



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---



## **FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL**

**ANÁLISIS CAUSA RAÍZ PARA EL COLAPSO  
ESTRUCTURAL DEL MÁSTIL PERTENECIENTE  
AL EQUIPO DE PERFORACIÓN 405**

**INFORME DE TRABAJO PROFESIONAL**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**I N G E N I E R O   M E C Á N I C O**

P R E S E N T A

JORGE FLORES CASTILLO

ASESOR EXTERNO:

ING. JUAN ANTONIO CASTRO RODARTE

ASESOR INTERNO:

DR. LEOPOLDO ADRIÁN GONZÁLEZ GONZÁLEZ

## Tabla de contenido.

Resumen .....	IV
Tabla de contenido .....	V
Introducción .....	1
Objetivo y alcances .....	5
Desarrollo .....	6
Antecedentes .....	6
Definición del problema .....	8
Método .....	8
Aplicación del método .....	10
Paso 1. Identificación de los eventos más significativos .....	10
Paso 2. Preservar las evidencias de las fallas .....	11
Paso 3. Ordenar el análisis .....	14
Paso 4. Construir el Árbol Lógico de fallas .....	15
1. Planteamiento de los modos de falla .....	15
2. Pruebas de tracción .....	17
3. Análisis químico .....	18
4. Metalografía .....	19
5. Caracterización de materiales .....	20
6. Análisis estructural mediante el método de elementos finitos .....	23
7. Análisis de resultados .....	24
8. Comparación de los resultados de análisis numérico con la geometría del mástil .....	31
Paso 5. Comunicar los resultados y las recomendaciones .....	33
Paso 6. Seguimiento de los resultados .....	33
Conclusiones .....	34
Bibliografía .....	36
Anexo A .....	38
Anexo B .....	48
Anexo C .....	53
Anexo D .....	55
Anexo E .....	60

## **Resumen.**

En los últimos años, la Unidad Operativa de Perforación Reynosa (UOPR) perteneciente a Petróleos Mexicanos, ha tenido incidentes con sus equipos de perforación, específicamente con el mástil. Después del último incidente ocurrido con el equipo de perforación número 405, la UOPR solicita apoyo al Instituto Mexicano del Petróleo para hacer el análisis causa raíz del colapso que sufrió la estructura. El determinar la causa raíz que produce la falla en la estructura, nos adentra al área del análisis de fallas, de la caracterización de materiales y la resistencia de los mismos. El método mas adecuado para realizar esta investigación es el Análisis de Causa Raíz, que es un análisis deductivo en el que las causas que se van identificando son lógicas y los efectos están relacionados, de manera que cuando se profundiza en el análisis, se avanza hacia la individualización de la causa raíz del problema. Para llevar a cabo este método, recopilé, junto con otros compañeros, la información escrita y verbal sobre los eventos relacionados con el incidente, además de seleccionar muestras de las partes más relevantes de la estructura en la zona colapsada.

En la determinación de las propiedades químicas y mecánicas de dichas muestras, me auxilié de laboratorios externos al Instituto Mexicano del Petróleo. Una vez que generé el sólido en CAD y determiné los esfuerzos y las tendencias al pandeo teóricos, discriminé los métodos de falla mas comunes, hasta llegar a la conclusión de que la causa raíz del colapso de la estructura fue la sobrecarga del equipo, provocada por una mala operación.

De los resultados y conclusiones reportadas, la UOPR planea implementar nuevos procedimientos de mantenimiento en sus equipos de perforación, sistemas de control y monitoreo, con la finalidad de prevenir estos incidentes.

## Introducción.

Una vez que se ha diseñado un pozo productor de aceite, se procede a la selección del equipo de perforación (figura 1), que será el encargado de realizar las diversas etapas y operaciones para la perforación del pozo, desde el nivel del suelo hasta la profundidad programada.

Un equipo de perforación típico esta constituido por la subestructura, el piso de perforación y el mástil; su tamaño dependerá de la profundidad del pozo. El mástil es el componente de mayor altura y más esbeltez, que servirá para operar la sarta de perforación; además, es el apoyo de los cables que transmiten la tensión producida por el malacate (figura 2).

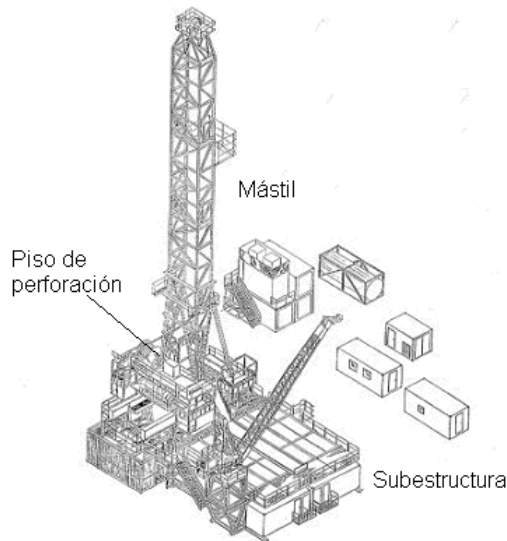


Figura 1. Equipo de perforación.

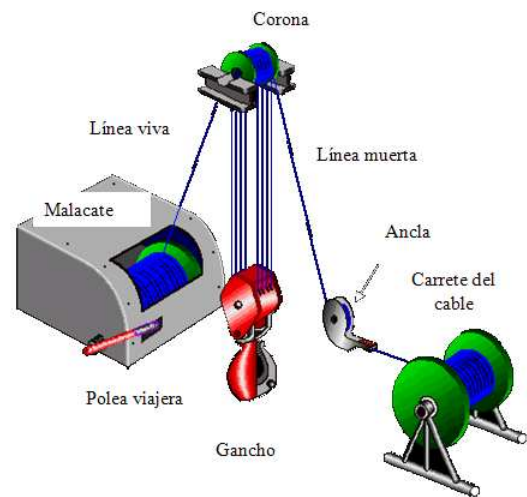


Figura 2. Sistema de izaje.

El proceso de perforación se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Perforación. Es la actividad que da el nombre al departamento, y consiste en crear el agujero que comunicara al yacimiento con la superficie. En México, el método empleado es la Perforación Rotatoria, que consiste en hacer girar por medio de la tubería de perforación (TP) una herramienta de corte (barrena) unida a un conjunto de herramientas estabilizadoras y tuberías pesadas (sarta de perforación) (figura 3), a la vez que los recortes son expulsados fuera del agujero mediante un flujo constante de fluido de perforación (figura 4). Conforme el conjunto avanza se añaden nuevos tramos de TP.
2. Retiro de la sarta de perforación. Se retira del agujero la TP y la barrena, dejando el agujero lleno de un fluido de control.
3. Introducción de la tubería de revestimiento. Una tubería llamada tubería de revestimiento (TR) es colocada en el agujero para evitar su derrumbe y proteger a la tubería de producción.
4. Cementado. El espacio resultante entre la TR y el agujero, es sellado por medio de cemento, con la finalidad de evitar comunicación entre las capas del subsuelo.





Figura 3. Sarta típica de perforación.

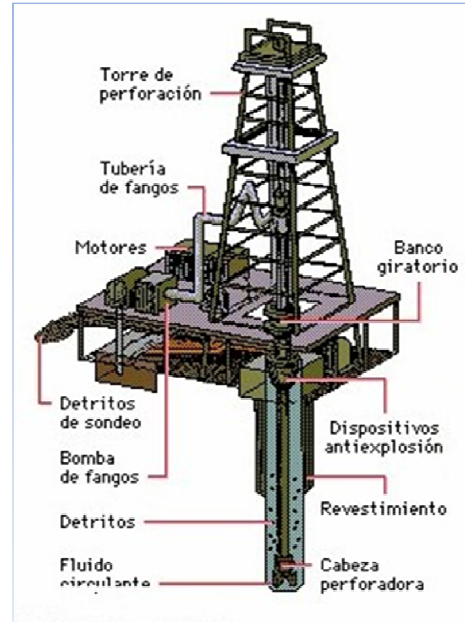


Figura 4. Perforación rotatoria.

Este proceso se repite tantas veces como lo indique el programa de perforación.

Uno de los contratiempos más recurrentes dentro de las primeras tres etapas, es el atrapamiento de cualquiera de los elementos (TP y/o barrena). Para liberarlos, se requiere tensar el elemento, lo que podría generar una sobrecarga del equipo de perforación y generar daños en sus componentes.

Petróleos Mexicanos cuenta con equipos de perforación cuya estructura metálica tiene alrededor de 50 años de uso, pero que gracias al mantenimiento extensivo que se les da, siguen en uso continuo. Estos mantenimientos consisten principalmente en identificar los elementos dañados y remplazarlos, sin meditar sobre las causas que lo generaron y así evitarlos a futuro. Debido a que la mayoría de los daños en los elementos no son de gran impacto para la estructura, estos no eran encontrados hasta que se realizaba el mantenimiento, pero en algunos casos, el daño que se genera durante el trabajo tiene gran trascendencia, a tal grado que llevan a suspender la operación de perforación para evitar graves accidentes. Este es el caso del equipo de perforación modelo Full View número. PEMEX 405 (FV-405), que se colapsó cuando estaba en trabajos de perforación, inclinando la tercera sección del mástil hacia el oeste, haciendo imposible su funcionamiento y poniendo en riesgo al personal operativo.

Una vez desmontado el mástil, PEMEX solicita al grupo de Sistemas y Herramientas para la Adquisición de Información de Pozos (SHAIP) del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) apoyo para determinar la causa que generó el daño, con la finalidad de plantear nuevos métodos de mantenimiento y de monitoreo en campo y así evitar este tipo de incidentes.

EL grupo SHAIP pertenece a la Gerencia de Exploración y Producción, y está dedicado en lo fundamental al desarrollo de tecnologías innovadoras para la aplicación en los Activos de producción y áreas operativas de pozos, considerando un equipo técnico de trabajo de alto nivel y gran experiencia de campo, aportando Soluciones Integrales con Valor para PEMEX Exploración y Producción (PEP). SHAIP es un grupo multidisciplinario, compuesto de ingenieros mecánicos, electrónicos, petroleros y técnicos en maquina-herramientas (figura 5), gracias a

esto, ha desarrollado soluciones para cubrir las necesidades de su cliente directo: PEMEX Exploración y Producción.

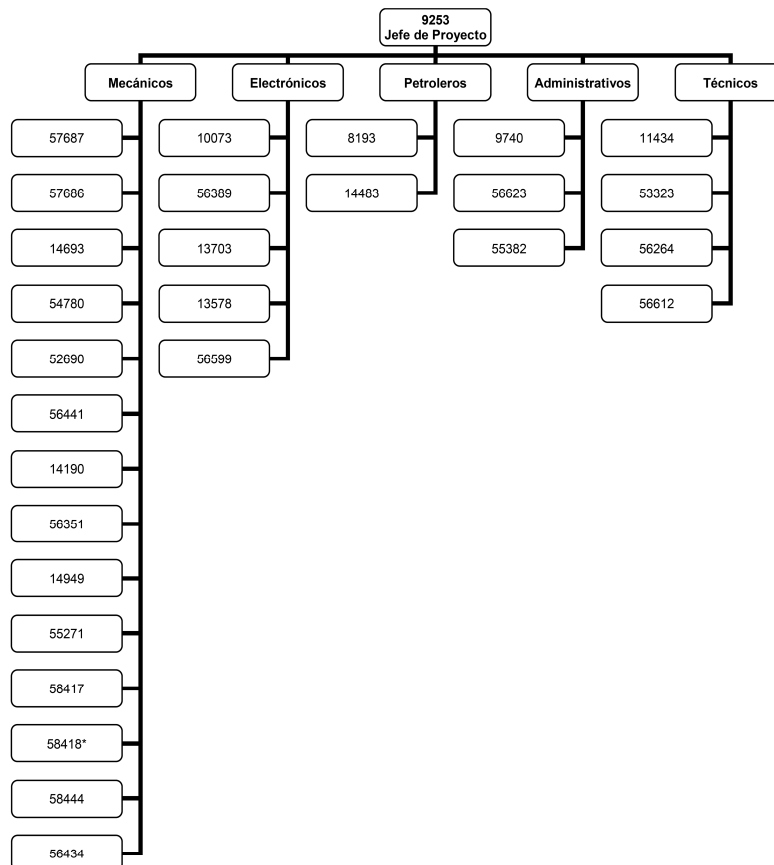


Figura 5. Organigrama del grupo SHAIIP, el personal esta representado por su clave de empleado, siendo la mía la 54780.

Para el grupo, he laborado a lo largo de seis años como Ingeniero de Desarrollo, participando ya sea como encargado o como colaborador en el desarrollo de las soluciones. Cuando soy el encargado, entro en contacto directo con el personal de PEMEX que tiene la necesidad, colaboro y si es el caso, superviso las etapas de diseño, manufactura e implantación en campo de la solución, para finalmente darle un seguimiento por determinado tiempo y tener la certeza de que la solución satisface plenamente la necesidad.

Para determinar la causa raíz que originó el colapso estructural me adentro en temas de análisis de fallas, caracterización de materiales, determinación de esfuerzos e inestabilidad elástica mediante métodos teóricos o pruebas de laboratorio.

En el desarrollo de este trabajo, se me encomendó ejecutar y supervisar las actividades para determinar la causa raíz del incidente. Por ello, participé en la recopilación de información en campo, acudiendo al lugar donde estaba resguardada la estructura, con la finalidad de realizar la inspección visual del equipo y seleccionar muestras para su estudio, además, recopilé toda la información posible que tuviera el personal de PEMEX antes, durante y después del incidente. En las instalaciones del Instituto Mexicano del Petróleo, planteé los modos de fallas posibles,

descartando los que no eran sustentados por las evidencias físicas. Dado que el departamento no dispone del equipo necesario para realizar las pruebas mecánicas, la metalografía y la determinación de los elementos químicos, encomendé a la empresa Electroodos-Infra esta tarea. Para el análisis numérico, elaboré el sólido en el programa Mechanical Desktop de Autodesk y el análisis lo efectúe en el programa de elemento finito COSMOS/DesignSTAR 2007 de SolidWorks. Ya con todos los resultados y adicionando un estudio detallado de la geometría de la estructura, realicé el análisis correspondiente a cada modo de falla. Con base en este análisis, llegué a la conclusión citada en este trabajo: La estructura falló por pandeo, causado por exceder la carga crítica que soporta la estructura bajo la deformación geométrica que sufrió.

Una vez con el veredicto, redacté el informe escrito y tras el visto bueno del Jefe de Proyecto y de los ingenieros mecánicos del área, procedí a entregarlo y exponerlo al personal de PEMEX de la Gerencia de Perforación y Mantenimiento de Pozos, Región Norte.

Este trabajo, concluyó con la aceptación del veredicto por parte del cliente.

Como frutos del trabajo, se tiene que PEMEX modificará sus métodos de mantenimiento consistentes en la sustitución de partes dañadas por una identificación de los puntos críticos de la estructura para darles mantenimiento preventivo y la implantación de sistemas de control de potencia que se activen en casos de sobre carga, además, este trabajo deja evidencia por ser el primero de su tipo ante estos incidentes.

### **Objetivo y alcances.**

Determinar la causa raíz que produjo el colapso de la estructura del equipo de perforación propiedad de PEMEX número 405, de la Unidad Operativa de Perforación-Reynosa; con la finalidad de establecer nuevos métodos y procedimientos de mantenimiento preventivo y correctivo, así como implantar sistemas de control y almacenamiento de datos para cuando estén en operación.

**Desarrollo.**

Los tiempos y actividades que se emplearon para realizar el estudio, se muestran en el siguiente diagrama de actividades:

PROGRAMA DE ACTIVIDADES CAUSA RAÍZ FV 405								
No. ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	MENSUAL						
		Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	Trabajo de campo. Revisión de la estructura, recopilación de información y selección de muestras.	█						
2	Análisis de la información y planteamiento de hipótesis.		█					
3	Maquinado de probetas, análisis químicos y pruebas mecánicas.			█				
4	Caracterización de los materiales y análisis previos de los resultados de laboratorio				█			
5	Dibujo tridimensional de la estructura.				█			
6	Análisis numérico.					█		
7	Interpretación de resultados y conclusiones						█	
8	Elaboración del informe, presentación verbal y escrita.							█

**Antecedentes.**

A las 15:45 hrs. del día martes 9 de mayo del 2007, a los 95 barriles bombeados de lechada de cemento, con 2,300 m de TR 9 5/8", se presenta la falla en la estructura (figura 6). Con ello suspenden todas las operaciones para aplicar los procedimientos de contingencia. Las zonas que presentan colapsos son la unión entre la tercera y segunda sección del mástil, y las dos crucetas estabilizadoras, además la corona del mástil presenta gran desplazamiento (figura 7).

El día 23 de mayo del 2007, a las 16:21 hrs., la sección dañada del mástil, es posada en tierra, para su retiro de la zona de trabajo (figura 8 y 9). Esto se logra gracias al trabajo en conjunto, la organización, coordinación y planeación entre las diversas empresas involucradas (PEMEX, COMIMSA, TITSA, MORESA, IMP), en el proceso para el desmantelamiento en forma segura del equipo de perforación FV 405.



Figura 6. Colapso de la estructura FV-405.

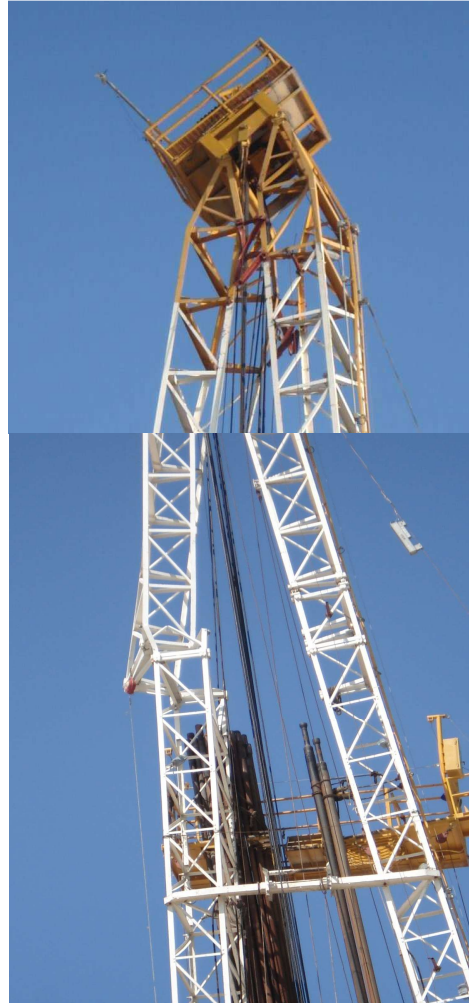


Figura 7. Zonas dañadas: crucetas (superior), unión entre la segunda y tercera sección (inferior).



Figura 8. Separación de la sección dañada.



Figura 9. La estructura es posada en tierra.

La sección dañada es resguardada en las instalaciones del campo Reynosa, en el patio de maniobras del área de mantenimiento, donde personal de COMIMSA había realizado inspecciones y tomado algunas muestras de la estructura.

Información Mostrada por personal de la Unidad Operativa señala que este es el tercer caso de colapso estructural que se ha presentado en los últimos tres años, uno de ellos con la pérdida total del mástil y cuatro decesos humanos. Desafortunadamente, la Unidad Operativa no había realizado estudio alguno sobre los casos pasados, dejándolos solo como antecedentes archivados.

### ***Definición del problema.***

La Unidad Operativa de Perforación Reynosa, solicitó al grupo de Sistemas y Herramientas para la Adquisición de Información de Pozos del Instituto Mexicano del Petróleo, el estudio causa-raíz sobre el colapso estructural del equipo FV-405 en la segunda sección del mástil mientras realizaba trabajos de cementación en el pozo Pípila 7.

### ***Método.***

Cuando sobreviene la falla en una pieza, ésta puede ser advertida porque se generan ciertos síntomas a través de los cuales se puede identificar dicha falla. Con la finalidad de evitar estas fallas, se debe realizar un análisis minucioso de las causas que la provocarán, de tal forma que se de solución de raíz y no solo a sus síntomas. El término “causa raíz” se emplea para establecer conexiones en el análisis de modos de falla, de manera que, si se profundiza suficientemente, es posible encontrar la causa original y verdadera del problema. Este enfoque ha devenido en una de las mejores herramientas fundamentales para el mejoramiento de la confiabilidad y determinación de las causas que generan el advenimiento de fallas, a la cual se le denomina “Análisis de la Causa Raíz” (ACR), también identificada por sus siglas en inglés RFCA (Root Cause Failure Analysis).

