

El esfuerzo cortante promedio debido a la fuerza cortante vertical, se considera igual a:

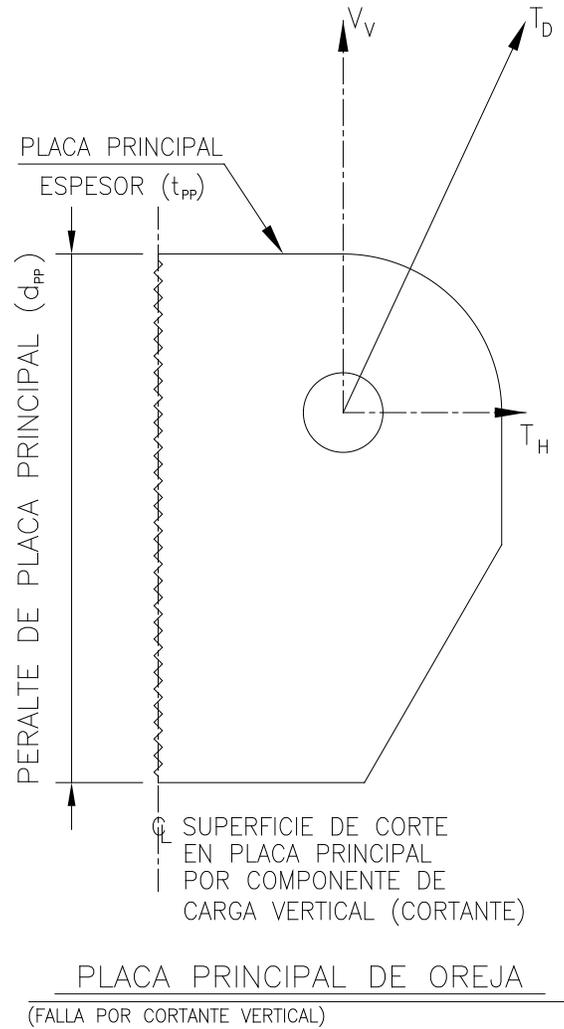
$$f_v = \frac{V_v}{A_v}$$

Despejando el área sometida al esfuerzo cortante se tiene lo siguiente:

$$A_v = \frac{V_v}{f_v}$$

Como se mencionó anteriormente, de acuerdo con el “Manual of steel construction” del AISC el esfuerzo cortante permisible es:

$$F_v = 0.4 F_y$$



**Figura 4.22 Croquis del comportamiento de la placa principal por esfuerzo cortante vertical promedio**

### Flujo de Cortante

El esfuerzo cortante horizontal se calculará con la fórmula del cortante:

$$f_v = \frac{V_v \cdot Q}{I \cdot t}$$

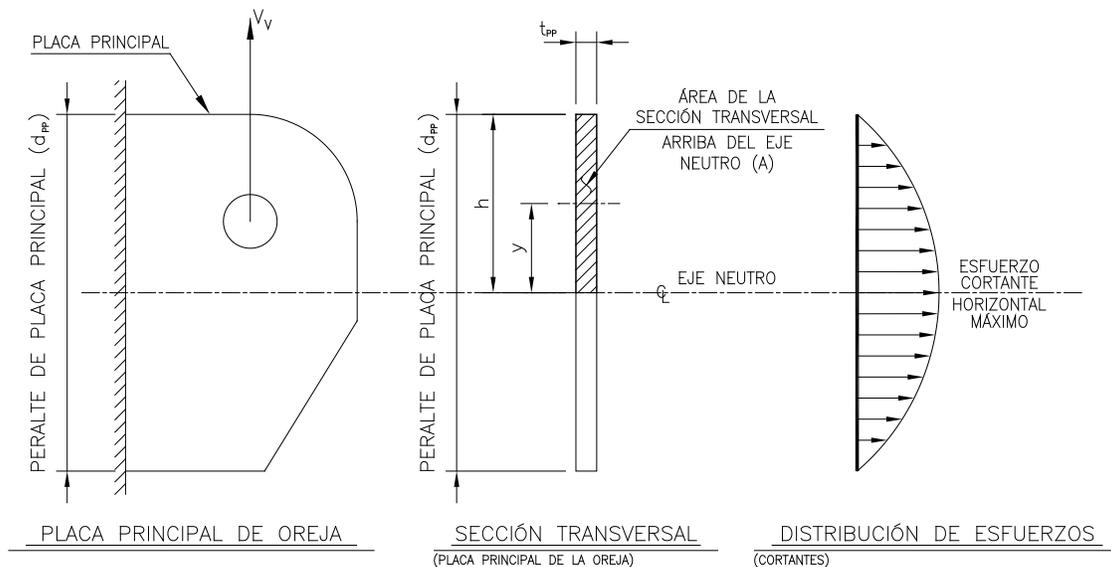
donde:

$f_v$  = Esfuerzo cortante horizontal de trabajo.

$V_v$  = Fuerza cortante vertical en la sección.

- Q = Momento estático respecto al eje neutro, correspondiente al segmento de la sección transversal localizada arriba (o abajo) del nivel en que  $f_v$  se está calculando.
- I = Momento de inercia de toda el área de la sección transversal con respecto al eje neutro.
- t = Espesor de la sección en el lugar donde se calcula el esfuerzo cortante.

En realidad la distribución de esfuerzos cortantes horizontales en una sección transversal de una viga rectangular delgada es parabólica. El valor máximo del esfuerzo cortante ocurre en el eje neutro donde el momento estático Q tiene su valor máximo. En la figura 4.23 se muestra el diagrama con la distribución parabólica de los esfuerzos cortantes horizontales en la placa principal y las propiedades geométricas de la sección transversal rectangular.



**Figura 4.23 Croquis de la distribución de los esfuerzos cortantes en la placa principal de la oreja para izaje**

El momento estático “Q” para un punto de la sección rectangular es igual a:

$$Q=Ay$$

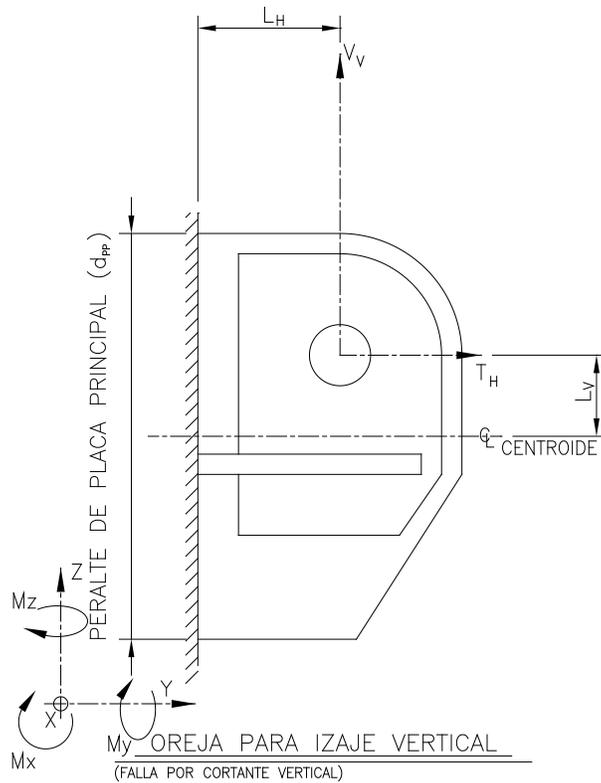
donde:

- Q = Momento estático máximo respecto al eje neutro de la porción de la sección transversal localizada arriba (o abajo) del eje neutro.
- A = Área de la sección transversal localizada arriba (o abajo) del eje neutro ( $A=(h)(t)$ ).
- h = Altura de la sección transversal localizada arriba del eje neutro.
- t = Espesor de la sección transversal localizada arriba del eje neutro.
- y = Distancia del eje neutro al centroide de la sección transversal.

Flexo tensión

La fuerza de tensión que los cables inducen a las orejas de izaje, no producen flexión ni carga axial únicamente, sino una combinación de ambos esfuerzos. Si se obtienen las componentes horizontal y vertical de esta fuerza, como se muestra en la figura 4.24 estas componentes actúan de la siguiente manera.

La fuerza horizontal axial “ $T_H$ ” produce esfuerzos directos de tensión en todas las fibras. La fuerza vertical “ $V$ ” produce esfuerzos de flexión. Como ambos esfuerzos actúan para alargar o acortar las fibras, pueden combinarse algebraicamente. El hecho de que ambas cargas producen esfuerzos que tienen la misma línea de acción confirma que la superposición de esfuerzos es válida.



**Figura 4.24 Croquis de las propiedades geométricas y mecánicas de la oreja para izaje por flexo tensión**

Revisión de la longitud de la placa principal por flexión alrededor del eje X.

De acuerdo con el “Manual of steel construction” del AISC, los miembros sometidos simultáneamente a esfuerzos de tensión axial y flexión, deben estar diseñados en toda su longitud para satisfacer los requisitos de la siguiente fórmula:

$$\frac{f_t}{0.6 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$$

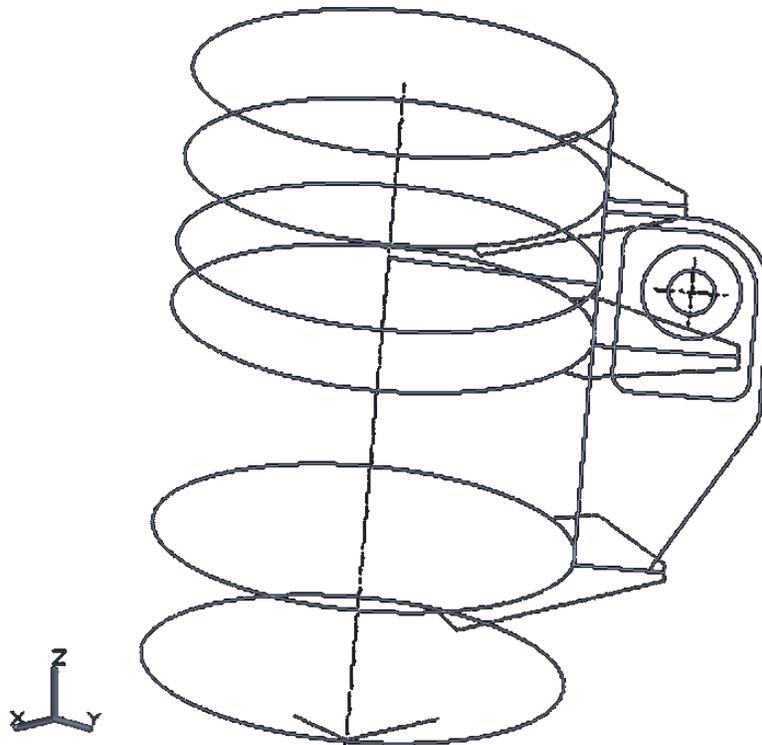
De acuerdo con el AISC, el esfuerzo permisible por flexión para secciones prismáticas será el que se indica a continuación.

$$F_b = 0.75 F_y$$

Debido al sentido opuesto de los momentos flexionantes alrededor del eje X, el momento total se obtiene a partir de la diferencia algebraica entre ambos.

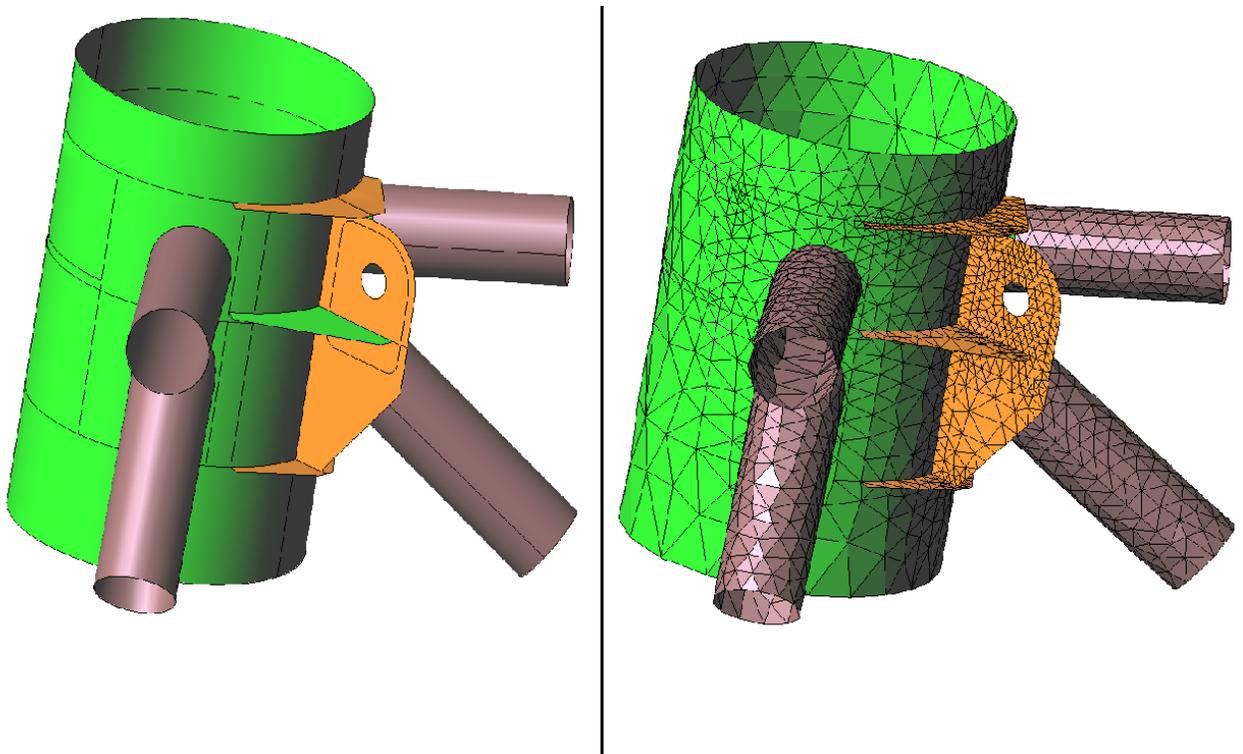
$$M_x = M_{x_V} - M_{x_H}$$

La geometría que resulte de estas revisiones deberá ser plasmada en croquis o planos preliminares, los cuales servirán de base para la creación de un modelo tridimensional de la oreja. Es conveniente que este modelo 3D se haga de modo unifilar; es decir, que sólo se dibuje el contorno de los elementos que formarán a las orejas, al centro del espesor de cada placa como se observa en la figura 4.25



**Figura 4.25 Modelo tridimensional de oreja para izaje dibujada a centro de líneas**

El STAAD genera el espesor de las placas desde el centro de estas hacia afuera en ambos lados. Por ello es conveniente un modelo unifilar en 3D, como el ilustrado en la figura anterior. Dependiendo de la complejidad que tenga la geometría de las orejas o muñones, estos podrán ser mallados en AutoCAD o con ayuda de otro software. Incluso se puede mallar dentro del STAAD si la geometría lo permite. La utilización del software para realizar la malla también dependerá de la experiencia y la habilidad que el diseñador tenga respecto a los mismos. Las geometrías complejas pueden ser asistidas por un software mallador, como el GID. Una estructura “alambrada” (como en la figura 4.26) puede exportarse como archivo DXF desde el AutoCAD y completarse con superficies dentro del GID para después mallarse e importar después al STAAD, con todos los puntos de la malla generados.



**Figura 4.26 Generación de superficies y malla en el GID**

Al dimensionar este tipo de elementos se deben tomar en cuenta los siguientes requerimientos indicados en la NRF-041-PEMEX-2014:

- a) Las orejas de izaje se deben diseñar con soldaduras principales de preferencia para esfuerzos de cizalla o corte y no para esfuerzos por tensión.
- b) La placa principal de las orejas de izaje se debe soldar a los elementos principales de la estructura.

- c) El espesor de la placa secundaria no debe ser mayor al espesor de la placa principal.
- d) El atiesador central del muñón (placa de cizalla / corte) debe estar conectada por una palca principal y diseñarse para transferir la carga total de la eslinga a la placa principal, sin considerar la resistencia de la tubería del muñón.
- e) El diámetro del muñón debe ser de preferencia 4 veces el diámetro de la eslinga / grommet. El diámetro mínimo de un muñón debe ser de al menos 2,5 veces del diámetro de la eslinga o grommet, sin embargo, esto podría dar como resultado pérdidas importantes por dobladura para la resistencia del grommet o eslinga y por lo mismo eslingas o grommets más pesados.
- f) El muñón se debe ajustar con un arreglo que sostenga la eslinga.
- g) La placa secundaria se debe soldar al mismo elemento primario de la estructura a la cual la placa principal de la oreja de izaje esta soldada.
- h) Todos los bordes filosos que puedan causar daño a las eslingas durante el manejo y transportación se deben redondear.

Para cualquier estructura, las orejas y muñones de izaje se deben alinear con el ángulo de la eslinga en una configuración horizontal o vertical.

La dirección real de las cargas de aparejos no debe dar como resultado dobladura fuera de plano en las partes estructurales principales del punto de izaje. Se debe considerar que algunos barcos grúas tienen ganchos grandes asimétricos y el alineamiento de los aparejos no es el mismo que el alineamiento al centro geométrico.

Con los datos extraídos del modelo para el análisis de izaje (ver listado de la sección 5.3), se puede obtener la tensión máxima en las eslingas; es conveniente que se presente de manera vectorial, pues en el STAAD Pro se incluirá a través de sus componentes coordenadas, como se puede ver en la figura 4.27

```

2277 1826 1847 1884 1903 1933 1950 1974 1981 1993 1994 2084 2088 2093 2097 2106 -
2278 2111 2119 2123 2131 2133 2135 TO 2138 FIXED
2279 LOAD 1 LOADTYPE Gravity TITLE LOAD CASE 1
2280 JOINT LOAD
2281 2139 FX 171.84 FY -258.795 FZ 737.22
2282 LOAD 2 LOADTYPE Gravity TITLE LOAD CASE 2
2283 JOINT LOAD
2284 2139 FX -33.229 FY -22.095 FZ -2.7636
2285 LOAD COMB 3 COMBINATION LOAD CASE 3
2286 1 2.0 2 2.0
2287 LOAD COMB 5 COMBINATION LOAD CASE 5
2288 1 2.0 2 -2.0
2289 *
2290 PERFORM ANALYSIS PRINT ALL
    
```

**Figura 4.27 Archivo de entrada STAAD Pro**

Se debe tomar en cuenta una carga adicional de punto de izaje de un mínimo de 5% de la tensión de diseño. En caso de las orejas de izaje esta carga actúa en el centro del agujero del perno de manera perpendicular a los aparejos en la dirección menos favorable. Para el caso de muñones, esta carga actúa en el centro del muñón, perpendicular al aparejo. Esta carga adicional considera pequeños des-alineamientos as-built entre los puntos de izaje y el ángulo real de la eslinga. En la figura 4.27, esta carga adicional corresponde a la línea 2284 de la carga No. 2 (LOAD 2).

El API RP 2A-WSD indica que para los izajes realizados costa afuera expuestos a mar abierto, las orejas para izaje y otros miembros internos de la estructura contiguos a la junta donde la oreja transmite las fuerzas de izaje a la estructura, deben ser diseñados con un factor mínimo de carga de 2.0 aplicado a la carga estática calculada.

Con base en lo anterior, la revisión por esfuerzos de la oreja de izaje se realiza con un factor de carga por amplificación dinámica de 2.0 Lo cual es coincidente con lo que indica la NRF-173-PEMEX-2009.

Este factor (FAD) se ve reflejado en las combinaciones de carga 3 y 5 (LOAD COMB 3 y LOAD COMB 5), del listado que se presenta en la figura 4.27. En la tabla 4.9 se presenta un ejemplo de las combinaciones de carga consideradas para un análisis de puntos de izaje.

**Tabla 4.9 Cargas consideradas en el diseño.**

Tensión máxima en el cable.	( $T_E$ )	800.00 kips	362.87 ton
Factor de amplificación dinámica de diseño.	(FAD)	2.00	
Tensión de diseño de oreja para izaje.	( $T_D$ )	1600.00 kips	725.75 ton
Carga lateral accidental del 5% (API).	( $F_{LA}$ )	80.00 kips	36.29 ton
Componente lateral total.	( $F_{LT}$ )	80.00 kips	36.29 ton

Resultados del análisis de elementos finitos de puntos de izaje

En la revisión de esfuerzos se considera el criterio de Von Mises, el cual asume esfuerzos promedio en cada elemento. El esfuerzo máximo que se presenta en los elementos sólidos que representan al punto de izaje debe ser menor a  $0.9F_y$ .

A continuación se presentan algunos ejemplos con diagramas de esfuerzos. La figura 4.28 corresponde a un muñón y la figura 4.29 a una oreja de izaje.

