



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**ESTUDIO Y DISEÑO DE UN PROCEDIMIENTO DE COLAPSO
CONTROLADO DEL PUENTE METÁLICO EL PALO EN CALOTO -
CAUCA UTILIZANDO ANÁLISIS NO LINEAL**

Programa de Maestría en Ingeniería Civil

Directora tesis:

M.Sc. María Victoria Mondragón

Presentado por:

Ing. Sebastián Pantoja García

Ing. David Fernando Pantoja Pachajoa

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Noviembre de 2024

RESUMEN

La demolición controlada de puentes obsoletos o estructuralmente comprometidos es una práctica importante en la ingeniería civil para garantizar la seguridad pública y la renovación de infraestructuras. Este estudio se centra en el diseño de un procedimiento de colapso controlado para el Puente El Palo, ubicado en Caloto, Cauca, aplicando un análisis no lineal mediante el método Pushover. Construido originalmente en 1940 para tráfico ferroviario y posteriormente adaptado para vehículos, el Puente El Palo ha excedido su vida útil y presenta deficiencias estructurales, incluidas aquellas derivadas de soldaduras estructurales no conformes. Mediante un modelado estructural, esta investigación simula cargas incrementales para analizar el comportamiento del puente bajo condiciones extremas, identificando puntos débiles y modos de falla críticos para planificar una secuencia de desmontaje segura. La metodología utiliza el software SAP2000 para crear un modelo no lineal detallado, simulando una demolición progresiva para optimizar el control del colapso y proteger las estructuras cercanas. Los resultados muestran que el análisis Pushover evalúa eficazmente la capacidad remanente y la ductilidad del puente, lo que permite definir las secuencias de desmontaje y evitar un colapso no controlado. Este enfoque no solo mejora la seguridad, sino que también apoya prácticas sostenibles al facilitar la reutilización de materiales.

ABSTRACT

The controlled demolition of outdated or structurally compromised bridges is essential in civil engineering to ensure public safety and infrastructure renewal. This study focuses on designing a controlled collapse procedure for the El Palo Bridge in Caloto, Cauca, applying nonlinear analysis through a pushover method. Originally constructed in 1940 for rail traffic and later adapted for vehicles, the El Palo Bridge has exceeded its design life and shows significant structural deficiencies, including those from non-compliant structural welding. Using detailed structural modeling, this research simulates incremental loading to analyze the bridge's behavior under extreme conditions, identifying weak points and failure modes critical to planning a safe dismantling sequence. The methodology employs SAP2000 software to create a detailed nonlinear model, simulating progressive demolition to optimize collapse control and safeguard nearby structures. Results indicate the pushover analysis effectively evaluates the bridge's remaining capacity and ductility, helping refine dismantling sequences to avoid uncontrolled collapse. This approach not only enhances safety but also supports sustainable practices by facilitating material reuse.

LISTADO DE TABLAS.

Tabla 1. Tipos de demolición.....	19
Tabla 2. Tabla resumen de parámetros sísmicos.	27
Tabla 3. Valores del factor de Sitio, F_{pga} , en el período de vibración cero del Espectro de Aceleraciones.	27
Tabla 4. Valores del factor de Sitio, F_a , en el intervalo de períodos de vibración cortos del Espectro de Aceleraciones	28
Tabla 5. Valores del factor de Sitio, F_v , en el intervalo de períodos de vibración largos del Espectro de Aceleraciones.	29
Tabla 6. Resumen de parámetros.	29
Tabla 7. Zonas de Desempeño Sísmico.	30
Tabla 8. Factores de Ministración de Resguardo—Subestructuras.	30
Tabla 9. Datos de entrada.....	31
Tabla 10. Desplazamiento y rotación del punto de control.	42
Tabla 11. Desplazamiento y rotación del punto de control.	43
Tabla 12. Resumen de cargas vs desplazamientos.....	44
Tabla 13. Combinaciones y Factores de Carga.....	47
Tabla 14. Combinaciones de carga.	48
Tabla 15. Tabla resumen de combinaciones de carga.....	48
Tabla 16. Combinaciones de carga.	49
Tabla 17. Empujes.	49
Tabla 18. Etapa 1, iteración 1	50
Tabla 19. Resumen de pushover.	51
Tabla 20. Iteración etapa 1 a etapa 6.....	53
Tabla 21. Reporte de la etapa 6.....	55
Tabla 22. Registro etapas 7-20.....	55
Tabla 23. Desplazamiento vertical de la plataforma.....	56
Tabla 24. Registro de desmontaje.....	57
Tabla 25. Resumen primera iteración – parte 1.....	62
Tabla 26. Resumen primera iteración – parte 2.....	63
Tabla 27. Registro de ruta de colapso definitiva.....	64

Tabla 28. Resumen de desmontaje parte 1.....	68
Tabla 29. Resumen de desmontaje parte 2.....	69

LISTADO DE IMÁGENES.

Imagen 1. Geometría puente el palo.	21
Imagen 2. Secciones transversales.....	22
Imagen 3. Curvas Momento – Curvatura.....	24
Imagen 4. Referencia de colores momento curvatura.....	33
Imagen 5. Modelo 3D.	35
Imagen 6. Eje 1 (XZ).	35
Imagen 7. Eje 2 (XZ).	35
Imagen 8. Desplazamiento punto de control.....	41
Imagen 9. Asignación de carga distribuida.....	42
Imagen 10. Desplazamiento punto de control primera iteración.	43
Imagen 11. Pushover 1 – etapa 1.	50
Imagen 12. Pushover 2 – etapa 1.	50
Imagen 13. Pushover 3 – etapa 1.	50
Imagen 14. Apuntalamiento.....	52
Imagen 15. Pushover 1 etapa 2.	52
Imagen 16. Pushover 2 etapa 2.	52
Imagen 17. Pushover 3 etapa 2.	52
Imagen 18. Elemento a desmontar.....	53
Imagen 19. Pushover 1 etapa 3.	53
Imagen 20. Pushover 2 etapa 3.	53
Imagen 21. Pushover 3 etapa 3.	53
Imagen 22. Se retira elemento 122.	54
Imagen 23. Pushover 1 etapa 6.	54
Imagen 24. Pushover 2 etapa 6.	54
Imagen 25. Pushover 3 etapa 6.	54
Imagen 26. Etapa 21.	56
Imagen 27. Degradación de sección	58
Imagen 28. Valor carga de empuje.	59
Imagen 29. Nudos 3H1, 1H1.	59
Imagen 30. Diferencial de cadena.....	59

Imagen 31. Dirección de la carga de colapso.	60
Imagen 32. Pushover step 7.	61
Imagen 33. Cargas de colapso cercha 2.	61
Imagen 34. Pushover step 9.	61
Imagen 35. Plataforma.	65
Imagen 36. Procedimiento de desmontaje utilizado en campo vigas.	67
Imagen 37. Procedimiento de desmontaje utilizado en campo cerchas.	67
Imagen 38. Colapso de cercha principal eje XZ1.	70
Imagen 39 Comparación procedimiento Pushover vs en campo.	73