El RFCA es un riguroso método de solución de problemas, para cualquier tipo de fallas, que utiliza la lógica sistemática y el árbol de causa raíz de fallas, usando la deducción y prueba de los hechos que conducen a las causas reales. Esta técnica de análisis permite aprender de las fallas y eliminar las causas, en lugar de corregir los síntomas.

Para implementar un ACR, se tiene un procedimiento de trabajo de seis pasos. Este proceso inicia preparando la investigación a realizar y termina con un reporte de los hallazgos.

*Paso 1.* Identificar los eventos más significativos. En este paso se recolecta la información, se definen las fallas y se calculan las pérdidas materiales y económicas debido a ellas. El objetivo es determinar cuales son los eventos y fallas más importantes.

*Paso 2.* Preservar las evidencias de las fallas. Es la parte en la que se comienza a analizar un problema específico. La recolección de datos es una parte integral del ACR, pues sin la información, es virtualmente imposible descubrir las causas. Para ellos, se recolecta información



de las partes falladas, su ubicación física en el mecanismo, del personal involucrado en la falla, recopilación de todos los reportes relacionados con la falla (de mantenimiento, planos, etc.).

**Paso 3.** Ordenar el análisis. Se conforma el equipo de trabajo que intervendrá en el análisis.

**Paso 4.** Construir el Árbol Lógico de Fallas. El Árbol Lógico trata estrictamente con datos reales y utiliza la lógica deductiva para trabajar sistemáticamente a través del problema. Los pasos para construir el árbol lógico de fallas son:

- Describir el evento de falla.
- Describir los modos de falla.
- Hacer una lista de las causas potenciales de falla y verificarlas.
- Determinar y verificar las causas raíz físicas.
- Determinar y verificar las causas raíz humanas.
- Determinar y verificar las causas raíz del sistema.

En esencia, el árbol lógico debe ir de lo general a lo específico, aplicando la lógica deductiva.

El paso más crítico, es la verificación de las hipótesis. Se debe verificar cada hipótesis para ver cuál es la verdadera y cuáles no lo son. Este proceso de lógica deductiva y verificación se reitera una y otra vez hasta que todas las raíces se determinan acertadamente.

Al final, el árbol presentará la estructura que se muestra en la figura 10.

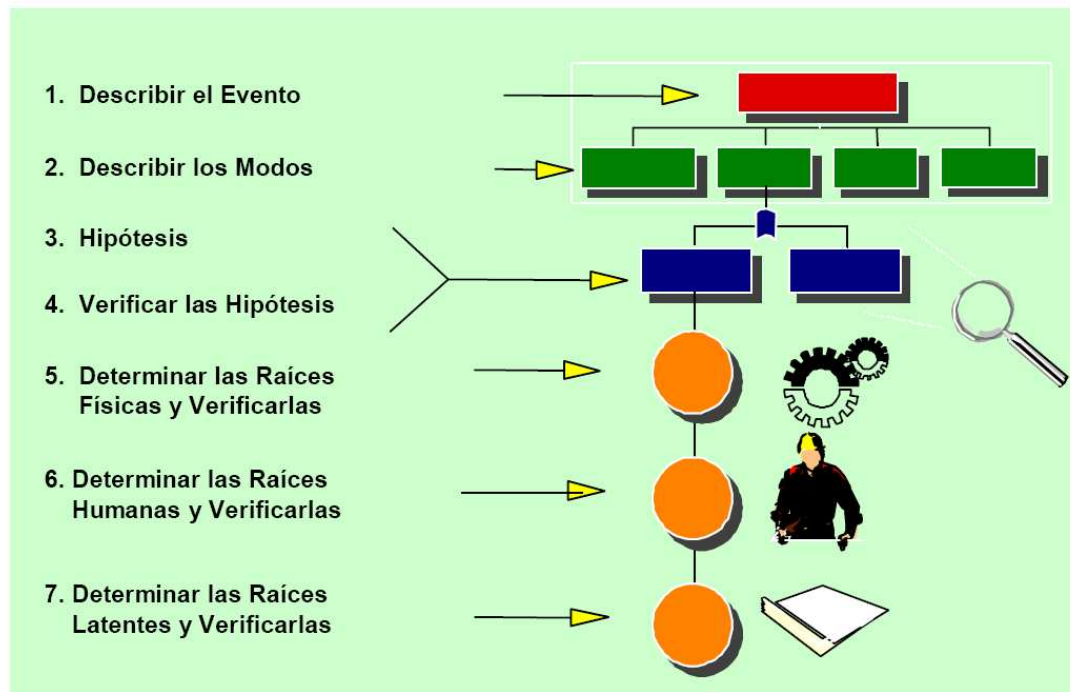


Figura 10. Árbol lógico de fallas.



**Paso 5.** Comunicar los resultados y las recomendaciones. Comunicar los resultados es el paso esencial para documentar los hallazgos. Un informe por lo general ayuda a obtener el compromiso para resolver las fallas centrándose en las causas raíz identificadas en la investigación.

**Paso 6.** Seguimiento de los resultados. El ACR no sería de utilidad si no se implantan las recomendaciones y soluciones, por ello se debe de llevar a cabo el monitoreo, con la finalidad de comparar los resultados con las registros de falla.

### **Aplicación del método.**

#### *Paso 1. Identificación de los eventos más significativos.*

Durante la visita que realicé junto con un ingeniero mecánico y un técnico en maquinaria-herramientas a las Instalaciones del campo Reynosa (ubicado en la carretera a Reynosa-San Fernando, km 10, Tamaulipas), se efectuó un reconocimiento visual de la estructura, poniendo mayor énfasis en la zona del colapso. De esta revisión se pudo observar que las zonas alejadas al colapso presentan daños generalizados en los elementos y en varias uniones soldadas, pero los daños en los tornillos es mínima. En la zona del colapso, se presentan estados de separación parcial entre los elementos, sin llegar a la ruptura total. La mayoría de estos inicios de falla están presentes en zonas aledañas al cordón, lugar donde el material tiende a endurecerse por el proceso de soldadura (figura 11a-b).



*Figura 11a. Falla en zona aledaña al cordón*



*Figura 11b. Falla en el cordón*

Las fallas en el cordón son mucho menores que las fallas en la zona aledaña (del orden de 4 a 1). También se observa que los elementos de carga están flexionados, ya sea hacia el claro o hacia el vértice. Los tornillos de esta zona no presentan trabajo mecánico, al igual que los pernos que unen las secciones. Un aspecto a resaltar es el gran desplazamiento presentado en la estructura lo provocó la unión pernada entre las secciones y que la zona de colapso esta justamente abajo de la zona de discontinuidad de la estructura.

Al conjuntar información no oficial obtenida al platicar con el personal operativo que estaba presente en el momento que ocurrió el colapso, obtengo la secuencia de operaciones que se realizaron antes del colapso:

- Aproximadamente 12 horas antes del incidente, la tubería de revestimiento se atrapa cuando fue asentada en el fondo del agujero.
- Para efectuar la cementación, se requiere que exista por lo menos 50 cm de separación entre el fondo y la TR, lo cual supuestamente logran al tensar la tubería y desplazarla hacia arriba.
- 4 horas antes del incidente, preparan las conexiones para realizar la cementación. La tubería sigue tensada y toda la carga es soportada por el mástil.
- El colapso se da durante la cementación, específicamente cuando habían inyectado 10 toneladas de cemento. En este punto, el mástil aun soportaba toda la carga.

Puedo apreciar la falta de control que tiene PEMEX en sus operaciones, porque no se tiene un registro preciso de las actividades que se realizan, además se observa que todas las operación se efectúan en base a la experiencia de los trabajadores y no en un procedimiento escrito y certificado por las dependencias que deberían de estar a cargo.

Otro punto importante que obtuve, es que el malacate que tenía en equipo de perforación no es el original, ni tampoco de capacidad similar, es de mayor carga. La persona encargada de manejar el malacate cuenta solamente con un indicador de tensión análogo, carente de un modo de almacenamiento de datos. El equipo en conjunto no cuenta con sistemas de control, que actúen en caso de efectuar una mala operación y así evitar sobrecargas en sus partes.

#### *Paso 2. Preservar las evidencias de las fallas.*

Personal del área de mantenimiento estructural proporcionó información la siguiente información:

- Posibles escenarios al momento del colapso, esta información se resume en la siguiente tabla I.
- Información de operación del equipo (figura 12).
- planos del equipo de perforación elaborados por la empresa COMIMSA (ver anexo D).

Tabla I. Condiciones de carga.

Tipo de carga	Carga	Carga al 80%	Carga al 100%
Estática	161.50 ton	174 ton	218 ton
Dinámica	168.67 ton	174 ton	218 ton
Dinámica direccional	151.60 ton	174 ton	218 ton
Cierre de tubería	180.75 ton	174 ton	218 ton



Figura 12. Datos adquiridos de la placa del mástil.

Personal del área de mantenimiento infirió en posibles escenarios de falla, llegando a las siguientes conclusiones:



- De la evaluación de escenarios, se observa que solo la condición en la que se tapa la tubería, la carga resultante del sistema supera el límite de resistencia certificado al 80% de la carga total del Mástil.
- Esta condición no es factible debido al tiempo de inicio de la operación vs tiempo de fraguado de la lechada.
- Además primero se reportó la falla en el mástil y después suspendió operaciones, Según reportes.
- Resalta que ninguna de las cargas asociadas al proceso de cementación supera la carga máxima certificada del mástil del Equipo.

Después de inspeccionar la estructura, se seleccionan muestras de la zona colapsada para caracterizar el material y realizar estudios metalográficos (figura 13a-d), con el fin de determinar el estado del material.



Figura 13a. Zona colapsada del mástil.



Figura 13b. Toma de muestras en el campo Reynosa.

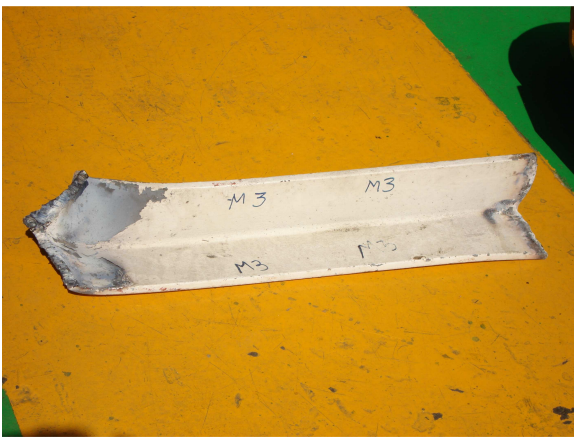


Figura 13c. Muestra cortada.



Figura 13d. Corte de muestras en las instalaciones del IMP.

La selección de las muestras se apoyó en la observación de las deformaciones: Se seleccionaron aquellas que sufrieron más deformación (figura 14a-b).

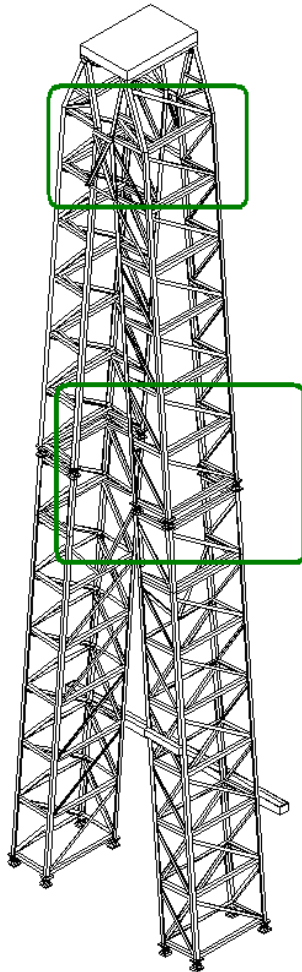


Figura 14a. Zonas dañadas del mástil.

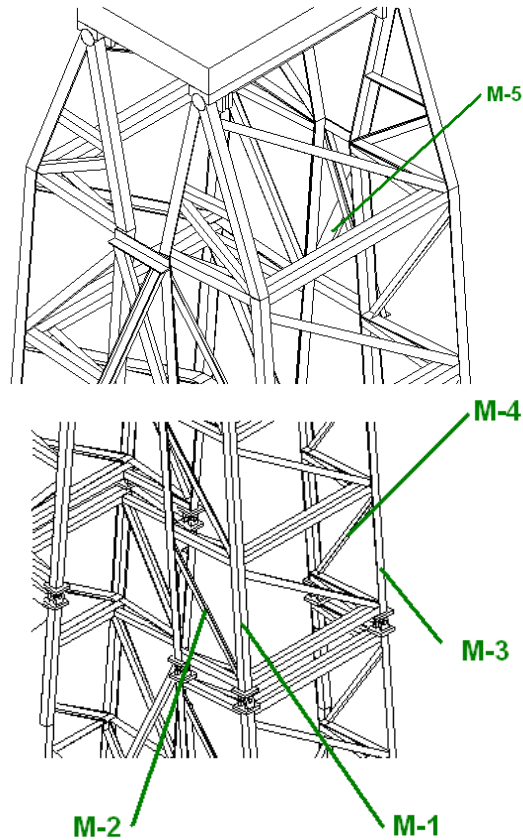


Figura 14b. Muestras seleccionadas.

### Paso 3. Ordenar el análisis.

El equipo que participará directamente en la elaboración del estudio estará constituido principalmente por el encargado de determinar la causa raíz del colapso (función a mi cargo), un técnico en máquina-herramientas que se encargará de los maquinados de probetas y el jefe de proyecto, que fungirá como facilitador. Indirectamente, dispondré del apoyo de los ingenieros mecánicos pertenecientes al departamento.

#### *Paso 4. Construir el Árbol Lógico de Fallas.*

Para la construcción del árbol lógico de fallas realicé las siguientes actividades:

1. Planteamiento de los modos de falla.
2. Pruebas de tracción.
3. Análisis químico.
4. Metalografía.
5. Caracterización de materiales.
6. Análisis estructural mediante el método de elementos finitos.
7. Análisis de resultados.
8. Comparación de los resultados de análisis numérico con la geometría del mástil.

#### **1. Planteamiento de los modos de falla.**

Para determinar el mecanismo de falla que derivó en el colapso de la estructura, planteó los siguientes modos de falla más frecuentes en elementos estructurales:

Plasticidad.

- Manifestación: deformaciones plásticas son posibles.
- Origen: estructura microscópica (deslizamiento de cristales).
- Plasticidad local: redistribución de tensiones a zonas con menores tensiones. Materiales dúctiles, capaces de desarrollar deformaciones grandes.
- Propagación de plasticidad: Fluencia de una parte considerable del objeto estructural.
- Caracterización: Límite de fluencia, superficies de fluencia, strain hardening.
- Factores que influyen: Procesos de carga/descarga, ritmo de carga, estados multiaxiales, temperaturas altas.
- Modelos: constitutivas no lineales, cinemáticas lineales

Fractura.

- Manifestación: Se rompe el material antes de tener deformaciones grandes.
- Origen: Defectos locales en el material a nivel microestructural.
- Fractura repentina en materiales “frágiles”: rocas, fundición, etc.

- Fractura de materiales "dúctiles" con defectos (fisuras, concentración de tensiones, ranuras, etc.). En materiales dúctiles puede haber rotura frágil.
- Propagación de fisuras: extensión de una fisura de manera continuada. Inestabilidad de fisuras.
- Modo de falla: Iniciación de superficies interiores. Separación de la estructura en partes.
- Factores que influyen: bajas temperaturas, cargas dinámicas, habilidad del material para absorber energía.
- Caracterización: Resistencia a fractura (fracture toughness), longitud crítica.
- Modelos: deformaciones plásticas pequeñas.

#### Fatiga.

- Manifestación: Fractura progresiva.
- Causa: Estados tensionales repetidos o cíclicos.
- Falla sin aviso previo visual.
- Factores que influyen: concentración de tensiones, cambios abruptos de sección, fisuras, etc.
- Caracterización: Número de ciclos límite, resistencia a la fatiga.

#### Desplazamientos instantáneos.

- Origen: esbeltez del objeto estructural.
- Modo 1: Desplazamientos grandes con equilibrio estable.
- Modo 2: Pandeo (equilibrio inestable), falla en la forma estructural. Las fallas por modos de pandeo, están dominados por la geometría y no por el material.
- Modo 3: Vibraciones. Consecuencias: ruido, golpes entre partes que se mueven, grandes desplazamientos transitorios.
- Modelos: constitutivas elásticas, cinemáticas no lineales.
- Reducción de desplazamientos: modificación de la forma, redimensionar secciones. No influye tanto cambiar el material.
- Factores que influyen: relaciones geométricas.
- Consecuencias: problemas operativos, colapso, inseguridad del usuario.

#### Creep.

- Manifestación: Desplazamientos diferidos en el tiempo.

- Origen: en metales y cerámicos ocurre una difusión de vacancias, con cambio de forma en los granos. Deslizamiento de granos, formación de cavidades a lo largo de los bordes de granos.
- Causa: tensiones actuando durante tiempos largos.
- Factores que influyen: temperaturas, problemas de material.

De estos modos de fallas, el modo de fractura queda descartado, porque no hay elemento que se haya seccionado de forma frágil. El modo de creep, es descartado porque el periodo de tiempo es muy corto. Así pues, los modos de falla posibles son el de plasticidad, el de fatiga y el de desplazamientos instantáneos.

Para determinar cual de los modos es el causante, me tuve que apoyar en el estudio mecánico y químico de las muestras y un análisis más a detalle de las deformaciones y de la construcción de la estructura.

## 2. Pruebas de tracción.

En esta prueba conocí parámetros como son límite elástico del material, elongación y resistencia a la tracción, ello para verificar que el material cumpla con las especificaciones. Para efectuar estas pruebas, envié las muestras a la empresa electrodos-infra, cuyos resultados obtenidos bajo la norma ASTM A-370 se muestran en las tablas II y III.

Tabla II. Resultados del límite elástico.

Muestra	Límite elástico (psi)	Límite elástico promedio (psi)
M1-1	37340.0	39016.0
M1-2	40692.0	
M2-1	41105.0	41189.5
M2-2	41274.0	
M3-1	59082.0	58995.5
M3-2	58909.0	
M4-1	43221.0	42617.0
M4-2	42013.0	
M5-1	41389.0	42202.5
M5-2	43016.0	



Tabla III. Resultados del límite de tensión.

Muestra	Límite tensión (psi)	Límite tensión promedio (psi)
M1-1	62732.0	62579.0
M1-2	62426.0	
M2-1	52654.0	52120.0
M2-2	51586.0	
M3-1	93395.0	92835.5
M3-2	92276.0	
M4-1	59520.0	58390.5
M4-2	57261.0	
M5-1	64808.0	65572.0
M5-2	66336.0	

Las graficas de estas pruebas se pueden ver en el anexo A.

### 3. Análisis químico.

En el análisis químico busco identificar la composición química del material de las muestras, esto es para poder caracterizarlos. El análisis se realiza mediante dos métodos:

**Absorción atómica**, en este se encuentran los porcentajes de Cobre, Manganeso, Silicio y Vanadio.

**Químico**, en esta área se encuentran los porcentajes de, Carbono, Fósforo y Azufre.

Para efectuar estos análisis, envié las muestras a la empresa electrodos-infra. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla IV.

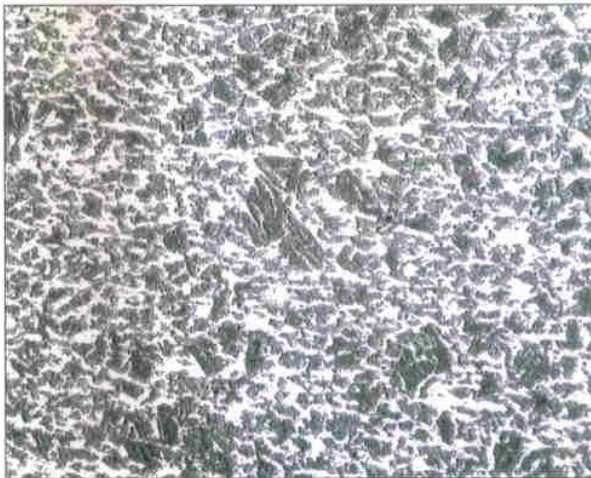
Tabla IV. Resultados del análisis químico.