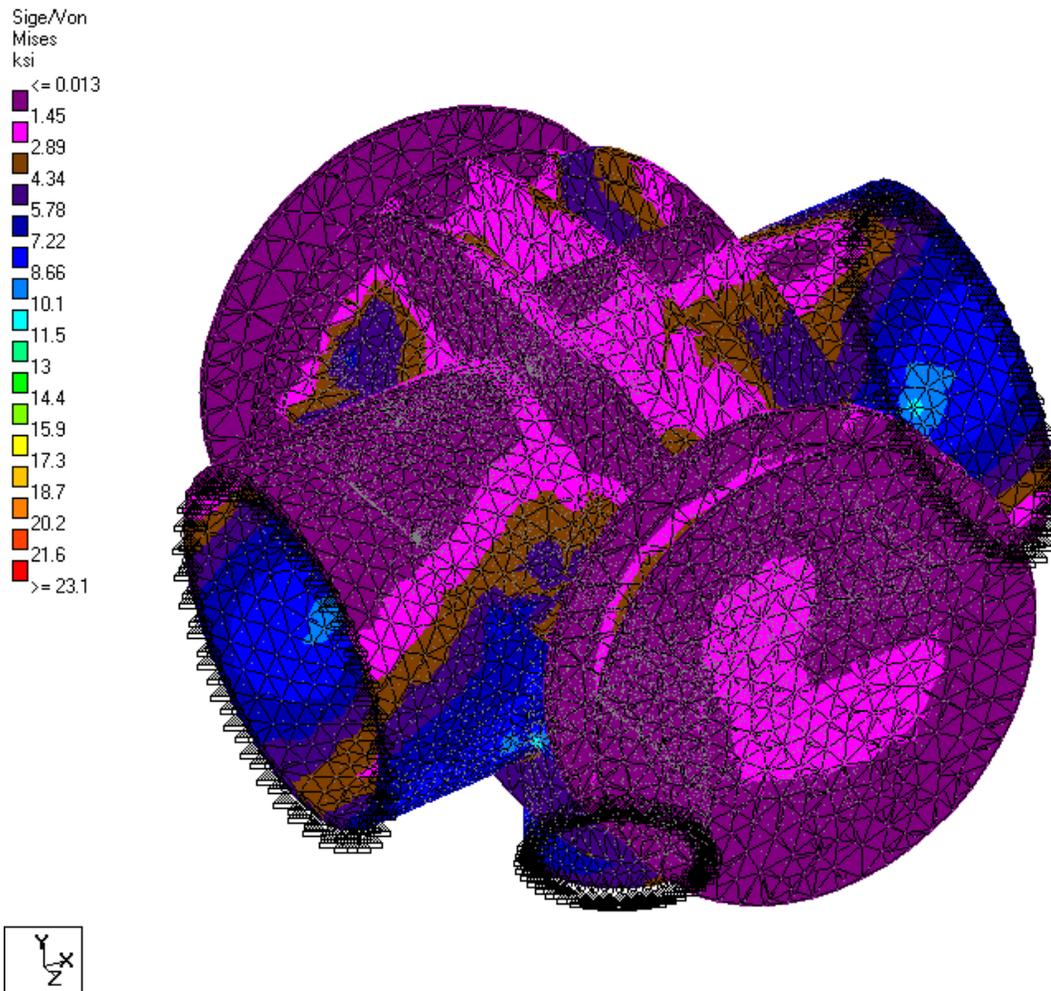
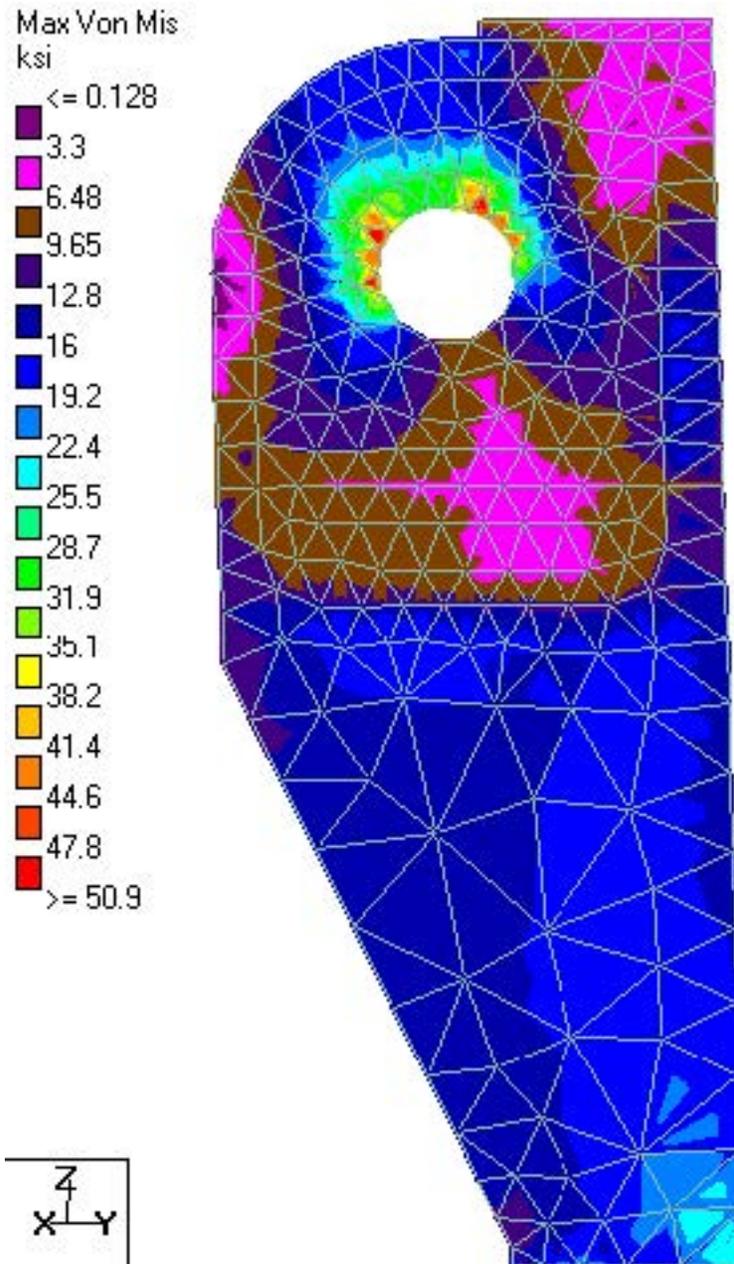


Figura 4.28 Diagrama de esfuerzos máximos de von mises, (isométrico de muñón)



**Figura 4.29 Distribución de esfuerzos en la placa principal de una oreja de izaje**

# *Capítulo V*

Resultados del análisis estructural

## 5. Resultados del análisis estructural

A continuación se describen los resultados obtenidos del análisis de izaje de la subestructura. Se presenta la manera en que deben revisarse las condiciones básicas de carga, las combinaciones de carga aplicadas en el análisis, la revisión de elementos, relaciones de interacción de esfuerzo de los elementos y relaciones de interacción de esfuerzos en juntas tubulares (punzonamiento), a través del ejemplo práctico que se describió en el capítulo anterior.

### 5.1 Peso de la subestructura

En el siguiente listado se presenta el resultado de las cargas básicas impuestas en el modelo estructural y que representan el peso total de la subestructura; estas cargas no incluyen los factores de carga, pues éstos se consideran en las combinaciones:

```

***TOTAL APPLIED LOAD ( KIP  INCH ) SUMMARY (LOADING  1 )
SUMMATION FORCE-X =          0.00
SUMMATION FORCE-Y =          0.00
SUMMATION FORCE-Z =        -1595.79

***TOTAL APPLIED LOAD ( KIP  INCH ) SUMMARY (LOADING  2 )
SUMMATION FORCE-X =          0.00
SUMMATION FORCE-Y =          0.00
SUMMATION FORCE-Z =         -172.22

***TOTAL APPLIED LOAD ( KIP  INCH ) SUMMARY (LOADING  3 )
SUMMATION FORCE-X =          0.00
SUMMATION FORCE-Y =          0.00
SUMMATION FORCE-Z =         -121.55
    
```

La suma es de 1,889.56 kips (857.098 ton) y corresponde al peso total de la subestructura, sin el incremento de los factores de carga.

A continuación se presenta el centro de gravedad, el cual coincide en sus coordenadas horizontales con la posición del punto 1006 que representa al gancho de la grúa, como se aprecia en la figura 5.1

CENTER OF FORCE BASED ON Z FORCES ONLY (INCH).  
 (FORCES IN NON-GLOBAL DIRECTIONS WILL INVALIDATE RESULTS)

X = -0.142807771E+02  
 Y = 0.660844317E-01  
 Z = 0.212410639E+04

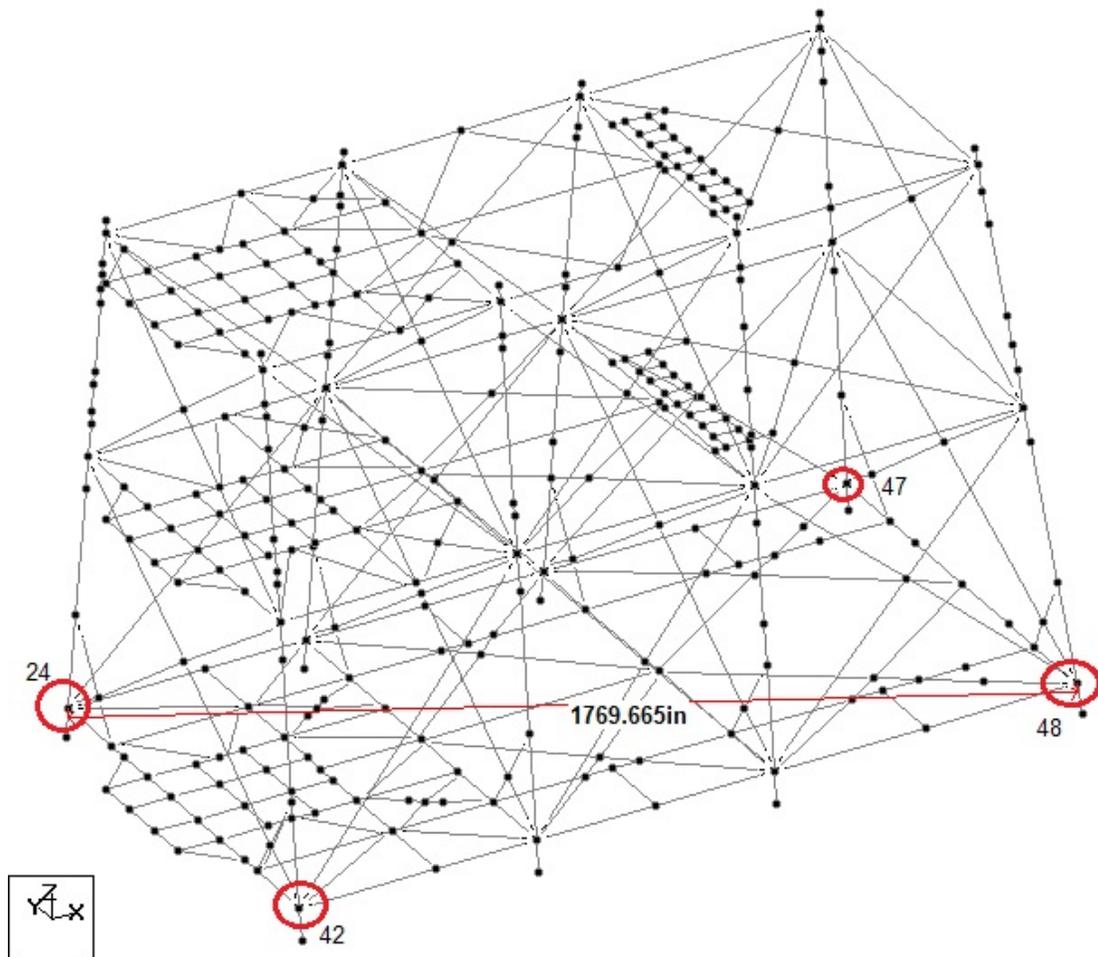
Node	X in	Y in	Z in
1006	-14.278	0.069	3323.328
1007	15.118	254.586	1614.000
1008	123.611	254.586	1614.000

Figura 5.1 Coordenadas del gancho

Como se ha podido apreciar en la tabla 4.7 y 4.8, la condición más desfavorable se presenta para la combinación de carga de la revisión de los elementos principales con el factor recomendado por el API RP 2A-WSD (factor de carga de 2.2). Por lo tanto, se realiza la revisión de la inclinación de la subestructura en esta condición. En el siguiente listado se aprecian los desplazamientos que se presentan en la base de la plataforma. La figura 5.2 indica los nodos para los cuales se revisa esta condición.

JOINT DISPLACEMENT (INCH RADIANS)      STRUCTURE TYPE = SPACE  
-----

JOINT	LOAD	X-TRANS	Y-TRANS	Z-TRANS	X-ROTAN	Y-ROTAN	Z-ROTAN
24	1	-0.27575	-1.44740	-1.05015	-0.00041	-0.00010	0.00020
	5	-0.60665	-3.18428	-2.31033	-0.00091	-0.00023	0.00045
42	1	-0.02913	-1.45463	-0.45089	-0.00107	-0.00009	0.00040
	5	-0.06409	-3.20018	-0.99196	-0.00234	-0.00019	0.00087
47	1	-0.32627	-0.95715	-0.75478	-0.00059	-0.00022	0.00034
	5	-0.71780	-2.10573	-1.66051	-0.00129	-0.00048	0.00075
48	1	-0.07962	-0.96780	-0.17175	-0.00086	-0.00020	0.00026
	5	-0.17516	-2.12915	-0.37786	-0.00189	-0.00044	0.00057



**Figura 5.2 Identificación de nodos exteriores en la base de la subestructura**

De acuerdo con la NRF-041-PEMEX-2014, para situaciones de izaje estándares, la inclinación del objeto a izar no debe exceder un 2% en ambas direcciones longitudinal y transversal. La inclinación debe ser verificada una vez que la geometría del arreglo de izaje está definida y se conozca la posición del centro de gravedad (C.G.).

De acuerdo a los desplazamientos obtenidos, la pendiente que se presenta es:

$$z = 2.31 \text{ in} - 0.38 \text{ in}$$

$$z = 1.93 \text{ in}$$

$$x = 1,769.67 \text{ in}$$

por lo que:

$$m(\%) = \frac{z}{x} = \frac{1.93}{1,769.67} = 0.109 \%$$

Representa una inclinación menor al 2% para inclinaciones tanto transversales como longitudinales, que se establece en la norma NRF-041-PEMEX-2014.

Además la norma indica que el desplazamiento del centro de gravedad (C.G.) horizontal permitido ( $e_{\text{perm.}}$ ) para mantener la inclinación dentro de este 2% será:

$$e_{\text{perm.}} = 0.02 \times \text{distancia vertical entre el gancho de la grúa}$$

Sin embargo, como hemos podido apreciar en la figura 5.1, el centro de gravedad coincide prácticamente con las coordenadas horizontales del centro de gravedad y entonces  $e_{\text{perm.}} = 0.00$ ; cumpliendo con lo establecido por la norma.

## 5.2 Reacciones en apoyos

En el siguiente listado se indica la magnitud de las reacciones que se presentan en los apoyos considerados dentro del modelo estructural para las condiciones de frontera.

SUPPORT REACTIONS -UNIT KIP INCH STRUCTURE TYPE = SPACE							
-----							
JOINT	LOAD	FORCE-X	FORCE-Y	FORCE-Z	MOM-X	MOM-Y	MOM Z
1006	1	0.00	0.00	1889.57	0.00	0.00	0.00
	4	0.00	0.00	2806.01	0.00	0.00	0.00
	5	0.00	0.00	4157.05	0.00	0.00	0.00
	6	0.00	0.00	1949.66	0.00	0.00	0.00
	7	0.00	0.00	2909.93	0.00	0.00	0.00
255	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
471	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Como puede apreciarse, las reacciones se presentan únicamente en la dirección de las cargas gravitacionales (dirección vertical Z), con lo cual se puede concluir que la estructura no tiene desplazamientos importantes en las direcciones horizontales, pues en los resortes que restringen estos desplazamientos no existen reacciones. Como se ha ilustrado en la figura 4.9 del capítulo anterior, el nodo 1006 corresponde al gancho de la grúa y los nodos 255 y 471 contienen a los resortes que le dan estabilidad al modelo, con una rigidez lineal despreciable.

Estas condiciones de apoyo fueron descritas en el subcapítulo 4.4; en la figura 4.18 se ilustra la ubicación de los apoyos dentro del modelo.

Esta revisión nos permite asegurar que la posición del gancho es adecuada y por otra parte reafirma que la inclinación que presenta la estructura está dentro de los parámetros aceptables.

### 5.3 Tensión en cables

El siguiente listado muestra las fuerzas y momentos presentes en las eslingas durante las diferentes condiciones de carga para el izaje de la subestructura. En la figura 4.9, del capítulo anterior, se ilustra la identificación de estos nodos y elementos. Como podemos apreciar, los elementos que representan a las eslingas presentan únicamente carga axial, por lo cual se puede concluir que se ha modelado adecuadamente las restricciones de desplazamiento para estos elementos.

```

MEMBER END FORCES      STRUCTURE TYPE = SPACE
-----
ALL UNITS ARE -- KIP  INCH      (LOCAL )
MEMBER  LOAD  JT      AXIAL  SHEAR-Y  SHEAR-Z  TORSION  MOM-Y  MOM-Z

```

MEMBER	LOAD	JT	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
459	1	255	-689.26	0.00	0.00	-0.59	0.00	0.00
		1006	689.26	0.00	0.00	0.59	0.00	0.00
	4	255	-1023.56	0.00	0.00	-0.87	0.00	0.00
		1006	1023.56	0.00	0.00	0.87	0.00	0.00
	5	255	-1516.38	0.00	0.00	-1.29	0.00	0.00
		1006	1516.38	0.00	0.00	1.29	0.00	0.00
	6	255	-711.18	0.00	0.00	-0.61	0.00	0.00
		1006	711.18	0.00	0.00	0.61	0.00	0.00
460	7	255	-1061.46	0.00	0.00	-0.90	0.00	0.00
		1006	1061.47	0.00	0.00	0.90	0.00	0.00
	1	471	-338.14	0.00	0.00	-0.60	0.00	0.00
		1006	338.14	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00
	4	471	-502.13	0.00	0.00	-0.89	0.00	0.00
		1006	502.13	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00
	5	471	-743.90	0.00	0.00	-1.32	0.00	0.00
		1006	743.90	0.00	0.00	1.32	0.00	0.00
461	6	471	-348.89	0.00	0.00	-0.62	0.00	0.00
		1006	348.89	0.00	0.00	0.62	0.00	0.00
	7	471	-520.73	0.00	0.00	-0.92	0.00	0.00
		1006	520.73	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00
	1	491	-699.50	0.00	0.00	0.59	0.00	0.00
		1006	699.50	0.00	0.00	-0.59	0.00	0.00
	4	491	-1038.76	0.00	0.00	0.87	0.00	0.00
		1006	1038.76	0.00	0.00	-0.87	0.00	0.00
462	5	491	-1538.90	0.00	0.00	1.29	0.00	0.00
		1006	1538.90	0.00	0.00	-1.29	0.00	0.00
	6	491	-721.74	0.00	0.00	0.61	0.00	0.00
		1006	721.75	0.00	0.00	-0.61	0.00	0.00
	7	491	-1077.23	0.00	0.00	0.91	0.00	0.00
		1006	1077.23	0.00	0.00	-0.91	0.00	0.00
	1	492	-351.85	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00
		1006	351.85	0.00	0.00	-0.60	0.00	0.00
462	4	492	-522.50	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00
		1006	522.50	0.00	0.00	-0.89	0.00	0.00
	5	492	-774.07	0.00	0.00	1.32	0.00	0.00
		1006	774.07	0.00	0.00	-1.32	0.00	0.00
	6	492	-363.04	0.00	0.00	0.62	0.00	0.00
		1006	363.04	0.00	0.00	-0.62	0.00	0.00
	7	492	-541.85	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00
		1006	541.85	0.00	0.00	-0.92	0.00	0.00

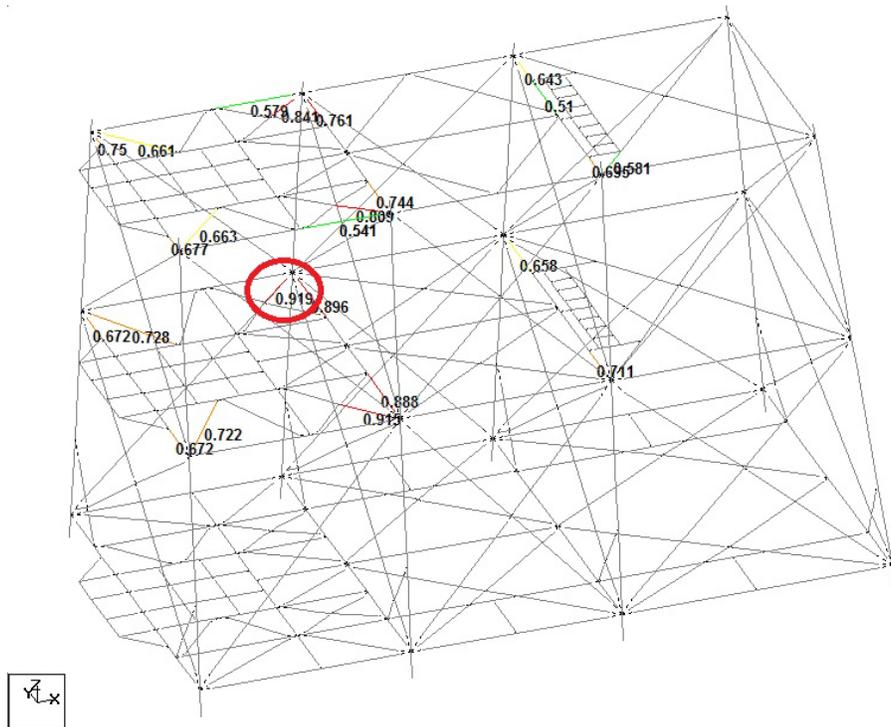
En color amarillo, se resalta la tensión máxima, y se presenta en el cable 461 para la combinación de carga número cinco, la cual corresponde a la combinación para la revisión de elementos principales con un FAD de 2.0 recomendado por el API RP 2A-WSD. Esta tensión se utilizará para el diseño de los puntos de izaje (orejas o muñones).

