

# **REFLEXIONES DE LAS CAUSAS PROBABLES DEL COLAPSO DE LA TRABE DE ACERO DE LA LÍNEA 12 DEL METRO DE LA CDMX**

**(PUBLICADAS EN REDES SOCIALES EL 7 DE MAYO DE 2021)**

**Héctor Soto Rodríguez**

**Director General CRDIC**

Correo electrónico: [hectorsotomorgmail.com](mailto:hectorsotomorgmail.com)

# OBJETIVO

**Argumentar y fundamentar las reflexiones preliminares publicadas por el autor el 7 de mayo de 2021 referentes al colapso de la trabe de acero de la línea 12 del Metro de la CDMX, entre las estaciones de Tezonco y Olivos de la Avenida Tláhuac.**

## ACLARACIONES

**1. Las reflexiones que se fundamentan a continuación NO constituyen un DICTAMEN DE ESTABILIDAD Y SEGURIDAD ESTRUCTURAL.**

## ACLARACIONES

**2. El tema que se presenta debe tratarse con mucha responsabilidad social, ética profesional, sensibilidad y experiencia en el campo de las estructuras de acero. “No debemos ESPECULAR”, esperemos el Dictamen del colapso de la viga de acero.**

**3. La finalidad de este trabajo es compartir con el gremio de los estructuristas la experiencia práctica profesional del autor para coadyuvar en la comprensión de este lamentable suceso e impulsar y mejorar la práctica profesional de la Ingeniería Estructural para que en el futuro no vuelva a repetirse.**

## ACLARACIONES

**Esperamos que próximamente un equipo de especialistas de las diversas ramas de la Ingeniería Civil, Estructural, Sísmica, Geotecnia , Mecánica de Suelos y Forense de las sociedades técnicas mexicanas y grupos colegiados, encabezados por el Colegio de Ingenieros Civiles de México, realicen los estudios profundos, basados en pruebas físicas en laboratorios de materiales (análisis metalográfico y de fractografía), Normas Técnicas Complementarias del Reglamento vigente en la época del proyecto, parámetros de diseño, revisión de las cargas de diseño, modelos analíticos con simulaciones matemáticas y elementos finitos, revisión integral del proyecto estructural (Ingeniería estructural básica, planos de taller, errores en procedimientos constructivos, montaje, soldadura, calidad de la supervisión, bitácora, etc.), topografía, detección, análisis y reducción de riesgos (vulnerabilidad) para determinar las verdaderas causas del colapso.**

**ANTECEDENTES  
PROBLEMAS DETECTADOS EN AÑOS ANTERIORES**

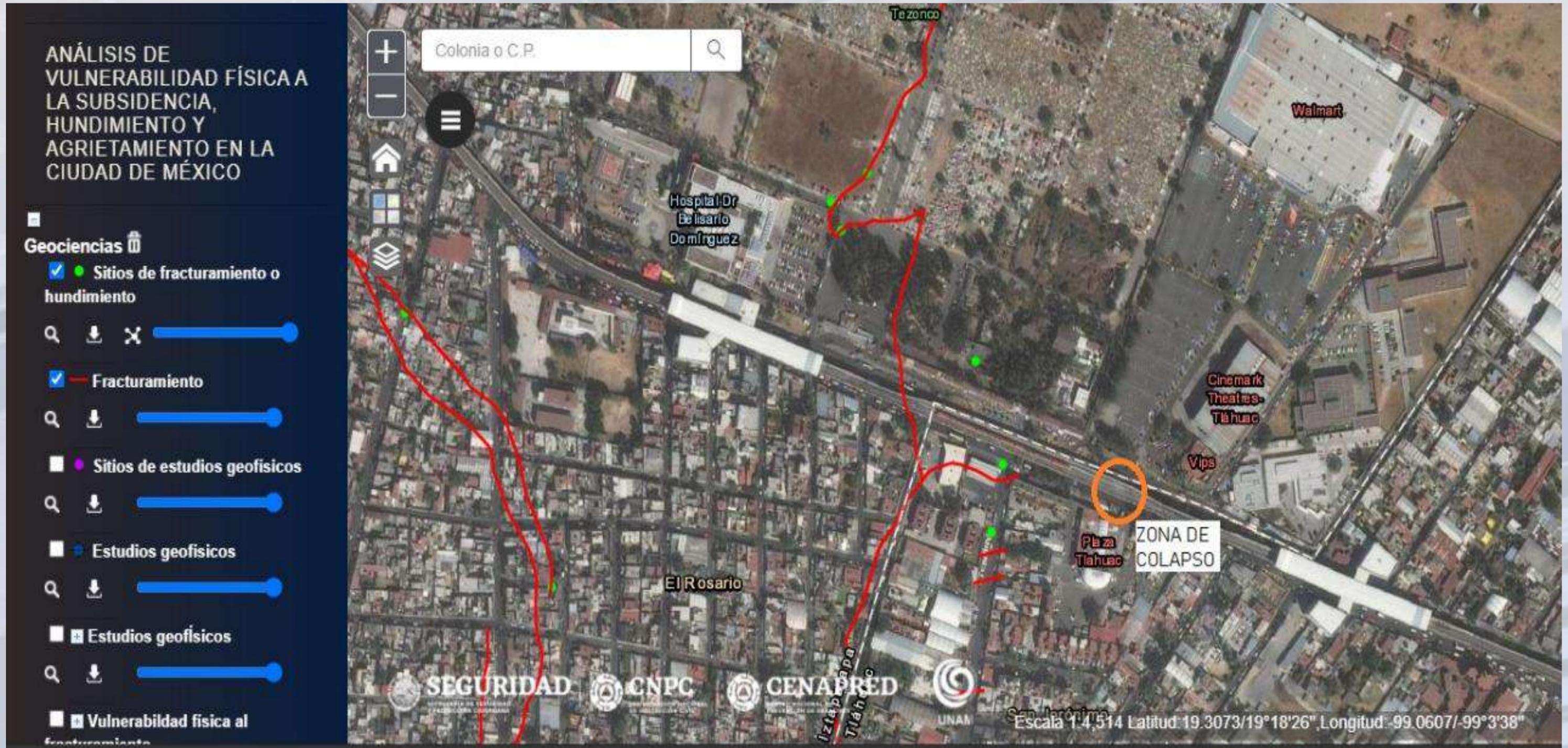
- 1. DISCREPENCIAS ENTRE PROYECTO ORIGINAL Y EJECUTIVO**
- 2. VAGONES PESADOS INCOMPATIBLES CON VÍAS**
- 2. DESGASTE ACELERADO DE VÍAS Y RUEDAS**
- 3. DAÑOS EN COLUMNAS POR EL SISMO DEL 2017**
- 4. HUNDIMIENTO REGIONAL Y AGRIETAMIENTO**
- 5. VIBRACIONES EXCESIVAS**
- 6. DESGASTE ACELERADO DE LOS RIELES**
- 7. DAÑOS EN LOS DURMIENTES**
- 8. MALA CALIDAD Y DETERIORO DEL BALASTO**

**Se recomienda ampliamente consultar:**

**1. El desastre de la línea 12, Autor: Darío Celís, El Financiero, Mayo 7, 2021**

**2. Ortega, G. (Conductor) y Gaviño, Jorge (Entrevistado). Transmisión 10 de mayo. [Noticiero] (2021, 11 de mayo). Con Ortega a las 10. El Financiero.**