MATERIAL	% C	% S	% Mn	% Si	% P
M-1	0,25	0,019	0,42	0,05	0,018
M-4	0,20	0,027	0,38	0,05	0,016
M-5	0,20	0,033	0,70	0,06	0,026

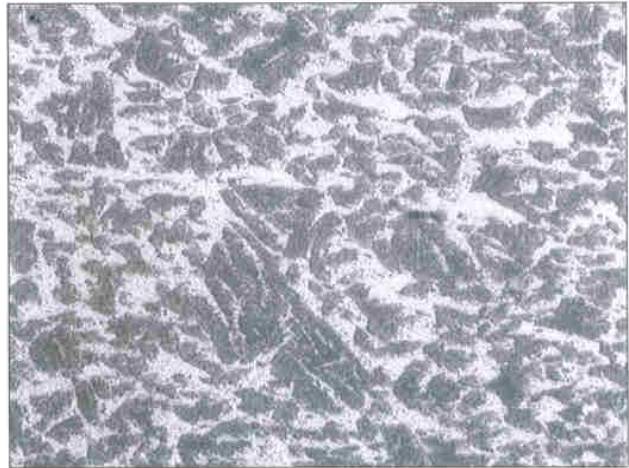
#### 4. Metalografía.

Con la metalografía intento encontrar anomalías en el grano, incrustaciones no metálicas, o corrosión. Los resultados se muestran en seguida:

*Muestra M-1, atacada con Nital al 2% (figura 15).*



*Figura 15. Muestra M-1: Aumentos 50X*



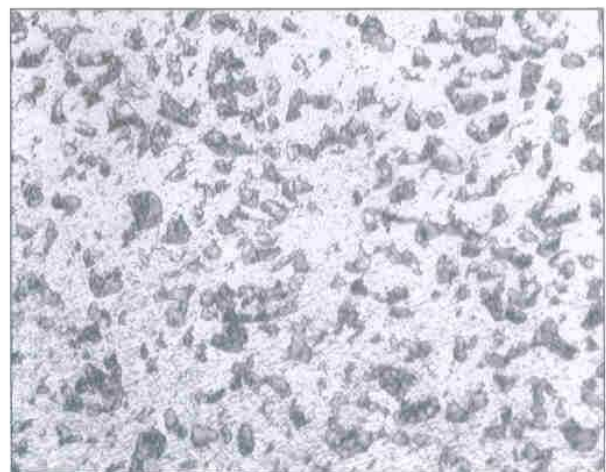
*Aumentos 100X*

Corte transversal de la muestra, microestructura característica de un acero hipoeutectoide, donde se observa perlita (zonas oscuras) en una matriz ferrítica (zonas claras). No se observa ningún tipo de corrosión, ni inclusiones no metálicas.

*Muestra M-4, atacada con Nital al 2% (Figura 16).*



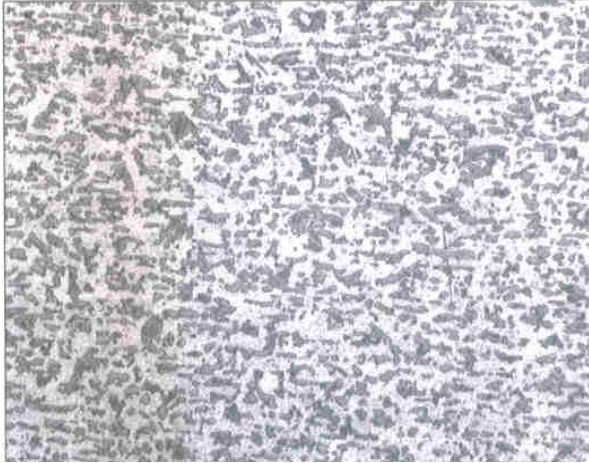
*Figura 16. Muestra M-4: Aumentos 50X*



*Aumentos 100X*

Corte transversal de la muestra, microestructura característica de un acero hipoeutectoide, donde se observa perlita (zonas oscuras) en una matriz ferrítica (zonas claras). No se observa ningún tipo de corrosión, ni inclusiones no metálicas.

*Muestra M-5, atacada con Nital al 2% (figura 17)*



*Figura 17. Muestra M-5: Aumentos 50X*

*Aumentos 100X*

Corte transversal de la muestra, microestructura característica de un acero hipoeutectoide, donde se observa perlita (zonas oscuras) en una matriz ferrítica (zonas claras). No se observa ningún tipo de corrosión, ni inclusiones no metálicas.

## 5. Caracterización de materiales.

Las propiedades de los aceros estructurales comerciales y sus características mecánicas y químicas, nombrados por la ASTM, se listan en la tabla V y en la tabla VI:

*Tabla V. Propiedades de los aceros estructurales*

ASTM A-36	Acero estructural de 36 ksi mínimo de límite elástico y de 58-80 ksi de resistencia a la tensión.
ASTM A-572-50	Acero calidad estructural de alta resistencia y baja aleación de 50 ksi mínimo de límite elástico y 65 ksi mínimo de resistencia a la tensión.
Grado Dual A-36/A-572-50	Acero calidad estructural de alta resistencia y baja aleación de 50 ksi mínimo de límite elástico y 65-80 ksi de resistencia a la tensión.

Tabla VI. Propiedades mecánicas y composición química de los aceros estructurales.

Propiedades mecánicas y composición química	Grado A-36	Grado dual A-36 / A-572-50	Grado A-572-50
Límite elástico (ksi)	36 (mín.)	50 (mín.)	50 (mín.)
Resistencia a la tensión (ksi)	58 - 80	65 - 80	65 (mín.)
% elongación en 8"	20 (mín.)	20 (mín.)	18 (mín.)
% elongación en 2"	21 (mín.)	23 (mín.)	21 (mín.)
% Carbono	0.26 (máx.)	0.23 (máx.)	0.23 (máx.)
% Manganeso	0.85 - 1.35	0.50 - 1.35	1.35 (máx.)
% Fósforo	0.04 (máx.)	0.04 (máx.)	0.04 (máx.)
% Azufre	0.05 (máx.)	0.05 (máx.)	0.05 (máx.)
% Silicio	0.40 (máx.)	0.40 (máx.)	0.40 (máx.)
% Cobre, cuando el cobre es especificado	0.20 (mín.)		
% Columbium / Niobio o Vanadio		0.05 (máx.)	0.05 (máx.)

Los resultados que obtengo al comparar los Límites elásticos y de resistencia a la tensión, entre las muestras y los valores normados se muestran en las tablas VII y VIII:

Tabla VII. Comparación del límite elástico.

Muestra	Limite elástico (psi)	A-36	A-26/A-572-50	A-572-50
		36000.0	50000.0	50000.0
M-1	39016.0	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
M-2	41189.5	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
M-3	58995.5	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
M-4	42617.0	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
M-5	42202.5	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE

Tabla VIII. Comparación de la resistencia a la tensión.

Muestra	Resistencia a la tensión (psi)	A-36		A-26/A-572-50		A-572-50
		58000.0	80000.0	65000.0	80000.0	65000.0
M-1	62579.0	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
M-2	52120.0	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
M-3	92835.5	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
M-4	58390.5	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
M-5	65572.0	CUMPLE	NO CUMPLE	CUMPLE	NO CUMPLE	CUMPLE

Los resultados que obtengo al comparar el análisis químico con los valores del acero ASTM A-36 se muestra en las tablas IX-XIII:

Tabla IX. Comparación del contenido de Carbono.

Muestra	% C	0.26
M-1	0.25	CUMPLE
M-4	0.20	CUMPLE
M-5	0.20	CUMPLE

Tabla X. Comparación del contenido de Manganeso

Muestra	% Mn	0.85
M-1	0.42	CUMPLE
M-4	0.38	CUMPLE
M-5	0.70	CUMPLE

Tabla XI. Comparación del contenido de Fósforo.

Muestra	% P	0.040
M-1	0.018	CUMPLE
M-4	0.016	CUMPLE
M-5	0.026	CUMPLE

Tabla XII. Comparación del contenido de Azufre.

Muestra	% S	0.050
M-1	0.019	CUMPLE
M-4	0.027	CUMPLE
M-5	0.033	CUMPLE

Tabla XIII. Comparación del contenido de Silicio.

Muestra	% Si	0.40
M-1	0.05	CUMPLE
M-4	0.05	CUMPLE
M-5	0.06	CUMPLE



En la tabla XIV muestro la clasificación que realicé de las muestras, esto fue apoyándome en las pruebas de tracción, al análisis químico y metalográfico.

Tabla XIV. Identificación de las muestras.

Muestra	Acero
M-1	ASTM-A36
M-2	ASTM-A36
M-3	ASTM A-572-50
M-4	ASTM-A36
M-5	ASTM-A36

## 6. Análisis estructural mediante el método de elementos finitos.

Una vez que determiné las propiedades mecánicas de los materiales empleados en la fabricación de la estructura y ya habiendo dibujado el modelo tridimensional en un programa de CAD, procedo a realizar la simulación numérica bajo los criterios de pandeo y de tensión, tomando en cuenta la información de cargas proporcionada por el personal de PEMEX y aplicando las restricciones y grados de libertad.

Los análisis que realicé fueron dos: Análisis de tensión en modo estático con comportamiento lineal y Análisis de pandeo en modo estático.

El procedimiento que empleé para realizar los análisis numéricos se enlista abajo:

- a) Importación del modelo virtual.
- b) Definición del tipo de estudio a realizar.
- c) Establecimiento de las condiciones de contacto entre los elementos y grados de libertad.
- d) Establecimiento del tipo de material para el análisis.
- e) Discretización de los elementos.
- f) Aplicación de condiciones de carga.
- g) El software soluciona el problema bajo las condiciones de frontera planteadas.
- h) Graficación de los resultados obtenidos.

La descripción mas detallada de este proceso esta en el anexo B.

Los datos de entrada empleados para la simulación numérica de tensión se muestran en la tabla XV.

Tabla XV. Parámetros para la simulación numérica de tensión.

Análisis de tensión	
Carga de operación	Vertical 170,000 kgf Horizontal 15,000 kgf
Grados de libertad	Estructura fija en la base, uniones pernadas entre los segmentos.
Material	Verticales de carga ASTM A-572-50 Horizontales y Contraventos ASTM A36
Tipo de análisis	Estático con comportamiento lineal

Los datos de entrada empleados para la simulación numérica se muestran en la tabla XVI.

Tabla XVI. Parámetros del análisis de pandeo

Análisis de pandeo	
Carga de operación	Vertical 170,000 kgf Horizontal 15,000 kgf
Grados de libertad	Estructura fija en la base, uniones pernadas entre los segmentos.
Material	Verticales de carga ASTM A-572-50 Horizontales y Contraventos ASTM A36
Tipo de análisis	Pandeo con comportamiento lineal y cuatro modos de comportamiento

## 7. Análisis de resultados.

Ya con todos los resultados de los puntos anteriores, procedí a analizarlos de forma conjunta y con mayor detalle; esto, con la finalidad de poder determinar el modo de falla.

El análisis químico y las pruebas de tracción nos indica que las muestras M-1, M-3, M-4, y M-5 cumplen con las condiciones de los aceros ASTM A36 y ASTM A-572-50. La muestra M-2 no cumple con las condiciones de resistencia a la tensión. Debido a que el parámetro que nos importa es el límite elástico, todas las muestras lo cumplen.

**Los materiales cumplen con las condiciones para el trabajo.**

Los estudios metalográficos muestran que los materiales no presentan alteraciones y anomalías granulares.

**Los materiales están en buen estado.**

Los resultados de la concentración de esfuerzos se ven en las figuras 18-20 y las tendencias de deformación en las figuras 21-24.

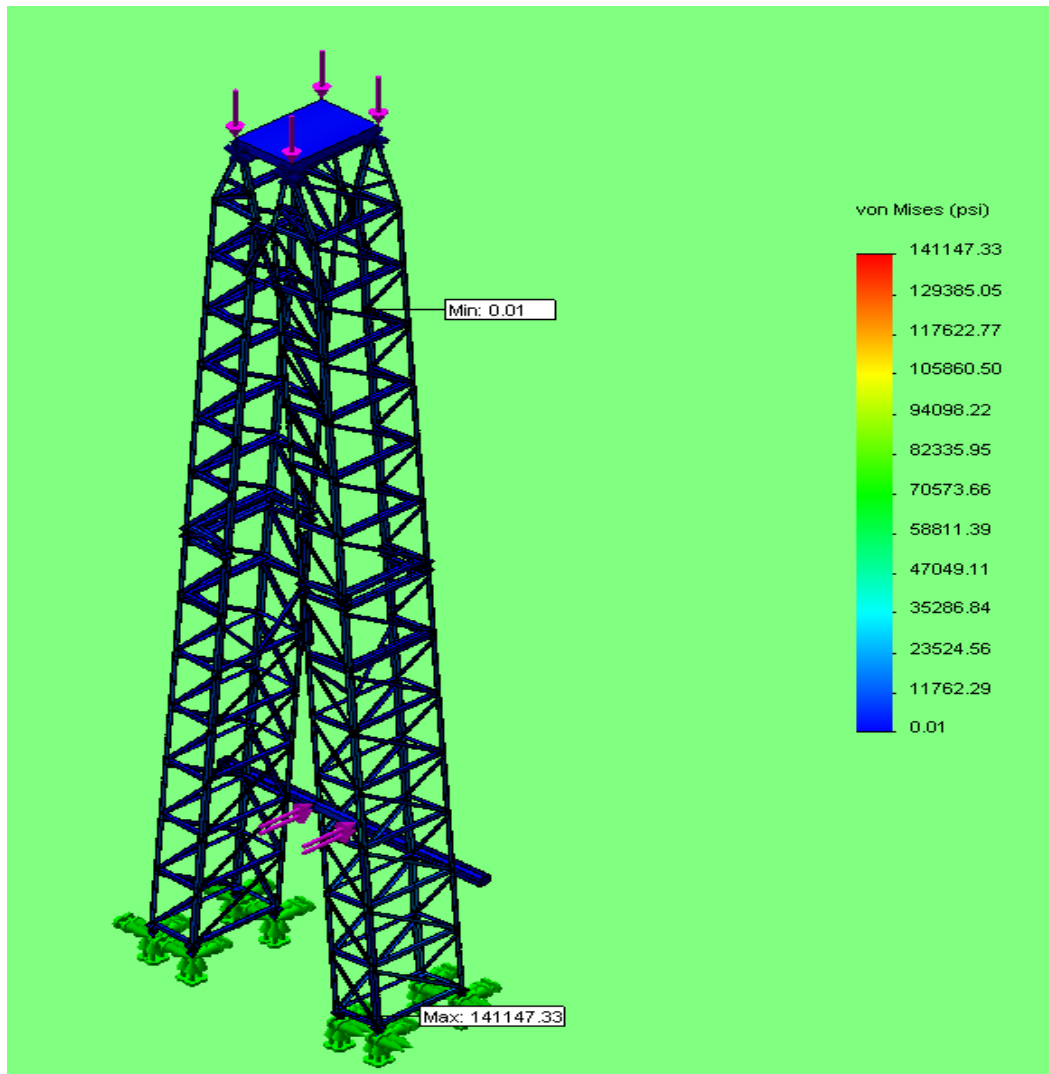


Figura 18. La imagen muestra la distribución de esfuerzos en la estructura.



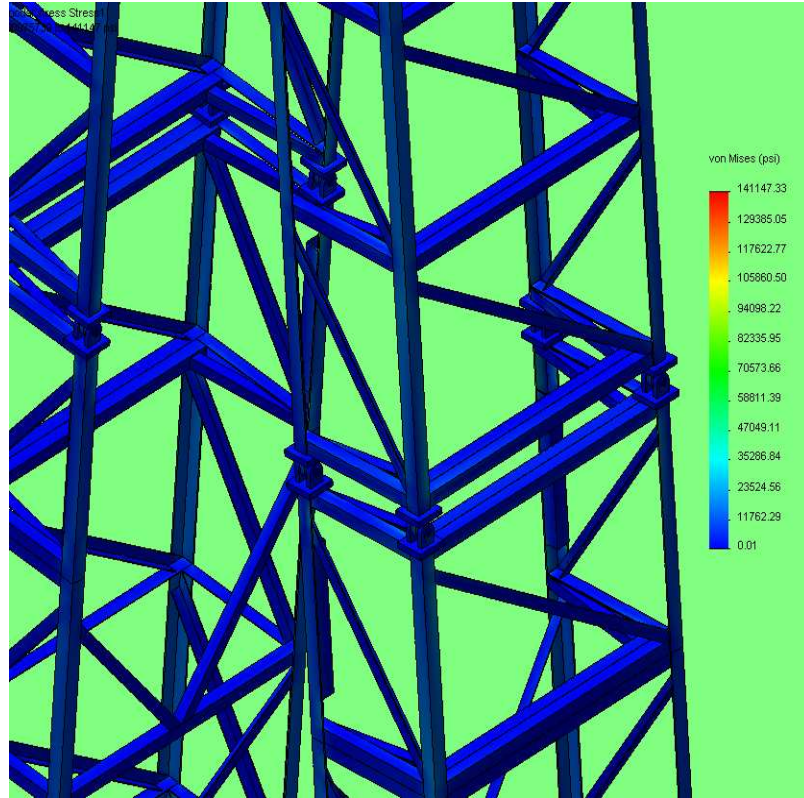


Figura 19. Acercamiento a la zona de colapso.

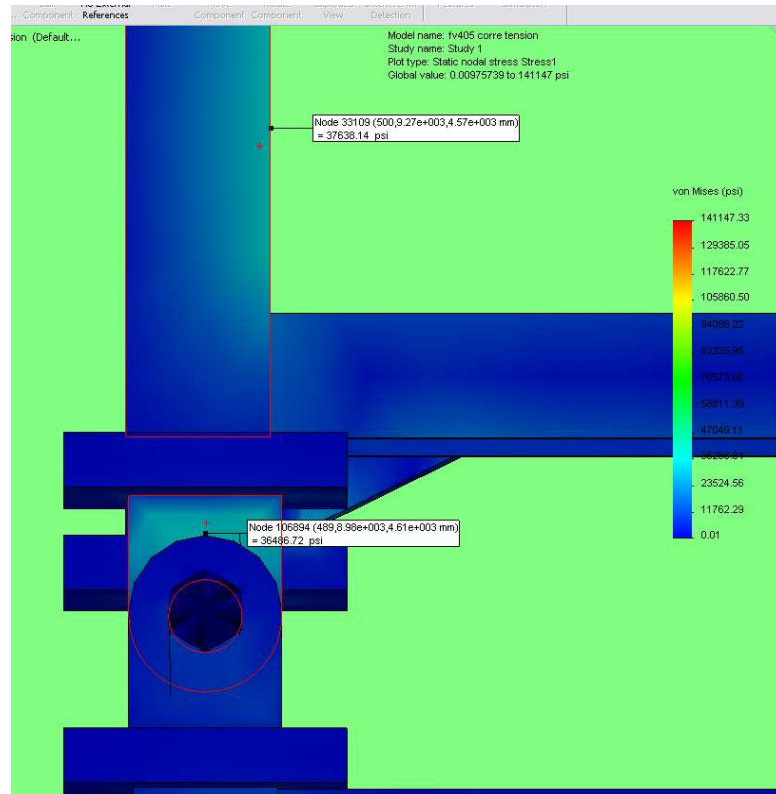


Figura 20. Muestreo en zonas de mayor esfuerzo.

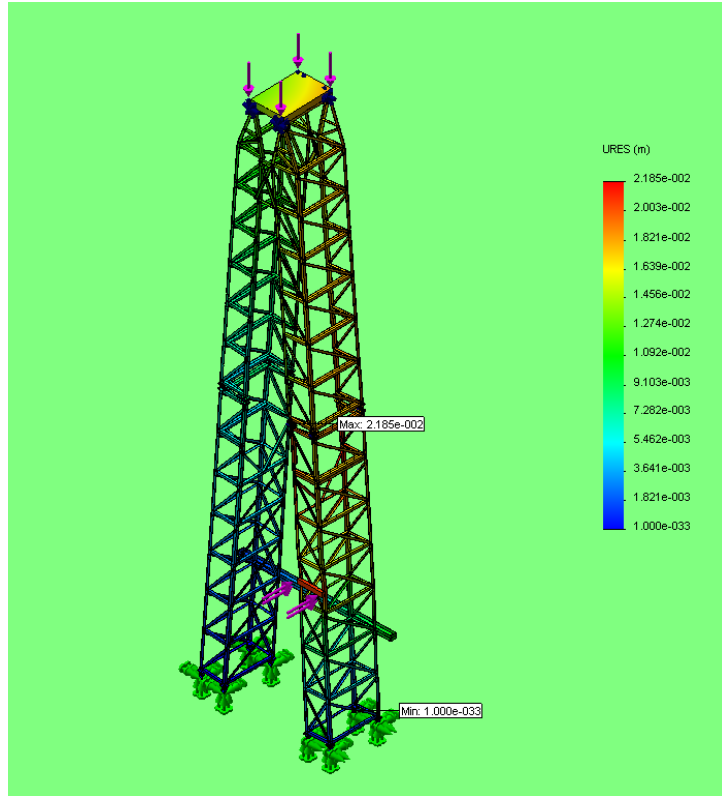


Figura 21. Vista isométrica de deformación.