Para la selección del cable y del grillete (como se vio en el capítulo 3), se utilizará la tensión de este mismo elemento 461 pero en la condición de carga uno, multiplicada por el factor de contingencia de 1.1, pues hay que recordar que la condición de carga uno, no considera ningún factor de carga. Por lo tanto:

$$T_{max} = 699.5 \times 1.1 = 769.45 \text{ kips}$$

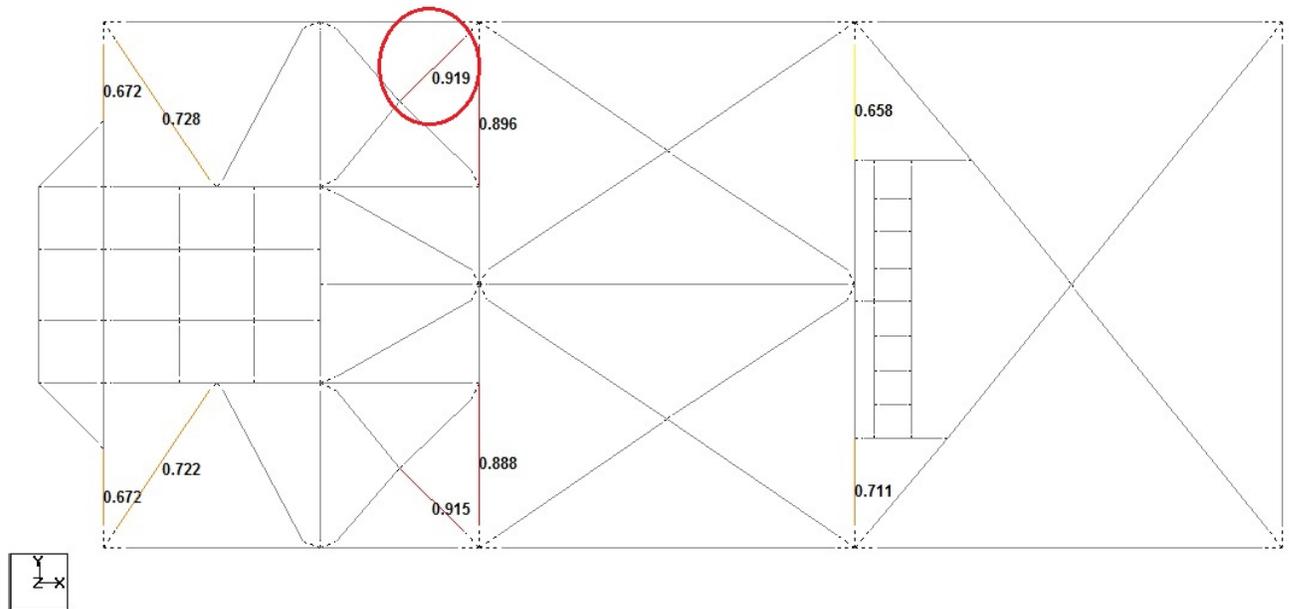
#### 5.4 Relaciones de interacción de esfuerzos

A continuación se presentan las relaciones máximas de interacción de esfuerzos que se generan durante la maniobra de izaje en los miembros de la estructura analizada. Como podrá apreciarse, todos los valores son menores a la unidad, cumpliendo con lo establecido por las normas y códigos. Además, los valores no son tan pequeños, lo cual implica que los elementos no están sobrados. Los resultados se irán presentando de acuerdo al orden de las combinaciones de carga. En la figura 5.3 se muestra la máxima relación de interacción de esfuerzos para la revisión de los elementos secundarios con la norma API RP 2A-WSD, en la que se considera un factor de amplificación dinámica igual a 1.35



**Figura 5.3 Relaciones máximas de interacción de esfuerzos en elementos secundarios API RP 2A-WSD (FAD =1.35)**

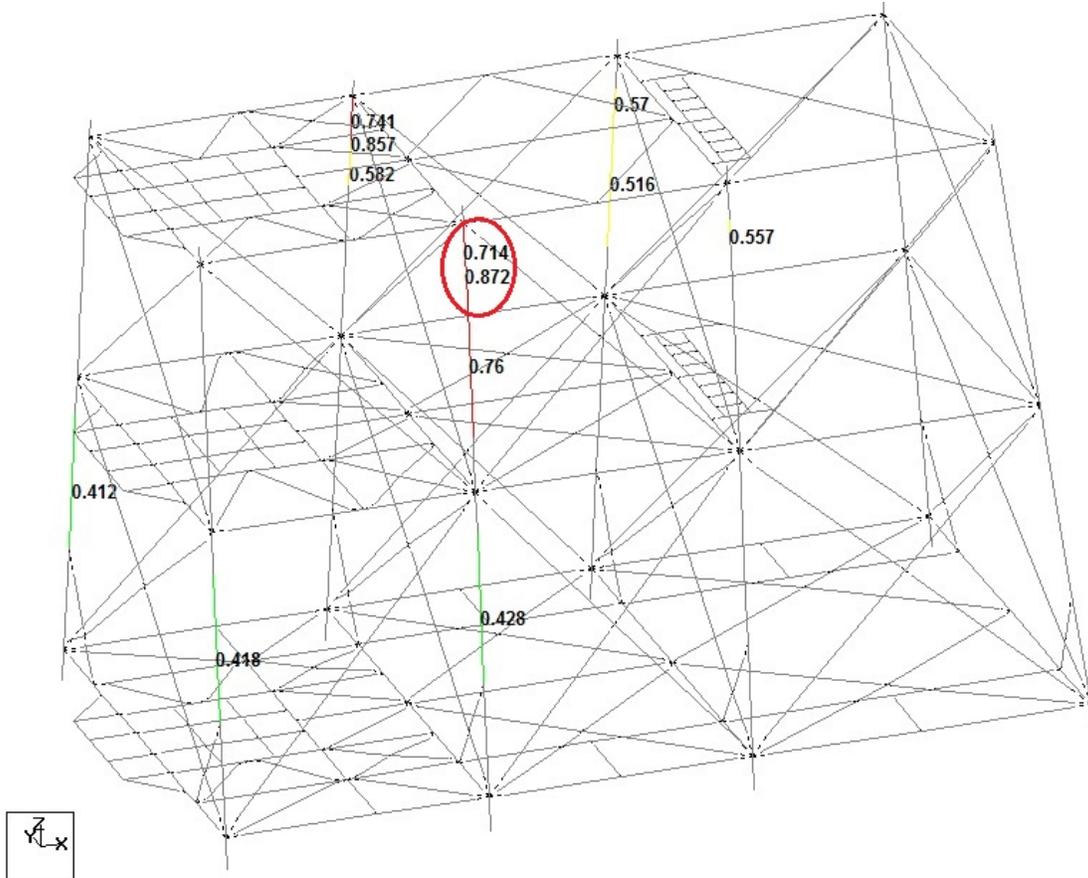
Por claridad, únicamente se presentan los valores de relación de interacción de esfuerzos (Unity Check en inglés o simplemente UC) mayores a 0.5; en la figura 5.4 se muestra el elemento que presenta esta condición.



**Figura 5.4 Identificación de elemento secundario con el máximo UC, planta de nivel arriostramiento Elev. (-) 6.096 (20' - 0")**

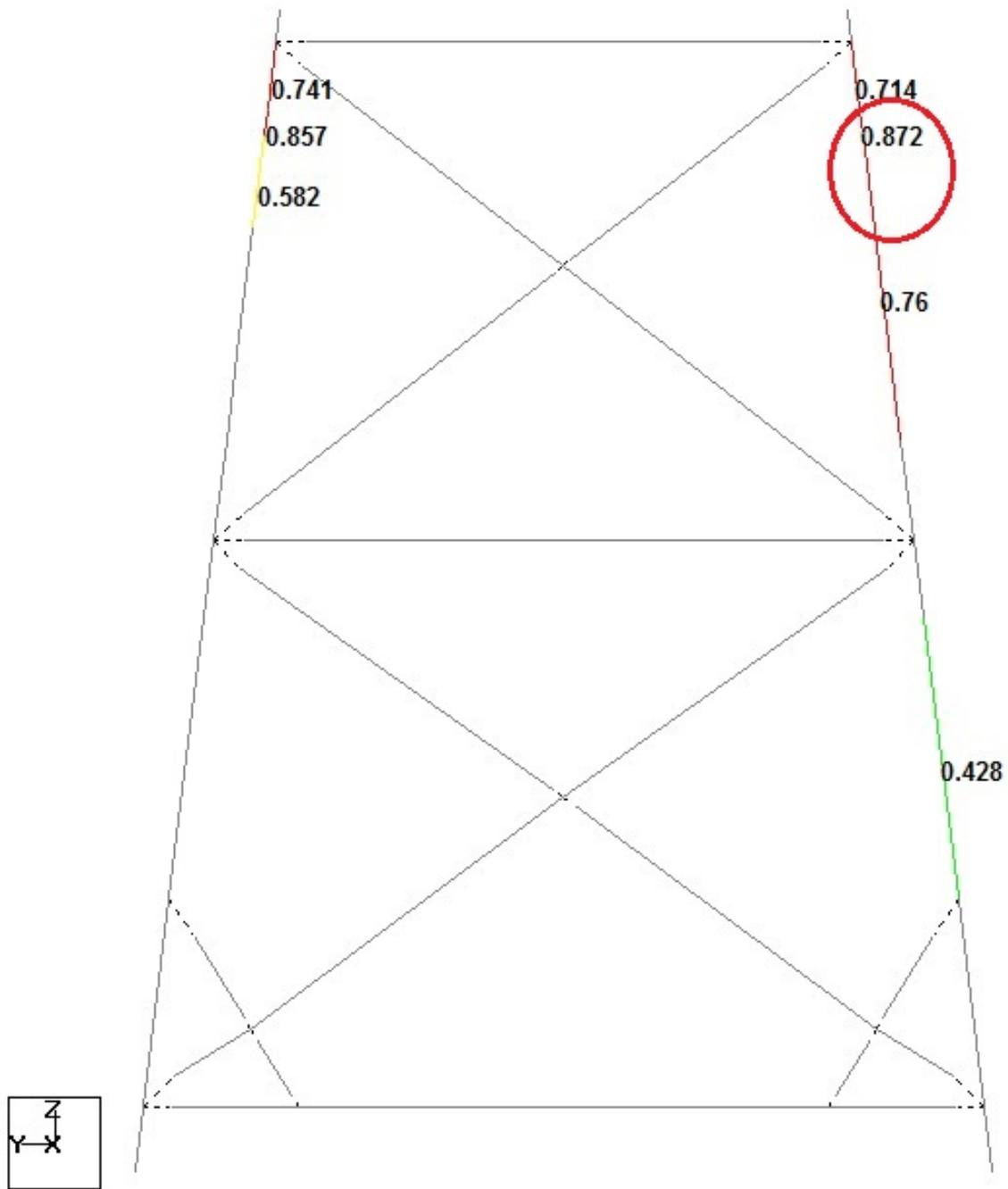
Beam	Analysis Property	Design Property	Actual Ratio	Allowable Ratio	Normalized Ratio (Actual/Allowable)	Clause	L/C
1227	PIPE	PIPE	0.494	1.000	0.494	AISC- H2-1	4
85	PIPE	PIPE	0.498	1.000	0.498	AISC- H2-1	4
88	PIPE	PIPE	0.510	1.000	0.510	AISC- H1-3	4
82	PIPE	PIPE	0.541	1.000	0.541	AISC- H2-1	4
801	PIPE	PIPE	0.546	1.000	0.546	AISC- H2-1	4
83	PIPE	PIPE	0.579	1.000	0.579	AISC- H2-1	4
219	PIPE	PIPE	0.581	1.000	0.581	AISC- H1-3	4
220	PIPE	PIPE	0.643	1.000	0.643	AISC- H1-3	4
236	PIPE	PIPE	0.658	1.000	0.658	AISC- H1-3	4
108	PIPE	PIPE	0.661	1.000	0.661	AISC- H2-1	4
104	PIPE	PIPE	0.663	1.000	0.663	AISC- H2-1	4
290	PIPE	PIPE	0.672	1.000	0.672	AISC- H1-3	4
291	PIPE	PIPE	0.672	1.000	0.672	AISC- H1-3	4
137	PIPE	PIPE	0.677	1.000	0.677	AISC- H1-3	4
217	PIPE	PIPE	0.695	1.000	0.695	AISC- H1-3	4
237	PIPE	PIPE	0.711	1.000	0.711	AISC- H1-3	4
256	PIPE	PIPE	0.722	1.000	0.722	AISC- H1-3	4
260	PIPE	PIPE	0.728	1.000	0.728	AISC- H1-3	4
97	PIPE	PIPE	0.744	1.000	0.744	AISC- H1-3	4
136	PIPE	PIPE	0.750	1.000	0.750	AISC- H1-3	4
96	PIPE	PIPE	0.761	1.000	0.761	AISC- H1-3	4
103	PIPE	PIPE	0.809	1.000	0.809	AISC- H2-1	4
102	PIPE	PIPE	0.841	1.000	0.841	AISC- H2-1	4
250	PIPE	PIPE	0.888	1.000	0.888	AISC- H1-1	4
249	PIPE	PIPE	0.896	1.000	0.896	AISC- H1-2	4
267	PIPE	PIPE	0.915	1.000	0.915	AISC- H1-3	4
266	PIPE	PIPE	0.919	1.000	0.919	AISC- H1-3	4

**Figura 5.5 Relaciones máximas de interacción de esfuerzos en elementos secundarios, API RP 2A-WSD (FAD =1.35)**

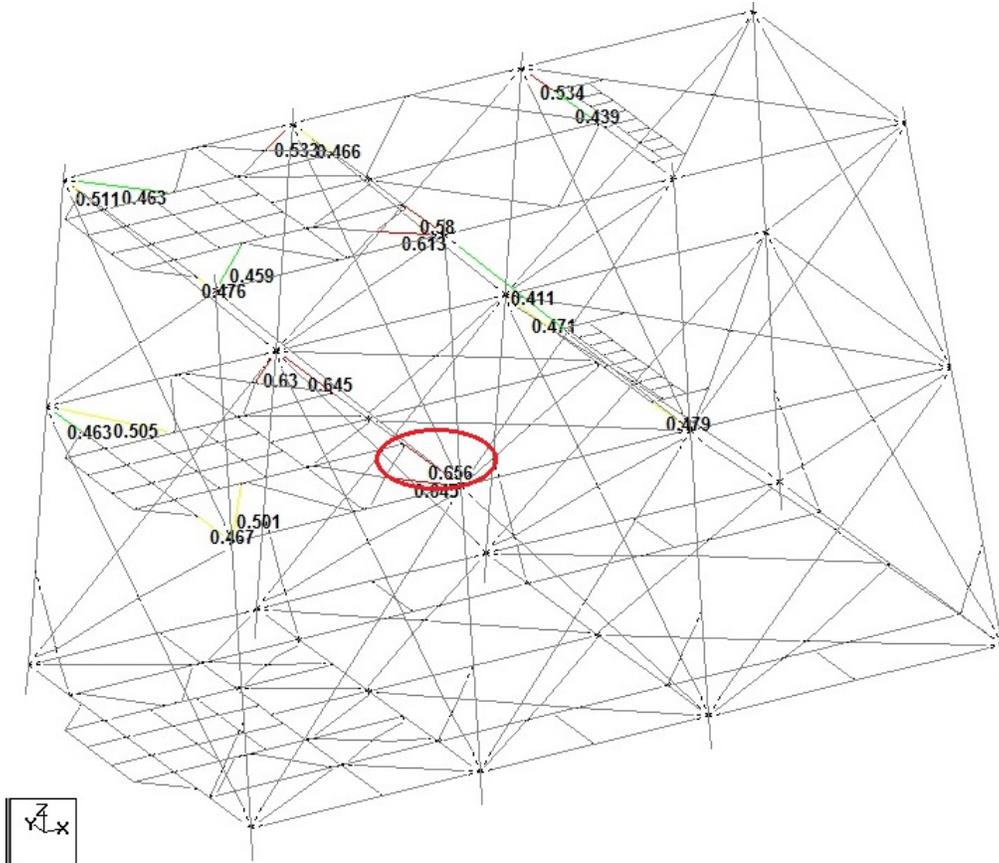


Beam	Analysis Property	Design Property	Actual Ratio	Allowable Ratio	Normalized Ratio (Actual/Allowable)	Clause	L/C
1399	PIPE	PIPE	0.239	1.000	0.239	AISC- H2-1	5
1400	PIPE	PIPE	0.242	1.000	0.242	AISC- H2-1	5
42	PIPE	PIPE	0.244	1.000	0.244	AISC- H2-1	5
30	PIPE	PIPE	0.247	1.000	0.247	AISC- H2-1	5
43	PIPE	PIPE	0.251	1.000	0.251	AISC- H2-1	5
49	PIPE	PIPE	0.254	1.000	0.254	AISC- H2-1	5
24	PIPE	PIPE	0.268	1.000	0.268	AISC- H2-1	5
1318	PIPE	PIPE	0.276	1.000	0.276	AISC- H2-1	5
1320	PIPE	PIPE	0.294	1.000	0.294	AISC- H2-1	5
31	PIPE	PIPE	0.326	1.000	0.326	AISC- H2-1	5
1406	PIPE	PIPE	0.335	1.000	0.335	AISC- H2-1	5
1405	PIPE	PIPE	0.356	1.000	0.356	AISC- H2-1	5
29	PIPE	PIPE	0.390	1.000	0.390	AISC- H2-1	5
37	PIPE	PIPE	0.394	1.000	0.394	AISC- H2-1	5
32	PIPE	PIPE	0.396	1.000	0.396	AISC- H2-1	5
11	PIPE	PIPE	0.412	1.000	0.412	AISC- H1-3	5
2	PIPE	PIPE	0.418	1.000	0.418	AISC- H1-3	5
23	PIPE	PIPE	0.428	1.000	0.428	AISC- H2-1	5
52	PIPE	PIPE	0.516	1.000	0.516	AISC- H2-1	5
1403	PIPE	PIPE	0.557	1.000	0.557	AISC- H2-1	5
53	PIPE	PIPE	0.570	1.000	0.570	AISC- H2-1	5
34	PIPE	PIPE	0.582	1.000	0.582	AISC- H2-1	5
1398	PIPE	PIPE	0.714	1.000	0.714	AISC- H2-1	5
1397	PIPE	PIPE	0.741	1.000	0.741	AISC- H2-1	5
25	PIPE	PIPE	0.760	1.000	0.760	AISC- H2-1	5
35	PIPE	PIPE	0.857	1.000	0.857	AISC- H2-1	5
26	PIPE	PIPE	0.872	1.000	0.872	AISC- H2-1	5

Figura 5.6 Relaciones máximas de interacción de esfuerzos en elementos principales API RP 2A-WSD (FAD =2.00)



**Figura 5.7** Identificación de elemento principal con el máximo UC, elevación del eje 2



Beam	Analysis Property	Design Property	Actual Ratio	Allowable Ratio	Normalized Ratio (Actual/Allowable)	Clause	L/C
1280	PIPE	PIPE	0.356	1.000	0.356	AISC- H1-1	4
85	PIPE	PIPE	0.363	1.000	0.363	AISC- H2-1	4
81	PIPE	PIPE	0.374	1.000	0.374	AISC- H1-3	4
83	PIPE	PIPE	0.380	1.000	0.380	AISC- H2-1	4
217	PIPE	PIPE	0.389	1.000	0.389	AISC- H1-3	4
82	PIPE	PIPE	0.398	1.000	0.398	AISC- H2-1	4
1386	PIPE	PIPE	0.411	1.000	0.411	AISC- H2-1	4
88	PIPE	PIPE	0.439	1.000	0.439	AISC- H1-3	4
104	PIPE	PIPE	0.459	1.000	0.459	AISC- H2-1	4
108	PIPE	PIPE	0.463	1.000	0.463	AISC- H2-1	4
290	PIPE	PIPE	0.463	1.000	0.463	AISC- H1-3	4
96	PIPE	PIPE	0.466	1.000	0.466	AISC- H1-3	4
291	PIPE	PIPE	0.467	1.000	0.467	AISC- H1-3	4
236	PIPE	PIPE	0.471	1.000	0.471	AISC- H1-3	4
137	PIPE	PIPE	0.476	1.000	0.476	AISC- H1-3	4
237	PIPE	PIPE	0.479	1.000	0.479	AISC- H1-3	4
256	PIPE	PIPE	0.501	1.000	0.501	AISC- H1-3	4
260	PIPE	PIPE	0.505	1.000	0.505	AISC- H1-3	4
136	PIPE	PIPE	0.511	1.000	0.511	AISC- H1-3	4
102	PIPE	PIPE	0.533	1.000	0.533	AISC- H2-1	4
220	PIPE	PIPE	0.534	1.000	0.534	AISC- H1-3	4
97	PIPE	PIPE	0.580	1.000	0.580	AISC- H1-3	4
103	PIPE	PIPE	0.613	1.000	0.613	AISC- H2-1	4
266	PIPE	PIPE	0.630	1.000	0.630	AISC- H1-3	4
249	PIPE	PIPE	0.645	1.000	0.645	AISC- H1-3	4
267	PIPE	PIPE	0.645	1.000	0.645	AISC- H1-3	4
250	PIPE	PIPE	0.656	1.000	0.656	AISC- H1-3	4

Figura 5.8 Relaciones máximas de interacción de esfuerzos en elementos secundarios NRF-041-PEMEX-2014 (F.C. = 0.67), revisión 60 - 40

