



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS ARAGON**

**“PROCEDIMIENTO PARA LA
REPARACIÓN DE LA SOLDADURA DE LA
CONEXIÓN SUPERESTRUCTURA-PILOTE DE
PLATAFORMAS MARINAS FIJAS”**

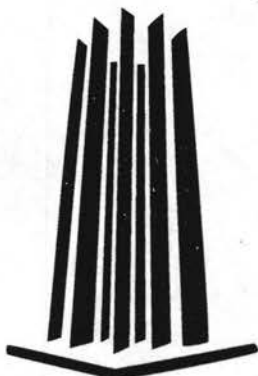
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A :

JONATHÁN SÁNCHEZ CEDILLO



**ASESOR: ING. FRANCISCO A. VARGAS RODRÍGUEZ
ING. KARLA IVONNE GUTIÉRREZ VÁZQUEZ**

SAN JUAN DE ARAGON, EDO. DE MEX.

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Agradecimientos

Al IMP y al Ing. Francisco Vargas por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo que me ha dejado una gran satisfacción.

A la Ing. Karla Ivonne Vázquez por las facilidades para la elaboración de esta tesis.

Al M. en C. José Daniel Muñoz por haberme apoyado en mucho del trabajo aquí expuesto.

A mis amigos que siempre me animaron a seguir adelante.

Y sobre todo a mi familia por apoyarme todo este tiempo y confiar en mí.



Índice

<i>Introducción</i>	1
1. Conceptos generales	10
1.1. El proceso de la soldadura	10
1.1.1. Soldadura por fusión	11
1.1.2. Soldadura sin fusión	12
1.1.3. Soldadura de arco eléctrico (SMAW)	13
1.1.4. Electrodo	15
1.1.4.1. Núcleo del electrodo	16
1.1.4.2. Revestimiento del electrodo	16
1.1.4.3. Identificación del electrodo	17
1.2. Calidad en la soldadura	18
1.2.1. Verificación del proceso de soldadura	19
1.2.2. Defectos en la soldadura	19
1.3. Pruebas en la soldadura	21
1.3.1. Líquidos penetrantes	21
1.3.2. Partículas magnéticas	22
1.3.3. Radiografía industrial	22
1.3.4. Ultrasonido	23



2. Revisión del estado del arte.....	26
2.1. Análisis y evaluación de las discontinuidades existentes en las conexiones superestructura-pilote.....	26
2.2. Reparación en condiciones de servicio.....	33
2.2.1. Soldadura en placas bajo tensión constante	34
2.2.2. Soldadura en placas bajo compresión constante.....	36
2.2.3. Soldadura en columnas circulares bajo compresión axial.....	38
2.2.4. Conclusiones generales.....	42
3. Aspectos teóricos de modelación.....	44
3.1. El método de los elementos finitos	44
3.1.1. Los elementos y los nodos... ..	46
3.1.2. Clasificación de problemas de análisis de esfuerzos.....	49
3.2. Análisis térmicos.....	51
3.2.1. Transferencia de calor	51
3.2.1.1. Conducción.....	52
3.2.1.2. Convección.....	53
3.2.1.3. Radiación.....	53
3.2.1.4. Conductividad térmica de sólidos.....	54
3.2.2. Análisis térmicos con elementos finitos.....	55
3.2.3. Consideraciones de la modelación térmica.....	57
4. Modelación del procedimiento de reparación.....	59
4.1. Verificación de la magnitud del defecto, localización y evaluación.....	60
4.2. Procedimiento para la remoción de la soldadura con defectos.....	61
4.2.1. Evaluación de esfuerzos en la ranura.....	62
4.2.1.1. Revisión por estabilidad global.....	63
4.2.1.2. Revisión por estabilidad local.....	71
4.3. Aplicación del nuevo material de soldadura.....	83
4.4. Verificación de la sanidad de la soldadura y sus fronteras con la soldadura anterior	90



5. Revisión de la propuesta.....	91
5.1. Modificación del modelo.....	91
5.2. Esfuerzos en la zona de soldadura	96
5.3. Disminución de la abertura	99
5.4. Aplicación de cargas en condición de tormenta después de la reparación.....	101
6. Conclusiones y recomendaciones.....	107
6.1. Conclusiones.....	107
6.2. Recomendaciones.....	109
6.3. Recomendaciones para trabajos futuros.....	110
Bibliografía.....	111
Anexo A.....	113
A.1. Localización de los esfuerzos máximos en la sección.....	113
Anexo B.....	119
B.1. Propiedades de la sección transversal reducida.....	119
Anexo C.....	125
C.1. Determinación del esfuerzo máximo debido a las condiciones de operación.....	126
C.2. Determinación de las propiedades geométricas de la sección.....	133
C.3. Esfuerzos máximos y mínimos en la conexión más esforzada debidos a la abertura...	135
C.4. Calculo de la relación de esfuerzos.....	136
C.5. Determinación del esfuerzo máximo debido a las condiciones de tormenta.....	137

NOTA: Los anexos A, B y C se encuentran en archivo electrónico en el disco compacto adjunto a esta tesis.



Introducción

Una de las principales funciones de un Ingeniero Civil es garantizar que las estructuras mantengan una adecuada respuesta ante las sollicitaciones a que se verán sometidas durante su vida de operación, sin poner en riesgo la integridad de las personas y los equipos que en ellas se resguardan. Esto no solo se logra con diseños y procedimientos constructivos adecuados, sino que además se debe diseñar un programa eficaz de inspección y mantenimiento que garantice la pronta y apropiada reparación de los daños que puedan surgir durante la vida útil de la estructura.

En nuestro territorio se encuentran importantes yacimientos de hidrocarburos, que han sido por muchos años eje de nuestra economía. A principios del siglo pasado el petróleo se extraía principalmente en zonas de los estados de Tamaulipas y Veracruz, pero el continuo incremento en el uso de este compuesto en la industria hizo que se incrementara su demanda y con el paso del tiempo que se buscaran nuevas fuentes de explotación incluso más allá de la zona costera del golfo de México, es entonces que se plantea la necesidad de utilizar estructuras que permitieran la extracción segura y rentable de hidrocarburos en la zona de la plataforma continental.

Existe una variedad de estructuras que pueden realizar explotación de hidrocarburos en mar abierto, las características de cada una dependen directamente de la profundidad a la que se realice la extracción.

En zonas cercanas a la plataforma continental, donde la profundidad del mar no supera los 250m lo más factible es utilizar plataformas fijas, mientras que para profundidades mayores, económicamente es más recomendable la utilización de sistemas flotantes (Figura I.1).



Dentro de las plataformas marinas fijas tenemos el caso de las plataformas de acero y las plataformas de concreto, estas realizan la explotación de hidrocarburos en zonas de poca profundidad ya que estas se encuentran apoyadas en el suelo marino.

Por otro lado cuando la profundidad es mayor se recurre a sistemas para la explotación en aguas profundas, en el que las estructuras ya no se encuentran asentadas en el suelo marino, sino que son sistemas flotantes, de este tipo podemos mencionar las Plataformas Semisumergibles, Plataformas de Piernas Tensadas (PPT), Barcos de Producción, Almacenamiento y Descarga, Plataformas tipo SPAR, Sistemas de producción submarinos, principalmente. Estos sistemas pueden extraer petróleo de profundidades de hasta 1600m actualmente.



Figura I.1. Estructuras para la explotación de hidrocarburos en el mar.

El Golfo de México se caracteriza por la baja profundidad de sus aguas, en las cuales a pesar de encontrarse a kilómetros de la costa, se tienen tirantes relativamente pequeños (unos 80m en promedio) lo cual es ideal para la utilización de Plataformas Marinas Fijas. En México a lo largo de décadas el uso de estos sistemas ha comprobado su confiabilidad estructural, y a pesar de que la vida útil para la que fueron diseñados en algunos casos ya fue sobrepasada siguen prestando un buen servicio.

Las Plataformas Marinas Fijas que son utilizadas en México son construidas de acero y se conocen como tipo "Jacket".



Estructuralmente existen varios tipos, Dodecapodos denominados así por el número de piernas que tiene la estructura, Octapodos, Tetrápodos, Trípodes y Estructuras ligeras. Además prestan diferentes servicios como son, de perforación, de compresión, recuperación de pozos, de telecomunicaciones, habitacionales, de enlace, de quemador y de apoyo.

A continuación se da una breve explicación de las partes más importantes que conforman una plataforma marina fija y la manera en que son construidas.

LA PLATAFORMA MARINA FIJA

También conocidas como tipo “Jacket” por su sistema constructivo, estas plataformas están hechas de elementos tubulares de acero y pueden dividirse en tres partes principales: la superestructura, la subestructura y la cimentación (pilotes), (Figura I.2).

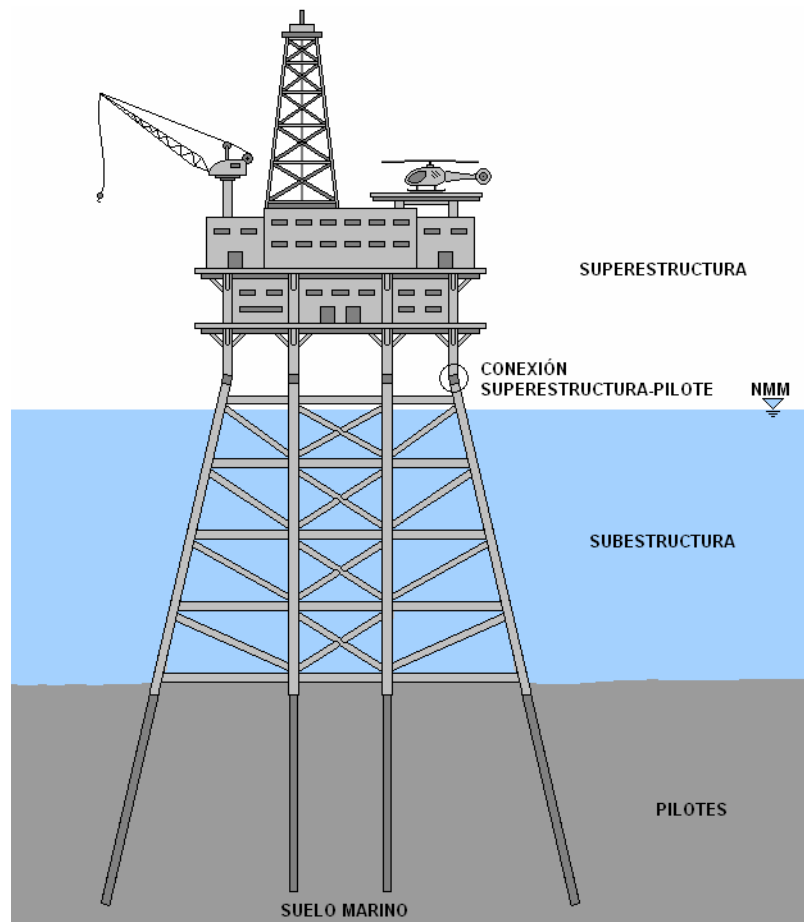


Figura I.2. Representación esquemática de una plataforma marina fija típica de perforación.



La subestructura formada a base de marcos, proporciona la estabilidad y rigidez necesaria para soportar las cargas laterales y además sirve como guía para llevar a cabo el hincado de los pilotes, es decir, los pilotes quedan dentro de las piernas de la subestructura es por eso que recibe el nombre de "Jacket".

Los pilotes por su parte, van embebidos dentro de las piernas de la subestructura y se desplantan dentro del suelo marino hasta la profundidad necesaria para soportar las cargas provenientes de la superestructura y de la subestructura.

La superestructura resguarda al personal y al equipo necesarios para las operaciones de la plataforma.

Durante la fabricación, las partes, tanto la subestructura como la superestructura son formadas en tierra. Después son colocadas en barcazas para transportarlas a el lugar donde se instalará la plataforma (Figura I.3).

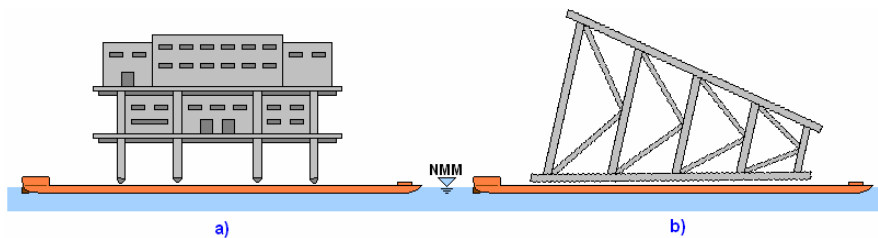


Figura I.3. Transportación. a) Subestructura, b) Superestructura.

Una vez llegado al lugar indicado, la barcaza se inclina y lanza la subestructura al mar, esta lleva unos sellos en los extremos de las piernas, lo que hace que flote, y a través de un sistema de válvulas se controla la inundación hasta que queda en la posición y lugar correcto (Figura I.4).

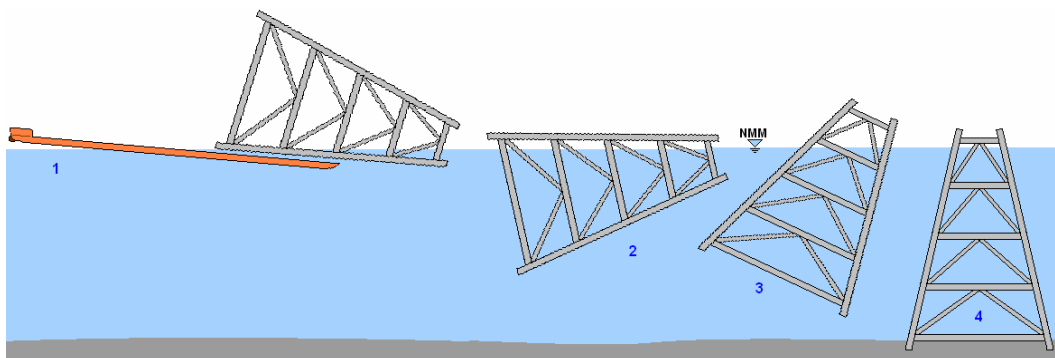


Figura I.4. Colocación de la subestructura.

Una vez colocada la subestructura en el lugar preciso, se procede al hincado de pilotes, primero se coloca un pilote de prueba, que se corre a través de la pierna de la subestructura y una vez que se comprueba que su hincado fue correcto se procede a colocar los restantes (Figura I.5).

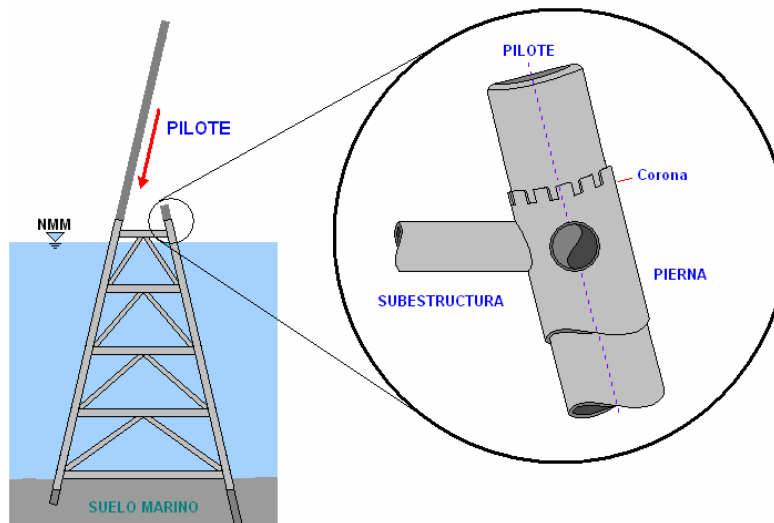


Figura I.5. Hincado de los pilotes.

Una vez que se han hincado los pilotes se soldan las cuñas de ajuste para unirlos a la corona de la subestructura (extremo superior de las piernas de la subestructura, Figura I.5), se recortan las partes sobrantes del pilote y se deja una pequeña parte saliente, y se moldea (se crea un bisel) para que después pueda unirse con la superestructura (Figura I.6).

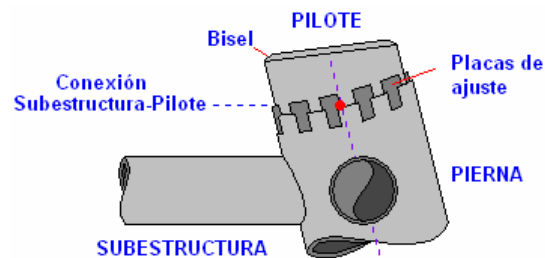


Figura I.6. Corte y modelación del pilote.

La superestructura es izada por una grúa y colocada sobre extremos salientes de los pilotes (Figura I.7), esto es posible gracias a que las piernas de la superestructura tienen conos de acoplamiento en sus extremos (Figura I.8).

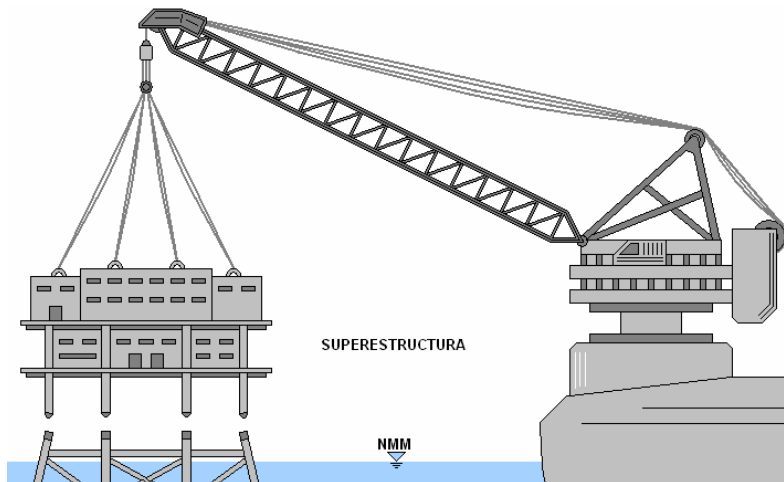


Figura I.7. Colocación de la Superestructura.

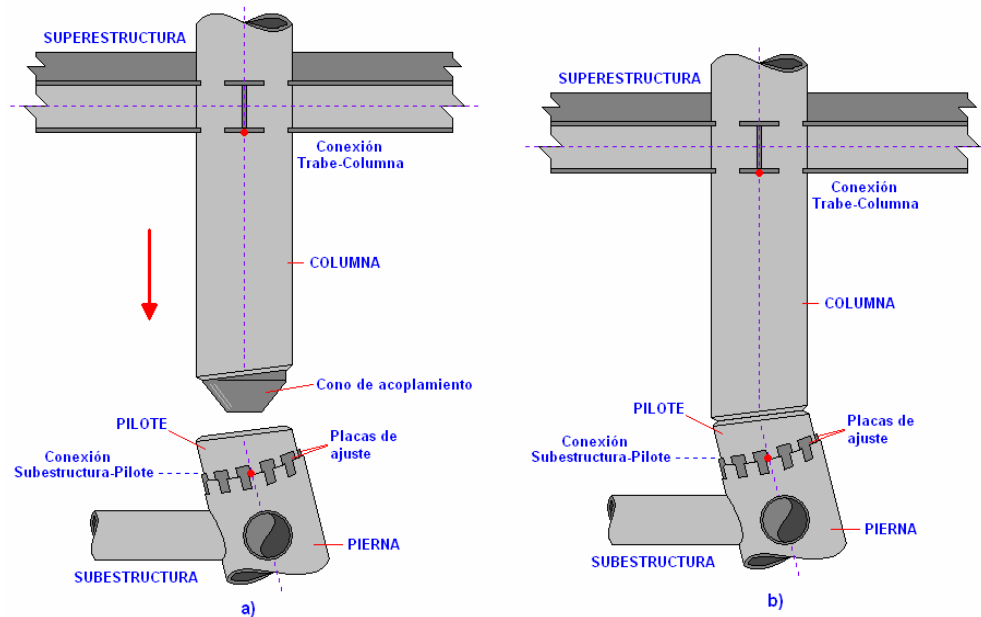


Figura I.8. Acoplamiento de las piernas de la superestructura con los pilotes.

Por último, la unión de la columna de la superestructura con el pilote es soldada para dar continuidad a los elementos (Figura I.9), a esta se le conoce como Conexión Superestructura-Pilote.

Es en esta conexión donde se transmiten todas las cargas provenientes de la superestructura y es por eso que se tiene especial cuidado en mantener esta unión en óptimas condiciones.

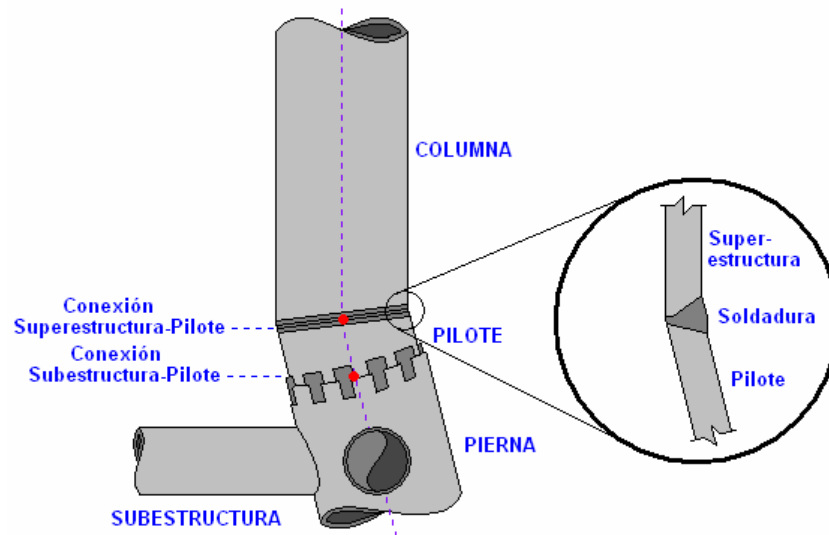


Figura I.9. Soldadura de la conexión Superestructura-Pilote.

Una posible causa de falla en la conexión es la presencia de daños en la soldadura, frecuentemente causados por una mala aplicación del procedimiento de soldadura, mostrando líneas de escoria, porosidad y falta de fusión principalmente. Estos defectos aunados a los esfuerzos provenientes de la superestructura ponen en riesgo la integridad de la unión.

Entonces, en base a lo anterior se planea la continua inspección de estas conexiones, y desde hace tiempo se ha utilizado el método del ultrasonido industrial para detectar posibles defectos en la soldadura (Figura I.10).

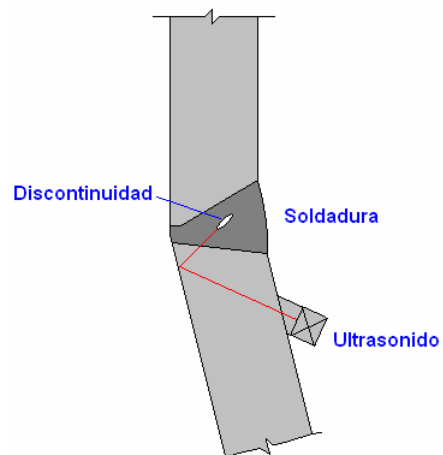


Figura I.10. Inspección de la soldadura con ultrasonido industrial.



Las *discontinuidades*, se definen como la falta de homogeneidad o interrupción en la estructura física normal de un material, son evaluadas bajo el código AWS D1.1 (American Welding Society; Sociedad Americana de la Soldadura), el cual determina mediante propiedades geométricas como son el espesor del material, profundidad, tamaño del defecto y proximidad con otros defectos, la longitud máxima de discontinuidad que puede ser aceptada en la soldadura.

Al percatarse de que la soldadura de las conexiones presentan discontinuidades que sobrepasan las normas del AWS, se planteó la necesidad de realizar un estudio para determinar la frecuencia de los daños, sus consecuencias y las medidas se deben de adoptar, para en su caso repararlas o bien, dar un seguimiento con el cual se pueda saber hasta que punto se permiten cierto tipo de daños por su estabilidad en el tamaño.

Una vez que se determinaron las formas y longitudes de las discontinuidades en la soldadura, es necesario emitir un procedimiento para llevar a cabo la reparación de esta.

Como fundamento de este trabajo, se tomó un procedimiento de reparación de defectos embebidos en la soldadura que consiste en la remoción de la soldadura que contiene daños y el depósito de nuevo material.

Este trabajo se enfoca en la evaluación estructural del procedimiento y en la determinación de una longitud máxima de reparación, a través de análisis mecánicos incluyendo los efectos del calentamiento del material para efectuar el depósito de soldadura. Aunque el procedimiento de reparación implica una amplia participación del área de Tecnología de Materiales, aquí se mencionan algunos conceptos propios de esa área, sin llegar a profundizar en éstos.

Para cumplir con el objetivo de la tesis, ésta se organiza como se describe a continuación. En el capítulo 1 se habla del proceso de la soldadura y sus diferentes tipos, posibles defectos, como identificarlos y como evitarlos.

Como parte de la información documental, el capítulo 2 se refiere a estudios hechos en otros centros de investigación sobre elementos que han sido reforzados bajo cargas de servicio; se refiere también a un estudio en el que se determinan las longitudes de discontinuidades que son admisibles para el tipo de conexión que se analiza en este trabajo.

Debido a la geometría del problema surge la necesidad de utilizar distintas herramientas, como es el caso de El Método de los Elementos Finitos, en el capítulo 3 se hablará de los principios en el que se basa este método, así como sus ventajas y desventajas.



En el capítulo 4 se determinan las condiciones para las cuales la conexión superestructura - pilote es estable global y localmente en las distintas fases de la reparación. Se discuten las propiedades mecánicas del acero dependientes de la temperatura y la forma en que éstas intervienen en la estabilidad de la conexión cuando ésta se encuentra sometida a carga.

En el capítulo 5 se hará revisión estructural de dos fases del procedimiento de reparación variando el lugar de la reparación y la contribución del nuevo material a la distribución de esfuerzos cuando se presentan cargas mayores a las condiciones de operación.

Por último, en el capítulo 6 y con base en los resultados de los análisis estructurales se discuten las características del procedimiento final, conclusiones y recomendaciones. En este capítulo se incluyen las recomendaciones para trabajos futuros, en que se sugieren actividades de análisis que pueden realizarse para representar con mayor aproximación los efectos de la reparación en el material no removido.



Capítulo 1

CONCEPTOS GENERALES

La acción de reparar en ingeniería consiste en devolverle a los sistemas estructurales las condiciones adecuadas y de ser posible óptimas de funcionamiento, esto implica conocer como fueron diseñados y fabricados. Dado que el propósito de este trabajo es reparar soldadura, es necesario conocer como es que se lleva a cabo este proceso, y como podemos verificar que la reparación que realizamos es adecuada.

En las siguientes páginas se da una descripción general del proceso de soldadura en sus distintas variantes, y nos enfocaremos en el proceso de soldadura con arco eléctrico, ya que es el método que se utilizará para reparar la conexión superestructura-pilote.

Además hablaremos de los distintos tipos de defectos y como evitarlos, así como las pruebas que se utilizan para la inspección de la soldadura.

1.1 EL PROCESO DE LA SOLDADURA

Soldar es el proceso de unir o juntar metales. Ya sea que las piezas de metal se calienten hasta que se fundan, o bien alcancen una temperatura inferior a su punto de fusión y se unan con un metal fundido como relleno.



Gracias a los grandes avances de los últimos tiempos existen un gran número de procesos de soldadura, los cuales pueden ser divididos en dos categorías: la soldadura por fusión y la soldadura sin fusión (Figura 1.1).

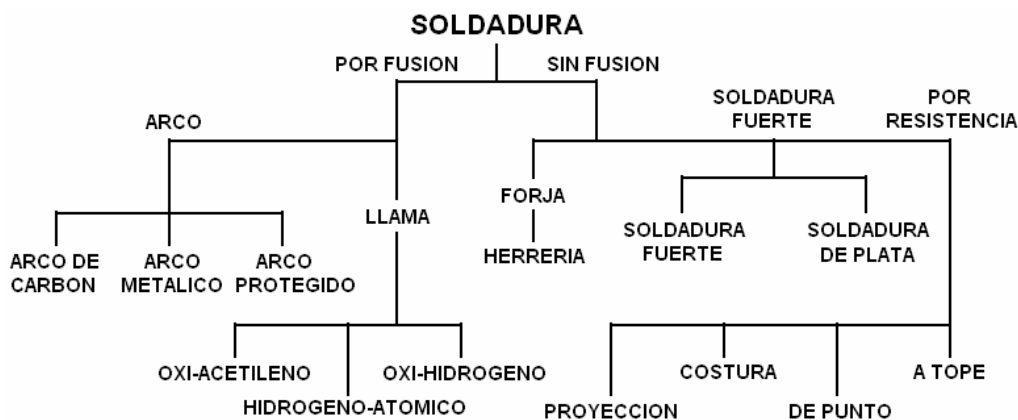


Figura 1.1. Clasificación de los procesos de soldadura.

La *soldadura por fusión* es el proceso de unir metales fundiéndolos. La *soldadura sin fusión* es el proceso de unir metales sin fundirlos.

1.1.1 SOLDADURA POR FUSIÓN

Aquí podemos definir dos grandes ramas, la *soldadura por arco* y la *soldadura por llama*.

Los procesos de *soldadura por arco* emplean el calor generado por una corriente eléctrica, para llevar los metales a la temperatura requerida.

En la *soldadura de arco metálico* se establece una corriente eléctrica entre los metales y una varilla que funciona como electrodo, este último es fijado a un soporte especial para que el soldador lo pueda sostener con la mano. El calor requerido para fundir los metales que se desean unir proviene del arco que se forma cuando la corriente eléctrica *brinca* entre el extremo del electrodo y los metales. En este proceso, tanto los metales como el electrodo son fundidos (Figura 1.2).

La *soldadura por arco protegido* es un método especial, usado para proteger la soldadura. Debido a que el metal fundido al exponerse directamente al aire se vuelve frágil, es por eso que se usa una protección, esta puede formarse usando electrodos recubiertos, un gas inerte o fundente granulado, esto dependiendo del proceso usado.

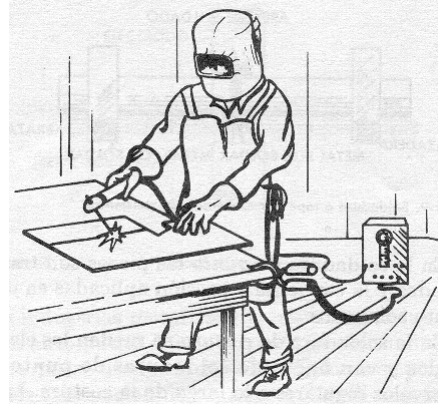


Figura 1.2. Soldadura de arco metálico.

En la *soldadura de arco de carbón*, el arco se establece entre un electrodo de carbón sencillo o doble y los metales por unir. Un porta-electrodos soporta los electrodos de carbón. En este proceso el arco únicamente provee el calor necesario para fundir los metales, este no agrega nada al metal.

Los procesos de *soldadura con llama* aprovechan el calor producido por los gases al quemarse para fundir los metales. Estos combustibles casi siempre son mezclados con oxígeno, siendo la mezcla mas frecuente la de Oxígeno-Acetileno (Figura 1.3).

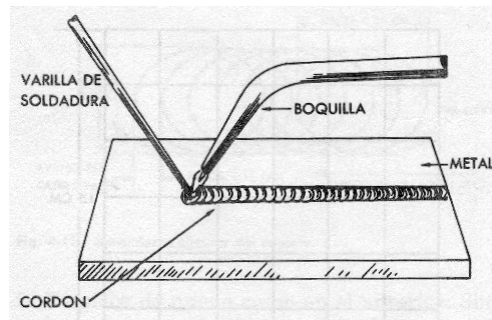


Figura 1.3. Soldadura con llama.

1.1.2 SOLDADURA SIN FUSIÓN

Existen tres tipos principales de soldadura sin fusión: *forjado*, *soldadura por resistencia* y *soldadura fuerte*.



En el *forjado* las piezas que se van a unir se calientan uniformemente en una fragua hasta una temperatura adecuada, luego son puestas en la posición deseada y martilladas juntas, en este caso los metales no se unen por fusión sino por la presión del martilleo.

En la *soldadura por resistencia* también se utiliza el calor y la presión para unir las partes metálicas. Las partes que van a soldarse son amordazadas juntas, entre dos electrodos de cobre en una máquina. El calor se genera por una corriente eléctrica que fluye a través de los puntos donde se hace la soldadura, o sea, los puntos donde los electrodos tocan el metal.

La *soldadura fuerte* es similar al estañado pero mucho más fuerte. En este proceso se usa una varilla de soldar (varilla de metal con un punto de fusión más bajo que el de los metales que se va a soldar). Se calienta el metal base a una temperatura inferior a su propio punto de fusión pero superior al punto de fusión de la varilla de soldadura. Las piezas de metal son unidas por el metal fundido de la varilla de soldadura, este método forma una soldadura fuerte y limpia ^[1].

En estructuras metálicas, como es el caso de las plataformas marinas, es necesario que en las uniones de los elementos se proporcione una continuidad adecuada para transmitir los esfuerzos. La única manera de proporcionar esta continuidad es a través una soldadura por fusión, ya que el hecho de provocar la fusión implica la unión de los metales a niveles moleculares, además que en los casos donde hay material de aporte se garantiza que la soldadura tenga mejores propiedades que las de los metales que une, de esta manera se asegura tanto la continuidad como la seguridad de que no se presenten fallas en la unión.

En la soldadura por fusión los dos procesos mas usados son el de arco eléctrico protegido y el de oxi-acetileno, ambos generan una gran cantidad de calor para fundir los metales (3500°C aproximadamente), solo que al generarse el calor de manera distinta también este se distribuye de forma diferente, ya que la flama del oxiacetileno es mas extendida que la del arco eléctrico. El arco eléctrico concentra mejor el calor en la zona de la soldadura, lo que contribuye a tener menores distorsiones por efecto de la temperatura.

En el caso de la conexión superestructura-pilote, la soldadura es hecha por el método de arco protegido, es por eso que a continuación profundizaremos un poco más en este proceso.

1.1.3 SOLDADURA DE ARCO ELÉCTRICO PROTEGIDO (SMAW)

La soldadura de arco eléctrico es un proceso ampliamente usado en la actualidad, como ya se mencionó es un proceso de soldadura por fusión en el que los metales se funden. El soldador que



realiza este proceso usa un soporte especial para sostener los electrodos, y a medida que el soldador acerca el electrodo al metal base, se forma un arco con la corriente eléctrica que fluye entre el electrodo y el metal base, este arco es extremadamente caliente (aproximadamente unos 3600°C o 6500°F), lo suficiente para fundir el metal base y el electrodo, originándose la mezcla de ambos en estado líquido que al solidificarse formarán el cordón de soldadura (Figura 1.4). El metal fundido del electrodo fluye hacia la unión.

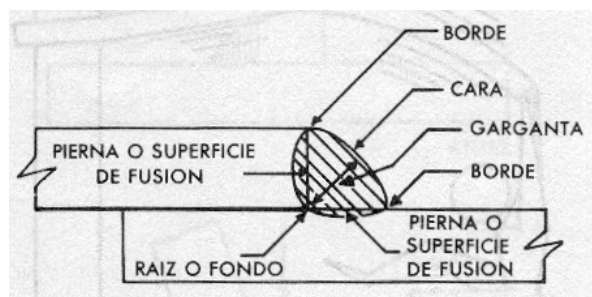


Figura 1.4. Términos comunes aplicados a una soldadura.

El equipo básico para la soldadura con arco eléctrico, consiste principalmente en una maquina para soldar, cables, porta-electrodos y grapas para tierra (Figura 1.5). Los electrodos por su parte son el material que formará la soldadura junto con el metal base.

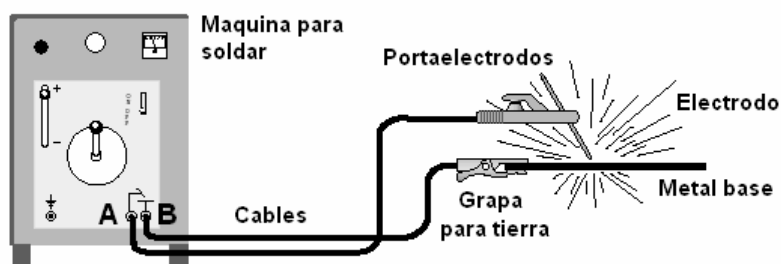


Figura 1.5. Equipo básico de soldadura con arco eléctrico.

En la Figura 1.4 se muestra el circuito de la soldadura, este comienza en A, donde el cable del electrodo se conecta a una terminal de la máquina de soldar y termina en el punto B, donde el cable de tierra se conecta a la otra terminal de la máquina. La corriente fluye por el cable del electrodo al porta-electrodo, del porta-electrodo fluye al electrodo y a través del espacio que hay entre el extremo del electrodo y el metal base formando el arco, y por ultimo del metal base regresa por el cable de tierra a la máquina de soldar.



Para realizar el proceso de soldadura de arco eléctrico es indispensable contar con una máquina que controle la fuerza de la electricidad, aumente o disminuya la potencia (amperaje) según se requiera, y sea segura en su manejo. Existen tres tipos principales de maquina usadas en soldadura de arco:

1. Máquina de CA (corriente alterna)
2. Máquina de CD (corriente directa)
3. Máquina de CA/CD (combinación de ambas)

La corriente eléctrica es en realidad un flujo de electrones de la terminal negativa hacia la terminal positiva de un conductor. Cuando los electrones de una corriente se mueven siempre en una misma dirección, se produce una corriente directa (CD), y cuando estos invierten su dirección a intervalos regulares se produce una corriente alterna (CA). Cuando se usa corriente alterna y el cable del electrodo se conecta a la terminal positiva de la maquina, la máquina esta en polaridad positiva, y por ende cuando el electrodo se conecta a la terminal negativa de la maquina esta en polaridad negativa. En la industria, se conocen las polaridades positiva y negativa como polaridades inversa y directa respectivamente.

La importancia de lo anterior radica en que no todos los electrodos pueden ser utilizados con el mismo tipo de corriente o polaridad, ya que estas afectan tanto la facilidad de aplicación y la apariencia, forma y propiedades de la soldadura final.

1.1.4 ELECTRODOS

En la soldadura casi siempre el material del electrodo es del mismo tipo del metal base, pero en otros casos pueden ser diferentes al metal base. Los electrodos son una mezcla de diferentes elementos metálicos y no metálicos que le darán características especiales a la aleación. Los principales elementos de las aleaciones son Cromo, Fósforo, Molibdeno, Hidrógeno, Níquel, Silicio, Tungsteno, Manganeso, Hierro, Vanadio, Carbono, Titanio, Azufre, Coulombio, Aluminio, Cobalto entre otros ^[2].

El electrodo revestido en el proceso de arco metálico protegido tiene cuatro funciones básicas

- *Establecer el arco eléctrico con el metal base*
- *Dirigir y controlar el arco eléctrico según lo requieran las piezas por soldar*
- *Proporcionar el metal de aporte*
- *Proteger el cordón de soldadura*



Se pueden distinguir tres partes en el electrodo revestido: núcleo, revestimiento e identificación (Figura 1.6).

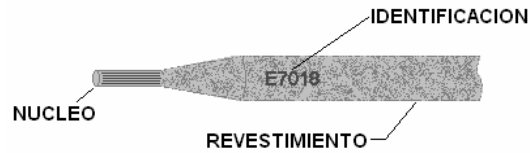


Figura 1.6. Partes del electrodo revestido.

1.1.4.1 NÚCLEO DEL ELECTRODO

El núcleo del electrodo está constituido por un alambre metálico que conduce la corriente eléctrica y permite establecer el arco eléctrico. El intenso calor del arco hace que se funda progresivamente la punta del alambre y que en forma de pequeñas gotas se deposite en el cordón de soldadura, proporcionando así el material de aporte (Figura 1.7).

El metal del núcleo depende del tipo de metal base que se requiere soldar. Si es acero generalmente se usará acero y si es aluminio el núcleo será aluminio.

El calibre del electrodo esta determinado por el diámetro del núcleo, y al mismo tiempo determina la intensidad de corriente en amperes que en promedio debe utilizarse.

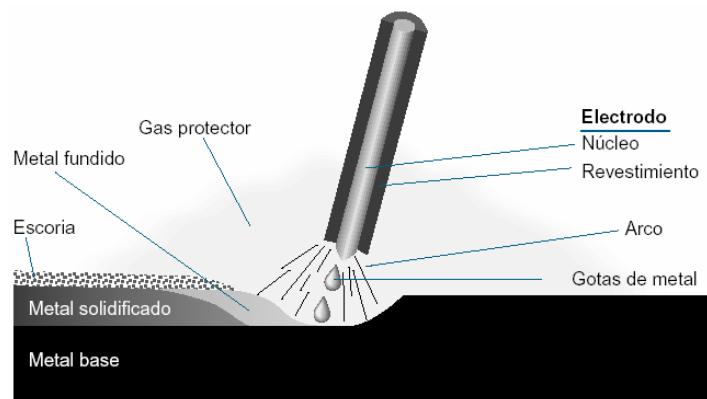


Figura 1.7. Deposito de soldadura.

1.1.4.2 REVESTIMIENTO DEL ELECTRODO

El revestimiento del electrodo cumple diversas funciones al soldar con arco metálico protegido:



Estabiliza el arco, facilita el encendido y el mantenimiento constante del arco. Genera una pantalla de gases de protección que evita la contaminación del cordón por el oxígeno y nitrógeno del aire. Concentra el calor en la punta del electrodo (Figura 1.7).

Proporciona elementos que eliminan los óxidos e impurezas del material. Forma escoria que retarda el enfriamiento brusco del cordón y además le da forma a la soldadura. Adicionalmente determina las condiciones de operación del electrodo y las características del cordón.

Los electrodos de acuerdo a los componentes de su revestimiento pueden clasificarse en cinco tipos:

1. **Tipo Celulósico.** Este electrodo contiene en su revestimiento celulosa. El arco eléctrico del electrodo calienta el recubrimiento descomponiendo la celulosa en CO, CO₂ y vapor de agua. Este tipo de electrodo forma poca escoria, sin embargo el cordón de soldadura es poco vistoso por su tipo irregular y alta salpicadura.
2. **Base de Rutilo.** Formados principalmente por bióxido de titanio. Se destacan por su tipo de acabado y facilidad de manejo, su escoria se remueve fácilmente y en algunos casos sola. Su contenido de hidrógeno es alto y no requiere un proceso de gran calidad.
3. **Bajo Hidrógeno.** Este tipo de electrodo produce las soldaduras de más alta calidad debido a su bajo contenido de carbono e hidrógeno. La presencia del hidrógeno en el metal fundido aumenta la tendencia a la formación de porosidad durante la solidificación del metal de la soldadura y además aumenta la posibilidad de agrietamientos por debajo del cordón. Por tanto este tipo de electrodos fueron desarrollados para mantener un contenido de baja humedad, evitando la introducción del hidrógeno a la soldadura.
4. **Oxido de Hierro.** Este electrodo se caracteriza por su tipo de escoria líquida y su alta velocidad de depósito y limpieza. Posee un alto contenido de manganeso como agente reductor y liga impurezas.
5. **Polvo de Hierro.** Este electrodo contiene un 50% de Hierro en el revestimiento, logrando hacer depósitos de 2.5 veces el volumen del alma del electrodo. El tipo de electrodos más usados son el E-7018 y E-7024, el primero es bajo hidrógeno. Gracias a su alto contenido de Hierro en polvo produce una escoria que es fácilmente removible^[2].