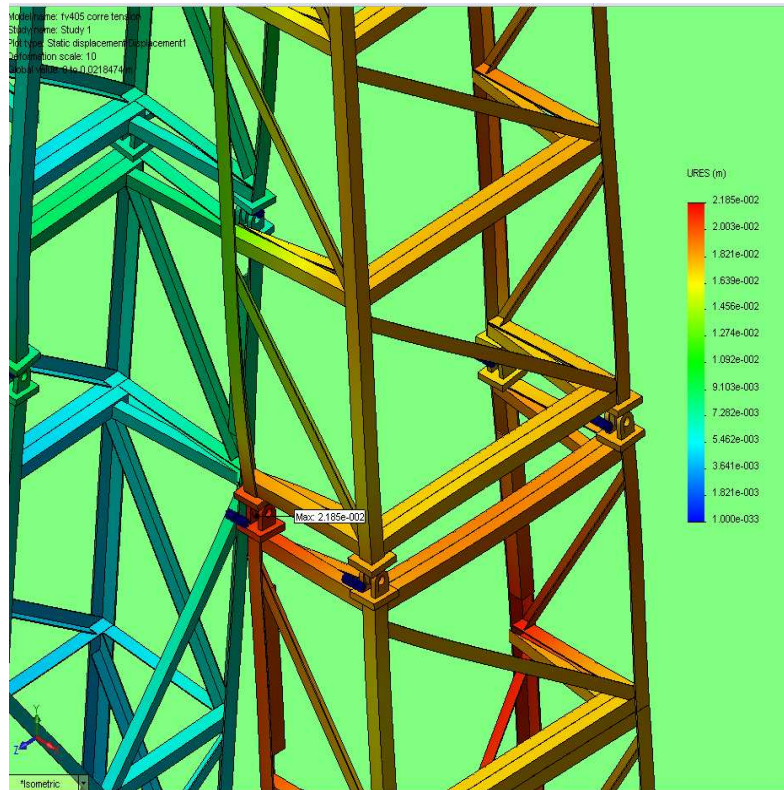


Figura 22. Vista acercamiento a la zona de máxima de deformación.

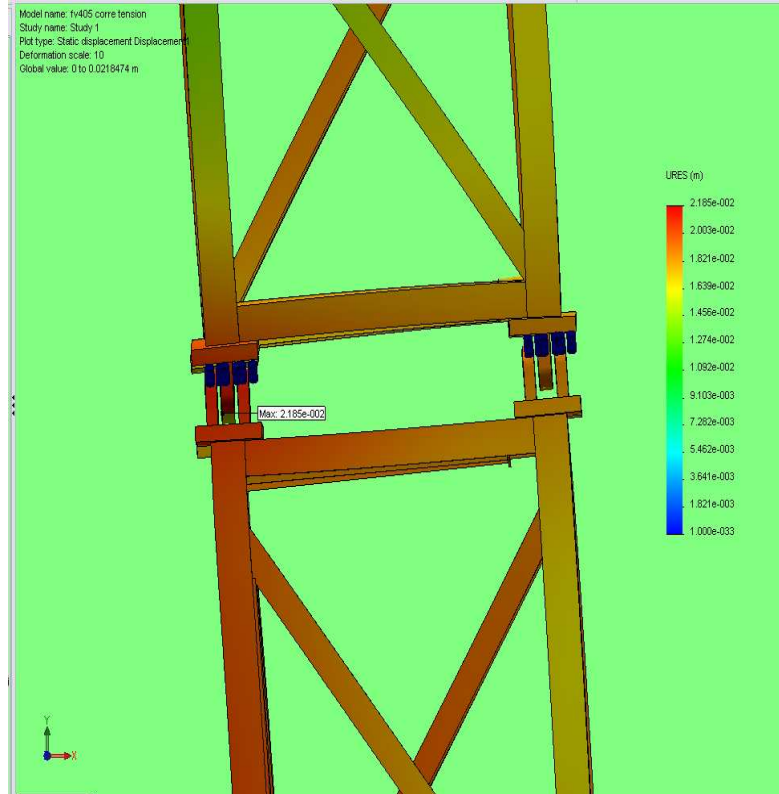


Figura 23. Vista frontal de deformación.

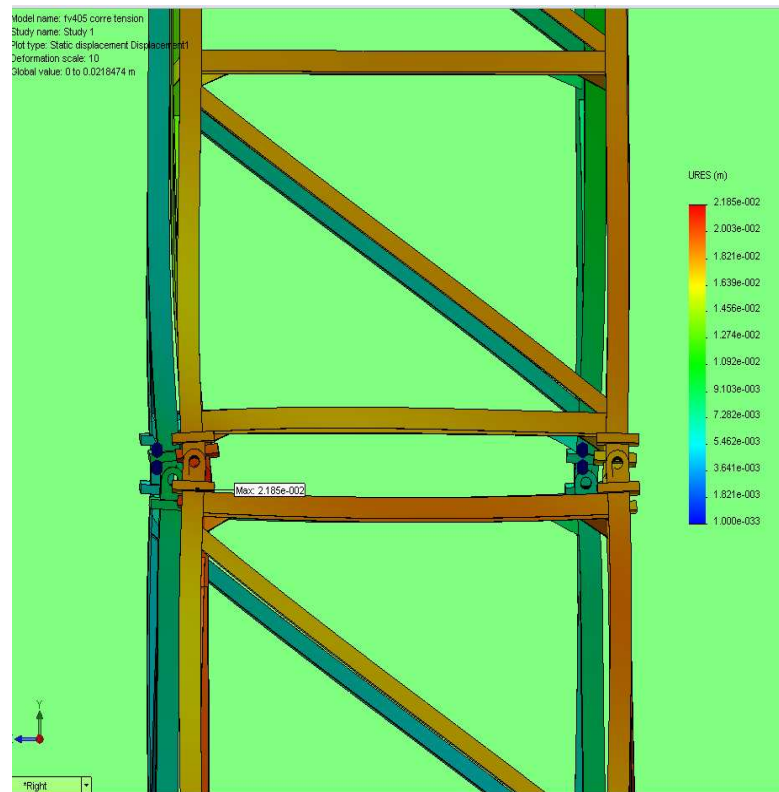


Figura 24. Vista lateral de deformación

En la figura 12 se observa que el esfuerzo promedio en la mayor parte de la estructura es de aproximadamente 11,762 psi. En la figura 20, se aprecia que el valor máximo se da en los verticales de carga; si tomamos como esfuerzo máximo 36,500 psi, tendremos un factor de seguridad de 1.4, porque el material soporta en esa zona 50,000 psi.

En las imágenes de tendencias de deformación de la estructura, se ve que las uniones pernadas permiten la liberación de energía y mayor desplazamiento. Bajo estos criterios:

### La estructura soporta la carga de trabajo.

Los resultados de la tendencia al pandeo se ven en las figuras 25-27.

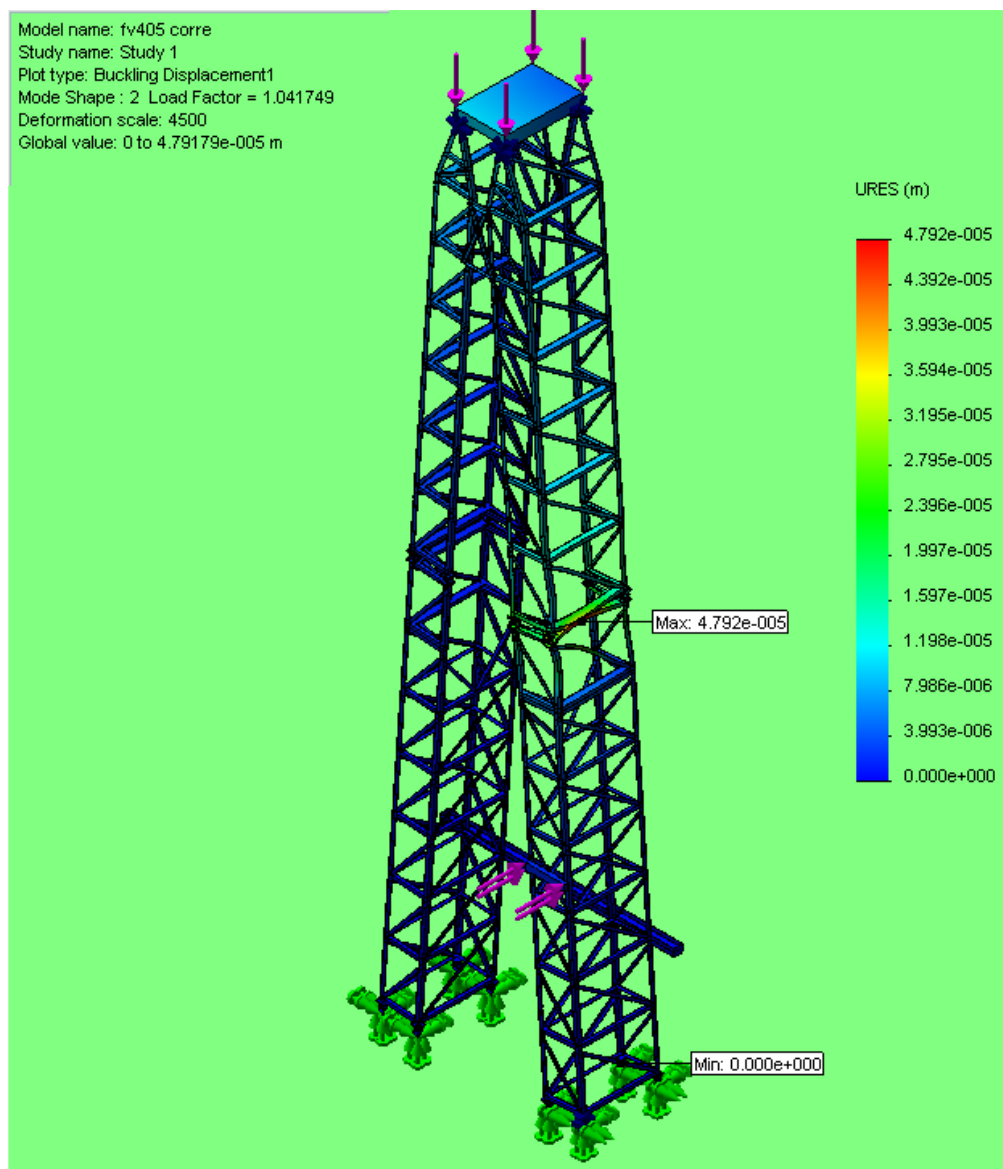


Figura 25. Tendencia general de pandeo.



En la figura 26 se muestra la tendencia de la estructura al pandeo. Se puede observar que la zona de mayor afectación se encuentra entre la zona pernada y la zona de discontinuidad. El estudio nos da un factor de carga (BLF) de 1.042.

La Teoría de pandeo indica que si:

$BLF > 1$  la carga está por debajo de la carga crítica.

$0 < BLF < 1$  La carga excede la carga crítica estimada

$BLF = 1$  La carga aplicada es exactamente la carga crítica.

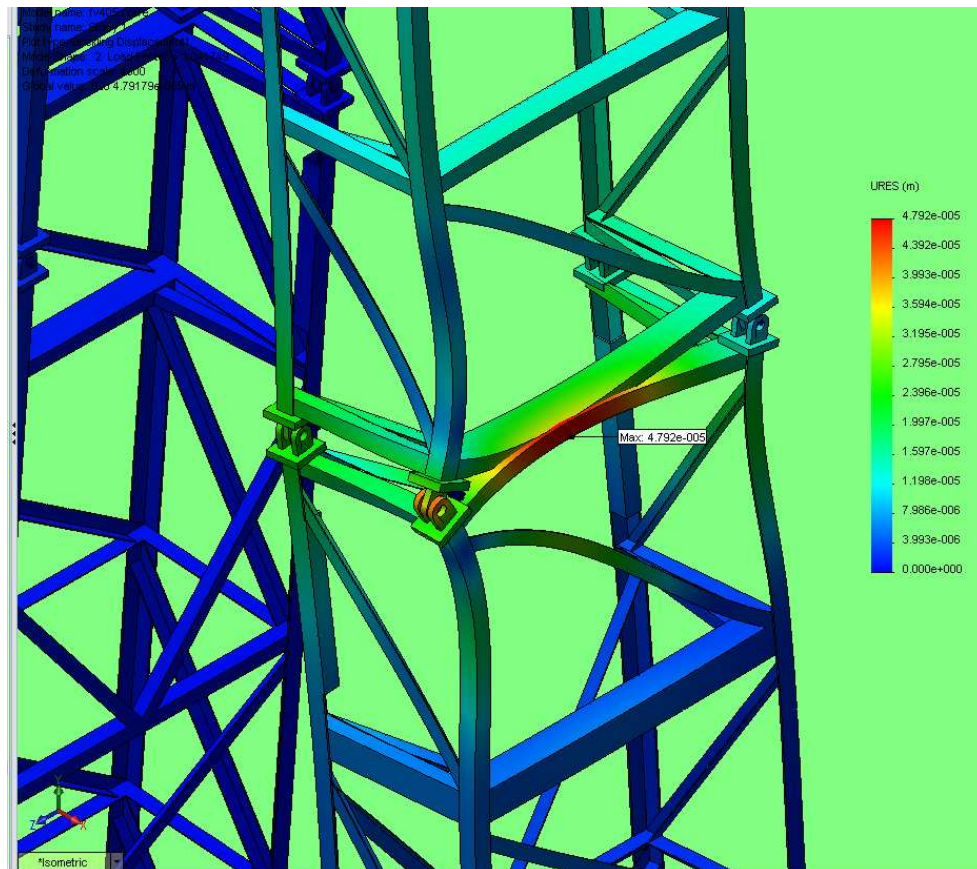


Figura 26. Acercamiento a la zona de mayor valor.

En un acercamiento a la zona de colapso (figura 27), se puede ver que en la zona pernada se presenta la mayor tendencia a la deformación por pandeo.

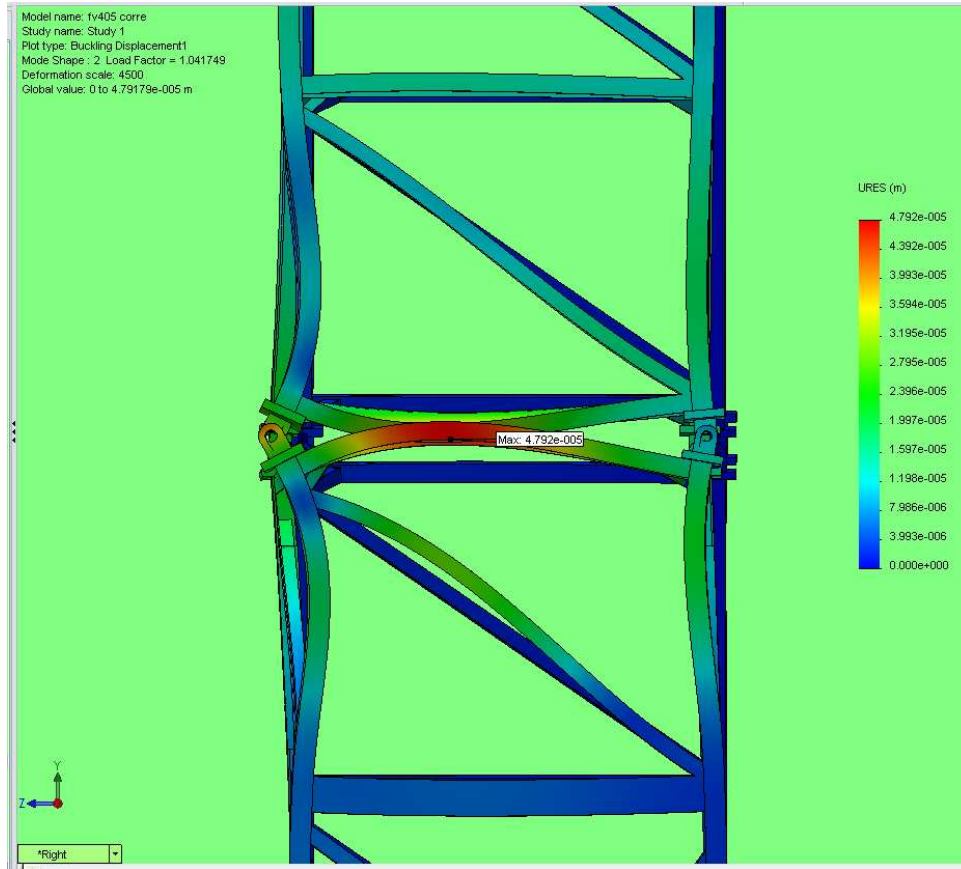


Figura 27. Vista lateral de la deformación inducida por el pandeo.

El valor dado por el análisis está muy próximo al intervalo en el que se puede presentar el pandeo. Lo que abre la puerta a especular que un incremento en la carga lo pondría dentro del intervalo, y así iniciaría la falla.

## 8. Comparación de los resultados de análisis numérico con la geometría del mástil.

Las imágenes muestran que la zona de falla es la de máxima concentración de deformación por pandeo y máxima concentración de esfuerzos, además es justamente la discontinuidad del armado de la estructura y con base en la teoría de pandeo y los principios de diseño estructural, se llega a la conclusión de que la estructura fue diseñada para fallar en esa zona, y así evitar que se tenga un daño de mayor proporción (figura 28).

El análisis geométrico de los elementos de la estructura, indican que fue diseñada para seguir en pie, con el grado de daño que sufrió, más no para seguir operando. Por ello no se precipitó y permitió el desalojo del personal.

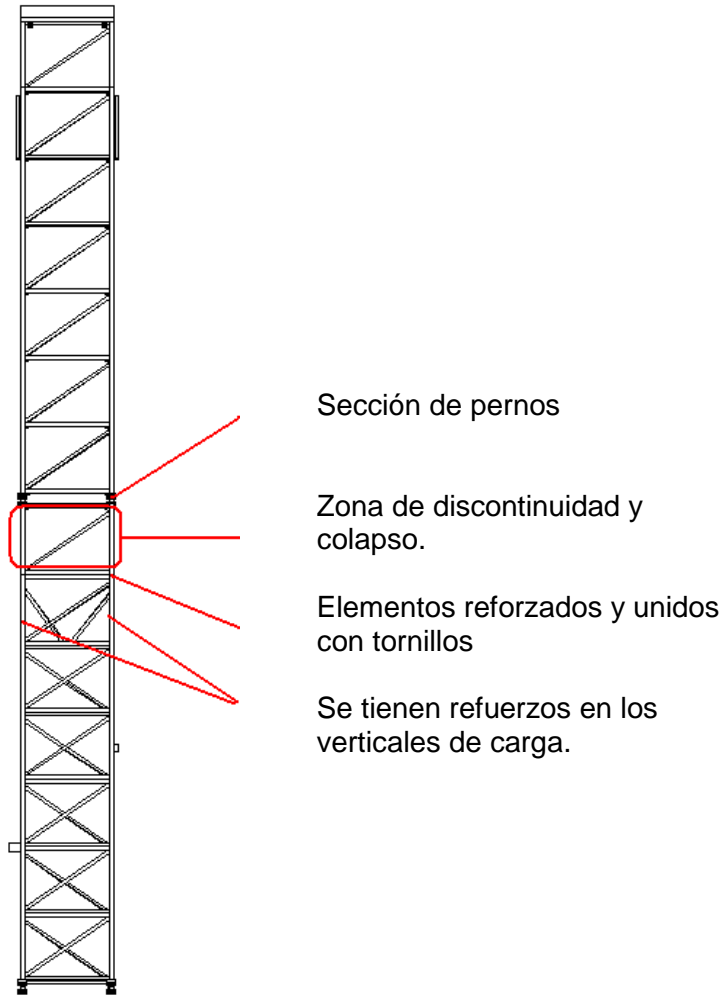


Figura 28. Localización de la zona de falla.