# HUNDIMIENTO Y AGRIETAMIENTO ZONA COLAPSO

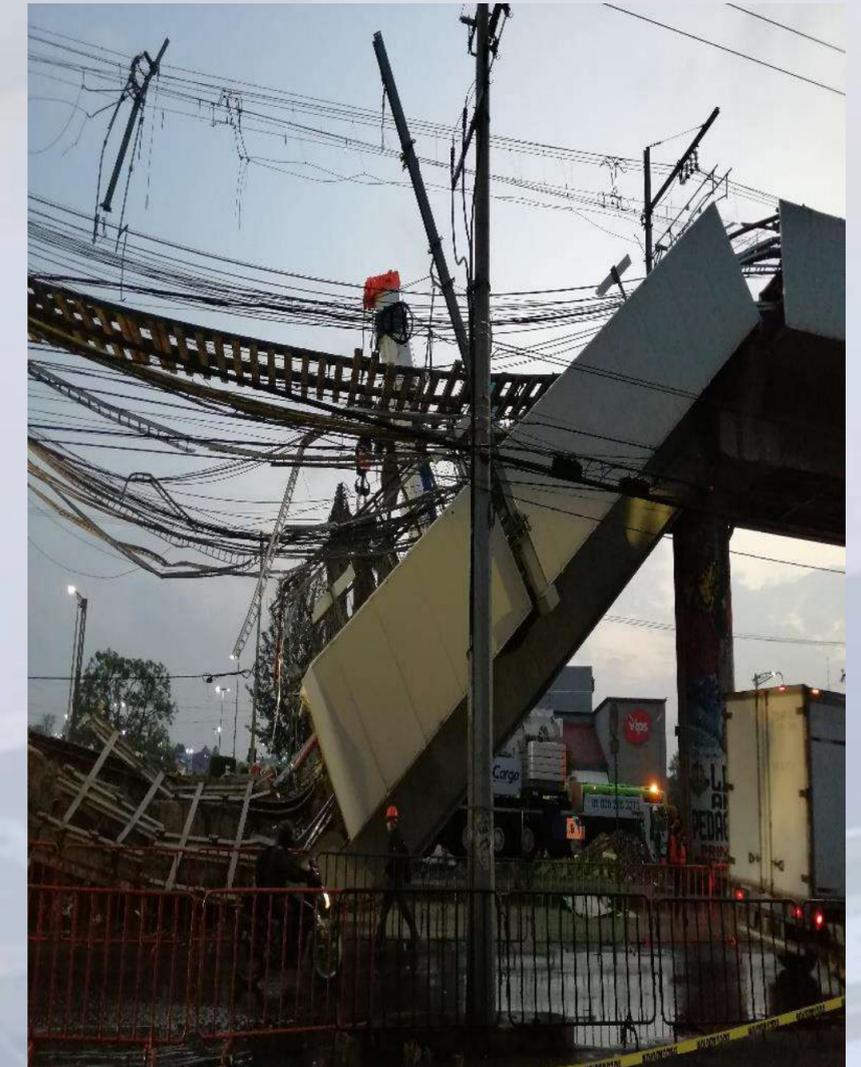


## REFLEXIÓN 1

Se rebasaron súbitamente los estados límite de falla y de servicio correspondientes a miembros sujetos a flexión, debido a las combinaciones de cargas estáticas y dinámicas. **Colapso de la viga de acero sin sismo.**



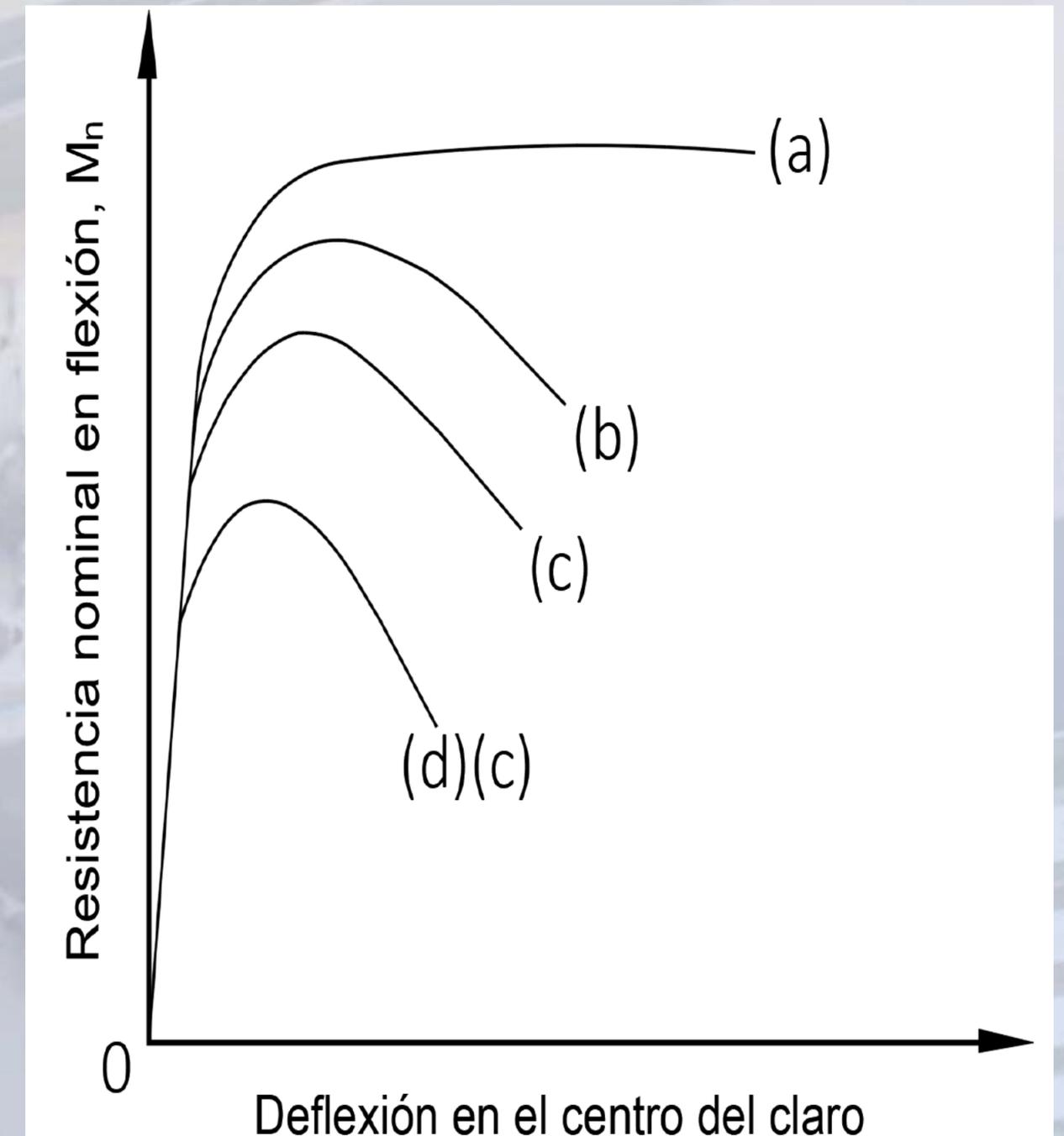
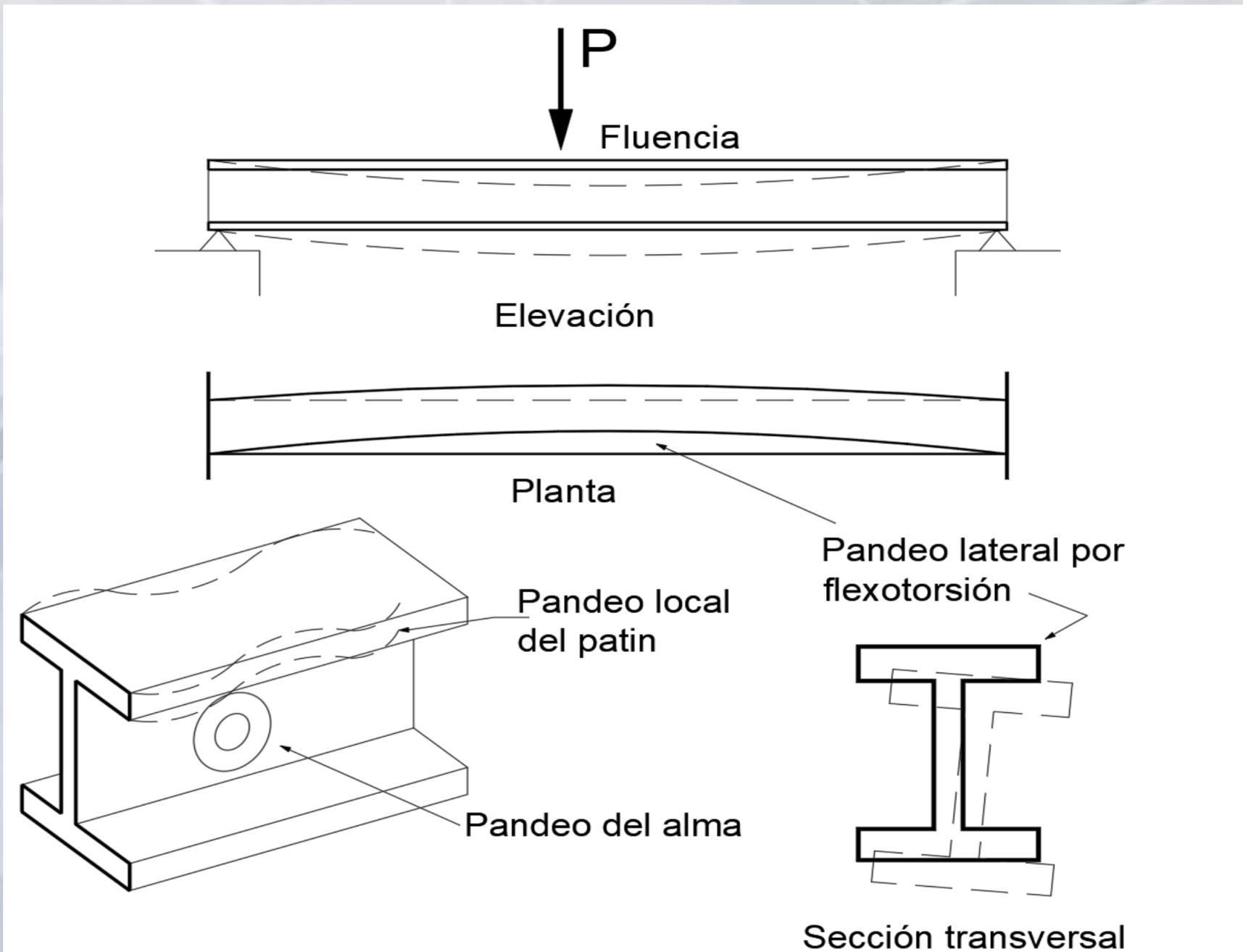
## **COLAPSO DE ESTRUCTURAS SIN SISMO**