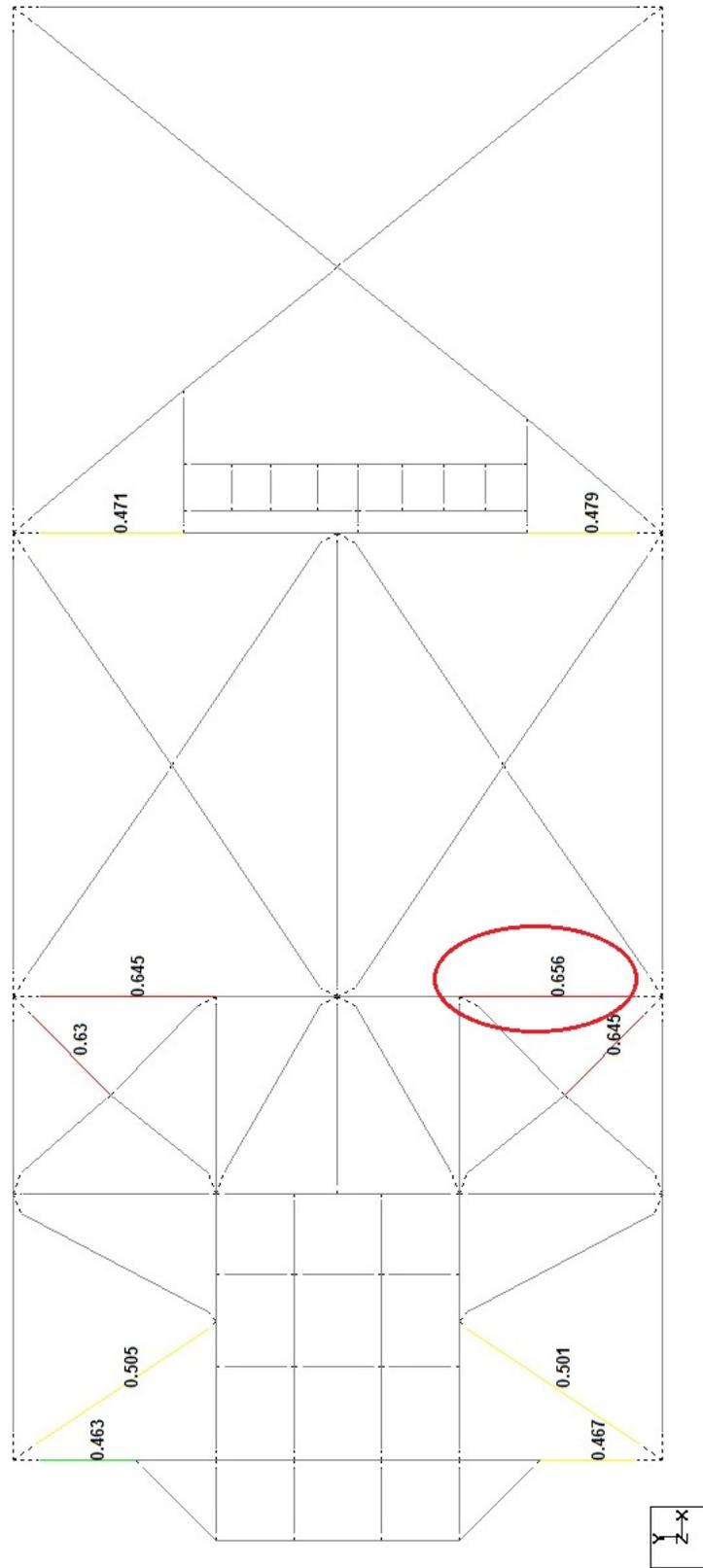
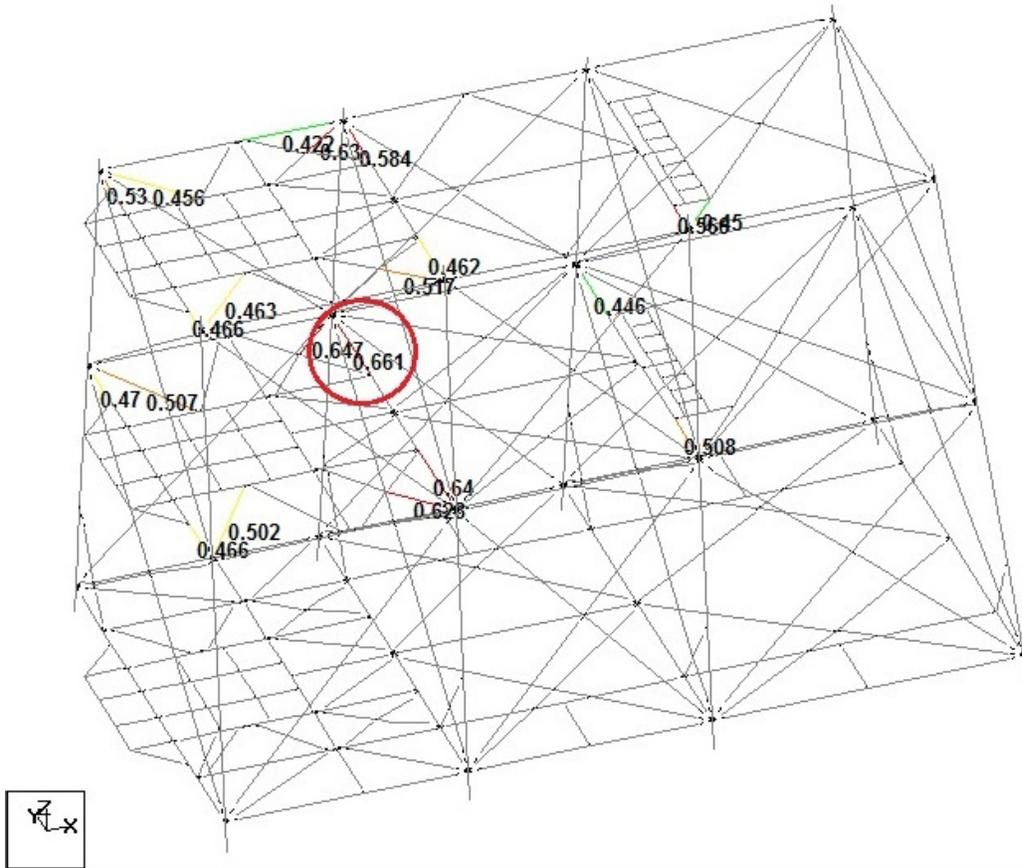


Figura 5.9 Identificación de elemento secundario con el máximo UC, planta de nivel arriostamiento Elev. (-) 6.096 (20' - 0'')



Beam	Analysis Property	Design Property	Actual Ratio	Allowable Ratio	Normalized Ratio (Actual/Allowable)	Clause	L/C
80	PIPE	PIPE	0.354	1.000	0.354	AISC- H1-3	4
316	PIPE	PIPE	0.354	1.000	0.354	AISC- H1-3	4
1374	PIPE	PIPE	0.355	1.000	0.355	AISC- H2-1	4
82	PIPE	PIPE	0.357	1.000	0.357	AISC- H2-1	4
220	PIPE	PIPE	0.369	1.000	0.369	AISC- H1-3	4
801	PIPE	PIPE	0.416	1.000	0.416	AISC- H2-1	4
83	PIPE	PIPE	0.422	1.000	0.422	AISC- H2-1	4
236	PIPE	PIPE	0.446	1.000	0.446	AISC- H1-3	4
219	PIPE	PIPE	0.450	1.000	0.450	AISC- H1-3	4
108	PIPE	PIPE	0.456	1.000	0.456	AISC- H2-1	4
97	PIPE	PIPE	0.462	1.000	0.462	AISC- H1-3	4
104	PIPE	PIPE	0.463	1.000	0.463	AISC- H2-1	4
137	PIPE	PIPE	0.466	1.000	0.466	AISC- H1-3	4
291	PIPE	PIPE	0.466	1.000	0.466	AISC- H1-3	4
290	PIPE	PIPE	0.470	1.000	0.470	AISC- H1-3	4
256	PIPE	PIPE	0.502	1.000	0.502	AISC- H1-3	4
260	PIPE	PIPE	0.507	1.000	0.507	AISC- H1-3	4
237	PIPE	PIPE	0.508	1.000	0.508	AISC- H1-3	4
103	PIPE	PIPE	0.517	1.000	0.517	AISC- H2-1	4
136	PIPE	PIPE	0.530	1.000	0.530	AISC- H1-3	4
217	PIPE	PIPE	0.566	1.000	0.566	AISC- H1-3	4
96	PIPE	PIPE	0.584	1.000	0.584	AISC- H1-3	4
267	PIPE	PIPE	0.628	1.000	0.628	AISC- H1-3	4
102	PIPE	PIPE	0.630	1.000	0.630	AISC- H2-1	4
250	PIPE	PIPE	0.640	1.000	0.640	AISC- H1-3	4
266	PIPE	PIPE	0.647	1.000	0.647	AISC- H1-3	4
249	PIPE	PIPE	0.661	1.000	0.661	AISC- H1-3	4

Figura 5.10 Relaciones máximas de interacción de esfuerzos en elementos secundarios NRF-041-PEMEX-2014 (F.C. = 0.67), revisión 40 – 60

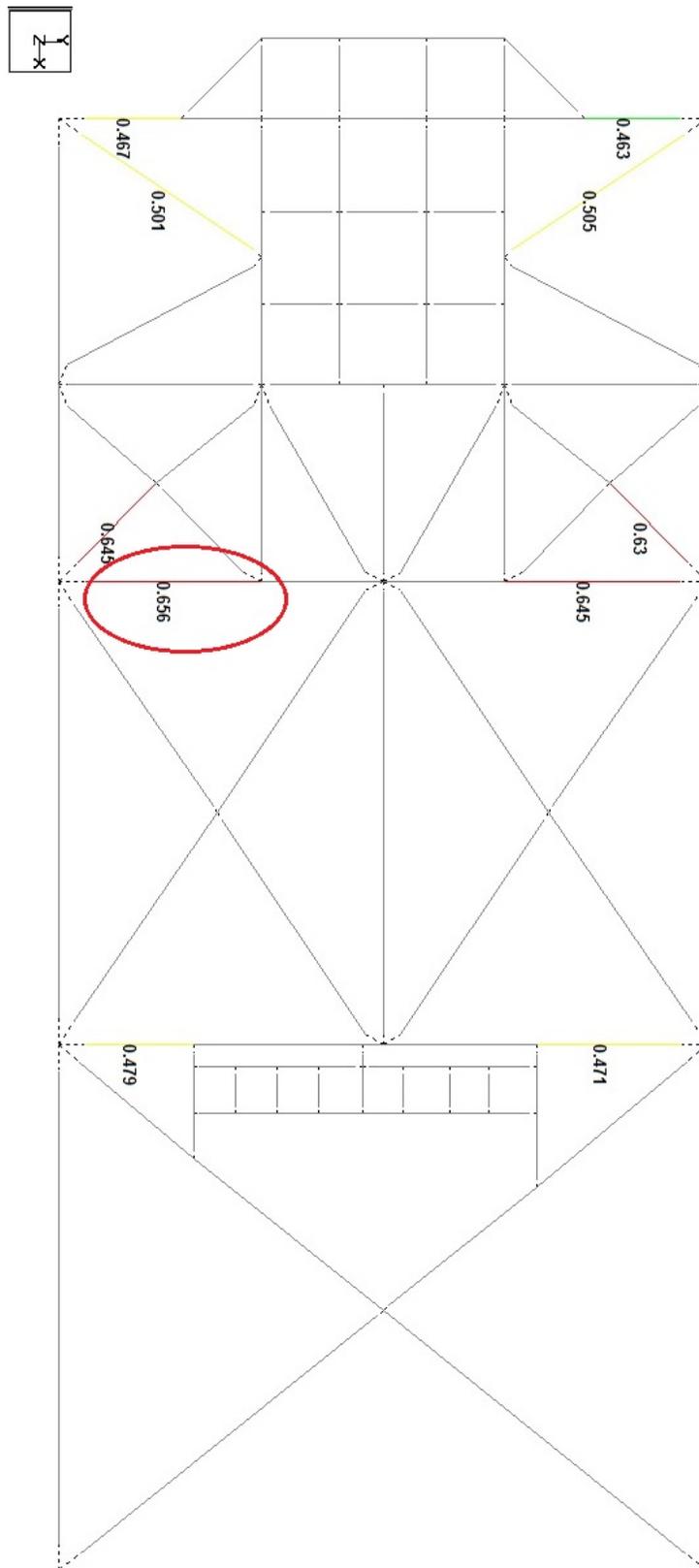
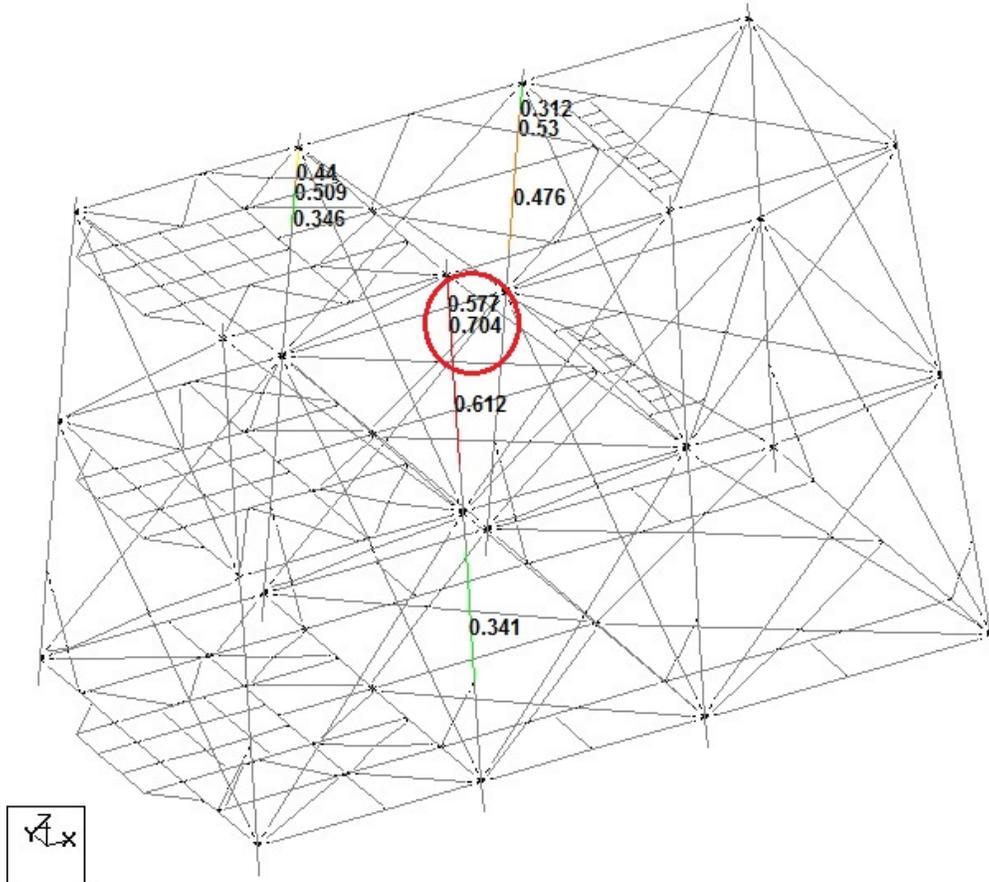


Figura 5.11 Identificación de elemento secundario con el máximo UC, planta de nivel arriostramiento Elev. (-) 6.096 (20' - 0")



Beam	Analysis Property	Design Property	Actual Ratio	Allowable Ratio	Normalized Ratio (Actual/Allowable)	Clause	L/C
1409	PIPE	PIPE	0.144	1.000	0.144	AISC- H2-1	5
30	PIPE	PIPE	0.145	1.000	0.145	AISC- H2-1	5
1399	PIPE	PIPE	0.148	1.000	0.148	AISC- H2-1	5
1318	PIPE	PIPE	0.151	1.000	0.151	AISC- H2-1	5
39	PIPE	PIPE	0.153	1.000	0.153	AISC- H2-1	5
1405	PIPE	PIPE	0.171	1.000	0.171	AISC- H2-1	5
37	PIPE	PIPE	0.191	1.000	0.191	AISC- H2-1	5
1400	PIPE	PIPE	0.191	1.000	0.191	AISC- H2-1	5
49	PIPE	PIPE	0.193	1.000	0.193	AISC- H2-1	5
31	PIPE	PIPE	0.199	1.000	0.199	AISC- H2-1	5
24	PIPE	PIPE	0.218	1.000	0.218	AISC- H2-1	5
29	PIPE	PIPE	0.234	1.000	0.234	AISC- H2-1	5
32	PIPE	PIPE	0.235	1.000	0.235	AISC- H2-1	5
1320	PIPE	PIPE	0.253	1.000	0.253	AISC- H2-1	5
1403	PIPE	PIPE	0.264	1.000	0.264	AISC- H2-1	5
11	PIPE	PIPE	0.288	1.000	0.288	AISC- H1-3	5
2	PIPE	PIPE	0.295	1.000	0.295	AISC- H1-3	5
1406	PIPE	PIPE	0.312	1.000	0.312	AISC- H2-1	5
23	PIPE	PIPE	0.341	1.000	0.341	AISC- H2-1	5
34	PIPE	PIPE	0.346	1.000	0.346	AISC- H2-1	5
1397	PIPE	PIPE	0.440	1.000	0.440	AISC- H2-1	5
52	PIPE	PIPE	0.476	1.000	0.476	AISC- H2-1	5
35	PIPE	PIPE	0.509	1.000	0.509	AISC- H2-1	5
53	PIPE	PIPE	0.530	1.000	0.530	AISC- H2-1	5
1398	PIPE	PIPE	0.577	1.000	0.577	AISC- H2-1	5
25	PIPE	PIPE	0.612	1.000	0.612	AISC- H2-1	5
26	PIPE	PIPE	0.704	1.000	0.704	AISC- H2-1	5

Figura 5.12 Relaciones máximas de interacción de esfuerzos en elementos principales NRF-041-PEMEX-2014 (F.C. = 1.00), revisión 60 – 40

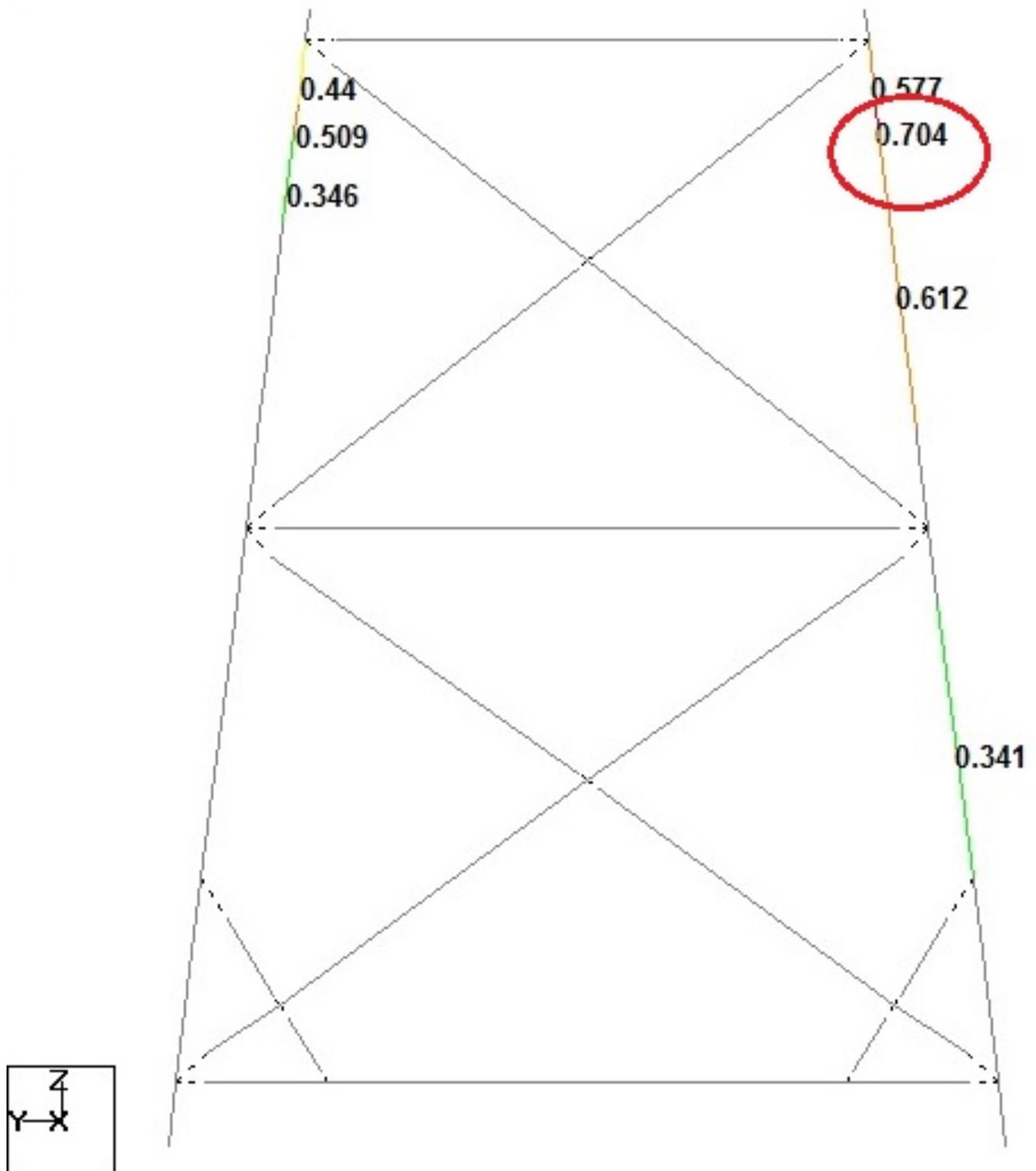
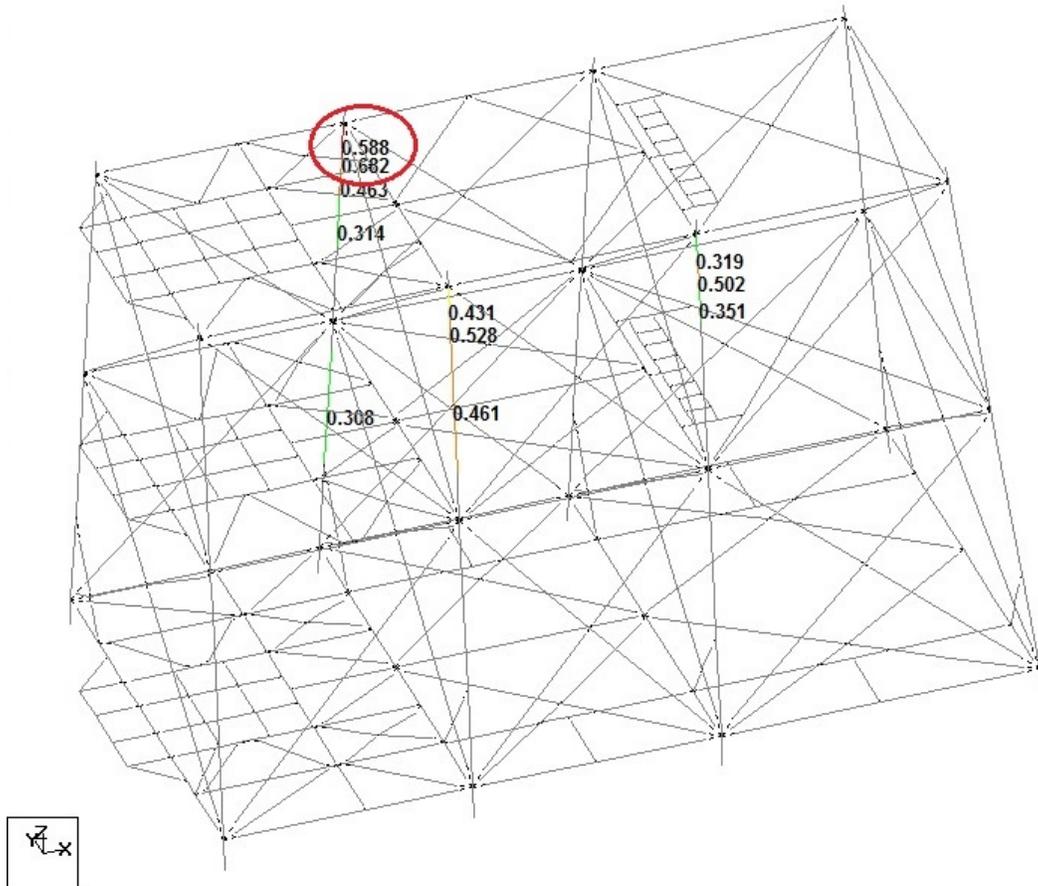
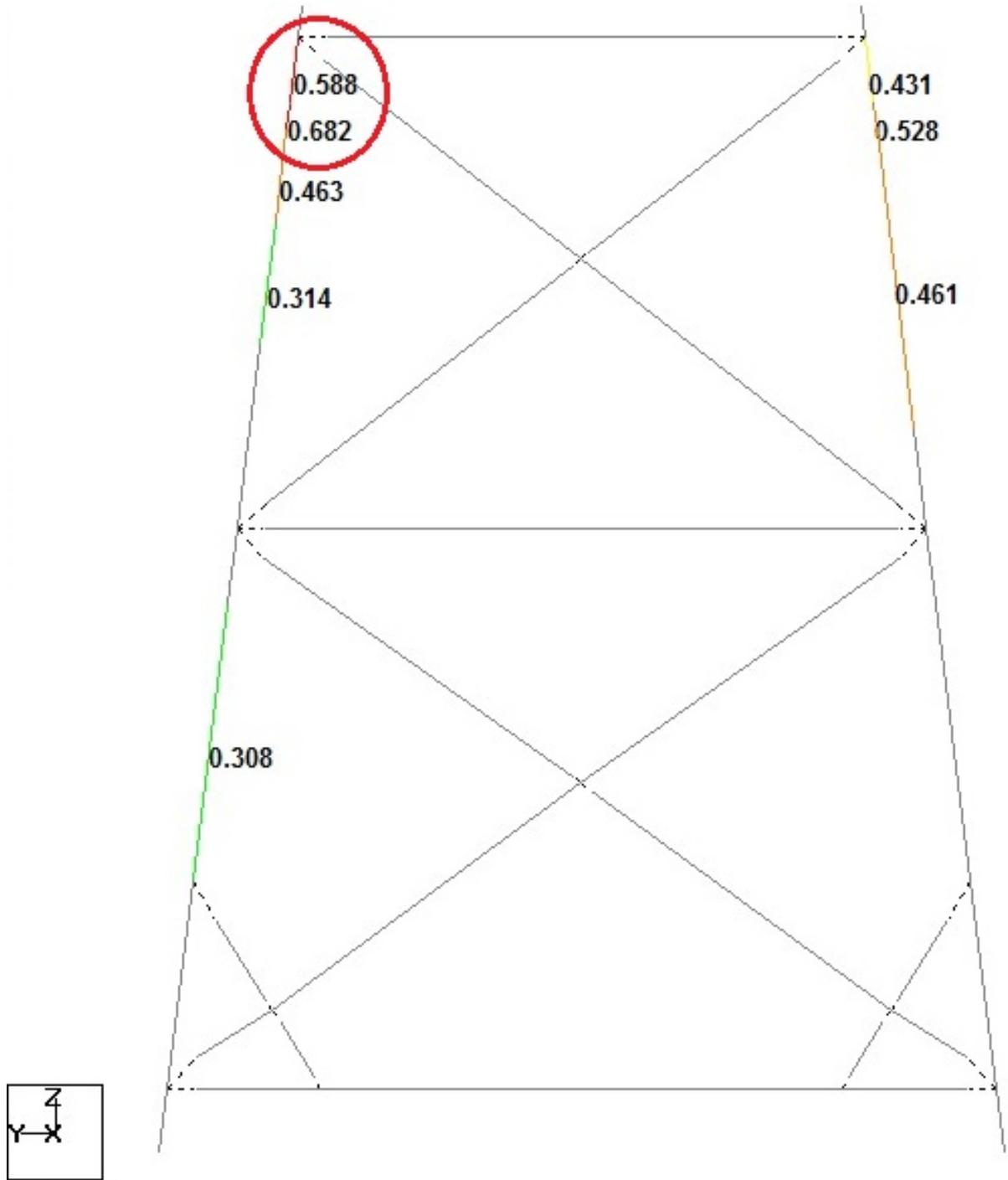