Al comparar los resultados obtenidos de la simulación numérica de pandeo con las deformaciones reales, se puede apreciar gran similitud entre ellas (figura 29). Teniendo en cuenta que la solución numérica solo nos da la posible tendencia de la deformación al inicio de la falla, es de esperarse que la comparación no sea exacta, pero si aproximada. En base a esto, se puede decir que el modo de fallo por pandeo se apega mucho a los resultados reales.

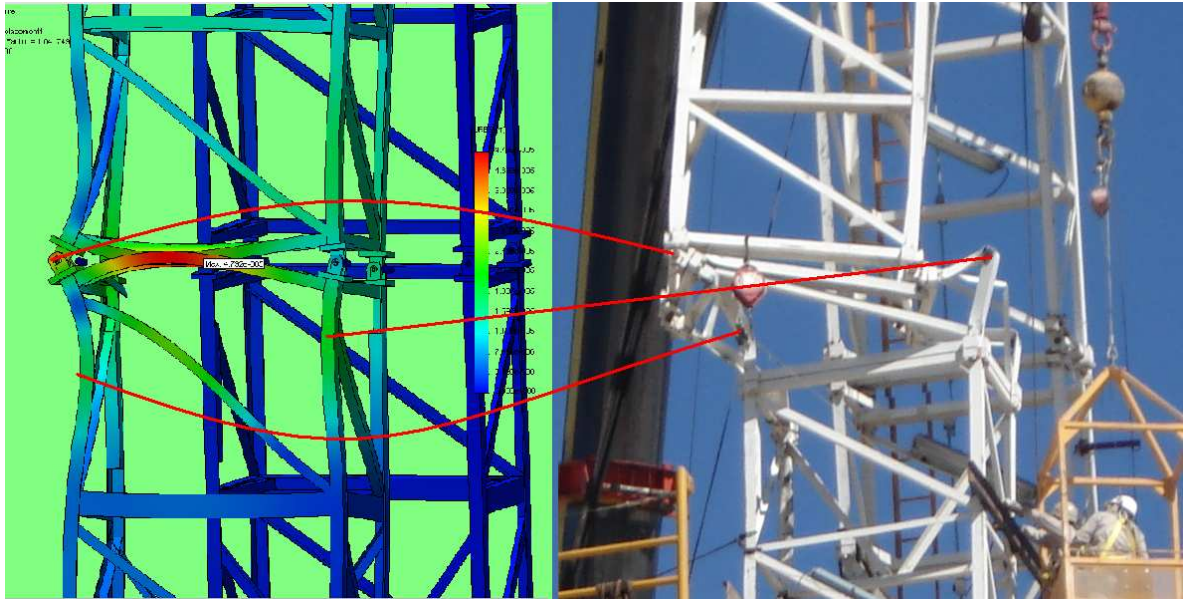


Figura 29. Comparación entre la solución numérica y el estado real de la estructura.

*Paso 5. Comunicar los resultados y las recomendaciones.*

Los resultados del análisis los entregué en un informe técnico al Encargado de Sección de Mantenimiento Estructural a Equipos de Perforación de la Unidad Operativa de Perforación-Reynosa y expuse el contenido a todos los encargados de la Gerencia de Perforación y Mantenimiento de Pozos Región Norte en una reunión de trabajo. La carátula de acuse y el contenido del informe se muestran en el anexo C.

*Paso 6. Seguimiento de los resultados.*

La UOPR se ha dado a la tarea de implantar las recomendaciones emitidas en el informe técnico y se ha visto reflejado en la apertura de un nuevo proyecto para el IMP llamado “Sistema de monitoreo en tiempo real de equipos de perforación”.



## **Conclusiones.**

Con base en los estudios realizados, se determina lo siguiente:

- La estructura no falló por fatiga, pues no se hallaron indicios en la metalografía y en la inspección visual de los componentes estructurales y soldaduras.
- El modo de tensión es también descartado, porque la estructura soporta la carga de trabajo bajo un factor de seguridad de 1.4.
- El modo que nos indica una posible falla, es el de pandeo, pues el factor de carga es de 1.042, valor muy próximo al intervalo crítico. Dado que las condiciones de carga son teóricas y asumiendo que los materiales son homogéneos e isotrópicos, además, de que las tendencias de deformación simuladas son muy próximas a los resultados reales, se llega a la conclusión de que el modo de falla más probable es el pandeo.

### **Modo de falla: Pandeo por Inestabilidad elástica.**

Como conclusión se tiene que la estructura falló por pandeo, debido a que en algún momento de la operación, se superó la carga crítica tolerada por la condición geométrica que adoptó el mástil; la cual no se puede determinar por falta de información precisa sobre los eventos que ocurrieron al momento de la falla.

El análisis causa raíz se resume en el árbol lógico mostrado en la figura 30.

Las recomendaciones basadas en el ACR que presentamos al personal de PEMEX son:

- No superar la carga crítica, pues no se garantiza la integridad del equipo.
- Tener mayor cuidado en los programas de mantenimiento, enfocándose en los puntos críticos, realizando pruebas no destructivas de la integridad del material (líquidos penetrantes, corrientes parásitas, etc.).
- En los casos de que se deben de sustituir elementos, se debe tener un estricto control de calidad sobre el material, para garantizar que cumpla con las normas empleadas en el diseño.
- Llevar una bitácora con la información más precisa que se pueda sobre todos los trabajos de mantenimiento.
- Instalar sistemas de control de tensión en las líneas, con la finalidad de evitar sobrecargas accidentales.
- Instalar sistemas de registro del historial de cargas, para así tener evidencia de todas las actividades que se realicen.

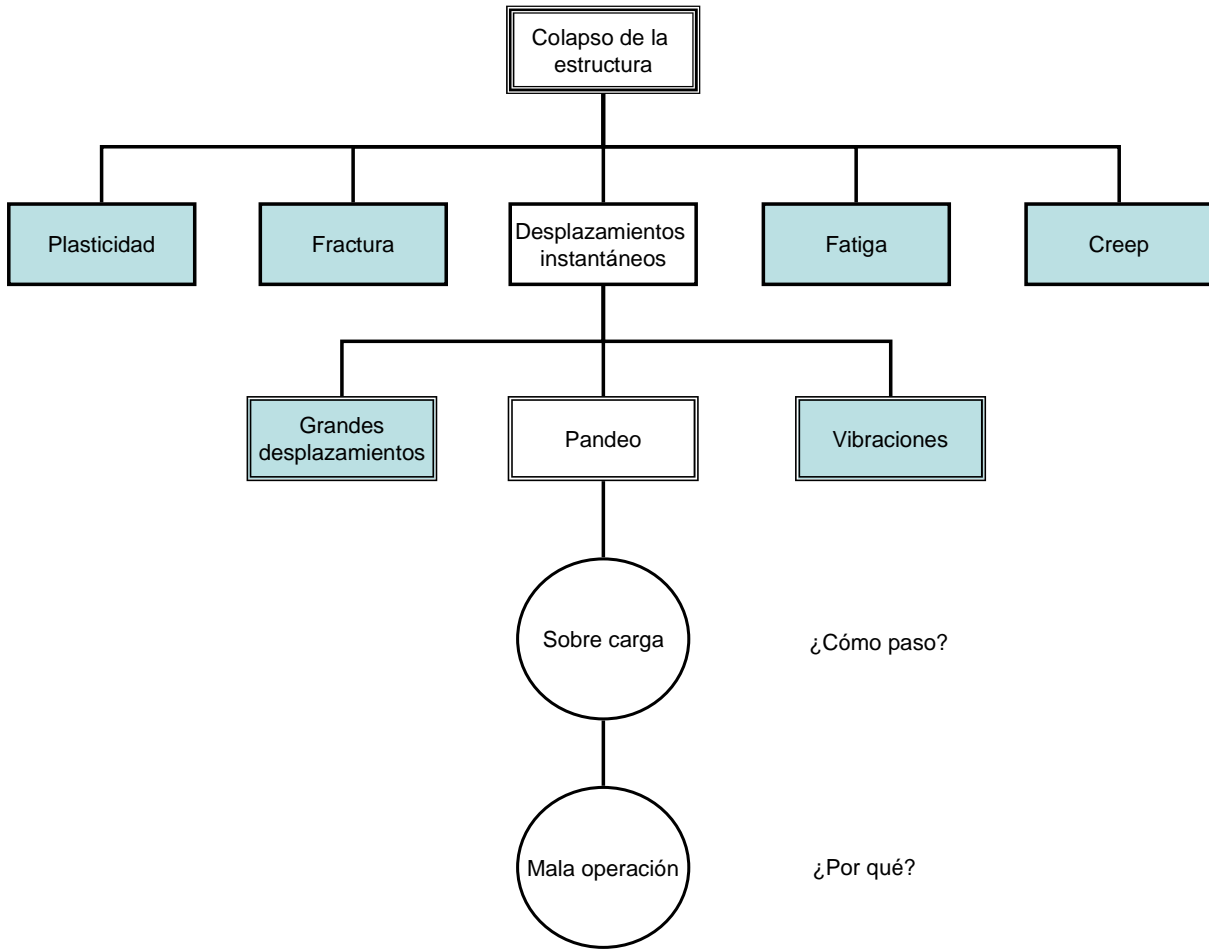


Figura 30. Árbol lógico del colapso estructural del equipo de perforación FV-405.

**Bibliografía.**

ASM, 1986, Metals handbook, ninth edition, Vol 11.

API 581 “Inspección basada en riesgo” Ed.2001.

ASTM A36/A 36M-05. “Standard specification for carbon structural steel”.

AWS D1.1, Procedimiento 1872/PO-01, “Inspección mediante ensayos no destructivos a elementos estructurales y soldados de mástiles de perforación”.

Grandt, Alten F, Fundamentals of structural integrity : damage tolerant design and nondestructive evaluation, Hoboken, New Jersey.

Murillo, William L. Modelo de confiabilidad basado en el análisis de fallas. ACIEM, Colombia.

Norton R., 1999, Diseño de máquinas, Prentice Hall, México.

Rajan, Subramaniam D, Introduction to structural analysis & design, New York : J. Wiley.

Shigley E, Mischke R., 2002, Diseño en Ingeniería Mecánica, Mc Graw Hill, México.

Timoshenko, Stephen, Mecánica de materiales, Grupo editorial Iberoamérica, México.

Timoshenko, Stephen, Teoría de las estructuras, Urmo, Bilbao.

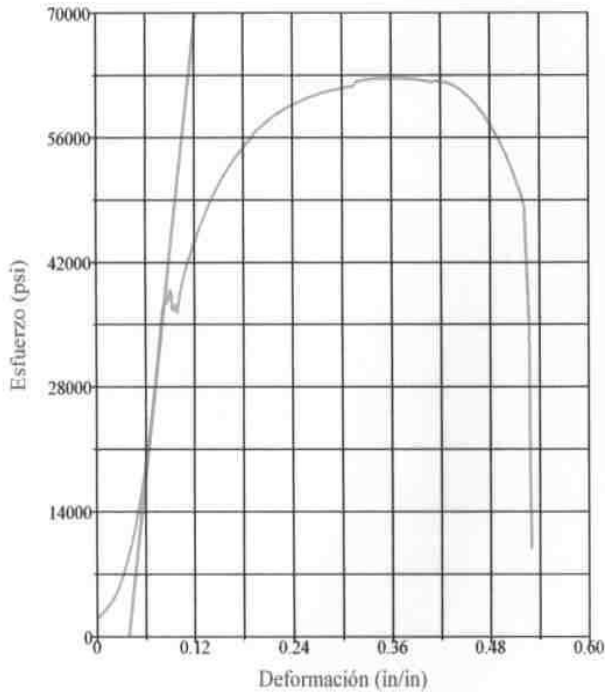
Programa de análisis de elemento finito: COSMOS/DesignSTAR 2007

# ANEXOS

## Anexo A

Resultados de las pruebas de tracción realizadas a las muestras.

### MUESTRA ANALIZADA M1-1



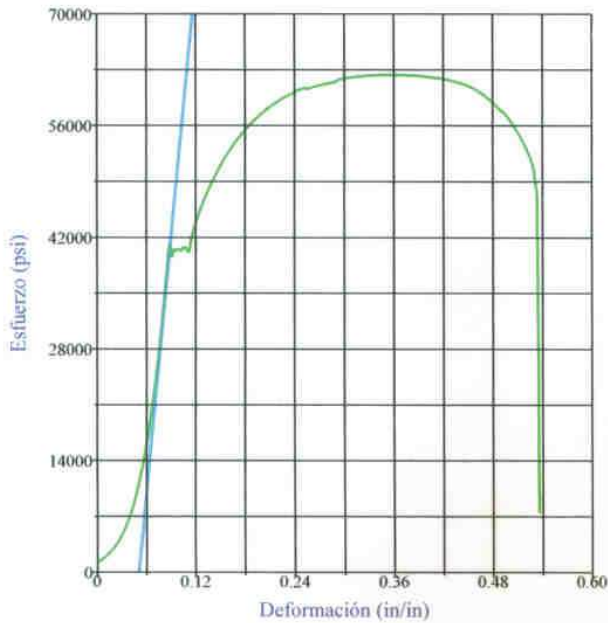
#### Resultados del ensayo

Módulo de Young:	849312 psi
Longitud de galga de la probeta:	2.0000 in
Anchura:	0.5050 in
Espesor:	0.4240 in
Área:	0.2141 in <sup>2</sup>
Distancia entre marcas previa al ensayo:	2.005 in
Distancia entre marcas posterior al ensayo:	2.715 in
Alargamiento total:	35 %
Carga en desplazamiento:	3626 kg
Carga en desplazamiento#2:	7995 lbf
Esfuerzo en desplazamiento:	37340 psi
Esfuerzo en desplazamiento#2:	257 MPa
Punto máximo Carga:	13431 lbf
Punto máximo Carga#2:	6092 kg
Resistencia a la tracción:	62732 psi
Resistencia a la tracción#2:	433 MPa

#### Resumen del ensayo

Contador: 2027  
 Tiempo transcurrido: 00:02:40  
 Nombre del procedimiento: EISA4-RECTANGULARES-METAL  
 Fecha de inicio: 11/21/2007  
 Hora de inicio: 12:14:53 PM  
 Fecha de final: 11/21/2007  
 Hora de final: 12:17:33 PM  
 Estación de trabajo: INFRA  
 Probado por: OPERADORES  
 Informe No.: 439-07  
 Cliente: Instituto Mexicano Del Petroleo 439-0  
 Referencia:: Carta 13-10-2007  
 Material: A-36 O A-55  
 Muestra: M1-1  
 Signatario Autorizado: Antonio Hernandez *Hernandez*  
 Representante Autorizado: Victor Montoya *Montoya*

MUESTRA ANALIZADA M1-2



**Resultados del ensayo**

Módulo de Young:	1070899 psi
Longitud de galga de la probeta:	2.0000 in
Anchura:	0.5060 in
Espesor:	0.4310 in
Área:	0.2181 in <sup>2</sup>
Distancia entre marcas previa al ensayo:	1.995 in
Distancia entre marcas posterior al ensayo:	2.737 in
Alargamiento total:	37 %
Carga en desplazamiento:	4026 kg
Carga en desplazamiento#2:	8875 lbf
Esfuerzo en desplazamiento:	40692 psi
Esfuerzo en desplazamiento#2:	281 MPa
Punto máximo Carga:	13615 lbf
Punto máximo Carga#2:	6176 kg
Resistencia a la tracción:	62426 psi
Resistencia a la tracción#2:	430 MPa

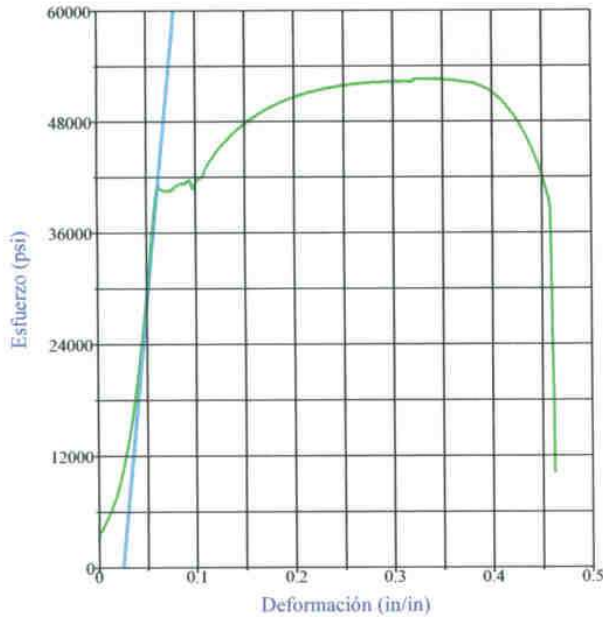
**Resumen del ensayo**

Contador: 2028  
 Tiempo transcurrido: 00:02:24  
 Nombre del procedimiento: EISA4-RECTANGULARES-METAL  
 Fecha de inicio: 11/21/2007  
 Hora de inicio: 12:22:17 PM  
 Fecha de final: 11/21/2007  
 Hora de final: 12:24:41 PM  
 Estación de trabajo: INFRA  
 Probado por: OPERADORES  
 Informe No.: 439-07  
 Cliente: Instituto Mexicano Del Petroleo 439-0  
 Referencia: Carta 13-10-2007  
 Material: A-36 O A-55  
 Muestra: M1-2  
 Signatario Autorizado: Antonio Hernandez  
 Representante Autorizado: Victor Montoya

*Antonio Hernandez*  
 #1



MUESTRA ANALIZADA M2-1



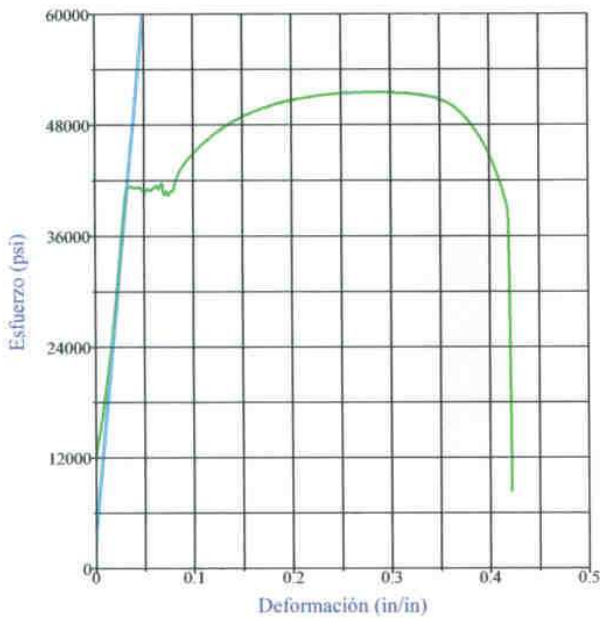
**Resultados del ensayo**

Módulo de Young:	1107687 psi
Longitud de galga de la probeta:	2.0000 in
Anchura:	0.5030 in
Espesor:	0.1940 in
Área:	0.0976 in <sup>2</sup>
Distancia entre marcas previa al ensayo:	1.997 in
Distancia entre marcas posterior al ensayo:	2.715 in
Alargamiento total:	36 %
Carga en desplazamiento:	1820 kg
Carga en desplazamiento#2:	4012 lbf
Esfuerzo en desplazamiento:	41105 psi
Esfuerzo en desplazamiento#2:	283 MPa
Punto máximo Carga:	5139 lbf
Punto máximo Carga#2:	2331 kg
Resistencia a la tracción:	52654 psi
Resistencia a la tracción#2:	363 MPa

**Resumen del ensayo**

Contador: 2029  
 Tiempo transcurrido: 00:01:59  
 Nombre del procedimiento: EISA4-RECTANGULARES-METAL  
 Fecha de inicio: 11/21/2007  
 Hora de inicio: 12:34:32 PM  
 Fecha de final: 11/21/2007  
 Hora de final: 12:36:31 PM  
 Estación de trabajo: INFRA  
 Probado por: OPERADORES  
 Informe No.: 439-07  
 Cliente: Instituto Mexicano Del Petroleo 439-0  
 Referencia:: Carta 13-10-2007  
 Material: A-36 O A-55  
 Muestra: M2-1  
 Signatario Autorizado: Antonio Hernandez *Hernandez*  
 Representante Autorizado: Victor Montoya *Montoya*

