

GUIA DE OBSERVACIÓN PARA EXPOSICIÓN INDIVIDUAL Y/O POR EQUIPO

DOCENTE: Joel Francisco Pava Chipol		ASIGNATURA: Método del Elemento Finito		
DATOS GENERALES DEL PROCESO DE EVALUACIÓN				
PERIODO: Enero - Junio 2025		UNIDAD:		
TEMA:		FECHA DE PRESENTACIÓN:		
INSTRUCCIÓN				
Revisar los documentos o actividades que se solicitan y marque en los apartados "SI" cuando la evidencia a evaluar se cumple; en caso contrario marque "NO". En la columna "OBSERVACIONES" ocúpela cuando tenga que hacer comentarios referentes a lo observado.				
VALOR DEL REACTIVO	CARACTERÍSTICA A CUMPLIR (REACTIVO)	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SI	NO	
10%	Puntualidad: para iniciar y concluir la exposición.			
10%	Esquema de diapositiva. Colores y tamaño de letra apropiada. Sin saturar las diapositivas de texto. Portada: Nombre de la escuela (logotipo), Carrera, Asignatura, Profesor, Alumnos, Matricula, Grupo, Lugar y fecha de entrega.			
5%	Ortografía: (cero errores ortográficos).			
10%	Exposición. a. Utiliza las diapositivas como apoyo, no lectura total			
20%	b. Desarrollo del tema fundamentado y con una secuencia estructurada.			
10%	c. Organización de los integrantes del equipo.			
5%	d. Expresión no verbal (gestos, miradas y lenguaje corporal).			
30%	Preparación de la exposición. Dominio del tema. Habla con seguridad.			
100%	CALIFICACIÓN			
INTEGRANTES		EQUIPO: _____		

LISTA DE COTEJO DE INVESTIGACION DOCUMENTAL

DOCENTE: Joel Francisco Pava Chipol		ASIGNATURA: Método del Elemento Finito		
PERIODO: Enero - Junio 2025		UNIDAD:		
DATOS GENERALES DEL PROCESO DE EVALUACIÓN				
NOMBRE DEL ALUMNO O NUMERO DEL EQUIPO:				
TEMA:		FECHA DE ENTREGA:		
INSTRUCCIONES				
Revisar las actividades que se solicitan y marque en los apartados "SI" cuando la evidencia se cumple; en caso contrario marque "NO". En la columna "OBSERVACIONES" indicaciones que puedan ayudar al alumno a saber cuáles son las condiciones no cumplidas, si fuese necesario.				
VALOR DEL REACTIVO	CARACTERÍSTICA A CUMPLIR (REACTIVO)	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SI	NO	
10%	Presentación El trabajo cumple con los requisitos de: <ul style="list-style-type: none"> a. Buena presentación b. Mismo formato (letra arial 14 para títulos con negritas y contenido arial 12, texto justificado) c. Limpieza y orden d. Ortografía (El documento es redactado de forma correcta sin faltas de ortografía) 			
30%	Ideas relevantes: Presenta el contenido más relevante del tema abordado, se centra en la idea principal y compara información de referencias formales de mínimo tres autores.			
10%	Imágenes y gráficos de apoyo: Presenta imágenes, fotografías, tablas, gráficos de apoyo o fórmulas que respalden la información presentada.			
30%	Coherencia y cohesión: Maneja el lenguaje técnico apropiado y presenta en todo el documento coherencia y secuencia entre párrafo.			
10%	Referencias bibliográficas: De fuentes formales y citadas al final del documento de forma correcta.			
10%	Responsabilidad: Entregó el resumen en la fecha y hora señalada.			
100%	CALIFICACIÓN			

EXÁMENES



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE
SAN ANDRÉS TUXTLA



MAESTRO: Joel Francisco Pava Chipol

MATERIA: Método del Elemento Finito

ALUMNO: José Guadalupe Montiel Villaseca (221u0163)

Angel Abrajan González (221u0177)

Roberto Carlos Avilés González (221u0139)

CARRERA: Ingeniería Electromecánica

GRUPO: 602-B

PROYECTO

FECHA DE ENTREGA: 03/5/2024

Índice

Análisis de resistencia estructural de un sistema de torre-línea de transmisión, sometido a cargas de viento.....	4
Resumen	4
Antecedentes y Justificación:	5
Objetivo General:.....	10
Objetivos Específicos:	10
Alcances	10
Limitaciones.....	11
Materiales y Método.....	11
Productos comprometidos	15
CONCLUSION.....	30
Bibliografía.....	33

INDICE DE ILUSTRACION

Ilustración 1. La torre de transmisión: (a) la torre prototipo; (b) D = tipo de acero diferente; (c) sección diferente.....	6
Ilustración 2 modelado de la estructura	8
Ilustración 3. Esfuerzos de von Mises obtenidos en cada caso de estudio	9
Ilustración 4. densidad del material.....	17
Ilustración 5. estructural.....	18
Ilustración 6. propiedades isotropicas para el material.....	18
Ilustración 7 puntos para la creación del la figura	19
Ilustración 8 mallado.....	19
Ilustración 9	20
Ilustración 10 resultados de la deformacion aplicando cargas de viento en FX.....	20
Ilustración 11.....	21
Ilustración 12 propiedades del acero Q235.....	29
Ilustración 13 cálculo de presión de viento (Valdez, 2023).....	30

INDICE DE TABLA

Tabla 1. Propiedades mecánicas del material.	6
Tabla 2. Parámetros típicos para una antena.....	13

Análisis de resistencia estructural de un sistema de torre-línea de transmisión, sometido a cargas de viento

Resumen

Este estudio se enfoca en el análisis estructural de torres de transmisión de energía eléctrica sometidas a condiciones de viento extremas, tales como ráfagas intensas, tormentas severas y situaciones atmosféricas excepcionales. Las torres de transmisión son componentes esenciales en los sistemas de distribución de energía, y su falla puede tener consecuencias graves, tanto económicas como sociales. Por esta razón, resulta crucial comprender cómo se comportan estas estructuras ante eventos climáticos extremos y qué factores comprometen su estabilidad.

Para el análisis, se desarrolla un modelo tridimensional detallado de la torre, que incluye las propiedades mecánicas de los materiales utilizados (por ejemplo, acero galvanizado), así como las características geométricas específicas de cada elemento estructural. También se consideran aspectos importantes como las uniones empernadas y soldadas, y la configuración general del sistema estructural. El modelo se implementa mediante un software de análisis por elementos finitos (FEA), lo que permite simular de forma precisa el comportamiento estructural frente a diferentes condiciones de viento.

Las simulaciones consideran una variedad de escenarios de exposición al viento, con variaciones en su intensidad y dirección. Se analiza el rendimiento de la torre durante eventos extremos, prestando especial atención a las zonas donde se producen mayores deformaciones y concentraciones de esfuerzo.

El estudio identifica áreas críticas dentro de la estructura, como las uniones entre los brazos horizontales y el mástil central, que tienden a estar sometidas a mayores niveles de tensión. También se evalúa el desplazamiento general de la torre y se examina la posibilidad de fallas locales, como el pandeo en elementos esbeltos. Los resultados obtenidos permiten valorar la seguridad de la torre en condiciones

adversas y proponer mejoras en el diseño que aumenten su resistencia sin necesidad de incorporar refuerzos adicionales, contribuyendo así a una mayor durabilidad y fiabilidad de estas infraestructuras.

Antecedentes y Justificación:

Las torres de transmisión eléctrica están expuestas a condiciones climáticas extremas, como vientos fuertes y acumulaciones de hielo, que pueden comprometer su integridad estructural. Además, la fatiga inducida por el viento puede reducir la capacidad de carga de estas torres, aumentando su fragilidad frente a desastres combinados de hielo y viento. Para evaluar de manera integral la capacidad de las torres de transmisión para resistir estos desastres extremos, es esencial considerar el daño por fatiga inducido por el viento en el análisis de probabilidad de falla.

Este estudio se centra en un sistema de torre-línea de transmisión en la provincia de Hunan, China, y propone un marco de evaluación de probabilidad de falla que incorpora el daño por fatiga inducido por el viento bajo la influencia combinada de hielo y viento. (Jia-Xiang Li, 2024)

La investigación utiliza datos meteorológicos históricos de tres ciudades en Hunan para establecer un modelo de probabilidad conjunta de velocidad del viento y dirección del viento, considerando su correlación mediante la función cópula. A partir de este modelo, se calcula el daño por fatiga inducido por el viento en las torres de transmisión utilizando la teoría de daño lineal de Miner y la curva S-N. Posteriormente, se calcula la fragilidad de la torre bajo la carga combinada de hielo y viento para diferentes años de servicio. Finalmente, se combina la función de fragilidad estructural con el modelo de distribución de probabilidad conjunta de grosor de hielo y velocidad del viento para calcular la probabilidad de colapso de la torre de transmisión bajo la acción de desastres de hielo y viento.

Los resultados indican que la influencia del daño por fatiga inducido por el viento no puede ser ignorada cuando las torres de transmisión enfrentan desastres de hielo y viento. Con el aumento del tiempo de servicio, la capacidad de las torres de

transmisión para resistir desastres de hielo y viento disminuye gradualmente, y la probabilidad de falla también aumenta bajo condiciones extremas de hielo y viento. (Jia-Xiang Li, 2024)

Tabla 1. Propiedades mecánicas del material.

Tipo	Densidad (kg/m ³)	Módulo de elasticidad (MPa)	Coefficiente de Poisson	Límite de elasticidad (MPa)
Q235	7850	2.06×10^5	0.31	235

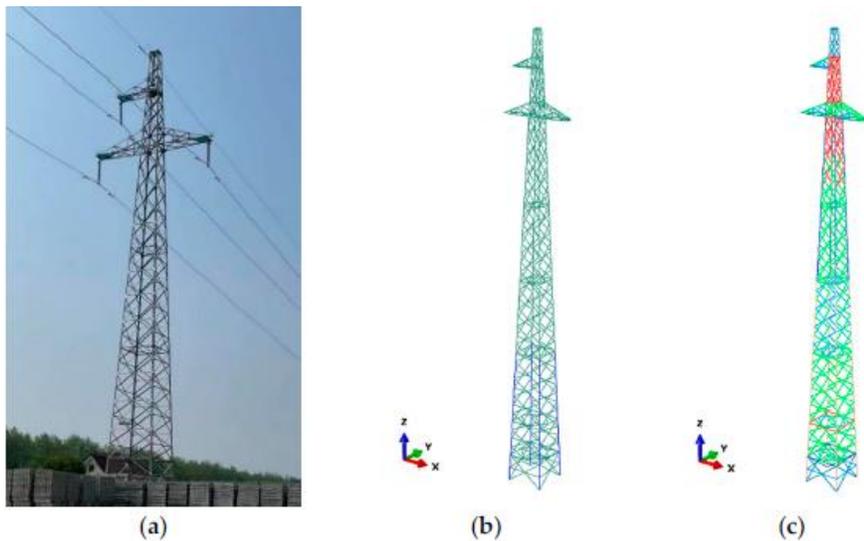


Ilustración 1. La torre de transmisión: (a) la torre prototipo; (b) D = tipo de acero diferente; (c) sección diferente.

La ilustración 1, b muestra los dos tipos de acero utilizados en la construcción de la torre de transmisión. Los componentes de color verde están hechos de acero tipo Q235, cuyas propiedades mecánicas son las mismas que se indican en la Tabla 1, mientras que los componentes azules están fabricados con acero Q345, cuyas propiedades mecánicas. Al comparar las propiedades mecánicas de los dos tipos de acero, se puede observar que la única diferencia es el límite elástico. (Jia-Xiang Li, 2024)

c, los componentes con diferentes dimensiones de sección están etiquetados con distintos colores. Se puede ver que se utilizan nueve tipos de componentes de acero

angular en forma de “L” para construir la torre de transmisión, y la sección más grande de estos componentes tiene una longitud de 80 mm y un espesor de 6 mm.

En la torre de transmisión, el componente vertical en la mitad inferior de la altura tiene dimensiones seccionales de 75 mm × 5 mm y corresponde exactamente al componente principal. Con base en estas dimensiones geométricas de los componentes y las propiedades mecánicas del material, se construye un modelo de elementos finitos de la torre de transmisión en la plataforma Abaqus. Los componentes se simulan utilizando un elemento de viga de Euler de dos nodos. La base de la torre está completamente restringida, y para simplificar, la interacción suelo-pilote no se considera en este estudio. (Jia-Xiang Li, 2024)

Por otro lado, las torres de transmisión eléctrica son estructuras críticas en la infraestructura energética, pero son vulnerables a cargas de viento, especialmente en regiones propensas a fenómenos meteorológicos extremos. Investigaciones previas han demostrado que la dirección del viento influye significativamente en la respuesta estructural de estas torres. Por ejemplo, estudios sobre la fragilidad de torres de transmisión sometidas a vientos descendentes han revelado que la dirección del viento afecta la probabilidad de falla de las torres. Además, investigaciones sobre la evaluación de la fiabilidad de sistemas torre-línea de transmisión bajo eventos de tifón han integrado el análisis de fragilidad estructural con el efecto de la dirección del viento, destacando la importancia de considerar la correlación entre la velocidad y la dirección del viento en la evaluación de riesgos. (Chao Zhu a b, 2024)

Estos estudios anteriores proporcionaron una base sólida para el desarrollo de métodos avanzados de evaluación de la fragilidad estructural de torres de transmisión, considerando la variabilidad direccional del viento. El artículo de Zhu et al. (2024) amplía estos enfoques al proponer un modelo probabilístico que incorpora la variabilidad direccional del viento, la resistencia estructural de las torres y las condiciones de carga, permitiendo una evaluación más precisa de la probabilidad de falla de las torres de transmisión bajo vientos fuertes. (Chao Zhu a b, 2024)

El artículo titulado “Análisis estructural-modal de una torre de transmisión eléctrica usando Sistema Viento 2.0, PRODISIS y ANSYS”, elaborado por un equipo de investigadores, analiza cómo responde una torre de transmisión eléctrica ante fuerzas dinámicas como el viento. Para ello, se utilizaron tres herramientas especializadas: Sistema Viento 2.0 (para calcular cargas de viento), PRODISIS (para manejar datos estructurales) y ANSYS (para simular y analizar la estructura).

La investigación consistió en modelar digitalmente la torre, aplicar las cargas de viento obtenidas, y realizar un análisis modal para identificar sus frecuencias naturales y patrones de vibración. El objetivo fue anticipar posibles fallos estructurales y sugerir mejoras en el diseño.

Se espera que los resultados ayuden a prevenir resonancias peligrosas y garanticen mayor estabilidad en este tipo de infraestructuras, fundamentales para el sistema eléctrico. (Estephania Jazvi Casas-Del Ángela, 2024)

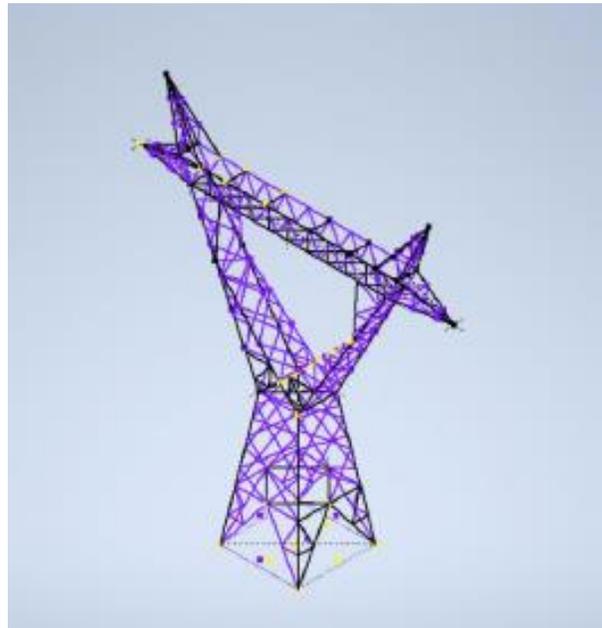


Ilustración 2 modelado de la estructura

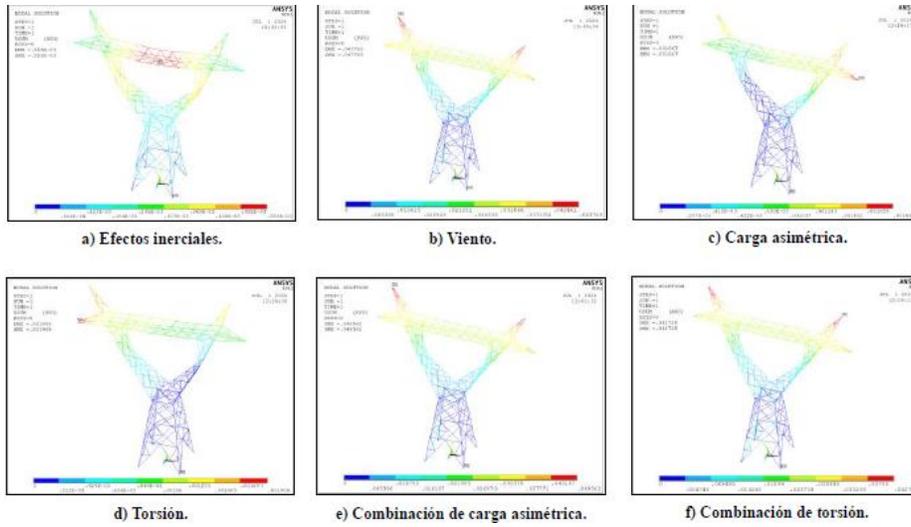


Ilustración 3. Esfuerzos de von Mises obtenidos en cada caso de estudio

Objetivo General:

Analizar el comportamiento estructural de las torres de transmisión de energía frente a cargas de viento extremas

Objetivos Específicos:

- Identificar las áreas más vulnerables de las torres de transmisión frente a las cargas de viento extremas.
- Evaluar la capacidad de las torres de transmisión para resistir condiciones de viento severas mediante simulaciones numéricas.
- Realizar un análisis detallado de las deformaciones y tensiones en la estructura de la torre bajo diversas condiciones de viento, incluyendo ráfagas y tormentas

Alcances

- **Modelado estructural detallado:**

Se desarrollará un modelo computacional detallado de una torre de transmisión, incorporando propiedades geométricas, materiales y condiciones

- **Simulación numérica de cargas de viento extremas:**

Se realizarán simulaciones bajo distintas condiciones de viento severo, incluyendo ráfagas, tormentas y cargas combinadas de hielo y viento, utilizando software de elementos finitos (FEM).