**ERRORES?. Que está pasando?**

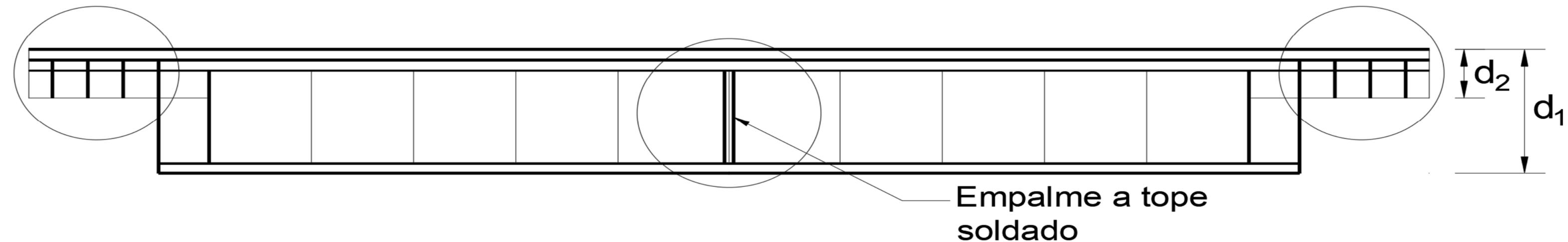
**Estudios de ingeniería insuficientes, conceptualización estructural errónea, evaluación incorrecta de las acciones, diseño estructural inadecuado, detallado, fabricación, montaje y supervisión sin calidad?**

## MODOS DE FALLA DE VIGAS



## REFLEXIÓN 2

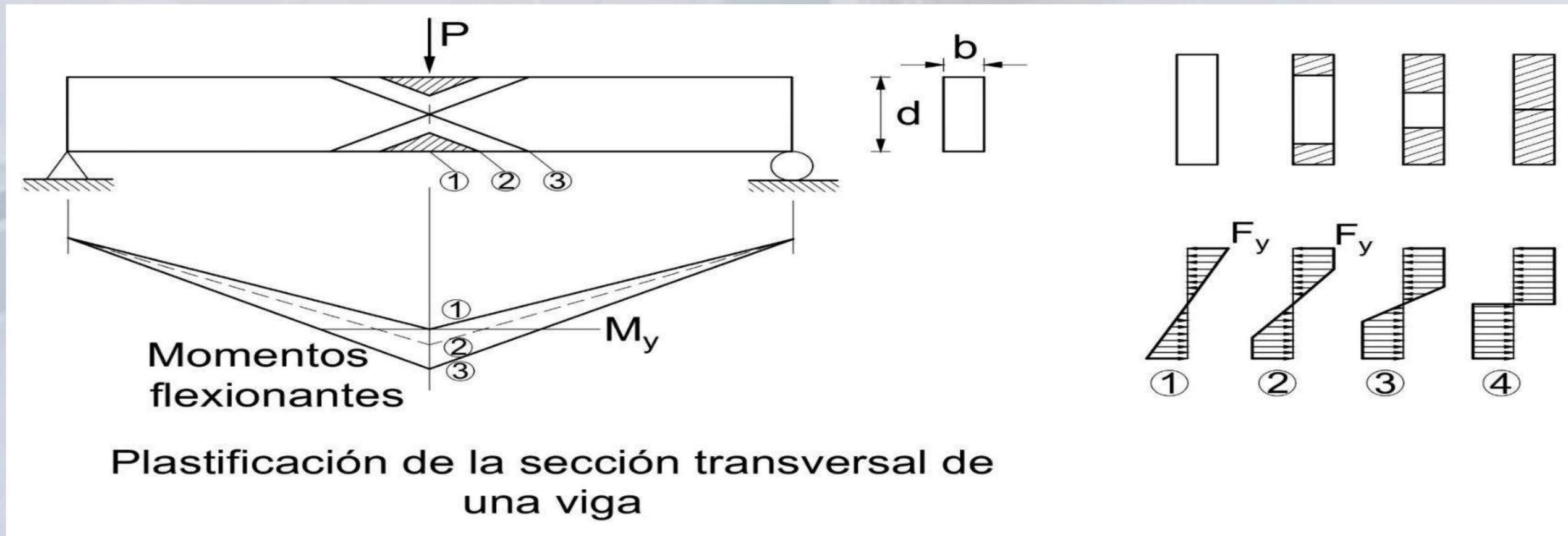
**Se enfatiza que los puntos críticos de la trabe soldada IS son la sección central y los apoyos**



**Deben revisarse los apoyos de neopreno que no se hayan deteriorado con el medio ambiente y tiempo.**

### REFLEXIÓN 3

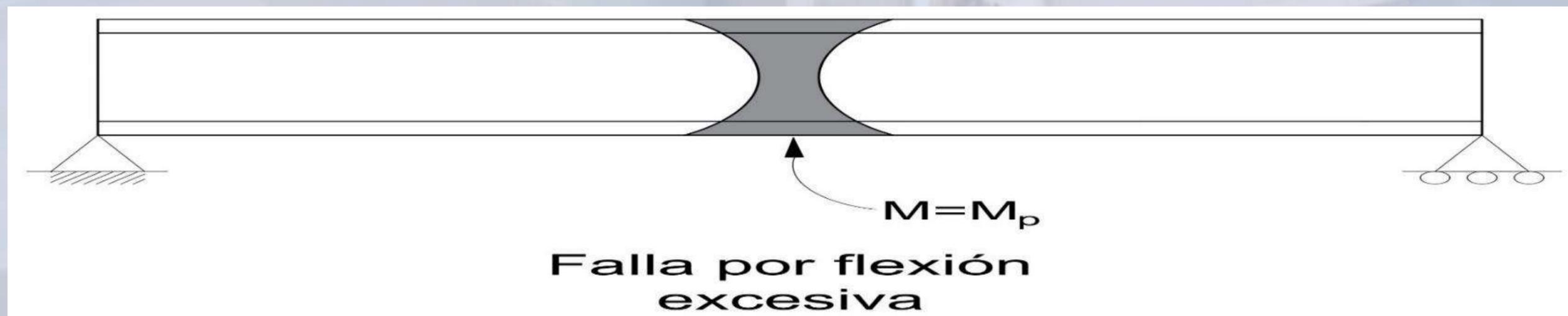
La falla de la trabe de acero se debió al agotamiento de la resistencia en flexión en la sección crítica (sección central).