MUESTRA ANALIZADA M2-2



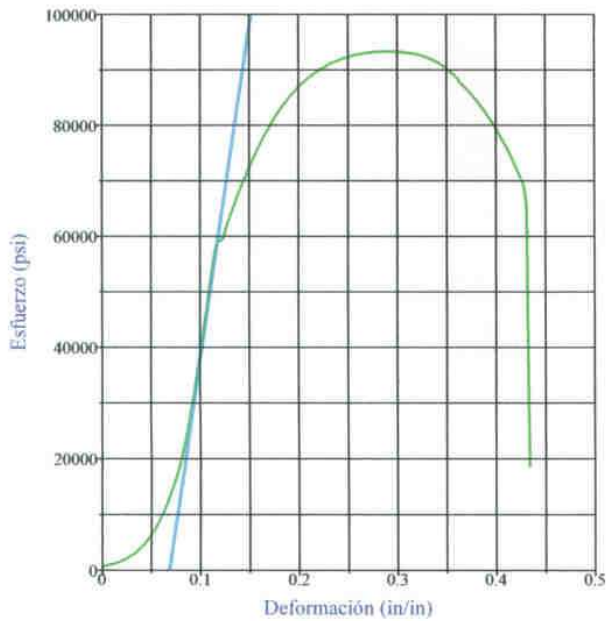
Resultados del ensayo

Módulo de Young:	1147998 psi
Longitud de galga de la probeta:	2.0000 in
Anchura:	0.5050 in
Espesor:	0.1960 in
Área:	0.0990 in <sup>2</sup>
Distancia entre marcas previa al ensayo:	1.999 in
Distancia entre marcas posterior al ensayo:	2.706 in
Alargamiento total:	35 %
Carga en desplazamiento:	1853 kg
Carga en desplazamiento#2:	4086 lbf
Esfuerzo en desplazamiento:	41274 psi
Esfuerzo en desplazamiento#2:	285 MPa
Punto máximo Carga:	5107 lbf
Punto máximo Carga#2:	2316 kg
Resistencia a la tracción:	51586 psi
Resistencia a la tracción#2:	356 MPa

Resumen del ensayo

Contador: 2030  
 Tiempo transcurrido: 00:01:53  
 Nombre del procedimiento: EISA4-RECTANGULARES-METAL  
 Fecha de inicio: 11/21/2007  
 Hora de inicio: 12:39:15 PM  
 Fecha de final: 11/21/2007  
 Hora de final: 12:41:08 PM  
 Estación de trabajo: INFRA  
 Probado por: OPERADORES  
 Informe No.: 439-07  
 Cliente: Instituto Mexicano Del Petroleo 439-0  
 Referencia: Carta 13-10-2007  
 Material: A-36 O A-55  
 Muestra: M2-2  
 Signatario Autorizado: Antonio Hernandez  
 Representante Autorizado: Victor Montoya

MUESTRA ANALIZADA M3-1



**Resultados del ensayo**

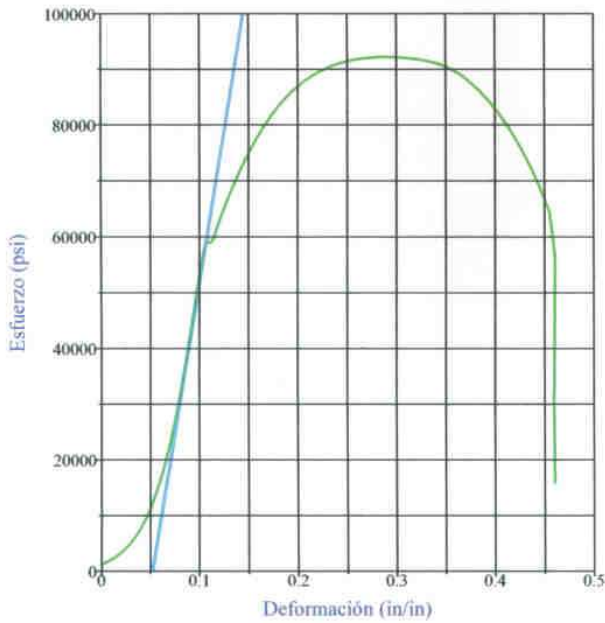
Módulo de Young:	1205114 psi
Longitud de galga de la probeta:	2.0000 in
Anchura:	0.5030 in
Espesor:	0.4310 in
Área:	0.2168 in <sup>2</sup>
Distancia entre marcas previa al ensayo:	2.001 in
Distancia entre marcas posterior al ensayo:	2.567 in
Alargamiento total:	28 %
Carga en desplazamiento:	5810 kg
Carga en desplazamiento#2:	12809 lbf
Esfuerzo en desplazamiento:	59082 psi
Esfuerzo en desplazamiento#2:	407 MPa
Punto máximo Carga:	20248 lbf
Punto máximo Carga#2:	9184 kg
Resistencia a la tracción:	93395 psi
Resistencia a la tracción#2:	644 MPa

**Resumen del ensayo**

Contador: 2031  
 Tiempo transcurrido: 00:02:04  
 Nombre del procedimiento: EISA4-RECTANGULARES-METAL  
 Fecha de inicio: 11/21/2007  
 Hora de inicio: 12:50:19 PM  
 Fecha de final: 11/21/2007  
 Hora de final: 12:52:23 PM  
 Estación de trabajo: INFRA  
 Probado por: OPERADORES  
 Informe No.: 439-07  
 Cliente: Instituto Mexicano Del Petroleo 439-0  
 Referencia: Carta 13-10-2007  
 Material: A-36 O A-55  
 Muestra: M3-1  
 Signatario Autorizado: Antonio Hernandez  
 Representante Autorizado: Victor Montoya

*Humánida*

MUESTRA ANALIZADA M3-2



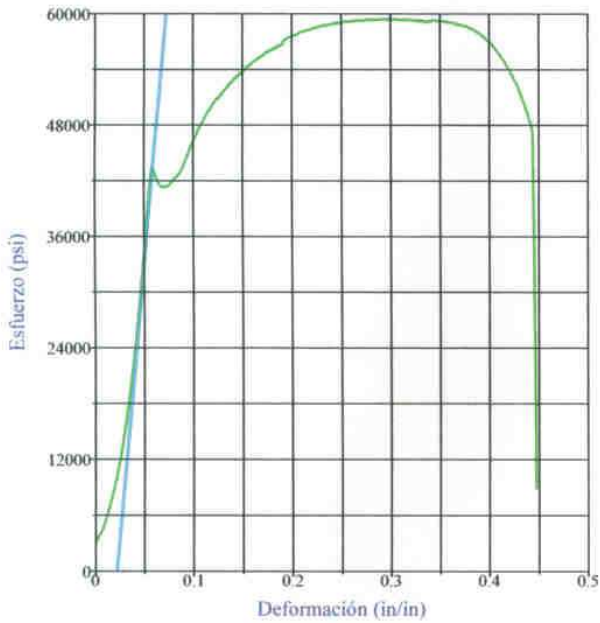
**Resultados del ensayo**

Módulo de Young:	1083559 psi
Longitud de galga de la probeta:	2.0000 in
Anchura:	0.5030 in
Espesor:	0.4280 in
Área:	0.2153 in <sup>2</sup>
Distancia entre marcas previa al ensayo:	1.995 in
Distancia entre marcas posterior al ensayo:	2.600 in
Alargamiento total:	30 %
Carga en desplazamiento:	5753 kg
Carga en desplazamiento#2:	12683 lbf
Esfuerzo en desplazamiento:	58909 psi
Esfuerzo en desplazamiento#2:	406 MPa
Punto máximo Carga:	19867 lbf
Punto máximo Carga#2:	9012 kg
Resistencia a la tracción:	92276 psi
Resistencia a la tracción#2:	636 MPa

**Resumen del ensayo**

Contador: 2032  
 Tiempo transcurrido: 00:02:10  
 Nombre del procedimiento: EISA4-RECTANGULARES-METAL  
 Fecha de inicio: 11/21/2007  
 Hora de inicio: 12:54:21 PM  
 Fecha de final: 11/21/2007  
 Hora de final: 12:56:31 PM  
 Estación de trabajo: INFRA  
 Probado por: OPERADORES  
 Informe No.: 439-07  
 Cliente: Instituto Mexicano Del Petroleo 439-0  
 Referencia: Carta 13-10-2007  
 Material: A-36 O A-55  
 Muestra: M3-2  
 Signatario Autorizado: Antonio Hernandez *[Signature]*  
 Representante Autorizado: Victor Montoya *[Signature]*

MUESTRA ANALIZADA M4-1



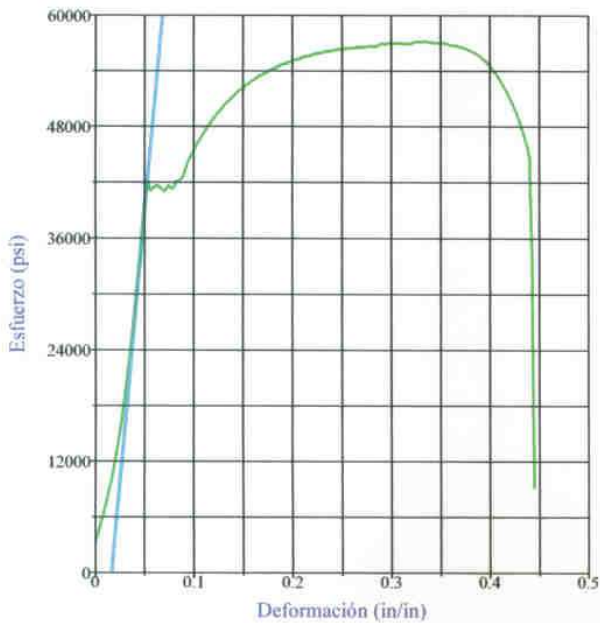
**Resultados del ensayo**

Módulo de Young:	1184122 psi
Longitud de galga de la probeta:	2.0000 in
Anchura:	0.5030 in
Espesor:	0.2030 in
Área:	0.1021 in <sup>2</sup>
Distancia entre marcas previa al ensayo:	2.001 in
Distancia entre marcas posterior al ensayo:	2.674 in
Alargamiento total:	34 %
Carga en desplazamiento:	2002 kg
Carga en desplazamiento#2:	4413 lbf
Esfuerzo en desplazamiento:	43221 psi
Esfuerzo en desplazamiento#2:	298 MPa
Punto máximo Carga:	6077 lbf
Punto máximo Carga#2:	2756 kg
Resistencia a la tracción:	59520 psi
Resistencia a la tracción#2:	410 MPa

**Resumen del ensayo**

Contador: 2033  
 Tiempo transcurrido: 00:02:07  
 Nombre del procedimiento: EISA4-RECTANGULARES-METAL  
 Fecha de inicio: 11/21/2007  
 Hora de inicio: 2:18:08 PM  
 Fecha de final: 11/21/2007  
 Hora de final: 2:20:15 PM  
 Estación de trabajo: INFRA  
 Probado por: OPERADORES  
 Informe No.: 439-07  
 Cliente: Instituto Mexicano Del Petroleo 439-0  
 Referencia:: Carta 13-10-2007  
 Material: A-36 O A-55  
 Muestra: M4-1  
 Signatario Autorizado: Antonio Hernandez  
 Representante Autorizado: Victor Montoya

MUESTRA ANALIZADA M4-2



**Resultados del ensayo**

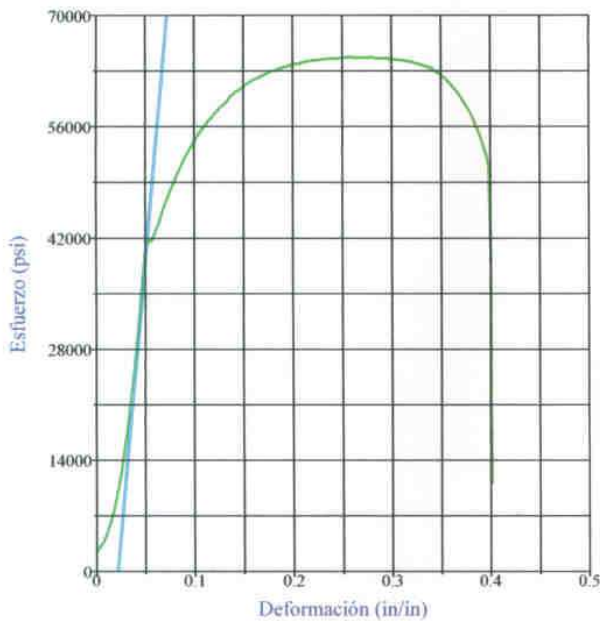
Módulo de Young:	1166940 psi
Longitud de galga de la probeta:	2.0000 in
Anchura:	0.5020 in
Espesor:	0.2190 in
Área:	0.1099 in <sup>2</sup>
Distancia entre marcas previa al ensayo:	1.999 in
Distancia entre marcas posterior al ensayo:	2.676 in
Alargamiento total:	34 %
Carga en desplazamiento:	2094 kg
Carga en desplazamiento#2:	4617 lbf
Esfuerzo en desplazamiento:	42013 psi
Esfuerzo en desplazamiento#2:	290 MPa
Punto máximo Carga:	6293 lbf
Punto máximo Carga#2:	2854 kg
Resistencia a la tracción:	57261 psi
Resistencia a la tracción#2:	395 MPa

**Resumen del ensayo**

Contador: 2034  
 Tiempo transcurrido: 00:01:43  
 Nombre del procedimiento: EISA4-RECTANGULARES-METAL  
 Fecha de inicio: 11/21/2007  
 Hora de inicio: 2:22:49 PM  
 Fecha de final: 11/21/2007  
 Hora de final: 2:24:32 PM  
 Estación de trabajo: INFRA  
 Probado por: OPERADORES  
 Informe No.: 439-07  
 Cliente: Instituto Mexicano Del Petroleo 439-0  
 Referencia:: Carta 13-10-2007  
 Material: A-36 O A-55  
 Muestra: M4-2  
 Signatario Autorizado: Antonio Hernandez *Hernandez*  
 Representante Autorizado: Victor Montoya *#*



MUESTRA ANALIZADA M5-1



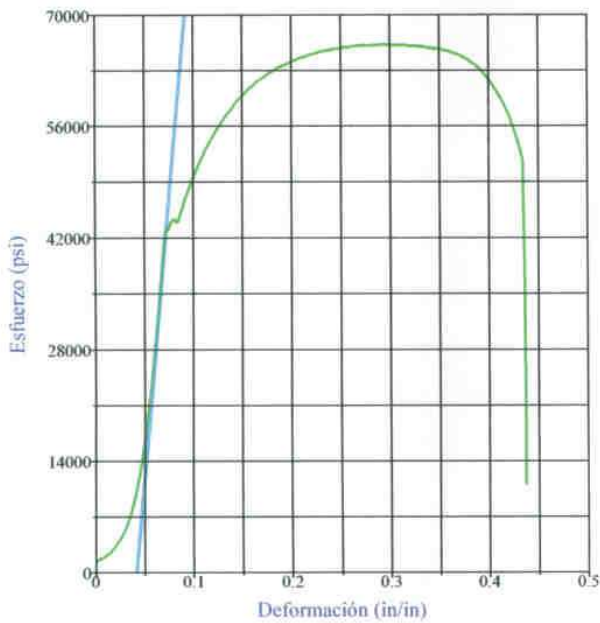
**Resultados del ensayo**

Módulo de Young:	1385693 psi
Longitud de galga de la probeta:	2.0000 in
Anchura:	0.5060 in
Espesor:	0.2010 in
Área:	0.1017 in <sup>2</sup>
Distancia entre marcas previa al ensayo:	2.004 in
Distancia entre marcas posterior al ensayo:	2.624 in
Alargamiento total:	31 %
Carga en desplazamiento:	1909 kg
Carga en desplazamiento#2:	4209 lbf
Esfuerzo en desplazamiento:	41389 psi
Esfuerzo en desplazamiento#2:	285 MPa
Punto máximo Carga:	6591 lbf
Punto máximo Carga#2:	2990 kg
Resistencia a la tracción:	64808 psi
Resistencia a la tracción#2:	447 MPa

**Resumen del ensayo**

Contador: 2035  
 Tiempo transcurrido: 00:01:57  
 Nombre del procedimiento: EISA4-RECTANGULARES-METAL  
 Fecha de inicio: 11/21/2007  
 Hora de inicio: 2:32:33 PM  
 Fecha de final: 11/21/2007  
 Hora de final: 2:34:30 PM  
 Estación de trabajo: INFRA  
 Probado por: OPERADORES  
 Informe No.: 439-07  
 Cliente: Instituto Mexicano Del Petroleo 439-0  
 Referencia:: Carta 13-10-2007  
 Material: A-36 O A-55  
 Muestra: M5-1  
 Signatario Autorizado: Antonio Hernandez *[Signature]*  
 Representante Autorizado: Victor Montoya *[Signature]*

MUESTRA ANALIZADA M5-2



**Resultados del ensayo**

Módulo de Young:	1399319 psi
Longitud de galga de la probeta:	2.000 in
Anchura:	0.5070 in
Espesor:	0.1970 in
Área:	0.0999 in <sup>2</sup>
Distancia entre marcas previa al ensayo:	2.005 in
Distancia entre marcas posterior al ensayo:	2.627 in
Alargamiento total:	31 %
Carga en desplazamiento:	1949 kg
Carga en desplazamiento#2:	4297 lbf
Esfuerzo en desplazamiento:	43016 psi
Esfuerzo en desplazamiento#2:	297 MPa
Punto máximo Carga:	6627 lbf
Punto máximo Carga#2:	3006 kg
Resistencia a la tracción:	66336 psi
Resistencia a la tracción#2:	457 MPa

**Resumen del ensayo**

Contador: 2036  
 Tiempo transcurrido: 00:01:55  
 Nombre del procedimiento: EISA4-RECTANGULARES-METAL  
 Fecha de inicio: 11/21/2007  
 Hora de inicio: 2:36:46 PM  
 Fecha de final: 11/21/2007  
 Hora de final: 2:38:41 PM  
 Estación de trabajo: INFRA  
 Probado por: OPERADORES  
 Informe No.: 439-07  
 Cliente: Instituto Mexicano Del Petroleo 439-0  
 Referencia: Carta 13-10-2007  
 Material: A-36 O A-55  
 Muestra: M5-2  
 Signatario Autorizado: Antonio Hernandez *Antonio Hernandez*  
 Representante Autorizado: Victor Montoya *Victor Montoya*

## Anexo B

Procedimiento que empleé para realizar los análisis numéricos:

- a) Importación del modelo virtual.
  - b) Definición del tipo de estudio a realizar.
  - c) Establecimiento de las condiciones de contacto entre los elementos y grados de libertad.
  - d) Establecimiento del tipo de material para el análisis.
  - e) Discretización de los elementos.
  - f) Aplicación de condiciones de carga.
  - g) El software soluciona el problema bajo las condiciones de frontera planteadas.
  - h) Graficación de los resultados obtenidos.
- a) Importación del modelo virtual. El modelo virtual, que generé en un programa CAD es importado al programa FEA (Finite Element Analysis) y depurado de errores en los elementos, interferencias, separaciones, etc. (figuras 1 y 2)

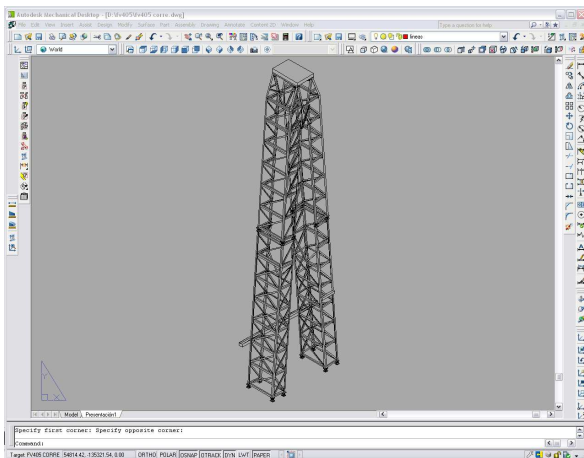


Figura 1. Modelo virtual en el programa CAD.

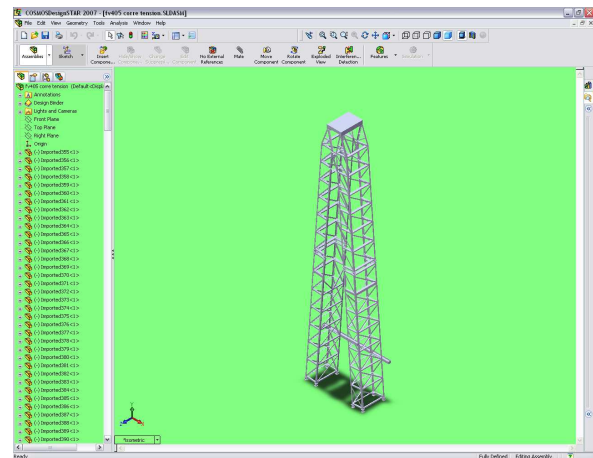


Figura 2. Modelo virtual en el programa FEA.