1.1.4.3 IDENTIFICACIÓN DEL ELECTRODO

En muchos lugares del mundo, la identificación de electrodos se efectúa utilizando en primer lugar un nombre comercial o sea la identificación particular que arbitrariamente le asigna cada fabricante



y en segundo lugar un nombre genérico el cual se forma siguiendo los lineamientos establecidos por la A.W.S. La forma en que se efectúa la clasificación A.W.S. de electrodos más comunes como son los utilizados para soldar aceros al carbón y aceros baja aleación, se incluye en la Tabla 1.1:

Tabla 1.1. Identificación de electrodos.
ACERO AL CARBON Y BAJA ALEACIÓN

LETRA	NUMERO	SUFIJO	
	4 O 5 DIGITOS	LETRA	NUMERO

E - 7018 B - 3

Letra "E"	Dos o tres primeros digitos	Penultimo digito	Numeración	Dos ultimos digitos					Letra	Numero	
				Corriente	Polaridad	Revestimiento	Arco	Penetracion			Grupo de aleacion
Electrodo para soldar con arco metalico protegido (Electrica SMAW)	Resistencia minima a la tension del cordon depositado en miles de libras por pulgada cuadrada	Posicion ideal de soldadura 1= Todas las posiciones 2= Plana y filete horizontal 3= Plana	xx10	CD	PI	Celulosa-Sodio	Energico	Alta	A-1	Molibdeno	
			xx11	CA-CD	PI	Celulosa-Potasio	Energico	Alta			
			xx12	CA-DD	PD	Rutilo-Sodio	Medio	Mediana			
			xx13	CA-CD	PD-PI	Rutilo-Potasio	Suave	Ligera	B-1	Cromo-Molibdeno	
			xx14	CA-CD	PD-PI	Rutilo-Polvo Fe	Suave	Ligera	B-2		
			xx15	CD	PI	Bajo Hidrogeno	Medio	Mediana	C-1	Niquel	
			xx16	CA-CD	PI	Bajo Hidrogeno	Medio	Mediana	C-2		
			xx18	CA-CD	PI	Bajo Hidrogeno	Medio	Mediana	C-3	D-1	Molibdeno
			xx20	CA-CD	PD-PI	Oxido de Hierro	Medio	Mediana	D-2		
			xx24	CA-CD	PD-PI	Rutilo	Medio	Mediana	D-2	Manganeso	
			xx27	CA-CD	PD	Polvo de hierro	Medio	Mediana	M-		Militar
			xx28	CA-CD	PI	Bajo hidrogeno	Suave	Ligera	S-	No clasificado	

De esta manera es más fácil determinar el tipo de electrodo a emplear, al conocer tanto sus propiedades, como requerimientos y posibles usos. En tanto que el calibre y la longitud del electrodo comúnmente vienen especificados en el empaque.

1.2 CALIDAD EN LA SOLDADURA

Es importante tener en cuenta, que la soldadura en el proceso de arco eléctrico además de proporcionar una continuidad adecuada de los elementos que une, se espera que también tenga la suficiente resistencia y homogeneidad, para evitar que precisamente sea en la soldadura en donde se pudieran iniciar o presentar problemas.



1.2.1 VERIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA

Un primer paso para formar una soldadura de buena calidad, es decir, de buena apariencia y sin defectos, es precisamente verificando antes, durante y después del proceso que se cumplan algunos puntos básicos.

Antes:

- Conocer el tipo y propiedades del metal base.
- Seleccionar el procedimiento a emplear en base al uso final de la soldadura.
- Seleccionar el electrodo correctamente en base a la junta a emplear.
- Limpiar el material base, eliminando escorias, pintura, óxidos, grasas, etc.

Durante:

- Usar máquinas, electrodos y accesorios de calidad,
- No realizar la soldadura sobre fracturas o porosidad creada por la soldadura anterior, primero hay que remover estas.
- Poner especial atención en el primer paso de penetración a raíz.
- Remover la escoria del cordón depositado anteriormente hasta que vaya a realizar el paso siguiente sobre este. En caso de no haber paso siguiente entonces hasta que este fría.
- Observar las dimensiones de la soldadura requerida y asegurarse de obtener estas, es decir, depositar la cantidad adecuada de soldadura.

Después:

- Inspeccionar el trabajo inmediatamente después de realizado y remover los defectos.
- Asegurarse que la apariencia de la soldadura sea la correcta si no deberá repararse.


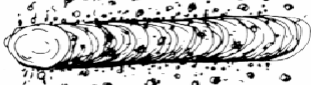





1.2.2 DEFECTOS EN LA SOLDADURA

Como se puede deducir, es indispensable no solo contar con equipo y materiales de calidad para realizar una buena soldadura, también es necesario contar con el personal adecuado para realizar el trabajo, ya que precisamente la calidad de la soldadura dependerá directamente de la habilidad y experiencia del soldador.

A pesar de todo y aunque se tomen las precauciones debidas es poco probable que no se llegue a presentar algún defecto en la soldadura, es por eso que señalaremos los defectos más comunes y sus posibles causas y por ende la forma de evitarlos (Tabla 1.2).



Tabla 1.2. Defectos más comunes en la soldadura de arco eléctrico, causas y recomendaciones.

Defecto	Causas probables	Recomendaciones
Mal aspecto 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conexiones defectuosas. 2. Recalentamiento. 3. Electrodo inadecuado. 4. Longitud de arco y amperaje inadecuado. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Usar la longitud de arco, el ángulo (posición) del electrodo y la velocidad de avance adecuados. 2. Evitar el recalentamiento. 3. Usar un vaivén uniforme. 4. Evitar usar corriente demasiado elevada.
Salpicadura excesiva 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Corriente muy elevada. 2. Arco muy largo. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Disminuir la intensidad de la corriente. 2. Acortar el arco.
Soldadura porosa 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Arco corto. 2. Corriente inadecuada. 3. Electrodo defectuoso. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Averiguar si hay impurezas en el metal base. 2. Usar corriente adecuada. 3. Utilizar el vaivén para evitar sopladuras. 4. Usar un electrodo adecuado para el trabajo. 5. Mantener el arco más largo. 6. Usar electrodos de bajo contenido de hidrógeno.
Soldadura agrietada 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Electrodo inadecuado. 2. Falta de relación entre tamaño de la soldadura y las piezas que se unen. 3. Mala preparación. 4. Unión muy rígida. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eliminar la rigidez de la unión con un buen proyecto de la estructura y un procedimiento de soldadura adecuado. 2. Precalear las piezas. 3. Soldar desde el centro hacia los extremos o bordes. 4. Seleccionar un electrodo adecuado. 5. Adaptar el tamaño de la soldadura de las piezas. 6. Dejar en las uniones una separación adecuada y uniforme.
Soldadura quebradiza 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Electrodo inadecuado. 2. Tratamiento térmico deficiente. 3. Soldadura endurecida al aire. 4. Enfriamiento brusco. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Usar un electrodo con bajo contenido de hidrógeno o de tipo austenítico. 2. Calentar antes o después de soldar o en ambos casos. 3. Procurar poca penetración dirigiendo el arco hacia el cráter. 4. Asegurar un enfriamiento lento.
Penetración incompleta 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Velocidad excesiva. 2. Electrodo de diámetro excesivo. 3. Corriente muy baja. 4. Preparación deficiente. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Usar la corriente adecuada. 2. Velocidad adecuada. 3. Calcular correctamente la penetración del electrodo. 4. Elegir un electrodo de acuerdo con el tamaño de bisel. 5. Dejar suficiente separación en el fondo del bisel.
Fusión deficiente 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Caras de los biseles contaminadas y/u oxidadas. 2. Insuficiente fusión de las caras de los biseles corriente muy baja. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Seleccionar la corriente de acuerdo al diámetro del electrodo y la posición de soldadura.



1.3 PRUEBAS EN LA SOLDADURA

Una vez realizada la soldadura es indispensable verificar que no tenga defectos, si llegase a tener, pueden ser detectados a través de ensayos no destructivos. Los ensayos no destructivos (END) son técnicas de inspección que se utilizan para verificar la sanidad interna y externa de los materiales, sin deteriorarlos ni alterar o afectar de forma permanente sus propiedades, sean éstas físicas, químicas o mecánicas.

Dentro de los ensayos no destructivos que son utilizados para verificar la sanidad de la soldadura tenemos de dos tipos, los superficiales como son *Partículas Magnéticas* o *Líquidos Penetrantes* o incluso a simple vista como los expuestos anteriormente. Pero cuando estos defectos se encuentran embebidos en la soldadura se utiliza pruebas no destructivas de tipo volumétrico, como es el caso de la *Radiografía* y el *Ultrasonido Industrial*, este último es el que generalmente se utiliza, para inspección la soldadura, ya que es de manejo sencillo y el equipo es fácilmente transportable, por esta razón, se da una breve explicación de los fundamentos de estas pruebas.

1.3.1 LIQUIDOS PENETRANTES

La inspección por Líquidos Penetrantes^[3] es empleada para detectar e indicar discontinuidades que afloran a la superficie de los materiales examinados.

En términos generales, esta prueba consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente a la superficie a examinar, el cual penetra en las discontinuidades del material debido al fenómeno de capilaridad. Después de cierto tiempo, se remueve el exceso de penetrante y se aplica un revelador, el cual generalmente es un polvo blanco, que absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades y sobre la capa de revelador se delinea el contorno de ésta.

Ventajas: Es extremadamente sensible a las discontinuidades abiertas a la superficie; la configuración de las piezas a inspeccionar no representa un problema para la inspección; son razonablemente rápidos en cuanto a la aplicación, además de que el equipo puede ser portátil.

Limitaciones: Sólo son aplicables a defectos superficiales y a materiales no porosos; se requiere de una buena limpieza previa a la inspección; no se proporciona un registro permanente de la prueba no destructiva.



1.3.2 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

La inspección por Partículas Magnéticas^[3] permite detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos.

El principio del método es la formación de distorsiones del campo magnético cuando se genera o se induce un campo magnético en un material ferromagnético; es decir, cuando la pieza presenta una zona en la que existen discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnético, éste se deforma o produce polos. Las distorsiones o polos atraen a las partículas magnéticas, que fueron aplicadas en forma de polvo o suspensión en la superficie sujeta a inspección y que por acumulación producen las indicaciones que se observan visualmente de manera directa o bajo luz ultravioleta.

Ventajas: Requiere de un menor grado de limpieza; generalmente es un método más rápido y económico; puede revelar discontinuidades que no afloran a la superficie.

Limitaciones: Son aplicables sólo en materiales ferromagnéticos; no tienen gran capacidad de penetración; sólo detectan discontinuidades perpendiculares al campo.

1.3.3 RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

La inspección por Radiografía Industrial^[3] (RI) esta diseñada para detectar discontinuidades macroscópicas y variaciones en la estructura interna o configuración física de un material. Al aplicar RI, normalmente se obtiene una imagen de la estructura interna de una pieza o componente, debido a que este método emplea radiación de alta energía, que es capaz de penetrar materiales sólidos, por lo que el propósito principal de este tipo de inspección es la obtención de registros permanentes para el estudio y evaluación de discontinuidades presentes en dicho material.

El principio físico en el que se basa esta técnica es la interacción entre la materia y la radiación electromagnética, siendo esta última de una longitud de onda muy corta y de alta energía. Durante la exposición radiográfica, la energía de los rayos X o gamma es absorbida o atenuada al atravesar un material. Esta atenuación es proporcional a la densidad, espesor y configuración del material inspeccionado.

La radiación ionizante que logra traspasar el objeto puede ser registrada por medio de la impresión en una placa o papel fotosensible, que posteriormente se somete a un proceso de revelado para obtener la imagen del área inspeccionada. En términos generales, es un proceso similar a la



fotografía, con la diferencia principal de que la radiografía emplea rayos X o rayos Gamma y no energía luminosa.

Ventajas: Es un excelente medio de registro de inspección; su uso se extiende a diversos materiales; se obtiene una imagen visual del interior del material; se obtiene un registro permanente de la inspección; descubre los errores de fabricación y ayuda a establecer las acciones correctivas.

Limitaciones: No es recomendable utilizarla en piezas de geometría complicada; la pieza de inspección debe tener acceso al menos por dos lados; su empleo requiere el cumplimiento de estrictas medidas de seguridad.

1.3.4 ULTRASONIDO

La inspección de ultrasonido se define como un procedimiento de inspección no destructivo de tipo mecánico, diseñado para detectar discontinuidades y las variaciones en la estructura interna de un material^[4].

El ultrasonido es una vibración mecánica con un rango mayor al audible por el oído humano que se transmite a través de un medio físico y es orientado, registrado y medido en Hertz (ciclos por segundo) con ayuda de un aparato creado para ese fin.

El ultrasonido forma parte del espectro de ondas acústicas, el cual es la serie resultante de un análisis de las ondas de sonido, y es expresada en términos de frecuencias, en el que se observan tres regiones o zonas:

- **Infrasónica.** Comprendida en el rango entre de frecuencia de 1 a 16 Hertz (Hz).
- **Sónica o audible.** Comprendida entre el rango de 16 Hz y 20 kHz. Cabe recordar que una onda es audible no solo por su frecuencia sino también por su intensidad que se mide en decibelios.
- **Ultrasónica.** Es la zona del espectro que comprende las zonas mayores de 20 kHz. El limite superior de sus frecuencias no esta definido físicamente.

Las frecuencias utilizadas en END para el control de discontinuidades, se comienzan en la proximidad de la zona audible (para concretos) y se extienden hasta los 25 MHz. En el caso de materiales metálicos las frecuencias utilizables varían entre 0.2 MHz y 25 MHz.



El principio en el que se basa el método de inspección por ultrasonido es la impedancia acústica, que es la resistencia que oponen los materiales al paso de una onda ultrasónica.

Para realizar la prueba, el sonido es transmitido a través del material de prueba por medio de un transductor ultrasónico. La interacción de este sonido con el material puede indicar la velocidad, densidad, espesor y por supuesto, la presencia de anomalías como son las discontinuidades o fallas en el mismo.

En la Figura 1.8 se presenta el diagrama general del sistema de inspección por ultrasonido.

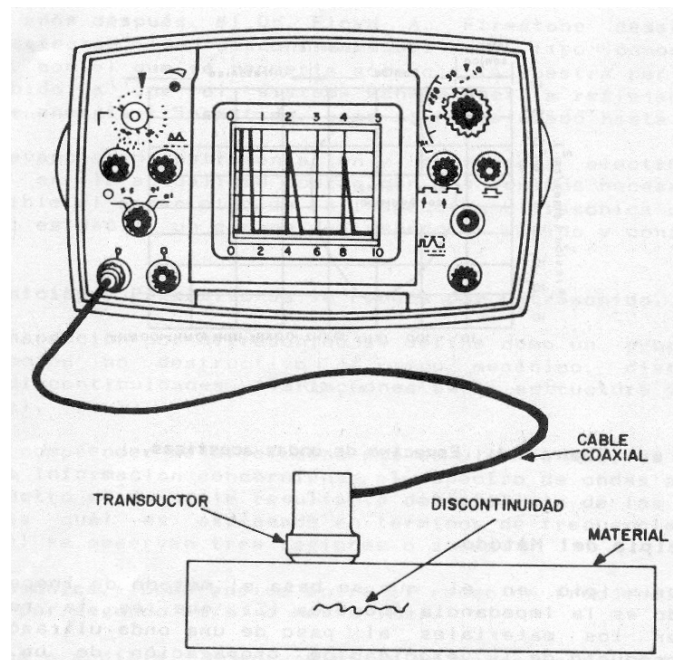


Figura 1.8. Inspección por Ultrasonido.

Los elementos esenciales del sistema son: *Equipo electrónico de ultrasonido*, *Cable coaxial*, *Transductor* y el *Material a inspeccionar*. Los tres primeros constituyen el medio de inspección mientras que el cuarto es el objeto de examen.

El equipo de ultrasonido genera pulsos eléctricos muy breves del orden de microsegundos, a una frecuencia de repetición entre los 125 y 5000 pulsos por segundo, estos son conducidos por el cable coaxial hasta el transductor, el cual mediante un cristal que tiene propiedades piezoeléctricas los transforma en vibraciones mecánicas con frecuencias entre los 0.25 y 25 MHz. Estas vibraciones son transmitidas al material en examinación, donde se propagan y reflejan en la



superficie opuesta, o bien pueden ser reflejadas, atenuadas o dispersas por una discontinuidad. Los pulsos reflejados son captados por el transductor, el cual los transforma en pulsos eléctricos que son analizados y representados en una pantalla de un tubo de rayos catódicos, en una gráfica o un digitalizador de imágenes.

En las inspecciones por ultrasonido todas las indicaciones de discontinuidades son comparadas con las de un patrón de referencia. Los patrones de referencia pueden ser un bloque o juego de bloques específicos para una determinada prueba y se denominan “bloques de prueba o de calibración” y tienen discontinuidades artificiales y/o espesores conocidos que son empleados para calibrar equipos de ultrasonido y para evaluar las indicaciones de las discontinuidades de la muestra inspeccionada. Los bloques de calibración deben de tener las mismas propiedades físicas, químicas y de estructura que el material a inspeccionar.

Ventajas: Se tiene una mayor exactitud al determinar la posición de las discontinuidades internas; estimando sus dimensiones, orientación y naturaleza; alta sensibilidad para detectar reflectores pequeños (discontinuidades); solo requiere acceso por un lado del objeto a inspeccionar.

Limitaciones: Baja velocidad de inspección cuando se emplean métodos manuales; requiere de personal con gran preparación técnica y gran experiencia, dificultad para inspeccionar piezas con geometría compleja, espesores muy delgados o de configuración irregular; es afectado por las características estructurales del material, por ejemplo el tamaño de grano y el tipo de material a ser inspeccionado.



Capítulo 2

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Existe un número importante de Plataformas Marinas instaladas en la Sonda de Campeche y a la fecha se cuenta con una gran cantidad de información de los diferentes conceptos involucrados en la inspección de estas instalaciones, entre estos conceptos se encuentran el de las discontinuidades de la soldadura de la conexión superestructura–pilote, que han sido registradas mediante ensayos no destructivos como lo es el ultrasonido industrial, y evaluadas bajo las normas establecidas por el código de la Sociedad Americana de la Soldadura A.W.S.

En el 2001, el Instituto Mexicano del Petróleo^[5], desarrolló un estudio para determinar que tan frecuentes son estos daños y los posibles efectos que pueden tener en la integridad de la conexión. Por ese motivo aquí se da una breve explicación del trabajo desarrollado y de las conclusiones a las que se llegaron.

2.1 ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EXISTENTES EN LAS CONEXIONES SUPERESTRUCTURA-PILOTE

Este estudio tuvo como objetivo *definir el proceder que se mantendrá en referencia a la presencia de defectos registrados en la soldadura de la conexión superestructura-pilote*. Esto se logró a partir



de la selección de una longitud de discontinuidad basada en resultados estadísticos de la presencia de discontinuidades en conexiones superestructura–pilote por tipo de estructura, servicio y categoría de riesgo de falla, así como de los resultados de análisis mecánicos de geometrías transversales de discontinuidades representativas embebidas en el espesor de la conexión, y finalmente, de los niveles de esfuerzos a que se someten las uniones en condiciones de operación y tormenta de las plataformas.

Primero se identificó la frecuencia con las que se presentaban los defectos en las conexiones superestructura-pilote esto en base al tipo y servicio de las plataformas. El mayor porcentaje de presencia y número de discontinuidades se presentó en las plataformas tipo octápodo. Mientras que por servicio las plataformas de perforación, tienen el mayor índice de presencia de defectos por pierna.

De los análisis estadísticos fue posible definir en forma genérica la longitud representativa de una discontinuidad para que fuese evaluada mecánicamente, sin embargo aún debía definirse la morfología de la sección radial del defecto, aunque era difícil establecer una discontinuidad genérica que cubriera todos los tipos de defectos que se presentan en soldaduras, se analizaron geometrías de la sección transversal, agudizando en algunos casos su morfología. En la Figura 2.1, se muestran las secciones radiales de la discontinuidad consideradas.

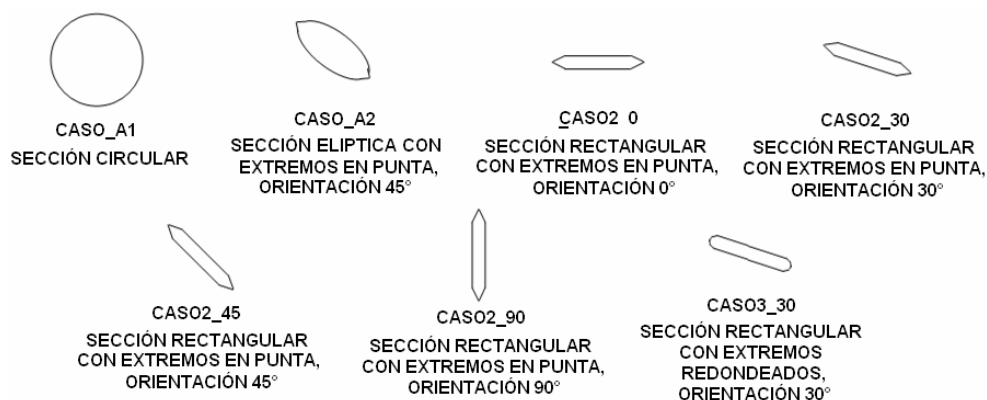


Figura 2.1. Idealización de secciones radiales de discontinuidades en la soldadura de la conexión superestructura-pilote.

Con la finalidad de comparar las concentraciones de esfuerzos según las diferentes secciones geométricas de los defectos considerados, se realizaron modelos matemáticos empleando técnicas numéricas de elemento finito. Se modelaron defectos con longitudes características de 3.8mm, siendo ésta la longitud mayor del defecto o el diámetro en el caso de la sección circular, para el caso de secciones rectangulares el lado menor del rectángulo fue de 0.6mm.



Aplicando los esfuerzos máximos de compresión y tensión de las plataformas que presentaron mayor índice de defectos y que además cuentan con una importante cantidad de equipo, en este caso plataformas de perforación tipo octápodo, se determinaron los Factores de Concentración de Esfuerzos, FCE, que resulta de dividir el esfuerzo máximo en la vecindad de la discontinuidad entre el esfuerzo nominal, para poder así determinar la sección radial que produce la mayor concentración de esfuerzos. Los resultados de los diferentes casos analizados se pueden observar en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Factores de concentración de esfuerzos para las diversas geometrías radiales de los efectos considerados.

Modelo	Descripción de la geometría radial del defecto	FCE
CASO_A1	Sección circular	2.71
CASO_A2	Sección elíptica, extremos en punta con abertura de 86°, orientación radial a 45°	2.14
CASO2_0	Sección rectangular con extremos en punta con abertura de 62°, orientación radial a 0°	8.42
CASO2_30	Sección rectangular con extremos en punta con abertura de 62°, orientación radial a 30°	8.45
CASO2_45	Sección rectangular con extremos en punta con abertura de 62°, orientación radial a 45°	6.07
CASO2_90	Sección rectangular con extremos en punta con abertura de 62°, orientación radial a 90°	1.27
CASO3_30	Sección rectangular con extremos redondeados con orientación radial a 30°	5.45

Los FCE son aplicables en esfuerzos actuantes de compresión y tensión, sin embargo, cuando se trata de esfuerzos en tensión actuando en aberturas, discontinuidades o grietas en un medio continuo, la teoría aplicable para determinar el comportamiento de la abertura está definida por la Mecánica de Fractura. Se hizo uso de la Mecánica de Fractura Elástica Lineal, considerando que los esfuerzos actuantes y los residuales en la unión, no rebasan los esfuerzos de fluencia del material.

La teoría de la Mecánica de Fractura Elástica Lineal, proporciona un índice de la estabilidad de una grieta o discontinuidad de elementos estructurales sometidos a tensión. Este índice se obtiene al comparar el factor de intensidad de esfuerzos KI con el de tenacidad a la fractura del material Kc, considerado de 25 M Pa m^{0.5}.

Se aplicaron diversos casos para la solución los cuales se muestran en la Figura 2.2.

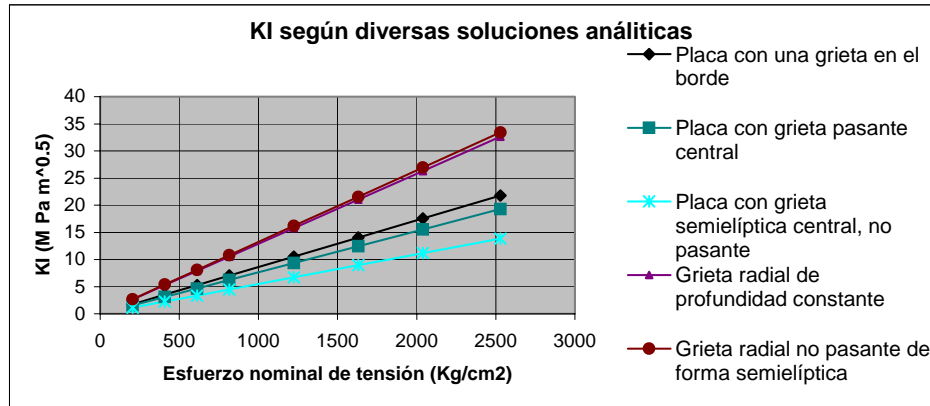


Figura 2.2. Factores de Intensidad de Esfuerzos KI para diversas discontinuidades.

Basándose en los resultados de los análisis hechos con los modelos de los elementos finitos se observó que un aspecto general en los análisis, es la participación de la agudeza de las puntas, que son concentradoras de esfuerzos, aunque todas las geometrías analizadas eran representaciones de la geometría real de un defecto en la soldadura, y que sin embargo, era de esperarse que debido a las temperaturas en que se funden los materiales durante el proceso de soldadura, se pueden reducir en gran manera las zonas angulosas de los extremos de las secciones de los defectos, es decir, las superficies en las discontinuidades circunferenciales embebidas en el espesor de la pared del elemento cilíndrico pueden presentar pocas o ninguna superficie angulosa en los extremos de sus secciones radiales. Por ese motivo es de esperarse que el caso mas adverso fuera el del caso3_30 con un FCE de 5.45.

Además se dictaminó que cuando las discontinuidades son sometidas a esfuerzos de tensión o compresión, el hecho más probable es la fluencia del material y plastificación de éste, cuando los esfuerzos actuantes fueran de más de 950 Kg/cm^2 . Para el caso específico de esfuerzos actuantes a compresión, se espera que el efecto en el material en la vecindad de los defectos, y únicamente en donde los esfuerzos son máximos, el material fluya y forme una zona plástica, cuyas dimensiones, de acuerdo con los resultados numéricos, son muy pequeñas en comparación con el tamaño de la discontinuidad.

Para el caso en que la unión conexión se somete a tensión, entra en juego la tenacidad a la fractura del material y la teoría de la Mecánica de Fractura Elástica Lineal. De las soluciones analíticas aplicadas ninguna se ajustaba perfectamente al problema real, sin embargo los casos que se analizaron establecieron los límites superior e inferior de los factores de intensidad de esfuerzos que se presentan en la discontinuidad detectada en las conexiones superestructura-



pilote. El modelo que más se aproximaba al problema real estaba representado por una placa con una discontinuidad en el centro que atraviesa el espesor de ésta.

De acuerdo con los resultados obtenidos de las diversas soluciones analíticas estudiadas, para esfuerzos de tensión de hasta 1520 Kg/cm^2 , que representa el $0.6f_y$ y el cual es el esfuerzo máximo a tensión con el cual se diseñan los elementos, en ninguno de los casos existen problemas de inestabilidad de grieta (ver Figura 2.2). Se determinó que las discontinuidades cercanas a la superficie interna del cilindro pueden ser inestables cuando se alcanzan niveles de esfuerzo longitudinal del orden de $2,000 \text{ Kg/cm}^2$ en los que se alcanzan magnitudes de KI superiores a $25 \text{ M Pa m}^{0.5}$ y en cuyo caso la grieta se propaga circunferencialmente de forma súbita.

Por lo anterior era necesario revisar los niveles de esfuerzo actuantes de las conexiones superestructura-pilote, tanto en condiciones de operación como de tormenta, para esta revisión se consideran los octápodos de perforación, estructuras que presentaron el mayor índice de defectos por conexión que se encontró en las plataformas.

El interés se centraba en los mayores esfuerzos combinados de carga axial y momento flexionante que actúan en la conexión y que resultan de las diversas condiciones de análisis de las plataformas.

Para las condiciones de operación, ninguna conexión alcanzó esfuerzos combinados de tensión en la sección de la conexión superestructura-pilote, por su parte, los esfuerzos de compresión alcanzaron magnitudes de un poco menos de 1200 Kg/cm^2 . En lo que a condiciones de tormenta se refiere, era más factible que se alcanzasen esfuerzos de tensión en zonas de esfuerzos combinados de carga axial más momento flexionante, obteniéndose esfuerzos de tensión de hasta 300 Kg/cm^2 , y de 1600 Kg/cm^2 de esfuerzos de compresión.

Con base en toda la información y resultados obtenidos, debía de definirse la longitud máxima de soldadura con daños que puede aceptarse en la conexión superestructura-pilote.

Una primera aproximación se basó en que la unión soldada, aún con la presencia de defectos, debería ser capaz de transmitir en su totalidad los elementos mecánicos de la columna al pilote. Debido a que la soldadura tiene en general un módulo de elasticidad mayor que el material base, se puede obtener el área mínima de soldadura que equivalga al área de la sección transversal de la columna (o pilote) para transmitir, con los factores de seguridad correspondientes, los elementos mecánicos de tensión, compresión o cortante. Considerando que la longitud de soldadura que presenta defectos no contribuye a la capacidad de la unión, puede construirse una curva de



longitudes críticas con defecto (acumuladas o únicas) en la soldadura contra espesor de la conexión y diferentes esfuerzos de fluencia de la soldadura, como la que se muestra en la Figura 2.3.

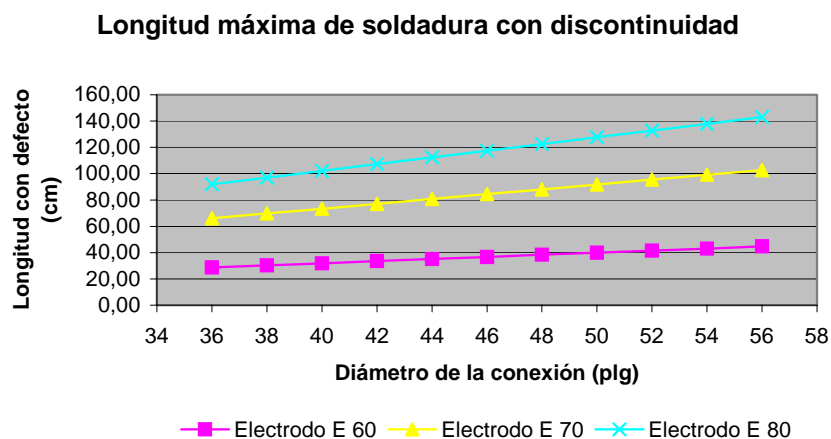


Figura 2.3. Longitud acumulada de soldadura defectuosa máxima admisible en una conexión soldada para cualquier diámetro y espesor de la conexión.

Por ultimo se consideró la discontinuidad como una grieta que puede crecer radialmente en el espesor de la unión. Se analizó entonces el comportamiento de una grieta radial pasante en un cilindro sometido al nivel de esfuerzos de tensión que se presentan en condiciones de tormenta en las conexiones superestructura–pilote de los octápodos de perforación, (300 Kg/cm^2), y se obtuvo la longitud máxima de una grieta radial pasante para diferentes diámetros y espesores de conexiones soldadas (Figura 2.4).

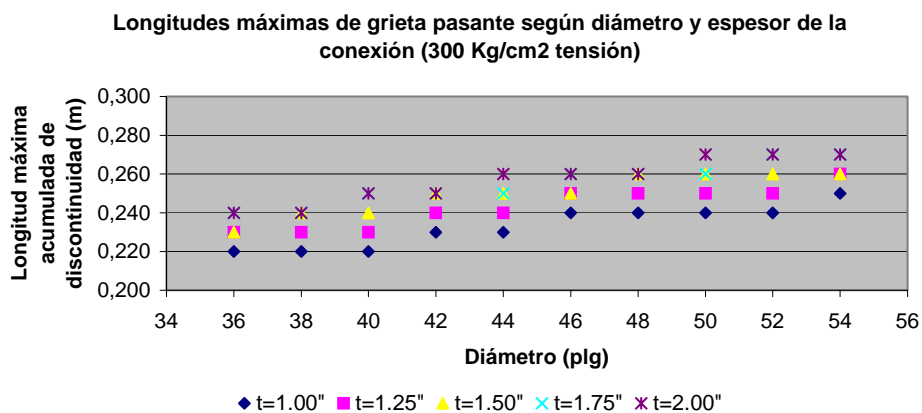


Figura 2.4. Curvas de longitudes máximas de grieta pasante radiales en las conexiones soldadas de superestructura – pilote.



Conclusiones

Los autores concluyeron que los esfuerzos máximos encontrados en los octápodos de perforación para condiciones de operación, no reportaron esfuerzos de tensión en la sección de la conexión soldada, debido a que las conexiones están sujetas a altas cargas verticales, disminuyendo así el efecto de los momentos flexionantes, en cambio para condiciones de tormenta, es posible encontrar esfuerzos de tensión en la conexión de hasta 300 Kg/cm^2 , pero aún para estos niveles de esfuerzo, no existen problemas de iniciación de una grieta radial e inestabilidad de la misma.

Por último conservadoramente, se realizó una unificación de las curvas de las Figuras 2.3 y 2.4 (tomando las curvas que permiten la menor longitud con daño) dando como resultado las curvas mostradas en la Figura 2.5.

Longitudes máximas de discontinuidad pasante y capacidad de la soldadura según diámetro de la conexión

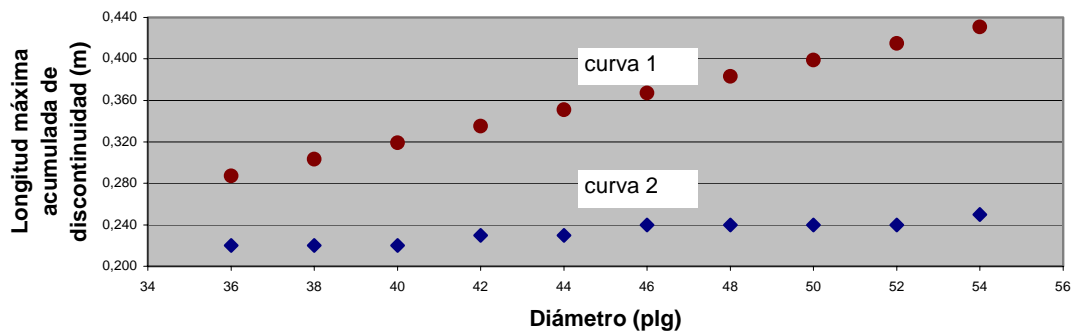


Figura 2.5. Longitudes máximas de discontinuidad según diámetro de la conexión.

De las curvas mostradas en la Figura 2.5 surgen las siguientes recomendaciones:

En general, al determinar la presencia de discontinuidades y sumar sus longitudes se podrán tener tres casos de longitud acumulada de soldadura con daño:

1. La longitud acumulada con discontinuidades es mayor a la longitud máxima admisible de la curva 1 mostrada en la Figura 2.5. En este caso se deberá reparar la longitud necesaria de soldadura defectuosa para ajustarse a la curva 1.



2. La longitud acumulada con discontinuidades no es mayor que la longitud máxima admisible de la curva 1 mostrada en la Figura 2.5, pero muestra indicaciones de crecimiento radial o longitudinal. La longitud de las discontinuidades, simple o acumulada deberá repararse para cumplir con la longitud máxima admisible de grieta radial pasante de la curva 2 de la Figura 2.5.
3. La longitud acumulada con discontinuidades no es mayor que la longitud máxima admisible de la curva 1 mostrada en la Figura 2.5, y no muestra indicaciones de crecimiento radial o longitudinal. La unión de soldadura no requiere ser reparada.

2.2 REPARACION EN CONDICIONES DE SERVICIO

La reparación de soldadura es un proceso que muchas veces puede resultar muy sencillo, por el hecho de que los defectos que puedan surgir son reparados inmediatamente después de realizada la soldadura o en caso de que la estructura se encuentra en servicio los esfuerzos en la zona a reparar son sustancialmente reducidos por disminución de las cargas o por medio de apuntalamientos.

En el caso de la reparación de la Conexión Superestructura-Pilote, es poco probable lograr reducir los esfuerzos en la conexión para poder reparar la soldadura, es por este motivo que se realizó una búsqueda de información en diversos institutos y centros de investigación en los cuales se han realizado estudios sobre el comportamiento de elementos estructurales en condiciones de servicio como en el caso de puentes, grúas, traveses, etc.

El Instituto de Investigación en Soldadura (Welding Research Institute), ahora Instituto de Investigación en Conexiones y Soldadura (Joining and Welding Research Institute) de la Universidad de Osaka, Japón, ha desarrollado trabajos de investigación sobre reparación con soldadura de elementos formados por placas y elementos cilíndricos, ante diferentes condiciones de carga, como de tensión, compresión y vibración.

A continuación se presentan de manera general tres de los trabajos realizados por la Universidad de Osaka, en los que se estudia la reparación con soldadura de placas sujetas a tensión y compresión constante y las investigaciones realizadas en reparaciones de columnas de sección circular sujetas a compresión axial.

2.2.1 SOLDADURA EN PLACAS BAJO TENSIÓN CONSTANTE

En los trabajos experimentales realizados por *Horikawa, Suzuki e Imi*^[6], realizados en 1983, se utilizó una placa de acero SS41 de 200 mm de ancho, 750 mm de longitud y 6 mm de espesor, con una ranura de 5 mm de ancho y 2 mm de profundidad. El objetivo de este experimento es verificar el estado de deformaciones de la placa cuando esta ranura se rellena con soldadura, así como analizar el estado de sanidad de la soldadura al efectuar la aplicación. El relleno de la ranura se efectuó bajo la aplicación de una carga constante de tensión.

El acero SS41 de especificación japonesa, es comparable con un acero ASTM A-36, de ahí que los resultados de esta investigación puedan ser ocupados como una primera aproximación al problema de reparación.

La configuración del procedimiento de prueba y de la pieza de prueba se muestra en la Figura 2.6.

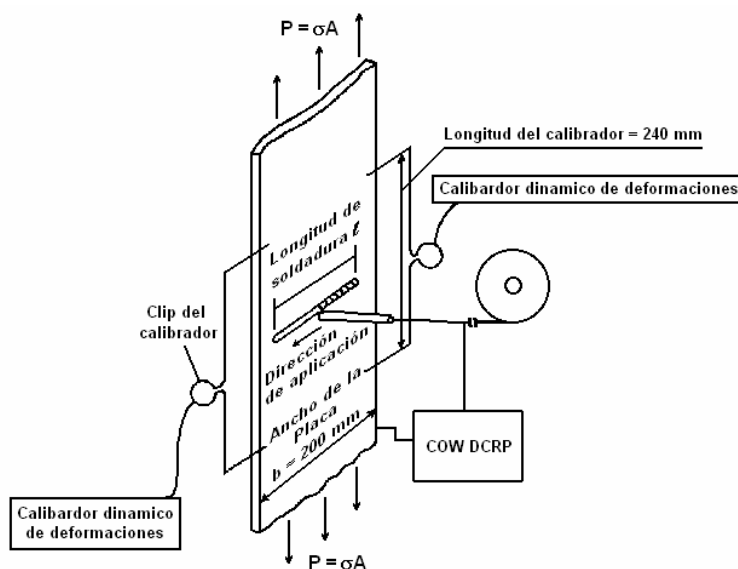


Figura 2.6. Configuración del procedimiento de prueba.

La carga aplicada de 16.8 ton que corresponde a un esfuerzo de 14 kg/mm^2 o 1400 kg/cm^2 que sería igual al 60% del esfuerzo de fluencia del material. Detalles adicionales sobre el procedimiento y electrodos de soldadura se pueden observar en la referencia.

Como se observa en la Figura 2.6, el desplazamiento sobre la placa se midió con un calibrador de deformaciones en una distancia de 240 mm entre puntos a cada lado de la sección soldada.



De los resultados obtenidos se observó:

1. Cuando la longitud de soldadura, l , es menor en comparación con el ancho de la placa, b , es decir $l/b < 0.5$, los extremos inicial y final de la soldadura se deforman de manera similar.
2. Cuando $l/b > 0.75$, la diferencia entre las deformaciones de los extremos es mayor, de tal forma que las deformaciones al final de la soldadura es de dos o mas veces mayor que en el extremo inicial de la soldadura.
3. Entre mayor sea la relación l/b , mayor será la elongación durante la aplicación de soldadura. Así como para mayor calor de soldadura aplicada, mayor es la deformación.

Para las piezas con preparación de filete y con $l/b = 1.0$, se presentaron grietas en la soldadura del orden de 70 mm de longitud en el extremo final sin importar la magnitud de calor empleada. En todos los casos, la localización de las grietas fue en el centro del cordón y longitudinales, estas grietas penetraron el espesor.

Las grietas ocurrieron antes de finalizar la soldadura y pueden considerarse como fracturas dúctiles en altas temperaturas.

De los resultados anteriores los investigadores concluyeron:

- Cuando $l/b = 1$, esto es, cuando la sección completa de la placa se solda casi simultáneamente, ocurrirán fracturas en la soldadura o grandes deformaciones, soldar en estas condiciones no es aplicable.
- Con $l/b < 0.5$, difícilmente ocurren deformaciones residuales después de soldar, bajo estas condiciones el trabajo de soldadura es aplicable.

Conclusiones

Los autores determinaron experimentalmente que para efectuar la operación en condiciones de deformaciones mínimas, se debe cumplir que la longitud de aplicación de soldadura debe ser menor de la mitad del ancho de la placa.

No hay que perder de vista que se trata de una placa sin curvatura y sin continuidad lateral y que por tanto carece de la continuidad y rigidez que proporciona un elemento cilíndrico, lo que daría resultados conservadores en nuestra aplicación. Por otro lado, habría que verificar si la profundidad de la ranura no es una variable que afecte los resultados dados por los autores. Los



autores no incluyeron la posibilidad de que sea necesario aplicar varios cordones de soldadura para realizar el relleno de la ranura en la placa, lo que a nivel de esfuerzos por temperatura puede ser un factor importante en la sanidad de la reparación.

Los resultados experimentales de esta investigación mostraron que cuando se aplica soldadura bajo esfuerzos de tensión se generan grietas debido a fracturamiento dúctil a altas temperaturas en los extremos finales de los cordones.

En las conexiones soldadas superestructura-pilote de plataformas fijas, se presentan esfuerzos de tensión únicamente en condiciones de tormenta, por lo que desde el punto de vista de esfuerzos y práctico, la reparación deberá efectuarse únicamente en condiciones de operación a fin de evitar la formación de grietas en la soldadura.

2.2.2 SOLDADURA EN PLACAS BAJO COMPRESIÓN CONSTANTE

Los trabajos de Suzuki y Horikawa^[7] en relación a la aplicación de soldadura en placas de acero SS41 sujetas a compresión, tienen una buena aproximación al problema de la reparación de la conexión superestructura pilote ya que esta se encuentra casi siempre sometida a esfuerzos de compresión.

En la Figura 2.7, se muestra la configuración de los especímenes de prueba, puede observarse que a diferencia de las pruebas de soldadura en placas a tensión, en estas pruebas no se realizaron ranuras en la placa y únicamente se aplica soldadura en el sentido transversal del espécimen, sobre la superficie de la placa. En la Tabla 2.2 se presentan las condiciones experimentales usadas en la investigación.

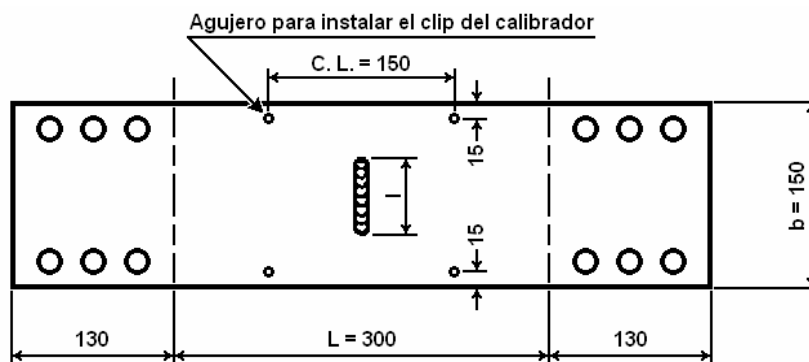


Figura 2.7. Configuración del espécimen de prueba.



Tabla 2.2. Condiciones experimentales de la placa en compresión.

Espécimen	Esfuerzo Aplicado (Kg/mm ²)	Longitud de soldadura normalizada, l/b
C-0	0	1.0
C-1	-7	1.0
C-2	-14	1.0
C-3	-14	0.5
C-4	-14	0.25
C-5	-14	0.1

Los especímenes fueron cargados hasta alcanzar las cargas descritas en la Tabla 2.2, de manera similar que el estudio anterior el esfuerzo máximo es aproximadamente el 60% del esfuerzo de fluencia del material, después, manteniendo este nivel de carga, se realizó la aplicación de soldadura, posteriormente se enfriaron a temperatura ambiente y se descargaron. Las deformaciones se midieron desde el inicio de la soldadura hasta la descarga.