Las combinaciones de cargas gravitacionales y dinámicas modificaron el comportamiento de la viga basado en la Teoría Plástica simple. **LA VIGA NO SE COMPORTÓ DE MANERA DÚCTIL.**

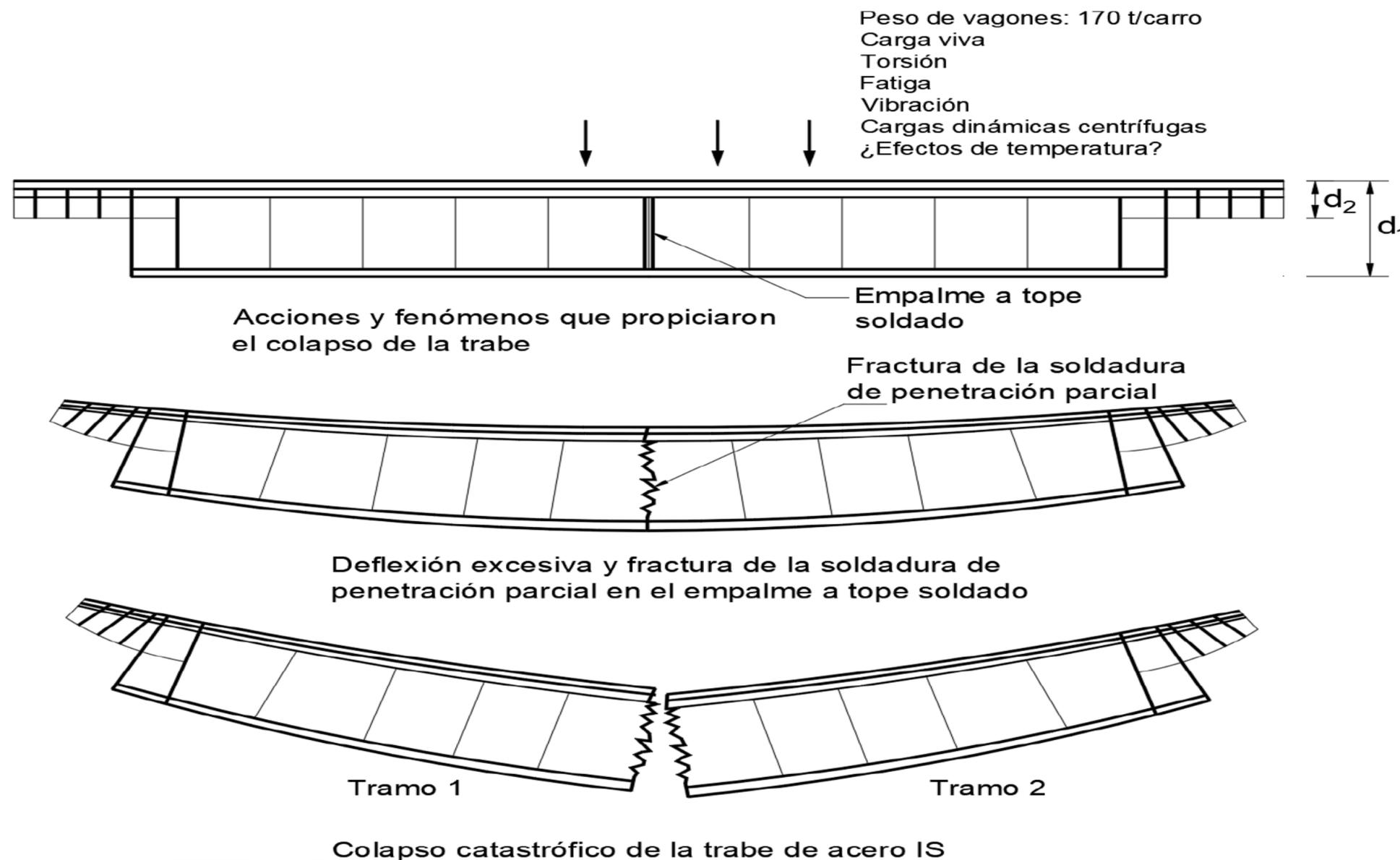
## REFLEXIÓN 4

**Debido a las condiciones de apoyo de la viga (libremente apoyados) no admiten redistribución de momentos y basta que se forme una sola articulación plástica para que ocurra el mecanismo de falla de la viga. Se está considerando en esta afirmación que no hay continuidad entre tramos de vigas y que las acciones dinámicas modificaron esta teoría.**



## REFLEXIÓN 5

Se subestimaron las cargas de diseño en la trabe de acero: peso de vagones, cargas vivas móviles, cargas de impacto, frenado, fatiga, fuerzas centrífugas y posiblemente efectos de temperatura.



## **COLAPSO CATASTRÓFICO SUBITO**



**“El análisis de la evidencia física es la principal fortaleza de la Ingeniería Estructural”**

## **COLAPSO CATASTRÓFICO SÚBITO**



**Recientemente, algunos colegas del medio han opinado que probablemente la trabe de acero estuvo sujeta a temperaturas elevadas ocasionadas por un incendio previo al colapso y que se debieron a la falla de un transformador que alimenta energía eléctrica a las vías por medio de vigas secundarias diagonales que soportan postes y que se apoyan en el centro del claro de la trabe donde justamente se ubica el empalme soldado a tope.**

**Por el momento, esta opinión no considerada por el autor, se toma con reserva hasta que no se realice el Dictamen de Estabilidad y Seguridad Estructural de la trabe de acero por parte de los especialistas.**

## REFLEXIÓN 6

Se descarta que el modo de falla de la trabe haya sido el pandeo lateral por flexotorsión, ya que el mecanismo de colapso se presenta en el plano sin desplazamiento lateral ni torsión de las secciones transversales de la trabe.