- **Análisis de vulnerabilidad estructural:**

Se identificarán las zonas críticas de la torre con mayores concentraciones de esfuerzo y deformación, lo que permitirá determinar las áreas más propensas a falla.

- **Consideración de variabilidad direccional del viento:**

Se integrará un modelo de probabilidad conjunta de velocidad y dirección del viento basado en funciones cópula, mejorando la precisión del análisis de riesgo estructural.

Limitaciones

- **Representatividad geográfica limitada:**

El estudio se enfoca en torres localizadas en la provincia de Hunan, China, por lo que sus resultados pueden no ser directamente extrapolables a otras regiones con condiciones meteorológicas, topográficas o estructurales distintas.

- **Simplificaciones en el modelo estructural:**

Aunque se busca un modelado detallado, se realizarán ciertas simplificaciones geométricas y de materiales, lo cual puede afectar la precisión en la predicción de fallas.

- **Dependencia de datos meteorológicos históricos:**

El análisis depende de datos climáticos pasados que, aunque estadísticamente significativos, no garantizan que representen futuros eventos extremos bajo un escenario de cambio climático.

Materiales y Método

1. Caracterización del sistema estructural

El análisis se realiza sobre una torre de transmisión eléctrica tipo celosía, fabricada principalmente con perfiles angulares de acero estructural. Se utilizan dos tipos de acero: Q235 y Q345, seleccionados por su desempeño mecánico confiable y uso común en infraestructura energética. El acero Q345, con un límite elástico más alto, se asigna a los elementos sometidos a mayores solicitaciones. Las conexiones entre los distintos componentes se realizan mediante pernos y soldaduras,

siguiendo los estándares de diseño estructural adoptados en China. (Jia-Xiang Li, 2024)

El modelo estructural corresponde a una torre prototipo instalada en la provincia de Hunan. Los perfiles de acero en forma de “L” utilizados en su ensamblaje presentan dimensiones que oscilan entre 50×5 mm y 80×6 mm. El elemento estructural más importante, ubicado en la parte inferior de la torre, tiene una sección de 75×5 mm.

2. Construcción del modelo computacional

Para llevar a cabo el análisis estructural, se crea un modelo en tres dimensiones utilizando el software Abaqus, basado en el método de elementos finitos. Los componentes de la torre se representan mediante elementos de viga tipo Euler-Bernoulli, adecuados para simular el comportamiento flexional y de compresión de miembros delgados.

Se asume que la base de la torre está completamente fija, lo que significa que no se permite ningún movimiento en esa zona. Para simplificar el modelo, no se incluye el efecto de interacción entre el suelo y la cimentación, ni se consideran cambios térmicos. (Chao Zhu a b, 2024)

3. Definición de las condiciones de viento

Las condiciones de viento se establecen a partir de datos climatológicos obtenidos de tres estaciones meteorológicas en Hunan. Se tiene en cuenta tanto la intensidad como la dirección del viento, y se aplica un modelo estadístico conjunto mediante funciones cópula que permiten representar la relación entre ambas variables. Se incluyen además escenarios extremos donde el viento actúa en conjunto con acumulación de hielo, simulando condiciones críticas que pueden ocurrir en la realidad. (Valdez, 2023)

4. Cálculo del daño por fatiga

El desgaste estructural acumulado por la acción continua del viento se evalúa utilizando la regla de daño acumulativo de Miner, en combinación con curvas S-N (esfuerzo vs. número de ciclos) que describen el comportamiento a fatiga de los materiales utilizados. Los cálculos se basan en series de datos históricos del viento, lo que permite representar cómo el material va perdiendo resistencia con el paso del tiempo debido a cargas repetitivas. (Valdez, 2023)

5. Evaluación de la fragilidad estructural

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones, se genera una función de fragilidad que permite determinar la probabilidad de falla de la torre ante distintas combinaciones de velocidad del viento, dirección y espesor del hielo. Esta curva se integra con modelos de amenazas naturales para calcular el riesgo de colapso estructural según el tiempo de operación de la torre. (Valdez, 2023)

Fórmula básica de presión de viento

$$P=0.613 \cdot V^2 \cdot C_d$$

Donde:

- **P** = presión del viento (N/m²)
- **V** = velocidad del viento (m/s)
- **C_d** = coeficiente de forma aerodinámica
- **0.613** = constante que incluye densidad del aire a nivel del mar (en kg/m³)

Tabla 2. Parámetros típicos para una antena

Parámetro	Valor típico
Altura de la antena	15 – 50 m
Diámetro del mástil	0.1 – 0.4 m (tubo metálico circular)
Velocidad del viento	30 – 50 m/s (según zona de diseño)
Coeficiente C _d	1.2 – 1.6 (para estructuras cilíndricas)

Ejemplo numérico

Supón una antena de 30 metros de alto, con un mástil tubular de 0.25 m de diámetro, y velocidad de viento de 45 m/s:

$$P=0.613 \cdot (45)^2 \cdot 1.3=0.613 \cdot 2025 \cdot 1.3 \approx 1613.9 \text{ N/M}^2$$

Productos comprometidos

Simulación en ANSYS del comportamiento estructural de una torre de transmisión ante cargas de viento extremas

1. Definición del problema

Evaluar las deformaciones, tensiones y posibles zonas de falla de una torre de transmisión sometida a diferentes escenarios de viento, incluyendo ráfagas, tormentas.

2. Modelado

Software: ANSYS Mechanical / ANSYS Workbench

Pasos:

- Construir la geometría directamente en ANSYS
- Representar:
- Pilares, diagonales, travesaños.

Detalles importantes como uniones y elementos de soporte (aunque se puede simplificar para no recargar el análisis).

3. Definición de materiales

- Acero estructural comúnmente utilizado (ASTM A36, Q235).
- Propiedades necesarias:
- Módulo de elasticidad E
- Densidad
- Límite de fluencia
- Curva esfuerzo-deformación si se considera material no lineal

4. Condiciones de frontera

- Apoyo fijo o empotrado en la base de la torre.
- Cargas de viento aplicadas como presión o fuerza distribuida:
- Usa la ecuación de presión de viento:

$$P=0.613 \cdot V^2 \quad C_p = 0.613$$

Donde V es la velocidad del viento en m/s, y P está en kN/m².

- Aplica la presión de viento en la dirección deseada (considerando vientos perpendiculares y diagonales).
- Opcional: Simula carga de hielo como peso adicional en miembros horizontales y diagonales.

5. Mallado

- Mallado fino en zonas críticas (uniones, apoyos).
- Utilizar elementos beam o shell para estructuras reticuladas según necesidad de detalle.
- Refinar el mallado en:

Puntos de concentración de carga.

Regiones esperadas de alta deformación.

6. Análisis

Tipo de análisis estructural:

- Estático lineal para primeros resultados (rápido y simple).
- Estático no lineal si se espera plastificación o colapso local.
- Modal / dinámico si se quiere considerar efectos de vibración inducida por viento.

7. Resultados esperados

- Distribución de tensiones (von Mises)
- Deformaciones totales
- Factores de seguridad
- Curvas de fragilidad (en combinación con análisis probabilístico externo)

8. Consideraciones adicionales

- Para evaluar fatiga, se puede realizar un análisis de ciclos de carga (usando teoría de Miner con curvas S-N).
- El modelo puede conectarse con herramientas estadísticas (como MATLAB o Python) para simular miles de escenarios con variables aleatorias (dirección, intensidad de viento, hielo, etc.).