De los resultados, los autores concluyeron lo siguiente:

1. La placa se pandea cuando la soldadura se desarrolla continuamente sobre un cuarto de su ancho con una carga externa de -14 Kg/mm². Para prevenir el pandeo, la longitud de soldadura debe dividirse en diez partes iguales para poder aplicarse.
2. El miembro puede soldarse continuamente sobre el ancho de la placa si el esfuerzo se reduce al 50%.

Conclusiones

La aplicación de este análisis experimental se aproxima a las condiciones de reparación de la soldadura de este trabajo, en el sentido del estado de esfuerzos existente en los elementos estructurales al aplicar la soldadura. Los efectos más importantes que deben considerarse al efectuar la reparación y que resultaron de la investigación son los efectos de la temperatura en la modificación de las características mecánicas del acero.

Los investigadores concluyeron que la placa se pandea cuando la soldadura se desarrolla en al menos un cuarto de su ancho, bajo una carga cercana al límite permisible de esfuerzos de diseño y que se puede prevenir el pandeo si la longitud de soldadura se divide en diez secciones, sin embargo, nuevamente no se incluye la condición de rigidez lateral de la placa, que en nuestro caso, está dada por la continuidad cilíndrica de la sección a reparar, y tampoco se considera el posible efecto que pueda causar el aplicar más de un cordón de soldadura.



Un resultado importante que puede considerarse es que la aplicación de soldadura no reportó problemas cuando el esfuerzo aplicado es del orden del 50% del esfuerzo permisible de diseño de la placa. Lo que demuestra la importancia de disminuir los esfuerzos en la zona de reparación.

2.2.3 SOLDADURA EN COLUMNAS CIRCULARES BAJO COMPRESIÓN AXIAL

En este trabajo experimental Suzuki y Horikawa^[8], estudian la estabilidad de elementos cilíndricos durante la adición de elementos de reforzamiento mediante soldadura y la capacidad del elemento para transmitir carga después de realizados los trabajos. Este estudio es el que tiene una mayor similitud con la geometría de la conexión ya que se trata de elementos circulares y a su vez se encuentran sometidos a esfuerzos de compresión.

Durante la aplicación de soldadura en un elemento sujeto a fuerzas de compresión cercanas a los límites de fluencia, se puede perder la estabilidad global del elemento, debido a que al soldar, en la zona donde es inducido calor se reduce el modulo de elasticidad y por consiguiente la rigidez y la capacidad de carga del elemento; la capacidad de carga después de los trabajos de soldadura también se reduce debido a las deformaciones causadas por la soldadura y a la adición de esfuerzos residuales.

En este estudio se emplean dos tipos de columnas, una de 216.3 mm de diámetro, 5.8 mm de espesor y 1600 mm de longitud denominada columna corta (tipo B) y otra de 48.6 mm de diámetro, 2.4 mm de espesor y 1600 mm de longitud denominada columna larga (tipo C). Ambos especímenes son de acero con una resistencia a la tensión de 410 MPa, denominado STK 41, este acero es comparable con un ASTM A-252 grado 2.

El desarrollo experimental consiste en adicionar refuerzos soldados en dos distintas direcciones, paralelos a la línea de carga, usando un cartabón y transversalmente a esta mediante un anillo externo, como se muestra en la Figura 2.8. Las condiciones de los experimentos se muestran en la Tabla 2.3, en donde se detalla la magnitud de la carga a aplicarse en cada espécimen.

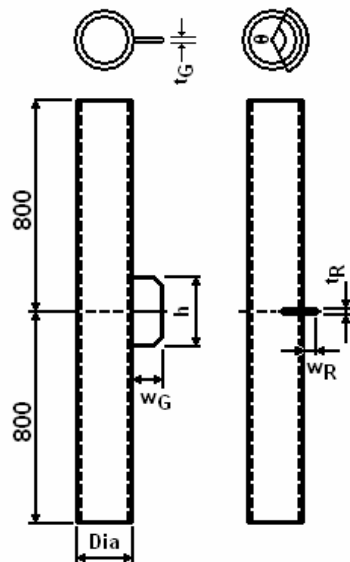
Tabla 2.3. Condiciones experimentales.

Refuerzo	$\sigma_n = 0$ MPa	$\sigma_n = 80$ MPa	$\sigma_n = 100$ MPa	$\sigma_n = 160$ MPa	$\sigma_n = 240$ MPa
Cartabón (Gusset plate)	B-1-0			B-1-A	B-1-Y
Anillo de Ref. (Ring S.)	B-2-0			B-2-A	B-2-Y
Cartabón (Gusset plate)	C-1-0	C-1-H	C-1-S	C-1-A	
Anillo de Ref. (Ring S.)	C-2-0	C-2-H	C-2-S	C-2-A	



donde:

B = Diámetro = 216.3 mm	0 = 0 MPa
C = Diámetro = 48.6 mm	H = 80 MPa
1 = Cartabón	S = 100 MPa
2 = Anillo de refuerzo	A = 160 MPa
	Y = 240 MPa



Dia (mm)	t _G (mm)	h (mm)	w _G (mm)	t _R (mm)	w _R (mm)	θ (°)
216.3	9	200	100	9	50	120
48.6	9	150	50	9	30	120

Figura 2.8. Configuración del cartabón y del anillo de Refuerzo^[6].

Primero se cargaron los especímenes al nivel prescrito, después se soldó el cartabón o el anillo de refuerzo, se mantuvo la carga durante 20min después de soldar y por último se descarga el elemento.

De los resultados se observó que las columnas cortas mostraron buena estabilidad durante la aplicación de soldadura en ambos casos de refuerzo, en todas las cargas aplicadas, mientras que las columnas largas comenzaron a perder estabilidad y mostraron una deflexión al soldar el anillo de reforzamiento en cargas menores a las de las columnas cortas.

Se realizó un análisis para calcular la carga crítica de la columna al ser reforzada. La longitud perimetral que fue soldada y con la que se observó inestabilidad fue del 25% del perímetro de la sección transversal de la tubería, ver Figura 2.9.

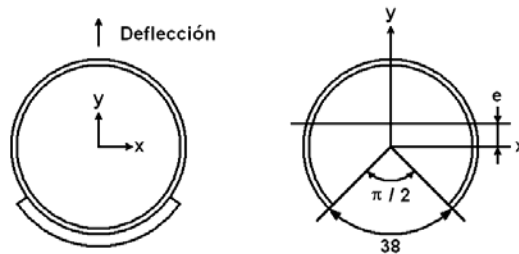


Figura 2.9. Dirección de la deflexión y modelo analítico de las columnas largas con anillo de refuerzo.

La sección en la que fue soldado el anillo de reforzamiento mostró un incremento elevado en la temperatura por lo que se consideró que esta parte dejaba de trabajar y por lo tanto se despreció, con esto se genera una excentricidad en la aplicación de la carga.

La carga que puede soportar la columna fue evaluada con la fórmula de la secante:

$$\sigma = \frac{P}{A} \left(1 + \frac{e}{k'} \sec \left(\frac{L}{2r} \sqrt{\frac{P}{EA}} \right) \right) \quad (2.1)$$

donde:

- P = carga externa
- A = área de la sección transversal
- e = excentricidad
- k' = radio central
- L = longitud efectiva de arriostamiento
- r = radio de giro
- E = modulo de elasticidad

Si $|\sec \theta| \geq 1$, entonces sustituyendo en la Ec. (2.1) y considerando que $\sigma = \sigma_y$ tenemos

$$P \leq \frac{\sigma_y * A}{\frac{e}{k'} + 1} \quad (2.2)$$

Esta expresión puede dar una buena aproximación de la carga aceptable para evitar la inestabilidad, pero un factor mas se añade al problema, la temperatura no solo afecta la zona de la soldadura sino que se conduce a través de la pieza, por lo que se dispuso medir la temperatura a ciertas distancias del punto de aplicación de la soldadura. Las condiciones de aplicación de



soldadura pueden verse en la referencia. En la Figura 2.10 se muestra la localización de los medidores de temperatura.

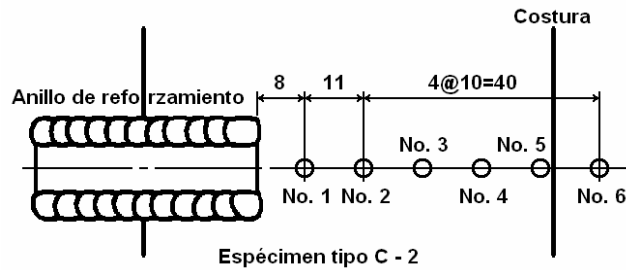


Figura 2.10. Localización de los medidores de temperatura [6].

Se observó que de los medidores del 1 al 3 se obtiene una temperatura de alrededor de 170°C y que de los medidores 4 al 6 una temperatura de alrededor de 100°C; por simplificación se tomó una media de 150°C.

Del mismo documento se hace referencia a un estudio realizado al acero SS41^[9], en el cual se establece la dependencia de las propiedades mecánicas del material con respecto a la temperatura, se establece que para una temperatura de 150°C la fluencia de este acero se reduce a un 75% del normal, mientras que el módulo de elasticidad se reduce a un 85% de su valor a temperaturas normales.

Como en la Ec. (2.2) el módulo de elasticidad no está incluido pero se sabe que $EA = \text{constante}$, entonces

$$(0.85 \times E) \times A = E \times (0.85 \times A) \quad (2.3)$$

En consecuencia la Ec. (2.2) queda

$$P \leq \frac{(0.75 * \sigma_y) * (0.85 * A)}{\frac{e}{k'} + 1} \quad (2.4)$$

En la expresión anterior, se incluye el efecto de la temperatura en la evaluación de la carga crítica de la columna.



Los autores concluyeron que las columnas cortas soportan muy bien las cargas aplicadas ya sea soldando los cartabones o los anillos de refuerzo no presentando inestabilidad, mientras que en el caso de las columnas largas presentan inestabilidad en cargas mas bajas y sobre todo al soldar transversalmente, esto debido a que al soldar, la temperatura reduce el modulo de elasticidad y la fluencia del material, disminuyendo el área efectiva de trabajo.

Conclusiones

En esta evaluación tuvo como objetivo, determinar las condiciones de carga axial considerando la distribución de calor en un elemento cilíndrico al que se va a reforzar mediante un anillo rigidizante o un cartabón.

Los resultados de este estudio, hacen evidente considerar los siguientes puntos:

1. La necesidad de evaluar la distribución de temperatura en la zona de la reparación durante el proceso de aplicación de soldadura, debido a que se disminuyen las características mecánicas del material.
2. La necesidad de considerar la excentricidad que se produce al remover material en la zona a reparar.

2.2.4. CONCLUSIONES GENERALES

Los tres trabajos expuestos dan un primer acercamiento a la visualización del problema de la reparación, en un enfoque mas general, es decir en la estabilidad global del elemento al ser reparado.

En el primero se habla de la importancia de las deformaciones de una placa al ser soldada cuando tiene una ranura y es sometida a tensión, las deformaciones se vuelven función directa de la longitud que es soldada, es decir, el área que no es afectada por la soldadura debe de ser capaz de absorber los esfuerzos y deformaciones dentro de un rango admisible, porque de lo contrario estos esfuerzos y deformaciones se vuelven demasiado grandes y ponen en riesgo la estabilidad e integridad de la placa.

En el segundo trabajo una placa de dimensiones similares, pero en esta ocasión sin ranura, es sometida a esfuerzos de compresión, al igual que en caso anterior lo que se busca es un longitud



mínima de afectación de la placa que garantice que el resto del material sea capaz de transmitir satisfactoriamente los esfuerzos.

Lo más notable de estos trabajos, es que en los dos se emplean placas, y en el caso de la conexión superestructura-pilote son elementos tubulares, los cuales se comportan de manera diferente ya que tienen la ventaja de la continuidad que adquieren a lo largo de su perímetro y además estos tienen un mayor momento de inercia, que en el caso de someter a compresión el elemento este puede soportar una mayor carga aun utilizando la misma área transversal que el de la placa.

El tercer estudio desarrolla más similitud con el trabajo aquí desarrollado, porque se utilizan elementos cilíndricos. En este estudio es evidente el enfoque que se le da a la reducción de las propiedades mecánicas del material por efecto de la temperatura, las cuales afectan de manera importante la estabilidad y capacidad de carga del elemento. Por lo anterior desarrollaron un proceso de análisis, a partir de la excentricidad generada por el material que supone que deja de contribuir a la rigidez del elemento y así calcular la capacidad de carga real del elemento.

Entonces basados en estos estudios expuestos, podemos determinar que la ranura no deberá ser mayor al 10% del perímetro de la conexión y que es necesario evaluar los efectos de la temperatura ya que esta afecta directamente en las propiedades mecánicas del acero.



Capítulo 3

ASPECTOS TEÓRICOS DE MODELACIÓN

Actualmente las estructuras pueden tomar una gran diversidad de formas, sujetas a su vez a diversas fuentes de sollicitación mecánica y condiciones de apoyo, para efectuar revisiones estructurales de estos sistemas, es común idealizar su comportamiento mecánico y hacer uso de elementos mas sencillos para representar la interacción entre sollicitaciones, propiedades mecánicas del sistema y transmisión de efectos a los apoyos.

Se han propuesto diversos métodos de análisis estructural, uno de los mas recientes y de mayor aceptación es el Método de los Elementos Finitos, que por la magnitud de operaciones para solucionar el sistema numérico que representa al problema físico, se usa exclusivamente a través de programas de computo para facilitar su aplicación, sin embargo, para obtener resultados adecuados es indispensable conocer sus fundamentos.

En este capitulo se da una breve explicación de los fundamentos que sustentan al Método de los Elementos Finitos y de su aplicación a la resolución de análisis de esfuerzos y distribución de temperatura, los cuales serán de vital importancia para el desarrollo del siguiente capítulo.

3.1 EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El Método de los Elementos Finitos (MEF) puede definirse como un método numérico para resolver problemas de ingeniería y física. En un principio se aplicó a problemas de análisis de



esfuerzos y se ha aplicado subsecuentemente a otros problemas de medios continuos. En todas las aplicaciones se busca calcular un campo de cantidades: en el análisis de esfuerzos se busca el campo de desplazamientos o de deformaciones; en el análisis térmicos el campo de temperaturas; y así sucesivamente. Los resultados de mayor interés normalmente son los valores máximos del campo de cantidades resultantes o sus gradientes.

Una descripción general del MEF involucra el cortar una estructura en varios elementos, describiendo el comportamiento de cada elemento de una manera simple y reconectándolos mediante *nodos*, como si estos fueran los puntos que los mantienen unidos a los elementos (Figura 3.1). Este proceso produce un juego de ecuaciones algebraicas simultáneas. En un análisis de esfuerzos, estas ecuaciones son ecuaciones de equilibrio de los nodos y puede haber varios centenares o miles de ecuaciones por lo que se vuelve imprescindible el uso de sistemas poderosos de cómputo.

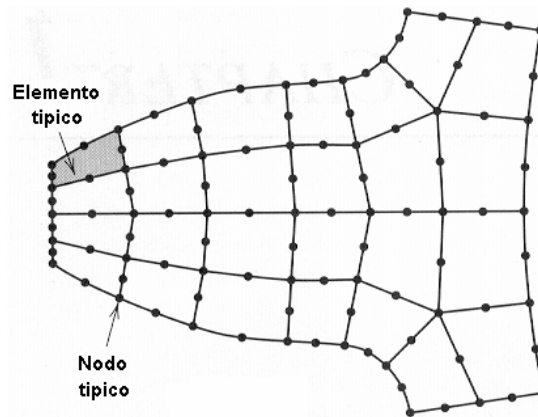


Figura 3.1. Forma de la malla de elementos finitos de un diente de engrane en dos dimensiones.

Una descripción más sofisticada del MEF lo considera como una interpolación polinómica de intervalos discretos. Esto es, un campo de cantidades como lo es el desplazamiento sobre un elemento, se interpola de los valores del campo de cantidades de los nodos. Conectando los elementos, el campo de cantidades se interpola sobre la estructura entera en intervalos discretos, por tantas expresiones polinómicas como elementos. Los mejores valores del campo de cantidades en los nodos son aquellos que minimizan alguna función, como la energía total. El proceso de minimización genera un juego de ecuaciones algebraicas simultáneas para los valores de la cantidad de campo en los nodos. El simbolismo de la matriz para este sistema de ecuaciones es $\mathbf{KD} = \mathbf{R}$ donde \mathbf{D} es un vector desconocido (los valores de la cantidad del campo en los nodos), \mathbf{R} es un vector de cargas conocidas, y el \mathbf{K} es una matriz de constantes conocidas. En el análisis de esfuerzos \mathbf{K} es conocida como la matriz de rigideces.



El poder del MEF se basa en su versatilidad, la estructura a analizar puede tener una forma arbitraria, apoyos arbitrarios, y cargas arbitrarias, tal generalidad no existe en los métodos analíticos clásicos. Por ejemplo, el cálculo de esfuerzos por temperaturas inducidas es normalmente difícil de analizar con los métodos clásicos, aún cuando la geometría de la estructura y la temperatura tengan una configuración relativamente simple. El MEF trata los esfuerzos termales tan fácilmente como esfuerzos inducidos por carga mecánica, y la propia distribución de temperatura puede calcularse por medio del MEF.

La teoría del MEF incluye la manipulación de matrices, integración numérica, resolución de ecuaciones, y otros procedimientos llevados a cabo automáticamente por algún programa comercial, el usuario sólo puede ver indicaciones de estos procedimientos como procesamiento de datos del programa, en cambio, el usuario trata principalmente con las interfaces del *preprocesador* (describiendo las cargas, apoyos, los materiales, y generando la malla de elementos finitos) y el *postprocesador* (ordenando los resultados, listados y despliegue de resultados). La facilidad con la que se emplean el preprocesador y el postprocesador es muy útil para el usuario, pero esto no se relaciona con la exactitud de resultados. Por eso es importante tener énfasis en saber cómo usar el MEF propiamente y no cómo usar el preprocesador y el postprocesador de un programa de computó.

3.1.1 LOS ELEMENTOS Y LOS NODOS

Los elementos finitos representan fragmentos de la estructura. Los nodos aparecen en los límites del elemento y sirven como conectores que unen los elementos. En la Figura 3.2a, los elementos son las áreas triangulares o cuadriláteras y los nodos son indicados por los puntos.

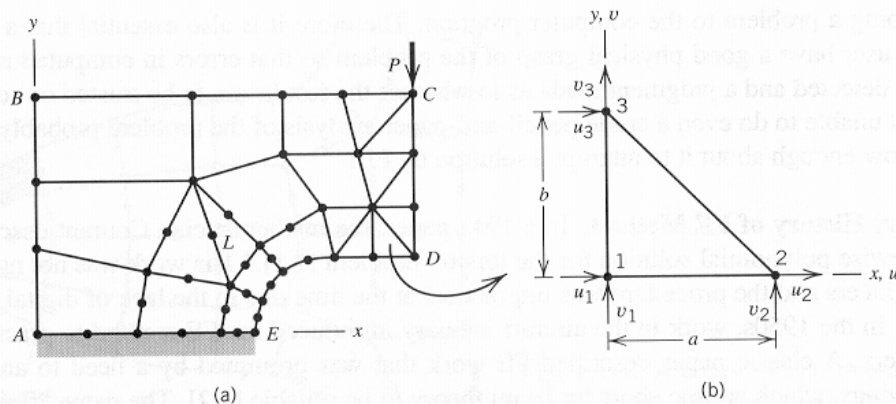


Figura 3.2. (a) Sección plana modelada con varios tipos de elementos (mas de los que se usarían en un análisis real) (b) Uno de los elementos, un “triángulo de deformación constante”. Todos los nodos y elementos coinciden en el plano del papel.



Salvo los nodos que se encuentran a la mitad de los lados de los elementos a lo largo de las líneas AED y nodos A, B, y E, cada nodo actúa como un conector entre dos o más elementos. Todos los elementos que comparten un nodo tienen los mismos componentes de desplazamiento en ese nodo. Las líneas en el Figura 3.2a indican los fronteras entre elementos, así vemos elementos con nodos únicamente en las esquinas y elementos con nodos laterales (tal mezcla de tipos de elementos no es necesaria ni común, solo se usa con fines ilustrativos).

Superficialmente, parecería que una estructura de elementos finitos puede producirse cortando la estructura real en partes y después uniendo las partes por los nodos. Claramente, tal ensamble sería débil y no representativo de la estructura real debido a las concentraciones de deformaciones en los nodos, deslizamientos entre uno y otro elemento, e incluso huecos que aparecerían entre algunos elementos. Para evitar estos defectos y permitir la convergencia hacia resultados exactos según se incremente el número de elementos usados en el modelo de Elementos Finitos (EF), cada elemento se restringe en su modo de deformación.

Considerando el elemento triangular plano en la Figura 3.2b. No importa que el origen de coordenadas se haya movido de su posición en el Figura 3.2a, las componentes de desplazamiento en las direcciones x y y de un punto arbitrario dentro del elemento son denominadas u y v . En el elemento triangular de tres nodos cada nodo se restringe para crear un polinomio lineal en x y y :

$$u = \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 y \quad (3.1a)$$

$$v = \beta_4 + \beta_5 x + \beta_6 y \quad (3.1b)$$

donde las β_i son llamadas “**coordenadas generalizadas**”. Estas pueden considerarse como las amplitudes del desplazamiento. Como ejemplo, en Ec. 3.1a, β_1 es la amplitud de desplazamiento del cuerpo rígido y β_2 y β_3 son las amplitudes de la variación lineal del desplazamiento, todas en la dirección x . Una forma alternativa de las Ecs. 3.1a y 3.1b pueden ser escritas expresando β_i en términos de los desplazamientos nodales, $u_1, v_1, u_2, v_2, u_3, y v_3$. Para el elemento de la Figura 3.2b se hacen las siguientes substituciones en Ecs. 3.1a y 3.1b:

$$\begin{aligned} u &= u_1 \quad y \quad v = v_1 \quad \text{en} \quad x=0 \quad y \quad y=0 \\ u &= u_2 \quad y \quad v = v_2 \quad \text{en} \quad x=a \quad y \quad y=0 \\ u &= u_3 \quad y \quad v = v_3 \quad \text{en} \quad x=0 \quad y \quad y=b \end{aligned} \quad (3.2)$$

Así, para el elemento en el Figura 3.2b, las ecuaciones alternativas de las Ecs. 3.1a y 3.1b se unen para ser:



$$u = \left(1 - \frac{x}{a} - \frac{y}{b}\right)u_1 + \frac{x}{a}u_2 + \frac{y}{b}u_3 \quad (3.3a)$$

$$v = \left(1 - \frac{x}{a} - \frac{y}{b}\right)v_1 + \frac{x}{a}v_2 + \frac{y}{b}v_3 \quad (3.3b)$$

De cualquier forma, en las Ecs. 3.1 o 3.3, el campo del desplazamiento $u = u(x, y)$ y $v = v(x, y)$ tiene seis **grados de libertad** (GDL). Es decir, seis cantidades que definen la configuración deformada, a saber, las seis β_i en Ecs. 1 o los tres u_i y tres v_i en las Ecs. 3.3. Considerando que las deformaciones son gradientes de desplazamiento. Por consiguiente:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{entonces} \quad \varepsilon_x = \beta_2 \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{entonces} \quad \varepsilon_y = \beta_6 \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad \text{entonces} \quad \gamma_{xy} = \beta_3 + \beta_5 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Este elemento de tres nodos se llama “**triángulo de deformación constante**” porque ninguna de las deformaciones varía en el elemento^[10]. Esto significa que el elemento tiene una respuesta muy limitada pero no habrá ninguna concentración de deformaciones por lo menos en los nodos. También, de las Ecs. 3.3a y 3.3b se puede concluir que los lados del elemento permanecerán rectos después de la deformación. Por ejemplo, fijando $x = 0$ examinando el lado 1-3 en la Figura 3.2b; así u es lineal en y y sólo depende de los GDL u_1 y u_3 . Lo mismo sucederá a lo largo de este lado en el elemento adyacente, porque los lados deformados permanecen rectos, los elementos tendrán una separación o traslape cuando la carga sea aplicada. De manera similar, se puede mostrar que v a lo largo de lado 1-3 es lineal en y y sólo depende del v_1 y v_3 . Es posible demostrar que el elemento triangular puede desplegar los estados de deformación constante y se deformará en cierto modo que sea compatible con sus vecinos. Puede mostrarse que estas propiedades permiten aproximarse a resultados más exactos en cuanto una malla sea más y más refinada; es decir, cuando se utilizan cada vez más elementos para modelar una estructura.

También se puede considerar un triángulo del seis nodos, como el elemento L en la Figura 3.2a. Tiene un nodo en cada uno de los vértices y un nodo a la mitad de cada lado. En términos de coordenadas generalizadas β_i , su campo de desplazamiento es:



$$\begin{aligned}u &= \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 y + \beta_4 x^2 + \beta_5 xy + \beta_6 y^2 \\u &= \beta_7 + \beta_8 x + \beta_9 y + \beta_{10} x^2 + \beta_{11} xy + \beta_{12} y^2\end{aligned}\tag{3.5}$$

Las formas deformadas de lados pueden ser rectas o parabólicas. Algebraicamente se muestra que la forma deformada de un lado depende de los GDL de los nodos adjuntos a ese lado pero no depende de los GDL de los nodos no adjuntos a ese lado. De acuerdo con lo anterior el elemento será compatible con sus vecinos porque los elementos adyacentes comparten los mismos nodos y GDL a lo largo de un lado común. Aplicando la diferenciación usada en Ecs. 3.4, puede verse que el elemento de seis nodos contiene términos lineales y constantes en su campo de deformación. Por lo tanto este elemento puede modelar los estados de deformación constante y también estados de deformación lineal que surgen en flexión pura. Claramente, es un elemento más competente que el triángulo de deformación constante. Por tanto es decisión del usuario del MEF definir si usa muchos elementos simples o pocos elementos mas elaborados.

La discusión anterior se apoya en la terminología de análisis de esfuerzos. En el análisis de esfuerzos planos el campo del desplazamiento es un campo vectorial porque tiene dos componentes, $u = u(x, y)$ y $v = v(x, y)$. En otras aplicaciones el campo puede ser un campo escalar $\phi = \phi(x, y)$ en problemas bidimensionales y $\phi = \phi(x, y, z)$ en problemas tridimensionales donde ϕ representa la temperatura en un problema de conducción de calor, voltaje en un problema de campo eléctrico, y así sucesivamente. Restablecer las ecuaciones anteriores en términos de campo escalar, implica desechar las ecuaciones que contienen v y reemplazar u por ϕ en las ecuaciones restantes.

Las Ecs. 3.1 y 3.5 constituyen “**la base de un elemento finito**”. Lo que resta es manipular la base para generar una matriz de rigidez que describe la conducta del elemento, conectar los elementos para producir el modelo de EF, aplicar cargas, imponer condiciones de apoyo, resolver para los GDL nodales, y usar los GDL para calcular las deformaciones y finalmente esfuerzos. Algunos de estos procedimientos son principalmente computacionales y otros requieren que el analista tome decisiones.

3.1.2 CLASIFICACIÓN DE PROBLEMAS DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS

Los elementos triangulares resumidos arriba son usados para problemas planos en los que la variación del desplazamiento y esfuerzo en la dirección de z es despreciable, es decir, en la dirección normal al plano de análisis. Si los desplazamientos y esfuerzos pueden variar de una



manera general en tres coordenadas, el objeto puede llamarse *sólido 3D* (Figura 3.3). El caso especial de un sólido con simetría axial (como una campana) normalmente se llama un *sólido de revolución*. Las cargas pueden ser o no axialmente simétricas. Una placa plana que conduce cargas en el plano es un problema plano, pero si la placa es cargada lateralmente, de tal forma que se flexiona, es llamado un *problema de flexión de placa* o simplemente un *problema de placa*. Las losas de piso son ejemplos de placas. Debe notarse que el espesor debe ser mucho menor que el claro para que el objeto pueda analizarse como una placa. Si una placa es curva entonces se vuelve un *cascarón*. Los tanques de agua y tanques de aire comprimido son ejemplos comunes de cascarones. Los cascarones pueden llevar cargas en el plano y cargas laterales; así la deformación plana y la deflexión normalmente aparecen simultáneamente en un cascarón. Se han desarrollado los elementos para todos estos problemas. Así hay elementos planos, elementos sólidos generales, elementos sólidos axisimétricos, elementos placa, y elementos cascarón. Además existen elementos para barras y vigas y muchos elementos especiales para cimentaciones elásticas, puntas de grieta, flexiones de tubería, y otros^[10].

El tipo de elemento que puede ser usado para realizar los análisis estructurales en esta tesis, es un elemento de tipo sólido 3D como el que se muestra en la Figura 3.3.

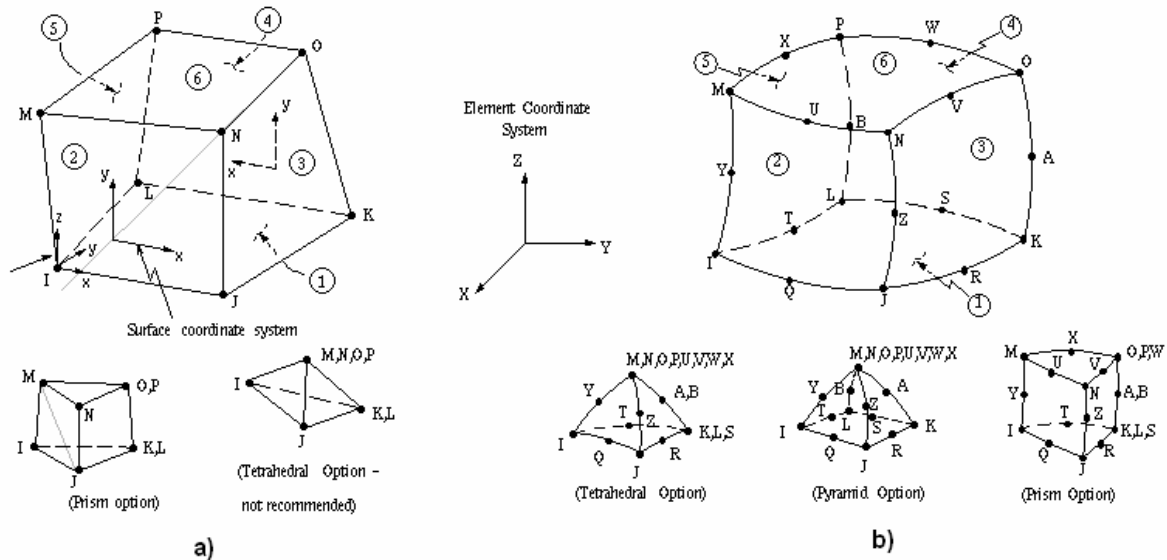


Figura 3.3. (a) Elemento de tipo sólido estructural 3D de ocho nodos (Elemento SOLID45 en el programa ANSYS 5.6) (b) Elemento de tipo sólido estructural 3D de veinte nodos (Elemento SOLID95 en el programa ANSYS 5.6).

En ambos elementos es posible obtener valores de desplazamientos y deformaciones (elásticas y plásticas), así como cantidades derivadas de estos resultados como lo son los esfuerzos.



Los dos elementos de la Figura 3.3 tienen geometrías muy similares, es decir, se asemejan a un cubo, la diferencia radica en el número de nodos con los que cuentan cada uno, en la Figura 3.3a el elemento cuenta únicamente con ocho nodos, uno en cada esquina, mientras que el elemento de la Figura 3.3b cuenta además de los ocho nodos de esquina del elemento anterior, con un nodo a la mitad de cada lado, para dar un total de 20 nodos.

Existen dos diferencias básicas en cuanto a la utilización de uno u otro elemento en función del número de nodos, la primera, es que al contar con más nodos el elemento pueda sufrir una mayor distorsión tanto de sus lados como de su forma, es decir, al realizar la malla de elementos finitos, los elementos no siempre son formados con cubos perfectos, sino que sufren cierta distorsión para adaptarse lo más posible a la forma de la pieza a analizar.

En la Figura 3.3a los lados del elemento permanecerán rectos, y por lo tanto los valores de los desplazamientos y deformaciones serán interpolados linealmente desde los desplazamientos y deformaciones de los nodos, mientras que en la Figura 3.3b al contar con un nodo a la mitad de cada lado, la interpolación se vuelve cuadrática, lo que resulta en mejores resultados cuando se trata de superficies curvas como cilindros y contornos circulares, como el caso del diente de engrane de la Figura 3.1 solo que en tres dimensiones.

La segunda diferencia y quizás la más limitante es que cada nodo de estos elementos cuenta con seis GDL lo que agrega seis ecuaciones de equilibrio a la matriz de rigidez por cada nodo que se le agregue al elemento, esto hace que la matriz de rigidez del elemento crezca mucho y por lo tanto se necesitan mayores recursos computacionales para poder resolverla, por lo que el tipo y cantidad de elementos a utilizar queda restringido a la capacidad de la computadora.

3.2 ANÁLISIS TÉRMICOS

Es bien conocido en la literatura estructural, que la temperatura y los gradientes de temperatura son una causa importante de generación de esfuerzos. El “análisis térmico” se refiere al cálculo de distribución de temperaturas en un cuerpo sólido. El producto de este cálculo es la información referente a la magnitud y dirección del flujo de calor en el cuerpo.

3.2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor consiste en complementar el análisis termodinámico, el cual considera únicamente sistemas en equilibrio, con leyes adicionales que permiten predicciones en las tasas de



tiempo de la transferencia de energía. Los tres modos fundamentales de transferencia de calor son: conducción, convección y radiación^[11].

3.2.1.1 CONDUCCIÓN

Un gradiente de temperatura dentro de una sustancia homogénea ocasiona una tasa de transferencia de energía dentro del medio que puede ser calculada por:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3.6)$$

Donde $\partial T / \partial n$ es el gradiente de temperatura en la dirección normal a un área de exposición A . La conductividad térmica k , es una constante experimental para el medio de referencia, y puede depender de factores como la temperatura y la presión. Las unidades de k son Btu/hr-pie-°F ó W/m-K.

El signo menos en la Ley de Fourier (Ec. 3.6), es necesario debido a la segunda ley de la termodinámica: la energía térmica de transferencia que resulta del gradiente térmico se efectúa de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura.

Si el perfil de temperatura dentro del medio es lineal, se puede reemplazar el gradiente de temperatura con:

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad (3.7)$$

Esta linealidad siempre existe en un medio homogéneo de k fija durante el estado estacionario de la transferencia de calor.

El estado estacionario de transferencia se presenta siempre que la temperatura dentro del cuerpo y en cada punto, incluyendo las superficies, sea independiente del tiempo. Si la temperatura varía con el tiempo, la energía es acumulada o entregada por el cuerpo. La tasa de esta acumulación es

$$q_{acum} = mc_p \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.8)$$

Donde la masa m es el producto del volumen V y la densidad r .



3.2.1.2 CONVECCIÓN

Siempre que un cuerpo sólido se pone en contacto dentro de un fluido en movimiento que posee una temperatura diferente a la del cuerpo, la energía es transportada mediante convección por el fluido.

Si la temperatura más alta de la corriente del fluido es T_{∞} y la temperatura de la superficie del sólido es T_s , la transferencia de calor por unidad de área está dada por la fórmula:

$$q = hA(T_s - T_{\infty}) \quad (3.9)$$

Conocida como la ley de enfriamiento de Newton. Esta ecuación define el coeficiente de convección de la transferencia térmica h , como la constante de proporcionalidad entre la transferencia de calor por unidad de tiempo y unidad de área y la diferencia total de temperatura. Las unidades de h son Btu/hr-pie²-°F ó W/m²-K. Es importante recordar que el intercambio fundamental de energía en la superficie de contacto entre el fluido y el cuerpo se efectúa por conducción, y que esta energía es transportada luego por convección por el flujo del fluido. Comparando (3.6) con (3.9), obtenemos para $n = y$,

$$hA(T_s - T_{\infty}) = -kA \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_s \quad (3.10)$$

Donde el subíndice del gradiente de temperatura indica que éste se calcula en la superficie del fluido.

3.2.1.3 RADIACIÓN

La tercera manera de transmisión de calor se debe a la propagación de las ondas electromagnéticas, la cual se puede presentar en el vacío por completo así como en un medio cualquiera. La evidencia experimental muestra que la transferencia de calor radiante es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta, mientras que la convección y la conducción son proporcionales a una diferencia lineal de temperatura. La ley fundamental de Stefan-Boltzmann establece que:



$$q = \sigma AT^4 \quad (3.11)$$

Donde T corresponde a la temperatura absoluta. La constante s es independiente de la superficie, del medio y de la temperatura; su valor es $0.1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/hr-pie}^2\text{-}^\circ\text{R}^4$ ó $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{-K}^4$.

3.2.1.4 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE SÓLIDOS

La conductividad térmica de la fase sólida de un metal de composición conocida, depende principalmente de la temperatura^[11]. En general, para un metal puro k , disminuye con la temperatura; las aleaciones tienden a invertir este comportamiento.

La conductividad térmica de un metal generalmente puede ser representada sobre un amplio rango de temperaturas por:

$$k = k_0(1 + b\theta + c\theta^2) \quad (3.12)$$

Donde $\theta = T - T_{ref}$ y k_0 es la conductividad a la temperatura de referencia T_{ref} . Para rangos de temperatura pequeños, se puede omitir el término cuadrático de la Ec. 3.12.

El calor específico de una sustancia es la medida de la variación de energía almacenada en relación con la temperatura, los dos más importantes son:

$$\begin{aligned} \text{Calor específico a volumen constante } c_v &= \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v \\ \text{Calor específico a presión constante } c_p &= \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p \end{aligned} \quad (3.13)$$

Aquí u es la energía interna por unidad de masa y h es la entalpía (calor asociado a una reacción). En general, u y h son funciones de dos variables: temperatura y volumen específico, y temperatura y presión, respectivamente. Para sustancias incompresibles, c_p y c_v son numéricamente iguales. Las unidades de c_p y c_v son $\text{Btu/lbm-}^\circ\text{F}$ ó J/Kg-K .

Para sólidos, los valores de los calores específicos dependen débilmente de la temperatura y son aún menos afectados por la presión.



Una combinación de términos bastante útil es la difusividad térmica α , definida por:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (3.14)$$

Se puede ver que α es la relación entre la conductividad térmica y la capacidad térmica del material. Sus unidades son pie^2/hr o m^2/s . La energía térmica se difunde rápidamente a través de sustancias con alta α y lentamente a través de sustancias con baja α [11].

3.2.2 ANÁLISIS DE TÉRMICOS CON ELEMENTOS FINITOS

El análisis térmico con elementos finitos puede dividirse genéricamente en tres áreas principales: (1) transferencia estacionaria de calor, es decir transferencia de calor independiente del tiempo, (2) transferencia de calor transitoria y (3) desplazamiento y esfuerzos inducidos térmicamente.

Las ecuaciones matriciales gobernantes para la *conducción en estado estable* son bastante simples. El conjunto básico de ecuaciones matriciales que gobiernan la *conducción simple* pueden tomarse de la relación de Laplace. El conjunto de ecuaciones matriciales es:

$$y = b [C]\{T\} = \{Q\} \quad (3.15)$$

donde:

$[C]$ = matriz de conductividad global del material

$\{T\}$ = vector nodal de temperatura.

$\{Q\}$ = vector nodal de flujo de calor, es decir, de cargas térmicas.

Aunque el flujo de calor se produce a través de la frontera del elemento, se establece en cargas nodales de la misma manera en que se establece la presión distribuida en fuerzas nodales.

La conductividad térmica y otras propiedades pueden depender fuertemente de la temperatura, de tal manera que $[C]$ en la Ec. 3.15 debe referirse como una función de la temperatura en lugar de una matriz de constantes. Entonces, el problema se convierte en no lineal. El problema es inherentemente no lineal si existe transferencia de calor por radiación, porque entonces el flujo de



calor a través de la frontera depende de las diferencias de potencias de cuarto orden de las temperaturas absolutas, más que de una simple diferencia de temperaturas.

Si no prevalecen condiciones de estado estacionario, en la Ec. 3.15 se incluye una matriz de “masas térmicas” y un vector de tasas nodales de cambio de temperatura. La ecuación resultante es análoga a la ecuación que describe la dinámica estructural.

Cuando se especifican convecciones como condiciones de frontera, el conjunto de ecuaciones matriciales se modifican:

$$[C]\{T\} = \{Q\} + \{h(T)\}\{T\} \quad (3.16)$$

Donde $\{h(T)\}$ es el conjunto de coeficientes de convección para los nodos de frontera apropiados.

Para conducción transitoria de calor, la ecuación gobernante dependiente del tiempo es

$$K \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (3.17)$$

donde:

ρ = densidad de masa del material, lbm/in³

c = calor específico del material, BTU/lbm-°F

k = conductividad del material, BTU/in-hr-°F

Las temperaturas nodales se incluyen en la solución para desplazamientos estáticos y esfuerzos mediante un conjunto equivalente de cargas nodales

$$[k]\{d\} = \{F\} + \{F_T(T)\} \quad (3.18)$$

donde:

$$y = b \{F_T(T)\} = \int [B][D][\alpha] dvol \{T\} \quad (3.19)$$

y



$[\alpha]$ = matriz identidad de los coeficientes térmicos de expansión

$[B][D]$ = Producto matricial que relaciona desplazamientos nodales a fuerzas nodales.

El vector de fuerzas térmicas $\{F_T(T)\}$ puede agregarse a un vector de fuerzas $\{F\}$ para calcular una carga combinada o usarse separadamente para calcular únicamente desplazamientos térmicos o únicamente esfuerzos. En el desarrollo de análisis en los que los efectos térmicos se combinarán con fuerzas externas, es recomendable realizar tres cálculos: obtención de efectos térmicos únicamente, obtención de efectos por fuerzas externas únicamente y obtención de los efectos por combinar las cargas térmicas y externas simultáneamente. Esto dará una buena indicación de los efectos relativos así como del resultado combinado.

3.2.3 CONSIDERACIONES EN LA MODELACIÓN TÉRMICA

Los resultados de un análisis térmico pueden usarse como datos iniciales para un análisis estructural^[12]. En estos casos, se puede desarrollar un modelo teniendo en mente análisis estructural a fin de incluir suficiente detalle en la malla de elementos finitos para la evaluación de concentraciones de esfuerzos. En modelos térmicos, se requiere menor detalle de la malla y pueden utilizarse modelos con mallas poco refinadas. Detalles como filetes y dentaciones probablemente no afectan la distribución de temperatura como podrían afectar la distribución de esfuerzos.

El tipo de análisis térmico dictará si es necesaria alguna modificación al modelo estructural. Para casos lineales estacionarios, el modelo térmico se analiza en menos tiempo que para el modelo estructural debido al grado único de libertad por nodo, así que usar el mismo modelo para ambos análisis, es el mejor procedimiento a emplear.

Para problemas altamente no lineales, tales como radiación, convección no lineal o cálculos transitorios térmicos, se puede justificar un modelo de malla poco refinada si el modelo estructural tiene pequeños detalles necesarios para efectos de concentración de esfuerzos. En estos casos, puede generarse un modelo para el análisis estructural con una malla refinada de tal manera que aún sea posible utilizar este modelo base para ambos análisis, térmico y estructural. Cuando no se use el mismo modelo para ambos análisis, se tendrá que interpolar para obtener datos de temperatura para el modelo estructural.



Para problemas de conducción, en general no se requiere un gran número de elementos interiores. Dado que la conducción es lineal, el gradiente de temperatura entre dos puntos será constante y se requiere un número mínimo de elementos.

La parte más difícil de un modelo térmico no es la generación del modelo sino definir que condiciones de frontera especificar. Para problemas de radiación, las incógnitas son la emisividad del material y los factores de vista. Los factores de vista son un problema de geometría y pueden estimarse de tablas o calcularse. La emisividad del material es crítica en problemas de radiación y es función del material, terminación superficial y temperatura.

La convección natural o forzada, es un fenómeno complejo que envuelve detalles del flujo del fluido sobre una superficie sólida. Se involucran la densidad, conductividad, coeficiente de expansión térmica y viscosidad del fluido. La terminación superficial de la superficie sólida también puede involucrarse en el problema, debido a que esta afecta la capa de la frontera. La tasa efectiva de convección forzada depende fuertemente de la velocidad del fluido y donde el fluido pueda estancarse; por ejemplo, en esquinas o ranuras, la tasa efectiva de convección puede ser mucho menor que a lo largo de una superficie libre.