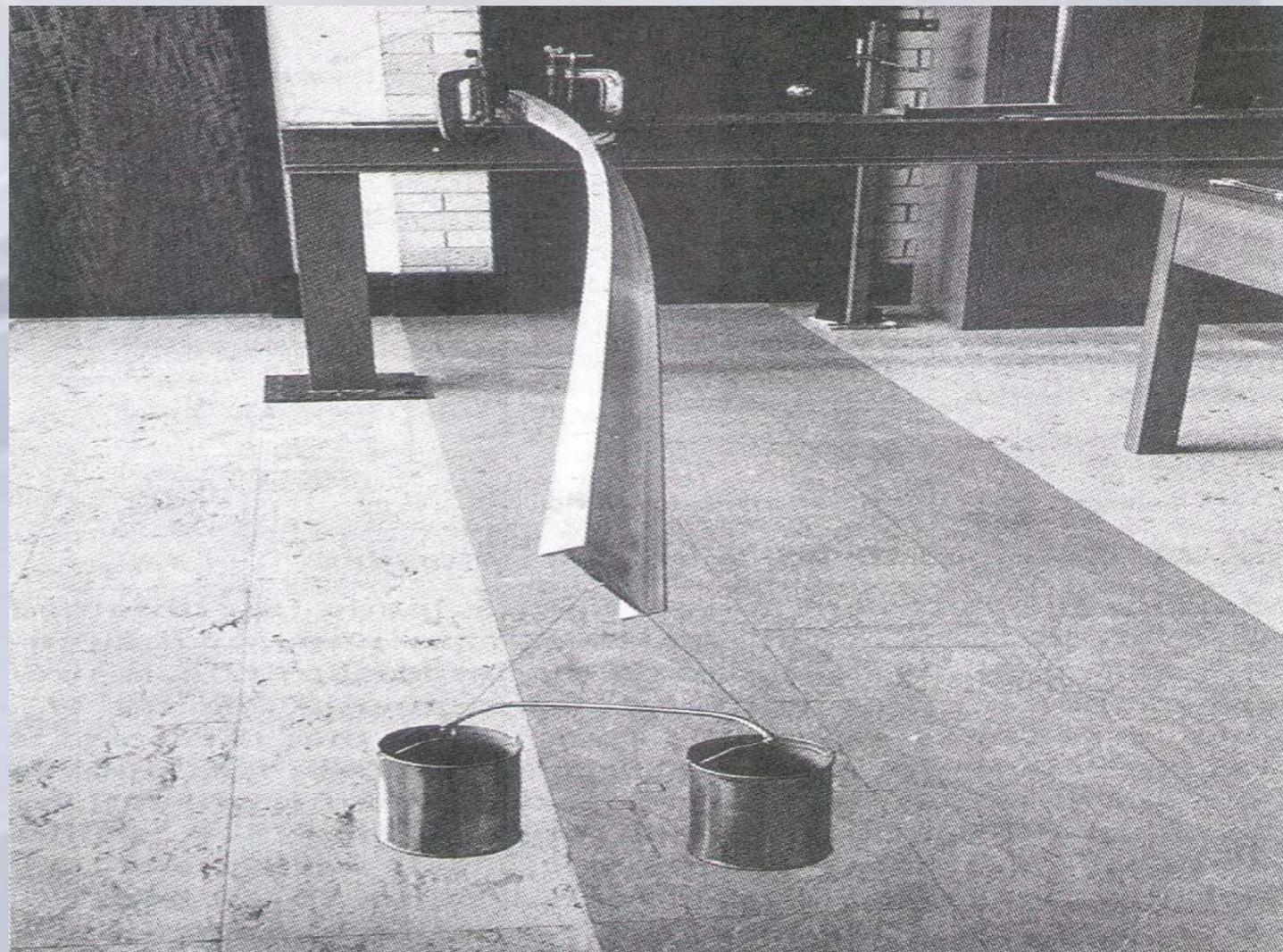
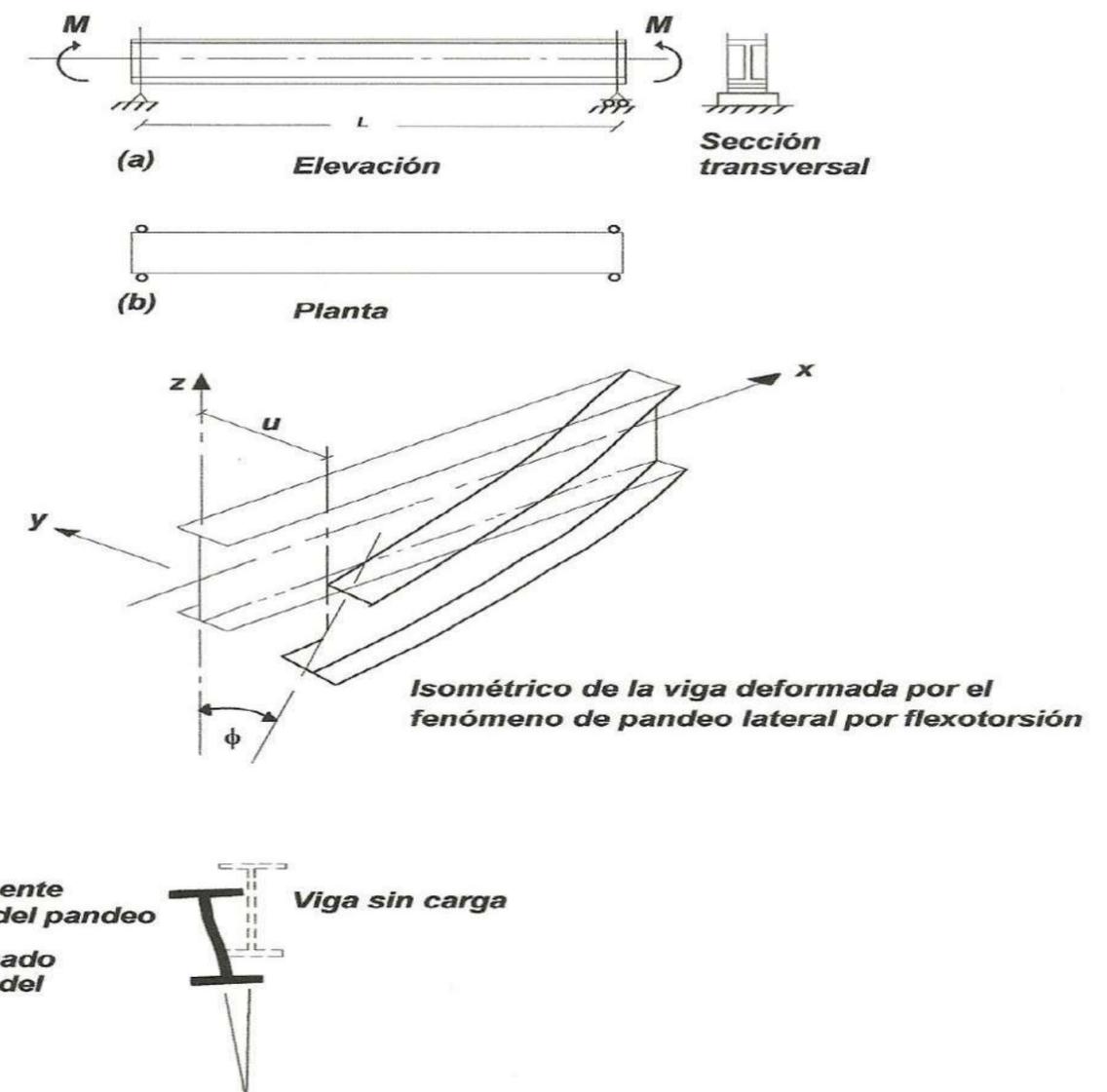
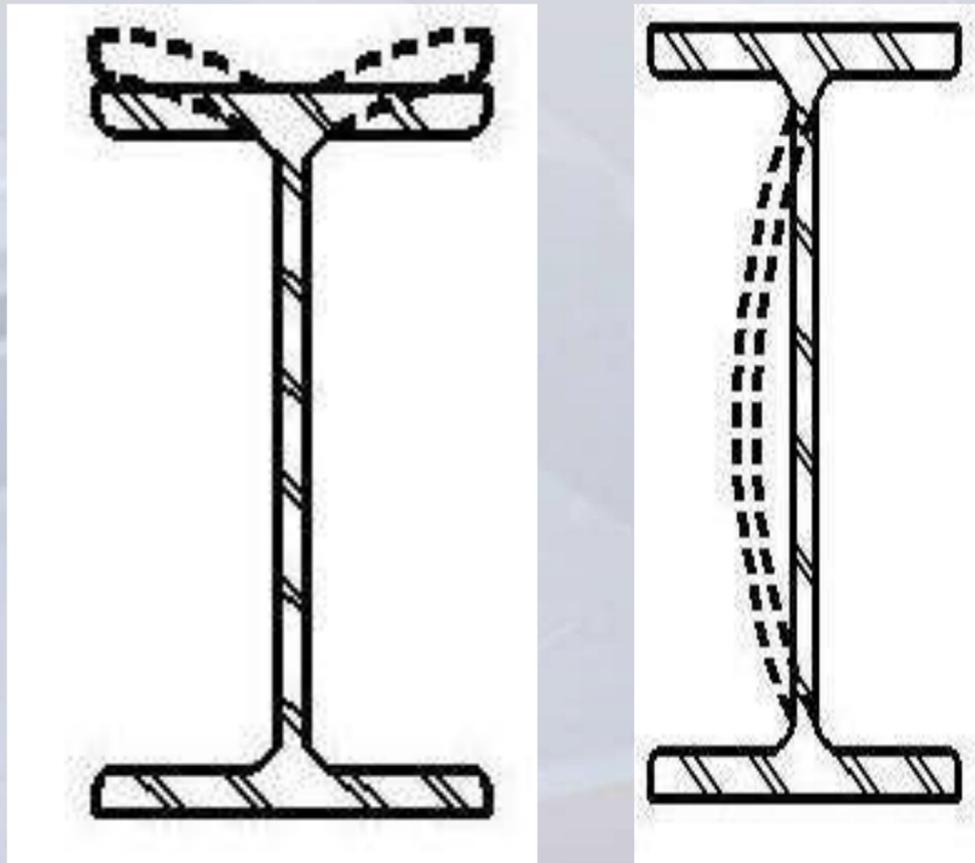


Fig. 22. Lateral-torsional buckling of cantilever beam.