1 Contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	11
2	JUSTIFICACIÓN.....	13
3	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	15
4	OBJETIVOS.....	15
4.1	Objetivo general.....	15
4.2	Objetivos específicos.....	15
5	REVISIÓN DE LITERATURA.....	16
5.1	Demolición.....	16
5.2	Tipos de demolición.....	16
5.2.1	Demolición Mecánica.....	16
5.2.2	Demolición Con Explosivos.....	17
5.2.3	Hidro Demolición.....	18
5.3	Comparación de los diferentes tipos de demolición.....	19
5.4	Análisis no lineal.....	20
6	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	21
6.1	Modelo digital.....	21
6.2	Secciones de los elementos.....	22
6.3	DETERMINACIÓN DE LAS FUERZAS SÍSMICAS.....	25
6.3.1	Procedimiento General.....	25
6.3.2	Espectro De Aceleraciones.....	26
6.3.3	Parámetros Básicos.....	27
6.3.4	Parámetros Sísmicos.....	29
6.3.5	Zonas De Desempeño Sísmico.....	30

6.3.6	Tabla De Factor De Modificación R.	30
6.3.7	Parámetros De Entrada y salida.....	31
6.3.8	Espectros Estructura Y Subestructura.	32
6.4	Definición tabla de colores para el diagrama momento curvatura SAP2000.	32
6.5	Definición de rótulas.....	34
7	ALGORITMO DE ITERACIÓN.	35
7.1	Función del algoritmo	36
7.2	Definiciones.	36
7.3	Pasos algoritmo de iteración.	36
8	SIMULACIÓN DE DEMOLICIÓN PROGRESIVA.	40
8.1	Calibración del modelo.....	40
8.2	Factores de seguridad.....	46
8.3	Análisis de etapas para obtener el procedimiento de desmontaje.....	51
8.4	Colapso controlado de las cerchas principales.....	58
8.4.1	Degradación de la sección para generar las rotulas de colapso.....	60
8.4.2	Secuencia de colapso de la cercha principal del eje 1.....	60
8.4.3	Secuencia de colapso de la cercha principal del eje 2.....	61
9	RESULTADOS.	62
9.1	Procedimiento de colapso teórico por pushover.	62
9.2	Ruta definitiva de colapso controlada.....	63
10	ANÁLISIS y COMPARACIÓN DEL MODELO TEÓRICO VS. EL PRÁCTICO.	65
10.1	Procedimiento de desmontaje realizado en campo.	66
10.2	Análisis.....	70
11	CONCLUSIONES.....	74

12	RECOMENDACIONES.	75
13	GLOSARIO DE TÉRMINOS ESPECIALES.....	78
14	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	79
15	ANEXOS.....	80
15.1	Plano topográfico.	80
15.2	Plano mecánico.	80
15.3	Documento de autorización alcaldía de Caloto.....	81
15.4	Documento de autorización INGIENERIA DAPA S.A.S.	82

1 INTRODUCCIÓN.

La demolición es un proceso esencial en la ingeniería de infraestructura, especialmente cuando una estructura ha alcanzado su vida útil y ya no puede cumplir con los estándares de seguridad y funcionalidad requeridos. En el caso de los puentes, esta vida útil se estima comúnmente en 75 años, según las especificaciones de diseño AASHTO LRFD, que consideran factores como la capacidad de resistencia, la durabilidad de los materiales y las demandas de carga previstas durante ese periodo. Estas especificaciones buscan garantizar que el puente pueda soportar cargas de manera segura a lo largo del tiempo, incluso frente a eventos extremos, como sismos o inundaciones. La decisión de demoler un puente se basa en múltiples consideraciones técnicas y ambientales. Con el paso del tiempo, los materiales estructurales sufren desgaste debido a factores como la exposición al clima, el tráfico continuo y, en particular, la corrosión en ambientes agresivos. Estos factores disminuyen progresivamente la capacidad de la estructura para resistir las cargas para las que fue diseñada, aumentando los riesgos de falla o colapso. La demolición controlada permite gestionar estos riesgos de forma segura, retirando las estructuras que han agotado su utilidad de manera planificada y sin comprometer el entorno. Además, la planificación de la demolición moderna incorpora la posibilidad de reciclar materiales, como el acero y el concreto, y adoptar métodos sostenibles, como la hidro demolición, que reduce la generación de polvo y escombros, minimizando así el impacto ambiental. Esta práctica no solo promueve la seguridad y eficiencia, sino que también responde a un enfoque de economía circular cada vez más relevante en el sector de la construcción (1).

La existencia de una estructura más allá de su vida útil puede representar un riesgo tanto para los usuarios como para las estructuras cercanas. Por lo tanto, la demolición se convierte en una medida fundamental para prevenir colapsos accidentales y garantizar la seguridad de los trabajadores, el público y las infraestructuras cercanas (2).

En el caso de los edificios y puentes, la demolición controlada permite proteger tanto a los trabajadores como al entorno, minimizando los riesgos de lesiones y accidentes, aunque esto representa un desafío técnico, logístico y económico significativo que requiere planificación y ejecución meticulosas (3).

Un ejemplo relevante es el puente metálico "El Palo," ubicado en el municipio de Caloto, Cauca. Este puente fue construido en 1940 por la empresa estadounidense Steel para servir como estructura ferroviaria, bajo la administración del presidente Eduardo Santos Montejó. En 1972, el puente fue adaptado para el tránsito vehicular, y en 1996 fue rehabilitado nuevamente. Sin embargo, estas intervenciones se realizaron sin respetar normativas especializadas en soldadura de acero estructural, lo que generó deficiencias técnicas que afectaron la durabilidad y el desempeño de la estructura a lo largo de su vida útil. Estas modificaciones, al no cumplir con estándares como los establecidos en la norma AWS D1.1, comprometieron la confiabilidad de las conexiones de la estructura.

Este documento se enfoca en analizar la demolición controlada del Puente Metálico El Palo mediante un enfoque no lineal, específicamente utilizando el análisis de Pushover. La metodología utilizada en esta tesis permite evaluar la curva de capacidad del puente, que muestra la relación entre la fuerza aplicada y el desplazamiento, así como examinar la formación de rótulas plásticas, indicadores de deformaciones permanentes. Este tipo de análisis permite la planificación de una demolición controlada, ya que asegura que los elementos estructurales colapsen de manera predecible, minimizando el riesgo de daños a infraestructuras cercanas y evitando un colapso incontrolado. El análisis no lineal se ha convertido en una herramienta importante para la ingeniería estructural de puentes, al capturar el comportamiento real de la estructura más allá de los límites elásticos. En el caso del Puente El Palo, esta metodología considera tanto la resistencia residual de sus componentes como la redistribución de fuerzas, aspectos esenciales para una demolición controlada y segura. Este análisis ofrece una comprensión más profunda de la interacción entre los elementos estructurales y la secuencia de fallos, factores críticos en la toma de decisiones para el desmantelamiento de la estructura (5).

2 JUSTIFICACIÓN.

La demolición en puentes que presentan daños estructurales representa un desafío técnico complejo que exige una planificación meticulosa y un análisis riguroso para garantizar la seguridad, eficiencia y sostenibilidad del proceso, que para este caso como el puente presentó una falla en una riostra de tensión (Fotografía 1), la cual es un componente crítico en la estructura de soporte. Esta falla se manifiesta típicamente debido a cargas extremas o a un desgaste progresivo del material. La observación de este tipo de fallas es fundamental para comprender los puntos vulnerables de la estructura, además de una gran cantidad de patologías en las conexiones lo cual es indicativo de deterioro en los puntos de unión de la estructura. Estas patologías pueden afectar la estabilidad y resistencia de las conexiones, haciendo necesario un análisis detallado para evaluar el nivel de intervención o refuerzo requerido (Fotografía 2)

Fotografía 1



PUENTE EL PALO [Fotografía], INGENIERÍA DAPA. SAS, 2024.