Por suerte existen elementos homólogos a los de la Figura 3.3a y 3.3b, cuya función principal es el cálculo de la dirección e intensidad del flujo de calor, un elemento de tipo sólido térmico 3D de ocho nodos (Elemento SOLID60 en el programa ANSYS 5.6) y un elemento de tipo sólido térmico 3D de veinte nodos (Elemento SOLID90 en el programa ANSYS 5.6), con los cuales se garantiza tener la misma cantidad y numeración de nodos en un modelo usando dos distintos tipos de elementos y con los cuales es posible imponer cargas térmicas calculadas previamente a un modelo estructural.



Capítulo 4

MODELACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE REPARACIÓN

El procedimiento de reparación a evaluar se basa en la remoción del material de soldadura que presenta los defectos y en la deposición del nuevo material. Este procedimiento fue propuesto por el área de Ingeniería Civil y Tecnología de Materiales del IMP^[13]. La reparación se planeo realizar en cuatro fases, enunciadas a continuación:

1. Verificación de la magnitud del defecto, localización y evaluación,
2. Remoción de la soldadura defectuosa,
3. Aplicación de nuevo material de soldadura y
4. Verificación de la sanidad de la nueva soldadura y sus fronteras con la soldadura anterior.

Para las fases 1 y 4 deben realizarse mediante la aplicación de pruebas no destructivas, como ultrasonido industrial o radiografía ya que no constituyen un problema de generación de esfuerzos adicionales en la conexión.

Durante las fases 2 y 3 de la reparación se formará una ranura en la soldadura para remover la discontinuidad, posteriormente, se depositará nuevo material para rellenar la ranura. Dependiendo de la localización del defecto en el espesor de la conexión, la ranura será de penetración parcial o completa y se requiere de una evaluación minuciosa de esfuerzos ante cargas mecánicas y



deformaciones producidas por la aplicación de calor, así como la determinación de las zonas plastificadas por la magnitud de esfuerzos concentrados en la ranura. Para este efecto se realizaron análisis estructurales y térmicos combinando ambas fuentes de sollicitación mecánica en la modelación de la reparación.

La estabilidad mecánica de la conexión durante la reparación se verificó en forma global y local para dos longitudes de reparación, considerando los siguientes puntos:

Para la estabilidad global:

- Cargas de en condiciones de operación de la conexión más esforzada, a saber carga axial y momentos flexionantes.
- Disminución del área efectiva en la sección transversal.
- Excentricidad generada por la remoción de material.
- Carga máxima admisible por inestabilidad.

Para la estabilidad local:

- Magnitud de los esfuerzos concentrados en el perímetro de la ranura.
- Magnitud de las deformaciones en la pared superior de la ranura.
- Distribución y efectos de la temperatura al iniciar el depósito de la nueva soldadura.

Con estas revisiones se definirá una longitud máxima de reparación en función del perímetro de la conexión. De manera conservadora y con base a las recomendaciones de los estudios vistos en el capítulo 2, se inicia considerando que la longitud de soldadura en reparación no será mayor que una décima parte de la longitud circunferencial de la conexión.

4.1 VERIFICACIÓN DE LA MAGNITUD DEL DEFECTO, LOCALIZACIÓN Y EVALUACIÓN

En repetidas ocasiones las discontinuidades de la conexión superestructura–pilote que han sido reportadas y de las cuales se lleva un registro, muestran una falta de consistencia en la magnitud y localización del defecto, por este motivo es necesario realizar una verificación de tales parámetros, para evaluar el defecto y determinar finalmente si es preciso repararse.



La verificación de la longitud y profundidad de la discontinuidad, debe efectuarse bajo el procedimiento de inspección ultrasónica con el personal y equipo calificados para tal prueba.

La discontinuidad debe evaluarse bajo el criterio definido por las curvas presentadas en la Figura 2.5 del capítulo 2.

4.2 PROCEDIMIENTO PARA LA REMOCIÓN DE SOLDADURA CON DEFECTOS

Al evaluar la discontinuidad y dictaminar que debe repararse de acuerdo a los criterios de aceptación, el evaluador deberá definir si cuenta con los materiales y personal adecuados para efectuar las siguientes fases de la reparación.

De acuerdo con las recomendaciones del área de Tecnología de Materiales del IMP, una vez que ha sido identificada la localización del defecto así como la profundidad, se deberá remover con el sistema *arco aire* el 75% de la profundidad y la remoción del material restante incluido el defecto se hará con *disco abrasivo*, formando una ranura con geometría similar a la especificada la Figura 4.1.

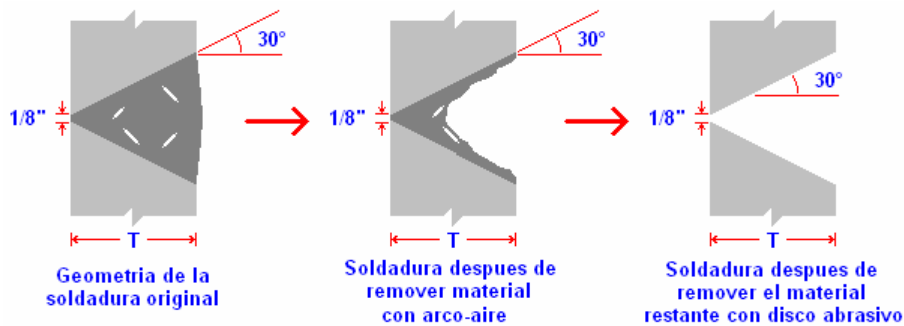


Figura 4.1. Remoción de la soldadura con defectos.

Para el caso de la penetración completa el bisel de 30° y el ancho de la raíz de $1/8''$ es la geometría con la que se realizó originalmente la unión, y de esta manera se asegura que únicamente el material removido será la soldadura.

El sistema de arco-aire es un procedimiento similar al de la soldadura con arco de carbón (véase Capítulo 1) la diferencia es que en este caso no se utiliza material de aporte, en vez de esto se utiliza un sistema de aire a presión para separar el material fundido del metal base, creando un efecto de desbaste.



La desventaja del proceso de arco-aire es que deja una superficie irregular (Figura 4.1), lo que puede provocar la creación de nuevos defectos durante el depósito de la nueva soldadura, es por eso que solo se forma con este método el 75% de la ranura, el resto es formado utilizando discos abrasivos, con los cuales se puede formar una superficie más suave en la que se eviten secciones afiladas en las que se pueden provocar concentraciones de esfuerzos.

4.2.1 EVALUACIÓN DE ESFUERZOS EN LA RANURA

Delimitación del caso a analizar

Existe una gran variedad de plataformas que podemos dividir por tipos y servicios, lo que lleva a tener un gran número de probables combinaciones tanto de geometría de los elementos como de cargas. Por ejemplo, en lo que respecta a la geometría de los elementos estructurales, los diámetros de los pilotes varían desde los 36" a las 54", los espesores de estos van de 0.75" a las 2.5"; las pendientes que se generan entre el pilote y la pierna de la superestructura son de 7.125° para las conexiones en las piernas intermedias de los octápodos, de 10.025° para las conexiones de esquina de los octópodos y tetrápodos, y de 12.216° para los trípodos; otra variante es la longitud de las columnas de la superestructura que en el caso de los octápodos pueden llegar hasta los 12.5 m y de 14 m en los trípodos pero debido a los arriostramientos por debajo de la cubierta inferior esta longitud se reduce a 9 m.

Es por estas razones que se decidió delimitar aún más el problema debido a la enorme gama de combinaciones que se crearía al querer abarcar todos los tipos existentes. Basado en datos estadísticos mencionados en la sección 1 del capítulo 2 se observa que los Octápodos de Perforación son los que muestran la mayor ocurrencia de discontinuidades en sus conexiones superestructura-pilote, y además que el diámetro de 48" con espesor 1.5" es el más común en este tipo de plataformas.

Por lo que se refiere a las cargas, las plataformas de perforación son estructuras que contienen una gran cantidad de equipo y por lo tanto son de las plataformas que más carga soportan, al contrario de los trípodos en los que los esfuerzos son notablemente menores debido a los servicios para los que son diseñados como lo son de comunicación, quemador o apoyo de puentes.

De esta manera podemos crear una envolvente racional que ayudará a crear un modelo base, con el cual al modificar algunas de sus características se podrá analizar el comportamiento de diferentes conexiones.

Entonces, una conexión representativa del problema es un diámetro de 48", un espesor de 1.5" y una inclinación del pilote respecto a la pierna de 10.025°, correspondiente a inclinaciones nominales 8: $\sqrt{2}$ de las piernas de esquina de la subestructura de plataformas tipo octápodo.

4.2.1.1 REVISIÓN POR ESTABILIDAD GLOBAL

Un punto importante a considerar para efectuar la reparación de la conexión, es la estabilidad global por pandeo de la unión columna-pilote. En este sentido, se considera que la columna al nivel de la primera cubierta de la superestructura se encuentra empotrada y con desplazamiento lateral restringido, por su parte, el pilote en su unión con la subestructura mediante las placas de ajuste, se considera que se encuentra arriostrado lateralmente, aunque el giro no está totalmente restringido. Se considera que el conjunto de elementos columna-pilote hasta sus niveles de arriostramiento forman una sola columna. Adicionalmente se considerará una deflexión inicial dada por el cambio de pendiente entre ambos elementos (Figura 4.2).

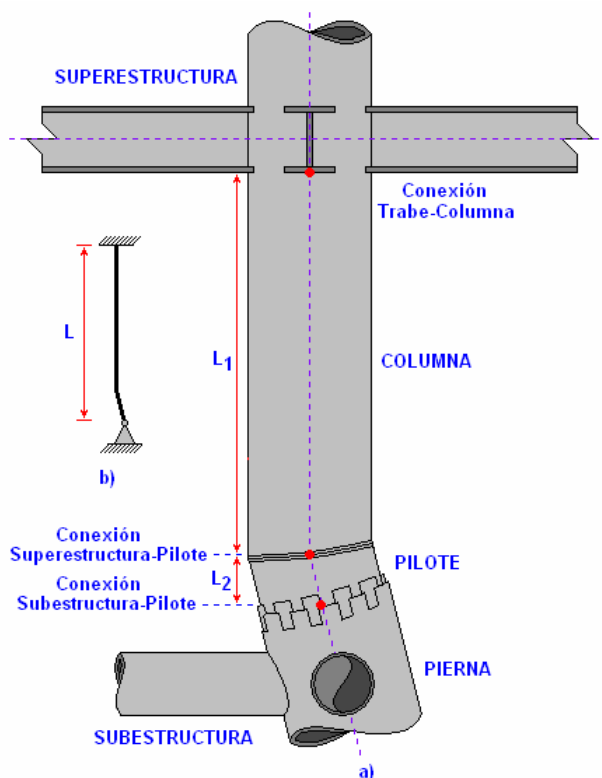


Figura 4.2. Idealización de la longitud de la columna a considerar para la evaluación del pandeo.

Mediante un análisis de estabilidad global se puede obtener una primera aproximación de la longitud máxima a reparar, debido a que al retirar el material defectuoso se modifican las propiedades mecánicas de la sección transversal y se modifica la capacidad de carga de la columna.

Se definió una zona en la sección transversal de la conexión, en donde la remoción de soldadura tiene el efecto mas adverso en la estabilidad del sistema, el análisis comparativo de los posibles lugares de la reparación se presenta en el Anexo A. El punto con mayor esfuerzo se presenta cuando se retira material de la parte interna del cambio de pendiente entre la columna y el pilote (Figura 4.3).

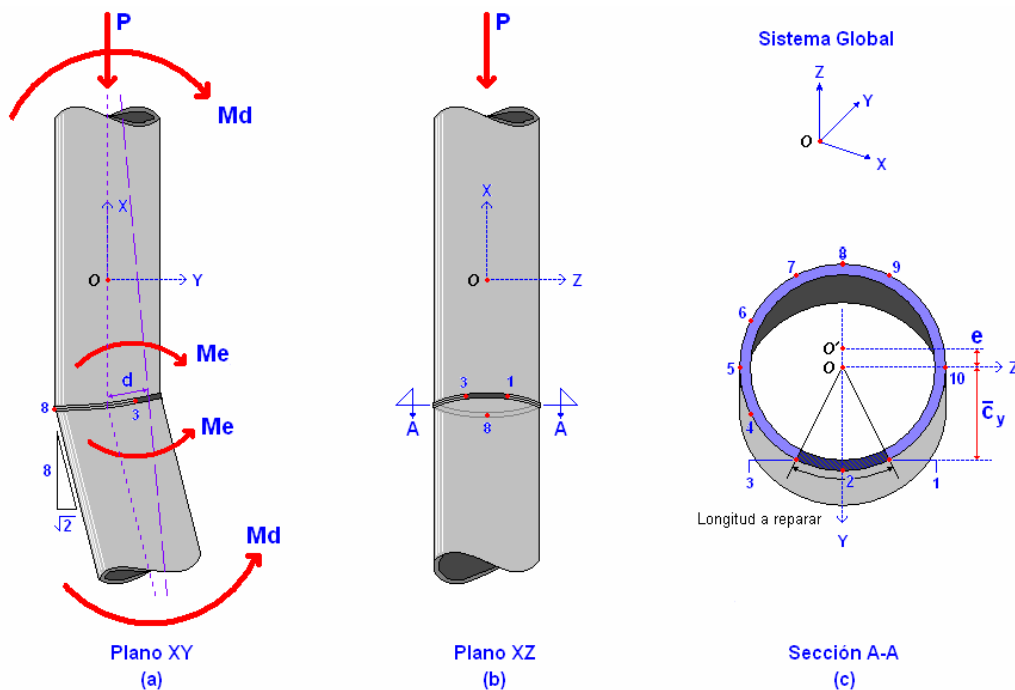


Figura 4.3. Lugar donde la remoción de la soldadura es más desfavorable.

En el punto 2 indicado en la Figura 4.3c, no solo actúa el efecto de la remoción de la soldadura que causa una excentricidad en la aplicación de la carga en la sección, sino que además se le agrega el efecto del cambio de pendiente existente entre la columna y el pilote, esta pendiente se toma como $\sqrt{2}/8$ o 10.025° debido a que es la mayor que se puede presentar en plataformas de tipo octápodo cuando estas son conexiones en las esquinas.



Determinación de los esfuerzos actuantes

El esfuerzo máximo que se tiene en la sección transversal de la conexión debido a las sollicitaciones mecánicas, puede determinarse mediante la fórmula de la escuadría:

$$\sigma_{act} = \frac{P}{A} \pm \frac{M_y \bar{c}_z}{I_y} \pm \frac{M_z \bar{c}_y}{I_z} \quad (4.1)$$

en donde

- σ_{act} = esfuerzo actuante
- P = carga axial externa actuante
- A = área de la sección transversal
- M_y = momento externo alrededor del eje y local del elemento
- M_z = momento externo alrededor del eje z local del elemento
- I = momento de inercia de la sección transversal
- \bar{c} = distancia del centro de rigidez de la sección transversal a la fibra extrema

Al esfuerzo actuante se le suman otros provocados por la excentricidad causada al retirar la soldadura defectuosa y el cambio de pendiente entre la columna y el pilote, (ver Figura 4.3).

Por lo anterior, a la Ec. 4.1 se la agregan 2 argumentos más:

$$\sigma_{total} = \sigma_{act} \pm \frac{Pe \bar{c}_z}{I_y} \pm \frac{Pd \bar{c}_y}{I_z} \quad (4.2)$$

donde

- $Pe = M_e$; momento producido por la carga axial P y la excentricidad e formada al retirar soldadura con defectos.
- $Pd = M_d$; momento producido por la carga axial P y por la deflexión d producto del cambio de pendiente entre la columna y el pilote.

Para evaluar los esfuerzos debidos a la excentricidad se puede aplicar la fórmula de la secante^[14].

$$\sigma = \frac{P}{A_{str}} \left(1 + \frac{ec}{r_{str}^2} \sec \left(\frac{L_e}{2r_{str}} \sqrt{\frac{P}{EA_{str}}} \right) \right) \quad (4.3)$$



donde

- A_{str} = área de la sección transversal reducida
- e = excentricidad producida por el retiro del material
- c = distancia del centroide de la sección a la fibra donde se obtiene el esfuerzo
- r_{str} = radio de giro de la sección transversal reducida
- L_e = longitud efectiva de pandeo
- E = modulo de elasticidad

y para evaluar el esfuerzo debido a la deflexión inicial se utiliza una expresión derivada de la fórmula de la secante^[14].

$$\sigma = \frac{P}{A_{str}} \left(1 + \frac{dc}{r_{str}^2} \frac{8EA_{str}}{P(L_e/r_{str})^2} \left(\sec \left(\frac{L_e}{2r_{str}} \sqrt{\frac{P}{EA_{str}}} \right) - 1 \right) \right) \quad (4.4)$$

donde

- d = es la deflexión del pilote con respecto a la columna (ver Figura 4.3).

Sumando ambos efectos resulta:

$$\sigma = \frac{P}{A_{str}} \left(1 + \frac{ec}{r_{str}^2} \sec \left(\frac{L_e}{2r_{str}} \sqrt{\frac{P}{EA_{str}}} \right) + \frac{dc}{r_{str}^2} \frac{8EA_{str}}{P(L_e/r_{str})^2} \left(\sec \left(\frac{L_e}{2r_{str}} \sqrt{\frac{P}{EA_{str}}} \right) - 1 \right) \right) \quad (4.5)$$

Considerando los esfuerzos adicionales debidos al cambio de pendiente en la conexión y al retiro de material defectuoso en la Ec. 4.3, el esfuerzo total en la conexión es:

$$\sigma_{total} = \frac{P}{A_{str}} \pm \frac{M_y \bar{c}}{I_{str}} \pm \frac{M_z \bar{c}}{I_{str}} + \frac{P}{A_{str}} \left(\frac{ec}{r_{str}^2} \sec \left(\frac{L_e}{2r_{str}} \sqrt{\frac{P}{EA_{str}}} \right) + \frac{dc}{r_{str}^2} \frac{8EA_{str}}{P(L_e/r_{str})^2} \left(\sec \left(\frac{L_e}{2r_{str}} \sqrt{\frac{P}{EA_{str}}} \right) - 1 \right) \right) \quad (4.6)$$

Determinación del esfuerzo admisible

Se debe asegurar que el esfuerzo total durante la reparación sea menor o igual al admisible,

$$\sigma_{total} \leq \sigma_{admissible} \quad (4.7)$$



Los esfuerzos admisibles serán evaluados bajo los requerimientos de la sección 3 del manual de diseño del Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute; API). El esfuerzo admisible a compresión depende del tipo de falla que presentará la columna, definido por su relación de esbeltez, kl/r , si la relación de esbeltez, es menor que el coeficiente de columna C_c , entonces es una columna corta, falla en el rango inelástico y el esfuerzo admisible σ_a se evalúa con la Ec. 4.8.

$$\sigma_a = \frac{\left[1 - \frac{(kl/r)^2}{2C_c^2}\right] \sigma_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(kl/r)}{8C_c} - \frac{(kl/r)^3}{8C_c^3}} \quad (4.8)$$

donde:

- k = coeficiente que determina la longitud efectiva de pandeo
- l = longitud libre de la columna
- r_{str} = radio de giro de la sección transversal reducida
- C_c = coeficiente de columna

en donde el coeficiente de columna C_c está dado por:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_y}} \quad (4.9)$$

Si $kl/r > C_c$ entonces es una columna larga, falla en el rango elástico y el esfuerzo admisible σ_a se evalúa con:

$$\sigma_a = \frac{12\pi^2 E}{23(kl/r)^2} \quad (4.10)$$

En la conexión superestructura-pilote los elementos que la conforman son de acero A-36, con esfuerzo de fluencia $\sigma_y = 36000 \text{ lb/in}^2$ y módulo de elasticidad $E = 29000000 \text{ lb/in}^2$ entonces $C_c = 126$, tomando en cuenta que las condiciones de apoyo consideradas en la Figura 4.2 el factor de longitud efectiva de pandeo es $k = 0.8$, que coincide con las recomendaciones de la sección 3.3.1d del API, y la longitud considerada de la columna fue de 12.457 m por ser la mayor longitud de columna sin arriostrar en los octápodos, lo que da como resultado que $kl/r < C_c$, entonces para la evaluación del esfuerzo admisible a compresión se aplicó la Ec. 4.8. El esfuerzo admisible a flexión de acuerdo a los requerimientos de las especificaciones de diseño ^[15], será de $0.66F_y$.

Propiedades de la Sección

En el Anexo B se presenta el análisis detallado de las propiedades de la sección reducida, dentro de las cuales se encuentran la determinación del centroide, la excentricidad, el área y el momento de inercia de la nueva sección (ver Figura 4.4).

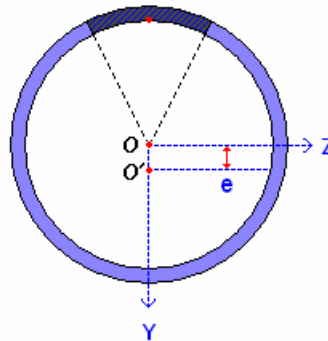


Figura 4.4. Excentricidad generada por el retiro del material.

Para la conexión de diámetro de 48" y un espesor de 1.5" la excentricidad varía con respecto a la cantidad de soldadura retirada como se muestra en la Figura 4.5.

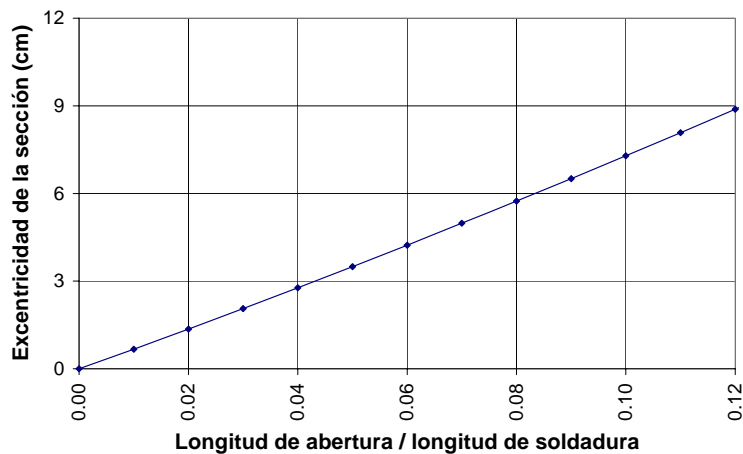


Figura 4.5. Variación de la excentricidad con respecto al porcentaje de abertura.

El momento de inercia en ambas direcciones se ve igualmente reducido, si tomamos como referencia la Figura 4.4, variando el porcentaje de abertura obtenemos la variación de los momentos de inercia mostrada en la Figura 4.6. El área por su parte se reduce proporcionalmente con respecto a la longitud de abertura.

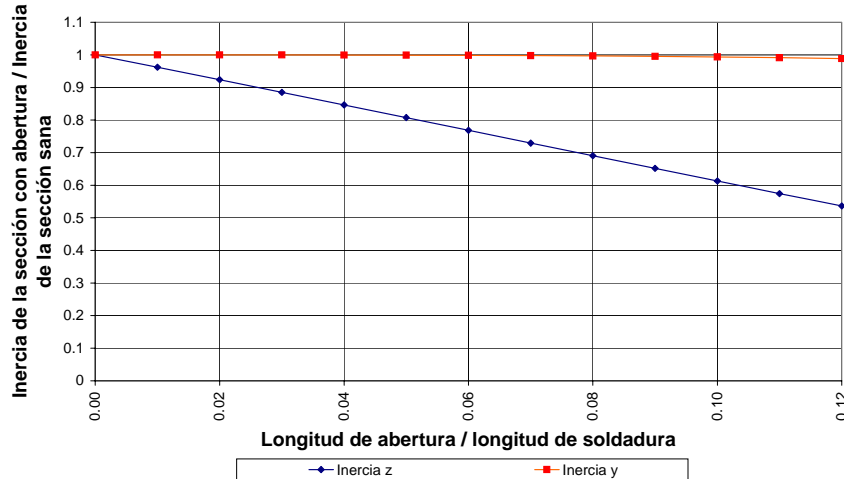


Figura 4.6. Variación del momento de inercia con respecto al porcentaje de abertura.

Capacidad de carga

Para observar el efecto que produce la ranura en la capacidad global de carga admisible, en la Figura 4.7, se muestra la reducción del esfuerzo admisible a compresión según la longitud de soldadura retirada. El esfuerzo permisible a flexión no varía dado que es función únicamente del esfuerzo de fluencia, en cambio el esfuerzo permisible a compresión es función del radio de giro, el cual varía según la longitud de la ranura. En esta figura, se muestran también las magnitudes de esfuerzos a compresión actuantes para la misma variación de longitudes de reparación, para el caso de la condición de esfuerzos de operación de una plataforma de perforación, los cálculos realizados para crear estas gráficas se pueden observar en el Anexo C.

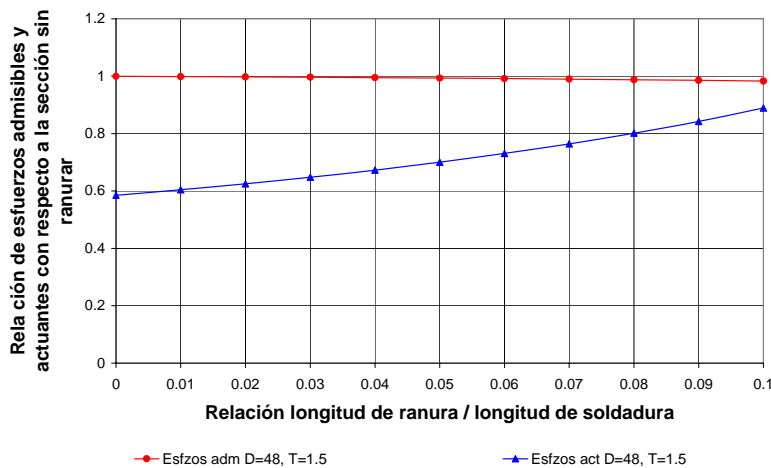


Figura 4.7. Efecto de la longitud de ranura en los esfuerzos admisibles y actuante de la conexión.



De la Figura 4.7, se observa que para una ranura del 10% de la longitud de soldadura el esfuerzo admisible de compresión se reduce ligeramente comparado con una sección sin ranurar, por otro lado, los esfuerzos actuantes se incrementan substancialmente al incrementar la longitud ranurada. El cruce de las curvas se presenta en una relación longitud de ranura / longitud de soldadura mayor a 0.1, sin embargo en estas curvas no se considera la interacción de esfuerzos a flexión. Para incluir los esfuerzos a compresión por flexión se debe revisar que la interacción de esfuerzos (Ec. 4.11) sea menor a la unidad.

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m \sqrt{fb_x^2 + fb_y^2}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_e'}\right) F_b} \leq 1.0 \quad (4.11)$$

donde:

- f_a = esfuerzo axial actuante
- F_a = esfuerzo de compresión axial permisible
- C_m = factor de reducción
- f_b = esfuerzo de compresión por flexión actuante
- F_b = esfuerzo de compresión por flexión permisible

$$F_e' = \frac{12\pi^2 E}{23(kl_b / r_b)^2} \quad (4.12)$$

Los elementos mecánicos considerados fueron: carga axial $F_x = 923.08$ ton en compresión y los momentos flexionantes $M_y = 9.10$ ton-m y $M_z = 19.11$ ton-m, que son los máximos obtenidos en la zona de la conexión de análisis realizados a una plataforma de perforación en condiciones de operación. En la Figura 4.8 se observa la manera en que los esfuerzos combinados actuantes se aproximan al límite permisible. Sin embargo, las combinaciones de carga axial y momentos flexionantes pueden ser tan variadas que debemos considerar un factor de seguridad para evitar rebasar los esfuerzos permisibles en la conexión y aunque se realizaron análisis para determinar la combinación de esfuerzos más desfavorable, aun falta considerar el efecto de la temperatura ya que ésta reducirá las propiedades mecánicas del material de la sección, pero esta será obtenida posteriormente. De manera conservadora si tomamos un factor de seguridad de 1.5, entonces de acuerdo con la Figura 4.8 la relación longitud de ranura contra longitud de soldadura no deberá ser mayor de 0.05, es decir, la longitud a reparar no deberá ser mayor que un cinco por ciento de la longitud circunferencial de soldadura.

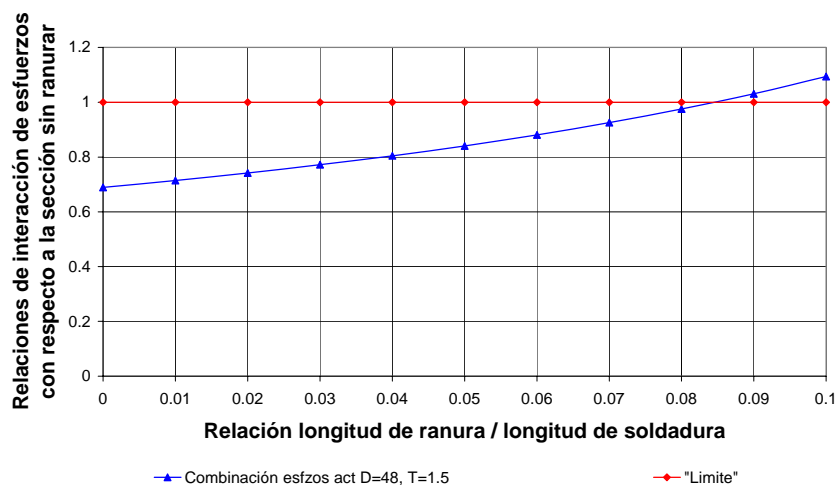


Figura 4.8. Efecto de la longitud de ranura en los esfuerzos combinados de flexión y compresión con respecto al esfuerzo admisible.

4.2.1.2 REVISIÓN POR ESTABILIDAD LOCAL

Esta revisión está enfocada a la evaluación de los esfuerzos, deformaciones elásticas y deformaciones plásticas que se generan por la aplicación de carga y formación de una ranura en la sección de la unión superestructura–pilote, así como la aplicación de temperatura durante el relleno de la ranura. Es importante definir las consideraciones tomadas en los modelos de análisis, tanto geométricas y de carga como de las propiedades del material.

Consideraciones geométricas, de carga y elementos finitos del modelo

Se ha observado que en condiciones de operación los esfuerzos en la conexión superestructura-pilote son causados principalmente por efecto de la carga axial (ver Anexo C) y que el esfuerzo admisible por compresión es aproximadamente 60% del de fluencia, por tal motivo la carga que se empleó en un primer modelo de análisis local fue aplicada uniformemente en la parte superior de la sección y es equivalente al 60% del esfuerzo de fluencia del acero A-36.

Es evidente que este nivel de esfuerzo es menor al permisible para compresión en fibras extremas debidos a flexión ($0.66f_y$), sin embargo, considerando que la mayor parte del esfuerzo aplicado es debido a la carga axial, se puede estimar adecuado aplicar el nivel de carga descrito uniformemente en la sección, además que de esta manera también se incluyen las áreas cercanas a las fibras de esfuerzos máximos de compresión por flexión.

En la Figura 4.9a se esquematizan las secciones transversales de las ranuras para los casos de penetración completa y parcial, aunque aquí solo se analizará el caso de penetración completa, la cual sería el caso más desfavorable. Es conocido que para evitar concentraciones elevadas de esfuerzos en la periferia de la ranura los contornos no deben presentar cambios abruptos de geometría como ángulos, de ahí que se opta por conformar contornos suaves como se observa en la Figura 4.9b.

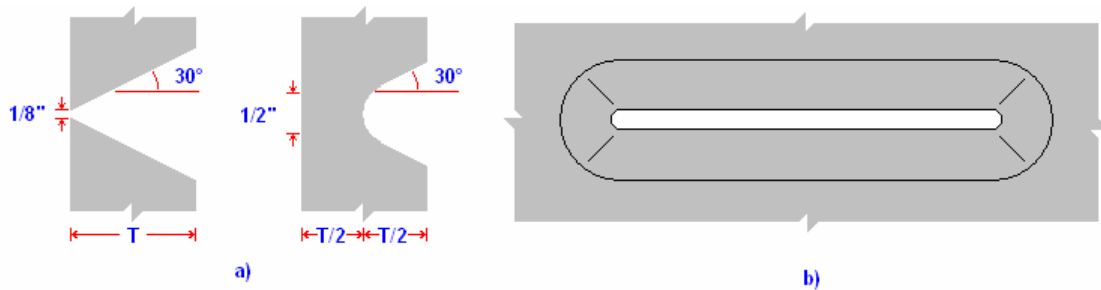


Figura 4.9. a) Preparaciones para remover defectos, vistas transversales de penetración completa y parcial. b) Vista externa de las ranuras.

La geometría del modelo empleado para el análisis local se muestra en la Figura 4.10, se realizaron análisis comparativos de distribuciones de esfuerzos para el caso de una conexión de 48" de diámetro (D) y 1.5" de espesor (t) y ranuras de penetración completa en 10% y 5% de la longitud circunferencial de soldadura. Los cambios de pendiente columna-pilote fueron de 10.025° , correspondiente a inclinaciones nominales $8:\sqrt{2}$ de las piernas de esquina de la subestructura.

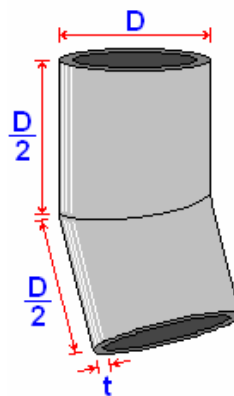


Figura 4.10. Geometría de la conexión modelada para evaluar esfuerzos locales en la ranura.

Los análisis de esfuerzos se realizaron mediante el uso del programa de análisis mecánico ANSYS versión 5.6, basado en el Método de los Elementos Finitos.



A fin de modelar detalladamente la zona a reparar se requirió un elemento tridimensional tipo “sólido”, que permitió modelar los biseles y contornos en la superficie externa de la conexión y en el fondo de la ranura. En la Figura 4.11 se muestra un modelo de elementos finitos empleado para el análisis, en la Figura 4.12 puede observarse el detalle de la modelación de una ranura de penetración total.

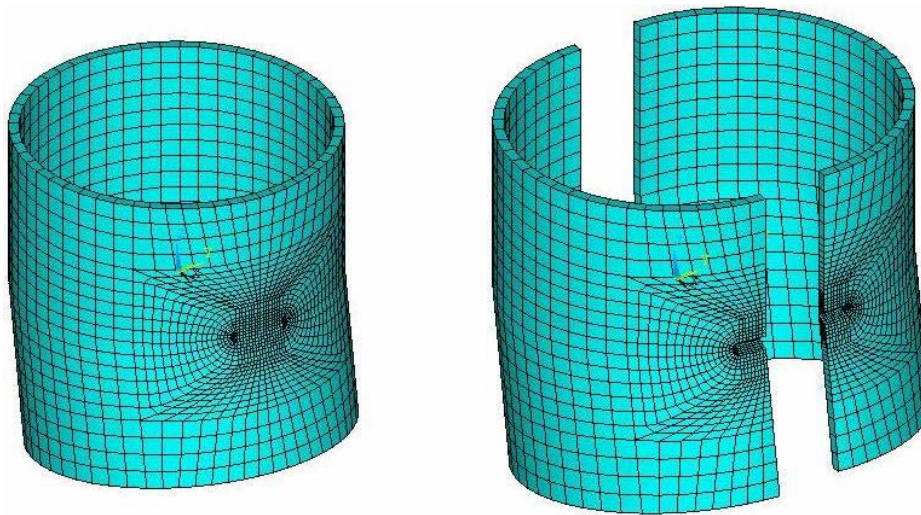


Figura 4.11. Modelo de elementos finitos de la conexión.

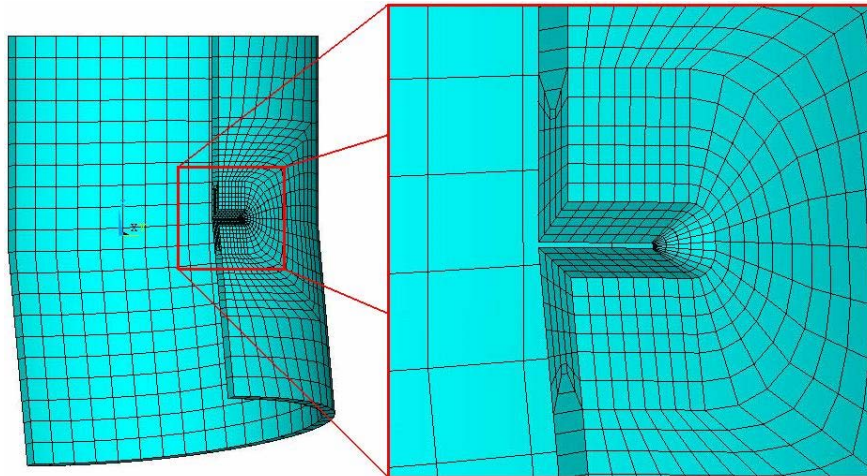


Figura 4.12. Detalle de una sección de la ranura

Una vez que se ha retirado el material defectuoso habrá una redistribución de esfuerzos en la sección, por tal motivo se realizaron los siguientes análisis estructurales para determinar dicha redistribución de esfuerzos y deformaciones.



Análisis de distribución de esfuerzos

Análisis Elásticos

Para ganar sensibilidad en los efectos que tienen los diferentes aspectos geométricos en la distribución de esfuerzos en la zona ranurada, en lo que sigue se discuten los resultados que se obtuvieron para la conexión de 48" de diámetro y 1.5" de espesor sin ranura, con ranura del 10% del perímetro y con ranura del 5% del perímetro en la parte interna del cambio de pendiente.

Se aplicará una carga uniformemente repartida en la parte superior del modelo correspondiente al 60% del esfuerzo de fluencia del material (Figura 4.13), que corresponde a $\sigma_y = 36,000 \text{ lb/in}^2$ para el acero A-36. Al realizar un análisis elástico lineal se supone que el material tiene una curva esfuerzo-deformación formada por una recta infinita, la pendiente de esta o módulo de elasticidad, es igual a $29,000,000 \text{ lb/in}^2$ (Figura 4.14).

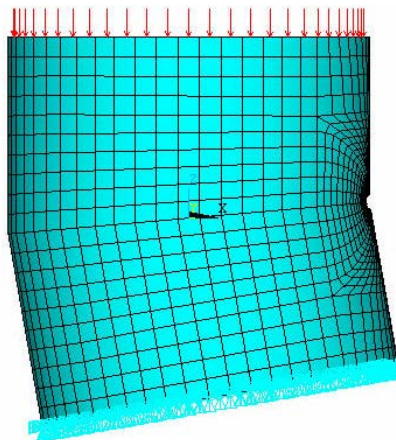


Figura 4.13. Aplicación de las cargas y restricciones al modelo

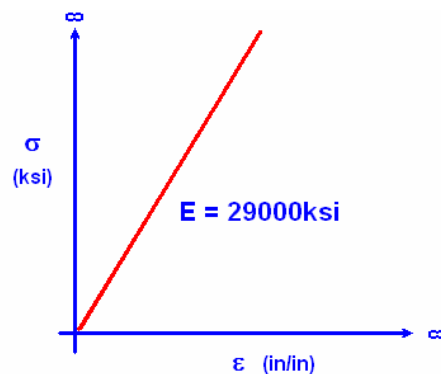


Figura 4.14. Curva esfuerzo deformación para análisis elástico



En la Figura 4.15 se muestra la distribución de esfuerzos en la conexión sin ranura. Cabe mencionar que a partir de este momento las vistas que se mostrarán corresponden al acercamiento de la ranura, que se muestra en detalle en la Figura 4.12, y los esfuerzos mostrados corresponden al esfuerzo máximo combinado de Von Mises que equivale a:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{2} + \frac{(\sigma_y - \sigma_z)^2}{2} + \frac{(\sigma_x - \sigma_z)^2}{2}} \quad (4.11)$$

donde:

- σ_{vm} = es el esfuerzo máximo combinado de Von Mises
- σ_x = es el esfuerzo principal en el sentido x
- σ_y = es el esfuerzo principal en el sentido y
- σ_z = es el esfuerzo principal en el sentido z

También se hubiesen podido mostrar los esfuerzos principales en X, Y ó Z, pero debido a la inclinación con la que fue modelada la conexión es necesario realizar una combinación de los tres para así obtener el esfuerzo máximo equivalente.

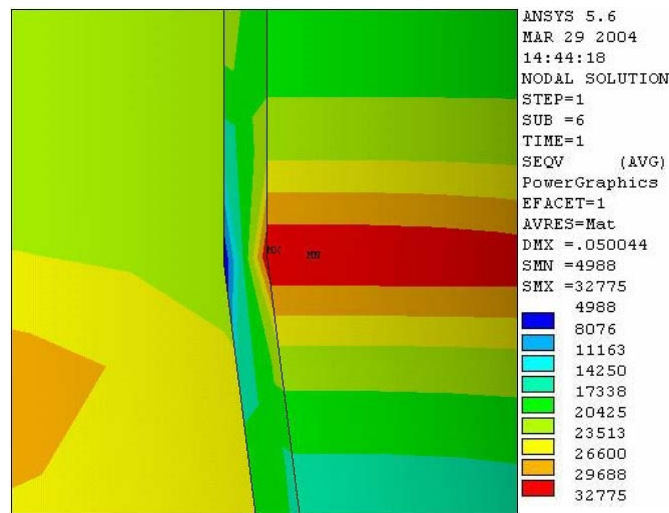


Figura 4.15. Distribución de esfuerzos en una conexión de 48"X1.5", sin ranura bajo un esfuerzo de compresión de 0.6 Fy.

El análisis elástico lineal mostró concentraciones de esfuerzos en el cambio de pendiente que están ligeramente debajo del esfuerzo de fluencia del material (36,000 lb/in²), el resultante esfuerzo que se determinó fue de 32,775 lb/in².



Con base a este nivel de esfuerzos máximos alcanzado, se evaluaron los efectos de las ranuras en la conexión, incrementando su longitud de 5% al 10% del perímetro de la soldadura y con el 100% de penetración.

En lo siguiente se referirá longitud de ranura de 5% o 10% como el porcentaje de la longitud total de la soldadura.

Los esfuerzos correspondientes para una ranura de penetración completa de longitud de 10%, en un análisis elástico se muestran en la Figura 4.16.

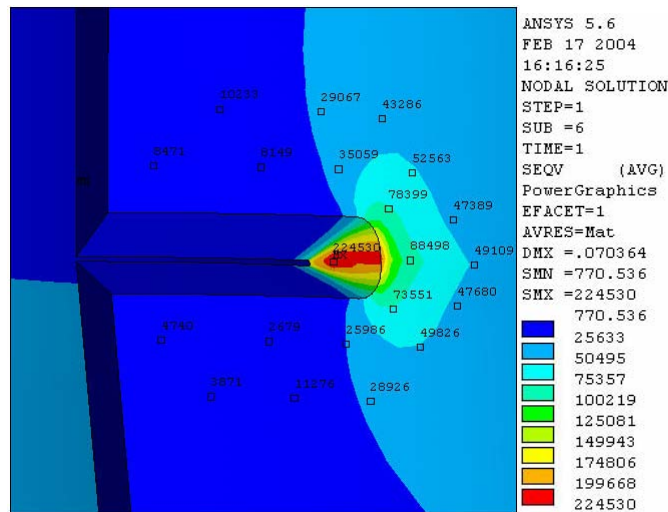


Figura 4.16. Distribución de esfuerzos en una conexión de 48”X1.5”, ranura de penetración completa y 10% de longitud, análisis elástico-lineal.

En la Figura 4.16 se puede observar un esfuerzo máximo de 224,530 lb/in², sin embargo considerando que este nivel de esfuerzos resulta de un análisis elástico lineal, en donde se considera que el material mantiene el módulo de elasticidad constante sin importar el nivel de deformaciones, esta magnitud de esfuerzos no es real ya que el esfuerzo de fluencia del acero A-36 es de 36,000 lb/in², por tanto solo podemos definir un factor de concentración de esfuerzos con respecto a la carga aplicada, (como se explico en la sección 1 del capítulo 2) el cual resulta igual a 10.4.

De forma similar los esfuerzos que se obtienen para una ranura de penetración completa de longitud de 5%, en un análisis elástico se muestran en la Figura 4.17.