## REFLEXIÓN 7

**Se eliminan los modos de falla de pandeo local de patines y del alma debido al colapso instantáneo de la trabe.**



**Pandeo local de patines y del alma**



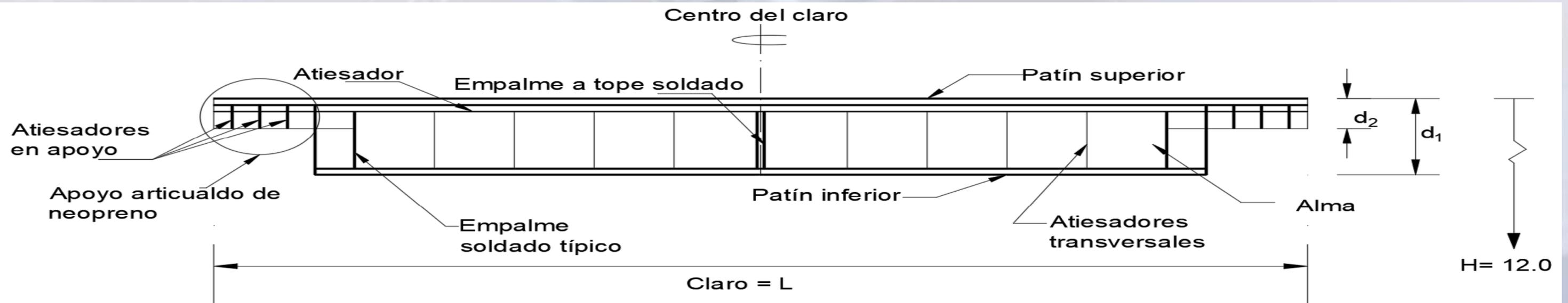
## REFLEXIÓN 8

Se descartan modos de falla por cortante correspondientes a traveses armados soldados provistas de atiesadores transversales en el alma. Parece ser a simple vista que la separación de los atiesadores transversales es adecuada para que se forme el campo de tensión diagonal.



## REFLEXIÓN 9

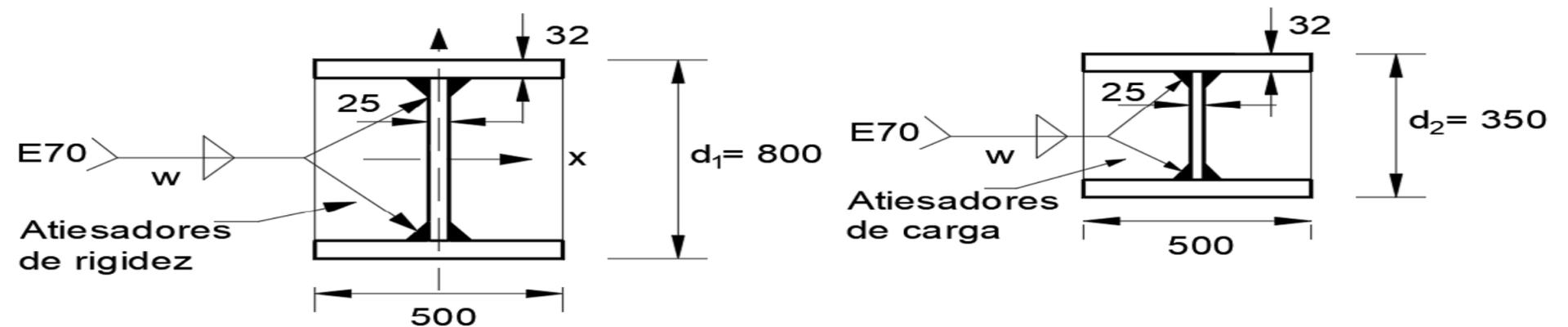
**Deben revisarse los tipos de acero de la trabe y las dimensiones de su sección transversal. Así mismo, la relación claro/peralte. Las dimensiones de la viga se han supuesto.**



$$\text{Relación claro/peralte} = L/d_1 = 30^*$$

Elevación de la trabe S/E

\* Revisar  
L = 25.0m?  
d = 80cm?