Fotografía 2



PUENTE EL PALO [Fotografía], INGENIERÍA DAPA. SAS, 2024.

El colapso no controlado de los puentes durante la demolición podría ocasionar graves daños a estructuras adyacentes, poniendo en riesgo la vida de las personas y bienes. La demolición planificada y eficiente minimizará los tiempos de ejecución, los costos asociados al proyecto, la interrupción del tráfico y el impacto en la comunidad.

En cuanto a sostenibilidad, la demolición controlada permitirá recuperar materiales valiosos de la estructura del puente para su reutilización o reciclaje disminuyendo el impacto ambiental durante la demolición.

3 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.

¿Cómo se puede desarrollar un procedimiento de demolición controlada seguro y eficiente para el Puente Metálico del Palo Cauca, utilizando análisis no lineal para evaluar la respuesta estructural durante todas las etapas de demolición?

4 OBJETIVOS.

4.1 Objetivo general.

- Establecer una secuencia de demolición segura y eficiente del puente metálico del Palo, Cauca mediante análisis no lineal.

4.2 Objetivos específicos.

- Desarrollar un modelo no lineal estático (Pushover) del puente metálico El Palo utilizando el software de análisis estructural especializado (SAP2000).
- Simular el proceso de demolición progresiva del puente en el modelo, considerando la pérdida gradual de elementos.
- Comparar los resultados teóricos obtenidos a partir de un análisis no lineal (Pushover) con los resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto ya realizado. Luego, concluiremos si la metodología teórica representa una buena opción para planificar un desmontaje seguro y eficiente.

5 REVISIÓN DE LITERATURA.

5.1 Demolición

La planificación de una demolición previene colapsos accidentales en cualquier estructura, asegurando la seguridad de los trabajadores, del público y de las propiedades circundantes (Tabla 1). La elección de los métodos empleados en la demolición depende de factores como el tipo de estructura, su ubicación y las condiciones específicas del sitio. En el caso de puentes y estructuras complejas, el análisis no lineal Pushover resulta especialmente relevante, ya que permite observar cómo la resistencia estructural disminuye progresivamente a medida que aumentan los desplazamientos laterales, lo cual ayuda a determinar con mayor precisión tanto la capacidad real de la estructura como la cortante de base del puente (4).

5.2 Tipos de demolición

5.2.1 Demolición Mecánica

La demolición mecánica de puentes es un proceso meticulosamente planificado en el cual se desmonta cada elemento estructural utilizando maquinaria pesada especializada, como excavadoras, grúas, martillos hidráulicos y pinzas de demolición. Estas máquinas, muchas de ellas equipadas con brazos de largo alcance, permiten acceder a zonas elevadas o de difícil acceso, asegurando un nivel de precisión y control adecuado para proyectos en entornos sensibles. Este método es particularmente efectivo para minimizar vibraciones y ruido, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas o cerca de infraestructuras críticas, como hospitales, escuelas o líneas de transporte.

Además de su precisión, la demolición mecánica se alinea con los principios de sostenibilidad al permitir la recuperación y reciclaje de materiales clave, como el acero y el concreto, lo cual reduce significativamente la cantidad de residuos enviados a vertederos y optimiza el uso de recursos. De esta manera, la demolición mecánica responde a los estándares del Código de Ejecución Segura y Sostenible de Demolición, que promueve prácticas orientadas a minimizar el impacto ambiental y maximizar la reutilización de materiales (5).

La gestión adecuada de los residuos de construcción y demolición (RCD) es también un aspecto fundamental de este proceso. Para asegurar una práctica segura y responsable, es necesario clasificar y manejar materiales peligrosos, como el asbesto y ciertos productos químicos, conforme a las normativas de salud y seguridad. Con una gestión correcta, se contribuye tanto a la sostenibilidad del proyecto como a la protección de las comunidades cercanas y del entorno natural.

Este método de demolición ofrece un alto grado de control sobre la dirección y el manejo de los elementos desmontados, lo que reduce el riesgo de daños a infraestructuras cercanas y al medio ambiente. Sin embargo, debido a la posible complejidad estructural de cada proyecto, los tiempos de ejecución pueden variar. Por ello, el código de sostenibilidad y seguridad establece que el proceso debe incluir una planificación detallada, que considere un estudio estructural del puente, una secuencia optimizada de desmantelamiento y un sistema de seguridad y salud para proteger tanto a los trabajadores como al entorno.

5.2.2 Demolición Con Explosivos

La demolición de puentes mediante el uso de explosivos es un método especializado que permite desmantelar la estructura al separar de manera controlada los componentes críticos, tales como columnas, losas y vigas. Este método, clasificado dentro de los métodos de colapso, implica la colocación de detonadores y cargas explosivas en puntos estratégicos de la estructura. La secuencia y el momento preciso de las detonaciones se diseñan para asegurar que el puente colapse bajo su propio peso, logrando un colapso controlado y seguro. El proceso de demolición controlada por explosivos sigue un conjunto de pasos fundamentales, que incluyen el diseño cuidadoso de las posiciones de voladura, la configuración de redes de detonación, la especificación de parámetros de voladura y la implementación de medidas de protección exhaustivas. La ubicación exacta de los explosivos, el tipo de carga y el cronometraje preciso de las detonaciones son factores críticos que influyen en la efectividad del colapso, maximizando la seguridad de los operarios y reduciendo el riesgo de daños colaterales. Estas precauciones minimizan los riesgos de escombros voladores y las vibraciones generadas, lo que es crucial para proteger tanto las estructuras cercanas como la integridad de los materiales reutilizables, cuando sea posible. Además, este enfoque tiene como objetivo reducir el impacto ambiental mediante la remoción eficiente de los restos del puente,

minimizando los efectos negativos en el entorno y asegurando que el espacio se libere rápidamente para futuros proyectos de construcción o infraestructura. Para alcanzar estos objetivos, las técnicas modernas de demolición explosiva consideran el tipo de material estructural del puente, la distribución de las cargas y la proximidad a áreas sensibles, lo que permite un control preciso sobre el colapso de la estructura. La planificación y ejecución cuidadosas también permiten reducir el tiempo de exposición de los trabajadores y el público a los posibles riesgos, maximizando tanto la seguridad como la eficiencia en el proceso (6) .