Figura 5.13 Identificación de elemento principal con el máximo UC, elevación del eje 2



Beam	Analysis Property	Design Property	Actual Ratio	Allowable Ratio	Normalized Ratio (Actual/Allowable)	Clause	L/C
24	PIPE	PIPE	0.161	1.000	0.161	AISC- H2-1	7
49	PIPE	PIPE	0.164	1.000	0.164	AISC- H2-1	7
1320	PIPE	PIPE	0.164	1.000	0.164	AISC- H2-1	7
1406	PIPE	PIPE	0.165	1.000	0.165	AISC- H2-1	7
39	PIPE	PIPE	0.180	1.000	0.180	AISC- H2-1	7
1399	PIPE	PIPE	0.185	1.000	0.185	AISC- H2-1	7
30	PIPE	PIPE	0.198	1.000	0.198	AISC- H2-1	7
42	PIPE	PIPE	0.207	1.000	0.207	AISC- H2-1	7
43	PIPE	PIPE	0.224	1.000	0.224	AISC- H2-1	7
1318	PIPE	PIPE	0.231	1.000	0.231	AISC- H2-1	7
31	PIPE	PIPE	0.254	1.000	0.254	AISC- H2-1	7
52	PIPE	PIPE	0.259	1.000	0.259	AISC- H2-1	7
23	PIPE	PIPE	0.262	1.000	0.262	AISC- H2-1	7
53	PIPE	PIPE	0.282	1.000	0.282	AISC- H2-1	7
11	PIPE	PIPE	0.290	1.000	0.290	AISC- H1-3	7
2	PIPE	PIPE	0.291	1.000	0.291	AISC- H1-3	7
29	PIPE	PIPE	0.308	1.000	0.308	AISC- H2-1	7
32	PIPE	PIPE	0.314	1.000	0.314	AISC- H2-1	7
1405	PIPE	PIPE	0.319	1.000	0.319	AISC- H2-1	7
37	PIPE	PIPE	0.351	1.000	0.351	AISC- H2-1	7
1398	PIPE	PIPE	0.431	1.000	0.431	AISC- H2-1	7
25	PIPE	PIPE	0.461	1.000	0.461	AISC- H2-1	7
34	PIPE	PIPE	0.463	1.000	0.463	AISC- H2-1	7
1403	PIPE	PIPE	0.502	1.000	0.502	AISC- H2-1	7
26	PIPE	PIPE	0.528	1.000	0.528	AISC- H2-1	7
1397	PIPE	PIPE	0.588	1.000	0.588	AISC- H2-1	7
35	PIPE	PIPE	0.682	1.000	0.682	AISC- H2-1	7

Figura 5.14 Relaciones máximas de interacción de esfuerzos en elementos principales NRF-041-PEMEX-2014 (F.C. = 1.00), revisión 40 – 60



**Figura 5.15** Identificación de elemento principal con el máximo UC, elevación del eje 2

A continuación se presenta un resumen con las relaciones máximas de interacción de esfuerzos en juntas que integran la estructura analizada. Cabe mencionar que los siguientes resultados corresponden al análisis estructural bajo la combinación de carga más desfavorable (número cinco), en la que se considera un factor de carga igual a 2.2, bajo esta condición se revisarán todas las juntas de la estructura.

STAAD.Pro - API JOINT CHECKS TO 21st edition.

(Includes Supplements 1-3)

NODE	NO:	491	CHORD	NO:	36	BRACE	NO:	96	RATIO:	0.991	PASS
NODE	NO:	255	CHORD	NO:	27	BRACE	NO:	97	RATIO:	0.953	PASS
NODE	NO:	110	CHORD	NO:	3	BRACE	NO:	291	RATIO:	0.909	PASS
NODE	NO:	109	CHORD	NO:	1392	BRACE	NO:	290	RATIO:	0.903	PASS
NODE	NO:	134	CHORD	NO:	282	BRACE	NO:	277	RATIO:	0.868	PASS
NODE	NO:	122	CHORD	NO:	278	BRACE	NO:	277	RATIO:	0.866	PASS
NODE	NO:	254	CHORD	NO:	9	BRACE	NO:	137	RATIO:	0.851	PASS
NODE	NO:	134	CHORD	NO:	282	BRACE	NO:	283	RATIO:	0.837	PASS
NODE	NO:	122	CHORD	NO:	278	BRACE	NO:	276	RATIO:	0.836	PASS
NODE	NO:	152	CHORD	NO:	285	BRACE	NO:	281	RATIO:	0.781	PASS
NODE	NO:	128	CHORD	NO:	279	BRACE	NO:	281	RATIO:	0.78	PASS
NODE	NO:	253	CHORD	NO:	21	BRACE	NO:	136	RATIO:	0.737	PASS
NODE	NO:	128	CHORD	NO:	279	BRACE	NO:	280	RATIO:	0.723	PASS
NODE	NO:	152	CHORD	NO:	285	BRACE	NO:	287	RATIO:	0.723	PASS
NODE	NO:	496	CHORD	NO:	126	BRACE	NO:	125	RATIO:	0.684	PASS
NODE	NO:	508	CHORD	NO:	130	BRACE	NO:	125	RATIO:	0.68	PASS
NODE	NO:	496	CHORD	NO:	126	BRACE	NO:	124	RATIO:	0.653	PASS
NODE	NO:	508	CHORD	NO:	130	BRACE	NO:	131	RATIO:	0.651	PASS
NODE	NO:	502	CHORD	NO:	127	BRACE	NO:	129	RATIO:	0.554	PASS
NODE	NO:	62	CHORD	NO:	390	BRACE	NO:	393	RATIO:	0.547	PASS
NODE	NO:	51	CHORD	NO:	388	BRACE	NO:	393	RATIO:	0.547	PASS
NODE	NO:	526	CHORD	NO:	133	BRACE	NO:	129	RATIO:	0.546	PASS
NODE	NO:	51	CHORD	NO:	388	BRACE	NO:	387	RATIO:	0.538	PASS
NODE	NO:	62	CHORD	NO:	390	BRACE	NO:	395	RATIO:	0.537	PASS
NODE	NO:	915	CHORD	NO:	170	BRACE	NO:	172	RATIO:	0.526	PASS
NODE	NO:	502	CHORD	NO:	127	BRACE	NO:	128	RATIO:	0.499	PASS
NODE	NO:	53	CHORD	NO:	389	BRACE	NO:	392	RATIO:	0.494	PASS
NODE	NO:	77	CHORD	NO:	396	BRACE	NO:	392	RATIO:	0.494	PASS
NODE	NO:	526	CHORD	NO:	133	BRACE	NO:	135	RATIO:	0.493	PASS
NODE	NO:	473	CHORD	NO:	18	BRACE	NO:	732	RATIO:	0.481	PASS
NODE	NO:	53	CHORD	NO:	389	BRACE	NO:	391	RATIO:	0.479	PASS
NODE	NO:	77	CHORD	NO:	396	BRACE	NO:	398	RATIO:	0.479	PASS
NODE	NO:	268	CHORD	NO:	31	BRACE	NO:	713	RATIO:	0.476	PASS
NODE	NO:	939	CHORD	NO:	192	BRACE	NO:	194	RATIO:	0.458	PASS
NODE	NO:	209	CHORD	NO:	32	BRACE	NO:	706	RATIO:	0.458	PASS
NODE	NO:	267	CHORD	NO:	15	BRACE	NO:	720	RATIO:	0.446	PASS
NODE	NO:	210	CHORD	NO:	43	BRACE	NO:	707	RATIO:	0.443	PASS
NODE	NO:	604	CHORD	NO:	25	BRACE	NO:	670	RATIO:	0.432	PASS
NODE	NO:	915	CHORD	NO:	170	BRACE	NO:	168	RATIO:	0.426	PASS
NODE	NO:	112	CHORD	NO:	24	BRACE	NO:	267	RATIO:	0.423	PASS
NODE	NO:	111	CHORD	NO:	30	BRACE	NO:	266	RATIO:	0.42	PASS

### 5.5 Soldaduras recomendadas para los puntos de izaje

La norma NRF-041-PEMEX-2014 indica que las orejas de izaje se deben diseñar con soldaduras principales de preferencia para esfuerzos de cizalla o corte y no para esfuerzos por tensión. La placa principal de las orejas de izaje se debe soldar a los elementos principales de la estructura. Por lo cual se utilizan soldaduras de penetración completa para la fabricación de orejas y muñones, siempre que es posible. A continuación se presenta una breve explicación de las soldaduras más empleadas en la fabricación de plataformas marinas.

Además de unir elementos metálicos para conformar a las estructuras, las soldaduras cumplen otra función que es la de sellar los intersticios que puedan quedar entre las uniones de los elementos para evitar que la humedad penetre ahí y de ese modo evitar la corrosión. Por lo cual, en las estructuras costa afuera se debe evitar las soldaduras de cordón intermitente.

### Simbología de soldadura

La figura 5.16 muestra los elementos con que se conforma los símbolos de soldadura.

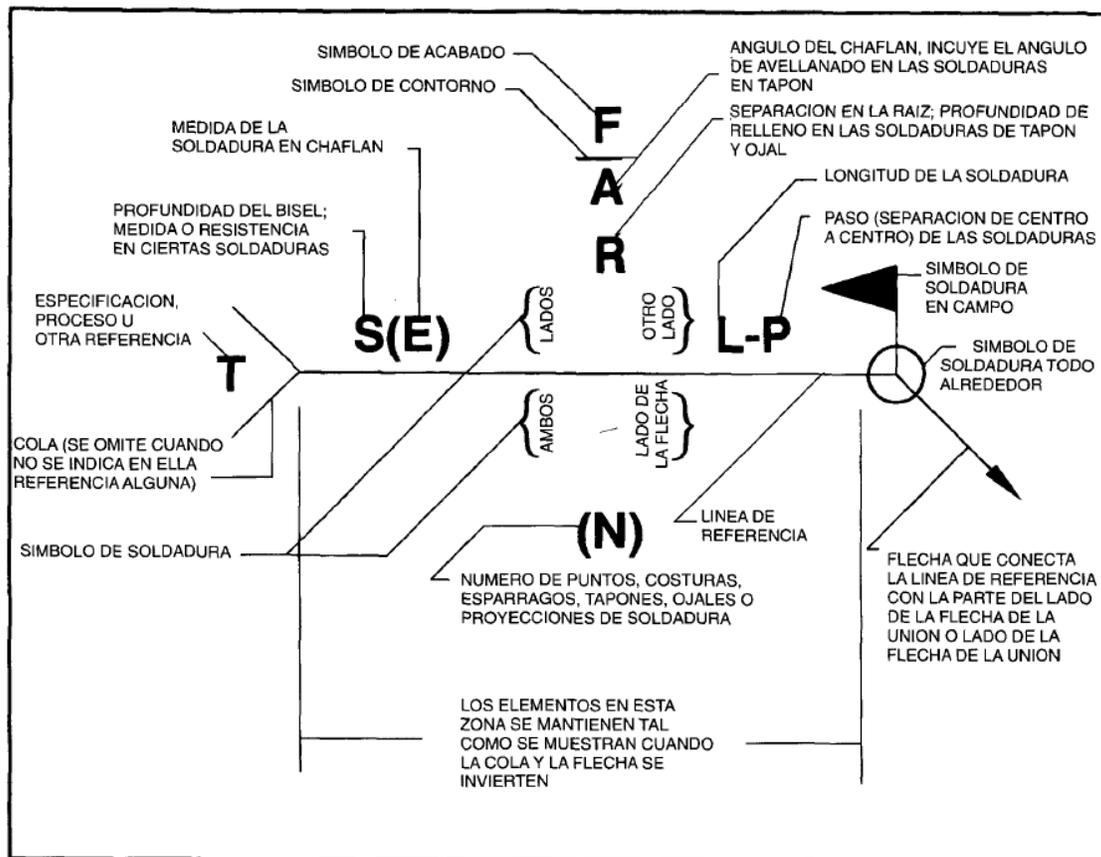


Figura 5.16 Situación normalizada de los elementos de un símbolo de soldadura

Se utiliza un quiebre como el indicado en la figura 5.17, en A o B para indicar que la flecha señala al elemento de la junta que debe prepararse con algún tipo de bisel.

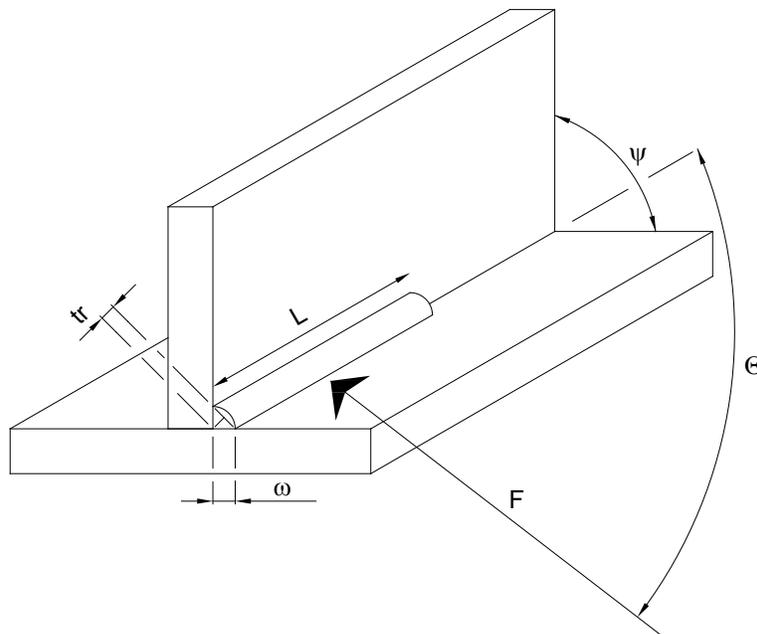


**Figura 5.17** Quiebre para indicar a la placa que recibe tratamiento

El manual de soldadura editado por la Sociedad Americana de Soldadura (AWS por sus siglas en inglés, American Welding Society) acepta cuatro procesos de soldadura como precalificados. Lo cual significa que estos son aceptables sin necesidad de pruebas posteriores sobre su educabilidad por medio de procedimientos de calificación. Pueden encontrarse en el apartado 1.3.1 del A.W.S. y son:

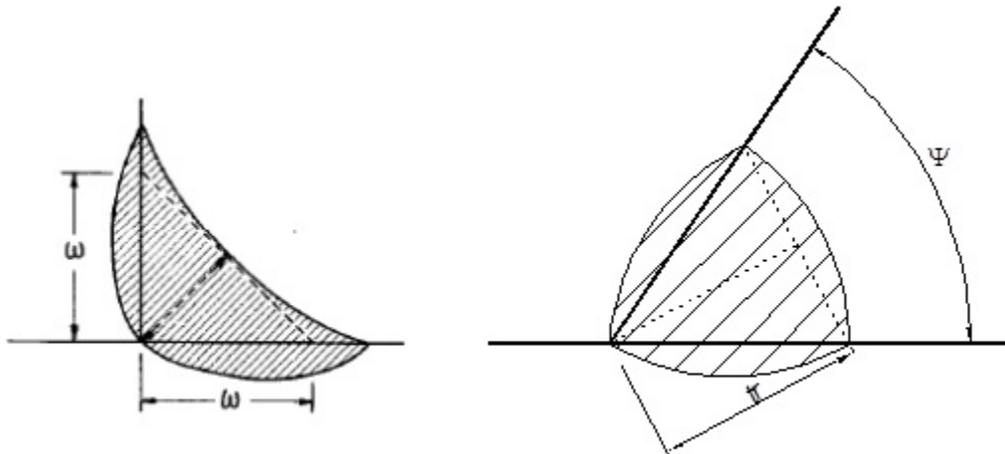
1. Soldadura por arco metálico protegido (SMAW). Es el proceso más común, usado para soldadura manual, mientras que los demás son usualmente automáticos o semiautomáticos.
2. Soldadura por arco sumergido (SAW).
3. Soldadura de arco metálico con gas (GMAW).
4. Soldadura de arco con núcleo fundente (FCAW).

Soldadura de filete (o chaflán):



**Figura 5.18** Soldadura de filete

Para uniones “T” entre placas que formen ángulos ( $\Psi$ ) entre  $80^\circ$  y  $100^\circ$  entre sí, se deberá especificar el tamaño de la soldadura ( $\omega$ ). Para uniones entre placas que formen ángulos ( $\Psi$ ) menores a  $80^\circ$  y mayores de  $100^\circ$  se deberá especificar la garganta efectiva ( $tr$ ). En la figura 5.19 se muestran con más detalle el tamaño  $\omega$  y la garganta  $tr$  de la soldadura.



**Figura 5.19 Sección transversal de filete**

( $\omega$ ) ó (E): Tamaño o pie de soldadura.

( $tr$ ): Garganta efectiva.

( $\Psi$ ): Ángulo entre placas unidas con soldadura de filete.

### Longitud del cordón de Soldadura de filete

La longitud efectiva ( $L$ ) para calcular la resistencia de la soldadura de filete debe medirse sobre el cordón, en la línea central de la garganta efectiva.

La longitud mínima de soldadura de filete debe ser mayor a cuatro veces el tamaño efectivo de la soldadura ( $tr$ ); si no es posible cumplir esta restricción, se debe verificar que el tamaño efectivo de la soldadura no exceda el 25% de la longitud efectiva del cordón. Para segmentos de una soldadura intermitente, la longitud mínima deberá ser de 1.5” (38 mm). Cabe mencionar que en estructuras costa afuera no se utilizan este tipo de soldaduras intermitentes ya que se pretende sellar todas las uniones para evitar la corrosión por la humedad que pueda quedar impregnada en las juntas.