Secciones transversales de la trabe fabricada con tres placas soldadas

## PRUEBAS DE LABORATORIO



**PROPIEDADES MECÁNICAS**



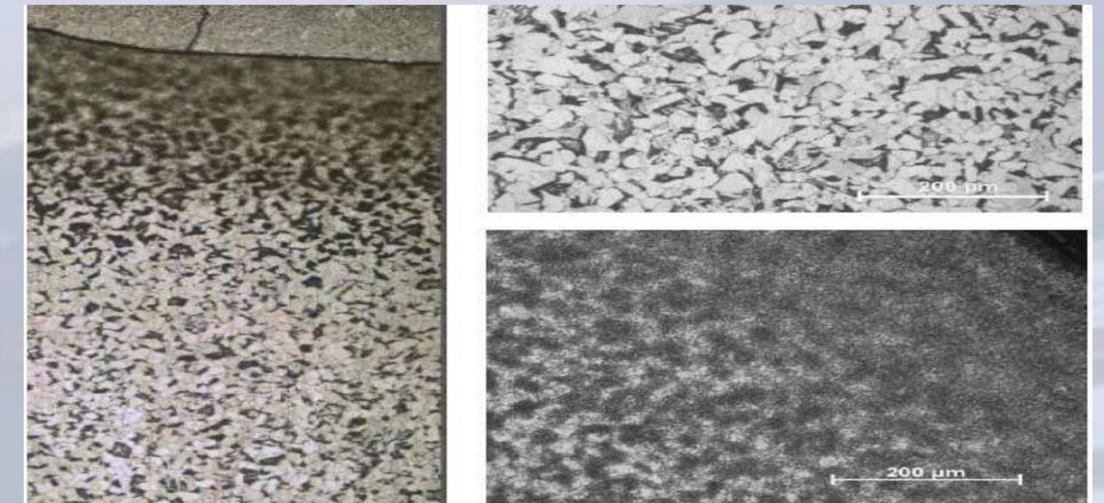
**ANÁLISIS DE LA FRACTURA**

**ANÁLISIS METALOGRAFÍCO Y DE FRACTOGRAFÍA**

Fotos cortesía GERDAU CORSA



*Figura 3. Fotografía tomada de la falla.*

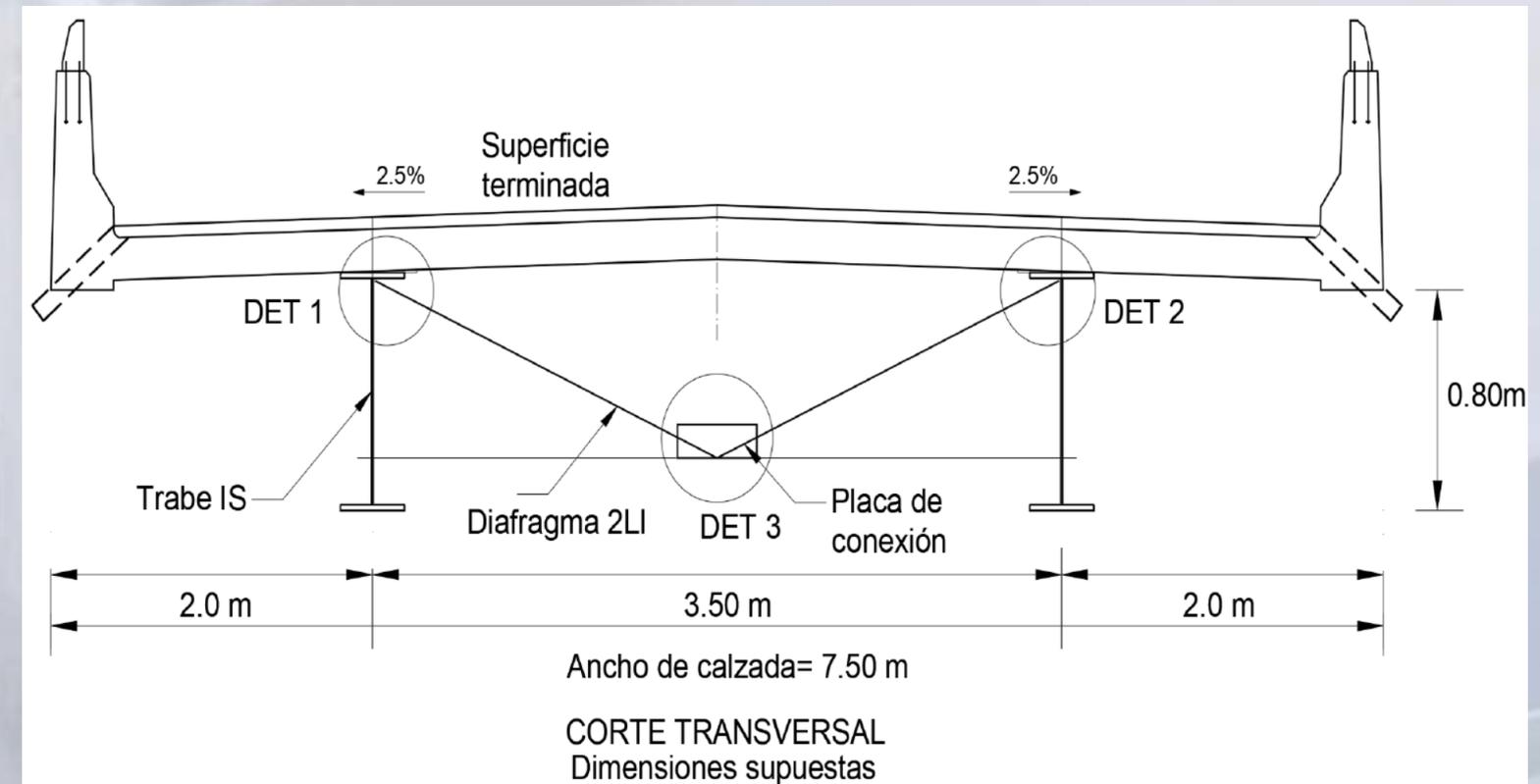


**MICROGRAFÍAS**

**CAMBIOS DE MICROESTRUCTURA**

## REFLEXIÓN 10

**Los diafragmas intermedios que proporcionan soporte lateral discontinuo a los patines de la trabe se aprecian esbeltos.**



## REFLEXIÓN 10



**Los diafragmas son soportes laterales que impiden el pandeo lateral por flexotorsión de una viga de acero y los atiesadores intermedios el arrugamiento del alma de la trabe IS**

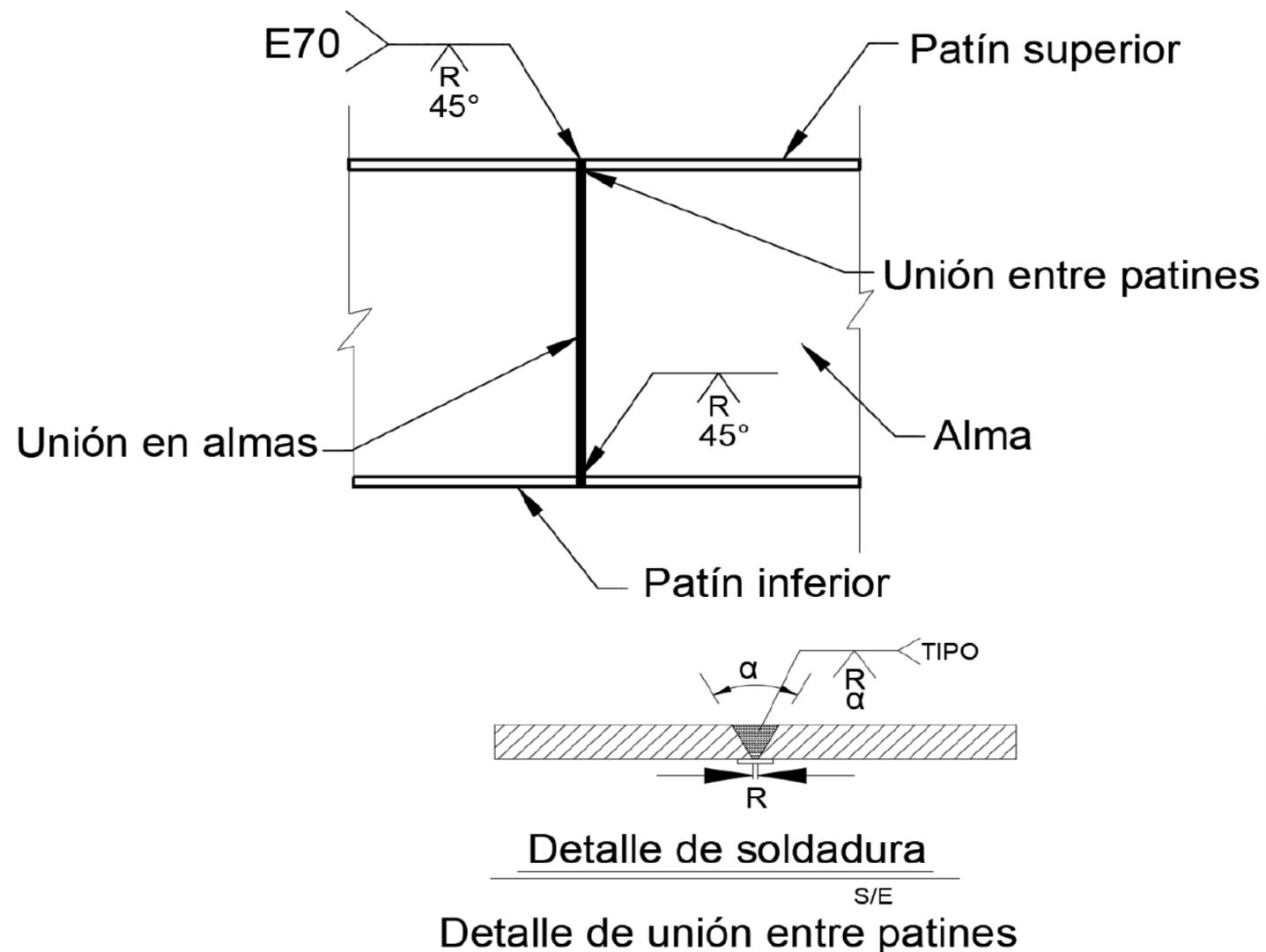
## REFLEXIÓN 11

**Se afirma que la posición del empalme soldado de los dos tramos de la viga en la sección central es incorrecta (zona crítica de demanda máxima por flexión).**



## REFLEXIÓN 12

Es probable que la soldadura del empalme a tope de los dos tramos de la viga IS no es precalificada y posiblemente se depositó sin supervisión oportuna y estricta. Las pruebas de laboratorio serán de gran importantes para confirmar o descartar esta reflexión.



**Preparación de la junta soldada a tope:**  
**Soldadura de penetración completa**  
**Tipo de preparación: En V sencilla**  
**Abertura de la raíz: R**  
**Ángulo del bisel:  $\alpha$**   
**Proceso de soldadura: SMAW**  
**Posiciones para soldar: Plana y vertical**

**JUNTA SOLDADA A TOPE SUPUESTA  
A FALTA DE INFORMACIÓN**

## REFLEXIÓN 13

**Debe revisarse si la reducción abrupta del peralte de la viga de acero en la zona de apoyos es correcta: número, separación y grueso de los atiesadores.**



## REFLEXIÓN 14

**Debe investigarse cuidadosamente si el daño acumulado de las columnas de concreto influyó en el colapso de la trabe en vista de que los vecinos de la zona reportaron desde hace varios años fuerte agrietamiento en estos elementos estructurales portantes.**



## REFLEXIÓN 15

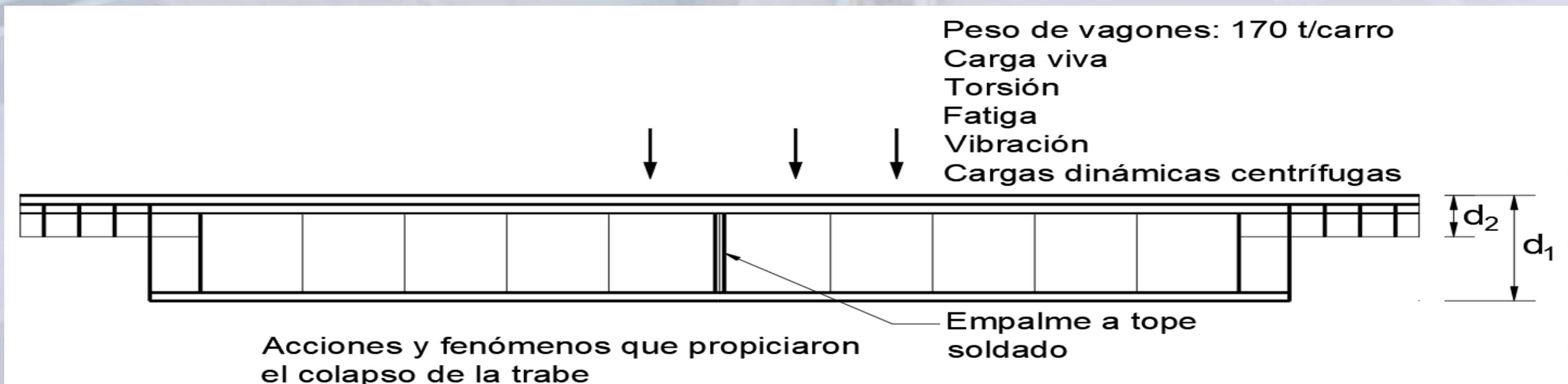
**Conviene reflexionar si el tipo de estructuración que se aplica en las estructuras del metro de la Ciudad de México son convenientes para suelos blandos.**