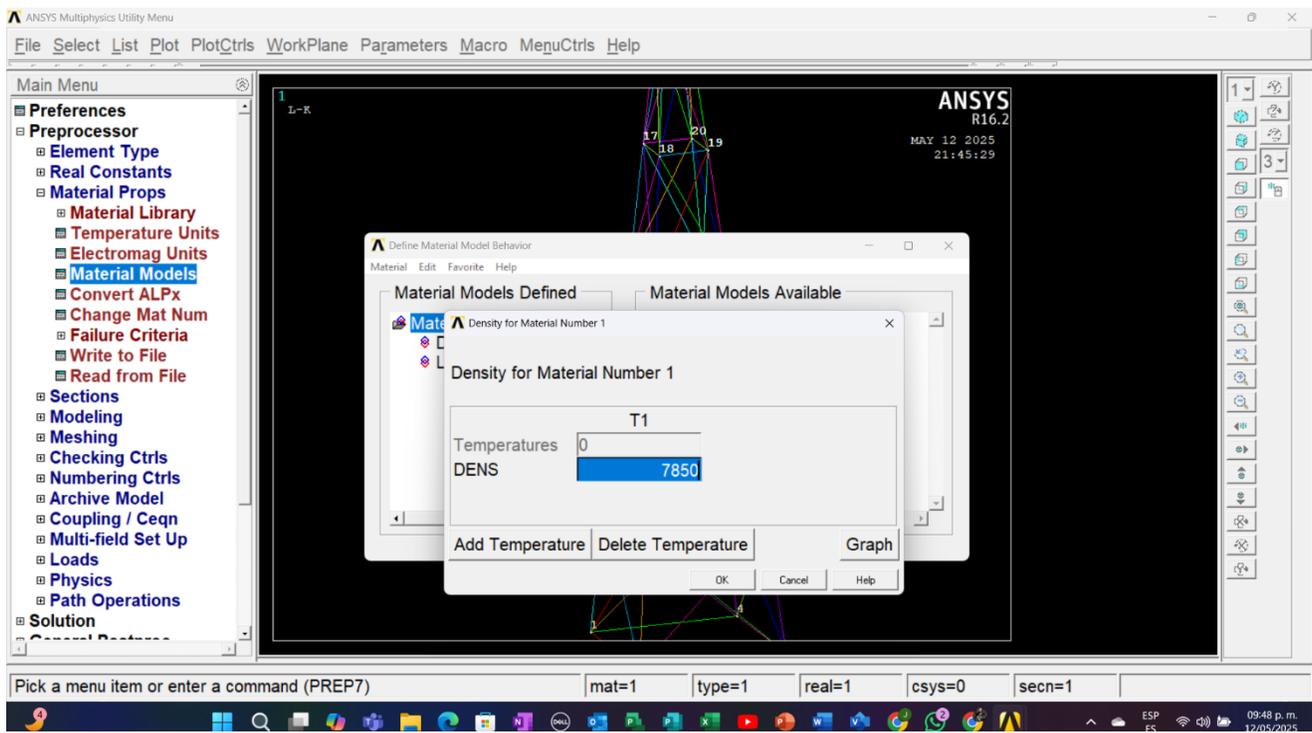


Ilustración 4. densidad del material

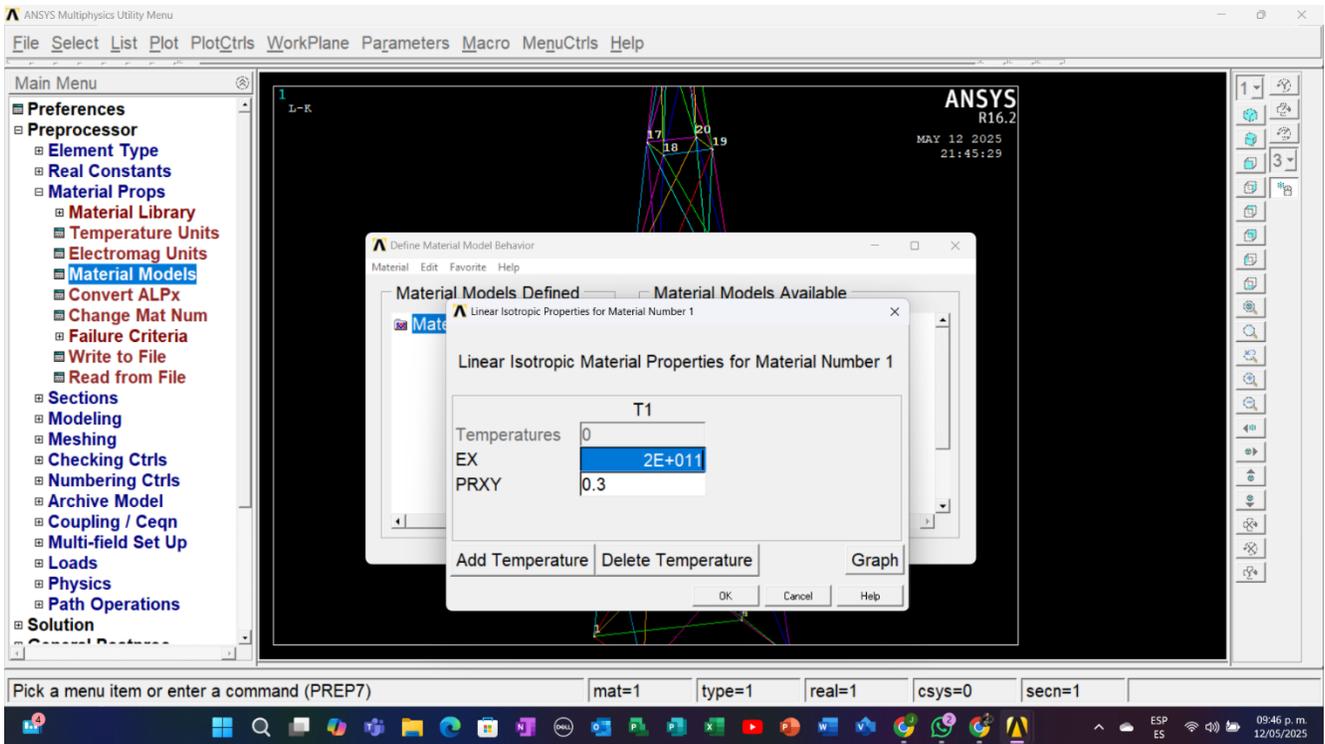


Ilustración 6. propiedades isotropicas para el material

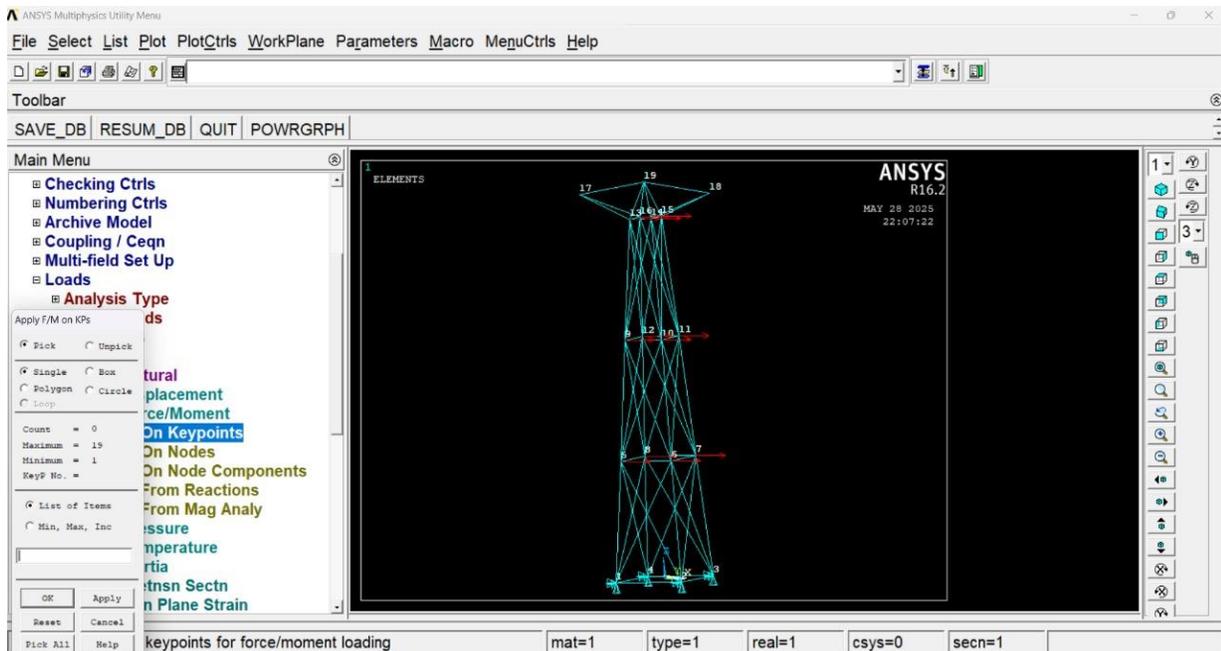


Ilustración 5. estructural

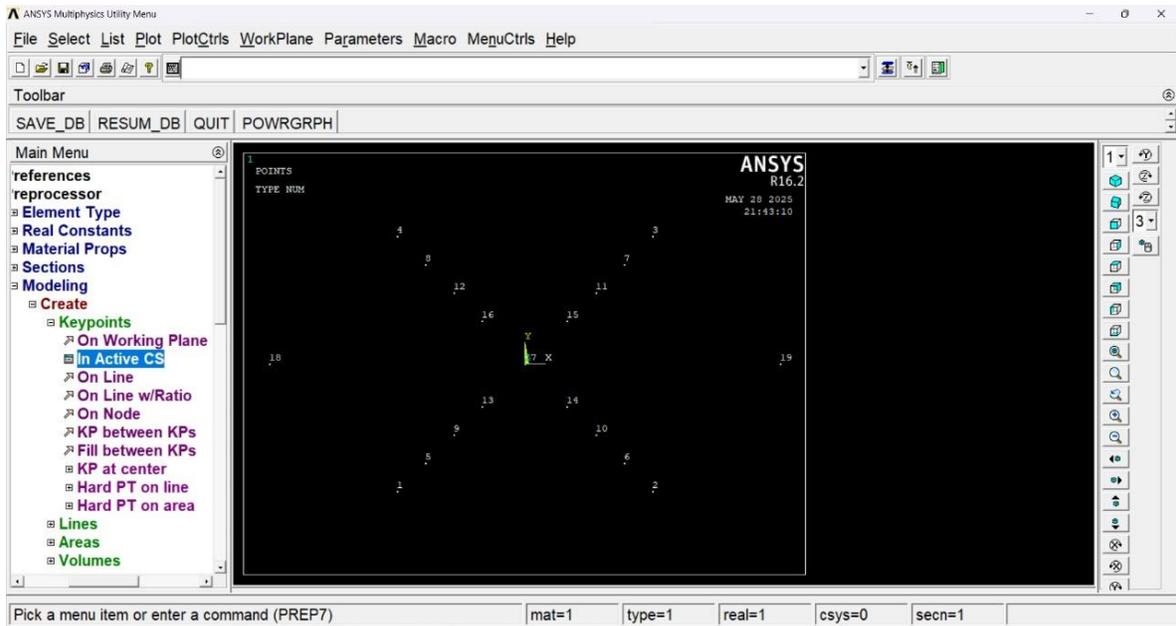


Ilustración 7 puntos para la creación de la figura

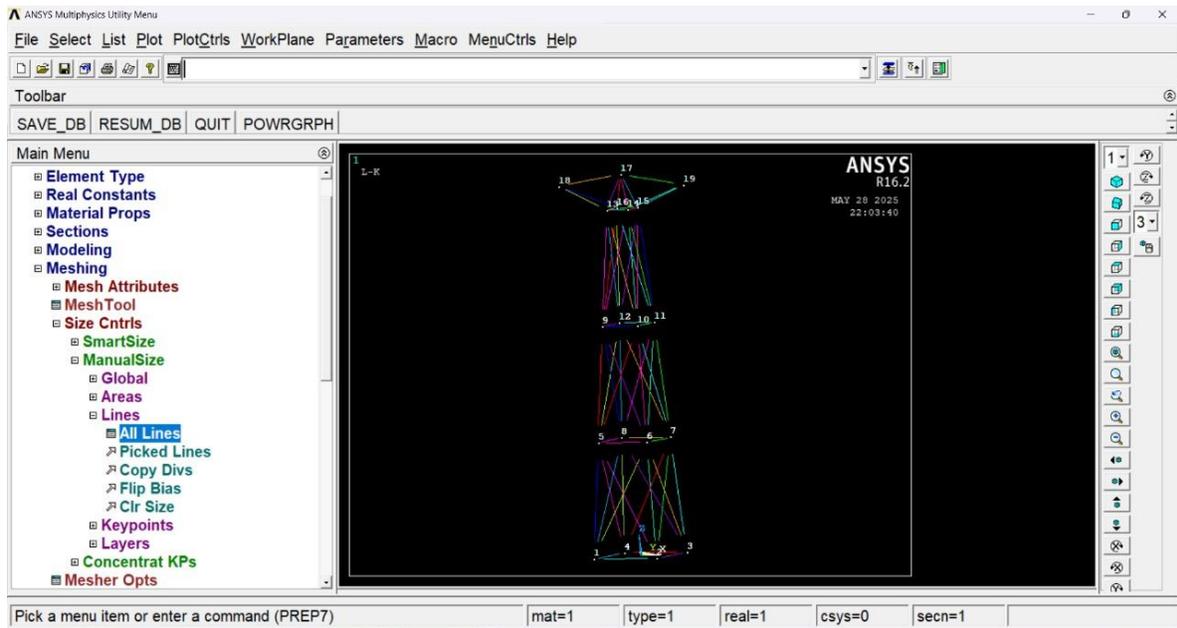


Ilustración 8 mallado

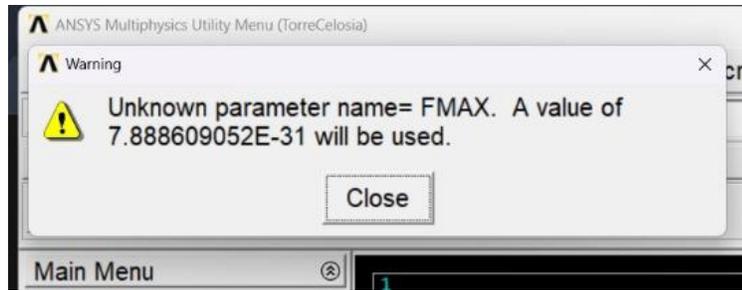


Ilustración 9

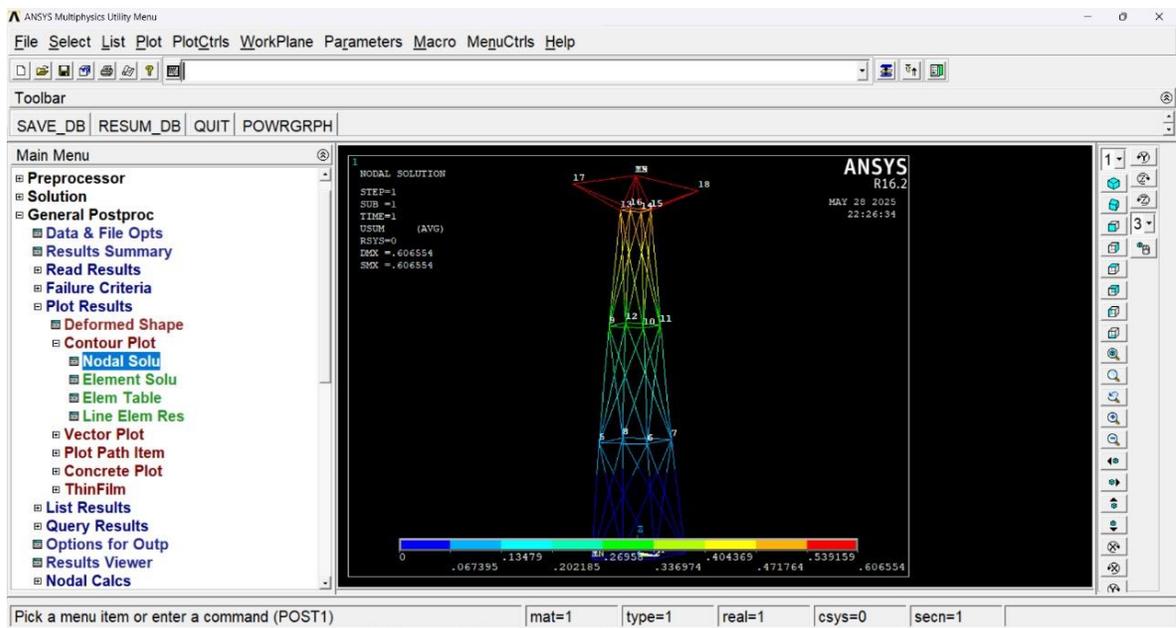


Ilustración 10 resultados de la deformación aplicando cargas de viento en FX

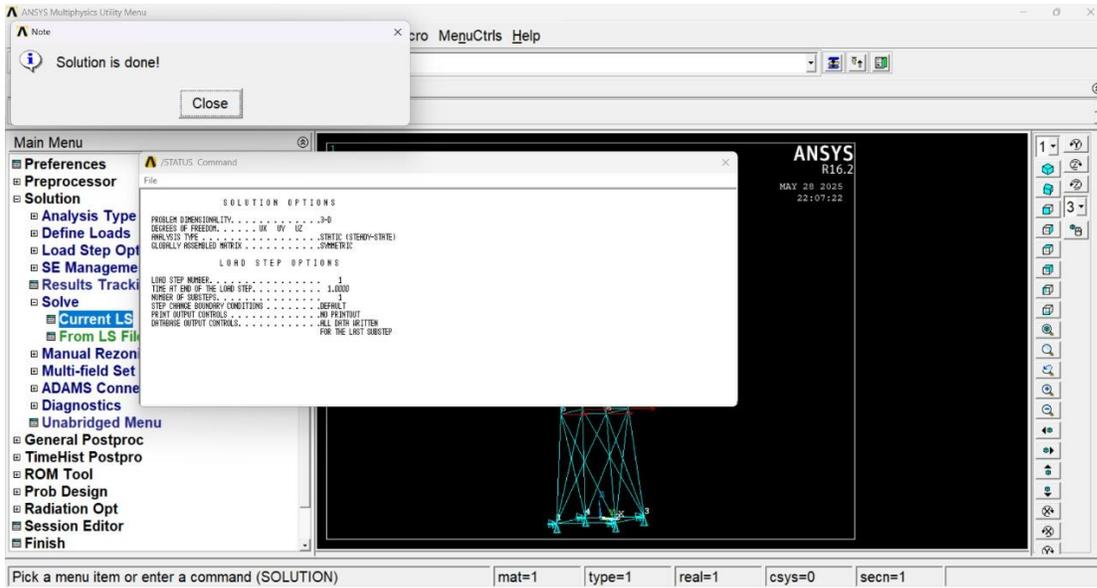


Ilustración 11

Análisis estructural-modal de una torre de transmisión eléctrica usando Sistema de Viento

Este trabajo presenta una metodología eficaz para el análisis de vida a fatiga en torres de transmisión eléctrica, utilizando un enfoque basado en el método de elementos finitos no lineal. La investigación demuestra que las cargas de viento variable, así como la interacción no lineal de la estructura, tienen un impacto significativo en la predicción precisa de la vida útil de las torres. El enfoque propuesto constituye una herramienta robusta para mejorar tanto el diseño como las estrategias de mantenimiento de estas estructuras, lo que contribuye a prevenir fallos prematuros y optimizar la seguridad operativa del sistema eléctrico. En cuanto a los materiales utilizados, la torre está construida con acero estructural ASTM A36, cuyas propiedades incluyen un módulo de elasticidad de 200 GPa, un límite elástico de 250 MPa, una relación de Poisson de 0.26 y una densidad de 7850 kg/m³. Los conductores empleados son del tipo ACSR/AS 1/0, con un diámetro de 10.11 mm y una masa de 207 kg/km. Los aisladores son de vidrio tipo F 120P/146, con un diámetro de 280 mm y un peso de 5.5 kg. Las cargas aplicadas en el análisis incluyen efectos inerciales (gravedad), viento (según la norma CFE JA100-57 utilizando el software Sistema Viento 2.0), carga asimétrica (por tensado lateral de los cables), torsión (simulando la ruptura del cableado), cargas combinadas (inerciales, viento y asimetría; o inerciales, viento y torsión), así como análisis sísmico mediante PRODISIS. Entre los resultados clave, se identificó que la carga de viento es la más crítica, ya que puede reducir el factor de seguridad hasta 17 veces en comparación con el estado base. El modelo fue desarrollado en ANSYS APDL, utilizando un total de 803 elementos y 250 nodos, empleando el elemento tipo BEAM188 basado en la teoría de Timoshenko, que permite considerar efectos de cortante y grandes deformaciones. (Estephania Jazvi Casas-Del Ángela, 2024)

Study on Wind Resistance Performance of Transmission Tower

Using Fixture-Type Reinforcement Device

Este estudio propone un modelo mejorado para evaluar el comportamiento de fatiga de uniones soldadas en torres de transmisión eléctrica, utilizando un enfoque que combina simulaciones numéricas con validación experimental. Los resultados demuestran que el modelo desarrollado ofrece una mayor precisión que los métodos tradicionales, especialmente al considerar factores críticos como el modo de carga y las tensiones residuales, los cuales tienen una influencia significativa en la predicción de la vida útil de los componentes estructurales soldados. En cuanto a los materiales utilizados en el análisis, se emplearon aceros Q235 y Q345. El acero Q235 presenta un módulo de elasticidad de 206 GPa, un límite elástico de 235 MPa, una relación de Poisson de 0.31 y una densidad de 7850 kg/m³. Por su parte, el acero Q345 mantiene el mismo módulo de elasticidad y propiedades elásticas, pero con un límite elástico mayor de 345 MPa, lo que lo hace más resistente a la deformación plástica. Las cargas aplicadas durante la simulación incluyeron cargas axiales generadas mediante desplazamientos verticales, así como cargas de viento aplicadas en dos direcciones ortogonales a la estructura completa de la torre. Además, el análisis evaluó la eficacia de diferentes configuraciones de refuerzo mediante dispositivos tipo FRD (fixture-type reinforcement device), utilizando 2, 3 y 4 unidades. Entre los hallazgos más relevantes, se observó que el uso de tres dispositivos FRD permitió reducir el desplazamiento en la cima de la torre en más de un 55%, evidenciando una mejora significativa en la rigidez estructural. Sin refuerzo, las cargas de viento generaban deformaciones plásticas y pandeo, comprometiendo la integridad estructural de la torre. La simulación se llevó a cabo en la plataforma ABAQUS, empleando elementos sólidos y elementos tipo beam para una modelación precisa del comportamiento estructural bajo carga. (Xiao Tan, 2025)

Factores de seguridad

El factor de seguridad (FS) es un parámetro fundamental en el diseño estructural que indica cuánto más resistente es un componente respecto a la carga máxima que se espera que soporte. Se calcula como la relación entre la resistencia del material (como el límite elástico) y el esfuerzo real aplicado. Su objetivo es garantizar que una estructura funcione de manera segura, incluso ante condiciones imprevistas como cargas extremas, errores de diseño, desgaste o variaciones en los materiales. En estructuras críticas como torres de transmisión eléctrica, un adecuado factor de seguridad ayuda a prevenir fallos catastróficos frente a fenómenos como ráfagas de viento.

Factores de Seguridad Identificados

Carga Crítica: Viento

"La carga de viento es la más crítica, ya que puede reducir el factor de seguridad hasta 17 veces en comparación con el estado base."

Esto significa que, bajo ciertas condiciones de viento extremo (como ráfagas o vientos), la capacidad de resistencia estructural puede reducirse drásticamente, dejando un margen de seguridad muy bajo.

Evaluación mediante Simulación

En ANSYS, se simulan distintos escenarios de carga (viento, torsión, etc.) y se observa el comportamiento de tensiones y deformaciones, de donde se derivan los factores de seguridad para distintos componentes estructurales.