- b) Definición del tipo de estudio a realizar. Una vez depurados los errores geométricos en el sólido, se selecciona el tipo de análisis a realizar (figura 3).

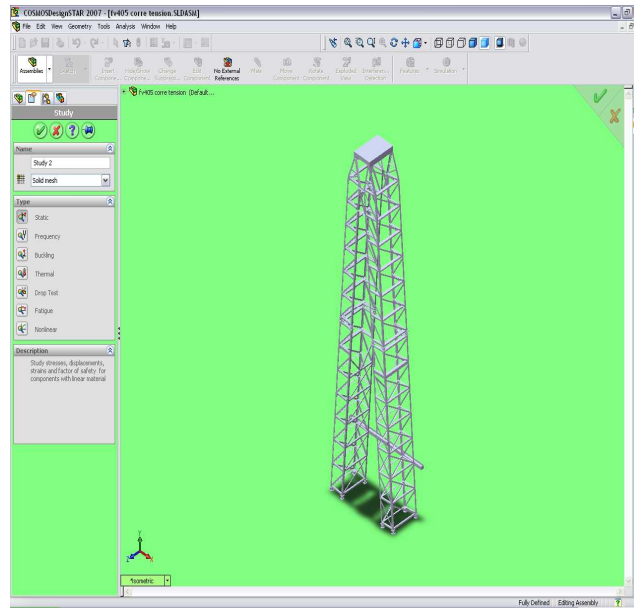


Figura 3. Selección del estudio.

- c) Establecimiento de las condiciones de contacto entre los elementos y grados de libertad. Con base a un análisis detallado de la interacción entre los elementos, se determinan los tipos de condiciones que tienen: contactos rígidos, articulaciones, etc. (figura 4).

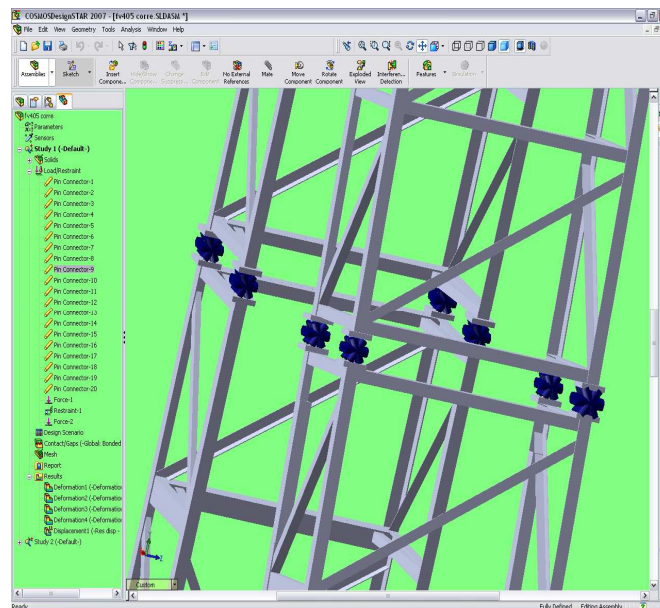


Figura 4. Condición de contacto: Uniones pernadas (pin).

- d) Establecimiento del tipo de material para el análisis. Con base en las pruebas realizadas, se conocen las propiedades mecánicas de los materiales, pero siempre es recomendable trabajar con los datos genéricos, ya que el material siempre presentará valores superiores (figuras 5 y 6).

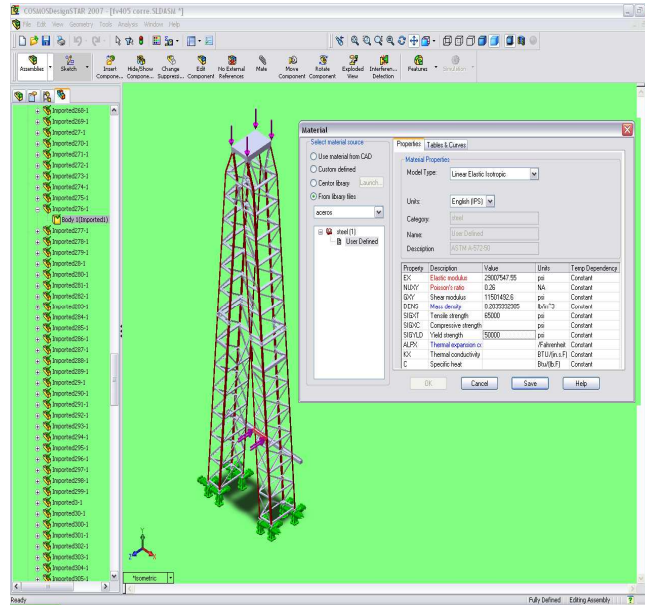


Figura 5. Material para las verticales (en rojo): ASTM A-572-50

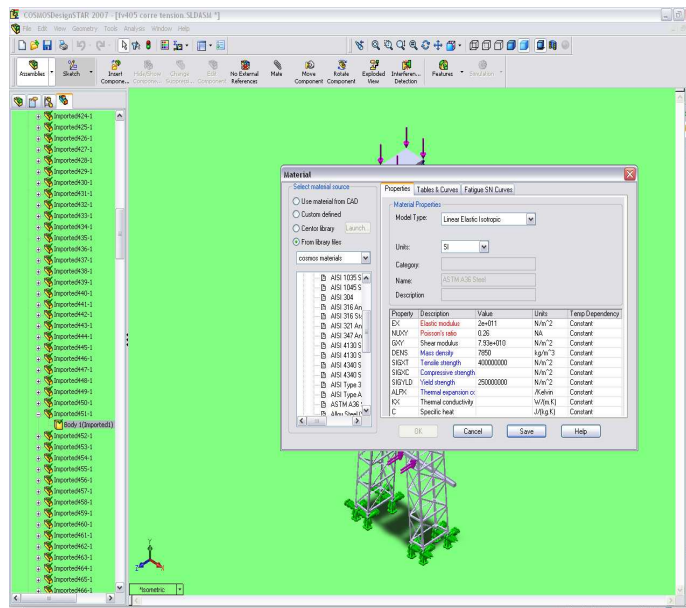


Figura 6. Material para los elementos restantes: ASTM A36.



- e) Discretización de los elementos. Se determinan las dimensiones óptimas de los elementos discretos y se procede a generarlos en el modelo virtual (figura 7).

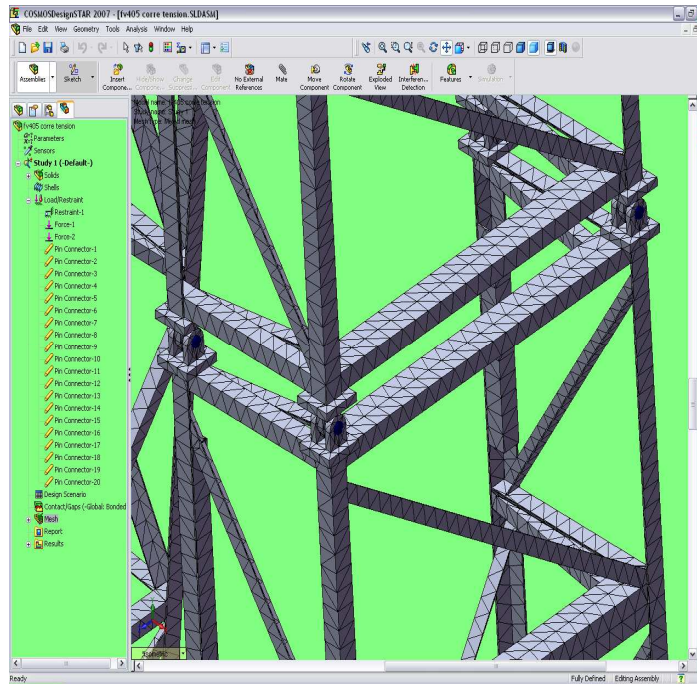


Figura 7. Discretización del modelo.

- f) Aplicación de las condiciones de carga. Se aplican al modelo las cargas a las que está sometido (figura 8).

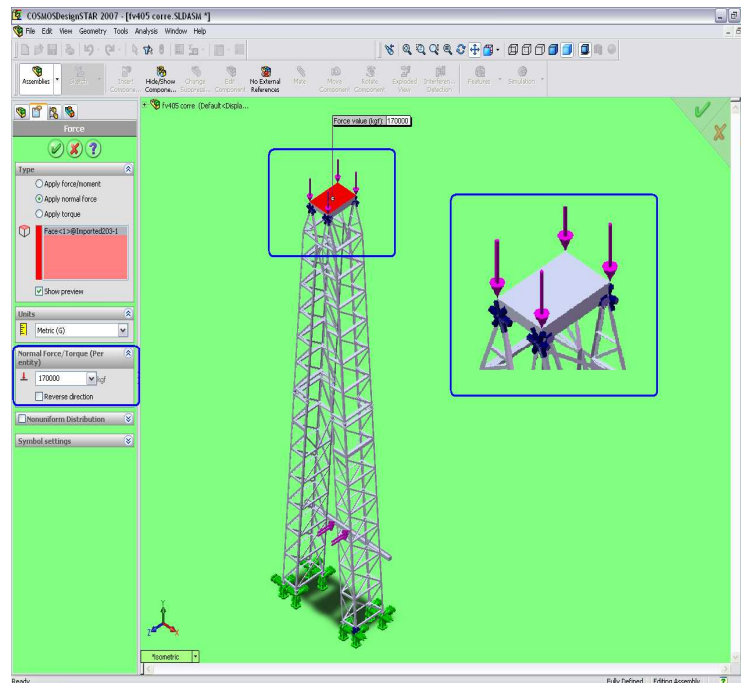


Figura 8. Aplicación de cargas.



- g) El software soluciona el problema bajo las condiciones de frontera planteadas. Ya planteadas las condiciones de carga, las restricciones, contactos y discretizados, se inicia el proceso de análisis numérico (figura 9).

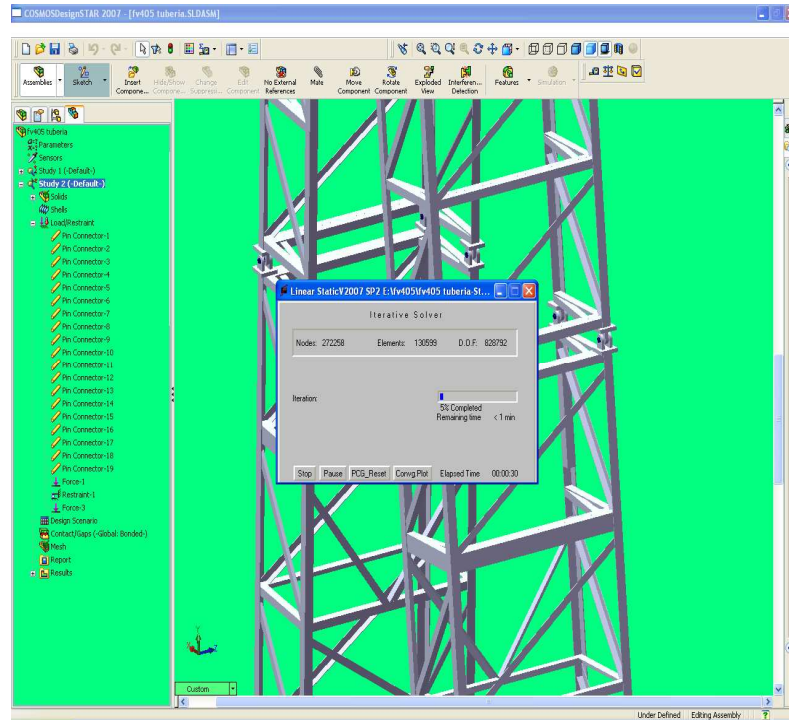


Figura 19. Solución de la simulación.

- h) Graficación de los resultados obtenidos. Una vez solucionado el modelo, se selecciona el estudio (tensión, pandeo, deformación, etc.), que se requiere para su interpretación (figura 10).





Figura 10. Selección del tipo de resultado.

## Anexo C

Portada y tabla de contenido del Informe técnico entregado al arquitecto Jorge Uribe Hernández, Encargado de Sección de Mantenimiento Estructural y avalado por el Jefe de Proyecto del Instituto Mexicano del Petróleo (figuras 1 y 2).



Figura 1. Portada del informe técnico.

 DIRECCIÓN DE EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN.	 GERENCIA DE PERFORACIÓN Y MANTENIMIENTO DE POZOS DIVISIÓN NORTE	FECHA: 06/11/2007	PAG: 1	DE: 56
		REVISIÓN: 00		
		ELABORÓ: ING. JORGE FLORES CASTILLO. <i>Jorge Flores</i>	COORDINACIÓN TÉCNICA: PEMEX: ARQ. JORGE URIBE HERNÁNDEZ. IMP: ING. JUAN ANTONIO CASTRO RODARTE. <i>Juan Antonio Castro</i>	
<b>INFORME TÉCNICO</b>				
<b>ESTUDIO CAUSA-RAÍZ DEL COLAPSO ESTRUCTURAL EN EL EQUIPO FV-405</b>				
<b>CONTENIDO</b>				
1. Antecedentes.				
2. Objetivo.				
3. Desarrollo.				
3.1. Levantamiento de información en campo.				
3.2. Planteamiento de hipótesis.				
3.3. Pruebas de tracción.				
3.4. Análisis químico.				
3.5. Metalografía.				
3.6. Caracterización de materiales.				
3.7. Análisis estructural mediante el método de elementos finitos.				
4. Análisis de resultados.				
4.1. Análisis químico, metalográfico y de pruebas de tracción.				
4.2. Análisis numérico de tensión.				
4.3 Análisis numérico de pandeo.				
5. Conclusiones y recomendaciones.				
6. Desglose del costo.				

CAUSA RAZ FV405.doc

Figura 1. Contenido del informe técnico.

## **Anexo D**

Personal de la Unidad Operativa de Perforación Reynosa, me proporcionó los planos del equipo de perforación que previamente había elaborado la empresa Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. de C.V. (COMIMSA) del equipo de perforación propiedad de PEMEX, identificado como PM-405. EL plano general del equipo se muestra en la figura 1. La sección derecha del mástil está en la figura 2, y la sección izquierda en la figura 3. En base a estos planos, elaboré el sólido en CAD mostrado en la figura 4.

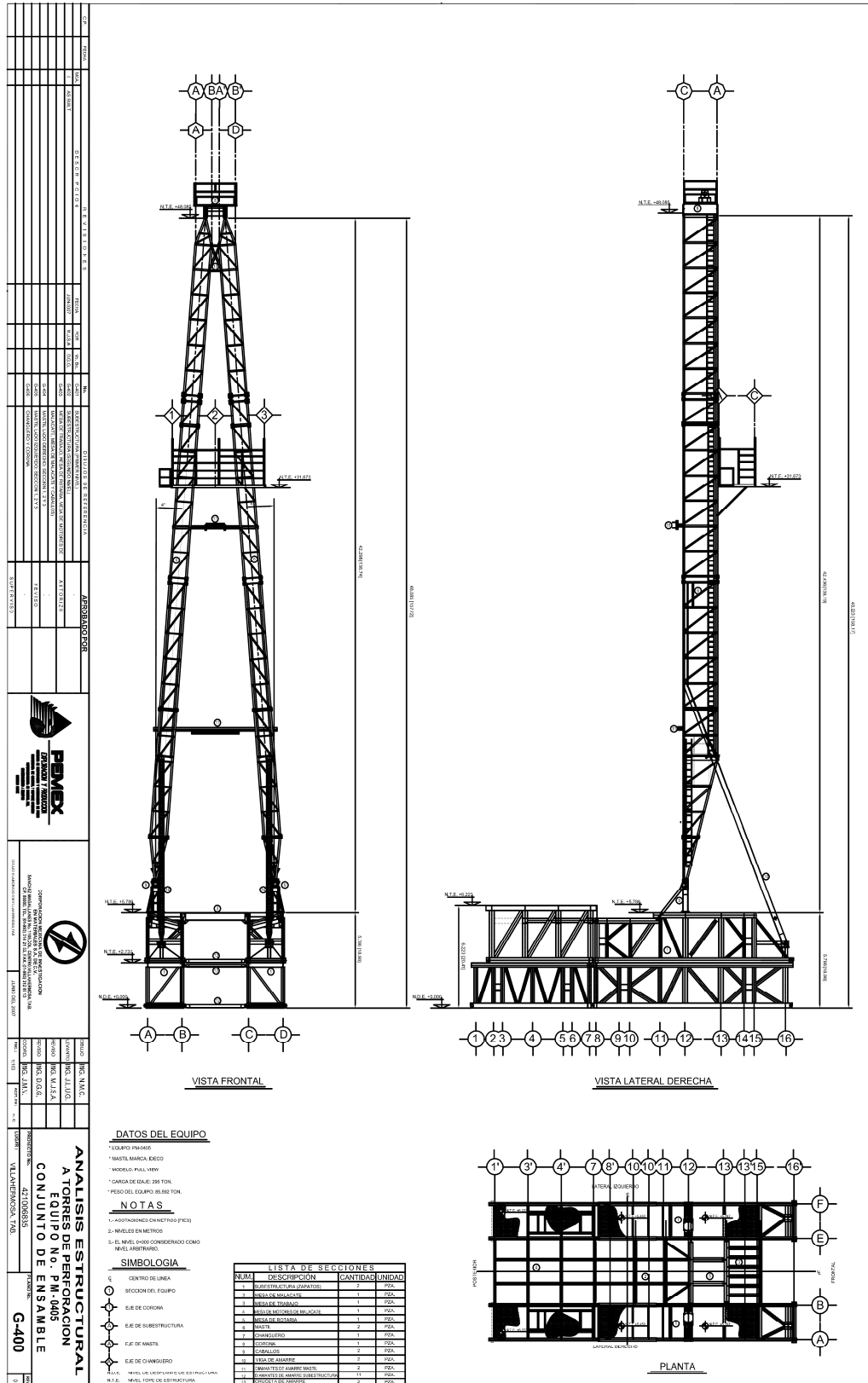


Figura 1. Plano general del equipo FV-405.

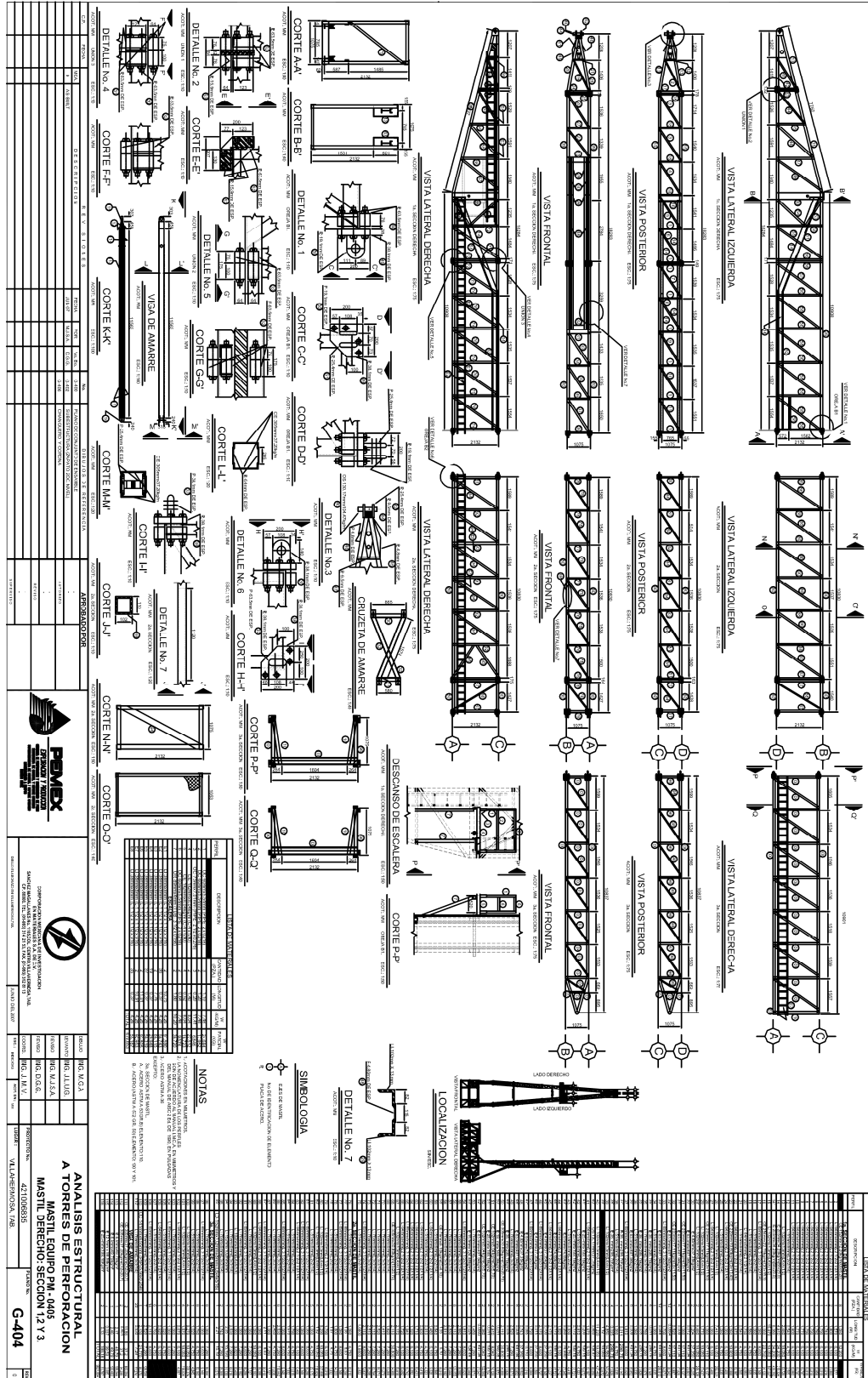


Figura 2. Sección derecha del mástil.