**Por ejemplo, las trabes de sección en cajón son más resistentes a los efectos de torsión y de pandeo lateral que las vigas fabricadas con tres placas soldadas IS.**

## REFLEXIÓN 16

**Deben efectuarse estudios especiales de simulación con computadora sobre el comportamiento estructural inesperado de la trabe de acero bajo los efectos de fatiga, vibraciones (armónicas), impacto, torsión, fuerzas centrífugas y bajo otras acciones dinámicas no previstas en el diseño estructural que pudieron influir en su colapso.**

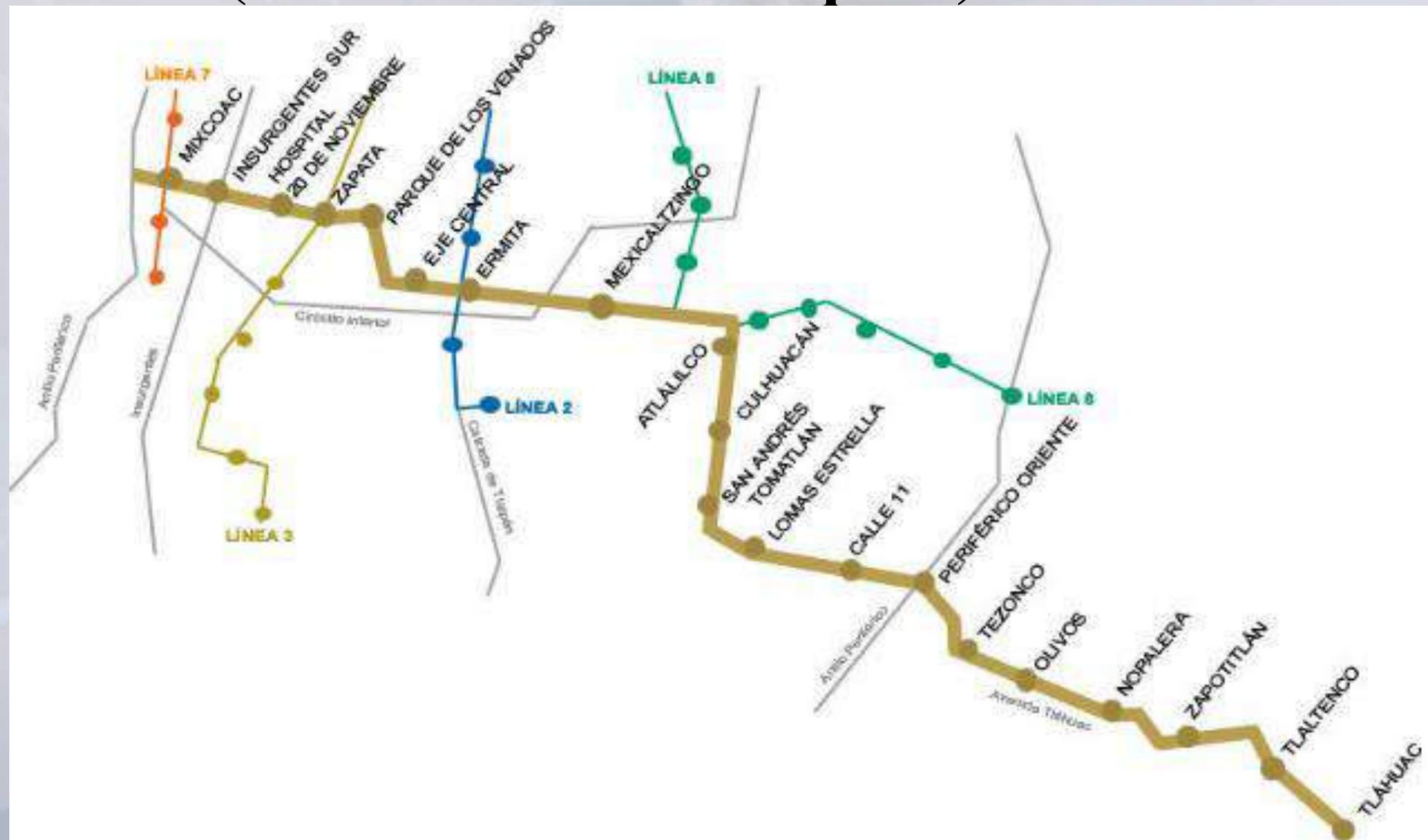


## REFLEXIÓN 17

**Deben revisarse cuidadosamente cada una de las etapas del proyecto ejecutivo de las líneas del Metro de la Ciudad de México: Planeación, trazo geométrico (topografía, a veces muy variable), conceptualización estructural, propiedades de los materiales, estructuración, normatividad aplicable, diseño estructural, procedimientos constructivos, supervisión e inspección de la obra con estricta calidad, particularmente de las juntas a tope soldadas, características de los vagones y materiales de las vías de circulación, etc.**

## REFLEXIÓN 18

**Debe exigirse programas de mantenimiento preventivo a la todas las líneas del Metro de la CDMX, ya que son servicios vitales de gran importancia para los ciudadanos (estructuras del Grupo A).**



## CONCLUSIONES

**1. Nuestro país cuenta con notables especialistas de las diferentes ramas de la Ingeniería Civil para realizar un Dictamen de Estabilidad y Seguridad Estructural cuidadoso y extenso, basado en los principios fundamentales de la Ingeniería Estructural, Sísmica y de Geotecnia que permita evaluar correctamente las verdaderas causas que ocasionaron este trágico accidente y que, al mismo tiempo sirva de base para que toda la infraestructura urbana de la gran Ciudad de México y de las principales ciudades del interior del país se revise urgentemente para evitar este tipo de tragedias en el futuro inmediato.**

## CONCLUSIONES

**2. La Ingeniería Estructural y sísmica son ramas de la Ingeniería Civil de gran importancia para garantizar la seguridad de las edificaciones bajo eventos sísmicos con el mínimo riesgo, evitando pérdidas de vidas humanas y económicas de la infraestructura urbana que pueden ser catastróficas si no se les da la debida importancia.**

**3. Las obras de infraestructura han de planearse, concebirse, diseñarse, construirse, supervisarse correctamente con estudios técnicos completos de todas las especialidades, con responsabilidad social y con ética profesional de lo contrario se convierten en “Bombas de tiempo” por una incorrecta ejecución y reducción de costos que afectan su calidad y seguridad estructural. Los colapsos y reconstrucción de una obra cuestan mucho más de su costo original.**

## CONCLUSIONES

**4. El autor propone dictaminar todas las líneas del Metro de la CDMX y también las edificaciones en virtud de que hay una gran cantidad de estructuras altamente vulnerables tras los sismos pasados que no han tenido ninguna intervención y que tienen daño acumulado alto.**

**5. Se desea poner en claro que la prevención, mitigación y atención de los daños a la infraestructura urbana de una ciudad, antes, durante y después de un desastre natural es una de las principales responsabilidades de los gobiernos municipales, estatales y federales.**

## **AGRADECIMIENTOS**

**El autor expresa su agradecimiento profundo al Ing. Edgar Mendoza Balanzario, Corresponsable en Seguridad Estructural, Nivel 2 y Perito Profesional en Seguridad Estructural por el Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM).**

**La mayoría de las fotos que aparecen en la presentación son cortesía del Ing. Edgar Mendoza Balanzario y de su equipo de trabajo. A todos ellos nuestra gratitud.**

**También se agradece al Ing. Héctor Santana Pantaleón y al Ing. José Luís Navarro Estrada sus valiosos comentarios.**