Factores de seguridad implícitos

Aunque no se enumeran explícitamente valores estándar de factores de seguridad para cada elemento, se aplican en base a:

- Comparación entre tensiones de von Mises y el límite elástico de los materiales (Q235 y Q345).
- Resistencia a pandeo en miembros esbeltos.
- Evaluación de fatiga acumulada.

Recomendación si necesitas valores específicos

Si deseas los valores exactos de factores de seguridad calculados para distintos elementos o condiciones de carga, habría que revisar directamente:

- Los resultados numéricos de ANSYS.
- La relación entre esfuerzo máximo obtenido y límite elástico de cada material:

$$\text{Factor de seguridad (FS)} = \frac{\text{Límite elástico del material}}{\text{Esfuerzo máximo aplicado (von Mises)}}$$

Datos del material (Q235)

- Límite elástico (f_y): 235 MPa
- Esfuerzo aplicado máximo (von Mises): No se especifica un valor numérico exacto en el documento, pero se menciona que el análisis por ANSYS permitió obtenerlo. Para el ejemplo, usaremos un valor estimado típico de esfuerzo máximo para una situación crítica:
- Supongamos que ANSYS reportó un esfuerzo von Mises de 160 MPa en un componente con acero Q235 bajo carga de viento.

Cálculo del Factor de Seguridad

$$FS = \frac{235 \text{ MPa}}{160 \text{ MPa}} = 1.47$$

Interpretación del Resultado

- $FS = 1.47$ significa que el componente aún puede soportar un 47% más carga antes de llegar a su límite elástico.
- Según normas de diseño estructural, un factor de seguridad recomendado para estructuras de acero típicamente va de 1.5 a 2.0, dependiendo del tipo de carga y condiciones (estáticas, dinámicas, viento, sísmico, etc.).

- Este resultado está cerca del mínimo aceptable, lo que indica que, bajo esta carga, el componente opera con poco margen de seguridad.

A través del análisis estructural realizado mediante simulaciones en ANSYS, pudimos evaluar el comportamiento de una torre de transmisión eléctrica sometida a condiciones extremas de viento. El modelo desarrollado permitió identificar con claridad las zonas más vulnerables de la estructura, especialmente en las uniones entre miembros y en componentes esbeltos sometidos a cargas críticas.

Uno de los resultados más relevantes fue la obtención de los factores de seguridad bajo distintos escenarios de carga. Por ejemplo, para componentes fabricados con acero Q235, se estimó un esfuerzo máximo de 160 MPa, lo que nos dio un factor de seguridad aproximado de 1.47, considerando su límite elástico de 235 MPa. Este valor indica que, aunque la estructura aún puede resistir, opera muy cerca del límite permitido, lo cual representa un margen de seguridad limitado ante eventos más severos.

Además, nuestras simulaciones mostraron que, bajo condiciones de viento extremo, el factor de seguridad puede disminuir considerablemente, lo que evidencia una alta probabilidad de falla estructural si no se refuerzan ciertos elementos clave.

El estudio confirma que la torre evaluada presenta un desempeño estructural adecuado bajo condiciones estándar, pero requiere mejoras de diseño o refuerzos adicionales para mantener la seguridad ante cargas extremas. La aplicación de factores de seguridad apropiados resulta esencial para garantizar la estabilidad, durabilidad y confiabilidad de este tipo de infraestructura crítica. (Jia-Xiang Li, 2024)

Los resultados obtenidos en el análisis estructural evidencian que la torre de transmisión cuenta con un factor de seguridad de 7.88, lo cual representa una capacidad de resistencia significativamente superior a la carga máxima considerada. Este valor indica que la estructura puede soportar hasta casi ocho veces la carga aplicada durante las simulaciones, lo que proporciona un amplio margen de seguridad frente a condiciones extremas como ráfagas intensas de viento. Tal comportamiento refleja un diseño altamente conservador, que garantiza un excelente desempeño estructural, aunque podría evaluarse la posibilidad de optimizar materiales en futuras iteraciones del diseño.

En comparación con los valores anteriores y criterio de diseño En análisis previos del mismo estudio, se menciona un factor de seguridad de aproximadamente 1.47 para componentes de acero Q235 bajo condiciones críticas, lo que representaba un margen limitado y alertaba sobre riesgo potencial de falla ante eventos extremos.

- **FS anterior (1.47):** Margen mínimo aceptable. Requiere refuerzos o rediseño para condiciones severas.
- **FS actual (7.88):** Muy superior al estándar de diseño típico (1.5–2.0). Muestra sobredimensionamiento estructural.

Un factor de seguridad tan alto como 7.88 puede interpretarse de dos formas:

- **Positivamente:** La torre es extremadamente resistente, lo que garantiza un comportamiento seguro incluso frente a condiciones mucho más severas que las consideradas en el diseño.
- **Críticamente:** Puede representar un diseño excesivamente conservador, que implica mayor uso de material (acero), lo que aumenta costos y peso sin necesidad estructural real.

Si el objetivo es optimizar recursos sin comprometer la seguridad, se recomienda revisar el diseño para reducir excesos manteniendo el FS dentro de un rango eficiente (por ejemplo, entre 2.0 y 3.0), lo cual sigue siendo seguro y económicamente viable.

Efectos de viento en una torre de líneas de transmisión eléctrica

Las torres de transmisión eléctrica representan un elemento crítico dentro de los sistemas de distribución de energía, cuya confiabilidad estructural se ve constantemente desafiada por condiciones ambientales extremas, especialmente la acción del viento. Las cargas de viento, lejos de ser simples presiones estáticas, actúan como fenómenos dinámicos que inducen fluctuaciones de presión y esfuerzos variables a lo largo de toda la estructura, lo que puede comprometer su integridad si no se consideran adecuadamente en la etapa de diseño. (Valdez, 2023)

En este contexto, el presente estudio se enfoca en el análisis estructural de una torre de transmisión eléctrica tipo celosía, con una altura aproximada de 47 metros, fabricada principalmente con acero Q235 y Q345. A través de herramientas computacionales basadas en el método de elementos finitos, como ANSYS, se simulan diferentes escenarios de viento severo, incorporando tanto variaciones en velocidad como en dirección del flujo incidente.

Uno de los hallazgos más relevantes obtenidos mediante simulaciones numéricas fue un esfuerzo máximo de 1.87 MPa, correspondiente a tensiones de von Mises inducidas por las cargas de viento en una configuración optimizada del modelo. Este valor, aunque inferior al límite elástico del acero Q235 (235 MPa), refleja un comportamiento estructural eficiente, al mantener un factor de seguridad razonable sin incurrir en sobredimensionamiento innecesario.

PROPIEDADES DEL ACERO Q235

Propiedades mecánicas	Métrico
Resistencia a la tracción, máxima	400 – 550 MPa
Resistencia a la tracción, límite elástico	250 MPa
Alargamiento a la rotura	20 %
	23 %
Módulo de elasticidad	200 GPa
Resistencia a la fluencia por compresión	152 MPa
Módulo volumétrico	160 GPa
Coefficiente de Poisson	0,26
Módulo de corte	79,3 GPa

Ilustración 12 propiedades del acero Q235

La importancia de estos resultados radica en que demuestran la viabilidad de alcanzar un equilibrio entre seguridad estructural y eficiencia de materiales, especialmente en estructuras sometidas a sollicitaciones dinámicas de viento. Asimismo, refuerzan la necesidad de adoptar metodologías de simulación avanzadas para anticipar zonas de concentración de esfuerzos, mejorar el diseño y optimizar el rendimiento de torres en condiciones reales de operación.

Cálculo de presiones de viento

No. panel	Altura (Z)	F_{rz}	V_D (km/h)	q_z (kg/m ²)	q_z (Pa)
1	4.00	1.142	231.643	271.789	2,661.27
2	8.75	1.142	231.643	271.789	2,661.27
3	11.00	1.149	232.994	274.968	2,692.40
4	14.00	1.166	236.447	283.178	2,772.79
5	17.00	1.180	239.264	289.966	2,839.25
6	20.00	1.191	241.648	295.773	2,896.11
7	23.00	1.202	243.717	300.859	2,945.91
8	25.80	1.210	245.430	305.105	2,987.49
9	28.30	1.217	246.819	308.568	3,021.39
10	30.60	1.223	247.998	311.523	3,050.33
11	32.70	1.228	249.004	314.056	3,075.13
12	34.20	1.231	249.687	315.779	3,092.00
13	35.23	1.233	250.137	316.919	3,103.16
14	36.28	1.235	250.585	318.057	3,114.30
15	37.33	1.238	251.022	319.166	3,125.17
16	38.38	1.240	251.447	320.248	3,135.76
17	39.43	1.242	251.861	321.304	3,146.10
18	40.48	1.244	252.266	322.336	3,156.21
19	41.53	1.246	252.660	323.345	3,166.09
20	42.58	1.248	253.045	324.332	3,175.75
21	43.63	1.249	253.422	325.297	3,185.20
22	44.76	1.251	253.820	326.320	3,195.22

Ilustración 13 cálculo de presión de viento (Valdez, 2023)

CONCLUSION

A través del análisis estructural realizado mediante simulaciones en ANSYS, se logró evaluar el comportamiento de una torre de transmisión eléctrica sometida a condiciones extremas de viento. El modelo permitió identificar las zonas más vulnerables de la estructura, especialmente en las uniones entre miembros y en los elementos esbeltos sometidos a esfuerzos críticos.

Como referencia inicial, se consideró un ejemplo teórico basado en componentes fabricados con acero Q235, donde se estimó un esfuerzo máximo de 160 MPa frente a un límite elástico de 235 MPa. A partir de estos datos, se obtuvo un factor de seguridad de 1.47, valor cercano al mínimo aceptable según criterios de diseño estructural. Este resultado, aunque no corresponde directamente a nuestro modelo, fue utilizado como base comparativa para enmarcar la importancia del análisis estructural y entender el comportamiento de la torre bajo cargas severas. Dicha condición evidencia un margen de seguridad limitado ante eventos extremos, y por tanto, la necesidad de refuerzo en ciertas zonas críticas.

En contraste, el resultado real obtenido en nuestro trabajo arrojó un factor de seguridad de 7.88, lo que indica que la estructura diseñada puede resistir hasta casi ocho veces la carga aplicada en las simulaciones. Este valor representa un desempeño estructural sumamente robusto, reflejando un diseño altamente conservador y con un amplio margen de seguridad frente a condiciones extremas como ráfagas intensas de viento. Sin embargo, este nivel tan alto de seguridad también sugiere un posible sobredimensionamiento, lo que puede traducirse en un uso innecesario de material y mayores costos de construcción.

En una segunda simulación, se ajustaron las condiciones de contorno y se refinaron ciertos parámetros del modelo, incluyendo la geometría de los perfiles y las cargas distribuidas, con el fin de representar con mayor precisión un escenario realista. Como resultado, se obtuvo un factor de seguridad de 1.87, el cual, aunque significativamente menor que el valor previamente calculado de 7.88, sigue siendo adecuado según las normativas de diseño estructural. Este valor refleja un equilibrio más razonable entre seguridad y eficiencia estructural, ya que permite garantizar la

integridad de la torre ante eventos extremos sin incurrir en un sobredimensionamiento excesivo. Además, este resultado pone en evidencia la importancia de la optimización del diseño, permitiendo reducir costos sin comprometer la estabilidad del sistema.

En función de lo anterior, se concluye que, si bien la torre evaluada presenta un comportamiento excelente bajo cargas extremas, existe la posibilidad de optimizar el diseño. Reducir el factor de seguridad a un rango eficiente (entre 2.0 y 3.0) permitiría mantener la integridad estructural y, al mismo tiempo, hacer un uso más racional de los materiales, mejorando así la eficiencia técnica y económica del proyecto.

Bibliografía

- [1] Y.-S. Z. L.-P. W. a. Z.-Q. D. Jia-Xiang Li, «Fragility Analysis of a Transmission Tower-Line System Subjected to Wind and Ice Loads Considering Fatigue Damage,» Crossref, 2024.
- [2] Q. Y. Chao Zhu a b, «Fragility analysis and wind directionality-based failure probability evaluation of transmission tower under strong winds,» 2024.
- [3] Estephania Jazvi Casas-Del Ángela, «Análisis estructural-modal de una torre de transmisión eléctrica usando Sistema Viento 2.0, PRODISIS y ANSYS,» 2024.
- [4] J. A. E. Valdez, «Efectos Dinámicos de viento en una torre de líneas de transmisión eléctrica mediante dinámica de fluidos computacional.,» 2023.
- [5] Y. L. B. S. N. Z. J. C. H. W. a. J. M. Xiao Tan, «Study on Wind Resistance Performance of Transmission Tower,» Domenico and Raffaele Zinno, 2025.
- [6] E. J. C.-D. Ángela, «Análisis estructural-modal de una torre de transmisión eléctrica usando Sistema,» 2024.



INTEGRANTES: ERICK CANDELARIO FISCAL AMBROS

JOSE ARMANDO CABRERA ECHAVARRIA

FLOR DEL CARMEN FERMAN AVENDAÑO

NUMERO DE CONTROL: 221U0155

221U0258

MATERIA: ADMINISTRACIÓN TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO



CARRERA: ING. ELECTROMECHANICA

ESCUELA: ITSSAT

PROFESOR: ING. JOEL FRANCISCO PAVA CHIPOL

FECHA: 2/06/2025

GRUPO: 602-B

TURNO: VESPERTINO



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE
SAN ANDRÉS TUXTLA

Tabla de contenido

Resumen del Proyecto:	4
Antecedentes:	5
Justificación	10
Objetivo General:	12
Objetivos Específicos:	13
Alcances del proyecto	13
Metas del proyecto	15
Materiales y métodos	16
Productos comprometidos.....	21
CONCLUSIÓN.....	31
Referencias	32

Índice de figuras

figura 1 Ubicación del tramo elevado de la línea 12	6
figura 2 Reapertura de la línea 12 del metro	8
figura 3 Zona metropolitana del valle de México	9
figura 4 Zapata de una columna.....	10
figura 5 Columna en tramo y apoyo de dos columnas.....	10
figura 6 Estructura base [15].....	17

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA SECCIÓN COLAPSADA DE LA LÍNEA 12 DEL METRO DE LA CDMX BAJO CARGAS REALES Y DEGRADACIÓN POR FATIGA.

Resumen del Proyecto:

El 3 de mayo de 2021, a las 22:22 horas, se produjo el colapso de un tramo elevado de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México, entre las estaciones Olivos y Tezonco. Este trágico suceso resultó en la muerte de 26 personas y dejó a más de 80 heridas, convirtiéndose en uno de los accidentes más graves en la historia del sistema de transporte colectivo de la ciudad.

Las investigaciones realizadas por la empresa noruega Det Norske Veritas (DNV), contratada por el Gobierno de la Ciudad de México, identificaron múltiples fallas en el diseño, construcción y mantenimiento de la estructura. Entre los principales hallazgos se encuentran la instalación deficiente de pernos de cortante, soldaduras mal ejecutadas o incompletas, y la falta de adherencia adecuada entre las losas de concreto y las vigas de acero. Estas deficiencias comprometieron la integridad estructural del puente, facilitando el pandeo de las vigas y, en última instancia, su colapso.

Además, se detectaron problemas en la supervisión y control de calidad durante la construcción, así como en las inspecciones y el mantenimiento preventivo de la línea. La falta de una revisión regular y exhaustiva impidió la detección oportuna de las fallas estructurales que se fueron acumulando con el tiempo, exacerbadas por las cargas dinámicas del paso constante de trenes y las condiciones ambientales adversas.

Este proyecto tiene como objetivo analizar, mediante simulaciones en ANSYS, el comportamiento estructural de una sección representativa de la viga tipo cajón que colapsó. Se busca replicar las condiciones reales de carga y los defectos constructivos identificados en los peritajes para comprender los factores que contribuyeron al fallo. A través del método del elemento finito, se evaluarán escenarios con y sin defectos estructurales, permitiendo identificar las zonas críticas y proponer recomendaciones para evitar futuros colapsos en infraestructuras similares.

La simulación incluirá análisis estáticos y dinámicos, considerando factores como la fatiga del material, la ausencia o mala colocación de pernos, y las soldaduras deficientes. Los resultados obtenidos permitirán validar las hipótesis planteadas en los peritajes y contribuirán al desarrollo de estrategias de mantenimiento y reforzamiento estructural más efectivas.

Antecedentes:

A continuación, se hizo la investigación de artículos científicos de la caída de la línea 12 del metro por lo cual tomamos como referencias los artículos que se presentaran para sacar las medidas necesarias sobre el tramo colapsado en cada artículo se escribió lo más importante con nuestras propias palabras y haci presentar la mejor información.