5.2.3 Hidro Demolición

La hidro demolición es un proceso avanzado que emplea chorros de agua a alta presión para eliminar el concreto deteriorado en estructuras, como los tableros de puentes de concreto, sin comprometer el acero de refuerzo subyacente. Este método resulta especialmente eficaz para la remoción selectiva de concreto, ya que permite la extracción precisa incluso por debajo de la malla superior de acero de refuerzo. Esto lo convierte en una técnica ideal para reparaciones de profundidad parcial, donde los métodos convencionales, como los martillos neumáticos o mecánicos, podrían no solo ser ineficaces, sino también causar daños indeseados en las barras de refuerzo. Una de las principales ventajas de la hidro demolición es su capacidad para minimizar las vibraciones que podrían comprometer la estabilidad estructural o dañar el concreto sano en áreas adyacentes. A diferencia de otros métodos de demolición, la hidro demolición evita la generación de micro fisuras, lo que contribuye a una mayor durabilidad de las reparaciones realizadas. Además, reduce significativamente la producción de polvo y escombros, mejorando así las condiciones de seguridad en el sitio de trabajo y reduciendo la contaminación ambiental. Este proceso utiliza grandes cantidades de agua, la cual puede ser reciclada en el propio sistema, haciendo que la hidro demolición sea una opción más ecológica y sostenible. Este procedimiento es particularmente adecuado para proyectos que requieren un alto grado de precisión y protección del acero de refuerzo, como en la rehabilitación de puentes, túneles o estructuras marinas. También es especialmente útil en áreas de difícil acceso o en entornos sensibles al ruido y las vibraciones. La hidro demolición puede ajustarse mediante la presión y el tipo de boquilla utilizada, permitiendo así remover capas específicas de concreto, ya sea superficialmente o a mayor profundidad, brindando flexibilidad y eficiencia en las labores de reparación y mantenimiento (7)

5.3 Comparación de los diferentes tipos de demolición

Tabla 1. Tipos de demolición.

Método de Demolición	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones Típicas
Hidro demolición	Remoción precisa de concreto sin dañar el acero de refuerzo; Minimiza vibraciones y evita micro fisuras en el concreto sano; Reducción de polvo y escombros; Reciclaje de agua, opción sostenible.	Elevado consumo de agua; Posibilidad de "blow-throughs" si no se controla adecuadamente; Costos altos en comparación con métodos mecánicos.	Rehabilitación de puentes de concreto, estructuras sensibles, áreas de difícil acceso o entornos sensibles al ruido.
Demolición Mecánica	Control sobre la dirección de caída de elementos; Reutilización y reciclaje de materiales; Menor ruido y vibración en áreas urbanas.	Puede ser menos preciso en comparación con hidro demolición; Riesgo de daños en el acero de refuerzo en estructuras complejas; Mayor generación de polvo y escombros.	Demolición en áreas urbanas o en proximidad a infraestructuras delicadas; Demolición de puentes medianos y pequeños.
Demolición con Explosivos	Rapidez en la demolición de grandes estructuras; Eficiente para colapsos controlados; Reducción del tiempo de demolición en comparación con otros métodos.	Requiere medidas de seguridad extremas; riesgo de escombros voladores y vibraciones; No siempre adecuado en áreas urbanas o cerca de infraestructuras sensibles.	Demolición de grandes estructuras o en áreas donde se necesita rapidez; Proyectos con acceso limitado o en estructuras en estado crítico.

5.4 Análisis no lineal

El análisis estático no lineal, comúnmente conocido como Pushover, se utiliza para desarrollar curvas de capacidad que ofrecen una visión detallada del comportamiento de una estructura frente a cargas sísmicas u otras fuerzas. Estas curvas relacionan las fuerzas internas con los desplazamientos, permitiendo evaluar la interacción entre los componentes estructurales y su respuesta ante deformaciones inelásticas. De este modo, el análisis Pushover constituye una herramienta fundamental para comprender la redistribución de fuerzas internas y evaluar la resistencia y capacidad de deformación de la estructura más allá de los límites elásticos, proporcionando una representación más precisa de su comportamiento en comparación con los métodos de análisis elástico tradicionales (8).

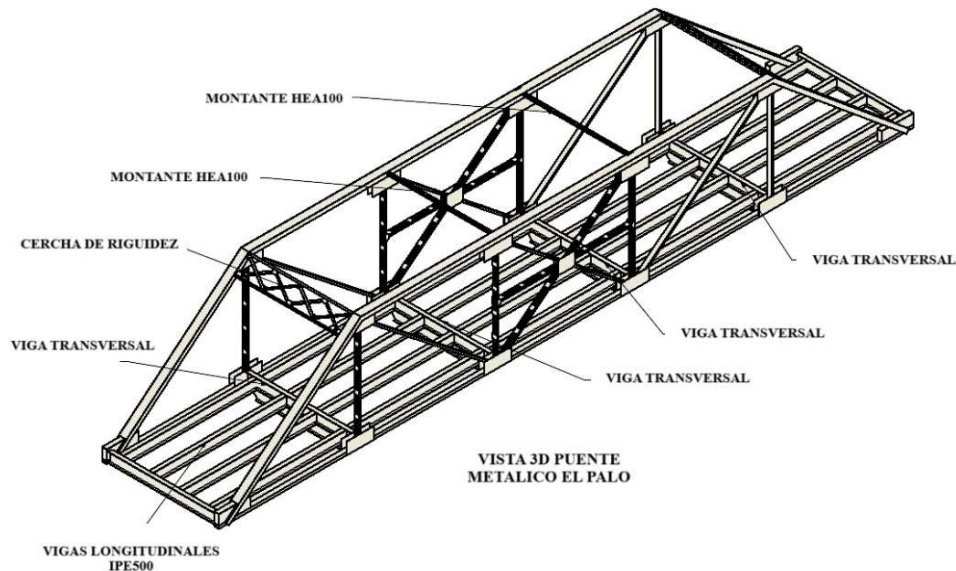
La ductilidad es esencial en estructuras sometidas a cargas extremas, ya que permite que los componentes absorban energía sin un colapso inmediato. En el contexto de un análisis no lineal, la formación de rótulas plásticas es indicativa de zonas donde la estructura está alcanzando sus límites inelásticos, disipando energía y mitigando la propagación del daño estructural a través de elementos críticos. Estas rótulas permiten la redistribución de fuerzas en los elementos cercanos y evitan fallos catastróficos mediante deformaciones controladas (9).

6 ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

6.1 Modelo digital.

La Imagen 1 presenta una perspectiva isométrica detallada de la geometría del puente El Palo. En esta representación, se destacan los componentes estructurales que conforman el puente, permitiendo entender su disposición y diseño.

Imagen 1. Geometría puente el palo.



En primer lugar, se muestran las vigas longitudinales, específicamente las vigas IPE500. Estas vigas se extienden a lo largo del puente, soportando las cargas verticales y horizontales, distribuyéndolas a lo largo de la estructura.

Se pueden apreciar también las vigas transversales, que conectan las vigas longitudinales proporcionando estabilidad lateral a la estructura. Estas vigas transversales mantienen la rigidez del puente y aseguran que las fuerzas se distribuyan adecuadamente entre las diferentes partes del puente.

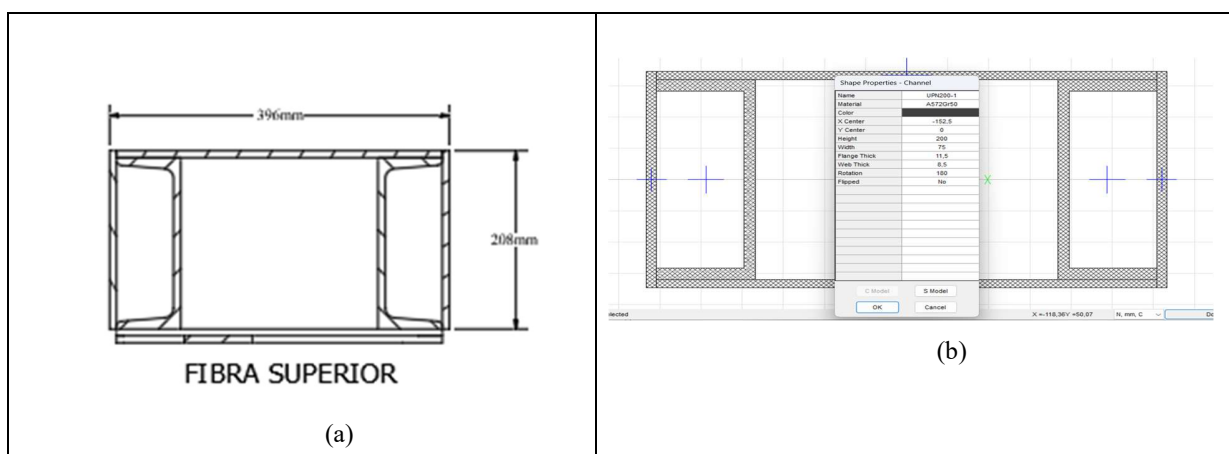
Otro componente destacado en la imagen son las cerchas de rigidez, que refuerzan la estructura mediante soporte adicional a lo largo del puente. Las cerchas garantizan estabilidad y resistencia frente a cargas dinámicas, como las que pueden generar el paso de vehículos o las condiciones sísmicas.