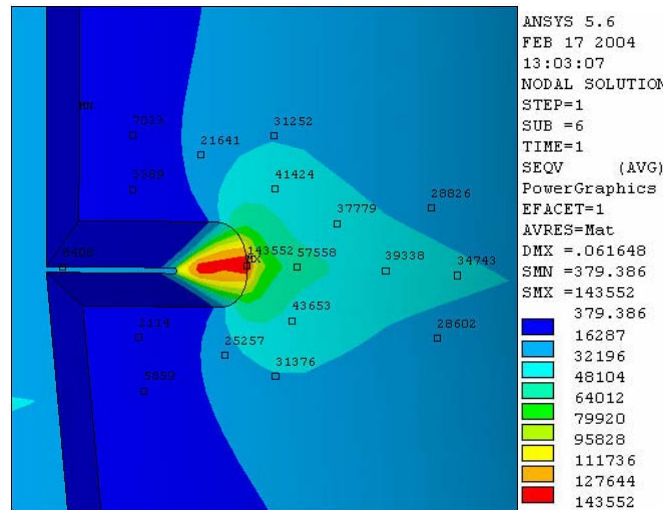


Figura 4.17. Distribución de esfuerzos en una conexión de 48”X1.5”, ranura de penetración completa y 5% de longitud, análisis elástico - lineal.

En la Figura 4.17 se puede observar un esfuerzo máximo de 143,552 lb/in², que como en el caso anterior este nivel de esfuerzos resulta mayor de 36,000 lb/in² y por tanto esta magnitud de esfuerzos no es real. El factor de concentración de esfuerzos resulta de 6.64.

Resulta entonces que en los dos casos anteriores se rebasa por mucho el esfuerzo de fluencia del material, por esta razón se recurre a la determinación de esfuerzos por medio de análisis elasto-plásticos, lo que significa que ahora consideraremos una curva esfuerzo-deformación bilineal del acero.

Análisis Elasto-Plástico

A fin de tomar en cuenta las deformaciones plásticas del material, se realizaron en lo siguiente, análisis elasto-plásticos. Para las mismas condiciones geométricas del análisis previo, se consideró que el material tiene un comportamiento perfectamente elástico-plástico como el mostrado en la Figura 4.18.

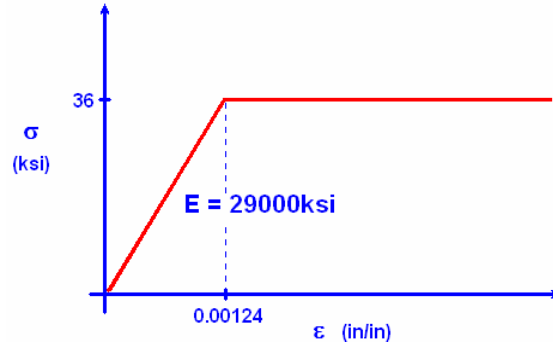


Figura 4.18. Curva esfuerzo-deformación del acero A-36 con un comportamiento perfectamente elasto-plástico.

La distribución de esfuerzos que resultan de este análisis se muestra en la Figura 4.19. La superficie mostrada en rojo representa la zona de mayores concentraciones de esfuerzos.

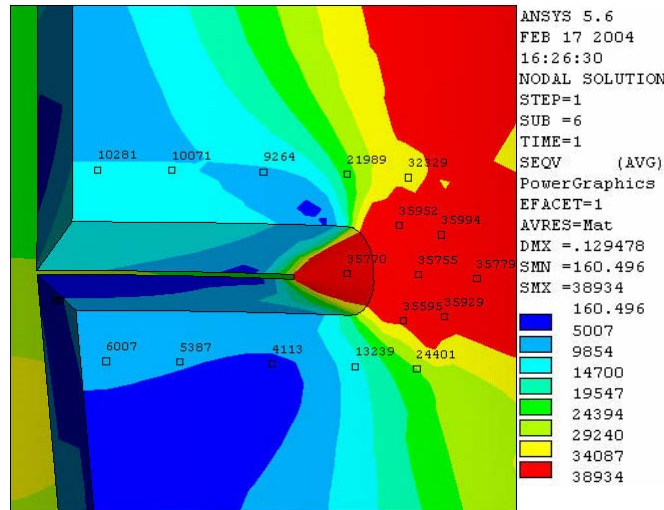


Figura 4.19. Distribución de esfuerzos en una conexión de 48"X1.5" con ranura de penetración completa y 10% de longitud, análisis elasto-plástico.

En la Figura 4.20 se pueden observar la distribución de esfuerzos y que el máximo es 38,934 lb/in², y aunque supera un poco las 36,000 lb/in², el resultado puede considerarse correcto ya que este máximo no se presenta en la zona de interés sino en áreas cercanas a los nodos que contienen las restricciones de desplazamiento del modelo.



Pero para tener una mejor perspectiva de la zona en donde se supera el rango elástico y se presenta la plastificación del material podemos observar la Figura 20, donde se muestran las deformaciones plásticas.

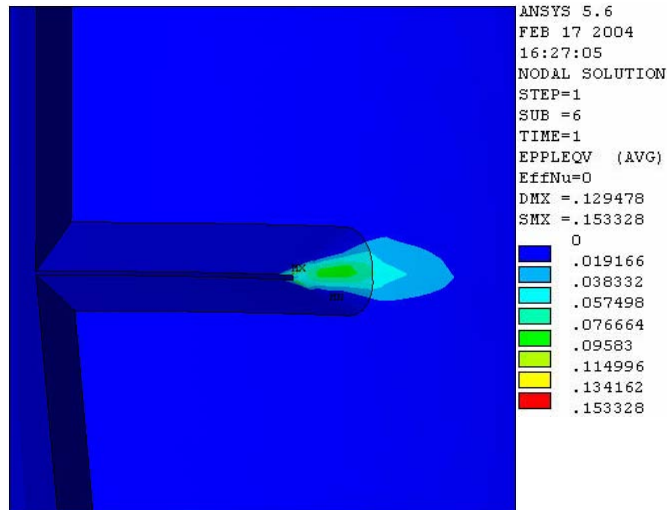


Figura 4.20. Distribución de deformaciones plásticas externas en una conexión de 48”X1.5” con ranura de penetración completa y 10% de longitud, análisis elasto-plástico.

Lo mismo sucede para el caso de la abertura del 5%, en la Figura 4.21 se muestran los esfuerzos y en la Figura 4.22 se muestran las deformaciones plásticas.

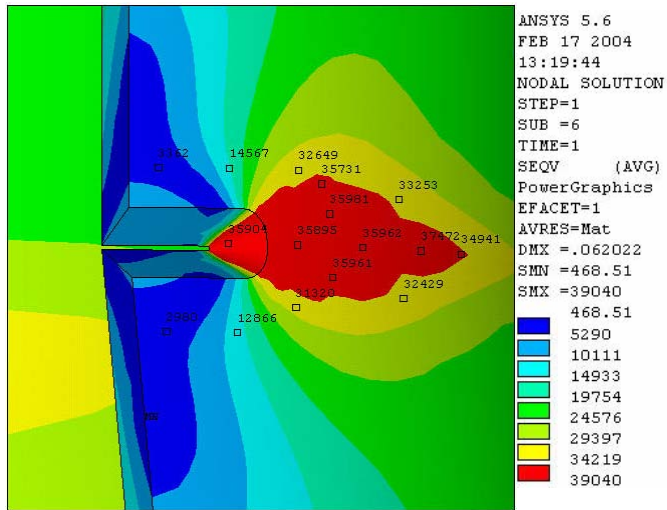


Figura 4.21. Distribución de esfuerzos en una conexión de 48”X1.5” con ranura de penetración completa y 5% de longitud, análisis elasto-plástico.

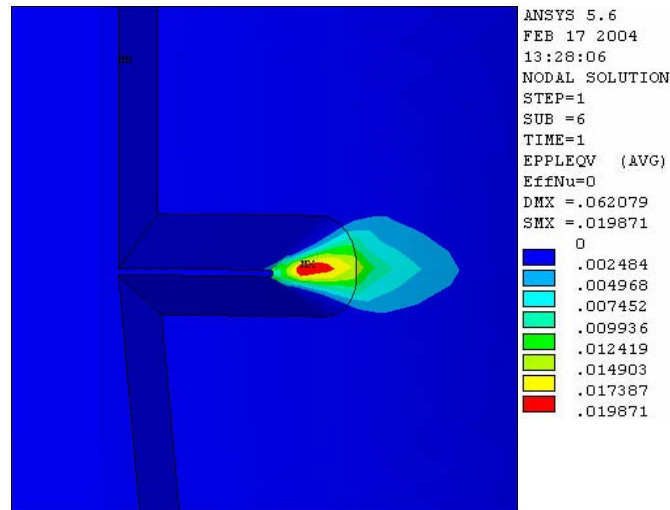


Figura 4.22. Distribución de deformaciones plásticas externas en una conexión de 48''X1.5'' con ranura de penetración completa y 5% de longitud, análisis elasto-plástico.

Se reconoce fácilmente que en los dos casos se supera el límite de fluencia del material y que surgen deformaciones dentro del rango inelástico.

En la práctica sería necesario analizar modelos reduciendo la abertura cada vez más, hasta encontrar una abertura con el tamaño ideal, es decir, en la cual el esfuerzo máximo resultante no sobrepase el esfuerzo de fluencia del material. Sin embargo como puede observarse en la Figura 4.15, a pesar de que el modelo no tiene abertura, el esfuerzo resultante está próximo a la fluencia del material y cualquier abertura por pequeña que esta fuese, provocaría inevitablemente una gran concentración de esfuerzos y plastificación en el material.

Hay que tener presente, que si lo que se quiere hacer es reparar la zona de la soldadura con defectos, se debe de tener un área mínima para poder realizar los trabajos de reparación, en las que el soldador pueda trabajar libremente y así evitar la formación de nuevos defectos.

Suponiendo que una reparación del 5% produce una ranura de 7.5'' o 20cm para un diámetro de 48'' es una longitud apenas aceptable si tomamos en cuenta el tamaño de las zonas de plastificación que se forman a los lados de las ranuras son de aproximadamente 2'' (Figura 4.22).

Entonces si se permiten deformaciones más allá del rango elástico ahora deberá revisarse hasta donde llega el nivel de la deformación y que esta no supere niveles que pudieran provocar la aparición de fracturas en el material.



En la estimación del daño causado en la sección debido a la presencia de deformaciones plásticas puede realizarse en términos de la ductilidad del acero. La ductilidad se define como la cantidad de deformación permanente, es decir, deformación que excede el límite de proporcionalidad, hasta alcanzar el punto de fractura (Figura 4.23). La ductilidad de un material toma gran importancia en la distribución de esfuerzos concentrados porque permite fluencia local por altos esfuerzos y cambia la distribución de esfuerzos.

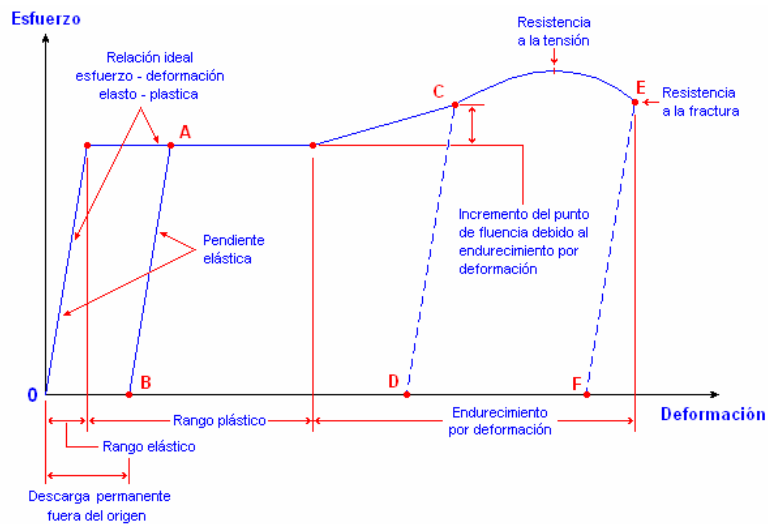


Figura 4.23. Efectos de la deformación más allá del rango elástico^[16].

Debido a que se presentan deformaciones plásticas, vale la pena referirse al comportamiento del material cuando se somete a nuevas cargas bajo un esquema inicial de deformaciones plásticas. Es conocido en la literatura que cuando se excede apreciablemente la deformación a la primer fluencia y se descarga el espécimen, la recarga dará una relación esfuerzo–deformación diferente a la observada en la carga inicial^[16]. La carga y descarga elástica no produce deformaciones residuales, sin embargo, una carga inicial más allá del punto de fluencia, tal como el punto A de la Figura 4.23, resulta en una descarga a la deformación del punto B; ocurre una deformación permanente OB. La capacidad de ductilidad se reduce de una deformación OF a la deformación BF. La recarga se comporta como si el origen de la curva esfuerzo–deformación fuera el punto B; la zona plástica previa al endurecimiento por deformación también se reduce.

Cuando se realiza una carga hasta alcanzar el punto C, la descarga sigue la línea punteada al punto D, es decir, el origen para una nueva carga es ahora el punto D. La longitud de la línea CD es mayor, indicando que el punto de fluencia se incrementa. El incremento en el punto de fluencia



se debe a un efecto del endurecimiento por deformación; la ductilidad remanente cuando se carga a partir del punto *D* se reduce severamente comparada con su valor original.

Con el fin de realizar una revisión detallada del nivel de ductilidad perdido por la plastificación de algunas zonas en la ranura, en la Figura 4.24 se muestran los valores típicos de una curva típica de tensión esfuerzo-deformación del Acero A-36, y la curva perfectamente elasto-plástica que se utilizó para realizar los análisis. Además se muestran en ellas los valores de las plastificaciones alcanzadas por los modelos del 5% y 10% de ranura longitudinal analizados previamente.

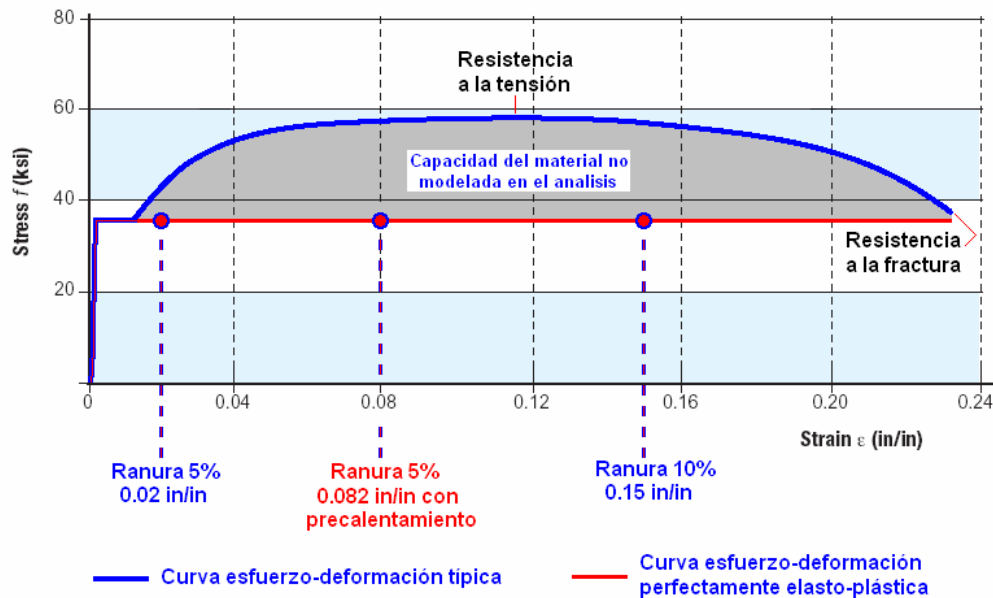


Figura 4.24. Curva de tensión esfuerzo- deformación para acero A-36 ^[17].

En el caso de la ranura del 5%, las deformaciones plásticas alcanzan la zona de endurecimiento por deformación de la curva esfuerzo-deformación del acero, con valores de 0.02 in/in (ver Figura 4.24) mientras que para la ranura del 10% la deformación plástica alcanza un valor de 0.15 in/in, valor que se ubica más allá del punto de resistencia a la tensión del acero (ver Figura 4.24), este valor es muy alto dado que puede presentarse agrietamiento si se alcanza el esfuerzo de resistencia a la fractura, por lo que, nuevamente se considera que no deberán realizarse ranuras de 10% de longitud. En tanto que los niveles de deformación alcanzados por la ranura del 5% representan un 17.4% de la deformación correspondiente a la resistencia a la tensión y un 8.7 % de la deformación correspondiente a la resistencia a la fractura. Además que hasta el momento se ha despreciado una posible sobresresistencia del material producto del endurecimiento por deformación (Figura 4.24).



4.3 APLICACIÓN DE NUEVO MATERIAL DE SOLDADURA

Procedimiento para el depósito de soldadura

Una vez conformada la ranura de la reparación se debe soldar conforme lo establece el código de referencia A.W.S. D.1.1.

Este indica que se deberá de aplicar un precalentamiento mínimo de 150°C en la zona a reparar, esto con el fin de evitar grandes gradientes de calor producto de la aplicación de la soldadura y así disminuir las tensiones internas que pudiesen provocar esfuerzos residuales y por tanto evitar la aplicación de un proceso de relevado de esfuerzos; de manera similar se debe asegurar que la temperatura entre cada paso de la soldadura no deberá ser menor de 150°C.

El precalentamiento será aplicado con multiflama y se deberá de medir la temperatura con un crayón térmico o un pirómetro a 2" de la ranura, teniendo que mantener esta temperatura durante toda la ejecución de la soldadura.

De acuerdo con las condiciones de campo se consideró por su versatilidad al proceso de arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW) como la mejor opción. El A.W.S. D.1.1 en la tabla 3.1 indica que para el acero A-36 debe ser usada soldadura E60XX o E70XX por lo que se decidió utilizar el electrodo E-7018 como material de aporte que tiene como características principales que puede ser usado en cualquier posición, su alto contenido de hierro en polvo en su recubrimiento permite depositar una gran cantidad de material en poco tiempo y su bajo contenido de hidrogeno, permite realizar una soldadura de alta calidad al evitar porosidades.

Análisis Térmicos

Cabe mencionar que para este análisis solo se modeló la carga de temperatura generada por el precalentamiento de la zona en estudio, y aunque el calor generado por el arco eléctrico es mucho mayor que el del precalentamiento, el arco eléctrico solo concentra el calor en área muy pequeña, y el tiempo que se requiere para pasar de un cordón a otro incluyendo el deposito del material y el retiro de la escoria hace poco significativo el aumento de temperatura.

Para recrear una distribución de temperaturas en el modelo de elementos finitos al realizar el precalentamiento se ingresaron los datos de las gráficas del Calor específico del material y conductividad térmica del material (Figura 4.25), ambos a su vez dependientes de la temperatura.

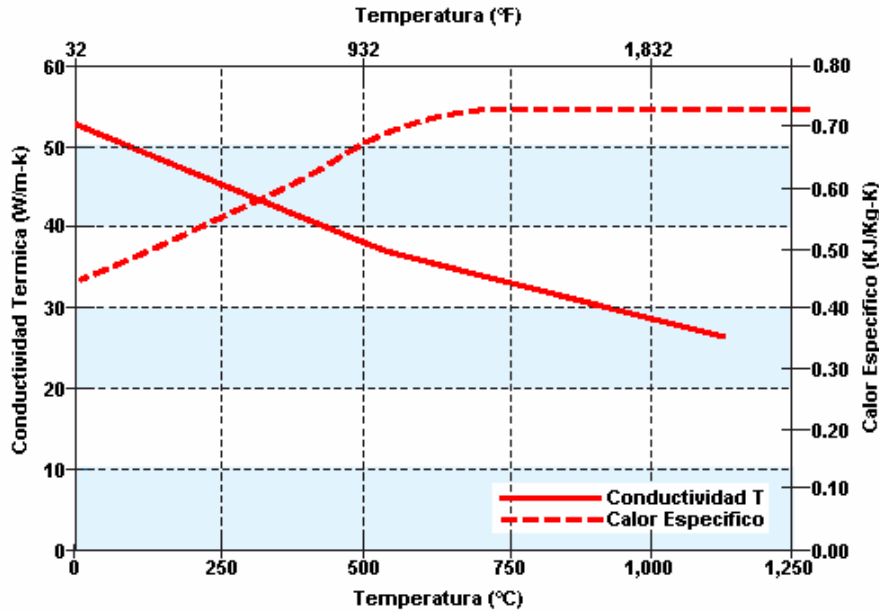


Figura 4.25. Variación del Calor específico del material y del Coeficiente de conductividad térmica con respecto a la temperatura^[17].

Para poder obtener una buena distribución de la temperatura y para estar del lado de la seguridad, solo se considero el efecto de la conductividad térmica, ya que por su parte la convección y la radiación térmica provocarían pérdidas de calor.

Por recomendaciones del área de Tecnología de Materiales la carga de temperatura fue realizada a través de un análisis transitorio (en pasos de carga), en el que se determinaron dos pasos: 1) la elevación de la temperatura de la temperatura ambiente 25°C (77°F) a la de precalentamiento 150°C (302°F), esto en un periodo de 3600 seg, y 2) el sostenimiento de la temperatura de 302°F durante 1800 seg (Figura 4.26).

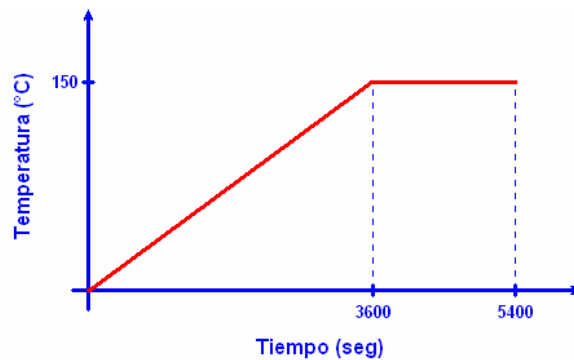


Figura 4.26. Aplicación de la temperatura del precalentamiento.



El calor del precalentamiento fue aplicado en la zona de la ranura y a 2" de su periferia, en la parte externa del modelo (Figura 4.27).

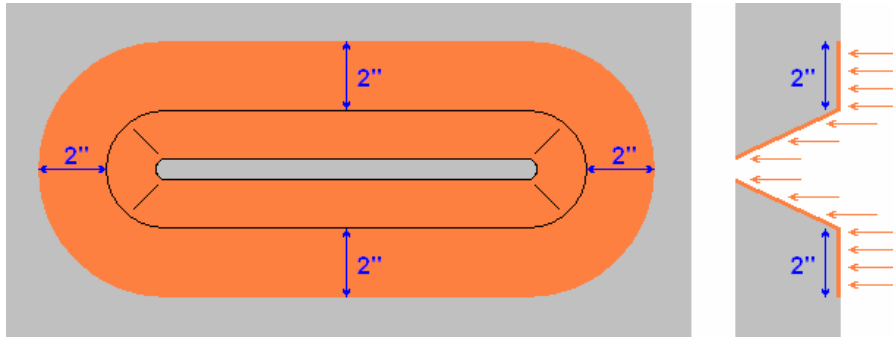


Figura 4.27. Aplicación de la temperatura del precalentamiento en la zona de la abertura.

Los resultados obtenidos de dicho análisis se pueden observar en la Figura 4.28.

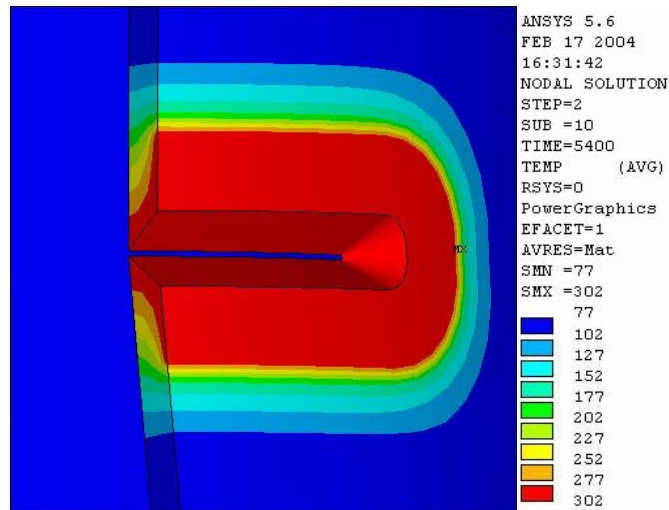


Figura 4.28. Distribución de la temperatura (°F).

Propiedades del material dependientes de la temperatura

Las propiedades mecánicas del acero A-36, así como de muchos otros materiales, son dependientes de la temperatura. En las siguientes figuras se presentan las curvas de variación de varias propiedades del acero con respecto a la temperatura que se consideraron en los análisis térmicos-estructurales.



En la Figura 4.29, se muestra la variación del coeficiente de variación térmica, necesaria para el cálculo de las expansiones térmicas. En la Figura 4.31, podemos observar la variación del esfuerzo de fluencia, la Figura 4.32 la variación del módulo de elasticidad, la Figura 4.33 la variación del módulo de Poisson, todos en función de la temperatura.

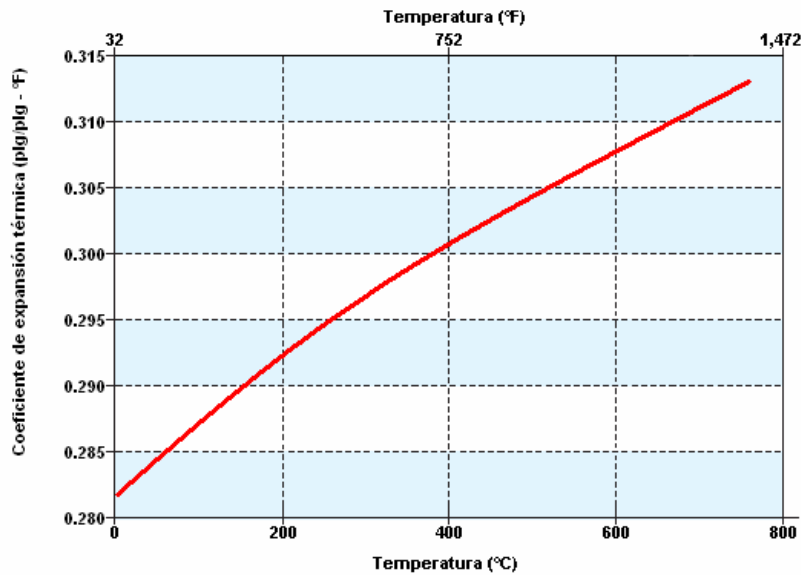


Figura 4.29. Variación del coeficiente de expansión térmica ALPX (plg/plg - °F) con respecto a la temperatura TEMP (°F) ^[17].

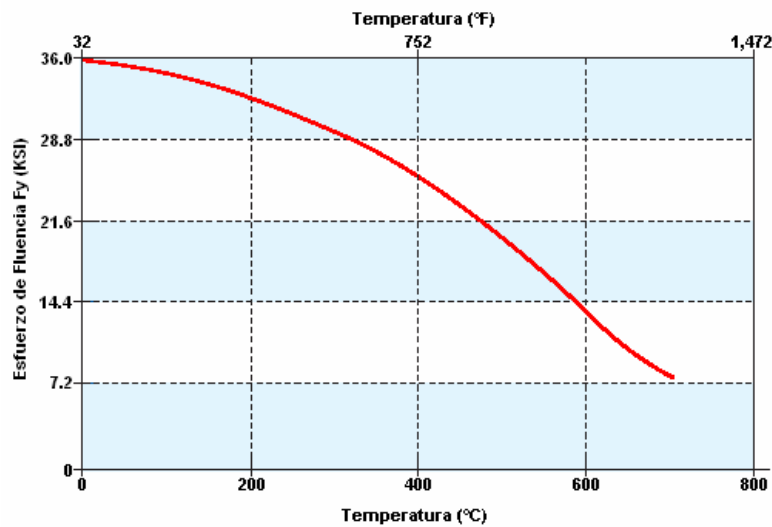


Figura 4.30. Variación del esfuerzo de fluencia Fy con respecto a la temperatura Temp. (°F) ^[17].

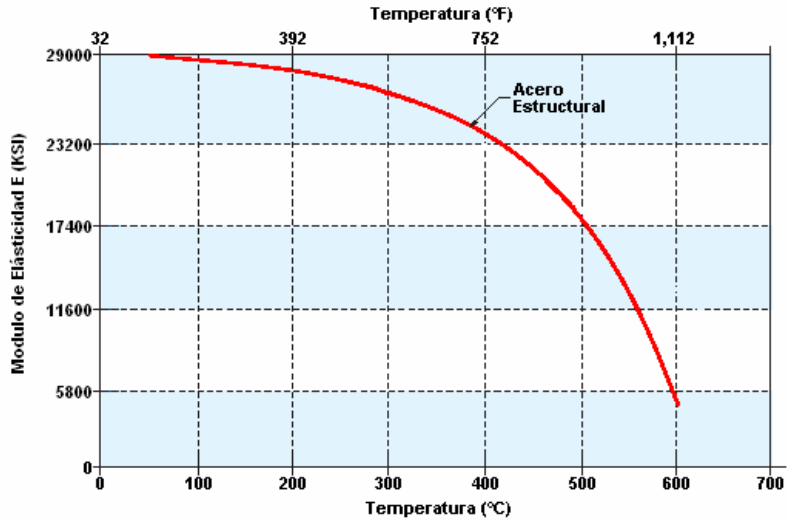


Figura 4.31. Variación del módulo de elasticidad E con respecto a la temperatura Temp. (°F)^[17].

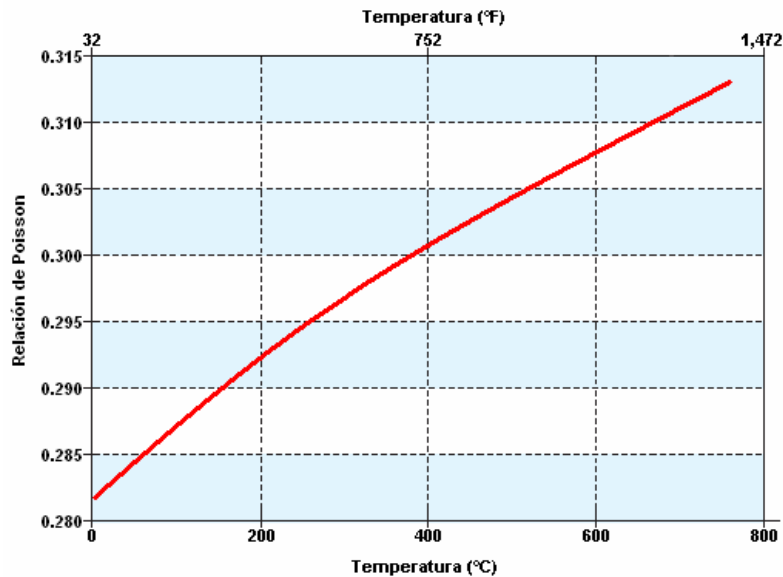


Figura 4.32. Variación de la relación de Poisson con respecto a la temperatura Temp. (°F)^[17].

Una vez obtenida la distribución de la temperatura del análisis térmico es posible utilizar los resultados como condición inicial en el modelo de elementos finitos al aplicarlos como cargas nodales para realizar un análisis termo-elasto-plástico, con el cual es posible determinar el comportamiento de los esfuerzos y deformaciones por la distribución de la temperatura.



Análisis Termo-elasto-plásticos

Se realizaron análisis termo-elasto-plásticos en los cuales se consideran las propiedades del material dependientes de la temperatura, para los modelos con aberturas del 10% y 5% obteniéndose los siguientes resultados. En la Figura 4.33 se muestra la distribución de esfuerzos del modelo con abertura del 10% y en las Figura 4.34 la distribución de las deformaciones plásticas.

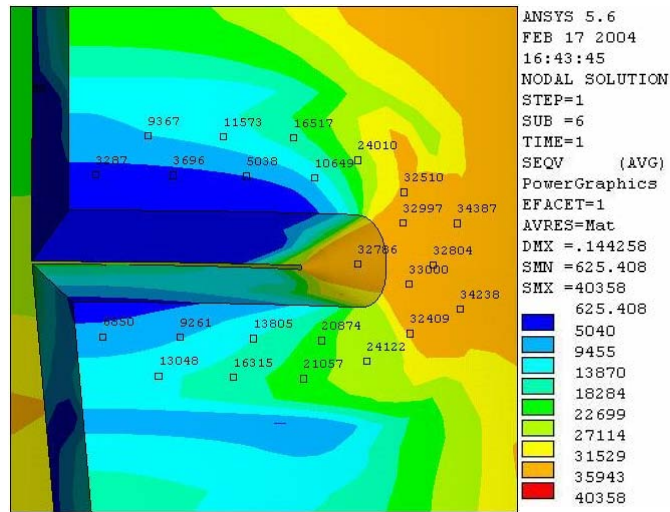


Figura 4.33. Distribución de esfuerzos en una conexión de 48"X1.5" con ranura de penetración completa y 10% de longitud, análisis termo-elasto-plástico.

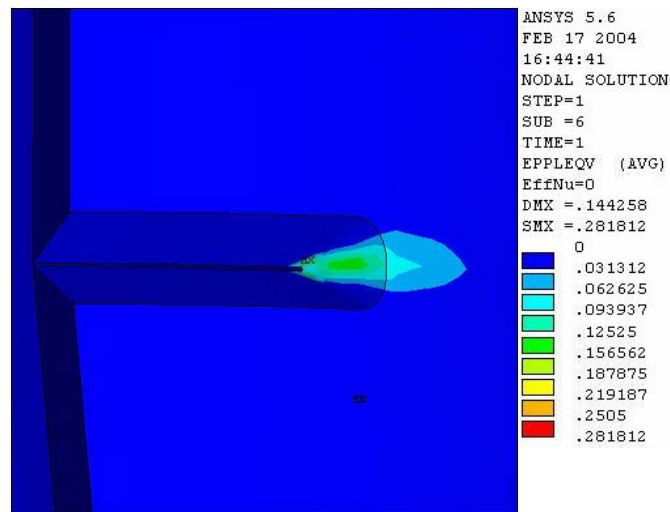


Figura 4.34. Distribución de deformaciones plásticas superficiales en una conexión de 48"X1.5" con ranura de penetración completa y 10% de longitud, análisis termo-elasto-plástico.

En la Figura 4.35 se muestra la distribución de esfuerzos del modelo con abertura del 5% y en la Figura 4.36 la distribución de las deformaciones plásticas.

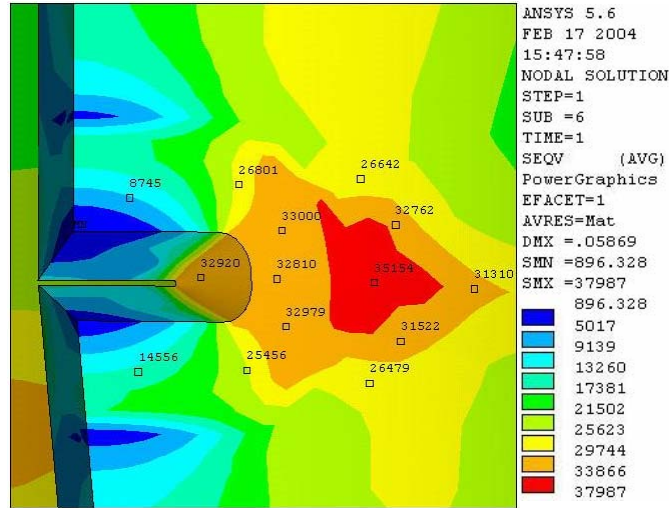


Figura 4.35. Distribución de esfuerzos en una conexión de 48"X1.5" con ranura de penetración completa y 5% de longitud, análisis termo-elasto-plástico.

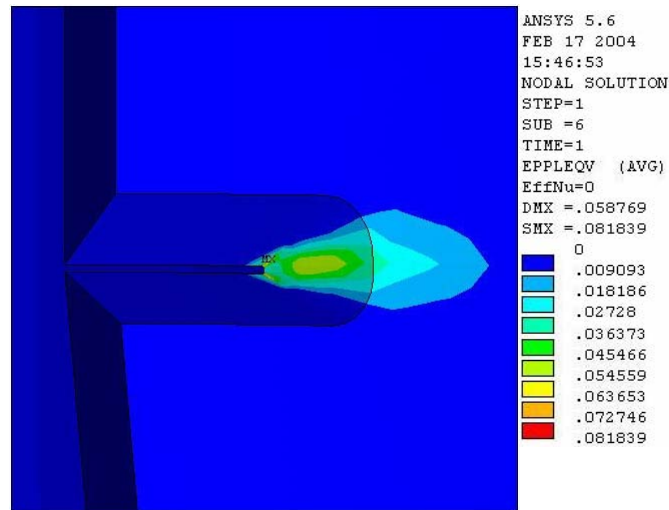


Figura 4.36. Distribución de deformaciones plásticas superficiales en una conexión de 48"X1.5" con ranura de penetración completa y 5% de longitud, análisis termo-elasto-plástico.

En el caso de la ranura del 5%, las deformaciones plásticas alcanzan la zona de endurecimiento por deformación de la curva esfuerzo-deformación del acero, con valores de 0.082 in/in (Figura 4.36) mientras que para la ranura del 10% la deformación plástica alcanza un valor de 0.28 in/in,



valor que se ubica más allá del punto de resistencia última del acero, este valor es muy alto dado que puede presentarse agrietamiento si se alcanza el esfuerzo de resistencia a la fractura, por lo que, nuevamente se considera que no deberán realizarse ranuras de 10% de longitud.

En la Figura 4.24 se muestran las deformaciones plásticas alcanzadas al realizar una ranura del 5% y aplicar la temperatura, estas alcanzan un 71% de la deformación correspondiente a la resistencia a la tensión y un 36% de la deformación correspondiente a la resistencia a la fractura, valores que a diferencia de los análisis sin temperatura toman valores de consideración, mas sin embargo hay que recordar que los niveles de esfuerzos aplicados son supuestos y pueden estar demasiado elevados, por lo que en el siguiente capítulo podrían obtenerse resultados mas favorables.

Aun así para la ranura del 10% tanto el factor de concentración de esfuerzos como los niveles de deformaciones plásticas alcanzados en los análisis elasto-plásticos y termo-elasto-plásticos alcanzan valores mucho mayores que los de la ranura del 5% que superan los niveles de deformación tanto la resistencia a la tensión como de la resistencia a la fractura, por lo que queda confirmado que no deben de realizarse reparaciones que implique la reparación en un solo paso del 10% del perímetro de la conexión.

4.4 VERIFICACIÓN DE LA SANIDAD DE LA NUEVA SOLDADURA Y SUS FRONTERAS CON LA SOLDADURA ANTERIOR

Una vez terminados los trabajos de soldadura se deberá de aplicar la prueba de líquidos penetrantes para asegurar que no existen defectos superficiales e inspeccionar con ultrasonido industrial el volumen de la nueva soldadura para garantizar que fue removido el defecto que dio origen a la reparación y para verificar que no se dejaron nuevos defectos.

Tanto el procedimiento de inspección con líquidos penetrantes como el de inspección ultrasónica deberán de cumplir los requisitos del capítulo 6 de AWS D1.1 última edición.



Capítulo 5

REVISION DE LA PROPUESTA

5.1 MODIFICACIÓN DEL MODELO

En el capítulo anterior se discutieron los resultados de los esfuerzos y deformaciones obtenidos del modelo de elementos finitos, al aplicar una carga de compresión uniformemente repartida en su parte superior correspondiente al 60% del esfuerzo de fluencia del material, en este caso acero A-36.

En este capítulo se aplicaran elementos mecánicos reales, que han sido obtenidos de una plataforma de perforación tipo octápodo, la cual de entre un grupo de plataformas del mismo tipo, presenta los mayores esfuerzos de compresión en sus conexiones superestructura-pilote.

A continuación se presentan los resultados de análisis termo-elasto-plásticos realizados al modelo usado en el capítulo anterior, solo que en esta ocasión debido a las enormes deformaciones plásticas que presentaba el modelo con abertura del 10% este se descarta en este capítulo. Entonces se trabaja con el modelo del 5% de abertura de penetración completa, pero en esta ocasión la abertura es modelada tanto en la parte interna como en la parte externa de la conexión. Se conservan tanto las propiedades geométricas como lo son el diámetro de 48", el espesor de 1.5" y la pendiente de 10.025°, así como que todo el modelo esta formado por acero A-36 y las

propiedades mecánicas del material dependientes de la temperatura expuestas en el capítulo anterior. Además, al aplicar la combinación de esfuerzos (carga axial $F_x = 923.08$ ton en compresión y los momentos flexionantes $M_y = 9.10$ ton-m y $M_z = 19.11$ ton-m que combinados producen un esfuerzo de compresión máximo de 705 kg/cm²), se tuvo especial atención en dirigir este esfuerzo máximo justamente por encima del lugar donde se encuentra la abertura (Figura 5.1).

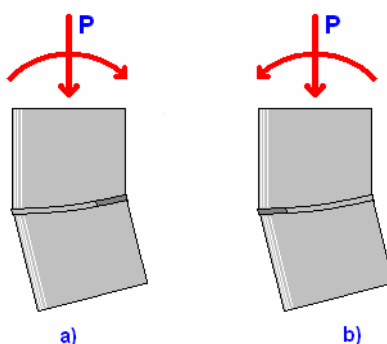


Figura 5.1. Aplicación de las cargas a los modelos ha analizar. a) Parte interna de la conexión, b) Parte externa de la conexión.

Se determinó una mejor distribución de la temperatura de precalentamiento, esto basado en las mediciones de temperatura realizadas en una prueba de calificación de soldadura, que se efectuó en un carrete de características similares (geometría y material) a las de la conexión superestructura-pilote^[18].

En este se registraron las temperaturas a diferentes distancias de la zona soldada, tanto en la parte interna como externa del espesor del carrete (similar a lo expuesta en la Figura 2.10). En esta prueba se pudo observar que aunque la temperatura de precalentamiento indicada era de 302°F (150°C) la temperatura real era mas elevada, y se extendía en una mayor superficie.

Por tal motivo el precalentamiento en el análisis de distribución de temperaturas con elementos finitos se realiza con 356°F (180°C) en ves de los 302°F (150°C) (utilizados en los análisis anteriores) para así obtener una temperatura mas elevada, y en vez de incrementar la temperatura en 3600 seg y mantenerla por 1800 seg más, ahora se incrementa en 3600 seg y se sostiene por 3600 seg lo que produce que la temperatura se distribuya en una mayor superficie (Figura 5.2).

Al igual que los análisis del capítulo anterior se precalentó en un área de 2" en la periferia de la ranura, los resultados de la aplicación de la temperatura se pueden ver en la Figura 5.3.

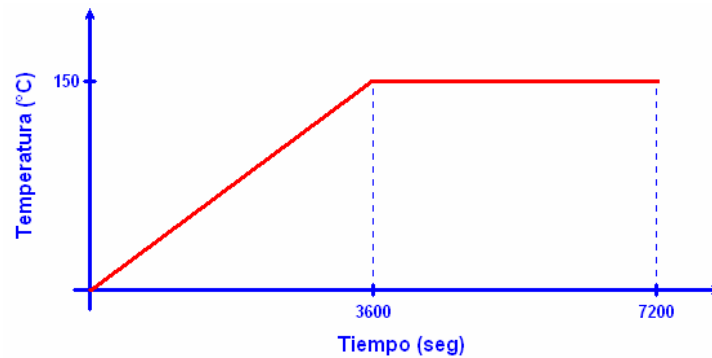


Figura 5.2. Aplicación de la temperatura.

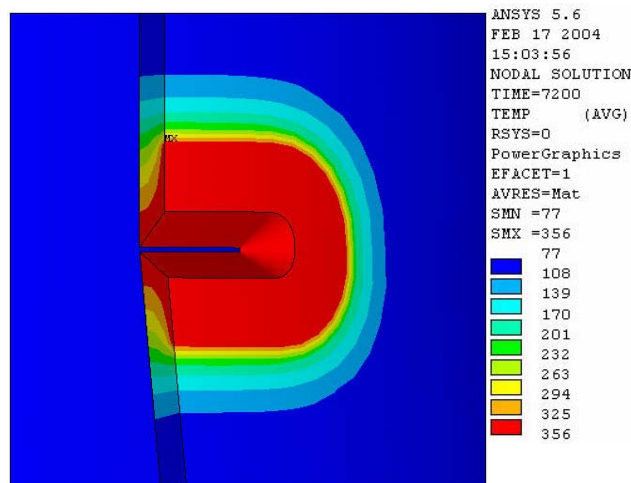


Figura 5.3. Distribución de temperatura, aplicando un precalentamiento de 356°F durante 7200 segundos.