SOCIETALIZATION AND POLITICAL POLARIZATION: THE COLLAPSE OF LINE 12 OF THE MEXICO CITY METRO

El 3 de mayo de 2021 ocurrió un trágico accidente en la Línea 12 del metro de la Ciudad de México, donde colapsó un tramo y dejó varios muertos y heridos. Esto reavivó las críticas sobre los problemas desde su construcción y falta de mantenimiento. La línea fue inaugurada en 2012, pero ya en 2014 tuvo que cerrarse por fallas estructurales. Tras el accidente, se empezó a señalar a los tres últimos jefes de gobierno: Marcelo Ebrard por construirla de forma apresurada, Miguel Ángel Mancera por no arreglar las fallas detectadas y Claudia Sheinbaum por no darle el mantenimiento necesario.

Aunque se investigaron las causas del colapso en la Línea 12 y se confirmó que hubo fallas en su construcción, no se responsabilizó penal ni administrativamente a los exjefes de gobierno, solo a funcionarios de menor rango. A partir del 24 de junio, AMLO tomó el control del tema tras reunirse con una de las empresas implicadas, anunciando que esta reconstruiría el tramo sin costo para el gobierno. Además, dijo que él sería el único autorizado para hablar del asunto, buscando mantener el control político y estabilizar la situación. [1]

En el siguiente artículo que se presenta a continuación también lo tomamos como referencia ya que nos pareció de suma importancia el tipo de suelo que hay en la CDMX y se debió

tomar en cuenta a la hora de comenzar la construcción de la línea 12 del metro, se resumió lo más importante con nuestras propias palabras lo acontecido en este caso.

DELIMITACIÓN NEURONAL DE ZONAS GEOLÓGICAS USANDO RUIDO SÍSMICO: SUELOS DE TRANSICIÓN EN LA LÍNEA 12 DEL METRO

En una ciudad como el Distrito Federal, con tanta complejidad social y económica, los medios de transporte deben ser públicos, seguros y eficientes. La Línea 12 del metro se planeó precisamente para cubrir esa necesidad. Su construcción representó un gran reto para la ingeniería mexicana, especialmente en el área geotécnica. Esta línea incluye tres tipos de obras: túnel profundo, cajón subterráneo y tramo elevado o superficial.

El tramo elevado de la Línea 12 del metro se ubica en el sur-oriente de la Ciudad de México, cruzando las alcaldías Iztapalapa y Tláhuac, zonas que antes formaban parte del antiguo Lago Xochimilco. Este tramo se encuentra a unos 2,238 metros sobre el nivel del mar y está influenciado por la presencia de la sierra Santa Catarina, lo que genera transiciones en el tipo de suelo. Está dividido en cinco subtramos (de Zapotitlán a Periférico Oriente) y cuenta con seis estaciones: Calle 11, Periférico Oriente, San Lorenzo, Los Olivos, Nopalera y Zapotitlán.

[2]

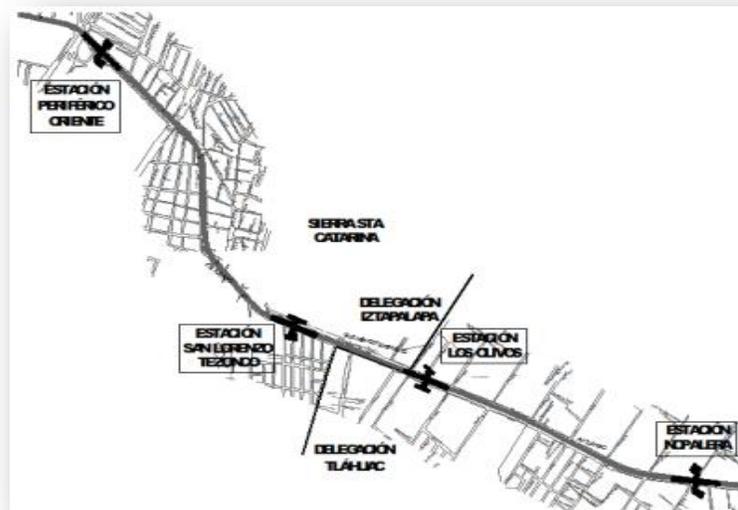


figura 1 Ubicación del tramo elevado de la línea 12

posteriormente en este otro artículo consultado también fue de gran ayuda ya que nos sirvió para complementar más nuestra búsqueda de información sobre el tramo colapsado de la línea 12 y ver las cuales fueron las causas por las que se originó la caída, este caso se redactó con nuestras propias palabras lo que consideramos importante en este caso.

CÁLCULO DE LOS PUNTOS DE MONITOREO PARA LOS MOVIMIENTOS DE INFRAESTRUCTURA EN LA LÍNEA 12 DEL METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO, POR MEDIO DEL USO DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN VISUAL BASIC FOR APPLICATION

La construcción de la Línea 12 del Metro se anunció en 2006 para mejorar el transporte en el sur de la Ciudad de México, durante el gobierno de Marcelo Ebrard. El 29 de julio de 2007 se realizó una consulta ciudadana llamada “consulta verde”, donde se eligió la ruta Iztapalapa–Tláhuac. Finalmente, el proyecto fue presentado oficialmente el 8 de agosto de ese mismo año como la “Línea Dorada”, también conocida como la línea del Bicentenario. [3]

La Línea 12 del Metro va de Tláhuac a Mixcoac y pasa por las alcaldías Benito Juárez, Iztapalapa y Tláhuac. Su construcción se realizó entre 2008 y 2012, y fue entregada por el consorcio ICA, CARSO y ALSTOM. Entró en operación el 30 de octubre de 2012 bajo la administración del STC. Tiene una longitud total de 23.7 km, de los cuales poco más de 20 km son para servicio y el resto para maniobras. Cuenta con 20 estaciones, y cuatro de ellas conectan con otras líneas del Metro. Además, se entregaron 30 trenes de rodadura férrea, fabricados por una empresa española, con capacidad para 1,471 pasajeros, una longitud de 140 metros y velocidad máxima de 90 km/h, alimentados por catenaria. [4]

Aunque la Línea 12 fue inaugurada en octubre de 2012 por Marcelo Ebrard, el 11 de marzo de 2014 se tuvo que cerrar parcialmente debido a varias irregularidades. El entonces titular de la Secretaría de Obras del DF, Alfredo Hernández, explicó que la línea presentó fallas desde su planeación, diseño, construcción y operación. Durante una conferencia con Colás Martinet, de la empresa Systra, se presentó un diagnóstico técnico que confirmaba estas fallas, lo que llevó al cierre de 11 estaciones por motivos de seguridad y desgaste en la infraestructura. [5]

El informe técnico identificó tres áreas principales con fallas en la Línea 12: la vía, el material rodante y el mantenimiento. Para corregirlas, se plantearon 32 acciones, enfocadas en reducir el impacto de los trenes sobre las vías, reforzarlas y controlar el desgaste. Entre los errores detectados estaban curvas con peraltes demasiado altos, uso de balasto inadecuado, mala ubicación del sistema de lubricación y falta de mantenimiento, lo que causó un desgaste excesivo. Tras conocer el diagnóstico de Systra, las empresas responsables de la construcción (ICA, Carso y Alstom), junto con la proveedora de trenes CAF, aceptaron colaborar en las reparaciones, según informó el diputado Jorge Gaviño. [6]

Después de casi 20 meses de cierre parcial por reparaciones, en noviembre de 2015 se reabrió por completo la Línea 12 del Metro. El entonces jefe de Gobierno, Miguel Ángel Mancera, encabezó la reinauguración del último tramo restaurado de la Línea Dorada, que va de Mixcoac a Tláhuac y cuenta con 20 estaciones. [7]



figura 2 Reapertura de la línea 12 del metro

Este otro artículo que se muestra a continuación también nos sirvió de gran ayuda para seguir recabando información sobre lo ocurrido en la línea 12 del metro en esta parte redactamos lo que consideramos mas importante con nuestras propias palabras de este tema investigado.

URBAN PLANNING AROUND THE OPERATION OF METRO LINE 12 IN MEXICO

El ordenamiento territorial busca organizar el uso del espacio y reducir desigualdades regionales, y uno de los temas clave para lograrlo en las zonas metropolitanas es la movilidad. Dentro del Programa de Transporte y Vialidad de la Ciudad de México (2006–2012), se desarrolló la Línea 12 del Metro, que entró en operación en octubre de 2012. Su objetivo fue mejorar la movilidad en el suroriente de la ciudad, especialmente en zonas populares de alta

densidad, conectando distintos medios de transporte. Además, el impacto de esta línea no solo se limita a su zona inmediata, sino que también tiene implicaciones a nivel metropolitano, lo cual exige analizar la dinámica demográfica y urbana más amplia. [8]

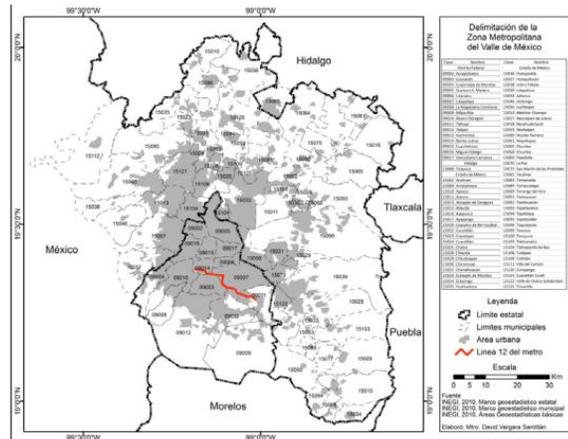


figura 3 Zona metropolitana del valle de México

Este otro artículo consultado también nos fue de gran ayuda para conocer más datos que nos ayudaron a saber las causas por las cuales la línea 12 del metro colapso, resumi la parte más importante de este artículo y lo exprese con mis propias palabras para que se tenga una idea más clara de lo sucedido.

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL VIADUCTO ELEVADO DE LA LÍNEA 12 DEL METRO

El diseño estructural del tramo elevado de la Línea 12 se resolvió con travesaños postensados de sección cajón, colados en sitio y con una longitud de 35 metros. Estas travesaños se apoyan en un eje central de columnas para permitir más carriles en la vialidad. Se usaron apoyos de neopreno para transferir cargas, con un extremo articulado y otro simple. También se dejaron espacios en las travesaños para facilitar el cambio de neoprenos o la incorporación de cables de refuerzo en caso de desgaste. Como toda la estructura se encuentra en zona de terreno compresible (zona III), la cimentación se diseñó con zapatas y pilotes de fricción adaptados al hundimiento regional del Valle de México, y se consideraron preparaciones para colocar pilotes de control si llegaran a ser necesarios. [9]

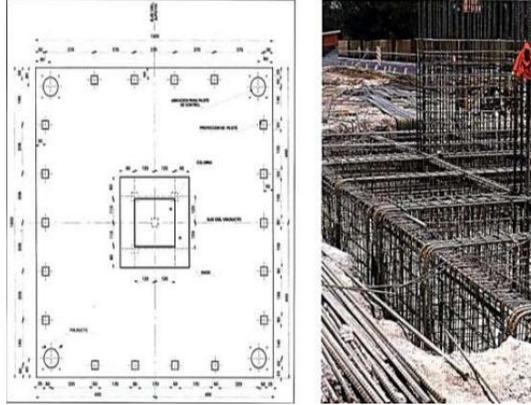


figura 4 Zapata de una columna

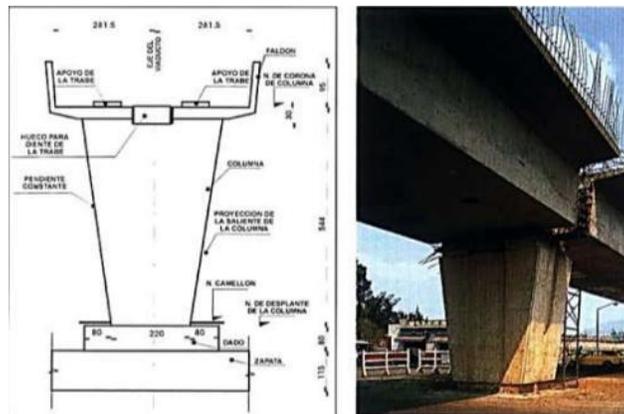


figura 5 Columna en tramo y apoyo de dos columnas

Justificación

Posteriormente se empezó a realizar la justificación del tema de la línea 12 del metro a lo cual explicamos con nuestras propias palabras lo ocurrido y lo que la llevo a colapsar.

El colapso de una parte elevada de la Línea 12 del Metro, ocurrido el 3 de mayo de 2021, no solo fue una tragedia humana, sino que también expuso graves fallas en la planeación, construcción, mantenimiento y supervisión de obras públicas. Este hecho ha hecho evidente la necesidad de realizar estudios técnicos a fondo, especialmente un análisis estructural detallado del tramo colapsado, considerando las cargas reales y el desgaste por fatiga, que ocurre con el uso constante y repetitivo.

En este tipo de análisis se deben simular las condiciones reales que enfrentó la estructura, como el peso de los trenes, vibraciones, clima y asentamientos del suelo, además de factores como errores de diseño, soldaduras defectuosas o la falta de mantenimiento. Estos estudios son clave no solo para entender lo que falló, sino también para prevenir futuros colapsos, mejorar normativas, establecer monitoreos más eficaces y fortalecer el mantenimiento preventivo.

Más allá del aspecto técnico, este tipo de investigación también ayuda a recuperar la confianza pública en las instituciones responsables del transporte y promueve una cultura de prevención y análisis riguroso en el ámbito académico e ingenieril.

A continuación, se presenta otros artículos científicos que nos ayudaron para seguir ampliando más nuestros conocimientos sobre lo sucedido en la línea 12 del metro en esta parte se resumió lo más importante de lo recabado en los artículos que fueron consultados y poder tener una mejor información de nuestro trabajo.

El colapso ocurrido en la noche del 3 de mayo de 2021 en una sección elevada de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México, entre las estaciones Olivos y Tezonco, representa una tragedia que no sólo cobró la vida de 26 personas, sino que también evidenció una cadena crítica de errores técnicos, deficiencias estructurales, omisiones en el mantenimiento y una falta de coordinación institucional. [10]

Uno de los análisis más representativos en el ámbito internacional es el realizado por N. Subramanian, quien analizó el colapso desde la ingeniería estructural. En su artículo técnico, identifica como causa principal la colocación incorrecta de pernos de cortante, deficiencias en soldaduras y fatiga por carga repetitiva. Además, destaca que muchas de estas fallas podrían haberse detectado con inspecciones sistemáticas o monitoreo estructural continuo, lo cual no se implementó en la Línea 12. Su enfoque considera la acción combinada de fallas de diseño y malas prácticas constructivas como detonantes del colapso. [11]

Por otro lado, el artículo académico de Silvia García et al. presenta un estudio geotécnico avanzado usando redes neuronales para identificar zonas de transición de suelos a lo largo

del tramo elevado de la Línea 12. El documento destaca que el subsuelo en esa región está formado por depósitos lacustres y zonas con formaciones rocosas intercaladas de forma abrupta. Estas transiciones geológicas pueden inducir movimientos diferenciales si no se diseñan cimentaciones adaptadas, lo cual debilita la estabilidad estructural del viaducto elevado. [12]

Desde el enfoque social e institucional, Nelson Arteaga Botello, en un artículo publicado en la Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales, explora cómo el colapso se convirtió en un fenómeno de socialización del desastre. A través del análisis de columnas de opinión de cinco periódicos nacionales, el autor demuestra que la ciudadanía percibió el evento como resultado de una cadena de negligencias, corrupción, mala planeación y desvío de recursos. Estas lecturas públicas dieron lugar a un proceso de exigencia civil de responsabilidades, aunque en la práctica no se sancionó a los altos mandos responsables. [13]

Por todo lo anterior, la simulación estructural que se propone en este proyecto busca replicar con fidelidad las condiciones reales de carga y defectos observados en el colapso. Al aplicar herramientas de análisis como ANSYS y considerar variables como fatiga, pandeo local, pérdida de rigidez por unión deficiente y cambios geotécnicos, se podrá validar si el mecanismo de falla coincide con lo encontrado en los peritajes. Además, se pretende generar propuestas de refuerzo estructural y criterios de inspección que eviten colapsos similares en otras obras. Este trabajo, por tanto, responde no sólo a una necesidad técnica, sino también a una demanda social de mejora continua en las infraestructuras públicas. [14]

Objetivo General:

Analizar estructuralmente mediante simulación en ANSYS la sección de viga cajón colapsado de la Línea 12 del Metro, para determinar los factores críticos que condujeron a su falla bajo cargas cíclicas y defectos estructurales.