La longitud máxima que se debe considerar para el cálculo de resistencia de la soldadura de filete, cargada en un extremo, depende de los siguientes casos:

- a) Si la longitud del cordón es menor a 100 veces el tamaño ( $\omega$ ) de la soldadura, se puede considerar el tamaño real del cordón sin afectarlo por ningún factor de reducción.
- b) Si la longitud del cordón es mayor a 100 veces el tamaño ( $\omega$ ) de la soldadura pero menor a 300 veces ( $\omega$ ), la longitud del cordón debe reducirse con el factor que resulte de la siguiente ecuación:

$$\beta = 1.2 - 0.2 \left( \frac{L}{100w} \right) \leq 1.0$$

Donde:

B = Coeficiente de reducción.

L = Longitud efectiva de soldadura cargada en un extremo, in [mm].

W = tamaño o pie de soldadura, in [mm].

- c) Si la longitud del cordón es mayor de 300 veces el tamaño ( $\omega$ ) de la soldadura, para el cálculo de resistencia de la soldadura, se debe considerar una longitud igual a 180 veces ( $\omega$ ).

### Cálculo de la garganta efectiva

Para uniones tipo “T” entre placas que formen entre sí un ángulo ( $\Psi$ ) entre  $80^\circ$  y  $100^\circ$ , la garganta efectiva ( $t_r$ ) deberá considerarse como la distancia mínima entre la raíz de la unión y la cara de la soldadura diagramática de  $90^\circ$  (triángulo inscrito en la sección transversal de la soldadura). Para uniones con ángulos entre  $60^\circ$  y  $80^\circ$ , y ángulos mayores a  $100^\circ$  el tamaño de pie de la soldadura ( $E$  ó  $\omega$ ) requerido que proporcione la garganta efectiva especificada deberá calcularse de acuerdo a la geometría. Para uniones con ángulos entre  $30^\circ$  y  $60^\circ$  el pie de soldadura deberá incrementarse por la  $Z$  perdida considerando que hay incertidumbre en cuanto a que la soldadura entre en un surco tan estrecho en la raíz de la unión. Para soldaduras hechas con el proceso de arco metálico protegido (SMAW) se deberán considerar los siguientes incrementos; para soldaduras hechas con otro tipo de procesos consultar la tabla 2.2 del AWS:

$$30^\circ \leq \Psi < 45^\circ \quad Z = 1/4 \text{ in (6 mm)}$$

$$45^\circ \leq \Psi < 60^\circ \quad Z = 1/8 \text{ in (3 mm)}$$

Las soldaduras de filete depositadas en ángulos agudos menores a  $30^\circ$  no deberán considerarse como efectivas para transmitir las cargas aplicadas, excepto las modificadas en elementos tubulares indicadas en la sección 4.12.4.2 del AWS.

Tamaño mínimo de soldadura

El tamaño ( $\omega$  ó E) mínimo para la soldadura de filete no deberá ser menor que el requerido para transmitir las cargas aplicadas ni menor a los indicados en la siguiente tabla, de acuerdo al espesor del metal base.

Tabla 5.1 Tamaño mínimo de soldadura de filete, según la tabla J.24 del AWS.

<b>TABLE J2.4 Minimum Size of Fillet Welds</b>	
Material Thickness of Thinner Part Joined, in. (mm)	Minimum Size of Fillet Weld, <sup>[a]</sup> in. (mm)
To 1/4 (6) inclusive	1/8 (3)
Over 1/4 (6) to 1/2 (13)	3/16 (5)
Over 1/2 (13) to 3/4 (19)	1/4 (6)
Over 3/4 (19)	5/16 (8)

<sup>[a]</sup> Leg dimension of fillet welds. Single pass welds must be used.  
Note: See Section J2.2b for maximum size of fillet welds.

Tamaño máximo de soldadura de filete

El máximo tamaño de soldadura de filete (E ó  $\omega$ ) a lo largo de los bordes de placas unidas o traslapadas deberá ser:

- a) Igual al espesor de la placa del metal base cuando este sea menor de 1/4 in (6 mm); y
- b) 1/16 in (2 mm) menor que el espesor de la placa del metal base cuando el espesor de la placa sea igual o mayor de 1/4 in (6 mm).

En la figura 5.20 se presentan las uniones de traslape típicas entre dos placas (elevación).

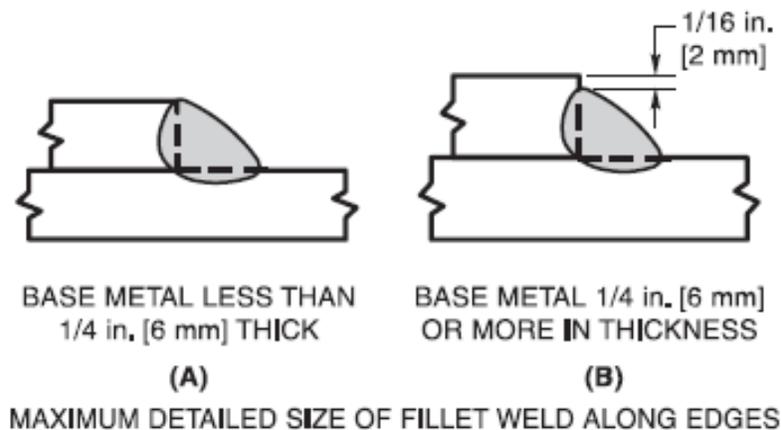


Figura 5.20 Tamaño máximo de soldadura de filete a lo largo de los bordes en juntas de traslape

Cuando los parámetros técnicos y de seguridad se han satisfecho, se puede utilizar parámetros de costo para elegir un tipo de soldadura óptimo en la fabricación de las estructuras. La figura 5.21 muestra una comparativa de costos con diferentes tipos de soldadura.

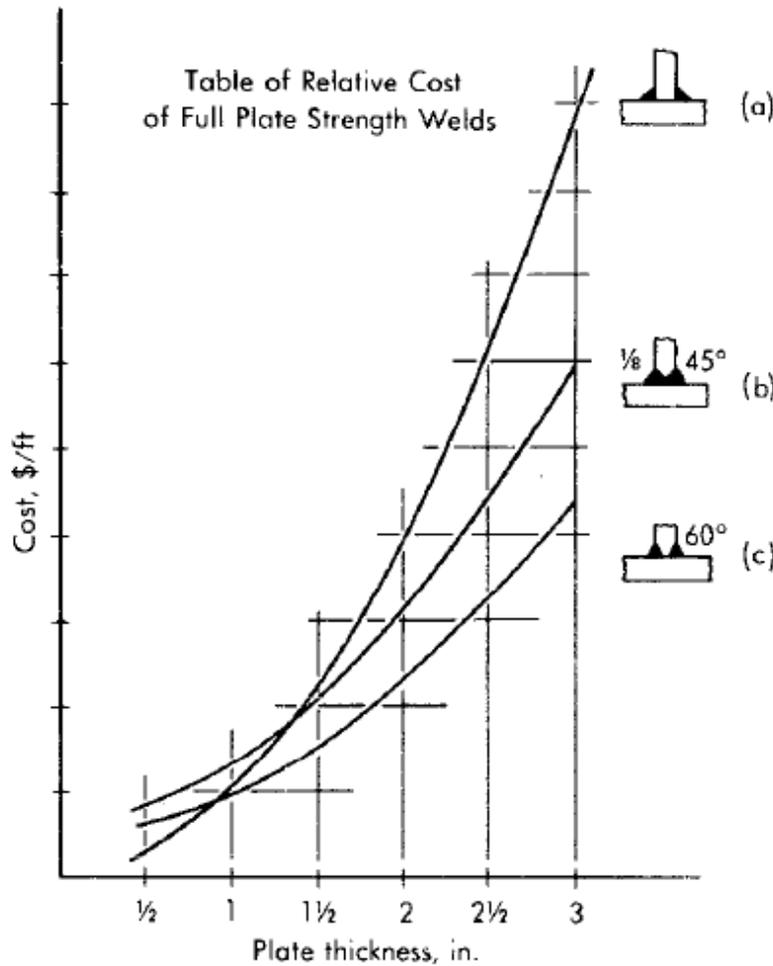


Figura 5.21 Costos relativos de soldadura de acuerdo al espesor de las placas unidas

### Área efectiva para soldadura de filete

Deberá ser aquella que resulte de multiplicar la longitud efectiva del cordón de soldadura por la garganta efectiva.  $A_w = L \times tr$

Donde:

$A_w$ : Área efectiva para el cálculo de resistencia de una soldadura.

L: Longitud efectiva del cordón de soldadura.

tr: Garganta efectiva.

Soldaduras de penetración

Simbología para soldaduras de penetración

El símbolo de soldadura sin dimensiones y con las siglas CJP en el extremo (en la cola de referencias), designa a una soldadura de penetración completa como se muestra en la figura 5.22:

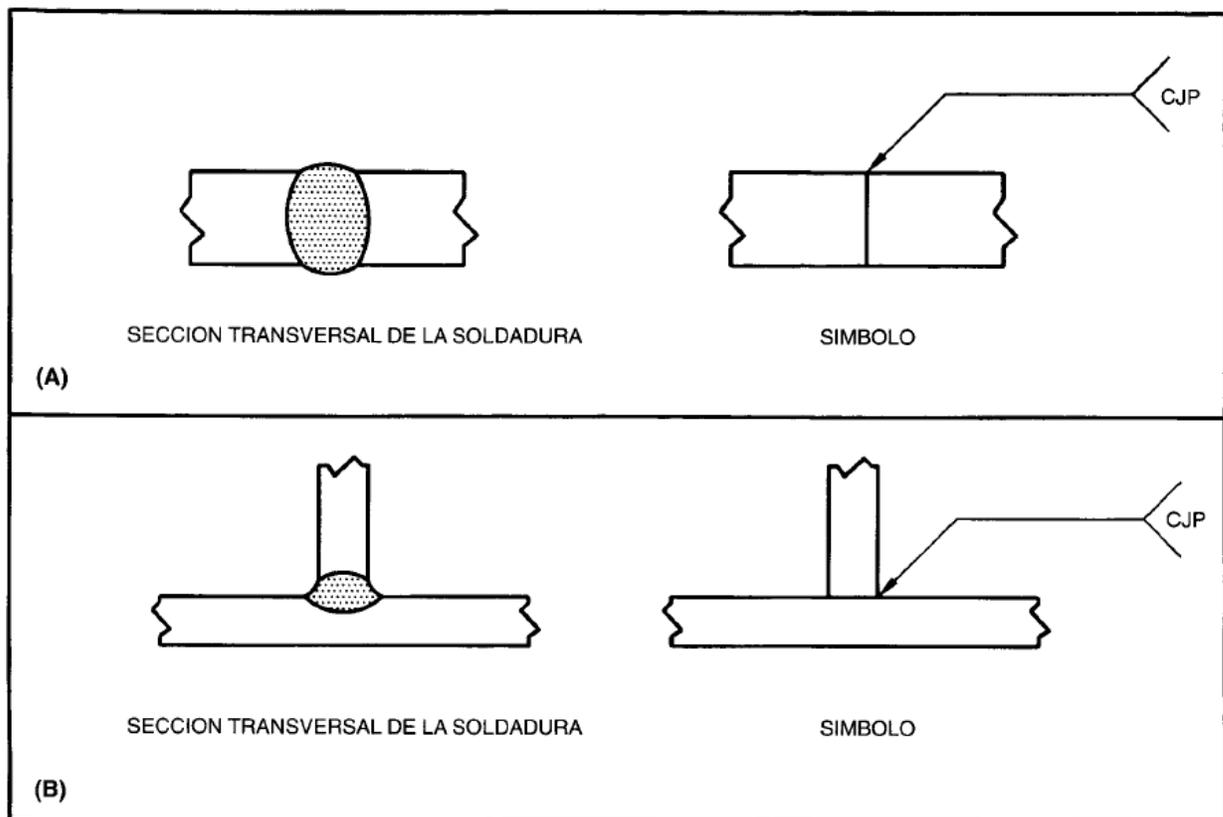


Figura 5.22 Penetración completa con geometría de la unión opcional

CJP: Soldadura de penetración completa (siglas en inglés, Complete Joint Penetration).

El símbolo para soldadura de penetración parcial deberá mostrar el tamaño de la soldadura encerrado entre paréntesis, tanto el tamaño del lado que indica la flecha de referencia como el otro lado, si fuera el caso, como se muestra a continuación, en la figura 5.23

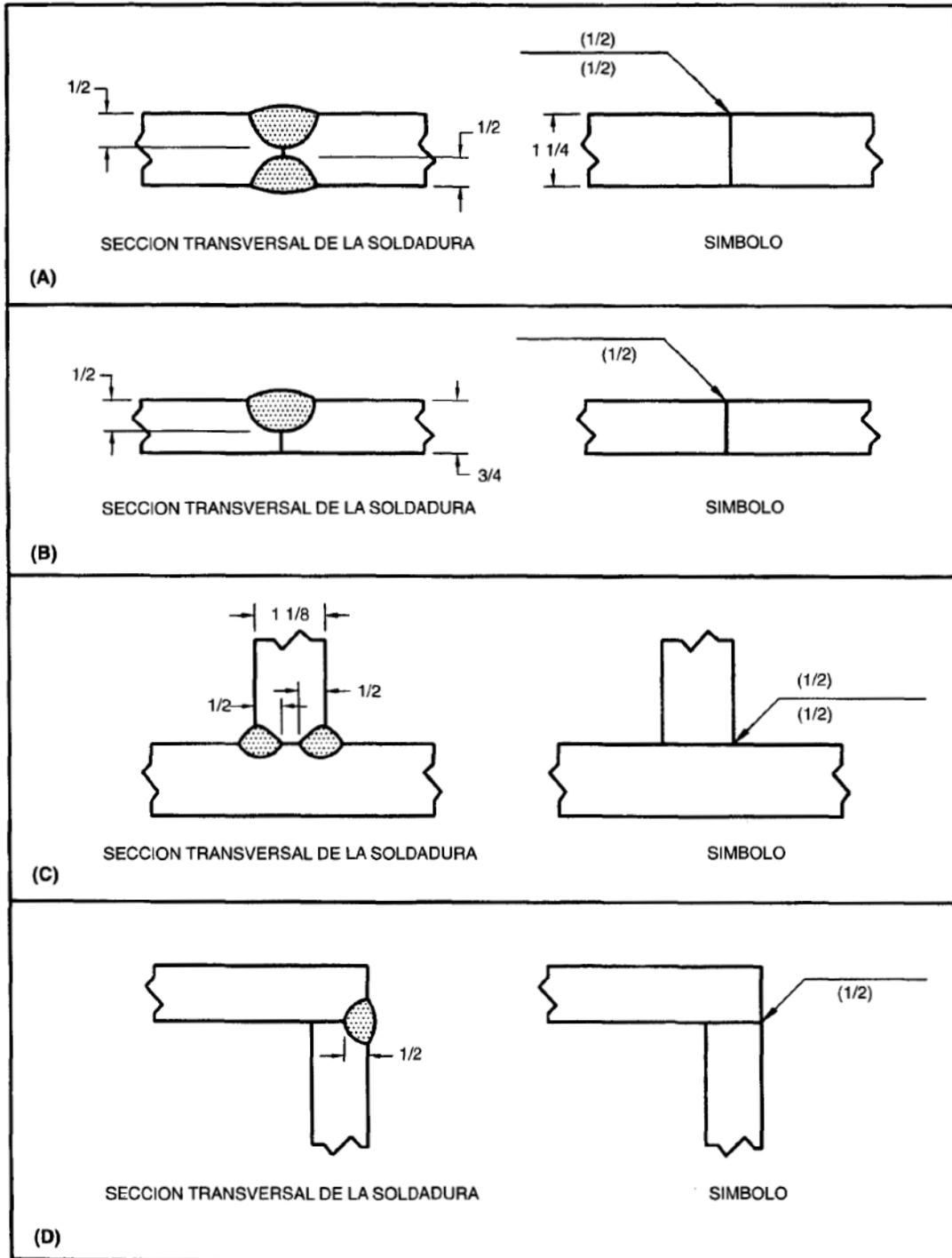


Figura 5.23 Penetración parcial con geometría de la unión opcional

De manera más frecuente, se utiliza la siguiente simbología de las figuras 5.24 a la 5.27

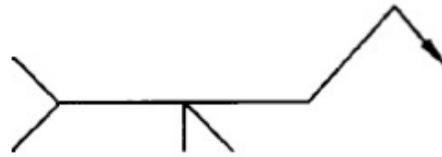


Figura 5.24 Soldadura de penetración parcial con bisel

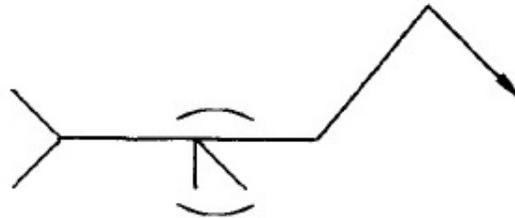


Figura 5.25 Soldadura de penetración completa con bisel

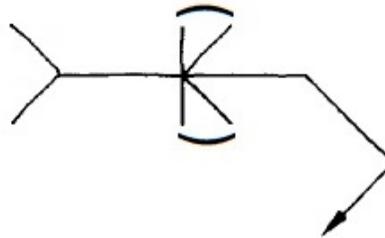


Figura 5.26 Soldadura de penetración parcial con bisel doble

Las flechas deben señalar el borde de la placa que se va a biselar:

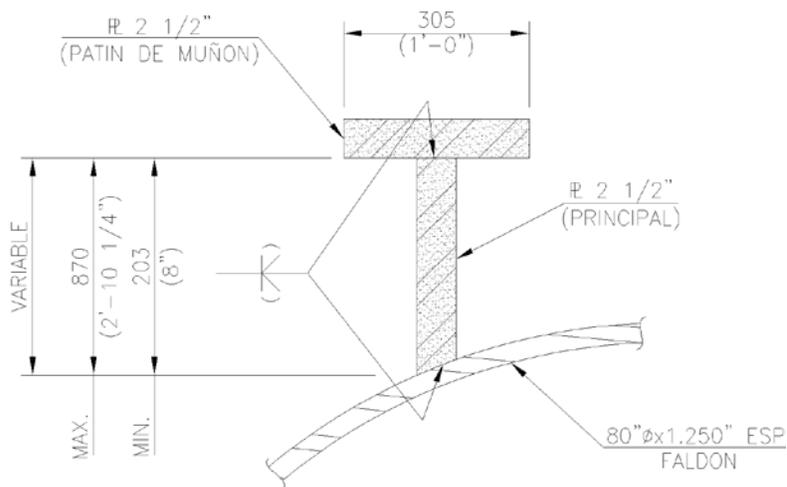
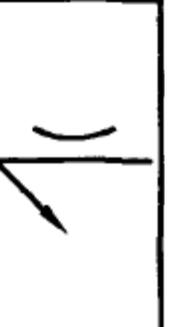


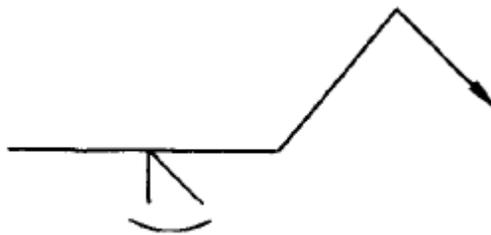
Figura 5.27 Croquis de aplicación de soldadura de bisel doble

El AWS indica que los símbolos de contorno (parecidos a un paréntesis) se utilizan para indicar soldaduras a realizar con superficies aproximadamente a paño, cóncavas o convexas sin emplear acabados mecánicos posteriores; en la figura 5.28 se indican dichos significados. Sin embargo, le damos un segundo uso para diferenciar la soldadura de penetración completa de la penetración parcial, como se ilustra en las imágenes anteriores.

CONTORNO		
A PAÑO O PLANO	CONVEXO	CONCAVO
		

**Figura 5.28 Símbolos de contorno**

Cabe mencionar que no es muy común la utilización del símbolo ilustrado a continuación (figura 5.29) sino que se utiliza sin el símbolo de contorno, a pesar de que es aceptado según el AWS.



**FIGURA 5.29 Soldadura de penetración parcial con bisel y acabado convexo mediante soldeo (según las recomendaciones del AWS)**

Contornos obtenidos mediante acabados

El AWS recomienda que las soldaduras acabadas mecánicamente con contornos aproximados a paño, planos, convexos o cóncavos se especifiquen añadiendo el símbolo de contorno y la sigla que especifica el método de acabado. Se recomiendan las siglas indicadas en la tabla 5.2 para los diferentes métodos:

Tabla 5.2 Acabados de soldadura.