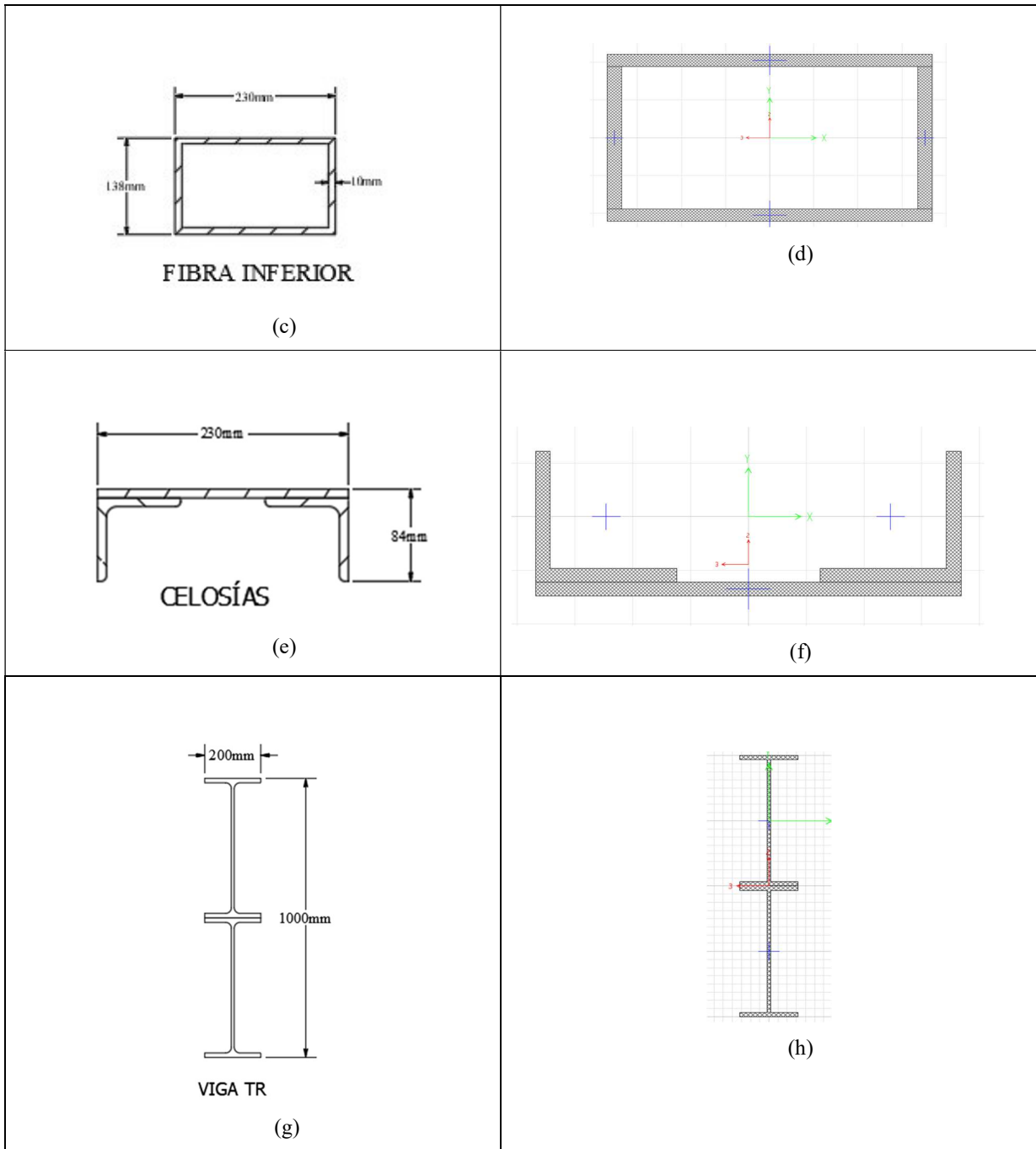
6.2 Secciones de los elementos

En la Imagen 2 se resumen las secciones para cada elemento de la estructura del puente. La fibra superior está conformada por dos perfiles UPN200 ASTM A572 y 4 placas ASTM A572 (Imagen 2 (a) y (b)). La fibra inferior se compone por un cajón armado de 230 mm x 138 mm x 10 mm de lámina ASTM A572 (Imagen 2 (c) y (d)). Las celosías (Imagen 2 (e) y (f)) está formada por dos ángulos 3 pul – 5/16 y una placa de rigidez ASTM A572 $e=8$ mm. Finalmente, Viga transversal compuesta por dos vigas IPE500, una sobre la otra. (Imagen 2 (g) y (h)).

En la columna derecha de la Imagen 2 se encuentra la representación gráfica obtenida en el módulo “section designer” del software de análisis estructural SAP2000, que permite crear secciones transversales con diferentes configuraciones. Adicionalmente, es posible definir las características geométricas de cualquier sección transversal. Incluye campos para ingresar datos como nombre, material, área, centroide en ejes X y Y, para obtener las propiedades mecánicas, momento inercial, radio de giro, entre otros.