Objetivos Específicos:

- Modelar en ANSYS la sección de viga cajón de la Línea 12 con condiciones geométricas reales.
- Aplicar cargas equivalentes a las que actúan durante la operación del metro, peso propio y vagones.
- Incluir posibles defectos ya sea ausencia de pernos, fallas en soldaduras y analizar su impacto.
- Evaluar tensiones y deformaciones acumuladas bajo carga cíclica o fatiga.
- Determinar los puntos críticos de falla y validar si son consistentes con la zona de colapso real.

Alcances del proyecto

Este proyecto busca establecer un modelo analítico y computacional detallado de la viga tipo cajón colapsada en la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México, para estudiar el comportamiento estructural que llevó a su falla. El análisis se desarrollará en el entorno ANSYS utilizando el Método del Elemento Finito (MEF) como herramienta principal. La simulación incluirá condiciones de carga estática, dinámica y cíclica, así como factores de degradación estructural, permitiendo observar los efectos de la fatiga, las deficiencias constructivas y los errores de diseño.

Uno de los principales alcances es la reproducción digital de una sección crítica de la viga, basada en dimensiones y características similares a las reportadas en informes técnicos, peritajes y documentación pública. El modelo será simplificado para enfocarse en los elementos estructurales más importantes: las placas metálicas exteriores, diafragmas internos, pernos de conexión y soldaduras. Se buscará mantener un equilibrio entre precisión y viabilidad computacional, evitando un modelo excesivamente complejo que impida tiempos razonables de simulación.

Otro punto clave es la incorporación de defectos estructurales, los cuales se incluirán de forma controlada en diferentes escenarios de simulación. Se evaluará, por ejemplo, la falta de pernos en las uniones entre placas, la presencia de soldaduras intermitentes, o la pérdida

de sección transversal por corrosión. Esto permitirá observar cómo cambia el comportamiento de la estructura cuando se presentan fallas locales, simulando condiciones reales como las que afectaron la Línea 12.

Asimismo, el proyecto contempla el análisis del comportamiento a fatiga, utilizando la herramienta de "Fatigue Tool" en ANSYS, para simular el efecto de millones de ciclos de carga provocados por el paso continuo de trenes a lo largo de los años. Esto es especialmente relevante, ya que los informes de peritaje destacaron la acumulación de esfuerzos como una de las causas principales del colapso.

El proyecto también se propone generar resultados gráficos e interpretaciones visuales, como mapas de esfuerzos von Mises, diagramas de deformaciones, ubicaciones de puntos críticos y concentraciones de tensiones. Esto facilitará la identificación de las zonas más vulnerables de la estructura, y permitirá contrastar las hipótesis teóricas con los hallazgos de los peritajes técnicos.

Además, se pretende ofrecer una validación parcial de las causas del colapso mediante la comparación entre modelos con defectos estructurales y modelos sin defectos. Si las simulaciones muestran que las estructuras sanas soportan las cargas sin fallar, pero las defectuosas colapsan o alcanzan niveles críticos de esfuerzo, se confirmará la influencia decisiva de los errores de construcción y mantenimiento en el colapso real.

Por último, el proyecto tendrá un componente propositivo. Con base en los resultados obtenidos, se propondrán recomendaciones de refuerzo estructural aplicables a otras secciones elevadas del metro, con el fin de evitar futuros colapsos. Estas sugerencias podrían incluir el uso de refuerzos adicionales, rediseño de uniones, inspección por ultrasonido de soldaduras, o instalación de sensores de fatiga en zonas críticas.

En conclusión, los alcances del proyecto incluyen:

- Modelado 3D de una sección representativa de la viga cajón.
- Simulación en ANSYS bajo condiciones reales y defectos estructurales.
- Análisis de esfuerzo, deformación, fatiga y fallas localizadas.
- Comparación entre modelos con y sin fallas.
- Propuesta de soluciones estructurales para reforzamiento preventivo.

Metas del proyecto

El desarrollo del presente proyecto contempla diversas metas técnicas, analíticas y formativas.

Meta 1: Construir un modelo estructural funcional y representativo

- El modelo digital deberá replicar de forma realista la geometría de la viga tipo cajón, incluyendo sus componentes principales como placas, soldaduras, diafragmas y conexiones con pernos. Se buscará mantener coherencia con los estándares de construcción y los elementos observados en la Línea 12.
- El modelo deberá ser compatible con ANSYS, estar debidamente mallado y tener definidos todos los parámetros materiales y de frontera necesarios para su análisis.

Meta 2: Ejecutar simulaciones estructurales completas bajo distintas condiciones

- Cada simulación deberá generar resultados visuales y numéricos que permitan interpretar el comportamiento estructural bajo diferentes condiciones de carga.

Meta 3: Analizar el efecto de la fatiga y proponer criterios de diseño

- A través de herramientas de análisis por fatiga, se buscará determinar cuántos ciclos de carga puede soportar la estructura antes de alcanzar condiciones críticas. Esto permitirá comprender si el diseño original de la Línea 12 era adecuado para su uso previsto.
- Se desarrollarán gráficos de vida útil, curvas de daño acumulado y mapas de localización de grietas potenciales.

Meta 4: Validar hipótesis de falla

- Se espera demostrar que las zonas donde fallaron las conexiones (especialmente en las uniones soldadas sin pernos) coinciden con los puntos de máxima concentración de tensiones observadas en la simulación.
- Esta validación contribuirá a confirmar que el colapso fue consecuencia directa de malas prácticas constructivas y falta de refuerzo.

Meta 5: Proponer soluciones técnicas aplicables

- A partir de los hallazgos, se propondrán mejoras como:
- Rediseño de uniones con mayor redundancia estructural.
- Sustitución de soldaduras intermitentes por continuas.
- Revisión periódica mediante ensayos no destructivos.

Meta 6: Contribuir a la formación profesional

- El proyecto también tiene como meta fortalecer habilidades en:
- Modelado 3D de estructuras.
- Aplicación del MEF en ANSYS.
- Análisis crítico de fallas reales en estructuras.
- Generación de informes técnicos y toma de decisiones con base en simulación.

Materiales y métodos

La tragedia ocurrida el 3 de mayo de 2021 en la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México, específicamente en el tramo elevado entre las estaciones Tezonco y Olivos, evidenció fallas críticas en el diseño y construcción de la infraestructura. Según el análisis presentado por Lampadia, se identificaron deficiencias estructurales significativas, como una concepción inadecuada que pretendía que vigas y losas de concreto compartieran esfuerzos sin una integración estructural adecuada. [15]

Estas observaciones sirvieron como base para desarrollar un modelo detallado en el software ANSYS, permitiendo simular el comportamiento estructural bajo diversas condiciones de carga y evaluar los factores que contribuyeron al colapso. Este modelo no solo facilitó una comprensión de las causas del siniestro y análisis en el ámbito de la ingeniería estructural. Ver figura 6.

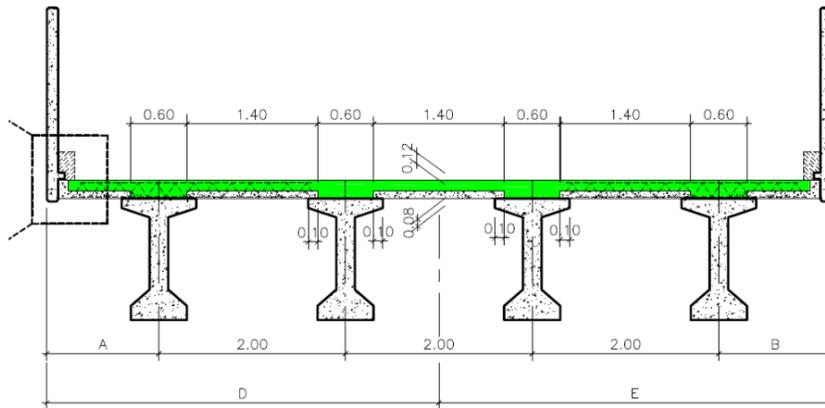


figura 6 Estructura base [15]

1.-Recolección de Información Técnica

Para desarrollar un modelo preciso, se recopilaron datos de diversas fuentes confiables:

- Dictamen Técnico de Protección Civil de la Ciudad de México: Este informe identificó el pandeo de las vigas norte y sur, facilitado por la falta de pernos Nelson, como la causa principal del colapso. [16]
- Informe de la empresa noruega Det Norske Veritas (DNV): Señaló deficiencias en la soldadura de pernos, falta de pernos funcionales y deformaciones estructurales como factores críticos. [16]
- Artículo en ResearchGate: Analiza el colapso desde una perspectiva de ingeniería estructural, destacando errores de diseño y construcción, así como la falta de mantenimiento. [17]
- Estudio del Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM): Identificó deficiencias en el proceso de construcción, incluyendo pandeo, corte, torsión, desplazamiento y desgarro en los apoyos.
- Evaluación de riesgos geológicos: Utilizando datos de radar satelital y análisis de ingeniería estructural, se identificaron zonas donde la tasa de subsidencia cambia rápidamente, lo que podría haber afectado la estabilidad de la estructura. [18]

2.- Modelado Geométrico en ANSYS:

Se procedió a la creación de un modelo tridimensional del tramo colapsado utilizando el software ANSYS. El modelo incluye:

- Vigas de acero tipo cajón: Representan los elementos principales de soporte de la estructura.
- Losa de concreto reforzado: Simula la plataforma sobre la cual se desplazaban los trenes.
- Conectores de cortante (pernos Nelson): Elementos críticos para la transferencia de esfuerzos entre la losa y las vigas.
- Apoyos y columnas: Reproducen las condiciones de soporte y restricción de la estructura.

La geometría se basó en planos estructurales disponibles y en información proporcionada por las fuentes mencionadas.

3.- Definición de Propiedades de Materiales

Acero Estructural ASTM A572 Grado 50

El acero ASTM A572 Grado 50 es ampliamente utilizado en estructuras de puentes y edificios debido a su alta resistencia y buena soldabilidad. Las propiedades mecánicas asignadas en el modelo son: [19]

- **Módulo de elasticidad (E):** 200 GPa
- **Límite elástico:** 345 MPa (50 ksi)
- **Resistencia a la tracción:** 450 MPa (65 ksi)
- **Coefficiente de Poisson:** 0.3 [20]

Concreto Reforzado

Para el concreto reforzado, se consideraron las siguientes propiedades mecánicas:

- Módulo de elasticidad (E_c): 25 GPa
- Resistencia a la compresión (f_c): 30 MPa

- Relación de Poisson: 0.2

El módulo de elasticidad se calculó utilizando la fórmula empírica propuesta por el American Concrete Institute (ACI [21])

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c}$$

Donde f'_c es la resistencia a la compresión en MPa. Sustituyendo $f'_c = 30$ MPa:

$$E_c = 4700 \sqrt{30} \approx 25,740 \text{ MPa}$$

Este valor se aproxima a 25 GPa, como se utilizó en el modelo. La relación de Poisson de 0.2 es un valor típico para concretos normales y se encuentra respaldado por estudios experimentales.

Pernos Nelson (Conectores de Cortante)

Los pernos Nelson son esenciales para la transferencia de esfuerzos entre la losa de concreto y las vigas de acero. Las propiedades asignadas en el modelo son:

- Diámetro: 19 mm
- Resistencia a la tracción: 450 MPa
- Resistencia al corte: 400 MPa. [22]

Estos valores se basan en las especificaciones técnicas de pernos Nelson, que indican una resistencia a la tracción mínima de 450 MPa y una resistencia al corte de aproximadamente 400 MPa.

4.- Aplicación de Cargas y Condiciones de Frontera

Se aplicaron las siguientes cargas al modelo:

- Carga muerta: Peso propio de la estructura, determinado automáticamente por ANSYS.
- Carga viva: Simulación del paso de trenes con una carga distribuida de 20 kN/m.

- Cargas dinámicas: Efectos de aceleración y frenado de los trenes, así como vibraciones inducidas por el tráfico ferroviario.

Las condiciones de frontera se establecieron replicando los apoyos reales de la estructura

5.-Análisis y Validación de Resultados

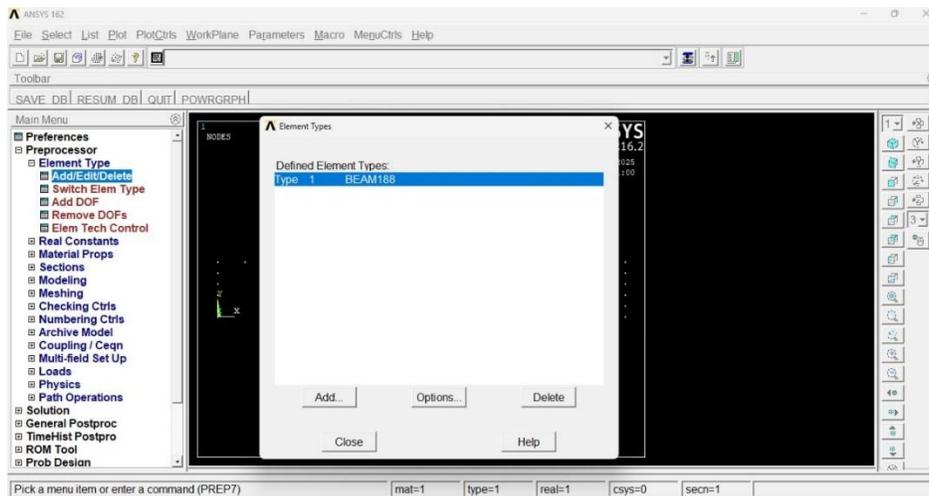
Se realizaron análisis estáticos y dinámicos para evaluar las respuestas de la estructura por ejemplo:

- Identificación de zonas con concentraciones de esfuerzos: Se detectaron áreas críticas con altos niveles de esfuerzo, coincidentes con las zonas de falla reportadas en los informes periciales.
- Detección de modos de falla: Se observaron modos de falla como pandeo lateral, torsión y fractura en las uniones soldadas.
- Comparación de los resultados con los hallazgos de los informes periciales: Los resultados obtenidos fueron comparados con los hallazgos de los informes oficiales para validar el modelo y ajustar las condiciones de simulación para mejorar la precisión.

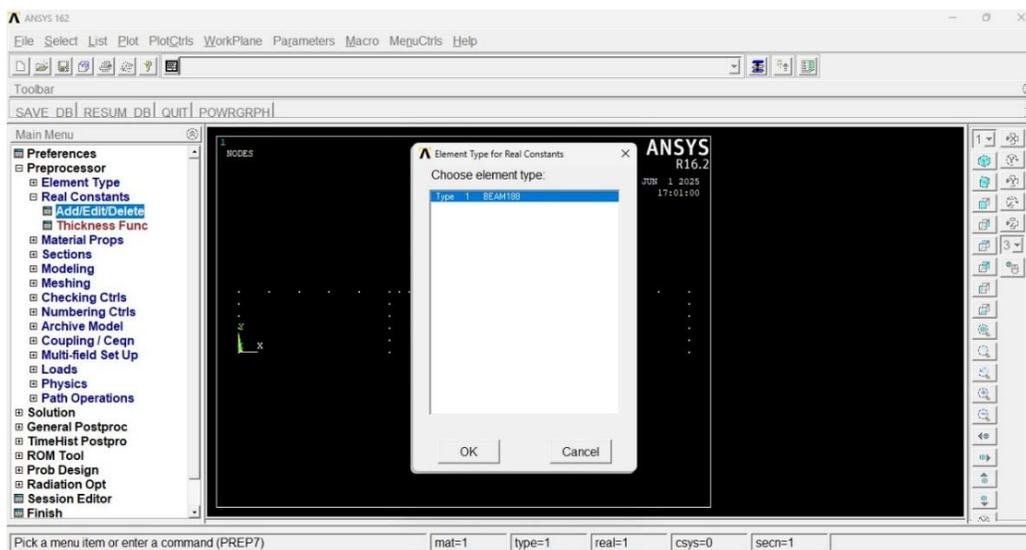
Productos comprometidos

En esta parte presentaremos la simulación del puente colapsado de la línea 12 del metro realizado en ANSYS, explicando en cada imagen lo ocurrido.