SIGLA	MÉTODO MECÁNICO
C	CINCELADO
G	ESMERILADO
H	MARTILLADO
M	MECANIZADO
R	LAMINADO

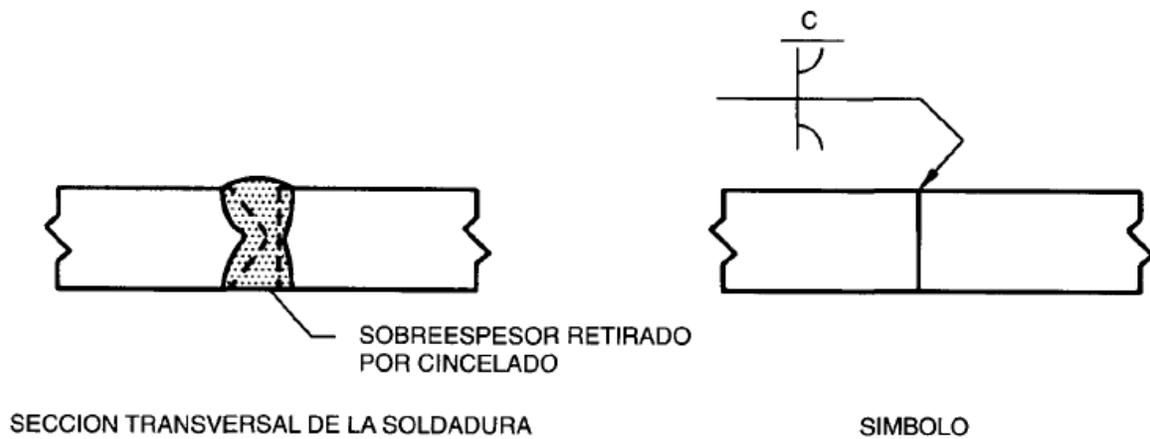


Figura 5.30 Símbolos de contorno a paño por el otro lado (ejemplo de símbolo recomendado por el AWS)

Regularmente, en vez de siglas, utilizamos la cola de referencias para especificar el método mecánico, combinado con el símbolo de contorno, como ilustra la figura 5.31

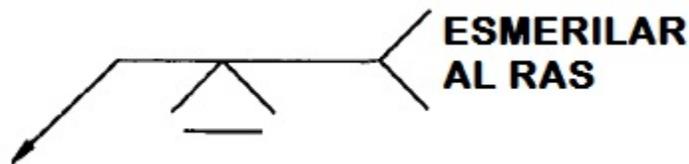
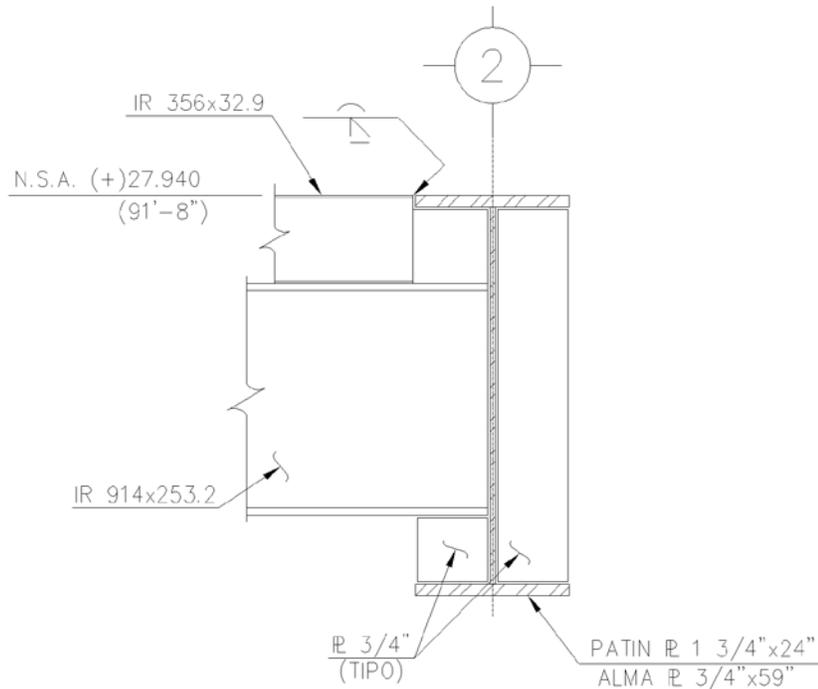


Figura 5.31 Símbolos de contorno a paño por el otro lado (ejemplo de símbolo usado regularmente)

O únicamente los símbolos de contorno, como los que se encuentran en la parte superior de la figura 5.32:



**Figura 5.32 Soldadura de penetración completa con bisel, y acabado enrasado plano del lado superior del patín y contorno convexo del otro lado**

Área efectiva para soldaduras de penetración

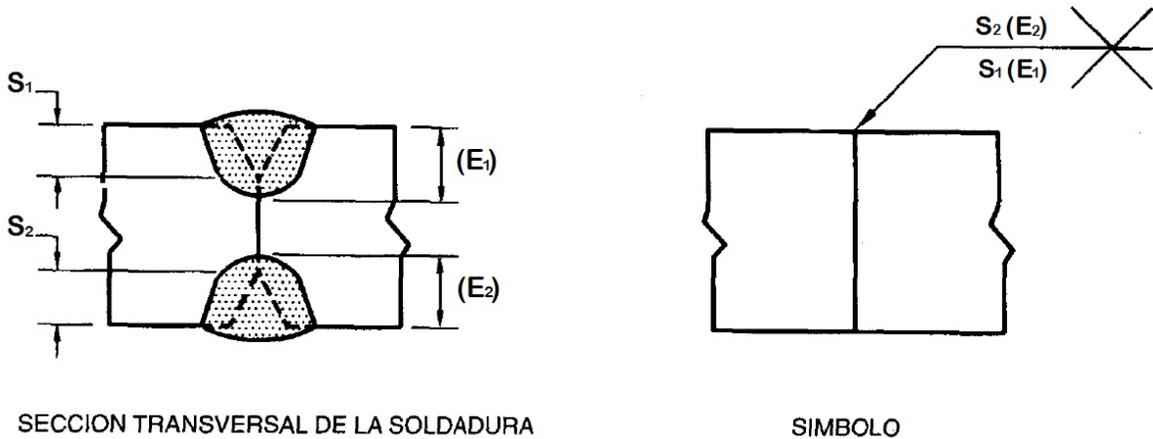
El área efectiva ( $A_w$ ) para el cálculo de resistencia de una soldadura de penetración deberá considerar la longitud de la soldadura al mismo tiempo que el espesor garganta efectiva de la soldadura.

El espesor de la garganta efectiva ( $t_r$ ) para una soldadura de penetración completa (CJP, por sus siglas en inglés) deberá ser el menor espesor de las placas unidas.

El tamaño de la garganta efectiva ( $t_r$ ) para una soldadura de penetración parcial (PJP, por sus siglas en inglés) depende del tipo de proceso y de la posición en que se realice la soldadura en base a lo indicado en la tabla 5.3:

**Tabla 5.3 Tamaño de garganta efectiva de soldadura de penetración parcial, de acuerdo a la tabla J2.1 del AWS**

<b>TABLE J2.1 Effective Throat of Partial-Joint-Penetration Groove Welds</b>			
Welding Process	Welding Position F (flat), H (horiz.), V (vert.), OH (overhead)	Groove Type (AWS D1.1, Figure 3.3)	Effective Throat
Shielded Metal Arc (SMAW)	All	J or U Groove 60° V	Depth of Groove
Gas Metal Arc (GMAW) Flux Cored Arc (FCAW)	All		
Submerged Arc (SAW)	F	J or U Groove 60° Bevel or V	
Gas Metal Arc (GMAW) Flux Cored Arc (FCAW)	F, H	45° Bevel	Depth of Groove
Shielded Metal Arc (SMAW)	All	45° Bevel	Depth of Groove Minus 1/8 in. (3 mm)
Gas Metal Arc (GMAW) Flux Cored Arc (FCAW)	V, OH	45° Bevel	Depth of Groove Minus 1/8 in. (3 mm)



SECCION TRANSVERSAL DE LA SOLDADURA

SIMBOLO

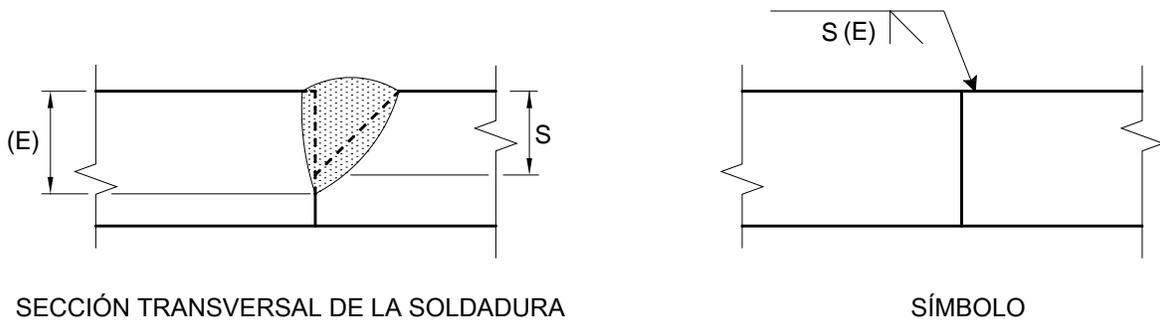
**Figura 5.33 Ejemplo de soldadura de penetración parcial con bisel en “V”**

(E): Tamaño de la soldadura.

(S): Profundidad de las ranuras (Depth of Groove).

Para este caso, de acuerdo con la tabla 5.3 (tabla J2.1 del AWS), el tamaño de la garganta efectiva será igual a la profundidad de la ranura o bisel.

$$tr = S$$



SECCION TRANSVERSAL DE LA SOLDADURA

SÍMBOLO

**Figura 5.34 Ejemplo de soldadura de penetración parcial con bisel a 45°**

Para este caso, de acuerdo con la tabla J2.1 del AWS, el tamaño de la garganta efectiva será igual a la profundidad de la ranura o bisel MENOS 1/8 de pulgada (3 mm).

$$tr = S - 1/8 \text{ [in]}$$

### Cálculo de resistencia de soldaduras (ASD)

La resistencia admisible,  $R_n / \Omega$  de juntas soldadas debe ser el valor menor entre la resistencia del material base determinada de acuerdo con los estados límites de ruptura a la tensión y ruptura al cortante, y la resistencia del metal de soldadura determinada de acuerdo con el estado límite de ruptura, como se menciona a continuación:

(a) Para el metal base

$$R_n = F_{BM} A_{BM}$$

(b) Para el metal de soldadura

$$R_n = F_w A_w$$

Donde:

$F_{BM}$ : Resistencia nominal del metal base.

$F_w$ : Resistencia nominal del metal de soldadura.

$A_{BM}$ : Área de la sección transversal del metal base.

$A_w$ : Área efectiva de la soldadura.

Los valores de  $\Omega$ ,  $F_{BM}$ ,  $F_w$  y las limitaciones respectivas se especifican en la Tabla 5.5

Los electrodos para la soldadura por arco protegido se designan como E70XX. En este sistema de clasificación la letra E significa electrodo y los dos primeros dígitos indican la resistencia mínima a la tensión de la soldadura en Ksi. Cabe señalar que esta resistencia es diferente al límite de fluencia del electrodo; para mayor información consultar el anexo del AWS D1.1 y los lineamientos descritos en AWS 5.1. Los dígitos restantes especifican el tipo de recubrimiento. Como la resistencia es el factor más importante para el ingeniero estructurista, usualmente especificamos los electrodos como E60XX, E70XX o simplemente E60, E70, etc. Regularmente se utilizan electrodos E70 para soldar aceros con valores de  $F_y$  entre 36 y 60 ksi, mientras que los E80 se usan cuando  $F_y = 65$  ksi.

Tabla 5.4 Propiedades de Resistencia para metales de aportación.

AWS A5.1-91, Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding		
AWS Classification	Nominal Tensile Strength (ksi)	Nominal Yield Strength (ksi)
E6010	60	48
E6011	60	48
E6012	60	48
E6013	60	48
E6019	60	48
E6020	60	48
E6022	60	n/s
E6027	60	48
E7014	70	58
E7015	70	58
E7016	70	58
E7018	70	58
E7024	70	58
E7027	70	58
E7028	70	58
E7018M	70	53 to 72
E7048	70	58

Tabla 5.5 Resistencia de Juntas Soldadas (Tabla J2.5, Sección J2, Manual IMCA).

Tabla J 2.5 Resistencia Disponible de Juntas Soldadas, T (kN)					
Tipo de Carga y Dirección Relativa al Eje de Soldadura	Metal Pertinente	$\Phi$ y $\Omega$	Tensión Nominal ( $F_{EM}$ Y $F_{EW}$ ) kgf/cm <sup>2</sup> (MPa)	Área Efectiva ( $A_{EM}$ Y $A_{EW}$ ) cm <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Nivel de Resistencia Requerida del Metal de Apórtel [a] [b]
<b>SOLDADURAS DE TOPE CON JUNTA DE PENETRACIÓN COMPLETA</b>					
Tracción Normal al eje de soldadura	Resistencia de la junta controlada por el metal base				Se debe usar metal de aporte compatible con el metal base. Para juntas 1 y de esquina sin remoción de soporte, se requiere de metal de aporte resistente a muescas. Ver la Sección J2.6.
Compresión Normal el eje de soldadura	Resistencia de la junta controlada por el metal base				Se permite metal de aporte con nivel de resistencia igual a un nivel de resistencia menor que metal de aporte compatible con el metal base.
Tracción o Compresión Paralelo al eje de soldadura	Tracción o compresión en partes unidas paralelas a la soldadura no necesitan ser consideradas en el diseño de soldaduras que unen las partes				Se permite metal de aporte con un nivel de resistencia igual o menor que metal de aporte compatible con el metal base.
Corte	Resistencia de la junta controlada por el metal base				Se debe usar metal de aporte compatible con el metal base, [c]
<b>SOLDADURAS DE TOPE CON JUNTA DE PENETRACIÓN PARCIAL INCLUYENDO SOLDADURAS DE SURCOS V Y BISEL ACAMPANADOS</b>					
Tracción Normal al eje de soldadura	Base	$\phi = 0.90$ $\Omega = 1.67$	$F_y$	Ver J4	Se permite un metal de aporte con un nivel de resistencia igual o menor que el metal de aporte compatible con el metal base.
	Soldadura	$\phi = 0.80$ $\Omega = 1.88$	$0.60 F_{EXX}$	Ver J2.1a	
Compresión Columna a placa base y empalmes de columna diseñadas por Sección J1.4(a)	No se necesita considerar la tensión de compresión en el diseño de soldaduras que conectan las partes.				
Compresión Conexiones de miembros diseñados para soportar que no sean columnas como se describe en Sección J1.4(b)	Base	$\phi = 0.90$ $\Omega = 1.67$	$F_y$	Ver J4	
	Soldadura	$\phi = 0.80$ $\Omega = 1.88$	$0.60 F_{EXX}$	Ver J2.1a	
Compresión Conexiones no terminadas para soporte	Base	$\phi = 0.90$ $\Omega = 1.67$	$F_y$	Ver J4	
	Soldadura	$\phi = 0.80$ $\Omega = 1.88$	$0.90 F_{EXX}$	Ver J2.1a	

Tabla 5.6 Resistencia de Juntas Soldadas continuación (Tabla J2.5, Sección J2, Manual IMCA).

Tabla J 2.5 (continuación)					
Resistencia Disponible de Juntas Soldadas, T (kN)					
Tipo de Carga y Dirección Relativa al Eje de Soldadura	Metal Pertinente		Tensión Nominal ( $\phi W_y F_w$ ) kgf/cm <sup>2</sup> (MPa)	Área Efectiva cm <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Nivel de Resistencia Requerida del Metal de Aporte <sup>[3]</sup> [b]
<b>SOLDADURAS DE FILETE INCLUYENDO FILETES EN AGUJEROS Y EN RANURAS</b>					
Corte	Base	Gobernado por J4			Se permite un metal de aporte con un nivel de resistencia igual o menor que el metal de aporte compatible con metal base.
	Soldadura	$\phi = 0.75$ $\Omega = 2.00$	$0.60 F_{Exx}$ <sup>[3]</sup>	Ver J2.2a	
Tensión o Compresión Paralelo al eje de soldadura	No se necesita considerar la tracción o la compresión paralela a una soldadura en el diseño de las soldaduras que unen las partes.				
<b>SOLDADURAS DE TAPÓN Y DE RANURA</b>					
Corte Paralelo a la superficie de contacto en el área efectiva	Base	Gobernado por J4			Se permite un metal de aporte con un nivel de resistencia igual o menor que el metal de aporte compatible con metal base.
	Soldadura	$\phi = 0.75$ $\Omega = 2.00$	$0.60 F_{Exx}$	Ver J2.3a	
Tensión o Compresión Paralelo al eje de soldadura	No se necesita considerar la tracción o compresión paralela a una soldadura en el diseño de las soldaduras que unen las partes.				
Corte	Base	Gobernado por J4			Ver J2.1a
	Soldadura	$\phi = 0.75$ $\Omega = 2.00$	$0.60 F_{Exx}$		

<sup>[3]</sup> Para metal de soldadura compatible con metal base ver la Sección 3.3 de AWS D1.1.

<sup>[3]</sup> Se permite un metal de aporte con un nivel de resistencia un nivel mayor que aquel compatible con el metal base.

<sup>[3]</sup> Se pueden usar metales de aporte con un nivel de resistencia menor que aquel compatible con el metal base para soldaduras de tope entre las almas y alas de secciones armadas transfiriendo las cargas de corte, o en aplicaciones donde la alta condición de restricción es una preocupación. En estas aplicaciones, la junta soldada puede ser detallada y la soldadura puede ser diseñada utilizando el espesor del material como la garganta efectiva,  $\phi = 0.80$ ,  $\Omega = 1.88$  y  $0.60 F_{Exx}$  como resistencia nominal.

<sup>[3]</sup> Alternativamente, se permiten las disposiciones de la Sección J2.4(a) cuando se considera la compatibilidad de deformaciones de los variados elementos de soldadura. Alternativamente, las Secciones J2.4(b) y (c) son aplicaciones especiales de la Sección J2.4(a) que proveen la compatibilidad de deformación.

Esfuerzo permisible para fuerza cortante para soldaduras de filete

Esfuerzo permisible:  $R_n / \Omega$  ;  $\Omega = 2.0$ , de acuerdo a la Tabla J2.5

$$\frac{F_v}{\Omega} = \frac{F_v = 0.60 F_{EXX} (1.0 + 0.50 \sin^{1.5} \Theta)}{2.00}$$

$$F_v = 0.30 F_{EXX} (1.0 + 0.50 \sin^{1.5} \Theta)$$

$F_v$  = Esfuerzo permisible para fuerza cortante.

$F_{EXX}$  = esfuerzo del electrodo.

$\Theta$  = ángulo entre la dirección de la carga aplicada y el eje de la soldadura [°].

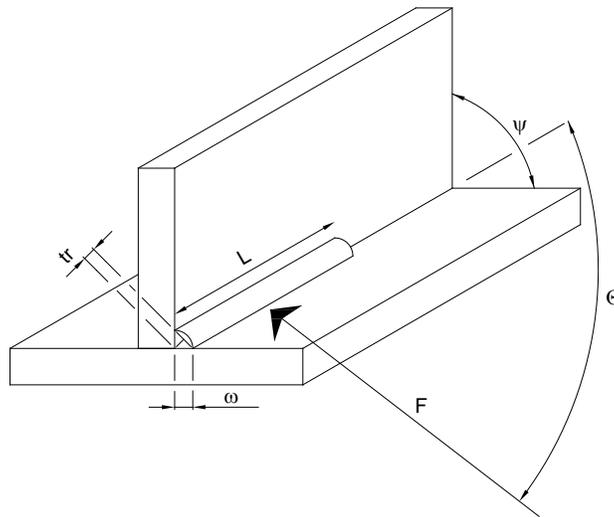


Figura 5.35 Cálculo de esfuerzo permisible de fuerza cortante para soldadura de filete

### Esfuerzo permisible para fuerza cortante para soldaduras de penetración

De acuerdo a la tabla J2.5 del IMCA, para penetración completa, la resistencia está dada por el metal base, es decir que considera la resistencia nominal del metal base y el área de la sección transversal del metal base. Lo que representa una resistencia mucho más grande que para la soldadura de filete. Por otra parte, la tabla indica que la resistencia de la soldadura se puede calcular como sigue, (nota [c] de la tabla J2.5 del IMCA):

$$\frac{F_v}{\Omega} = \frac{0.60F_{EXX}}{1.88}$$

El área efectiva para las soldaduras de penetración es más grande pues la garganta efectiva está dada casi por el tamaño mismo de la soldadura para soldaduras de penetración parcial y por el espesor mismo de la placa para soldaduras de penetración completa, mientras que para la soldadura de filete se debe considerar la distancia mínima entre la raíz de la unión y la cara de la soldadura diagramática de 90° (triángulo inscrito en la sección transversal de la soldadura), que regularmente es el 70% del tamaño de la soldadura.

$$\text{Filete: } \frac{0.6F_{EXX} \times 0.7071(E) \times L}{2.00} = 0.21213F_{EXX}(E)L$$

$$\text{Penetración: } \frac{0.6F_{EXX} \times (E) \times L}{1.88} = 0.3191F_{EXX}(E)L$$

Con este cálculo simplificado se puede notar que la resistencia para la soldadura de penetración es por lo menos 1.5 veces más grande que la resistencia para la soldadura de filete.

## Pre calentamiento

El principio de aplicar calor hasta alcanzar cierta temperatura y luego mantenerla como un mínimo, se usa para controlar el rango de enfriamiento del metal de soldadura y el metal base adjunto. Este proceso de calentamiento permite una difusión del hidrogeno más rápida y reduce la tendencia al agrietamiento por frío. Puede precalentarse la parte completa o solo el metal en la cercanía de la unión que se va a soldar (ver tabla 5.7). Los rangos de enfriamiento serán más rápidos para una soldadura hecha sin precalentamiento. Las temperaturas de precalentamiento mayores se traducen en un rango de enfriamiento más lento. Cuando el enfriamiento es suficientemente lento, reducirá efectivamente el endurecimiento y el agrietamiento. Para aceros sometidos al proceso de templado y revenido, no se desea un enfriamiento lento y no es recomendado por el productor del acero. Debe enfatizarse que las temperaturas en la tabla 5.7 son temperaturas mínimas y las temperaturas de precalentamiento y entre pasadas deberán ser lo suficientemente altas para asegurar soldaduras de buena calidad. La cantidad de precalentamiento requerido para disminuir los rangos de enfriamiento, como para producir uniones dúctiles libres de grietas, dependerá de:

- (1) La temperatura ambiente.
- (2) Calor del arco (no está considerado actualmente en el código).
- (3) Disipación del calor de la unión (depende del espesor del material).
- (4) Química del acero (soldabilidad, que depende del tipo de acero).
- (5) Contenido de hidrogeno del metal depositado de soldadura.
- (6) Grado de restricción en la unión (Ver tabla 5.7).

### Temperatura Ambiental Mínima.

La soldadura no deberá efectuarse en alguna de las siguientes circunstancias:

- (1) Cuando la temperatura ambiente en la vecindad inmediata de la soldadura sea menor que 0° F [-20 °C]. La temperatura del medio ambiente puede estar bajo 0° F [-20° C], pero una estructura caliente o una protección en un área en donde se esté realizando una soldadura, puede mantener la temperatura adyacente a la pieza que se va a soldar a 0° F [-20° C] o mayor.
- (2) Cuando las superficies estén húmedas, expuestas a la lluvia, o a la nieve.
- (3) Expuestas a altas velocidades de viento.
- (4) Cuando el personal de soldadura esté expuesto a condiciones inclementes del tiempo.

La temperatura de precalentamiento para diferentes tipos de acero y espesores a soldar se indican en la tabla 5.7 A continuación se indicarán temperaturas de aceros y espesores de placas más comunes a soldar:

- Acero especificación ASTM A 572, de un rango de espesor de 1 ½ a 2 ½ pulgadas, la temperatura mínima de precalentamiento será 150° F [65° C].