La distribución de temperatura mostrada en la Figura 5.3 tiene valores más altos (54°F o 30°C mayor que en la Figura 4.28) y más extendidos, esto repercute directamente sobre las propiedades mecánicas del material.

Es preciso señalar que como en el caso anterior únicamente se considero la conducción y no se analizaron las pérdidas de calor producidas por la convección y la radiación.

Al igual que en el capítulo anterior los valores de los resultados son los esfuerzos equivalentes Von Mises y sus unidades son lb/in². La distribución de los esfuerzos para el modelo 5% de abertura en la parte interna se puede ver en la Figura 5.4.

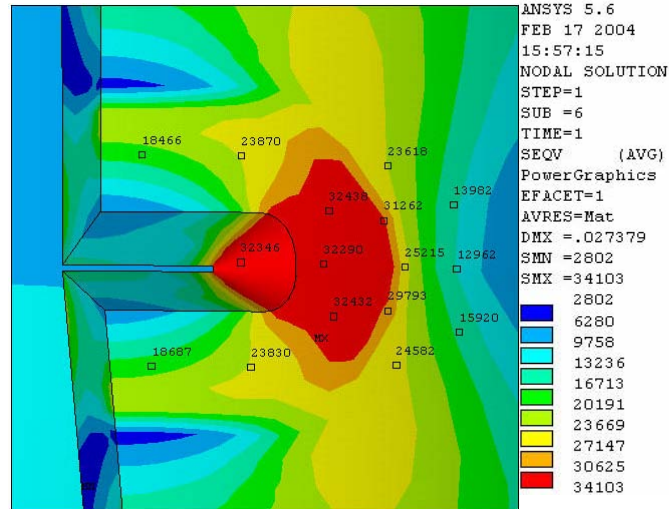


Figura 5.4. Distribución de esfuerzos en la parte interna de la conexión, ranura de penetración completa y de 5% de longitud, análisis termo-elasto-plástico.

El esfuerzo máximo resultante es de 34,103 lb/in², menor que el esfuerzo de fluencia del A-36, debido a que la temperatura influye directamente en las propiedades del material reduciendo tanto su módulo de elasticidad como su esfuerzo de fluencia, entonces se deben revisar las deformaciones plásticas. Estas deformaciones plásticas se muestran en las Figura 5.5.

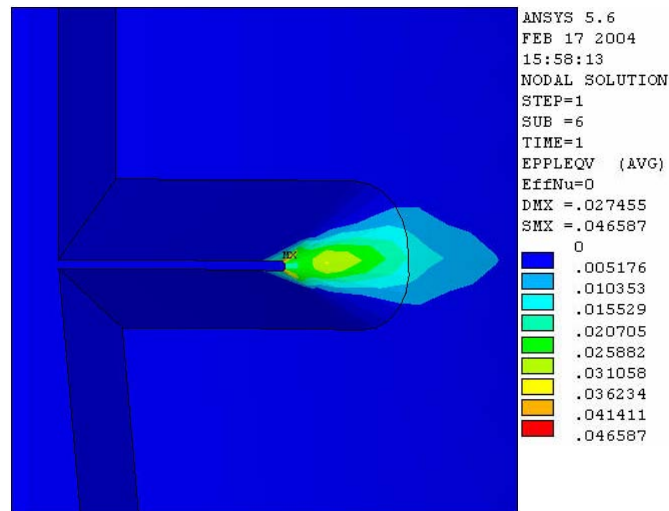


Figura 5.5. Distribución de deformaciones plásticas superficiales en la parte interna de la conexión, ranura de penetración completa y de 5% de longitud, análisis termo-elasto-plástico.



La distribución de los esfuerzos para el modelo con 5% de abertura en la parte externa se puede ver en la Figura 5.6 y de manera análoga se presentan las deformaciones plásticas en la Figura 5.7.

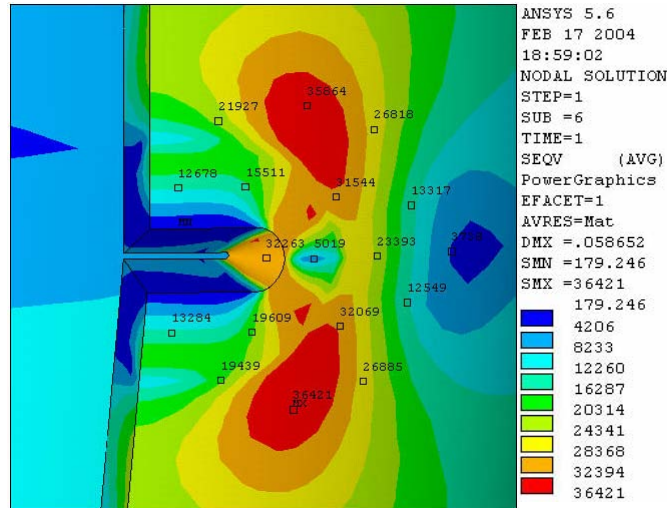


Figura 5.6. Distribución de esfuerzos en la parte externa de la conexión, ranura de penetración completa y de 5% de longitud, análisis termo-elasto-plástico.

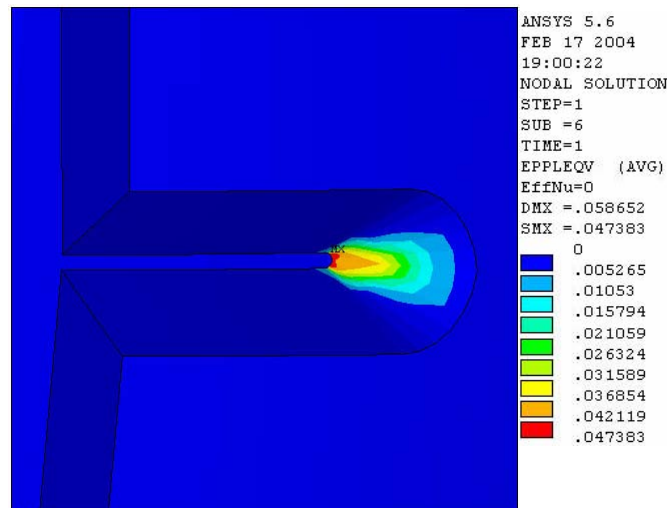


Figura 5.7. Distribución de deformaciones plásticas superficiales en la parte externa de la conexión, ranura de penetración completa y de 5% de longitud, análisis termo-elasto-plástico.

Puede observarse que estas deformaciones superan por mucho el rango elástico, la posición de estas deformaciones dentro de la curva esfuerzo deformación del acero A-36 se muestran en la Figura 5.8.

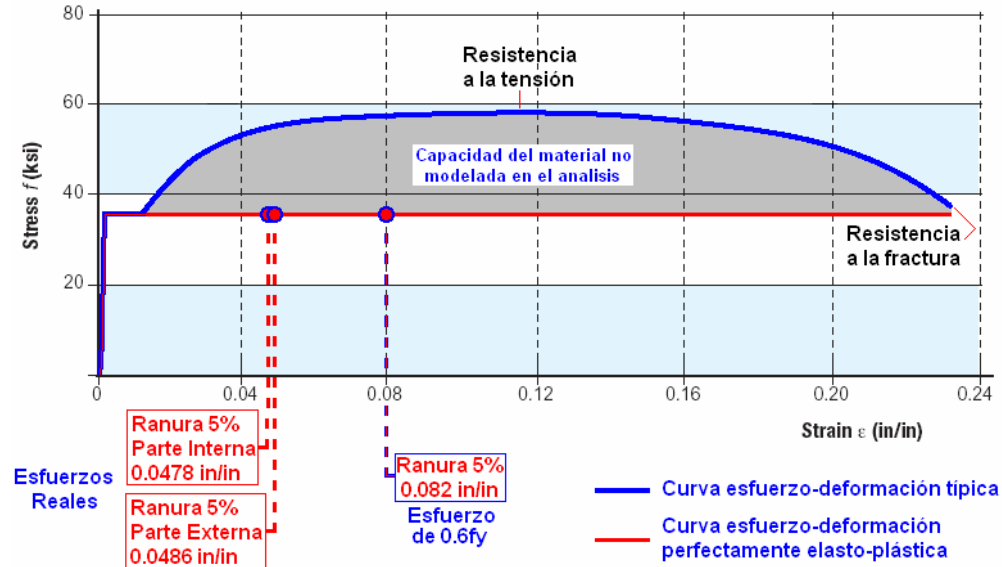


Figura 5.8. Visualización de las deformaciones de los análisis sobre la curva esfuerzo deformación del acero A-36.

Puede apreciarse en la Figura 5.8, que las deformaciones no llegan a los niveles donde se encuentra el esfuerzo máximo de a la tensión del material, pero estas deformaciones plásticas solo se encuentran concentradas en los extremos de las aberturas, por lo que el volumen de material que se plastifica es poco en comparación con el volumen de material de soldadura que se repara.

En la Figura 5.8 también pueden observarse la deformación máxima obtenida en el análisis termo-elasto-plástico de la ranura del 5% con esfuerzo de $0.6f_y$, puede verse que las deformaciones obtenidas con elementos mecánicos reales son sustancialmente menores (un 40% en promedio) y esto pese a que la distribución de temperatura en este capítulo es más alta y extendida.

Esto demuestra que los resultados obtenidos en el capítulo anterior son muy conservadores y que refinando el análisis cada vez más se pueden obtener menores valores de deformación plástica e incluso se podría incrementar la longitud de la abertura.

5.2 ESFUERZOS EN LA ZONA DE SOLDADURA

Se ha visto que las deformaciones plásticas se forman en los extremos de las aberturas, mientras que el resto del modelo permanece con esfuerzos dentro del rango elástico, justamente esas plastificaciones se encuentran embebidas dentro la zona que se encuentra formada por material de soldadura.



Es bien conocido que las soldaduras están diseñadas para resistir esfuerzos mucho mayores a los que pueden soportar los materiales a los que unen, y en este caso la utilización de soldadura E7018, implica que tiene una resistencia a la fluencia de 70,000 lb/in², esto quiere decir que al considerar en los análisis anteriores que todo el modelo estaba hecho de acero A-36 se ha subestimando una posible sobrerresistencia de la soldadura. Por estas razones se cambian las propiedades del modelo de las del acero A-36 a las de la soldadura E7018, conservando la pendiente elástica $E = 29000$ ksi.

La curva esfuerzo-deformación de la soldadura E-7018 se muestra en la Figura 5.13 en el que se considera un material perfectamente elasto-plástico. Las propiedades mecánicas del material dependientes de la temperatura se tomaron de manera análoga a las del acero A-36.

Se realizaron análisis termo-elasto-plásticos de los dos casos anteriores de abertura de 5% en la parte interna y 5% en la parte externa de la conexión. La distribución de los esfuerzos para el modelo con 5% de abertura en la parte interna se puede ver en la Figura 5.9.

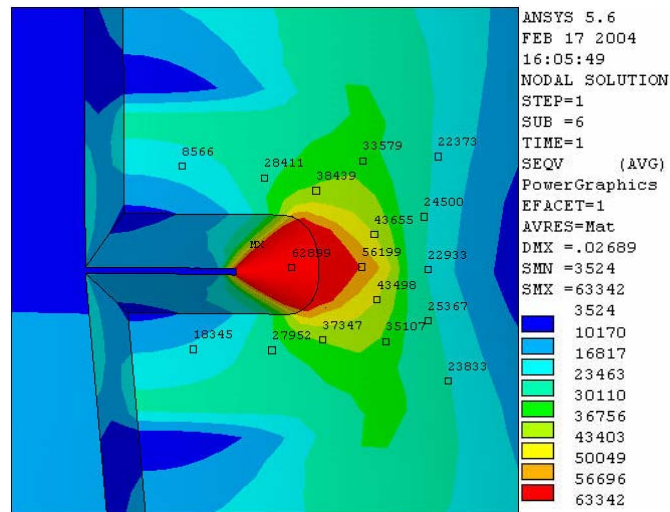


Figura 5.9. Distribución de esfuerzos en la parte interna de la conexión, ranura de penetración completa y de 5% de longitud, análisis termo-elasto-plástico.

Al igual que en el caso en el que se modelaba con acero A-36 el esfuerzo máximo de 63,342 lb/in² es menor que el esfuerzo de fluencia de la soldadura E-7018, esto de la misma manera influida por la temperatura. Las deformaciones plásticas resultantes se muestran en las Figura 5.10.

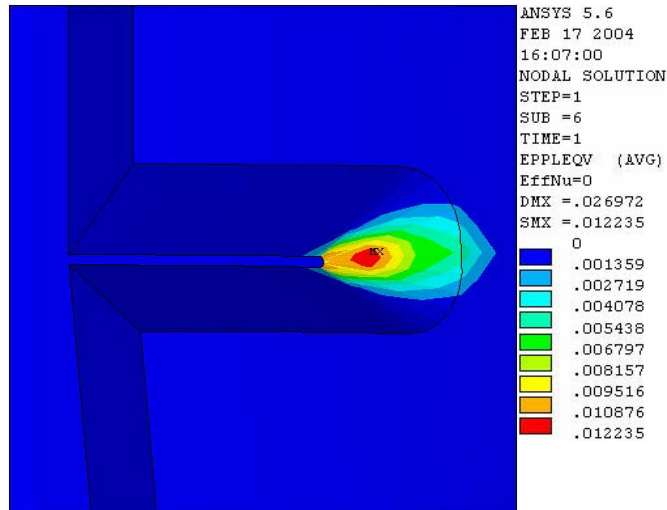


Figura 5.10. Distribución de deformaciones plásticas superficiales en la parte interna de la conexión, ranura de penetración completa y de 5% de longitud, análisis termo-elasto-plástico.

En seguida se muestra la distribución de esfuerzos resultantes del análisis de la abertura de 5% en la parte externa de la conexión, utilizando las propiedades de la soldadura E-7018. En la Figura 5.11 se muestra la distribución de esfuerzos, en la Figura 5.12 las deformaciones plásticas.

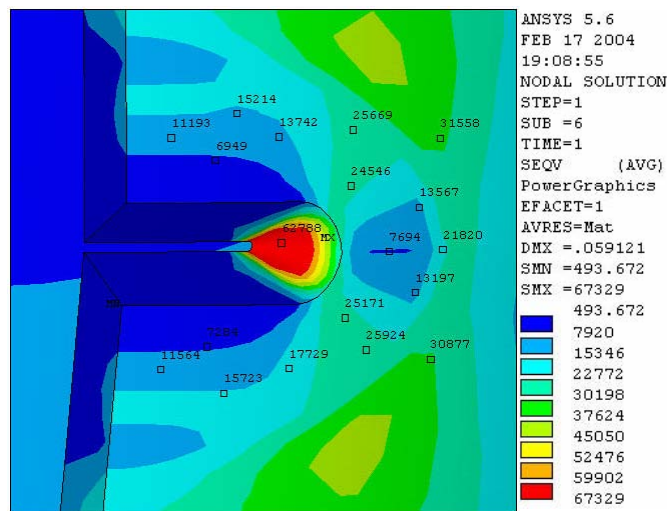


Figura 5.11. Distribución de esfuerzos en la parte externa de la conexión, ranura de penetración completa y de 5% de longitud, análisis termo-elasto-plástico.

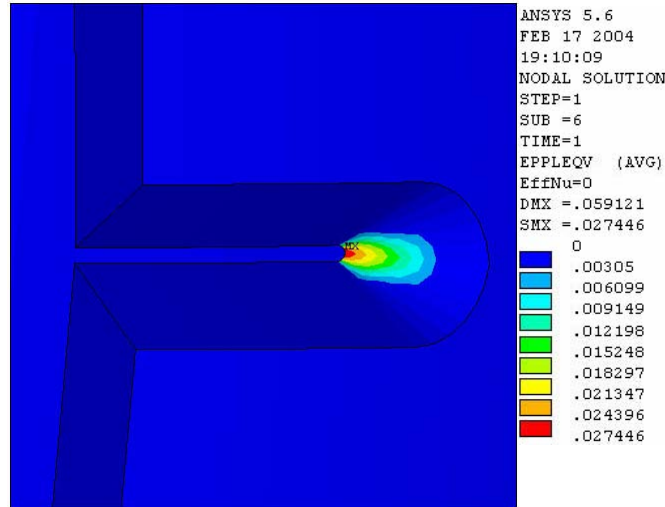


Figura 5.12. Distribución de deformaciones plásticas superficiales en la parte externa de la conexión, ranura de penetración completa y de 5% de longitud, análisis termo-elasto-plástico.

Una manera de visualizar el grado de deformación que sufre la conexión es nuevamente comparando las deformaciones obtenidas con las curvas esfuerzo-deformación tanto del acero A-36 como de la soldadura E-7018 (Figura 5.13). Se observa que estas deformaciones son sustancialmente menores a las obtenidas en los análisis considerando el modelo formado por acero A-36.

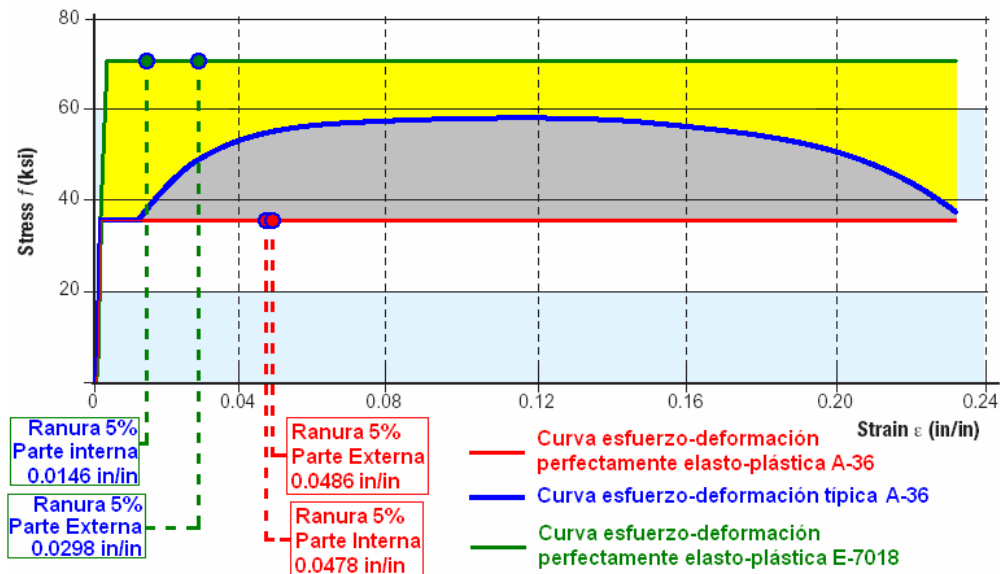


Figura 5.13. Comparación de las deformaciones obtenidas con las curvas esfuerzo deformación del acero A-36 y la soldadura E-7018.



Entonces podemos considerar que las deformaciones máximas se darán entre los límites marcados entre las deformaciones del mismo modelo pero considerando distintos materiales. Esto quiere decir que en el peor de los casos las deformaciones máximas considerando todo el modelo como acero A-36 serán de 0.047828 in/in para la parte interna y 0.048624 in/in para la externa y unas deformaciones mínimas en el mejor de los casos de 0.014649 in/in en la parte interna y de 0.02986 in/in para la parte externa.

Cabe mencionar que no se modelaron los dos materiales (acero A-36 y soldadura E-7018) en un mismo modelo ya que al momento de realizar la soldadura se crea una combinación de ambos materiales en estado líquido, lo que crea una zona de transición en la que no es posible asegurar las propiedades del material resultante, aunque estas deben de ser mayores a las del metal base.

Estos análisis solo se realizaron con fines comparativos y confirma la idea de que la refinación de los análisis produce resultados cada vez más favorables.

5.3 DISMINUCIÓN DE LA ABERTURA

Además de verificar la distribución de las deformaciones plásticas, hay que verificar que las aberturas no se cierren en su parte central, ya que sucediera dificultaría el depósito del nuevo material de soldadura (Figura 5.14).

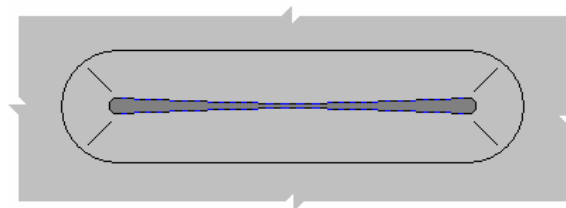


Figura 5.14. Disminución de la abertura por efecto de la carga y la temperatura.

En la Figura 5.15 se muestran los desplazamientos en la periferia de la ranura del modelo de 5% en la parte interna, y se muestra en detalle los valores de deformación la parte interna y central de la ranura. De manera análoga en la Figura 5.16 se muestran los desplazamientos en la periferia de la ranura del modelo de 5% en la parte externa, y en detalle la parte interna y central de la ranura.

Los valores de desplazamiento en las Figuras 5.15 y 5.16 se encuentran en pulgadas.

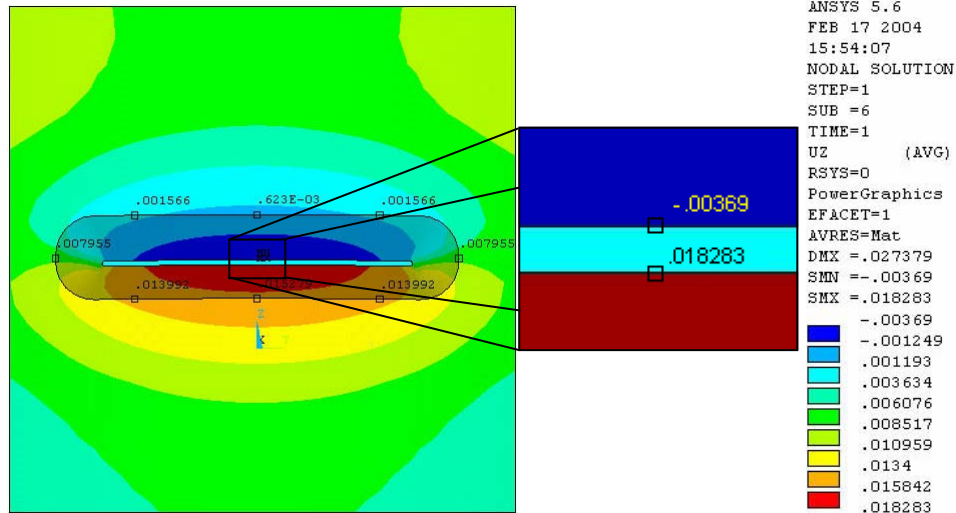


Figura 5.15. Desplazamientos en la periferia de la ranura de 5% en la parte interna.

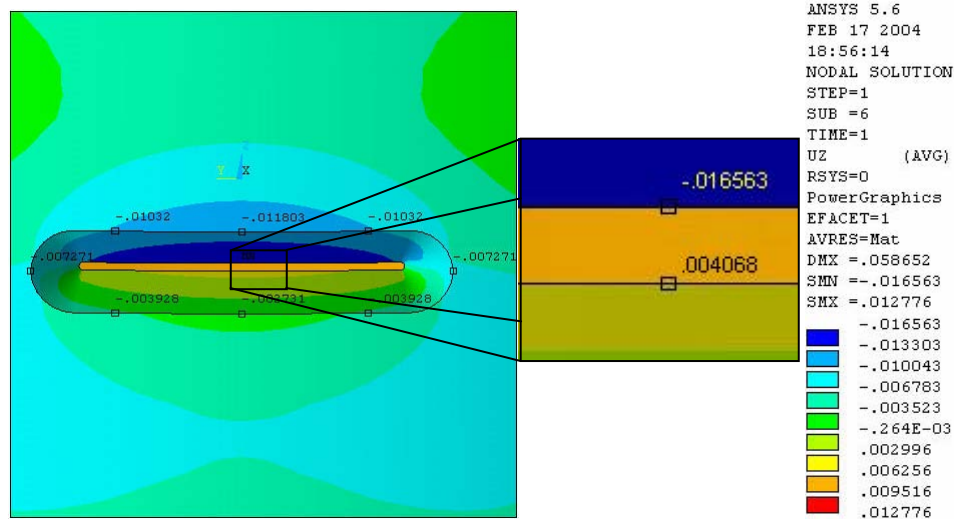


Figura 5.17. Desplazamientos en la periferia de la ranura de 5% en la parte externa.

Tomando las diferencias de los desplazamiento en la parte superior e inferior de las ranura de 5% en la parte interna (-0.00369 in en la parte superior y 0.018283 in en la parte inferior) y sabiendo que la ranura mide 1/8" en su parte mas profunda, la abertura se cierra 17.5%, (0.0219in o 0.56mm); en el caso de la ranura de 5% en la parte externa (-0.016553in en la parte superior y 0.004068in en la parte inferior) la abertura se cierra un 16.7%, 0.0206in o 0.52mm, por lo que no se presentan problemas para aplicar la soldadura ya que el cordón de soldadura podrá depositarse sin dificultad.



De todos los resultados anteriormente expuestos se puede asegurar que la reparación puede realizarse con una abertura del 5%, en cualquier parte de la conexión, ya que se analizaron los dos casos más críticos, resultando de estos que los niveles de deformación no alcanzan deformaciones que correspondan al esfuerzo máximo a la tensión del material, así como se asegura que la abertura creada no se cerrará con lo que garantiza la estabilidad de los elementos que conforman la conexión superestructura-pilote.

5.4 APLICACIÓN DE CARGAS EN CONDICIÓN DE TORMENTA DESPUES DE LA REPARACIÓN

Todos los análisis anteriores estuvieron basados en garantizar la estabilidad de la conexión durante la reparación, esto por supuesto en condiciones de operación. Pero surge una nueva interrogante, ¿Qué pasará cuando los esfuerzos en la conexión sufran un incremento sustancial, como es el caso de una condición de tormenta?, entonces el problema ahora consiste en determinar los esfuerzos resultantes a los que será sometida la conexión ya reparada cuando se presente un caso extraordinario que incremente los esfuerzos en la soldadura.

Lo anterior se logra generando un análisis a base de pasos en el que el último sea la aplicación de los máximos esfuerzos que puedan esperarse en condiciones de tormenta. En la Figura 5.19 se muestra las secuencias de cargas térmicas y operacionales aplicadas en los modelos de análisis.

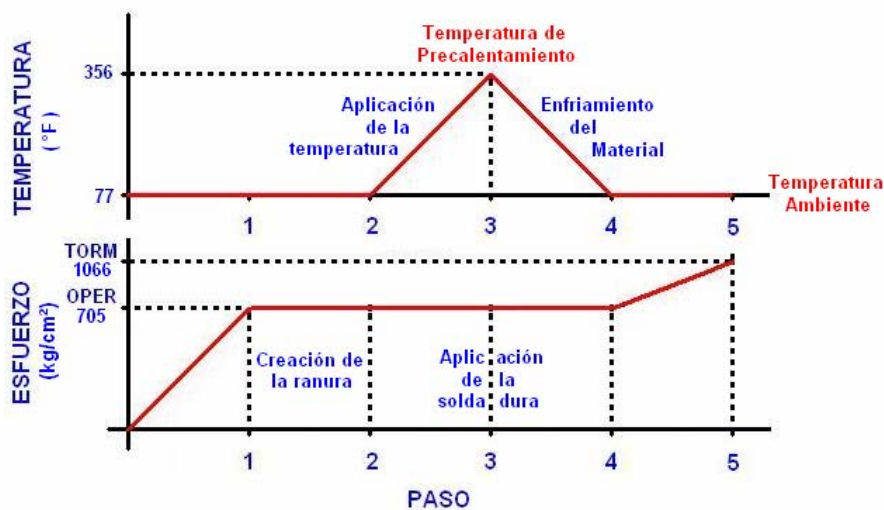


Figura 5.19. Secuencias de cargas térmicas y operacionales.



El esfuerzo máximo resultante de la combinación de carga axial $F_x = 759.20$ ton en compresión y momentos flexionantes $M_y = 123.7$ ton-m y $M_z = 174.80$ ton-m en condición de tormenta para la misma plataforma utilizada en los análisis anteriores resulta de 1066 kg/cm^2 .

Está claro que en este caso ya no se revisará la estabilidad global de la conexión, debido a que se supone que la sección ya fue reparada y al recibir un incremento en los esfuerzos por las cargas provenientes de la condición de tormenta la distribución de esfuerzos es uniforme. Sin embargo, no es el caso de la revisión por estabilidad local, debido a las zonas de plastificación creadas durante la reparación podrían extenderse cuando se incrementaran las cargas en condición de tormenta.

Se realizó un análisis con el modelo de elementos finitos, con la secuencia que se muestra en la Figura 5.19, en los análisis anteriores se había llegado solamente al equivalente del paso 3, en donde se comienza el depósito de la soldadura, ahora, se simula el enfriamiento de la conexión y el incremento de la carga hasta el máximo esfuerzo obtenido para la conexión en condiciones de tormenta para la misma plataforma de perforación.

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante el paso 5, únicamente para el material base, es decir, no se presentan los resultados del nuevo material de soldadura, por razones que más adelante se explican.

La distribución de los esfuerzos para el modelo 5% de abertura en la parte interna se puede ver en la Figura 5.20. Las deformaciones plásticas se muestran en las Figura 5.21.

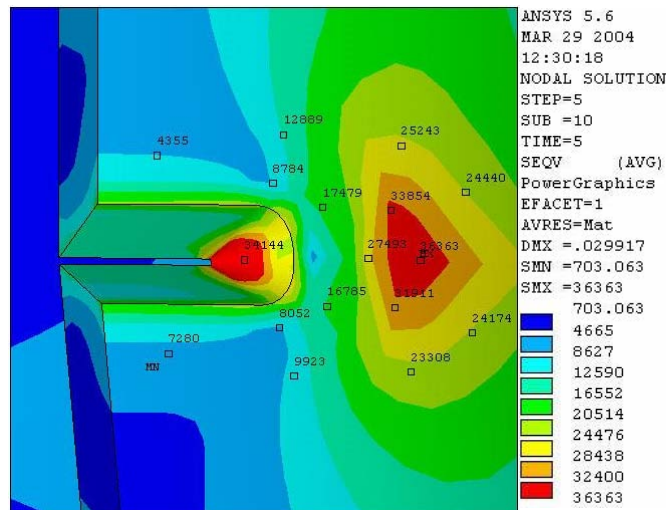


Figura 5.20. Distribución de esfuerzos en la parte interna de la conexión, ranura de penetración completa y de 5% de longitud, análisis termo-elasto-plástico con esfuerzo máximo de tormenta.

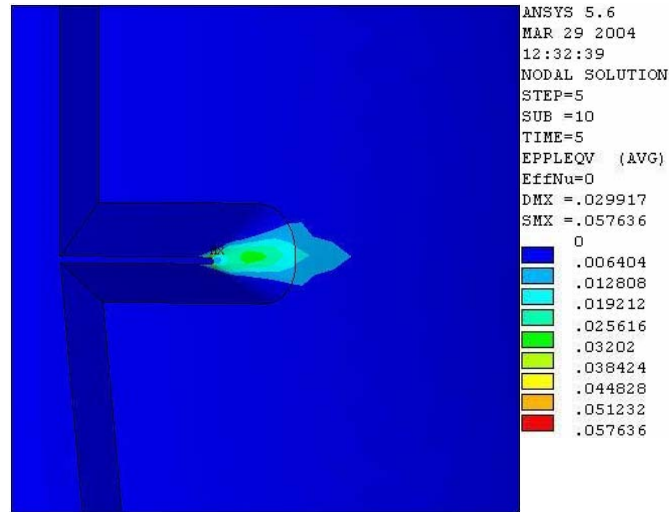


Figura 5.21. Distribución de deformaciones plásticas superficiales en la parte interna de la conexión, ranura de penetración completa y de 5% de longitud, análisis termo-elasto-plástico con esfuerzo máximo de tormenta.

Las Figuras 5.20, y 5.21 pueden ser comparadas directamente con las Figuras 5.4 y 5.5 respectivamente, para el mismo caso pero diferente condición de carga. Se observa un sustancial incremento en la deformación producto del aumento de carga, aun así este incremento eleva de 0.046587in/in a 0.057636in/in, más no incrementa la zona de plastificación si no que el mismo material plastificado sufre mas deformación. A pesar de esto las deformaciones se encuentran por debajo de la deformación que corresponde al esfuerzo máximo a la tensión (Figura 5.22).

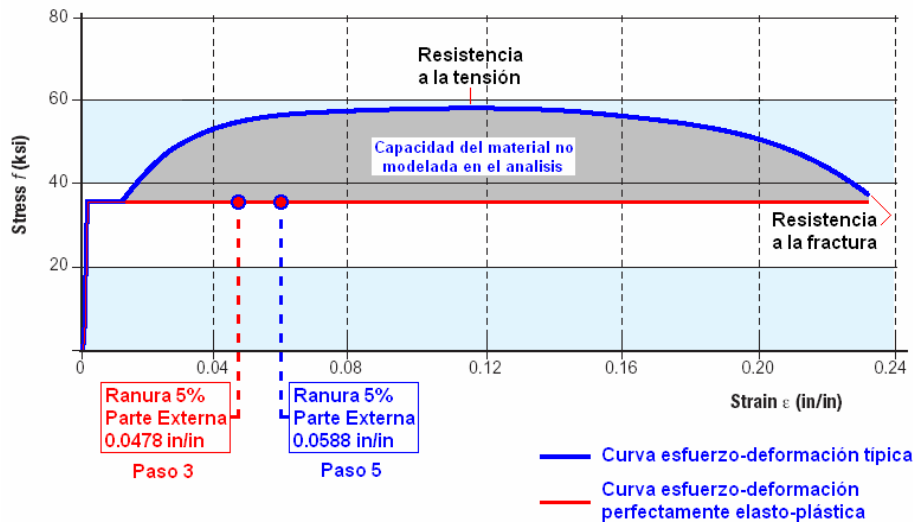


Figura 5.22. Visualización de las deformaciones de los análisis sobre la curva esfuerzo deformación del acero A-36.



En lo que respecta al material de soldadura nueva, se supuso que comienza a trabajar cuando se crea un incremento en la carga del elemento, o sea del paso 4 al paso 5 de la Figura 5.19.

En la Figura 5.23 se muestran los resultados de los esfuerzos en el material de soldadura nueva al aplicarle carga en condiciones de tormenta.

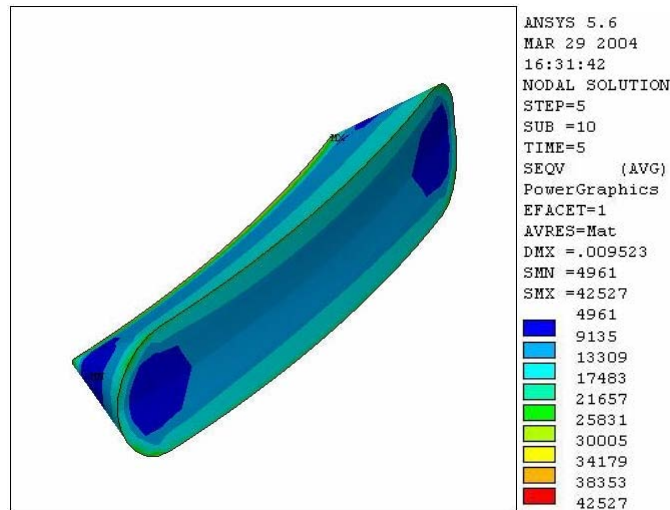


Figura 5.23. Esfuerzos del material de soldadura nueva, cuando se somete a una carga de tensión.

Sin embargo estos resultados no son cien por ciento reales, ya que para poder realizar el análisis en los pasos que se plantearon en la Figura 5.19, era necesario simular el retiro del material.

Para esto durante los pasos 2, 3 y 4 los elementos que simulan la soldadura que es retirada (Figura 5.23) son *desactivados* por el programa de análisis utilizado, lo que quiere decir que automáticamente estos elementos dejan de contribuir a la rigidez global del modelo.

Esto no quiere decir que hayan sido borrados definitivamente del modelo, sino que simplemente el programa no los considera, lo que es útil si después se quieren *reactivar*, como en el caso de simular que la conexión ha sido reparada y los elementos vuelven a contribuir a la rigidez global del modelo.

Entonces, al momento de desactivar los elementos estos dejan de contribuir a la rigidez global del modelo y los nodos de estos elementos conservan sus últimos valores de deformación y desplazamiento del último análisis ó paso de carga en los que estuvieron activos, mientras que el resto del modelo es deformado por la temperatura en los pasos 3 y 4.



Esto implica que al reactivar los elementos desactivados para simular que la reparación ha sido concluida, los desplazamientos de sus nodos ya no corresponden con los desplazamientos de los nodos del resto del modelo, lo que crea grandes concentraciones de esfuerzos sobre todo en los límites de la soldadura nueva como se observa en la Figura 5.23.

Sin embargo estos elementos recién activados son capaces de dar continuidad al modelo y transmitir esfuerzos con lo que se puede simular que la conexión ha sido reparada y es sometida a un incremento de esfuerzos.

Por lo anterior se descartan los resultados de la soldadura nueva ya que la única manera de tener resultados correctos es que al reactivar los elementos, los desplazamientos de sus nodos coincidan con los desplazamientos de los nodos de los elementos del resto del modelo.

Aun así los esfuerzos y las deformaciones a las orillas de la ranura son correctas porque estas solo dependen de los elementos de la nueva soldadura para transmitir cargas.

De acuerdo con los resultados anteriores las deformaciones plásticas alcanzadas cuando el modelo se somete a condiciones de tormenta equivalen al 50% de la deformación correspondiente a la resistencia a la tensión del acero y al 25% de la resistencia a la fractura. Por lo tanto puede considerarse aceptable la reparación del 5% del perímetro de la soldadura ya que se asegura tener una reserva considerable de ductilidad y así evitar la aparición de fallas en el material cuando la conexión reparada se somete a un incremento sustancial de esfuerzos en condición de tormenta.



Capítulo 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

La reparación de la soldadura con discontinuidades en conexiones superestructura-pilote de plataformas marinas fijas debe realizarse bajo procedimientos definidos de tal manera que se garantice la seguridad de las operaciones durante su desarrollo y después de éste, haciendo uso de las recomendaciones, y cumpliendo los requisitos de normas vigentes en el diseño de estructuras de acero y estándares de soldadura de estructuras metálicas como lo es el A.W.S. D1.1.

El procedimiento se desarrollo en cuatro fases:

1. Verificación de la magnitud del defecto, localización y evaluación.
2. Remoción de la soldadura defectuosa.
3. Aplicación de nuevo material de soldadura.
4. Verificación de la sanidad de la nueva soldadura y sus fronteras con la soldadura anterior.

Las fases 1 y 4 quedan definidas por la ejecución de pruebas no destructivas para garantizar en principio la detección y evaluación de discontinuidades a reparar y por ultimo garantizar la plena



reparación de la soldadura, estos procedimientos quedan regidos por las normas establecidas por el A.W.S. D1.1.

Los esfuerzos, deformaciones elásticas y deformaciones plásticas generadas en las fases 2 y 3 de la reparación, en las que se remueve soldadura hasta evidenciar y remover el defecto, y se aplica soldadura nueva para restituir el material removido, se analizaron desde dos puntos de revisión, comportamiento global de la reparación y comportamiento local.

La revisión del comportamiento global se basó en la estabilidad de la columna compuesta por la unión de la columna de la superestructura y el pilote hasta su punto de arriostamiento con la subestructura. La estabilidad de la columna se ve reducida por la formación de la ranura, que a su vez modifica las propiedades inerciales de la sección transversal que se repara. Se emplearon para esta revisión normas de diseño de estructuras de acero del API y la teoría referente al pandeo de columnas. Resultado de esta revisión, se estableció conservadoramente que la mayor longitud permisible en que se puede realizar la reparación considerando un factor de seguridad de 1.5 es de un **cinco por ciento** de la longitud circunferencial de la soldadura, esto sin considerar la concentración de esfuerzos que se generan en los extremos de la ranura ni la aplicación de temperatura producto de la soldadura.

La revisión del comportamiento local de la reparación evaluada mediante el Método de los Elementos Finitos, se basó en la distribución de esfuerzos máximos generados por la formación de la ranura, en las deformaciones elásticas y deformaciones plásticas generadas por las altas concentraciones de esfuerzos en el perímetro de la ranura y en los efectos de la aplicación de calor en las propiedades mecánicas del material. Se realizaron para esta revisión análisis elasto-plásticos y termo-elasto-plásticos de una conexión de 48" de diámetro y 1.5" de espesor, considerando que en la reparación se atraviesa todo el espesor de la conexión.

De los análisis efectuados de la reparación, se concluyó que la longitud máxima admisible para reparar es de un **cinco por ciento** de la longitud. Esta conclusión se basa en las magnitudes de deformaciones plásticas y su relación con los niveles máximos de deformaciones y esfuerzos límites a la tensión y fractura del acero A-36. En el caso de aberturas de 5%, las deformaciones plásticas máximas no son mayores de 0.048 in/in, en cambio para aberturas de 10 %, las magnitudes de deformación plástica son del orden de 0.28 in/in, valor que es mayor a la deformación alcanzada por el esfuerzo límite a la tensión del acero.

Las reducciones de ductilidad generadas en pequeñas zonas superficiales en el contorno de ranuras de 5% de longitud son aceptables para efectuar la reparación, esto debido a que aunque



alcanzan grandes deformaciones estas no superan la deformación que corresponde al esfuerzo máximo a la tensión del acero A-36.

Por otro lado, se verificó que las deformaciones elásticas al centro de las ranuras no fueran tales que se cerrara la ranura, provocando que al momento de generarla se removiera más material del necesario y/o impidiera la correcta aplicación del nuevo material de soldadura.

Por otro lado, las zonas de deformaciones plásticas alcanzadas al reparar la conexión, no se incrementan al someter la conexión ya reparada a un incremento en las cargas como lo es el caso de la condición de tormenta, aunque la deformación si crece en valor, estas deformaciones son formadas por esfuerzos de compresión, lo que hace que el material aunque se encuentre plastificado siga transmitiendo esfuerzos. Por esto se garantiza la plena seguridad de que la conexión tendrá garantizada su integridad aún en condiciones de tormenta.

6.2 RECOMENDACIONES

Con base en los resultados anteriores el IMP concluyó que desde el punto de vista de análisis de esfuerzos, la reparación de soldaduras de conexiones superestructura–pilote con discontinuidades embebidas puede realizarse siempre y cuando la longitud a reparar no rebase el cinco por ciento de la longitud circunferencial de la soldadura. Sin embargo, la reparación en campo deberá apearse en la mejor manera posible a las geometrías de las reparaciones modeladas en el capítulo 4 a fin de garantizar la estabilidad local y global de la conexión.

En casos en que la longitud acumulada de defecto en la soldadura rebase el 5% de longitud de reparación, se deberá revisar si con esta longitud reparada se cumple con los requerimientos de longitudes máximas admisibles con defecto o si es necesario reparar más soldadura defectuosa. En el último caso, deberá procederse a la generación de ventanas de reparación necesarias siempre y cuando, no se realicen simultáneamente.

La reparación debe de realizarse con personal calificado y materiales de calidad que garanticen la plena reparación de la soldadura y evitar la inclusión de nuevos defectos.



6.3 RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS

Es poco probable que en un solo trabajo se puedan abarcar la gran cantidad de variables que pueden surgir de un solo problema, y esta tesis no es la excepción, aquí se ha realizado una evaluación analítica, que invariablemente debe ser corroborada con pruebas estructurales de laboratorio que certifiquen los resultados aquí expuestos.

Aquí solo se planteó de manera muy particular uno de los muchos casos posibles que pueden encontrarse en las conexiones superestructura-pilote, más sin embargo el procedimiento de análisis llevado a cabo puede ser útil para verificar otros muchos casos.

En estos análisis se emplearon curvas esfuerzo-deformación bilineales del acero perfectamente definidas, que difiere de la realidad por que se desprecia una gran parte de esfuerzo adicional que considera el endurecimiento por deformación del acero.

No se considero las pérdidas de calor producto de la convección y de la radiación, lo que probablemente repercutiría en una carga de temperatura menor y por lo tanto menores esfuerzos inducidos por calor.