Imagen 2. Secciones transversales



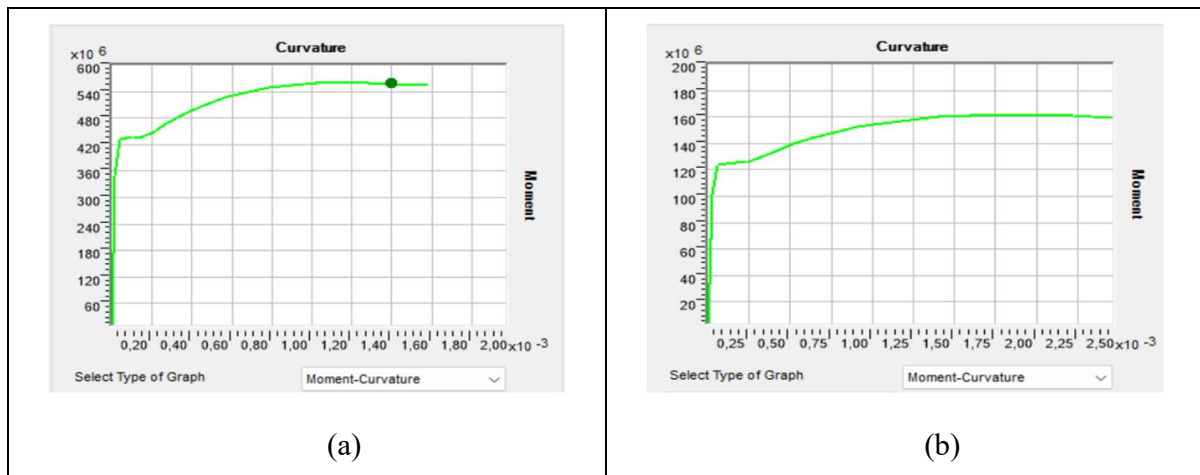


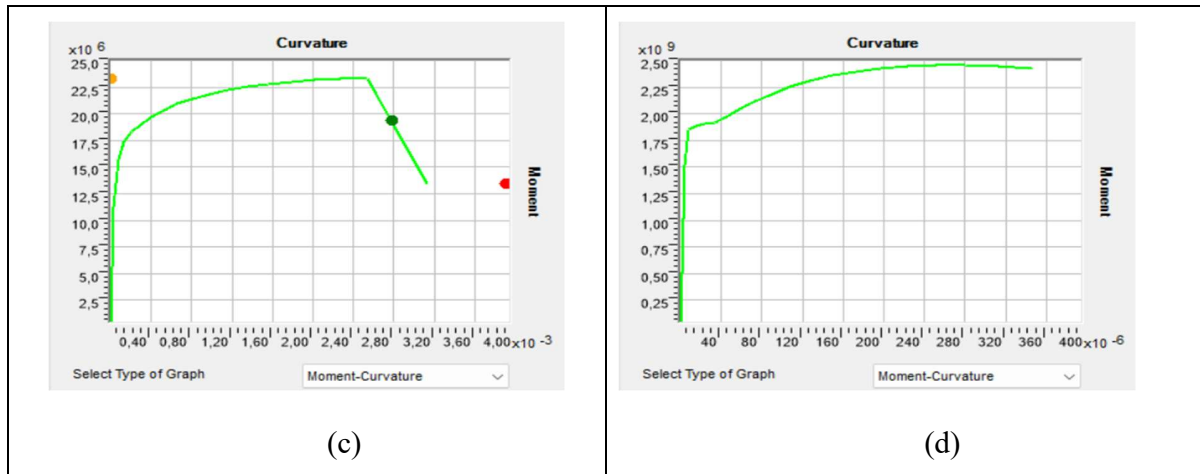
(a) Fibra superior [AUTOCAD] (b) Sección fibra superior [SAP2000] (c) Fibra inferior [AUTOCAD] (d) Sección fibra inferior [SAP2000] (e) Celosías [AUTOCAD]. (f) Celosía [SAP2000] (g) Viga transversal [AutoCAD]. (h) Viga transversal [SAP2000].

La Imagen 3 muestra el diagrama Momento-Curvatura para las secciones previamente mencionadas, detallando el comportamiento estructural de cada una de ellas.

- Imagen 2 (a) se presenta la curva correspondiente a la fibra superior. La pendiente inicial de la curva se reduce progresivamente, formando un tramo más plano a medida que se avanza. Este comportamiento refleja la variación del momento en función de la curvatura.
- Imagen 2 (b) se ilustra la curva para la fibra inferior, que exhibe una tendencia similar a la de la fibra superior. Este comportamiento es característico del acero debido a que las secciones están diseñadas sin excentricidades, y todos los elementos estructurales se encuentran atiesados.
- Imagen 2 (c) se ilustra la curva correspondiente a la sección de celosías muestra un comportamiento diferente al típico del acero. Esto se debe a la excentricidad inherente a su diseño, lo que la clasifica como un elemento no atiesado. Este factor influye en su respuesta estructural, generando una curva distinta en comparación con las otras secciones analizadas.
- En la Imagen 2 (d), se presenta la curva correspondiente a la sección de la viga, donde se observa que este elemento muestra una mayor capacidad y ductilidad en comparación con las otras secciones.

Imagen 3. Curvas Momento – Curvatura.





Fibra superior (b) Fibra inferior (c) Celosía (d) Viga IPE500

6.3 DETERMINACIÓN DE LAS FUERZAS SÍSMICAS.

El presente apartado describe el procedimiento general para la determinación de las fuerzas sísmicas, abordando los aspectos que influyen en la respuesta dinámica de las estructuras.

El análisis se inicia con la elaboración del espectro de aceleraciones, que establece los límites de movimiento para las edificaciones según la normativa CCP-14. Posteriormente, se detallan los parámetros básicos que describen el comportamiento sísmico del terreno y la estructura, incluyendo la clasificación de las zonas sísmicas y los valores que definen la intensidad del evento sísmico. La zona de desempeño sísmico, la tabla de factores de modificación "R" y los parámetros de entrada y salida se describen con el objetivo de proporcionar el cálculo de las fuerzas sísmicas.

6.3.1 Procedimiento General.

El Procedimiento General debe usar el coeficiente de Aceleración Pico del Terreno (PGA) y los coeficientes de periodo corto (S_s) y periodo largo (S_1). Para calcular el espectro como se especifica en 3.10.4, deben determinarse los valores de PGA, S_s y S_1 de las Figuras 3.10.2.1-1 a 3.10.2.1-3, del CCP-14, o de los valores, o mapas, especiales aprobados por la entidad contratante del diseño y construcción.

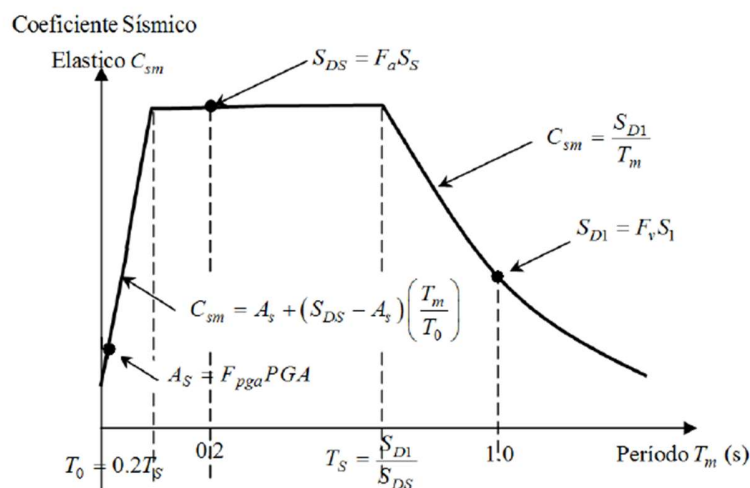
Se utilizó la interpolación lineal para sitios ubicados entre líneas de contorno o entre una línea de contorno y un valor mínimo local o un valor máximo local.