- Acero especificación API 5L grado x52, de un rango de espesor de 3/4 a 1 1/2 pulgadas, la temperatura mínima de precalentamiento será 225° F [110° C].
- Acero especificación API 2Y y API 2W grado 60, de un rango de espesor mayores a 2 1/2 a pulgadas, la temperatura mínima de precalentamiento será 300° F [150° C].

Los requerimientos de la tabla 5.7 no considera todos estos factores, sino que deben combinarse ambas recomendaciones. Debe actuarse con precaución en cuanto al acero sometido al método de precalentamiento de templado y revenido; y la entrada de calor no deberá exceder las recomendaciones del productor de acero (ver la sección 5.7 del AWS).

Debido a la característica de entrada de gran cantidad de calor de estos procesos, normalmente no se requiere precalentamiento. Sin embargo, no deberá efectuarse ninguna soldadura cuando la temperatura del metal base, en el punto de la soldadura, sea inferior a 32° F [0° C].



Continúa tabla 5.7 Precalentamiento de placas a soldar (Tabla 3.2, AWS).

**Table 3.2 (Continued)**

Category	Steel Specification		Welding Process	Thickness of Thickest Part at Point of Welding		Minimum Preheat and Interpass Temperature	
				in.	mm	°F	°C
B	ASTM A 36	Grade B Grade B Grades A, B, CS, D, DS, E AH 32 & 36 DH 32 & 36 EH 32 & 36	SMAW with low-hydrogen electrodes, SAW, GMAW, FCAW	1/8 to 3/4 incl.	3 to 20 incl.	32 <sup>1</sup>	0 <sup>1</sup>
	ASTM A 53						
	ASTM A 106						
	ASTM A 131						
	ASTM A 139						
	ASTM A 381	Grade B Grade Y35	SMAW with low-hydrogen electrodes, SAW, GMAW, FCAW	Over 3/4 thru 1-1/2 incl.	Over 20 thru 38 incl.	50	10
	ASTM A 441						
	ASTM A 500						
	ASTM A 501						
	ASTM A 516						
	ASTM A 524	Grades 55 & 60 65 & 70 Grades I & II Grades 50 & 55 Classes 1 & 2 Grades 42, 50, 55 Grade 65	SMAW with low-hydrogen electrodes, SAW, GMAW, FCAW	Over 1-1/2 thru 2-1/2 incl.	Over 38 thru 65 incl.	150	65
	ASTM A 529						
	ASTM A 537						
	ASTM A 573						
	ASTM A 588						
	ASTM A 595	Grades A, B, C Grades Ib, II, III Grades A, B Grades C, D Grades 36, 50, 50W Grade A, Class 2 (>2 in. [50 mm])	SMAW with low-hydrogen electrodes, SAW, GMAW, FCAW	Over 2-1/2	Over 65	225	110
	ASTM A 606						
	ASTM A 618						
	ASTM A 633						
	ASTM A 700						
	ASTM A 710	Grade 50	SMAW with low-hydrogen electrodes, SAW, GMAW, FCAW	Over 2-1/2	Over 65	225	110
	ASTM A 808						
	ASTM A 913 <sup>2</sup>						
ASTM A 992							

Continúa tabla 5.7 Pre calentamiento de placas a soldar (Tabla 3.2, AWS).

C a t e g o r y	Steel Specification	Welding Process	Thickness of Thickest Part at Point of Welding		Minimum Preheat and Interpass Temperature						
			in.	mm	°F	°C					
C	ASTM A 572	SMAW with low-hydrogen electrodes, SAW, GMAW, FCAW	in.	mm	°F	°C					
	Grades 60, 65										
	ASTM A 633						Grade E	1/8 to 3/4 incl.	3 to 20 incl.	50	10
	API 5L						Grade X52	Over 3/4 thru 1-1/2 incl.	Over 20 thru 38 incl.	150	65
	ASTM A 913 <sup>2</sup>						Grades 60, 65	Over 1-1/2 thru 2-1/2 incl.	Over 38 thru 65 incl.	225	110
	ASTM A 710						Grade A, Class 2 (<2 in. [50 mm])	Over 2-1/2	Over 65	300	150
	ASTM A 710						Grade A, Class 3 (>2 in. [50 mm])				
	ASTM A 709 <sup>3</sup>						Grade HPS70W				
	ASTM A 852 <sup>3</sup>										
	API 2W						Grade 60				
API 2Y	Grade 60										
D	ASTM A 710 ASTM A 913 <sup>2</sup>	SMAW, SAW, GMAW, and FCAW with electrodes or electrode-flux combinations capable of depositing weld metal with a maximum diffusible hydrogen content of 8 ml/100 g (H8), when tested according to AWS A4.3.	All thicknesses ≥ 1/8 in. [3 mm]		321	01					

General Notes:

- For modification of preheat requirements for SAW with parallel or multiple electrodes, see 3.5.3.
- See 5.12.2 and 5.6 for ambient and base-metal temperature requirements.
- ASTM A 570 and ASTM A 607 have been deleted.

Notes:

1. When the base metal temperature is below 32°F [0°C], the base metal shall be preheated to a minimum of 70°F [20°C] and the minimum interpass temperature shall be maintained during welding.
2. The heat input limitations of 5.7 shall not apply to ASTM A 913.
3. For ASTM A 709 Grade HPS70W and ASTM A 852 Grade 70, the maximum preheat and interpass temperatures shall not exceed 400°F [200°C] for thicknesses up to 1-1/2 in. [40 mm], inclusive, and 450°F [230°C] for greater thicknesses.

# *Capítulo VI*

## Conclusiones

## 6. Conclusiones

En el presente documento se describieron las consideraciones y los resultados correspondientes al análisis de izaje de una subestructura para plataformas marinas fijas, tipo jacket.

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis de izaje, en el ejemplo práctico propuesto, la relación de interacción máxima de esfuerzos en elementos es 0.919 y la relación máxima de esfuerzos en juntas es 0.991

El análisis estructural se ha llevado a cabo, así como el peso y el centro de gravedad de la estructura se ha determinado con ayuda del software Staad Pro a partir de la geometría y propiedades que configuran a la subestructura. Con esta información se le ha dado la posición óptima al gancho de la grúa para cumplir con la inclinación sugerida por las normas. Las reacciones en los apoyos revelan, por una parte, que esta posición es correcta para el gancho, pues solo hay componentes verticales en las reacciones; y por otra parte, que los desplazamientos horizontales están dentro de un rango apropiado para llevar a cabo la maniobra.

La tensión en los cables que ha sido determinada, revela que las condiciones de frontera se han modelado adecuadamente, pues los cables presentan carga únicamente en la dirección de los elementos, tal como se comportaría un cable real.

Por lo que se concluye que los esfuerzos actuantes en elementos y juntas tubulares cumplen con los parámetros permisibles indicados en las normas y recomendaciones aplicables, y que la subestructura presenta un comportamiento estructural adecuado bajo las solicitaciones de carga consideradas en este documento.

A continuación (en la tabla 6.1) se muestra un resumen de las relaciones de interacción de esfuerzos (o simplemente UC que significa Unity Check en inglés) en elementos de los análisis de izaje realizados. Cabe mencionar que la relación de interacción en juntas se revisó únicamente para la condición de carga más desfavorable, que es con un FAD de 2.00 recomendado por el API RP 2A-WSD.

Tabla 6.1 Relaciones máximas de interacción de esfuerzos en elementos.

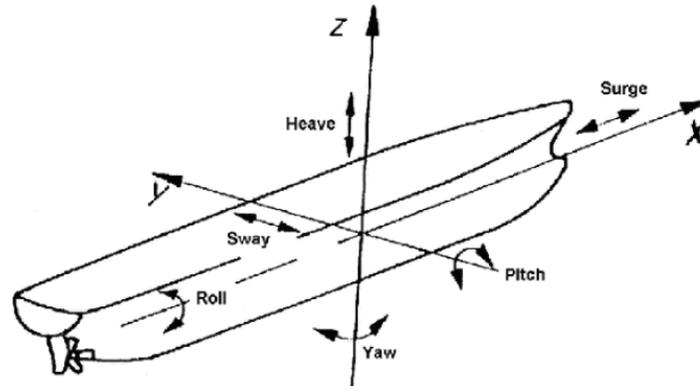
Norma	Combinación de carga	U.C. en elementos
API-RP-2A-WSD	REVISIÓN DE ELEMENTOS PRINCIPALES (FAD = 2.0)	0.872
	REVISIÓN DE ELEMENTOS SECUNDARIOS (FAD = 1.35)	0.919
NRF-041-PEMEX-2014	REVISIÓN DE ELEMENTOS PRINCIPALES (F.C. = 1.0) <b>(PRIMERA DIAGONAL)</b>	0.704
	REVISIÓN DE ELEMENTOS SECUNDARIOS (F.C. = 0.67) <b>(PRIMERA DIAGONAL)</b>	0.656
	REVISIÓN DE ELEMENTOS PRINCIPALES (F.C. = 1.00) <b>(SEGUNDA DIAGONAL)</b>	0.682
	REVISIÓN DE ELEMENTOS SECUNDARIOS (F.C. = 0.67) <b>(SEGUNDA DIAGONAL)</b>	0.661

El personal que realiza la instalación debe observar las recomendaciones y consideraciones indicadas en este tipo de documentos de análisis para izaje, para que de esta manera pueda planear las acciones necesarias y reproducir las condiciones incluidas en estos análisis. Es necesario que durante la instalación de la estructura, se tenga la asistencia técnica de un especialista para la toma de decisiones durante las distintas etapas en la maniobra de izaje, en caso de presentarse alguna situación no prevista en esta etapa de diseño.

## Glosario

Acoderar	Acción de amarrar una embarcación por medio de coderas o cabos a las bitas de otra embarcación.
Aguas someras y profundas	PEMEX ha establecido en base a la forma de administración de los campos, que se consideran aguas someras hasta los 200m de profundidad; aguas intermedias, de 200 a 500 m; y aguas profundas a tirantes mayores a 500m. A nivel internacional, existe otro rango más en la clasificación, y a los lugares con tirantes mayores a los 1,500 m se les considera aguas ultra profundas.
Alta mar	La parte del mar muy alejado de la costa que no pertenece al mar territorial ni a las aguas interiores de un Estado. Estando la alta mar abierta a todas las naciones, ningún Estado podrá pretender legítimamente someter cualquier parte de ella a su soberanía. Para los fines de este documento, se ha utilizado como sinónimo de costa afuera y de mar abierto, aunque estrictamente no tienen el mismo significado.
Altura de ola significativa	Parámetro metaoceánico que corresponde a la altura de oleaje promedio del tercio de los valores más altos ( $H_{1/3}$ ) de un tren de olas dado. Se ha comprobado que esta altura coincide aproximadamente con el valor que un observador imparcial y acostumbrado al mar asignará al oleaje por mera inspección en éste.
Anclaje	Acción de sujetar algo firmemente al suelo o al fondo del mar a través de instrumentos que se penden de cadenas y regularmente tienen forma de arpón o anzuelo doble.
Aparejo	Conjunto de elementos o componentes necesarios para realizar una maniobra de izaje o arrastre. Cables, grilletes, pernos, barra espaciadora, etc.
Atraque	Acción de amarrar una embarcación por medio de coderas o cabos a las bitas del muelle de una plataforma o a una instalación terrestre.
Calado	Distancia vertical medida de la quilla a la línea de flotación.
Chalán	Embarcación no tripulada, con una cubierta plana, sin propulsión propia, utilizada para transportar estructuras marinas y otros tipos de cargamento. También se le conoce como barcaza.
Conductor	Elemento estructural que proporciona protección a la tubería de perforación contra acciones ambientales.
Costa Afuera	(Offshore en inglés) significa alejado de la costa o mar adentro. Este calificativo se aplica a diferentes tipos de actividades que se realizan en alta mar como por ejemplo la explotación de plataformas petrolíferas o de obtención de energía eólica.
Cubierta	Son los diferentes planos de construcción comprendidos en el espacio que abarca la superestructura de una plataforma marina o bien, el casco y la superestructura de un barco, estos planos forman los diferentes niveles del barco (o de la superestructura en una plataforma).
Deck	(Superestructura, en español) Estructura de acero donde se instalan los equipos o apoyan otros tipos de estructuras.
Eslinga (Estrobo)	Es un cable de acero de diámetro y capacidades de carga específicos, al que en sus extremos se le dispone un medio para poder conectarse y transmitir cargas. Los medios de conexión pueden ser gazas o casquillos fundidos.

- Estado de mar** Conjunto de parámetros ambientales y/o meteorológicos con los cuales se puede definir el comportamiento del mar en un instante dado, tales como la velocidad del viento y altura de las olas. Se puede emplear la denominada escala “Beaufort”.
- Grados de libertad de embarcaciones** Las embarcaciones tienen tres movimientos de traslación (estrepada, deriva y arfada) y tres de rotación (cabeceo, rolido y guiñada) alrededor de los ejes coordenados X Y Z. El origen se toma en la base del buque o en el CG. Estos conceptos también se aplican a plataformas marinas. En la figura siguiente se muestra un esquema con la representación de estos grados de libertad y su nombre en inglés.



- Grommets** Cable de acero tejido en forma de lazo continuo, de diámetro y capacidad de carga definidos.
- Faldones** Accesorio estructural, que se suelda a las piernas de la subestructura, y sirve de guía para dirigir a los pilotes durante su instalación.
- Grillete** Es un anillo de acero con perno, roscado o no, que sirve para sujetar los estrobos.
- Guías de acoplamiento** Accesorio estructural que auxilia a la colocación de la subestructura sobre el lecho marino cuando la plataforma retomará un pozo perforado con anterioridad.
- Inspector de garantía marino (IGM)** Persona moral en la que las firmas de seguros asignan la responsabilidad de certificar el cumplimiento de la cláusula de garantía, la cual requiere que las operaciones marinas, tales como la carga, amarre, transporte e instalación de plataformas marinas han sido planeadas con el objetivo de definir y reducir los riesgos, conforme a las mejores prácticas de operación y maniobra de la industria petrolera.
- Izaje** Es una operación que se realiza para mover objetos grandes y/o pesados y que no pueden ser transportados manualmente sino con ayuda de equipo, maquinaria, cables, accesorios, etc. El equipo utilizado para el Izaje de carga es todo dispositivo que permite elevar o bajar una carga, previamente calculada en forma segura y controlada.
- Jacket** (Subestructura, en español). Parte de la sustentación de la plataforma que se apoya en el lecho marino y sobresale del nivel del mar hasta una altura segura para instalar el resto de las estructuras.
- Jackup** Unidad móvil, también llamada plataforma auto elevable, dotada con dispositivos mecánicos móviles con la capacidad para elevar y hacer descender la plataforma por encima del nivel del mar.

Lastrado	Procedimiento con el cual se definen las diferentes condiciones de llenado de tanques de las diferentes etapas de una operación específica y que garantizan la estabilidad y condición de calados requeridos.
Lastre	Objeto o fluido (normalmente agua de mar) que se embarca con el fin de modificar las condiciones de estabilidad y calados.
Lecho marino	(Mudline, en inglés) También es conocido como relieve del mar, relieve submarino o lecho oceánico. Se considera como relieve oceánico al manto de tierra que se encuentra al fondo de los océanos.
Mar abierto	Porción del océano alejado de la costa y que no cuenta con protección alguna de los embates de las olas ni del viento, como pudiera ser la protección de un puerto, rompeolas, dique u alguna otra estructura.
Marea	Movimiento periódico y alternativo de ascenso y descenso de las aguas del mar (cambio en el nivel del mar), producido por la atracción del Sol y de la Luna.
Marejada	Ola larga o movimiento tumultuario de grandes olas, generalmente bajo condiciones atmosféricas normales, originada por una tormenta en un lugar distante. Agitación del mar en forma de ondas violentas y muy dinámicas, que se propagan lejos de los sitios en que han sido originadas.
Muelle	Estructura construida a lado del mar, lago o río navegable, para facilitar el embarque y desembarque.
Muñón de izaje	Punto de sujeción de una estructura para ser izada que asemeja un gancho y que elimina el uso de grilletes, permite el giro libre del estrobo en varias direcciones y la fácil liberación de este.
Offset	Diferencia de distancia entre el centro de los elementos estructurales y el paño o bordes de los elementos. La consideración de esta distancia en el cálculo puede afectar el resultado de los mismos, agregando excentricidades, peso, etc.
Orejas de izaje	Accesorios estructurales para izar y posicionar la subestructura o la superestructura durante las maniobras de instalación en mar.
Patio de fabricación	Espacio habilitado con equipo, maquinaria e infraestructura para la fabricación y manejo de estructuras robustas y pesadas. Regularmente se alojan al borde de las costas o en la rivera de ríos, próximos a la desembocadura para facilitar el embarque de las estructuras hacia su posición final en mar abierto.
Plantilla	Accesorio estructural que sirve de guía a los conductores durante el proceso de perforación. También conocido como templete.
Plataforma marina	Estructura de acero formada por una subestructura, pilotes, superestructura y los diferentes equipos y/o paquetes que dependen del servicio al que destina la plataforma.
Popa	Es la parte posterior del casco de una embarcación.
Proa	Es la parte delantera del casco de una embarcación su forma generalmente es angulosa para ofrecer mínima resistencia al agua.
Punto de trabajo	En las estructuras se utiliza este término para referirse a la intersección de dos elementos, en su centro de línea. En el ámbito costa afuera se utiliza para referirse al punto en el que se unen los pilotes de la cimentación de una plataforma marina con la superestructura. Es el punto en el que se asienta la superestructura sobre la subestructura y los pilotes.
Puntos de izaje	Accesorios que se sueldan directamente a los elementos principales de las estructuras y se utilizan para sujetar los cables que las levantarán. Hay de dos tipos, orejas y muñones.

Punzonamiento	(Punching shear, en inglés) Se refiere a la fuerza axial que ejercen algunos elementos (denominados brace, en inglés) sobre otros elementos tubulares (chord en inglés), en las conexiones y que su efecto provoca la penetración de un elemento sobre otro o el desprendimiento de la junta. Este tema se encuentra desarrollado, con todo detalle, en la sección 4.3 del API RP 2A-WSD.
Quilla	Es el eje en la parte inferior del casco que soporta toda la estructura del barco, comienza en la proa y termina en la popa, sus extremos son la roda (en la proa) y el codaste (en la popa).
Redundancia	Cualidad que tiene una estructura para transmitir las cargas que se le imponen sobre varios elementos, disminuyendo la probabilidad de falla sobre los elementos principales. Este efecto se logra a través del aumento de elementos secundarios que unen a los principales (contra venteo) o aumentando elementos principales en los marcos.
Remolcador	Embarcación que sirve para jalar o remolcar a otras embarcaciones o artefactos flotantes que no cuenten con propulsión (por diseño o por daño) o su capacidad de maniobra sea limitada.
Reservas	El petróleo y el gas todavía en el subsuelo, sin descubrir, son considerados como reservas. Las reservas estimadas son aquellas encontradas en reservorios o yacimientos, las cuales no han sido evaluadas o producidas. Las reservas probadas son aquellas que sabemos que existen en los reservorios en producción.
Reservorio (Yacimiento)	Es una capa o lecho sedimentario formado en el mar; estructuras geológicas de muchos tamaños, formas y tipos diferentes en los cuales puede acumularse el petróleo.
Seguros marinos	Elementos estructurales temporales que sujetan la estructura a la embarcación para resistir los movimientos producidos durante la navegación.
Semi-sumergible	Plataforma del tipo fija, flotante, con capacidad de variar su posición vertical a través del lastrado de tanques dispuestos en sus piernas. A veces están dotadas con equipo para su auto propulsión.
Spars	Plataforma del tipo fija, flotante, cuya subestructura consta de un cilindro vertical flotante, de grandes dimensiones. Cuenta con líneas de anclaje y propulsores para mantener su posición.
Tirante	Término que se aplica a la profundidad; es decir, que es la distancia entre la superficie libre del agua y el fondo marino.
Ventana meteorológica	Predicciones meteorológicas y meteoceánicas para los próximos días, durante los cuales se planea realizar alguna maniobra o trabajo en el mar.

## Bibliografía

- Diseño y evaluación de plataformas marinas fijas en el golfo de México, **NRF-003-PEMEX-2007**, Petróleos Mexicanos, enero 2008.
- Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms- Working stress design. **API RP 2A-WSD**, Twenty-first edition, December 2000, errata and supplement 3, October 2007, Reaffirmed, October 2010. American Petroleum Institute.
- Dynamics of offshore structures. James F. Wilson, Editor, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. Published simultaneously in Canada, 2003.
- Anuario estadístico 2013, Petróleos Mexicanos.
- Carga, amarre, transporte e instalación de plataformas costa afuera, **NRF-041-PEMEX-2014**, Petróleos Mexicanos, agosto 2014.
- Curso de Ingeniería Civil costa afuera – apuntes de clase tomo I. Ing. Víctor Manuel Valdés Rubio, UNAM, Facultad de Ingeniería, Primera edición, México, 2004.
- Acercamiento y amarre de embarcaciones a instalaciones costa afuera, **NRF-043-PEMEX-2014**, Petróleos Mexicanos, agosto 2014.
- Diseño de accesorios estructurales para plataformas marinas, **NRF-173-PEMEX-2009**, Petróleos Mexicanos, junio 2009.
- Manual of steel construction – American Institute of Steel Construction, Allowed Stress Design, **ASD**, 13<sup>th</sup> edition, 2005.
- Rigging selection and lift point design for heavy lift. Dr Y.S. Choo, Invited paper for World Maritime Technology Conference, San Francisco October 2003, Revised after review comments – 18Apr2003, National University of Singapore, Singapore.
- Manual de construcción en acero - Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, A.C., Diseño por Esfuerzos Permisibles, **IMCA** 5<sup>a</sup> edición, 2014.
- Structural welding code – Steel, American Welding Society, **AWS D1.1/D1.1M:2004**, 19th Edition, Approved by American National Standards Institute, October 15, 2003.
- Offshore structures. Design, Construction and Maintenance. Mohamed A. El-Reedy, Elsevier, Inc., USA, 2012.