Los modelos se analizaron considerando únicamente un tipo de material, ya sea acero A-36 o soldadura E7018, aunque los resultados que rigieron fueron los del A-36, quizás si se modelaran ambos se obtendrían mejores resultados.

Claramente se observa que las recomendaciones se tomaron en base a los resultados de una manera conservadora, que con el refinamiento de los puntos anteriores se pueden obtener resultados más favorables, lo que repercutiría en menores deformaciones o en la posibilidad de efectuar una reparación de mayor tamaño.



Bibliografía

- [¹] **Pender, James A.** “Soldadura”. Ed. McGraw-Hill, 1980.
- [²] **INDURA.** “Manual de soldadura”. <http://www.indura.cl>. Colombia 2003.
- [³] **SIEEND (Servicios de ingeniería en ensayos no destructivos).** “Ensayos no destructivos”. <http://www.sieend.com.mx>. México 2003.
- [⁴] **García, Alfonso.** “Ultrasonido Industrial”. México 1989.
- [⁵] **IMP (Instituto Mexicano del Petróleo).** “Análisis numérico local mediante elementos finitos de las conexiones superestructura-pilote con discontinuidades y determinación del efecto que producen”. Instituto Mexicano del Petróleo. Reporte Técnico. Octubre de 2001.
- [⁶] **Horikawa, K., Suzuki, H. e Imi, K.** “Repair Welding on Bridges in Service Condition”. Transactions of JWRI, Vol 12. No. 2, 1983. Welding Research Institute of Osaka University, Osaka, Japan.
- [⁷] **Suzuki, H. and Horikawa, K.** “Fundamental Study on Welding to Bridge Members in Service Condition, Welding to Compression Members”. Transactions of JWRI, Vol. 12 No. 2, 1983. Welding Research Institute of Osaka University, Japan.
- [⁸] **Suzuki, H. and Horikawa, K.** “Welding to Pipe Column under Axial Compressive Load”. Transactions of JWRI, Vol. 13 No. 2, 1988. Welding Research Institute of Osaka University, Japan



[9] “Tensile test of SS 41 in high temperature”, private report (in Japanese). Referencia tomada de [6], no se refieren autores.

[10]. **Cook, R. D.** Finite Element Modeling for Stress Analysis. John Wiley & Sons, Inc. 1995. USA.

[11]. **Pitts, D. R. y Sissom, L. E.** Teoría y Problemas de Transferencia de Calor. McGraw-Hill. 1979. Bogotá, Colombia.

[12]. **Tutorials ANSYS 5.6.** “Basic Analysis Procedures Guide”.

[13] **IMP (Instituto Mexicano del Petróleo).** “Procedimiento de reparación de la soldadura de la conexión superestructura-pilote”. Instituto Mexicano del Petróleo. Reporte Técnico. Octubre de 2003.

[14] **Roark, Raymond J. Young,** “Formulas for Stress and Strain” Fifth Edition. McGraw-Hill, Inc. 1982.

[15] **IMCA.** Manual de Construcción en Acero – DEP. Instituto Mexicano de la Construcción en Acero. Ed. Limusa, 2001.

[16] **Salmon, C. G., Johnson, J. E.** “Steel Structures, Design and Behavior. Emphasizing Load and Resistance Factor Design”. Fourth Edition. Ed Harper Collins College Publishers. 1996.

[17] **Fisher, J., Iwankiw, N.** World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observations and Recommendations. Federal Emergency Management Agency. New York, N.Y. Appendix B, Structural Steel and Steel Connections. FEMA 403, May 2002.

[18] **IMP (Instituto Mexicano del Petróleo).** “Calificación del procedimiento de soldadura”. Instituto Mexicano del Petróleo. Reporte Técnico. Noviembre del 2003.



Anexo A

LOCALIZACIÓN DE ESFUERZOS MÁXIMOS EN LA SECCIÓN

Las condiciones mecánicas en las que se encuentra la conexión superestructura-pilote, están regidas principalmente por la carga axial y los momentos que surgen de la superestructura, como se muestra en la Figura A.1

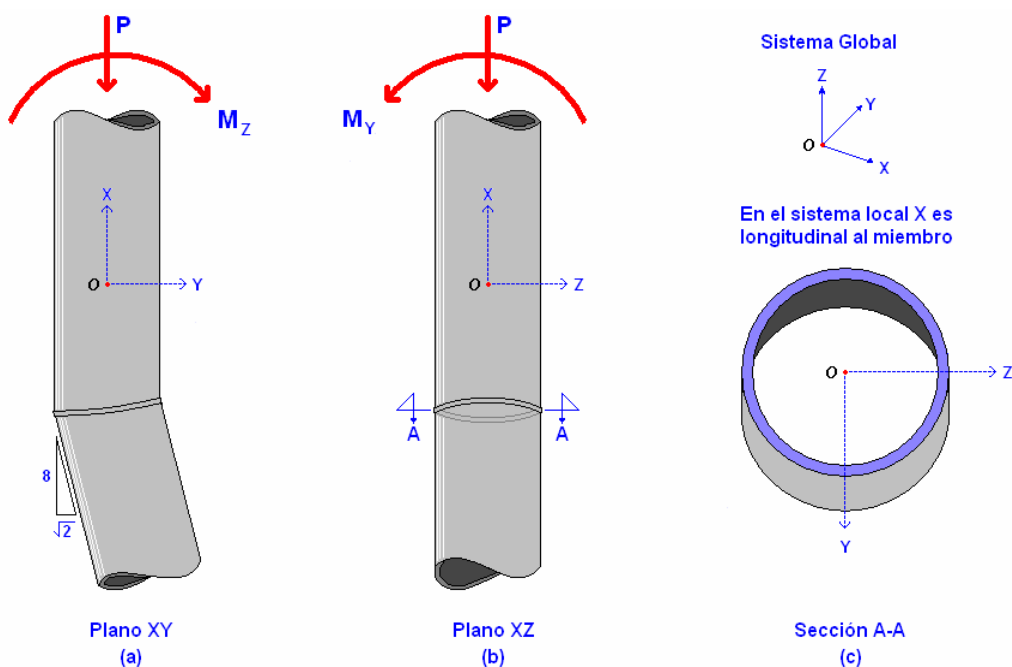


Figura A.1. Condiciones mecánicas.



El esfuerzo máximo que se tiene en la sección transversal de la conexión debido a las sollicitaciones mecánicas puede determinarse mediante la fórmula de la escuadría.

$$\sigma_{act} = \frac{P}{A} \pm \frac{M_y \bar{c}_z}{I_y} \pm \frac{M_z \bar{c}_y}{I_z} \quad (\text{A.1})$$

en donde:

- σ_{act} = es el esfuerzo actuante
- P = carga axial externa actuante
- A = área de la sección transversal
- M_y = momento externo alrededor del eje y local del elemento
- M_z = momento externo alrededor del eje z local del elemento
- I = momento de inercia de la sección transversal
- \bar{c} = distancia del centro de rigidez de la sección transversal a la fibra extrema

Al momento de la reparación se retirará material de soldadura con defectos, generándose una redistribución de esfuerzos en la sección transversal de la conexión, entonces al esfuerzo actuante se le suman otros provocados por la excentricidad causada al retirar la soldadura defectuosa y el cambio de pendiente entre la columna y el pilote.

Por lo anterior, a la ecuación (A.1) se le agregan 2 argumentos más:

$$\sigma_{total} = \sigma_{act} \pm \frac{P e \bar{c}_z}{I_y} \pm \frac{P d \bar{c}_y}{I_z} \quad (\text{A.2})$$

en donde:

- $P e = M e$; es el momento producido por la carga axial P y la excentricidad formada al retirar soldadura con defectos.
- $P e = M d$; es el momento producido por el cambio de pendiente columna-pilote

Ubicación de la reparación y esfuerzos máximos resultantes

Analizando el posible, lugar de la reparación se determinaron 3 condiciones críticas.

Caso 1. La reparación se realiza en la parte interna del cambio de pendiente (Figura A.2).

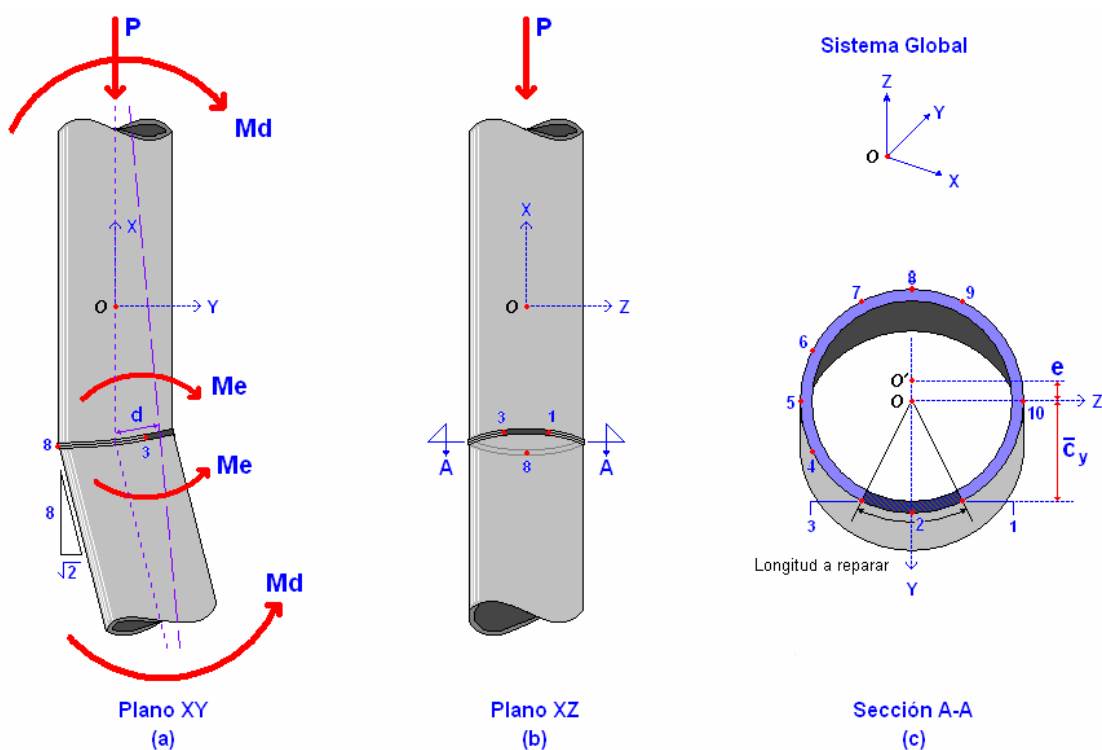


Figura A.2. Reparación de soldadura en el cambio de pendiente, en la parte interna.

En primera instancia se crea un momento por el cambio de pendiente entre la pierna y el pilote; denominado Md , $Md = Pxd$, ver figura A.2(a).

Un segundo momento Me se crea al retirar una parte de la soldadura para repararla, ver figura A.2(c), debido a que se origina una excentricidad en la aplicación de la carga axial, en este caso es alrededor del eje z.

Los puntos en donde los esfuerzos son máximos, (en este caso los puntos 1, 3 y 8) se muestran mediante los puntos indicados en la figura A.2(c).

Entonces los esfuerzos provocados en los tres puntos extremos señalados en la figura A.2(c) son:

En los puntos 1 y 3:

$$\sigma_{total} = \sigma_{3total} = \sigma_{act} + \frac{P\bar{e}c_y}{I_{z_{str}}} + \frac{Pd\bar{c}_y}{I_{z_{str}}} = \sigma_{act} + \frac{P\bar{c}}{I_{z_{str}}}(e + d) \quad (\text{A.3})$$

En el punto 8:

$$\sigma_{8total} = \sigma_{act} - \frac{P\bar{e}\bar{c}_y}{I_{z_{str}}} - \frac{Pd\bar{c}_y}{I_{z_{str}}} \quad (A.4)$$

donde: I_{str} = Momento de inercia de la sección transversal reducida.

Caso 2. La reparación se realiza en la parte externa del cambio de pendiente (Figura A.3).

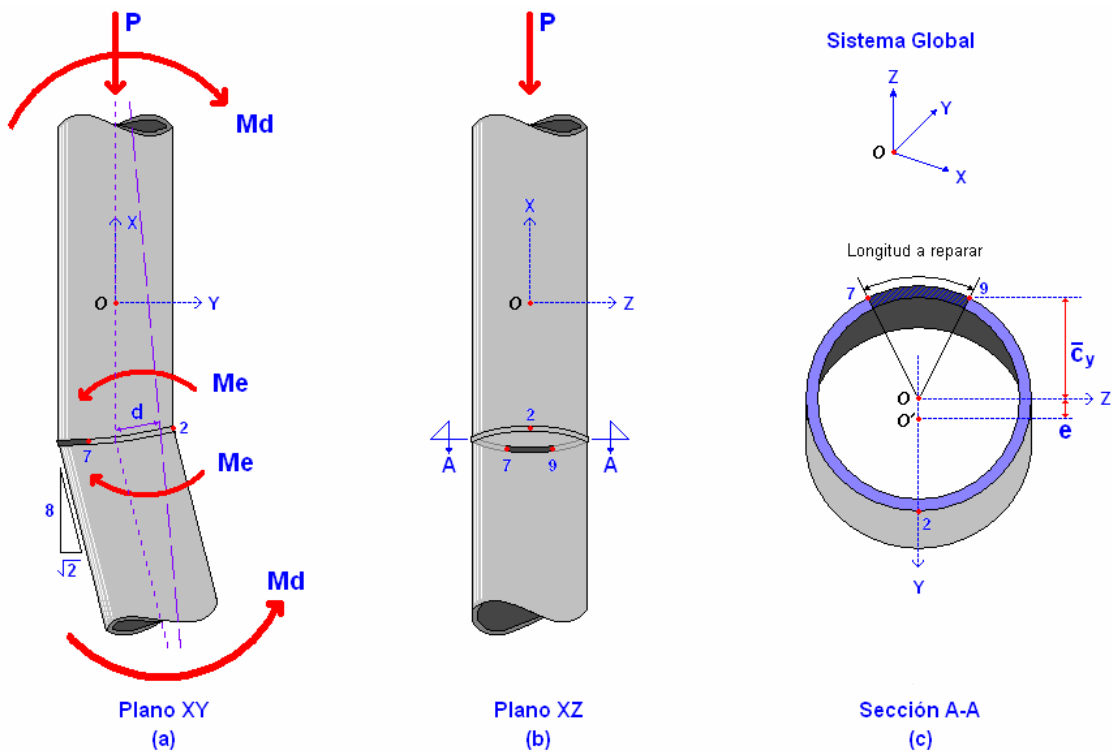


Figura A.3. Reparación de soldadura en el cambio de pendiente, en la parte externa.

Al igual que en el caso anterior se crean los momentos Md y Me alrededor del eje z , entonces el esfuerzo provocado en los tres puntos extremos (puntos 2, 7 y 9) señalados en la figura A.3(c) son:

En el punto 2:

$$\sigma_{2total} = \sigma_{act} + \frac{P\bar{e}\bar{c}_y}{I_{z_{str}}} - \frac{Pd\bar{c}_y}{I_{z_{str}}} \quad (A.5)$$

En los puntos 7 y 9:

$$\sigma_{7total} = \sigma_{9total} = \sigma_{act} - \frac{P\bar{e}\bar{c}_y}{I_{z_{str}}} + \frac{Pd\bar{c}_y}{I_{z_{str}}} \quad (A.6)$$

Caso 3. La reparación se realiza en la parte lateral, a 90° de cualquiera de los casos anteriores (Figura A.4).

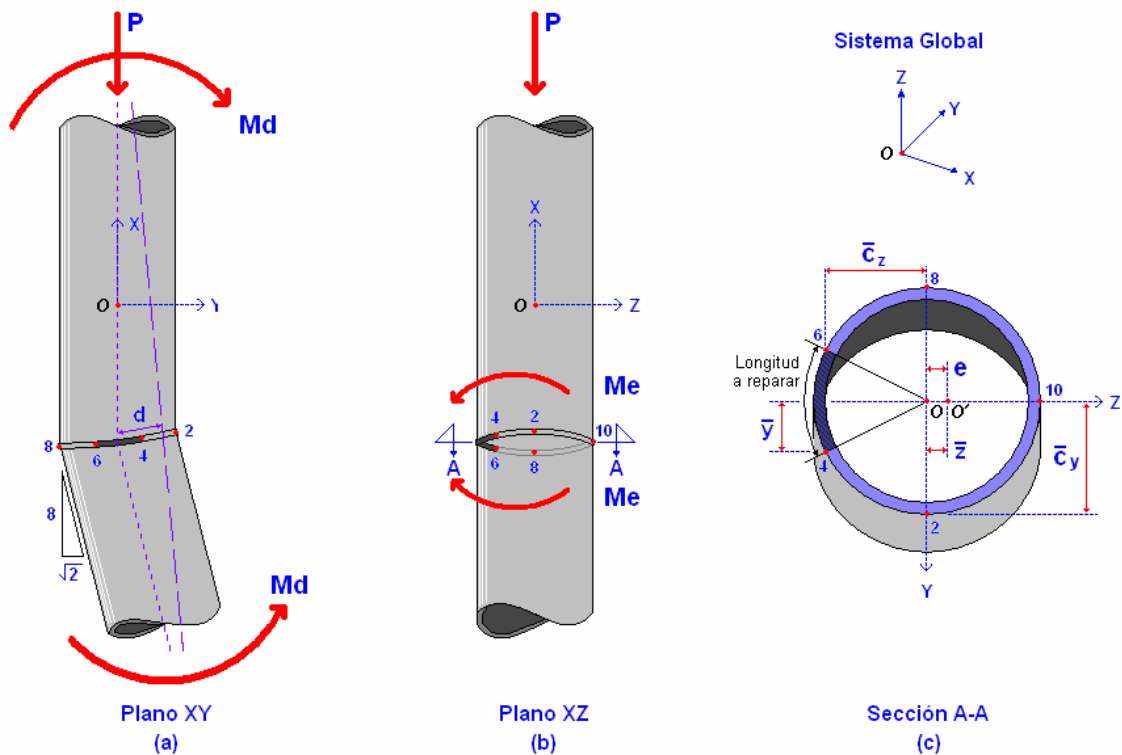


Figura A.4. Reparación de soldadura en la parte lateral.

Ahora el momento Md se crea alrededor del eje z , y el momento Me alrededor del eje y , entonces el esfuerzo provocado en los cinco puntos extremos (puntos 2, 4, 6, 8 y 10) señalados en la Figura A.4(c) son:

En el punto 2:

$$\sigma_{2total} = \sigma_{act} + \frac{Pe\bar{z}}{I_{y_{str}}} + \frac{Pd\bar{c}_y}{I_{z_{str}}} \quad (A.7)$$



En el punto 4:

$$\sigma_{4total} = \sigma_{act} + \frac{P\bar{e}\bar{c}_z}{I_{y_{str}}} + \frac{P\bar{d}\bar{y}}{I_{z_{str}}} \quad (\text{A.8})$$

En el punto 6:

$$\sigma_{6total} = \sigma_{act} + \frac{P\bar{e}\bar{c}_z}{I_{y_{str}}} - \frac{P\bar{d}\bar{y}}{I_{z_{str}}} \quad (\text{A.9})$$

En el punto 8:

$$\sigma_{8total} = \sigma_{act} + \frac{P\bar{e}\bar{z}}{I_{y_{str}}} - \frac{P\bar{d}\bar{c}_y}{I_{z_{str}}} \quad (\text{A.10})$$

En el punto 10:

$$\sigma_{2total} = \sigma_{act} - \frac{P\bar{e}\bar{c}_z}{I_{y_{str}}} \quad (\text{A.11})$$

Al comparar las expresiones anteriores (ecuaciones 3-10), se observa que en los puntos 1 y 3 del caso 1 y se crea el momento máximo de las condiciones de carga y reparación analizadas.

Ahora sabemos que el esfuerzo máximo se formará en las fibras extremas de la sección a reparar, cuando esta se realice en la parte interna del cambio de pendiente esto es

$$\sigma_{total} = \sigma_{act} + \frac{P\bar{e}\bar{c}}{I_{str}} + \frac{P\bar{d}\bar{c}}{I_{str}} \quad (\text{A.12})$$



Anexo B

PROPIEDADES DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL REDUCIDA

Se tienen como constantes, el diámetro exterior D y el espesor t , y una variable, la longitud a reparar L (Figura B.1).

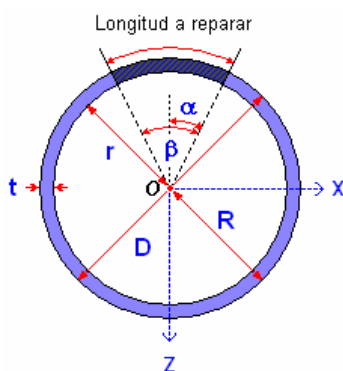


Figura B.1. Dimensiones principales de la sección de estudio.

Al momento de la reparación se retirará una parte de la soldadura, la longitud de soldadura a retirar no será mayor que un décimo del perímetro, esta longitud formará un ángulo al que llamaremos β . Las dimensiones mostradas en la Figura B.1 son:

$$R = D/2 \quad (\text{B.1})$$

$$r = R - t \quad (\text{B.2})$$



$$\beta = L/R \quad (\text{B.3})$$

$$\alpha = \beta/2 \quad (\text{B.4})$$

Para calcular las propiedades de esta sección reducida, como lo son el área, el momento de inercia y el radio de giro, esta se divide en varias secciones con propiedades conocidas (figura B.2).

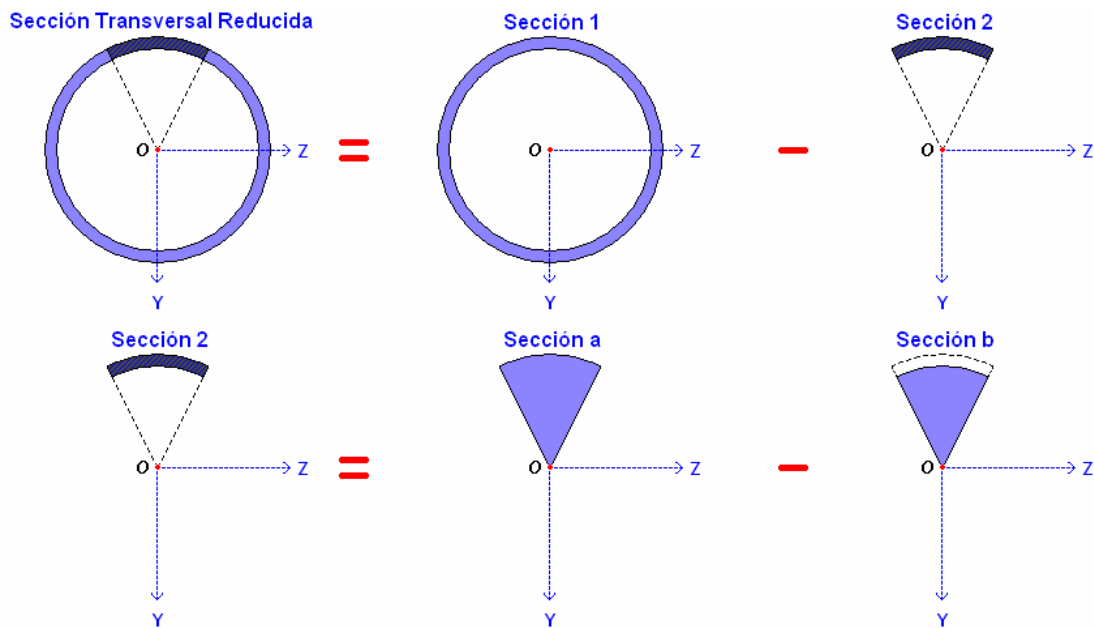


Figura B.2. División de la sección en otras más simples para su análisis.

Las características de la sección 1 se muestran en la Figura B.3

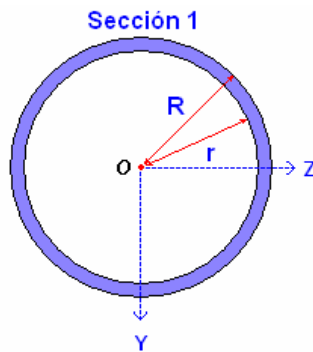


Figura B.3. Características de la sección 1.



Las propiedades de esta sección están dadas por:

$$A_1 = \pi(R^2 - r^2) \quad (\text{B.5})$$

$$\bar{y}_1 = 0 \quad (\text{B.6})$$

$$I_1 = \frac{1}{4}\pi(R^4 - r^4) \quad (\text{B.7})$$

La sección 2 se divide en las secciones a y b (Figura B.4)

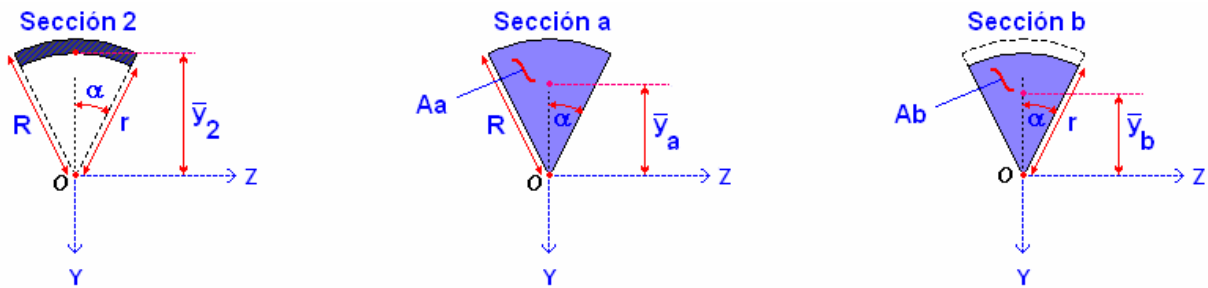


Figura B.4. División de la sección 2 y principales características de las secciones a y b.

De las secciones a y b se conocen las siguientes propiedades

$$A_a = \alpha R^2 \quad (\text{B.8})$$

$$\bar{y}_a = \frac{2R \operatorname{sen} \alpha}{3\alpha} \quad (\text{B.9})$$

$$I_a = \frac{1}{4}R^4(\alpha + \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha) \quad (\text{B.10})$$

$$A_b = \alpha r^2 \quad (\text{B.11})$$

$$\bar{y}_b = \frac{2r \operatorname{sen} \alpha}{3\alpha} \quad (\text{B.12})$$



$$I_b = \frac{1}{4} r^4 (\alpha + \text{sen} \alpha \cos \alpha) \quad (\text{B.13})$$

Con los datos anteriores calculamos la posición del centroide de la sección 2 (y_2)

$$\bar{y}_2 = \frac{(A_a \times \bar{y}_a) - (A_b \times \bar{y}_b)}{A_a - A_b} \quad (\text{B.14})$$

La posición del centroide de la sección 2 y de las distancias de los centroides particulares de las secciones a y b al centroide de la sección 2 se muestran en la Figura B.5.

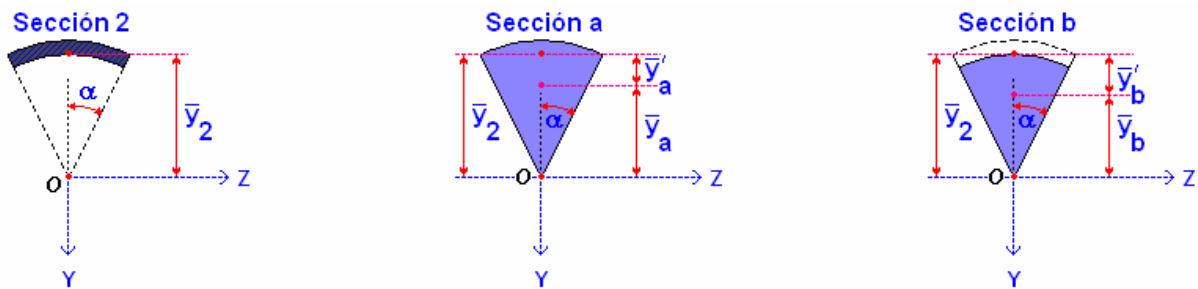


Figura B.5. Posición del centroide de la figura 2 y distancias de los centroides particulares.

Las distancias de los centroides particulares de las secciones a y b al centroide de la sección 2 son determinadas por

$$\bar{y}'_a = \bar{y}_2 - \bar{y}_a \quad (\text{B.15})$$

$$\bar{y}'_b = \bar{y}_2 - \bar{y}_b \quad (\text{B.16})$$

Entonces para la sección 2 el área y la inercia quedan determinadas por

$$A_2 = A_a - A_b \quad (\text{B.17})$$

$$I_2 = I_a + (A_a \times \bar{y}_a^2) - [I_b + (A_b \times \bar{y}_b^2)] \quad (\text{B.18})$$

Ahora que contamos con las propiedades de la sección 1 y 2 podemos calcular la excentricidad generada o distancia de O a O' de la sección transversal disminuida (Figura B.6).

$$e = \frac{(A_1 \times \bar{y}_1) - (A_2 \times \bar{y}_2)}{A_1 - A_2} \quad (\text{B.19})$$

Sección Transversal Reducida

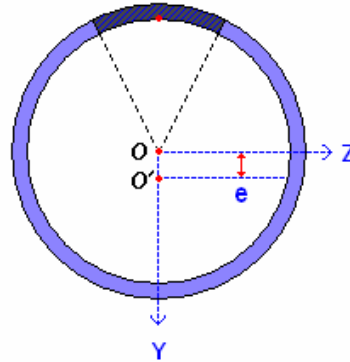


Figura B.6. Excentricidad generada por el retiro del material.

Las distancias de los centroides particulares de las secciones 1 y 2 al de la sección principal se determinan por las siguientes expresiones (Figura B.7).

$$\bar{y}'_1 = e \quad (\text{B.20})$$

$$\bar{y}'_2 = \bar{y}_2 + e \quad (\text{B.21})$$

Sección Transversal Reducida

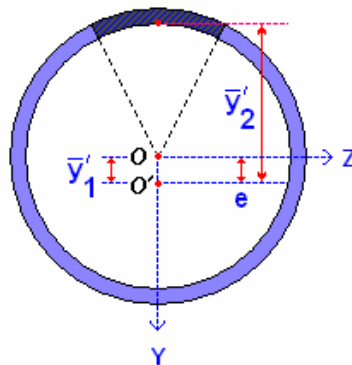


Figura B.7. Distancias de los centroides particulares al centroide general.

El área, momento de inercia y radio de giro de la sección transversal reducida se calculan por medio de las siguientes expresiones



$$A_{str} = A_1 - A_2 \quad (\text{B.22})$$

$$I_{str} = I_1 + (A_1 \times \bar{y}_1^2) - \left[I_2 + (A_2 \times \bar{y}_2^2) \right] \quad (\text{B.23})$$

$$r_{str} = \sqrt{\frac{I_{str}}{A_{str}}} \quad (\text{B.24})$$

Por último la distancia del centro de rigidez de la sección transversal a la fibra extrema, se determina mediante la expresión B.25, ver Figura B.8

Sección Transversal Reducida

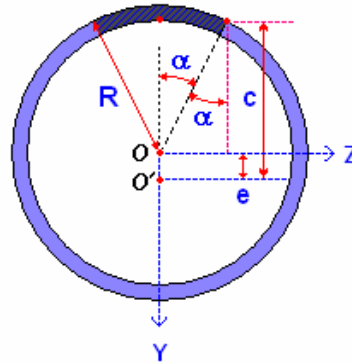


Figura B.8. Distancia del centro de rigidez a la fibra extrema.

Entonces esta distancia queda definida por

$$c = e + R \cos \alpha \quad (\text{B.25})$$



Anexo C

CÁLCULOS PARA LA ESTABILIDAD GLOBAL



C.1. ESFUERZOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN LA CONEXIÓN SUPERESTRUCTURA-PILOTE

PLATAFORMA DE PERFORACIÓN

diac	48,00	plg	diámetro	121,92	cm
tc	1,50	plg	espesor	3,81	cm
rc	24,00	plg	radio exterior	60,96	cm
rmc	23,25	plg	radio medio	59,055	cm
P	371,05	cm	perímetro		
I	2467723,83	cm ⁴	Momento de Inercia		
A	1413,71	cm ²	Área de la sección		
S	40481,03	cm ³			

CONDICIÓN 1

OPERACIÓN

PIERNA	A1 NODO 300	A2 NODO 303	A3 NODO 307	A4 NODO 311	B1 NODO 358	B2 NODO 361	B3 NODO 365	B4 NODO 369
Fx (kg)	-545519,1	-813226,4	-893907,9	-920634,5	-541632,4	-716154,3	-833455,1	-875002,4
My (kg-cm)	337707,4	700934,4	830697	1456211,3	-1156503,1	694656,4	-1200540,2	-1114200,6
Mz (kg-cm)	24136,4	-1279601,4	610997,5	-662976,4	-558576,6	383327,9	-865406,5	-2267199,5
Myz (kg-cm)	338568,8	1459002,7	1031201,0	1600027,8	1284331,4	793402,7	1479940,9	2526190,1
Esfuerzo Axial (fa) (kg/cm ²)	-385,88	-575,24	-632,31	-651,22	-383,13	-506,58	-589,55	-618,94
Esfuerzo de flexión (fby) (kg/cm ²)	8,34	17,32	20,52	35,97	-28,57	17,16	-29,66	-27,52
Esfuerzo de flexión (fbz) (kg/cm ²)	0,60	-31,61	15,09	-16,38	-13,80	9,47	-21,38	-56,01
Esfuerzo de flexión (fbyz) (kg/cm ²)	8,36	36,04	25,47	39,53	31,73	19,60	36,56	62,40
fa+fby	-377,53	-557,93	-611,79	-615,24	-411,70	-489,42	-619,21	-646,46
fa-fby	-394,22	-592,56	-652,83	-687,19	-354,56	-523,74	-559,89	-591,41
fa+fbz	-385,28	-606,85	-617,22	-667,59	-396,93	-497,11	-610,93	-674,95
fa-fbz	-386,47	-543,63	-647,41	-634,84	-369,33	-516,05	-568,17	-562,93
fa+fbyz	-377,51	-539,20	-606,84	-611,69	-351,40	-486,98	-552,99	-556,53
fa-fbyz	-394,24	-611,28	-657,79	-690,74	-414,85	-526,18	-626,11	-681,34
esfuerzo axial máximo (kg/cm ²) =	-377,51	-539,20	-606,84	-611,69	-351,40	-486,98	-552,99	-556,53
esfuerzo axial mínimo (kg/cm ²) =	-394,24	-611,28	-657,79	-690,74	-414,85	-526,18	-626,11	-681,34



C.1. ESFUERZOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN LA CONEXIÓN SUPERESTRUCTURA-PILOTE

PLATAFORMA DE PERFORACIÓN

diac	48,00 plg	diámetro	121,92 cm
tc	1,50 plg	espesor	3,81 cm
rc	24,00 plg	radio exterior	60,96 cm
rmc	23,25 plg	radio medio	59,055 cm
P	371,05 cm	perímetro	
I	2467723,83 cm ⁴	Momento de Inercia	
A	1413,71 cm ²	Área de la sección	
S	40481,03 cm ³		

CONDICIÓN 2

OPERACIÓN

PIERNA	A1 NODO 300	A2 NODO 303	A3 NODO 307	A4 NODO 311	B1 NODO 358	B2 NODO 361	B3 NODO 365	B4 NODO 369
Fx (kg)	-487896,5	-735339,1	-810515,1	-814087,4	-663838,6	-805530,5	-908182,6	-923075,4
My (kg-cm)	-6372,2	345608,4	322190,1	877460,6	-566775,8	1054016,4	-718584,0	-910158,4
Mz (kg-cm)	-533205,0	-1494295,3	442949,7	-520304,4	-778993,3	557561,8	-684957,1	-1911079,6
Myz (kg-cm)	533243,1	1533741,7	547732,5	1020124,4	963361,5	1192403,3	992738,2	2116746,0
Esfuerzo Axial (fa) (kg/cm ²)	-345,12	-520,15	-573,32	-575,85	-469,57	-569,80	-642,41	-652,94
Esfuerzo de flexión (fby) (kg/cm ²)	-0,16	8,54	7,96	21,68	-14,00	26,04	-17,75	-22,48
Esfuerzo de flexión (fbz) (kg/cm ²)	-13,17	-36,91	10,94	-12,85	-19,24	13,77	-16,92	-47,21
Esfuerzo de flexión (fbyz) (kg/cm ²)	13,17	37,89	13,53	25,20	23,80	29,46	24,52	52,29
fa+fby	-345,27	-511,61	-565,36	-554,17	-483,57	-543,76	-660,16	-675,43
fa-fby	-344,96	-528,68	-581,28	-597,53	-455,57	-595,83	-624,66	-630,46
fa+fbz	-358,29	-557,06	-562,38	-588,70	-488,81	-556,02	-659,33	-700,15
fa-fbz	-331,95	-483,23	-584,27	-563,00	-450,33	-583,57	-625,49	-605,73
fa+fbyz	-331,94	-482,26	-559,79	-550,65	-445,77	-540,34	-617,89	-600,65
fa-fbyz	-358,29	-558,03	-586,85	-601,05	-493,37	-599,25	-666,93	-705,23
esfuerzo axial máximo (kg/cm ²) =	-331,94	-482,26	-559,79	-550,65	-445,77	-540,34	-617,89	-600,65
esfuerzo axial mínimo (kg/cm ²) =	-358,29	-558,03	-586,85	-601,05	-493,37	-599,25	-666,93	-705,23



C.1. ESFUERZOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN LA CONEXIÓN SUPERESTRUCTURA-PILOTE

PLATAFORMA DE PERFORACIÓN

diac	48,00	plg	diámetro	121,92	cm
tc	1,50	plg	espesor	3,81	cm
rc	24,00	plg	radio exterior	60,96	cm
rmc	23,25	plg	radio medio	59,055	cm
P	371,05	cm	perímetro		
I	2467723,83	cm ⁴	Momento de Inercia		
A	1413,71	cm ²	Área de la sección		
S	40481,03	cm ³			

CONDICIÓN 3

OPERACIÓN

PIERNA	A1 NODO 300	A2 NODO 303	A3 NODO 307	A4 NODO 311	B1 NODO 358	B2 NODO 361	B3 NODO 365	B4 NODO 369
Fx (kg)	-547180,1	-721884,8	-771186,7	-705205	-778760,7	-845713,6	-920649,5	-868305,5
My (kg-cm)	124578,3	228024,1	52971,9	435915,7	-115704,2	1198276,4	-561972,4	-1143209,2
Mz (kg-cm)	-1067353,1	-1950421,3	58186,2	-712943,8	-572103,6	946318,3	-319751,3	-1621738,6
Myz (kg-cm)	1074598,7	1963705,2	78687,1	835650,3	583686,6	1526887,2	646570,9	1984178,3
Esfuerzo Axial (fa) (kg/cm ²)	-387,05	-510,63	-545,50	-498,83	-550,86	-598,22	-651,23	-614,20
Esfuerzo de flexión (fby) (kg/cm ²)	3,08	5,63	1,31	10,77	-2,86	29,60	-13,88	-28,24
Esfuerzo de flexión (fbz) (kg/cm ²)	-26,37	-48,18	1,44	-17,61	-14,13	23,38	-7,90	-40,06
Esfuerzo de flexión (fbyz) (kg/cm ²)	26,55	48,51	1,94	20,64	14,42	37,72	15,97	49,02
fa+fby	-383,97	-505,00	-544,20	-488,06	-553,72	-568,62	-665,11	-642,44
fa-fby	-390,13	-516,26	-546,81	-509,60	-548,00	-627,82	-637,35	-585,96
fa+fbz	-413,42	-558,81	-544,07	-516,44	-564,99	-574,84	-659,13	-654,26
fa-fbz	-360,68	-462,45	-546,94	-481,22	-536,73	-621,60	-643,33	-574,14
fa+fbyz	-360,51	-462,12	-543,56	-478,19	-536,44	-560,50	-635,26	-565,19
fa-fbyz	-413,60	-559,14	-547,45	-519,47	-565,28	-635,94	-667,20	-663,22
esfuerzo axial máximo (kg/cm ²) =	-360,51	-462,12	-543,56	-478,19	-536,44	-560,50	-635,26	-565,19
esfuerzo axial mínimo (kg/cm ²) =	-413,60	-559,14	-547,45	-519,47	-565,28	-635,94	-667,20	-663,22



C.1. ESFUERZOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN LA CONEXIÓN SUPERESTRUCTURA-PILOTE

PLATAFORMA DE PERFORACIÓN

diac	48,00 plg	diámetro	121,92 cm
tc	1,50 plg	espesor	3,81 cm
rc	24,00 plg	radio exterior	60,96 cm
rnc	23,25 plg	radio medio	59,055 cm
P	371,05 cm	perímetro	
I	2467723,83 cm ⁴	Momento de Inercia	
A	1413,71 cm ²	Área de la sección	
S	40481,03 cm ³		

CONDICIÓN 4

OPERACIÓN

PIERNA	A1 NODO 300	A2 NODO 303	A3 NODO 307	A4 NODO 311	B1 NODO 358	B2 NODO 361	B3 NODO 365	B4 NODO 369
Fx (kg)	-659234,4	-761809,2	-786877	-655720,7	-831213,9	-828413,3	-877581,7	-757285,3
My (kg-cm)	621541,9	460506,3	172751,2	223847,3	-23034,9	1016045,4	-721003,8	-1498104,9
Mz (kg-cm)	-1243102,4	-2425689	-357051,6	-1205923,2	-69902,7	1334797,1	25237,9	-1467313,8
Myz (kg-cm)	1389826,6	2469014,6	396647,0	1226522,9	73600,2	1677507,5	721445,4	2096980,7
Esfuerzo Axial (fa) (kg/cm ²)	-466,31	-538,87	-556,60	-463,83	-587,96	-585,98	-620,76	-535,67
Esfuerzo de flexión (fby) (kg/cm ²)	15,35	11,38	4,27	5,53	-0,57	25,10	-17,81	-37,01
Esfuerzo de flexión (fbz) (kg/cm ²)	-30,71	-59,92	-8,82	-29,79	-1,73	32,97	0,62	-36,25
Esfuerzo de flexión (fbyz) (kg/cm ²)	34,33	60,99	9,80	30,30	1,82	41,44	17,82	51,80
fa+fby	-450,96	-527,50	-552,34	-458,30	-588,53	-560,88	-638,57	-572,68
fa-fby	-481,67	-550,25	-560,87	-469,36	-587,40	-611,08	-602,95	-498,66
fa+fbz	-497,02	-598,79	-565,42	-493,62	-589,69	-553,01	-620,14	-571,92
fa-fbz	-435,61	-478,95	-547,78	-434,04	-586,24	-618,96	-621,39	-499,42
fa+fbyz	-431,98	-477,88	-546,80	-433,53	-586,15	-544,54	-602,94	-483,87
fa-fbyz	-500,65	-599,86	-566,40	-494,13	-589,78	-627,42	-638,59	-587,47
esfuerzo axial máximo (kg/cm ²) =	-431,98	-477,88	-546,80	-433,53	-586,15	-544,54	-602,94	-483,87
esfuerzo axial mínimo (kg/cm ²) =	-500,65	-599,86	-566,40	-494,13	-589,78	-627,42	-638,59	-587,47



C.1. ESFUERZOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN LA CONEXIÓN SUPERESTRUCTURA-PILOTE

PLATAFORMA DE PERFORACIÓN

diac	48,00 plg	diámetro	121,92 cm
tc	1,50 plg	espesor	3,81 cm
rc	24,00 plg	radio exterior	60,96 cm
rmc	23,25 plg	radio medio	59,055 cm
P	371,05 cm	perímetro	
I	2467723,83 cm ⁴	Momento de Inercia	
A	1413,71 cm ²	Área de la sección	
S	40481,03 cm ³		

CONDICIÓN 5

OPERACIÓN

PIERNA	A1 NODO 300	A2 NODO 303	A3 NODO 307	A4 NODO 311	B1 NODO 358	B2 NODO 361	B3 NODO 365	B4 NODO 369
Fx (kg)	-770260,1	-845892,8	-859880,9	-709442,3	-772595,1	-752952,2	-796915,7	-656961,4
My (kg-cm)	1209754,3	900689,1	669647	522308,5	-352658,6	584206,1	-1208442,1	-2057979,5
Mz (kg-cm)	-1004926,9	-2599568,1	-538226,4	-1737007,9	475456,5	1563777,6	230249,2	-1493228,6
Myz (kg-cm)	1572699,4	2751180,7	859136,1	1813836,4	591968,7	1669340,3	1230181,7	2542638,6
Esfuerzo Axial (fa) (kg/cm ²)	-544,85	-598,35	-608,24	-501,83	-546,50	-532,61	-563,70	-464,71
Esfuerzo de flexión (fby) (kg/cm ²)	29,88	22,25	16,54	12,90	-8,71	14,43	-29,85	-50,84
Esfuerzo de flexión (fbz) (kg/cm ²)	-24,82	-64,22	-13,30	-42,91	11,75	38,63	5,69	-36,89
Esfuerzo de flexión (fbyz) (kg/cm ²)	38,85	67,96	21,22	44,81	14,62	41,24	30,39	62,81
fa+fby	-514,96	-576,10	-591,70	-488,93	-555,21	-518,17	-593,56	-515,54
fa-fby	-574,73	-620,60	-624,78	-514,73	-537,79	-547,04	-533,85	-413,87
fa+fbz	-569,67	-662,56	-621,54	-544,74	-534,76	-493,98	-558,02	-501,59
fa-fbz	-520,02	-534,13	-594,95	-458,92	-558,25	-571,24	-569,39	-427,82
fa+fbyz	-506,00	-530,39	-587,02	-457,02	-531,88	-491,37	-533,31	-401,90
fa-fbyz	-583,70	-666,31	-629,47	-546,64	-561,12	-573,84	-594,09	-527,52
esfuerzo axial máximo (kg/cm ²) =	-506,00	-530,39	-587,02	-457,02	-531,88	-491,37	-533,31	-401,90
esfuerzo axial mínimo (kg/cm ²) =	-583,70	-666,31	-629,47	-546,64	-561,12	-573,84	-594,09	-527,52



C.1. COMPARACIÓN DE ESFUERZOS MÁXIMOS EN EL PUNTO DE TRABAJO

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
	NODO 300	NODO 303	NODO 307	NODO 311	NODO 358	NODO 361	NODO 365	NODO 369
CONDICIÓN 1	-394,240	-611,283	-657,785	-690,742	-414,854	-526,176	-626,109	-681,343
CONDICIÓN 2	-358,290	-558,035	-586,854	-601,050	-493,369	-599,253	-666,933	-705,233
CONDICIÓN 3	-413,597	-559,139	-547,448	-519,475	-565,280	-635,940	-667,200	-663,217
CONDICIÓN 4	-500,647	-599,863	-566,401	-494,127	-589,783	-627,423	-638,585	-587,472
CONDICIÓN 5	-583,699	-666,310	-629,466	-546,636	-561,124	-573,843	-594,093	-527,517
MÁXIMO	-583,699	-666,310	-657,785	-690,742	-589,783	-635,940	-667,200	-705,233

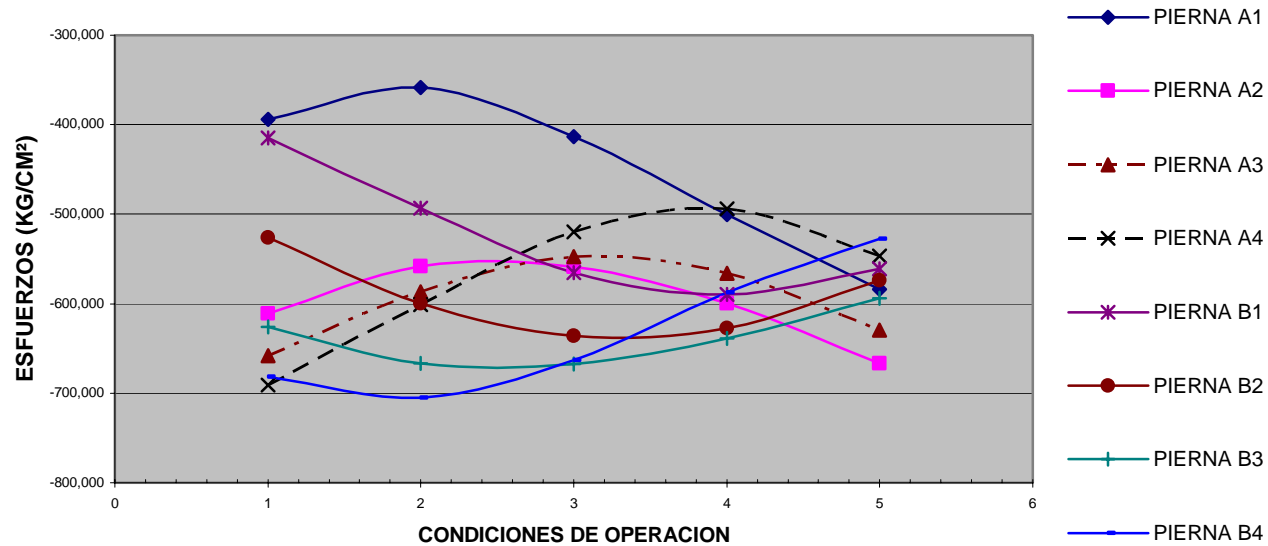


FIGURA C.1. Comparación de esfuerzos de combinados máximos en el punto de trabajo (conexión superestructura-pilote).