Los efectos locales deben incluirse dentro de la descripción del sismo de diseño según el tipo de perfil de suelo, como se especifica en 3.10.3. del CCP-14

6.3.2 Espectro De Aceleraciones.

La Figura 3.10.4.1-1 (Figura 1) de la CCP-14 muestra el espectro de aceleraciones de diseño para un amortiguamiento del 5%. Este espectro se calcula usando los coeficientes de aceleración pico del terreno (PGA) y los coeficientes espectrales para periodos cortos (S_s) y largos (S₁), escalados por los factores de sitio asociados al perfil del suelo en cuestión. Este gráfico muestra la respuesta estructural esperada en diferentes condiciones sísmicas y sirve como base para el diseño sísmico de puentes en Colombia(10). En la Tabla 2 se ilustran los parámetros sísmicos de la zona donde está localizada la estructura

Figura 1. Espectro de aceleraciones de diseño para 5% de amortiguamiento



FUENTE: ADAPTADA DE LA CCP-14 FIGURA 3.10(A-1) PAG 3-56

- PGA = coeficiente de aceleración pico del terreno.
- S_s = Máximo coeficiente asignado de la aceleración de respuesta espectral, considerado un amortiguamiento de 5%. Parámetro para periodos cortos (0.2 segundos), expresado como una fracción de la aceleración de la gravedad g.
- S₁ = Máximo coeficiente asignado de la aceleración de respuesta espectral; considerado un amortiguamiento de 5% Parámetro en un período de 1 segundo expresado como una fracción de la aceleración de la gravedad g.

- T_0 = Período de aceleración de referencia empleado para definir la forma espectral y es igual a 0.2 segundos
- T_s = Período de vibración que define el punto en el cual el espectro de aceleraciones cambia de la zona constante a una inversamente proporcional al período. T_s es igual a SD_1/S_s , en segundos
- T_m = Período medio de vibración del modelo de vibración en segundos
- S_{ds} = Respuesta de diseño de aceleración espectral con 5% de amortiguamiento en un corto periodo.
- S_{d1} = Respuesta de diseño de aceleración espectral con 5% de amortiguamiento en un periodo de 1 segundo.

6.3.3 Parámetros Básicos.

Tabla 2. Tabla resumen de parámetros sísmicos.

NSR-10	REGIÓN N°	VALOR
Aa	6	0,30
Av	6	0,60
TIPO DE SUELO		D

FUENTE: ADAPTADA DE LA CCP-14 TABLA 3.10.3.2-1 PAG 3-54

Los valores del factor de sitio, F_{pga} , se determinan en función del tipo de perfil del terreno y de la intensidad de los movimientos sísmicos. Según la normativa CCP-14, estos valores varían entre 0.8 y 2.5, dependiendo del tipo de perfil, tal como se muestra en la Tabla 3(10).

Tabla 3. Valores del factor de Sitio, F_{pga} , en el período de vibración cero del Espectro de Aceleraciones.

Tipo de Perfil	PGA \leq 0.1	PGA = 0.2	PGA = 0.3	PGA = 0.4	PGA \geq 0.5
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	Véase Nota 2	Véase Nota 2	Véase Nota 2	Véase Nota 2	Véase Nota 2

FUENTE: ADAPTADA DE LA CCP-14 TABLA 3.10.3.2-1 PAG 3-55

Notas: Se debe usar interpolación lineal para valores intermedios de PGA.

- Para el perfil tipo F, debe realizarse un estudio de sitio particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda. Los valores del factor de sitio, F_a , se determinan en función del tipo de perfil del terreno y del coeficiente de aceleración espectral para períodos de vibración cortos. Según la normativa CCP-14, estos valores varían entre 0.8 y 2.5, dependiendo del tipo de perfil, como se muestra en la (Tabla 4)(10).

Tabla 4. Valores del factor de Sitio, F_a , en el intervalo de períodos de vibración cortos del Espectro de Aceleraciones

Tipo de Perfil	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	Véase nota 2	Véase nota 2	Véase nota 2	Véase nota 2	Véase nota 2

FUENTE: ADAPTADA DE LA CCP-14 TABLA 3.10.3.2-2 PAG 3-55

Notas:

- Debe usar interpolación lineal para valores intermedios de S_s .
- Para el perfil tipo F, debe realizarse un estudio de sitio particular para el lugar específico y llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda.

La Tabla 3.10.3.2-3 (Tabla 5) de la norma CCP-14 proporciona los valores del factor de sitio, F_v , en el intervalo de períodos de vibración largos del espectro de aceleraciones. Estos valores varían según el tipo de perfil del terreno y el coeficiente de aceleración espectral, S_1 , facilitando el diseño y análisis estructural bajo condiciones sísmicas(10).

Tabla 5. Valores del factor de Sitio, F_v , en el intervalo de períodos de vibración largos del Espectro de Aceleraciones.

Tipo de Perfil	$S_1 \leq 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 \geq 0.50$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	Véase nota 2	Véase nota 2	Véase nota 2	Véase nota 2	Véase nota 2

FUENTE: ADAPTADA DE LA CCP-14 TABLA 3.10.3.2-3 PAG 3-55

Notas:

- Se debe usar interpolación lineal para valores intermedios de S_1 .
- Para el perfil tipo F, debe realizarse un estudio de sitio particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda.

6.3.4 Parámetros Sísmicos.

En la Tabla 6 se resumen los parámetros sísmicos obtenidos con base en los efectos de sitio y la ubicación de la estructura.

Tabla 6. Resumen de parámetros.

NSR-10	REGIÓN N°	VALOR
Aa	6	0,30
Av	6	0,60
TIPO DE SUELO		D
Fpga	1,2	
Fa	1,3	
Fv	1,8	

6.3.5 Zonas De Desempeño Sísmico

Tabla 7 establece las zonas de desempeño sísmico basadas en el coeficiente de aceleración espectral SD1, con el fin de definir la clasificación sísmica de los puentes en función de su ubicación y nivel de riesgo sísmico (10).

Tabla 7. Zonas de Desempeño Sísmico.

Coeficiente de aceleración espectral SD1	Zona de Desempeño Sísmico
$SD1 \leq 0.15$	1
$0.15 < SD1 \leq 0.30$	2
$0.30 < SD1 \leq 0.50$	3
$0.50 < SD1 \leq 0.50$	4

FUENTE: ADAPTADA DE LA CCP-14 TABLA 3.10.6.1-3 PAG 3-55

6.3.6 Factor De Modificación R.

Tabla 8 presenta los factores de modificación de respuesta aplicables a distintas subestructuras, dependiendo de su categoría operacional. Estos factores permiten ajustar las fuerzas de diseño en función de las características estructurales específicas y la importancia de cada subestructura (10).

Tabla 8. Factores de Modificación de Respuesta—Subestructuras.

Subestructura	Categoría Operacional		
	Crítica	Esencial	Otra
Pilares tipo muro-cimiento reforzado	1.5	1.5	2.0
Pilares con dimensión mayor			
- Con pilas inclinadas	1.5	2.0	3.0
- Con verticales únicamente	1.5	2.0	3.0
Columnas solas	1.5	2.0	3.0
Pórticos de acero o compuestos hacer/concreto			
- Con pilas verticales únicamente	2.0	3.5	5.0
- Con pilas inclinadas	2.0	4.0	6.0
Pórticos con múltiples columnas	2.5	4.5	7.0

FUENTE: ADAPTADA DE LA CCP-14 TABLA 3.10.1-4 PAG 3-58

6.3.7 Parámetros De Entrada y salida.

En la Tabla 9 se presentan los resultados de los parámetros sísmicos obtenidos con base en los efectos de sitio y la ubicación de la estructura. Estos datos son fundamentales para el diseño y análisis sísmico de estructuras. Los factores de amplificación (F_{pga} , F_a , F_v) y los desplazamientos espectrales (SD_s , SD_1) permiten determinar cómo una estructura responderá a diferentes niveles de aceleración sísmica, asegurando que su diseño contemple una resistencia adecuada frente a eventos sísmicos.