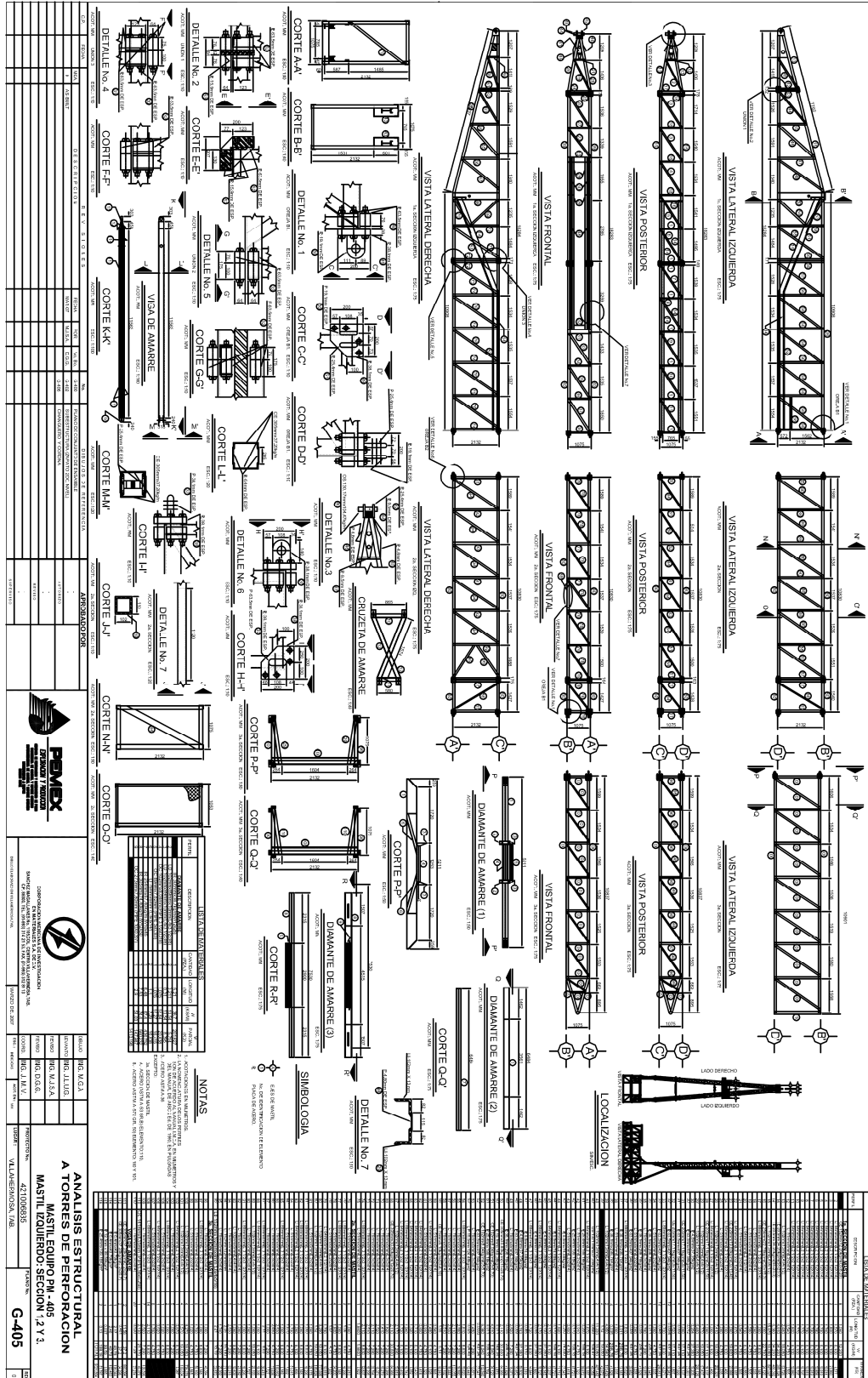


Figura 3. Sección izquierda del mástil.



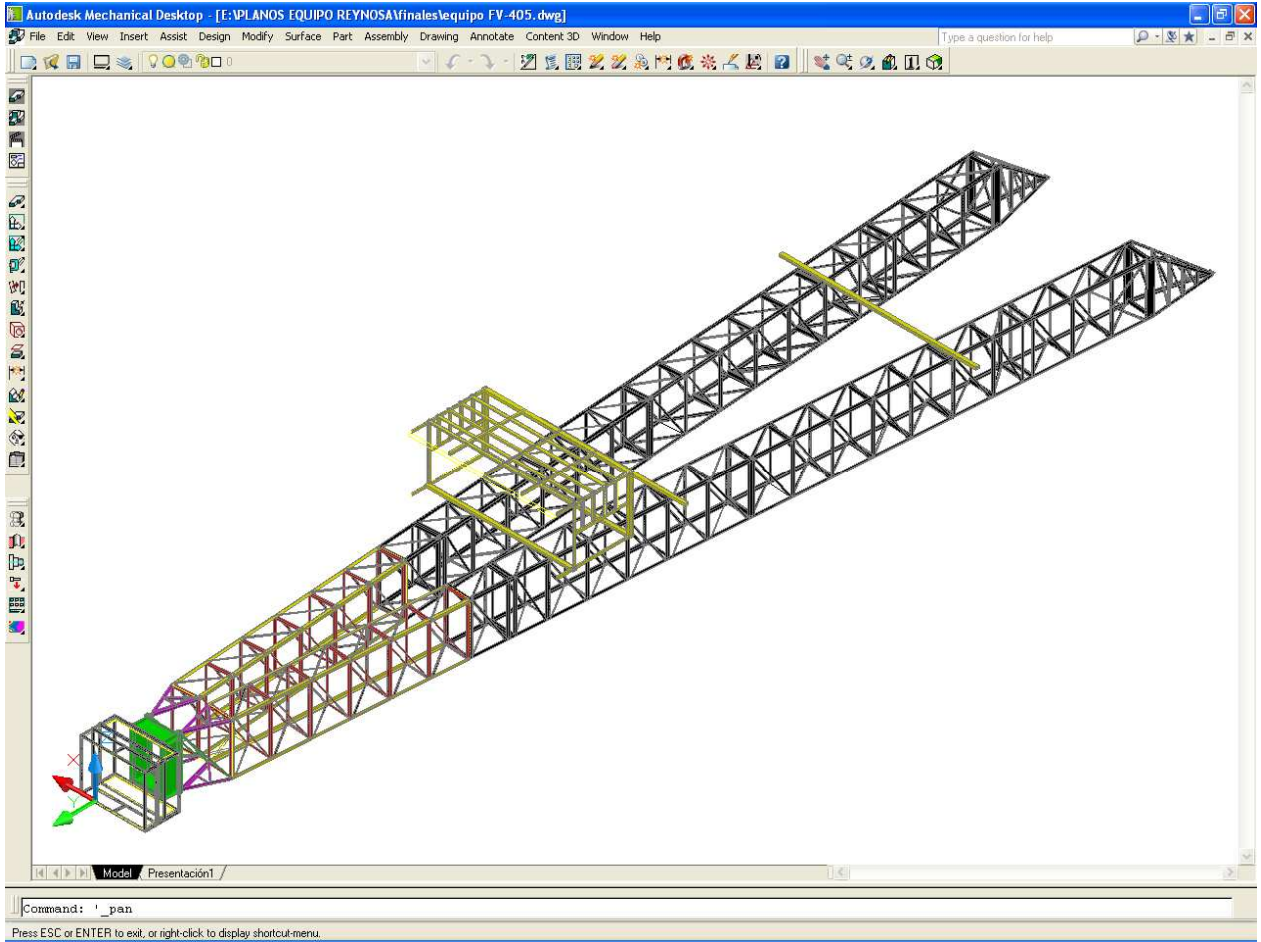


Figura 4. Sólido del mástil, dibujado en Mechanical Desktop.

## Anexo E

Las zonas que intervienen en el colapso son la segunda sección, tercera sección y crucetas, el resto de las secciones por presentar ligeros daños en sus elementos, no serán detallados, porque no los consideró representativos para el análisis,

Las características generales de la tercera sección del mástil son:

- Verticales de carga de perfil L 4 x 4 x ½ (LI 102 mm x 13 mm).
- Horizontales de perfil L 3 ½ x 3 ½ x ¼ (LI 89 mm x 6 mm).
- Diagonales de perfil L 3 x 3 x ¼ (LI 79 mm x 6 mm).
- Todas las uniones soldadas.
- Unida en la parte superior a la corona por un perno de norte a sur, y en la parte inferior a la segunda sección por cuatro pernos de este a oeste.
- Siete niveles.

La geometría del tejido se muestra en la figura 1.

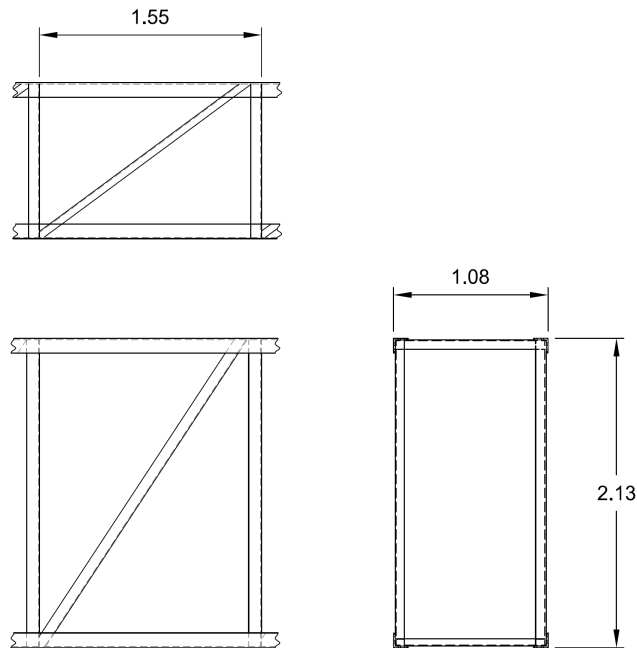


Figura 1. Tejido de la tercera sección (acotaciones es metros).

Las características generales de la segunda sección del mástil son:

- Verticales de carga de perfil L 4 x 4 x ½ (LI 102mm x13 mm).
- Horizontales de perfil L 2 ½ x 2 ½ x ¼ (LI 64 mm x 6 mm).
- Diagonales de perfil L 3 x 3 x ¼ (LI 79 mm x 6 mm).
- Atieizador de perfil L 3 x 3 x ¼ (LI 79 mm x 6 mm).
- Refuerzo de perfil L 3 ½ x 3 ½ x ¼ (LI 89 mm x 6 mm).
- Unida en la parte superior a la tercera sección por sección por cuatro pernos de este a oeste, y en la parte inferior a la primera sección por cuatro pernos de este a oeste.
- Cinco niveles en diagonal, un nivel en forma K y un nivel reforzado de forma diagonal.

El tejido de muestra en la figura 2.

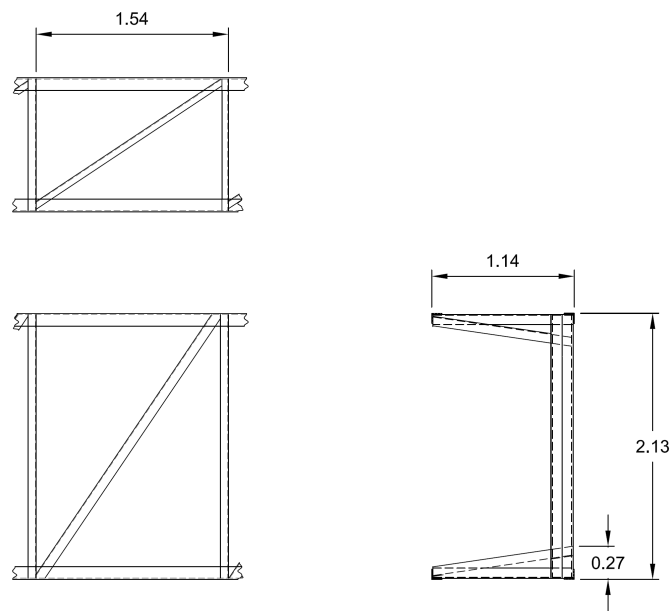


Figura 2. Tejido de la segunda sección (acotaciones es metros).

Las crucetas ubicadas a 37.6 m del nivel del piso de perforación, y que sirven como uniones secundarias de las piernas están fabricadas canal C 4x 2 x ¼ (C 102 mm x 50 mm x 6 mm). Su geometría se muestra en la figura 3.

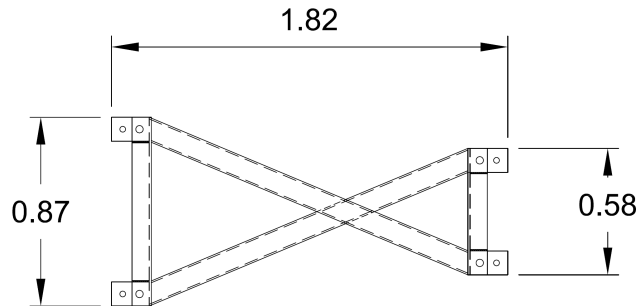


Figura 3. Crucetas de amarre.

La ubicación de las zonas colapsadas con respecto al nivel del suelo se muestran en la figura 4 y en la figura 5, se acotan con respecto al mástil.

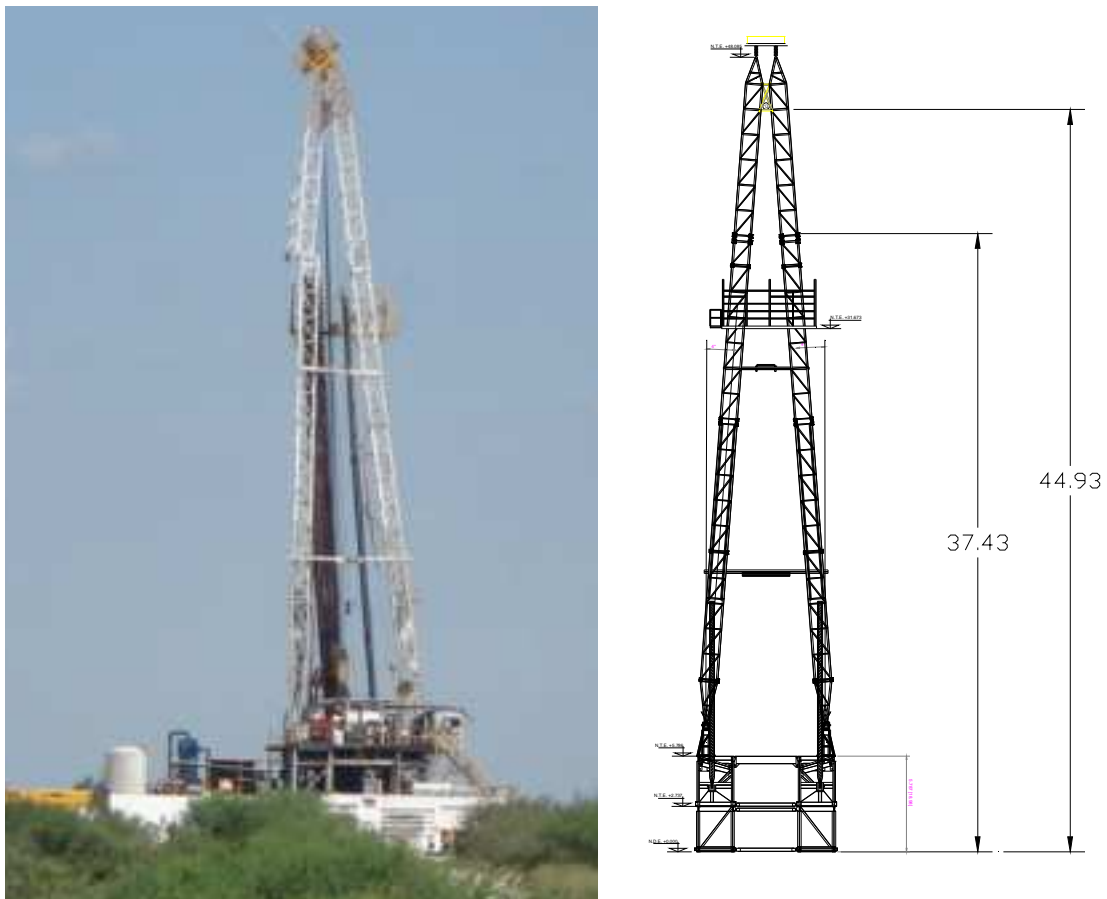


Figura 4 Ubicación de las zonas colapsadas (cotas en metros).

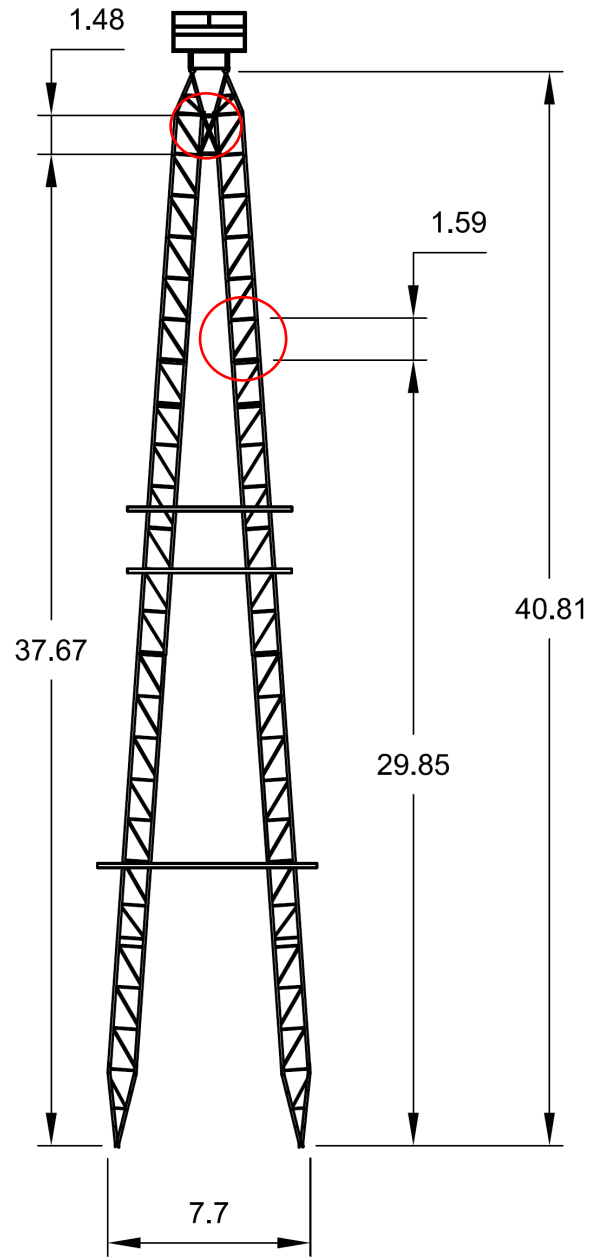


Figura 5. Ubicación de las zonas colapsadas con respecto al mástil (cotas en metros).