C.1. COMPARACIÓN DE ESFUERZOS MÍNIMOS EN EL PUNTO DE TRABAJO

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
	NODO 300	NODO 4703	NODO 4705	NODO 4707	NODO 4715	NODO 4713	NODO 4711	NODO 4709
CONDICIÓN 1	-377,513	-539,200	-606,838	-611,692	-351,401	-486,977	-552,991	-556,535
CONDICIÓN 2	-331,944	-482,259	-559,793	-550,650	-445,773	-540,342	-617,886	-600,654
CONDICIÓN 3	-360,506	-462,121	-543,560	-478,188	-536,443	-560,503	-635,255	-565,187
CONDICIÓN 4	-431,981	-477,879	-546,804	-433,530	-586,147	-544,544	-602,941	-483,869
CONDICIÓN 5	-505,998	-530,386	-587,019	-457,022	-531,877	-491,368	-533,315	-401,895
MÍNIMO	-331,944	-462,121	-543,560	-433,530	-351,401	-486,977	-533,315	-401,895

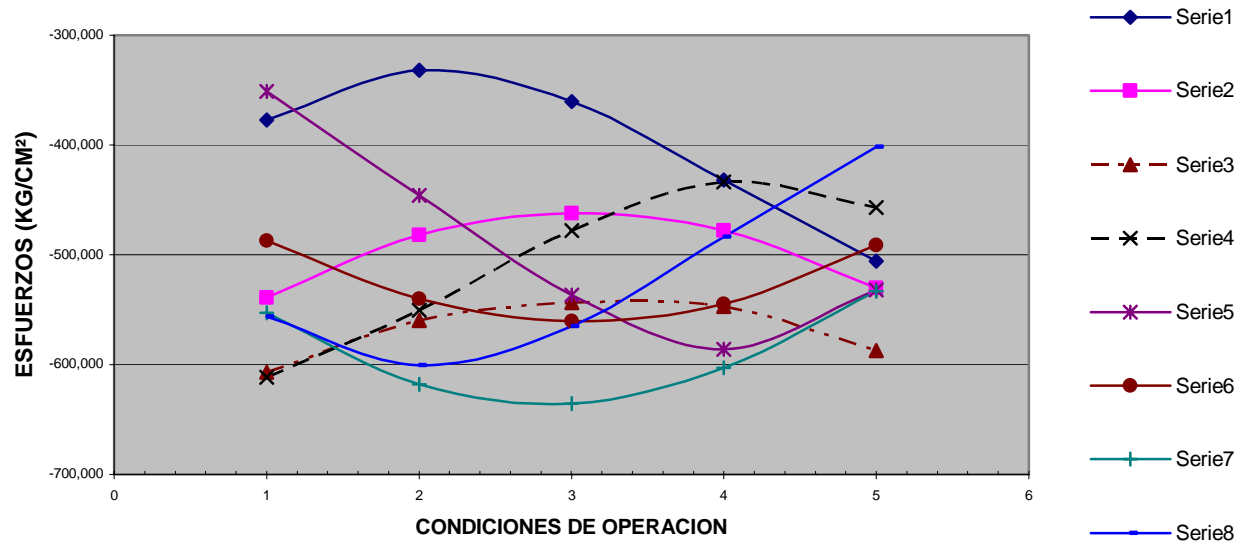


FIGURA C.2. Comparación de esfuerzos de combinados mínimos en el punto de trabajo (conexión superestructura-pilote).



C.2. CALCULO DEL MOMENTO DE INERCIA EN Z

D in	t in	Lrep In	D cm	t cm	Lrep cm	e cm	Asec cm2	Izsec cm4	rzsec cm	cz cm
48,00	1,50	0,00	121,92	3,81	0,00	0,00	1413,71	2467723,83	41,78	60,96
48,00	1,50	1,51	121,92	3,81	3,83	0,60	1399,58	2374031,18	41,19	61,53
48,00	1,50	3,02	121,92	3,81	7,66	1,20	1385,44	2279507,65	40,56	62,04
48,00	1,50	4,52	121,92	3,81	11,49	1,82	1371,30	2184311,15	39,91	62,51
48,00	1,50	6,03	121,92	3,81	15,32	2,46	1357,17	2088601,28	39,23	62,93
48,00	1,50	7,54	121,92	3,81	19,15	3,10	1343,03	1992538,94	38,52	63,31
48,00	1,50	9,05	121,92	3,81	22,98	3,75	1328,89	1896285,77	37,78	63,63
48,00	1,50	10,56	121,92	3,81	26,81	4,41	1314,75	1800003,68	37,00	63,90
48,00	1,50	12,06	121,92	3,81	30,64	5,08	1300,62	1703854,39	36,19	64,13
48,00	1,50	13,57	121,92	3,81	34,47	5,77	1286,48	1607998,87	35,35	64,30
48,00	1,50	15,08	121,92	3,81	38,30	6,46	1272,34	1512596,94	34,48	64,43
48,00	1,50	16,59	121,92	3,81	42,13	7,16	1258,21	1417806,73	33,57	64,51
48,00	1,50	18,10	121,92	3,81	45,96	7,87	1244,07	1323784,24	32,62	64,55
48,00	1,50	19,60	121,92	3,81	49,79	8,58	1229,93	1230682,89	31,63	64,53
48,00	1,50	21,11	121,92	3,81	53,62	9,31	1215,79	1138653,04	30,60	64,47
48,00	1,50	22,62	121,92	3,81	57,45	10,04	1201,66	1047841,59	29,53	64,36
48,00	1,50	24,13	121,92	3,81	61,28	10,78	1187,52	958391,52	28,41	64,20
48,00	1,50	25,64	121,92	3,81	65,11	11,53	1173,38	870441,52	27,24	64,00
48,00	1,50	27,14	121,92	3,81	68,94	12,29	1159,25	784125,59	26,01	63,76
48,00	1,50	28,65	121,92	3,81	72,77	13,05	1145,11	699572,66	24,72	63,47
48,00	1,50	30,16	121,92	3,81	76,60	13,82	1130,97	616906,25	23,36	63,13
48,00	1,50	31,67	121,92	3,81	80,43	14,59	1116,83	536244,11	21,91	62,76
48,00	1,50	33,18	121,92	3,81	84,27	15,37	1102,70	457697,97	20,37	62,34
48,00	1,50	34,68	121,92	3,81	88,10	16,15	1088,56	381373,18	18,72	61,88
48,00	1,50	36,19	121,92	3,81	91,93	16,94	1074,42	307368,49	16,91	61,38
48,00	1,50	37,70	121,92	3,81	95,76	17,73	1060,29	235775,82	14,91	60,83
48,00	1,50	39,21	121,92	3,81	99,59	18,52	1046,15	166679,98	12,62	60,25
48,00	1,50	40,72	121,92	3,81	103,42	19,32	1032,01	100158,57	9,85	59,64
48,00	1,50	42,22	121,92	3,81	107,25	20,12	1017,87	36281,74	5,97	58,98



C.2. CALCULO DEL MOMENTO DE INERCIA EN Y

D in	t in	Lrep in	D cm	t cm	L cm	ey cm	Asec cm2	lysec cm4	rysec cm	cy cm
48,00	1,50	0,00	121,92	3,81	0,00	0,00	1413,71	2467723,83	41,78	60,96
48,00	1,50	1,51	121,92	3,81	3,83	0,00	1399,58	2467707,59	41,99	60,96
48,00	1,50	3,02	121,92	3,81	7,66	0,00	1385,44	2467594,03	42,20	60,96
48,00	1,50	4,52	121,92	3,81	11,49	0,00	1371,30	2467286,21	42,42	60,96
48,00	1,50	6,03	121,92	3,81	15,32	0,00	1357,17	2466687,94	42,63	60,96
48,00	1,50	7,54	121,92	3,81	19,15	0,00	1343,03	2465704,20	42,85	60,96
48,00	1,50	9,05	121,92	3,81	22,98	0,00	1328,89	2464241,48	43,06	60,96
48,00	1,50	10,56	121,92	3,81	26,81	0,00	1314,75	2462208,16	43,28	60,96
48,00	1,50	12,06	121,92	3,81	30,64	0,00	1300,62	2459514,89	43,49	60,96
48,00	1,50	13,57	121,92	3,81	34,47	0,00	1286,48	2456074,89	43,69	60,96
48,00	1,50	15,08	121,92	3,81	38,30	0,00	1272,34	2451804,36	43,90	60,96
48,00	1,50	16,59	121,92	3,81	42,13	0,00	1258,21	2446622,76	44,10	60,96
48,00	1,50	18,10	121,92	3,81	45,96	0,00	1244,07	2440453,15	44,29	60,96
48,00	1,50	19,60	121,92	3,81	49,79	0,00	1229,93	2433222,48	44,48	60,96
48,00	1,50	21,11	121,92	3,81	53,62	0,00	1215,79	2424861,91	44,66	60,96
48,00	1,50	22,62	121,92	3,81	57,45	0,00	1201,66	2415307,04	44,83	60,96
48,00	1,50	24,13	121,92	3,81	61,28	0,00	1187,52	2404498,18	45,00	60,96
48,00	1,50	25,64	121,92	3,81	65,11	0,00	1173,38	2392380,61	45,15	60,96
48,00	1,50	27,14	121,92	3,81	68,94	0,00	1159,25	2378904,77	45,30	60,96
48,00	1,50	28,65	121,92	3,81	72,77	0,00	1145,11	2364026,43	45,44	60,96
48,00	1,50	30,16	121,92	3,81	76,60	0,00	1130,97	2347706,93	45,56	60,96
48,00	1,50	31,67	121,92	3,81	80,43	0,00	1116,83	2329913,29	45,67	60,96
48,00	1,50	33,18	121,92	3,81	84,27	0,00	1102,70	2310618,34	45,78	60,96
48,00	1,50	34,68	121,92	3,81	88,10	0,00	1088,56	2289800,84	45,86	60,96
48,00	1,50	36,19	121,92	3,81	91,93	0,00	1074,42	2267445,55	45,94	60,96
48,00	1,50	37,70	121,92	3,81	95,76	0,00	1060,29	2243543,31	46,00	60,96
48,00	1,50	39,21	121,92	3,81	99,59	0,00	1046,15	2218091,07	46,05	60,96
48,00	1,50	40,72	121,92	3,81	103,42	0,00	1032,01	2191091,88	46,08	60,96
48,00	1,50	42,22	121,92	3,81	107,25	0,00	1017,87	2162554,91	46,09	60,96



C.3. ESFUERZOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN LA CONEXIÓN MAS ESFORZADA DEBIDOS A LA ABERTURA

PLATAFORMA DE PERFORACIÓN	CONDICIÓN 2				OPERACIÓN				PIERNA B-4			
abertura %	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	
diámetro in	48,00	48,00	48,00	48,00	48,00	48,00	48,00	48,00	48,00	48,00	48,00	
espesor in	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	
Inercia z cm4	2467723,83	2374031,18	2279507,65	2184311,15	2088601,28	1992538,94	1896285,77	1800003,68	1703854,39	1607998,87	1512596,94	
Inercia y cm4	2467723,83	2467707,59	2467594,03	2467286,21	2466687,94	2465704,20	2464241,48	2462208,16	2459514,89	2456074,89	2451804,36	
área cm2	1413,71	1399,58	1385,44	1371,30	1357,17	1343,03	1328,89	1314,75	1300,62	1286,48	1272,34	
c z cm	60,96	61,53	62,04	62,51	62,93	63,31	63,63	63,90	64,13	64,30	64,43	
c y cm	60,96	60,96	60,96	60,96	60,96	60,96	60,96	60,96	60,96	60,96	60,96	
S z cm3	40481,03	38585,48	36739,86	34941,25	33187,00	31474,75	29802,36	28167,89	26569,62	25005,97	23475,53	
S y cm3	40481,03	40480,77	40478,90	40473,86	40464,04	40447,90	40423,91	40390,55	40346,37	40289,94	40219,89	
Fx (kg)	-923075,40	-923075,40	-923075,40	-923075,40	-923075,40	-923075,40	-923075,40	-923075,40	-923075,40	-923075,40	-923075,40	
My (kg-cm)	-910158,40	-910158,40	-910158,40	-910158,40	-910158,40	-910158,40	-910158,40	-910158,40	-910158,40	-910158,40	-910158,40	
Mz (kg-cm)	-1911079,60	-1911079,60	-1911079,60	-1911079,60	-1911079,60	-1911079,60	-1911079,60	-1911079,60	-1911079,60	-1911079,60	-1911079,60	
Myz (kg-cm)	2116745,98	2116745,98	2116745,98	2116745,98	2116745,98	2116745,98	2116745,98	2116745,98	2116745,98	2116745,98	2116745,98	
Esfuerzo Axial (fa) (kg/cm ²)	-652,94	-659,54	-666,27	-673,14	-680,15	-687,31	-694,62	-702,09	-709,72	-717,52	-725,49	
Esfuerzo de flexión (fby) (kg/cm ²)	-22,48	-23,59	-24,77	-26,05	-27,43	-28,92	-30,54	-32,31	-34,26	-36,40	-38,77	
Esfuerzo de flexión (fbz) (kg/cm ²)	-47,21	-47,21	-47,21	-47,22	-47,23	-47,25	-47,28	-47,32	-47,37	-47,43	-47,52	
Esfuerzo de flexión (fbyz) (kg/cm ²)	52,29	52,29	52,29	52,30	52,31	52,33	52,36	52,41	52,46	52,54	52,63	
fa+fby	-675,43	-683,13	-691,04	-699,19	-707,57	-716,23	-725,16	-734,40	-743,98	-753,92	-764,26	
fa-fby	-630,46	-635,95	-641,50	-647,09	-652,72	-658,39	-664,08	-669,78	-675,47	-681,12	-686,72	
fa+fbz	-700,15	-706,75	-713,48	-720,36	-727,38	-734,56	-741,90	-749,40	-757,09	-764,95	-773,01	
fa-fbz	-605,73	-612,33	-619,06	-625,92	-632,92	-640,06	-647,34	-654,77	-662,35	-670,09	-677,98	
fa+fbyz	-600,65	-607,25	-613,98	-620,84	-627,84	-634,98	-642,26	-649,68	-657,26	-664,98	-672,86	
fa-fbyz	-705,23	-711,83	-718,56	-725,44	-732,46	-739,64	-746,98	-754,50	-762,19	-770,06	-778,12	
esfuerzo axial máximo (kg/cm²) =	-705,23	-711,83	-718,56	-725,44	-732,46	-739,64	-746,98	-754,50	-762,19	-770,06	-778,12	
%fy	28%	28%	28%	29%	29%	29%	30%	30%	30%	30%	31%	
esfuerzo axial mínimo (kg/cm²) =	-600,65	-607,25	-613,98	-620,84	-627,84	-634,98	-642,26	-649,68	-657,26	-664,98	-672,86	
%fy	24%	24%	24%	25%	25%	25%	25%	26%	26%	26%	27%	



C.4. CALCULO DE LA RELACIÓN DE ESFUERZOS

Diámetro de 48" y espesor de 1.5"

Abertura %	σ_y kg/cm ²	E kg/cm ²	L total cm	k	L efectiva cm	D diámetro cm	t espesor cm	rsec cm	Cc	kl/r
0%	2530,00	2039000,00	1245,72	0,80	996,58	121,92	3,81	41,78	126,13	23,85
1%	2530,00	2039000,00	1245,72	0,80	996,58	121,92	3,81	41,19	126,13	24,20
2%	2530,00	2039000,00	1245,72	0,80	996,58	121,92	3,81	40,56	126,13	24,57
3%	2530,00	2039000,00	1245,72	0,80	996,58	121,92	3,81	39,91	126,13	24,97
4%	2530,00	2039000,00	1245,72	0,80	996,58	121,92	3,81	39,23	126,13	25,40
5%	2530,00	2039000,00	1245,72	0,80	996,58	121,92	3,81	38,52	126,13	25,87
6%	2530,00	2039000,00	1245,72	0,80	996,58	121,92	3,81	37,78	126,13	26,38
7%	2530,00	2039000,00	1245,72	0,80	996,58	121,92	3,81	37,00	126,13	26,93
8%	2530,00	2039000,00	1245,72	0,80	996,58	121,92	3,81	36,19	126,13	27,53
9%	2530,00	2039000,00	1245,72	0,80	996,58	121,92	3,81	35,35	126,13	28,19
10%	2530,00	2039000,00	1245,72	0,80	996,58	121,92	3,81	34,48	126,13	28,90

Abertura %	Pact kg	fact kg/cm ²	Fa kg/cm ²	Cm	fb kg/cm ²	F'e	Fb	Relación de esfuerzos
0%	923075,40	652,94	1430,70	1,00	52,29	18453,75	1669,80	0,49
1%	923075,40	674,16	1429,13	1,00	52,29	17932,43	1669,80	0,50
2%	923075,40	697,30	1427,43	1,00	52,29	17394,14	1669,80	0,52
3%	923075,40	722,60	1425,58	1,00	52,30	16839,56	1669,80	0,54
4%	923075,40	750,31	1423,57	1,00	52,31	16269,43	1669,80	0,56
5%	923075,40	780,74	1421,38	1,00	52,33	15684,52	1669,80	0,58
6%	923075,40	814,25	1418,99	1,00	52,36	15085,65	1669,80	0,61
7%	923075,40	851,27	1416,37	1,00	52,41	14473,66	1669,80	0,63
8%	923075,40	892,31	1413,50	1,00	52,46	13849,45	1669,80	0,66
9%	923075,40	938,00	1410,35	1,00	52,54	13213,94	1669,80	0,70
10%	923075,40	989,10	1406,87	1,00	52,63	12568,07	1669,80	0,74



C.5. ESFUERZOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN LA CONEXIÓN SUPERESTRUCTURA-PILOTE

PLATAFORMA DE PERFORACIÓN

CONDICIÓN 1

TORMENTA

diac	48,00	plg	diámetro	121,92	cm
tc	1,50	plg	espesor	3,81	cm
rc	24,00	plg	radio exterior	60,96	cm
rmc	23,25	plg	radio medio	59,055	cm
P	371,05	cm	perímetro		
I	2467723,83	cm ⁴	Momento de Inercia		
A	1413,71	cm ²	Área de la sección		
S	40481,03	cm ³			

PIERNA	A1 NODO 300	A2 NODO 303	A3 NODO 307	A4 NODO 311	B1 NODO 358	B2 NODO 361	B3 NODO 365	B4 NODO 369
Fx (kg)	-480554,40	-638749,50	-788339,20	-671283,30	-221094,30	-843652,80	-838946,50	-759195,70
My (kg-cm)	-6014269,00	-7103084,00	-6520618,20	-3937052,70	4112649,40	9087773,40	12673877,00	12370350,60
Mz (kg-cm)	-1826199,10	-5898359,90	-8175514,20	-17635718,80	-1226255,40	-3639481,80	-7310999,00	-17480275,40
Myz (kg-cm)	6285414,4	9232792,2	10457413,4	18069835,7	4291571,7	9789456,2	14631400,0	21414611,9
Esfuerzo Axial (fa) (kg/cm ²)	-339,92	-451,82	-557,64	-474,84	-156,39	-596,76	-593,43	-537,02
Esfuerzo de flexión (fby) (kg/cm ²)	-148,57	-175,47	-161,08	-97,26	101,59	224,49	313,08	305,58
Esfuerzo de flexión (fbz) (kg/cm ²)	-45,11	-145,71	-201,96	-435,65	-30,29	-89,91	-180,60	-431,81
Esfuerzo de flexión (fbyz) (kg/cm ²)	155,27	228,08	258,33	446,38	106,01	241,83	361,44	529,00
fa+fby	-488,49	-627,29	-718,72	-572,09	-54,80	-372,27	-280,35	-231,44
fa-fby	-191,35	-276,36	-396,56	-377,58	-257,99	-821,26	-906,52	-842,61
fa+fbz	-385,04	-597,53	-759,60	-910,49	-186,68	-686,67	-774,04	-968,84
fa-fbz	-294,81	-306,12	-355,68	-39,18	-126,10	-506,86	-412,83	-105,21
fa+fbyz	-184,66	-223,75	-299,31	-28,46	-50,38	-354,94	-232,00	-8,02
fa-fbyz	-495,19	-679,90	-815,97	-921,21	-262,41	-838,59	-954,87	-1066,03
esfuerzo axial máximo (kg/cm ²) =	-184,66	-223,75	-299,31	-28,46	-50,38	-354,94	-232,00	-8,02
esfuerzo axial mínimo (kg/cm ²) =	-495,19	-679,90	-815,97	-921,21	-262,41	-838,59	-954,87	-1066,03



C.5. ESFUERZOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN LA CONEXIÓN SUPERESTRUCTURA-PILOTE

PLATAFORMA DE PERFORACIÓN

CONDICIÓN 2

TORMENTA

diac	48,00	plg	diámetro	121,92	cm
tc	1,50	plg	espesor	3,81	cm
rc	24,00	plg	radio exterior	60,96	cm
rmc	23,25	plg	radio medio	59,055	cm
P	371,05	cm	perímetro		
I	2467723,83	cm ⁴	Momento de Inercia		
A	1413,71	cm ²	Área de la sección		
S	40481,03	cm ³			

PIERNA	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
	NODO 300	NODO 303	NODO 307	NODO 311	NODO 358	NODO 361	NODO 365	NODO 369
Fx (kg)	-523924,60	-660917,40	-817088,40	-691889,80	-205137,70	-800730,80	-838451,00	-717989,40
My (kg-cm)	-11585269,00	-12194904,30	-13573354,50	-9626076,20	-1857156,50	5557774,90	7942188,50	6957028,80
Mz (kg-cm)	971919,30	-3617634,80	-5947805,20	-16246955,10	624981,00	-2192253,20	-5726890,60	-14452753,90
Myz (kg-cm)	11625966,0	12720179,7	14819323,2	18884514,6	1959497,8	5974515,5	9791610,4	16040023,2
Esfuerzo Axial (fa) (kg/cm ²)	-370,60	-467,50	-577,97	-489,41	-145,11	-566,40	-593,08	-507,87
Esfuerzo de flexión (fby) (kg/cm ²)	-286,19	-301,25	-335,30	-237,79	-45,88	137,29	196,20	171,86
Esfuerzo de flexión (fbz) (kg/cm ²)	24,01	-89,37	-146,93	-401,35	15,44	-54,16	-141,47	-357,03
Esfuerzo de flexión (fbyz) (kg/cm ²)	287,20	314,23	366,08	466,50	48,41	147,59	241,88	396,24
fa+fby	-656,79	-768,75	-913,27	-727,21	-190,98	-429,11	-396,89	-336,02
fa-fby	-84,41	-166,25	-242,67	-251,62	-99,23	-703,70	-789,28	-679,73
fa+fbz	-346,59	-556,87	-724,90	-890,76	-129,67	-620,56	-734,55	-864,90
fa-fbz	-394,61	-378,14	-431,04	-88,07	-160,54	-512,25	-451,61	-150,85
fa+fbyz	-83,41	-153,28	-211,89	-22,91	-96,70	-418,81	-351,20	-111,64
fa-fbyz	-657,80	-781,73	-944,05	-955,92	-193,51	-713,99	-834,97	-904,11
esfuerzo axial máximo (kg/cm ²) =	-83,41	-153,28	-211,89	-22,91	-96,70	-418,81	-351,20	-111,64
esfuerzo axial mínimo (kg/cm ²) =	-657,80	-781,73	-944,05	-955,92	-193,51	-713,99	-834,97	-904,11



C.5. ESFUERZOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN LA CONEXIÓN SUPERESTRUCTURA-PILOTE

PLATAFORMA DE PERFORACIÓN

diac	48,00	plg	diámetro	121,92	cm
tc	1,50	plg	espesor	3,81	cm
rc	24,00	plg	radio exterior	60,96	cm
rmc	23,25	plg	radio medio	59,055	cm
P	371,05	cm	perímetro		
I	2467723,83	cm ⁴	Momento de Inercia		
A	1413,71	cm ²	Área de la sección		
S	40481,03	cm ³			

CONDICIÓN 3

TORMENTA

PIERNA	A1 NODO 300	A2 NODO 303	A3 NODO 307	A4 NODO 311	B1 NODO 358	B2 NODO 361	B3 NODO 365	B4 NODO 369
Fx (kg)	-568130,40	-639993,20	-851703,40	-680434,30	-226833,30	-757435,50	-863905,20	-675982,90
My (kg-cm)	-13462317,40	-13876465,80	-17016334,00	-12473984,40	-5115804,70	4320560,50	6139557,10	4276849,60
Mz (kg-cm)	6634363,80	935493,10	-1530575,40	-11003848,60	6326024,90	2531275,10	-1033146,70	-8036008,30
Myz (kg-cm)	15008290,1	13907963,6	17085031,0	16633850,2	8135726,7	5007454,1	6225877,7	9103234,1
Esfuerzo Axial (fa) (kg/cm ²)	-401,87	-452,70	-602,46	-481,31	-160,45	-535,78	-611,09	-478,16
Esfuerzo de flexión (fby) (kg/cm ²)	-332,56	-342,79	-420,35	-308,14	-126,38	106,73	151,67	105,65
Esfuerzo de flexión (fbz) (kg/cm ²)	163,89	23,11	-37,81	-271,83	156,27	62,53	-25,52	-198,51
Esfuerzo de flexión (fbyz) (kg/cm ²)	370,75	343,57	422,05	410,90	200,98	123,70	153,80	224,88
fa+fby	-734,43	-795,49	-1022,81	-789,45	-286,83	-429,05	-459,42	-372,51
fa-fby	-69,31	-109,91	-182,10	-173,17	-34,08	-642,51	-762,75	-583,81
fa+fbz	-237,98	-429,59	-640,27	-753,14	-4,18	-473,25	-636,61	-676,67
fa-fbz	-565,76	-475,81	-564,65	-209,48	-316,72	-598,31	-585,57	-279,65
fa+fbyz	-31,12	-109,14	-180,41	-70,40	40,52	-412,08	-457,29	-253,28
fa-fbyz	-772,62	-796,27	-1024,51	-892,21	-361,43	-659,48	-764,89	-703,04
esfuerzo axial máximo (kg/cm ²) =	-31,12	-109,14	-180,41	-70,40	40,52	-412,08	-457,29	-253,28
esfuerzo axial mínimo (kg/cm ²) =	-772,62	-796,27	-1024,51	-892,21	-361,43	-659,48	-764,89	-703,04



C.5. ESFUERZOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN LA CONEXIÓN SUPERESTRUCTURA-PILOTE

PLATAFORMA DE PERFORACIÓN

CONDICIÓN 4

TORMENTA

diac	48,00	plg	diámetro	121,92	cm
tc	1,50	plg	espesor	3,81	cm
rc	24,00	plg	radio exterior	60,96	cm
rmc	23,25	plg	radio medio	59,055	cm
P	371,05	cm	perímetro		
I	2467723,83	cm ⁴	Momento de Inercia		
A	1413,71	cm ²	Área de la sección		
S	40481,03	cm ³			

PIERNA	A1 NODO 300	A2 NODO 303	A3 NODO 307	A4 NODO 311	B1 NODO 358	B2 NODO 361	B3 NODO 365	B4 NODO 369
Fx (kg)	-583434,30	-597209,10	-872048,30	-640467,80	-272413,40	-734826,40	-900639,90	-659038,90
My (kg-cm)	-9941746,10	-10624581,10	-15008567,40	-9953048,80	-2883095,50	6611165,00	7993125,50	6580946,80
Mz (kg-cm)	11348166,00	5024305,20	3228772,90	-4797038,60	12445355,50	7562243,70	3673724,40	-1978459,70
Myz (kg-cm)	15087053,6	11752674,9	15351940,3	11048744,7	12774940,8	10044651,9	8796948,7	6871911,2
Esfuerzo Axial (fa) (kg/cm ²)	-412,70	-422,44	-616,85	-453,04	-192,69	-519,78	-637,07	-466,18
Esfuerzo de flexión (fby) (kg/cm ²)	-245,59	-262,46	-370,76	-245,87	-71,22	163,32	197,45	162,57
Esfuerzo de flexión (fbz) (kg/cm ²)	280,33	124,12	79,76	-118,50	307,44	186,81	90,75	-48,87
Esfuerzo de flexión (fbyz) (kg/cm ²)	372,69	290,33	379,24	272,94	315,58	248,13	217,31	169,76
fa+fby	-658,29	-684,90	-987,60	-698,91	-263,91	-356,47	-439,62	-303,61
fa-fby	-167,11	-159,98	-246,09	-207,17	-121,47	-683,10	-834,53	-628,74
fa+fbz	-132,36	-298,32	-537,09	-571,54	114,74	-332,97	-546,32	-515,05
fa-fbz	-693,03	-546,55	-696,61	-334,54	-500,13	-706,59	-727,83	-417,30
fa+fbyz	-40,00	-132,11	-237,61	-180,10	122,88	-271,65	-419,76	-296,42
fa-fbyz	-785,39	-712,77	-996,09	-725,98	-508,27	-767,92	-854,38	-635,93
esfuerzo axial máximo (kg/cm ²) =	-40,00	-132,11	-237,61	-180,10	122,88	-271,65	-419,76	-296,42
esfuerzo axial mínimo (kg/cm ²) =	-785,39	-712,77	-996,09	-725,98	-508,27	-767,92	-854,38	-635,93



C.5. ESFUERZOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN LA CONEXIÓN SUPERESTRUCTURA-PILOTE

PLATAFORMA DE PERFORACIÓN

CONDICIÓN 5

TORMENTA

diac	48,00 plg	diámetro	121,92 cm
tc	1,50 plg	espesor	3,81 cm
rc	24,00 plg	radio exterior	60,96 cm
rmc	23,25 plg	radio medio	59,055 cm
P	371,05 cm	perímetro	
I	2467723,83 cm ⁴	Momento de Inercia	
A	1413,71 cm ²	Área de la sección	
S	40481,03 cm ³		

PIERNA	A1 NODO 300	A2 NODO 303	A3 NODO 307	A4 NODO 311	B1 NODO 358	B2 NODO 361	B3 NODO 365	B4 NODO 369
Fx (kg)	-568421,70	-547651,20	-866745,20	-594301,60	-311399,00	-756765,70	-921661,90	-682689,30
My (kg-cm)	-3948566,90	-5478413,10	-8225335,90	-3228013,20	2690851,30	10412552,70	12810034,20	12758693,40
Mz (kg-cm)	13568866,20	7068650,90	5409958,50	-875729,20	14548917,00	9306366,20	5091369,10	-1197285,80
Myz (kg-cm)	14131712,9	8943088,7	9844988,7	3344692,9	14795663,8	13965303,6	13784738,5	12814747,4
Esfuerzo Axial (fa) (kg/cm ²)	-402,08	-387,38	-613,10	-420,38	-220,27	-535,30	-651,94	-482,90
Esfuerzo de flexión (fby) (kg/cm ²)	-97,54	-135,33	-203,19	-79,74	66,47	257,22	316,45	315,18
Esfuerzo de flexión (fbz) (kg/cm ²)	335,19	174,62	133,64	-21,63	359,40	229,89	125,77	-29,58
Esfuerzo de flexión (fbyz) (kg/cm ²)	349,09	220,92	243,20	82,62	365,50	344,98	340,52	316,56
fa+fby	-499,62	-522,72	-816,29	-500,12	-153,80	-278,08	-335,50	-167,73
fa-fby	-304,54	-252,05	-409,91	-340,64	-286,74	-792,52	-968,39	-798,08
fa+fbz	-66,89	-212,77	-479,46	-442,02	139,13	-305,41	-526,17	-512,48
fa-fbz	-737,27	-562,00	-746,74	-398,75	-579,67	-765,20	-777,72	-453,33
fa+fbyz	-52,98	-166,46	-369,90	-337,76	145,23	-190,32	-311,42	-166,34
fa-fbyz	-751,17	-608,31	-856,30	-503,01	-585,77	-880,29	-992,47	-799,47
esfuerzo axial máximo (kg/cm ²) =	-52,98	-166,46	-369,90	-337,76	145,23	-190,32	-311,42	-166,34
esfuerzo axial mínimo (kg/cm ²) =	-751,17	-608,31	-856,30	-503,01	-585,77	-880,29	-992,47	-799,47



C.5. COMPARACIÓN DE ESFUERZOS MÁXIMOS EN EL PUNTO DE TRABAJO

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
	NODO 300	NODO 303	NODO 307	NODO 311	NODO 358	NODO 361	NODO 365	NODO 369
CONDICIÓN 1	-495,192	-679,901	-815,966	-921,215	-262,407	-838,592	-954,873	-1066,025
CONDICIÓN 2	-657,797	-781,730	-944,054	-955,916	-193,511	-713,990	-834,965	-904,110
CONDICIÓN 3	-772,620	-796,271	-1024,508	-892,215	-361,428	-659,476	-764,887	-703,038
CONDICIÓN 4	-785,391	-712,765	-996,087	-725,976	-508,272	-767,917	-854,384	-635,932
CONDICIÓN 5	-751,172	-608,305	-856,298	-503,007	-585,766	-880,287	-992,467	-799,467
MÁXIMO	-785,391	-796,271	-1024,508	-955,916	-585,766	-880,287	-992,467	-1066,025

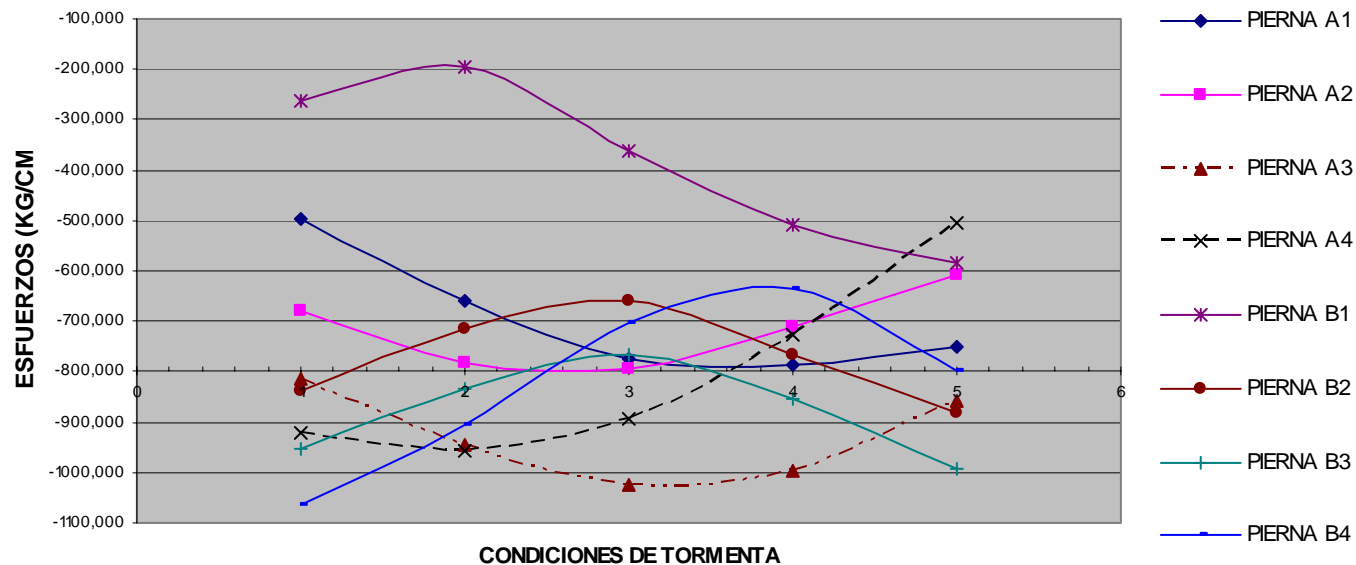


FIGURA C.3. Comparación de esfuerzos de combinados máximos en el punto de trabajo (conexión superestructura-pilote).



C.5. COMPARACIÓN DE ESFUERZOS MÍNIMOS EN EL PUNTO DE TRABAJO

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
	NODO 300	NODO 4703	NODO 4705	NODO 4707	NODO 4715	NODO 4713	NODO 4711	NODO 4709
CONDICIÓN 1	-184,655	-223,747	-299,308	-28,459	-50,378	-354,935	-231,996	-8,019
CONDICIÓN 2	-83,406	-153,279	-211,892	-22,910	-96,700	-418,814	-351,203	-111,639
CONDICIÓN 3	-31,122	-109,136	-180,408	-70,405	40,524	-412,078	-457,292	-253,285
CONDICIÓN 4	-40,002	-132,114	-237,611	-180,103	122,885	-271,652	-419,763	-296,419
CONDICIÓN 5	-52,982	-166,464	-369,898	-337,760	145,226	-190,319	-311,420	-166,343
MÍNIMO	-31,122	-109,136	-180,408	-22,910	145,226	-190,319	-231,996	-8,019

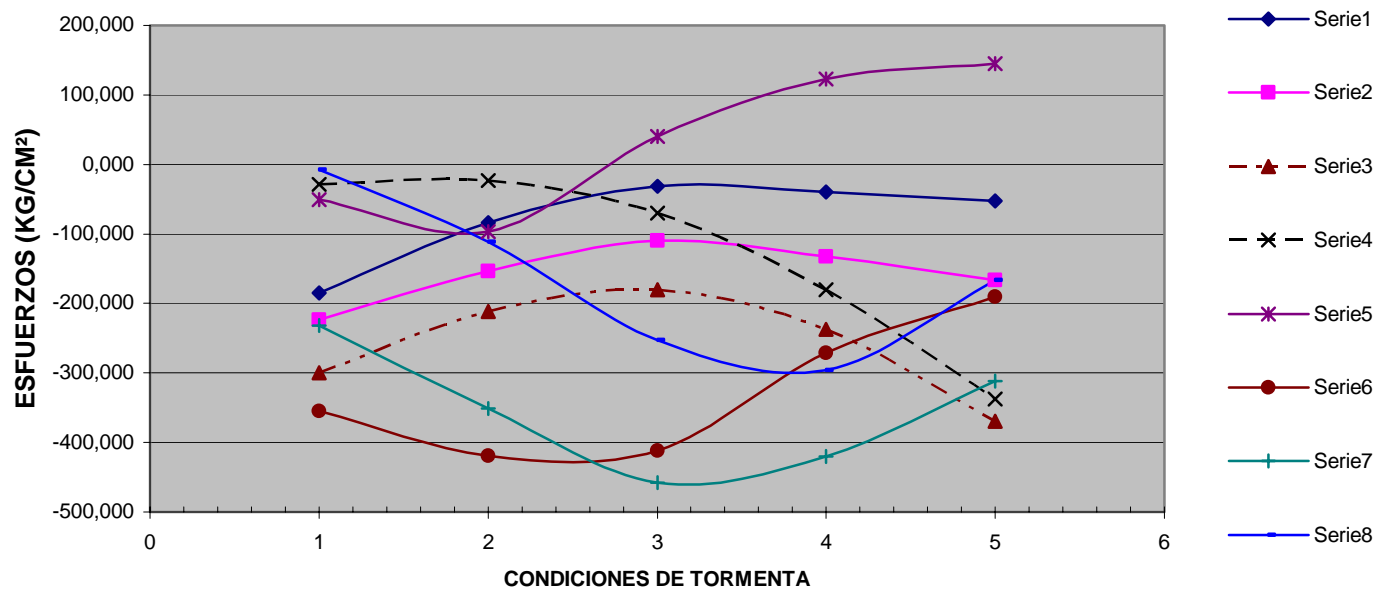


FIGURA C.4. Comparación de esfuerzos de combinados mínimos en el punto de trabajo (conexión superestructura-pilote).