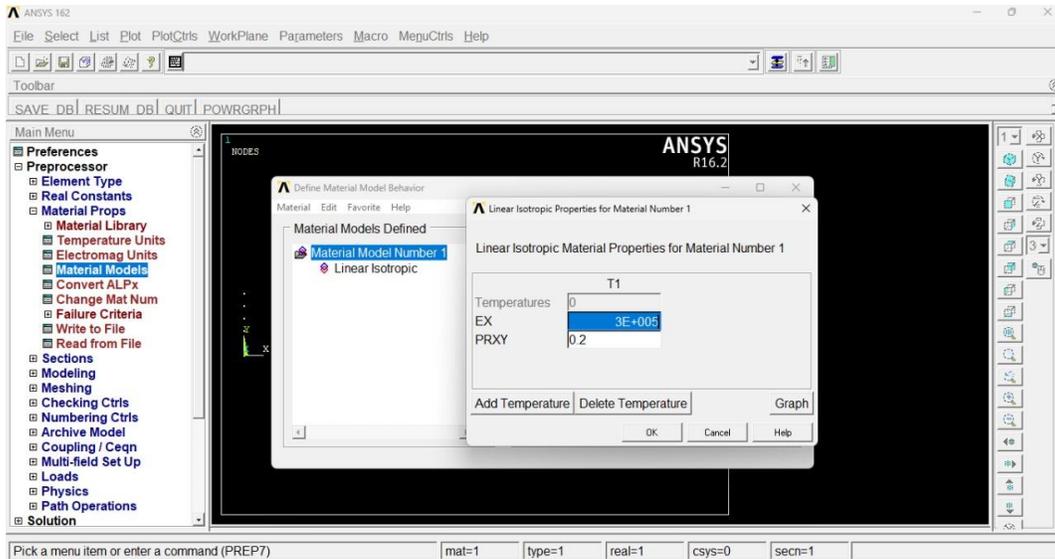
A continuación, en la siguiente imagen seleccionamos preprocessor después seleccionamos element type y le damos clic en add/edit/delete, y seleccionamos beam 188 y le damos ok.



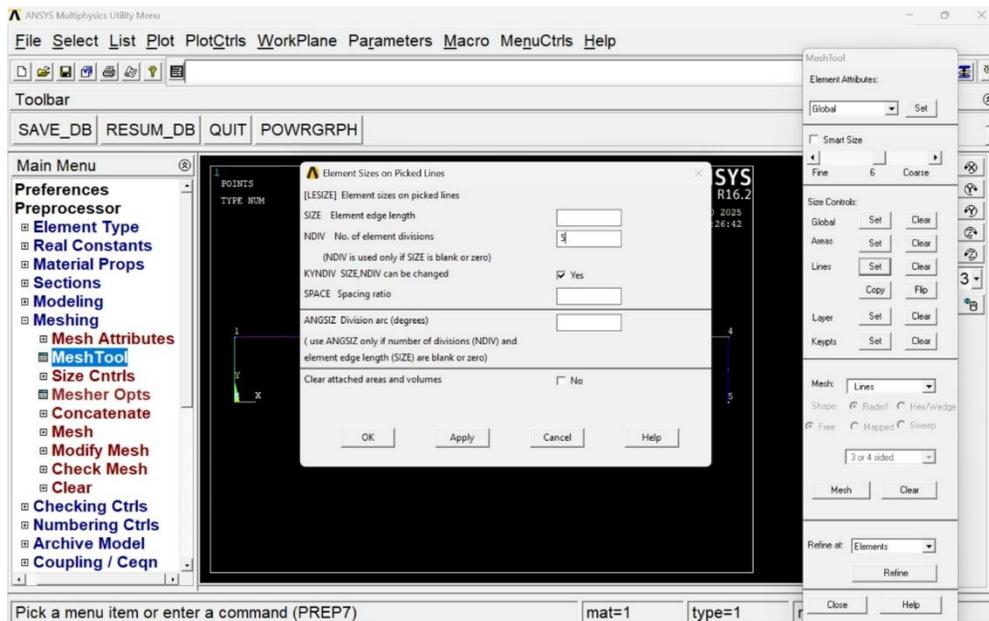
Posteriormente en la siguiente imagen seleccionamos preprocessor acto seguido le damos clic en real constants después add/edit/delete y checamos que aparezca el valor y le damos ok.



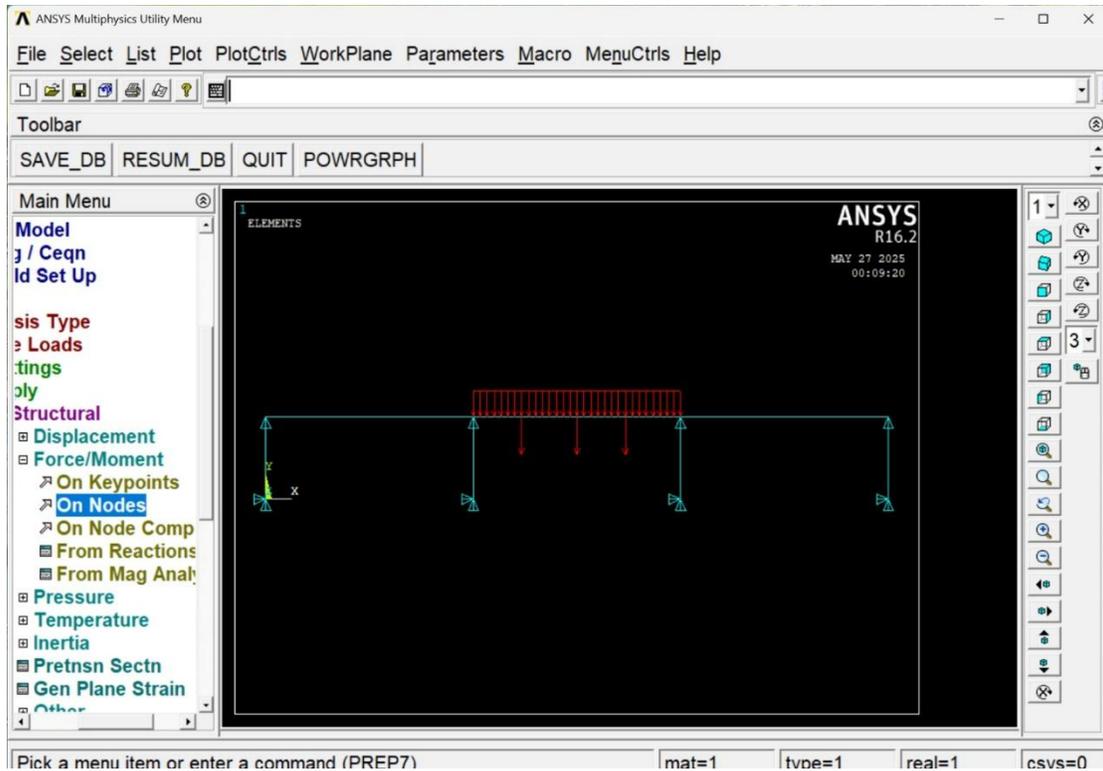
En la siguiente imagen se muestran las propiedades del material del puente de la línea 12 del metro de la cdmx para esto nos dirigimos a preprocessor después seleccionamos material props y seleccionamos material models, en EX 3E+005 y en PRXY 0.2.



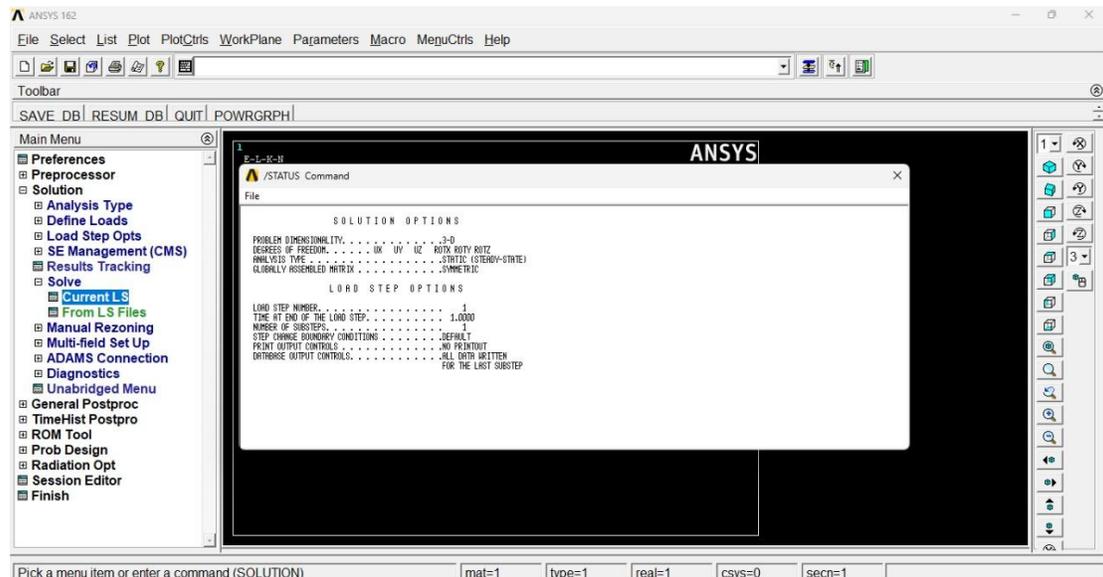
A continuación, en la siguiente imagen que se presenta nos dirigimos a preprocessor después a meshing y luego le damos clic en mesh tool y agregamos el valor 5 y le damos en ok.



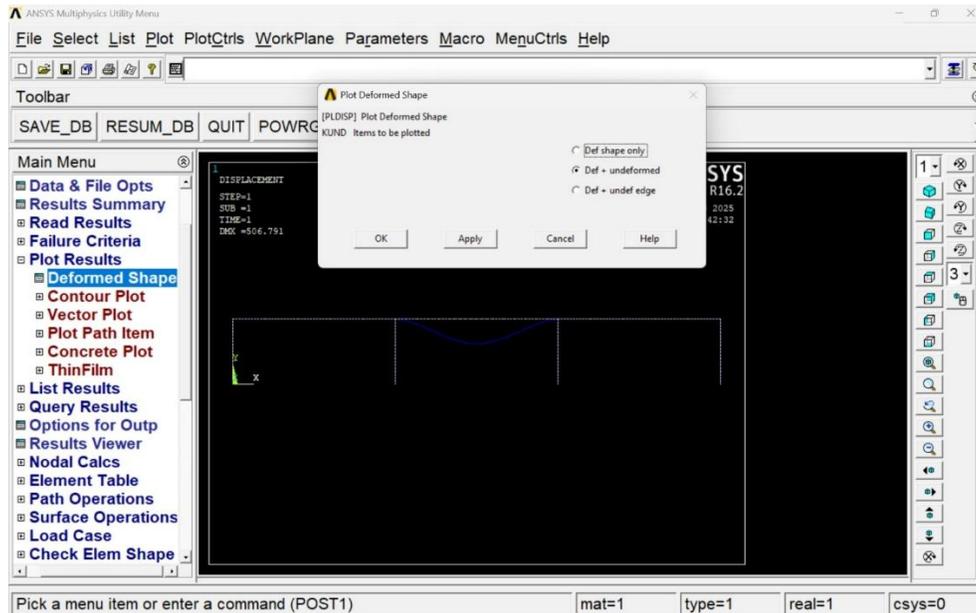
En la siguiente imagen se muestra la imagen del puente luego de a verle aplicado las cargas en los puntos 11,9 y 10 esos puntos se ubicaron en esa parte porque fue donde ocurrió el colapso.



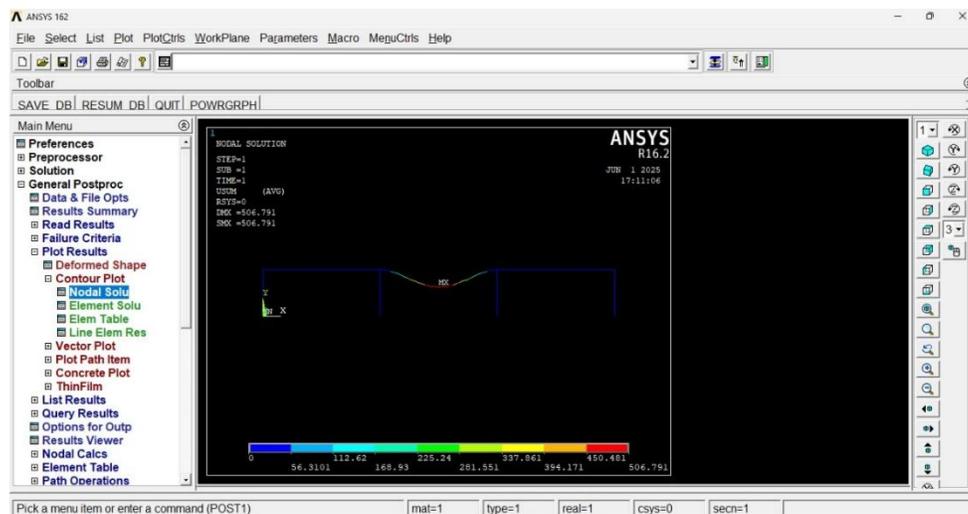
Acto seguido le damos clic en solution despues en solve y le damos en current ls y checamos la solucion que este bien.



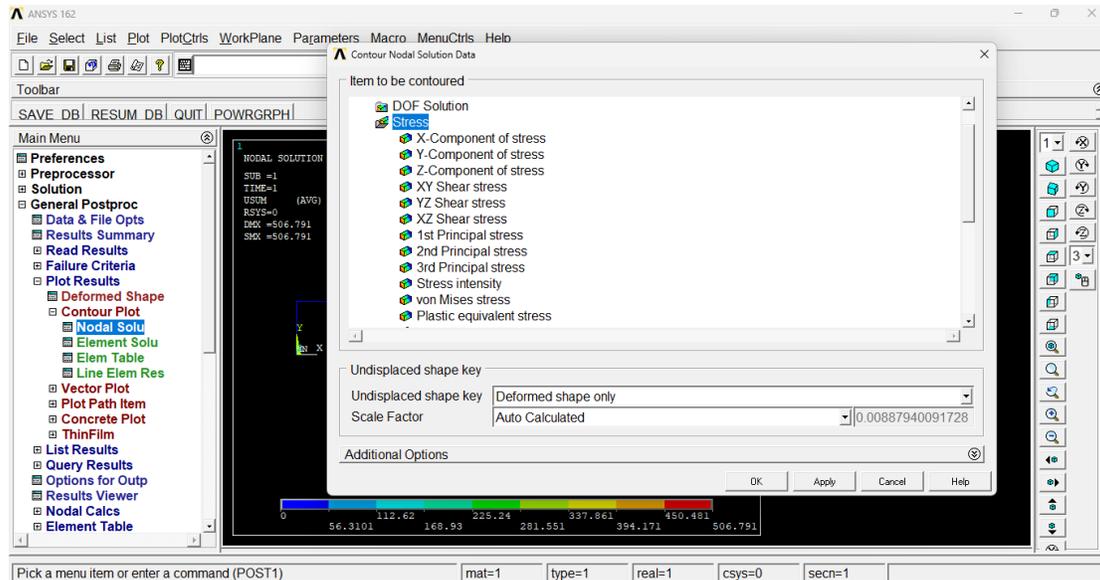
Acto seguido se presenta la siguiente imagen seleccionamos general postproc y de ahí le damos clic en plot results de hay le damos en deformed shape senos desplegara una ventana y seleccionamos def + undeformed y le damos en ok en esta parte del puente podemos apreciar en que parte del puente ocurre la deformación.



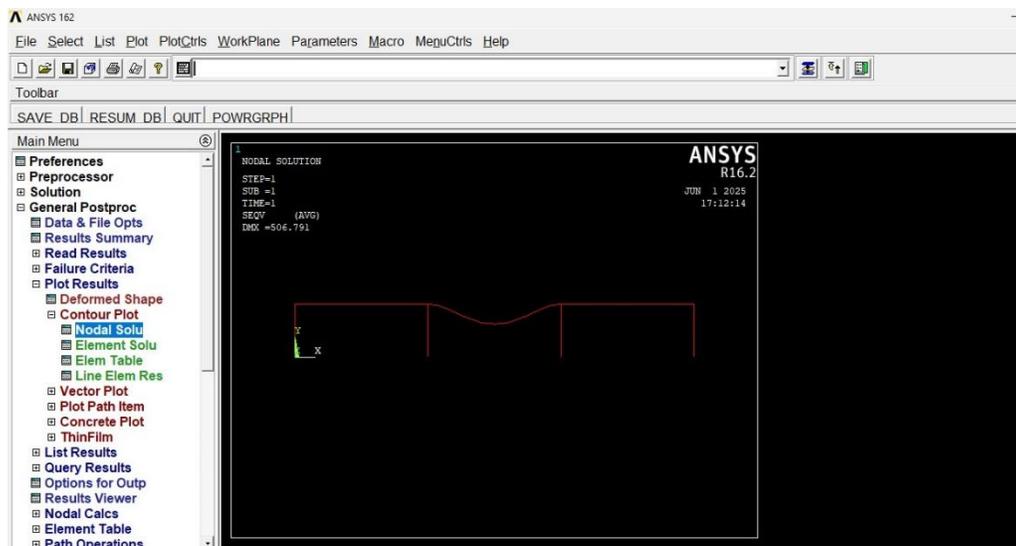
En la siguiente imagen que se presenta a continuación se presenta la solución del problema del puente colapsado de la línea 12 del metro de la cdmx, en esta parte del puente que se presenta el colapso ocurrió en la parte de en medio, las condiciones por la cual se presentó el colapso se debieron a la mala calidad de los materiales, y lo que influyo de igual manera a que colapsara el puente fue el peso de las personas, el peso de los vagones que transitaban del tren que transitaban por la zona.



De igual manera en la siguiente seccionamos general postproc después plot results y de hay le damos clic en contour plot seguidamente seleccionamos nodal solu y se desplegara una ventana seleccionamos stress y de hay le damos clic en von mises stress.



En la imagen que se muestra a continuación se presenta el puente de la línea 12 del metro de la cdmx una ves que se le aplico von mises stress.



Acto seguido se presenta los datos de tabla del problema del puente de la línea 12 del metro de la cdmx.

```

PRRSOL Command
File
PRINT REACTION SOLUTIONS PER NODE
**** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING ****
LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0
THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM

```

NODE	FX	FY	FZ	HX	HY	HZ
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.10650E+07	0.0000	0.10416E-09	-0.50747E-09	0.62780E+07
12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
32	0.0000	0.10650E+07	0.0000	0.10416E-09	-0.50747E-09	0.62780E+07
37	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
42	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
47	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

```

TOTAL VALUES
VALUE 0.0000 0.21300E+07 0.0000 0.20832E-09 -0.31019E-24 0.27940E-08

```

En esta parte mostrare el factor de seguridad obtenido del puente de la línea 12 del metro de la cdmx una vez que sufrió el colapso.

Se utilizo la siguiente formula para calcularlo la cual es:

$$FS = \frac{\text{Limite de fluencia}}{SEQV \text{ maximo}}$$

Dando como resultado la siguiente operación:

$$\frac{20}{0.10270 \times 10^7} \approx 19.48$$

Ese dato que obtuvimos es nuestro factor de seguridad del puente de la línea 12 del metro de la cdmx el cual es 19.48

Se consultaron artículos científicos de caídas de puentes para saber que tipo de materiales fueron los que utilizaron para hacer sus simulaciones en el software ANSYS a un que los resultados de la simulación no son los mismos que la simulación que presentamos el procedimiento con el cual se llevo a cabo es parecido a nuestra simulación empleada:

Evaluación del comportamiento estructural de un puente peatonal de eje curvo:

Este trabajo nos sirvió como guía para nuestra simulación ya que en la simulación que emplearon en este trabajo el tipo de material y las propiedades de los materiales son similares a los que empleamos en nuestra simulación de el colapso del puente de la línea 12 del metro, a un que los resultados de este trabajo no sean los mismos que el de nosotros el procedimiento que llevaron acabo es similar al que nosotros empleamos.

En esta simulación del colapso de la línea 12 del metro de la cdmx hubo muchas fallas desde de la apertura de esta línea las cuales eran los tipos de materiales que se utilizaron para la elaboración de esta obra no fueron los adecuados al igual el concreto con el que estaban hechos los soportes que sostenían el puente presentaban grietas esto por que no se realizo un estudio de suelo antes de la realización de esta obra el suelo de esa zona presentaba hundimiento cuando empezó operar todos estos factores que se comentan este trabajo fueron los causantes de que el puente de la línea 12 colapsara causando varias muertes que hasta la fecha los encargados de esa gran obra nose an echo responsables.

Otro trabajo que se consultó que fue de guía para nuestro trabajo es:

Identificación de parámetros modales de un puente atirantado mediante modelos experimentales y de elementos finitos

Este trabajo al igual que el anterior nos sirvieron como guía para poder llevar acabo nuestra simulación ya que en este trabajo emplearon factores parecidos al que nosotros empleamos los cuales son viga principal (beam188), Torres (beam188), Tirantes (link180) estos factores que emplearon ellos para la realización de su puente a un que no son los mismos que nosotros empleamos sirvieron como guía para la realización de nuestra simulación y la obtención del resultado, estos trabajos que se consultaron a un que no emplean los mismo materiales que empleamos nosotros y el resultado es distinto, nos pudimos guiar para poder obtener nuestros resultados del colapso de la línea 12 del metro de la cdmx .

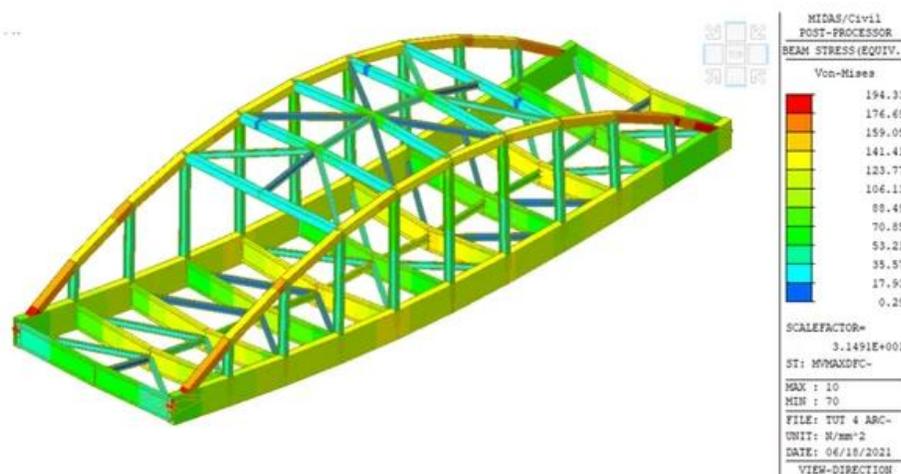
Lo que se llevo a cabo en este trabajo fue una simulación en el software ANSYS para ver en que punto del puente ocurrió el colapso y los factores que influyeron para que ocurriera este suceso al igual se presentaron los resultados obtenidos de nuestra simulación, tomando como referencia artículos que trataran de caídas de puentes y los factores que los llevaron a colapsar así fue como pudimos llevar a cabo este trabajo.

Al igual se consulto el siguiente articulo científico el cual habla sobre el estrés de von mises, esto nos sirvió como guía y referencia de como hacer nuestro puente de la línea 12 del metro de la cdmx que colapso.

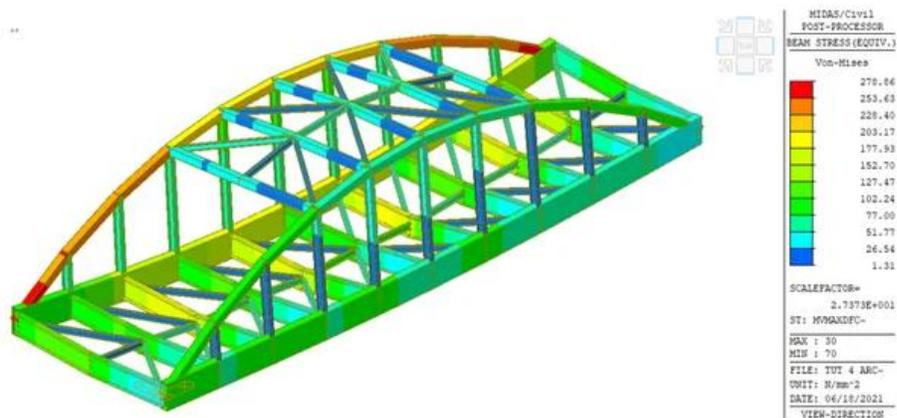
Tensiones de von Mises: Importancia física y aplicación en puentes de acero

Este artículo nos fue de gran ayuda ya que pudimos observar como es que se emplea el estrés de von mises en un puente ya que nuestro trabajo trata sobre el colapso de la línea 12 del metro de la cdmx y observamos que tienen similitud en unas cosas por eso de que nos sirvió para comparar aquí ello usaron lo siguiente en este articulo también se empleo el factor de seguridad del puente que se muestra a continuación:

La tensión de Von-Mises para la viga larguero cerca del centro del vano (contorno amarillo oscuro) es de 159 N/mm^2 inferior al valor del límite elástico. Por lo tanto, el diseño es seguro. Sin embargo, se podría revisar la sección para considerar un factor de seguridad más alto.



La tensión de Von-Mises para el arriostramiento transversal cerca del centro del vano (contorno verde pálido) es de 152 N/mm^2 , menor que el valor del límite elástico. Por lo tanto, el diseño es seguro. Sin embargo, es evidente que la tensión de Von-Mises para el elemento arco cerca del soporte es mayor que el límite elástico, por lo que es necesario revisar la sección.



En resumen, un ingeniero debe mantener el valor máximo de la tensión de Von-Mises inducida en el material menor que su límite elástico.

Antes de que la investigación de Von-Mises analizara el ensayo de tracción de materiales dúctiles, era evidente que la falla se debía al esfuerzo cortante, no a la torsión. Tanto la teoría del esfuerzo cortante máximo ($N = \sigma_{ys} / \tau_{max}$) como la teoría de esfuerzos de Von-Mises ($N = \sigma_y / \sigma'$) son adecuadas para calcular el factor de seguridad contra fallas. Sin embargo, la teoría del esfuerzo cortante máximo es un poco más conservadora que la teoría de esfuerzos de Von-Mises.

En esta parte de este trabajo ellos aplicaron von mises para poder conocer el factor de seguridad de su puente que se mostro hace un momento este trabajo nos fue de gran ayuda ya que lo que ellos realizaron en el trabajo que se acabo de mostrar es similar a lo que nosotros presentamos los resultados que se obtuvieron son distintos pero el procedimiento que se estuvo siguiendo es casi el mismo y con esto damos por concluido nuestro trabajo del colapso de la línea 12 del metro de la cdmx que dejo varias muertes ya que antes de poner en marcha el tren debieron de investigado mejor el tipo de calidad de materiales que utilizaron para

dicha obra ya que a unos días de su apertura la línea 12 ya presentaba fallas como lo herarn grietas en el hormigón y la falta de pernos en unas partes del puente todos estos factores que se iban presentando fueron los causantes de que dicho puente colapsara y se diera la muerte de varias personas.

En general nuestro trabajo buscaba simular el colapso del puente de la línea 12 del metro de la cdmx en el software ANSYS para poder observar las causas del colapso al igual las cargas que estaban actuando eran las de los bajones y el peso de las persona a la hora que ocurrió el colapso todos estos factores fueron los que se calcularon en el software al igual calculamos el estrés de von mises y el factor de seguridad del puente en este trabajo.

CONCLUSIÓN

El colapso de la sección elevada de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México representa un evento crítico que pone en evidencia la importancia de realizar análisis estructurales detallados bajo condiciones reales de operación y considerando la degradación por fatiga a lo largo del tiempo. El estudio de esta falla no debe limitarse únicamente a encontrar responsables, sino a comprender a fondo los mecanismos estructurales que llevaron a la pérdida de integridad del sistema, con el fin de evitar tragedias similares en el futuro.

El análisis estructural bajo cargas reales permite evaluar el comportamiento de la estructura en condiciones similares a las que experimentó durante su vida útil, proporcionando una visión más precisa del desempeño de sus elementos. Cuando este enfoque se complementa con un estudio de la fatiga de los materiales que considera el efecto acumulativo de las cargas cíclicas se obtiene una perspectiva integral del deterioro progresivo que pudo haber debilitado la resistencia original del sistema. Las vibraciones constantes, las variaciones de carga, las fallas en la soldadura y el desgaste por uso son factores que, aunque aparentemente menores de forma individual, pueden generar consecuencias catastróficas si no se monitorean adecuadamente.

Este tipo de análisis es crucial no solo para esclarecer los factores técnicos que provocaron el colapso, sino también para establecer nuevas pautas de diseño, mantenimiento y supervisión de estructuras públicas de alto impacto. Además, puede servir como base para actualizar reglamentos de construcción, establecer protocolos de revisión periódica y fomentar la implementación de sistemas de monitoreo estructural en tiempo real.

En conclusión, el análisis estructural de la sección colapsada de la Línea 12, bajo cargas reales y considerando la fatiga, constituye una herramienta fundamental para fortalecer la seguridad en la infraestructura urbana. La ingeniería no puede estar desligada de la ética y la responsabilidad social, y este caso subraya la necesidad de una cultura técnica rigurosa que anteponga la seguridad de la ciudadanía por encima de intereses políticos o económicos.

Referencias

[1]	9 5 2025. [En línea]. Available: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-19182024000200051&lng=es&nrm=iso#fn1 .
[2]	8 5 2025. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Silvia-Garcia-43/publication/338459725_Delimitacion_neuronal_de_zonas_geologicas_usando_ruido_sismico_Suelos_de_Transicion_en_la_linea_12_del_Metro/links/5e16585a4585159aa4bfee23/Delimitacion-neuronal-de-zonas-geologic .
[3]	V. flores, «Google academico,» 9 5 2025. [En línea]. Available: https://lasillarota.com/metropoli/2018/12/27/la-linea-12-del-metro-traves-del-tiempo-176171.html .
[4]	«Metro.cdmx,» 10 5 2025. [En línea]. Available: https://www.metro.cdmx.gob.mx/organismo/acerca-de .
[5]	«Forbes,» 10 5 2025. [En línea]. Available: https://www.forbes.com.mx/linea-12-del-metro-fallo-en-diseno-y-construccion/ .
[6]	L. P. C. y. K. Ramírez, 10 5 2025. [En línea]. Available: https://www.excelsior.com.mx/comunidad/2014/09/05/980130 .
[7]	A. D. J. A. CONTRERAS, 8 5 2025. [En línea]. Available: https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/28073/C%C3%A1lculo%20de%20los%20puntos%20de%20monitoreo%20para%20los%20movimientos%20de%20infraestructura%20en%20la%20C3%ADnea%2012%20del%20metro%20de%20la%20Ciudad%20de%20M%C3%A9xico%20por%20medio%20de .
[8]	D. V. Georgina Isunza, «Google academico,» 10 5 2025. [En línea]. Available: https://ica.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/12854/08insunza-proyeccion14.pdf .
[9]	J. G. A. ARCHUNDIA, «UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO,» 10 5 2025. [En línea]. Available: https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000687983/3/0687983.pdf .
[10]	R. Olmos, «En el desplome de la Línea 12, la impunidad es el sello del gobierno,» <i>The Washington Post</i> , CDMX, 2021.
[11]	S. Narayanan, «COLLAPSE OF THE MEXICO CITY METRO OVERPASS,» <i>Indian Association of</i> , p. 987, 1 07 2022.
[12]	S. Garcia, «Delimitación neuronal de zonas geológicas usando ruido sísmico: Suelos de,» <i>Sociedad Mexicana de</i> , Cancun, Quintana Roo, 2021.
[13]	N. ARTEAGA BOTELLO, «“Societalization and political polarization: The collapse of Line 12 of the Mexico City Metro,»» <i>mex. cienc. polít. soc [online]</i> ., vol. 69, n° 251, pp. 51-77, 2024.
[14]	L. J. B. Barajas, «The Case Method Articulating Physics with Engineering “Collapse of the Mexico City Metro Overpass,»» <i>International Journal of Higher Education</i> , vol. 6, n° 1, p. 4, 2025.
[15]	D. I. R. D. Sayán, «La tragedia de la línea 12 del metro de México,» <i>Lampadia</i> , 2021.
[16]	L. e. n. D. (. N. Veritas), «Línea 12 colapsó por pandeo de vigas ante falta de pernos, revela dictamen final,» <i>El sol de Mexico, cdmx</i> , 2021.

[17]	M. J. Goytia, «DNV Concludes Research on Line 12 Collapse,» <i>mexicobusiness.news</i> , vol. 2, nº 34, pp. 39-55, 2022.
[18]	A. B. Fattal, «Study identifies areas in Mexico City Metro affected by land subsidence,» Florida International University, florida, 2024.
[19]	«Gnee Acero (tianjín),» 2025. [En línea]. Available: https://es.cortensteels.com/carbon-steel-plates/astm-a572-steel.html?utm_source=chatgpt.com . [Último acceso: 04 05 2025].
[20]	L. Bertene, «Soluciones y Tecnologías COMPRACO,» Soluciones y Tecnologías COMPRACO, 05 2025. [En línea]. Available: https://compraco.com.br/es/blogs/especificacoes-do-aco/equivalente-de-aco-astm-a572-grau-50-gr-65-60-propriedades-resistencia-ao-escoamento-atracao?srsId=AfmBOorIM-EXqQFBPgrPBu31BtBdpvqebX4HLaBFO49yhgXBRnhZGWt0&utm_source=chatgpt.com . [Último acceso: 2025].
[21]	«scribb,» 9 05 2025. [En línea]. Available: https://es.scribd.com/document/524903432/Propiedades-mecanicas-C?utm_source=chatgpt.com .
[22]	«SkyCiv Cloud Structural Analysis,» [En línea]. Available: https://skyciv.com/es/quick-calculators/bolt-shear-strength-calculator/?utm_source=chatgpt.com . [Último acceso: 04 05 2025].