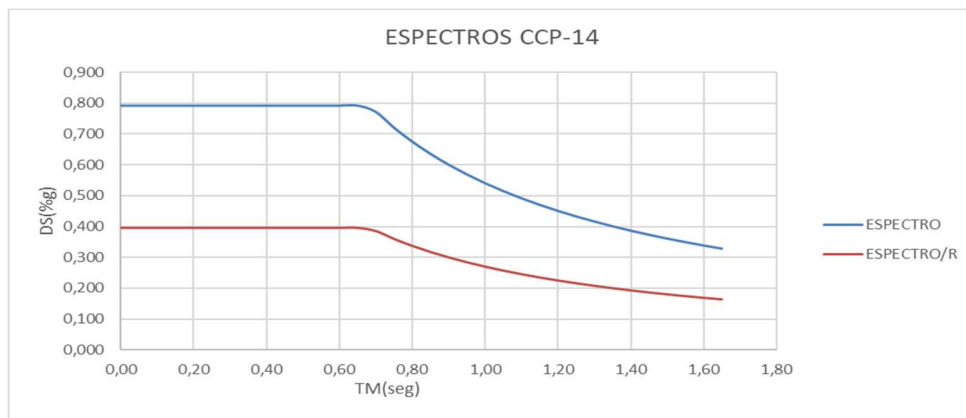
Tabla 9. Datos de entrada.

DATOS DE ENTRADA		
DEPARTAMENTO	CAUCA	
CIUDAD	MUNICIPIO DE CALOTO	
DIRECCIÓN	PUENTE EL PALO	
PROYECTO	PROYECTO 2024 SEBASTIÁN PANTOJA Y DAVID PANTOJA	
PGA	0,30	Unitless
S_s	0,60	Unitless
S_1	0,30	Unitless
TIPO DE SUELO	D	Unitless
F_{pga}	1,2	Unitless
F_a	1,3	Unitless
F_v	1,8	Unitless
SD_1	0,54	seg
CATEGORÍA OCUPACIONAL	Esencial	Unitless
R(subestructura)	2	Unitless
DATOS DE SALIDA		
SD_s	0,792	%g
TS	0,682	seg
SD_1	0,540	seg

6.3.8 Espectros Estructura Y Subestructura.

La Figura 2 muestra los espectros de aceleración con base en la norma CCP-14. La curva azul representa el **espectro elástico**, el cual refleja la respuesta estructural bajo condiciones donde no se producen deformaciones permanentes. Con este espectro se evalúa el comportamiento de la estructura en su capacidad máxima sin daños inelásticos. Por otro lado, la curva roja representa el **espectro inelástico**, que considera la capacidad de la estructura para disipar energía a través de deformaciones inelásticas, siendo una herramienta fundamental en el diseño sísmico para estructuras que deben resistir sin colapsar, aunque experimenten daños. La diferencia entre ambos espectros permite evaluar la reducción de la demanda de resistencia debido a la capacidad de disipación de energía en la estructura.

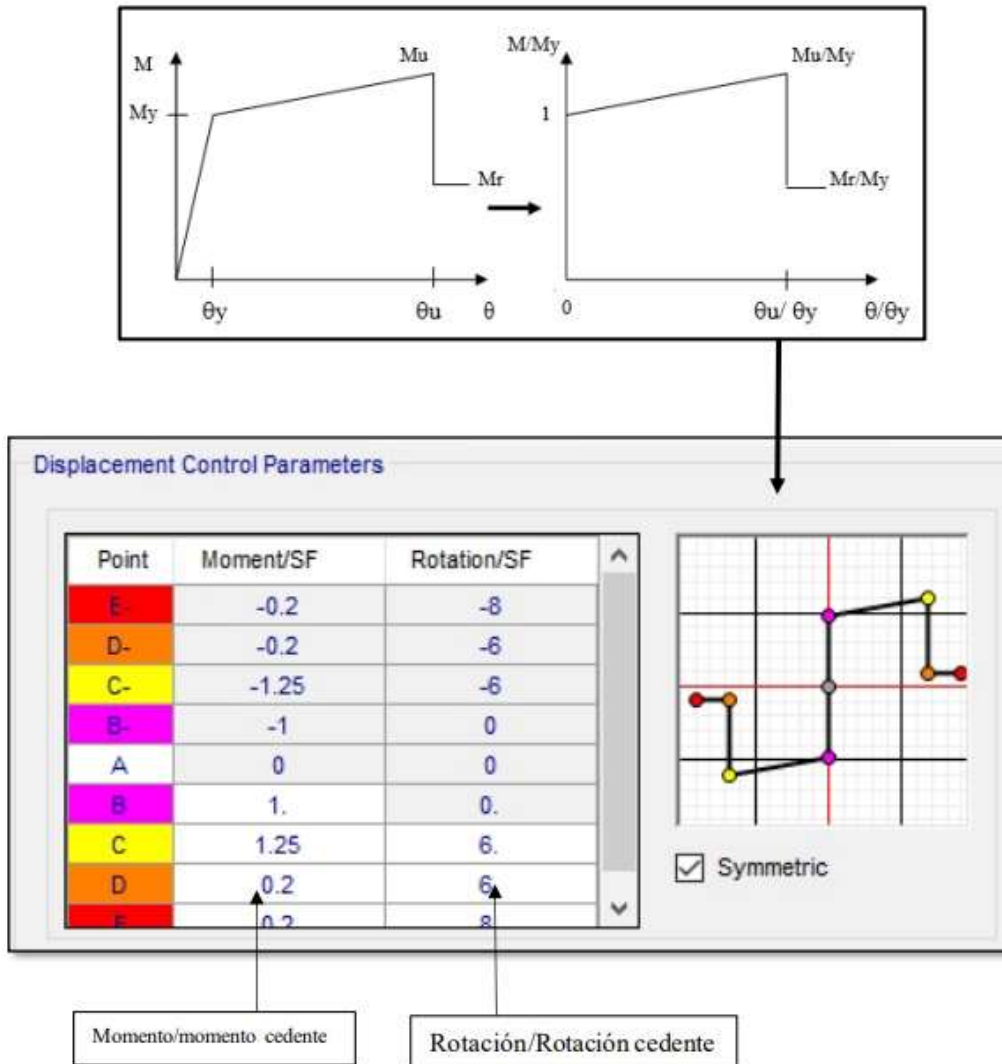
Figura 2. Espectros de respuesta.



6.4 Definición tabla de colores para el diagrama momento curvatura SAP2000.

El diagrama momento-curvatura en SAP2000 asigna colores específicos a cada punto representativo del comportamiento del material. Estos puntos reflejan las transiciones claves desde la zona elástica hacia la inelástica y finalmente hacia el estado de falla. Los colores sirven como herramienta visual para identificar de manera precisa los estados críticos en la respuesta del material y evaluar su desempeño frente a diferentes solicitaciones.

Imagen 4. Referencia de colores momento curvatura



6.5 Definición de rótulas.

En la Imagen 5 se puede observar la asignación de las rótulas a los diferentes elementos que conforman el puente vehicular el Palo. En la Imagen 6 se muestra una vista detallada de la asignación de las rótulas en el eje 1(XZ) de una de las cerchas principales. En esta configuración, se puede observar que todos los elementos estructurales están presentes y correctamente definidos. La Imagen 7, corresponde al eje 2 (XZ), se puede observar la asignación de las rótulas en la estructura. Además, se destaca la ausencia del elemento que falló en el puente. La asignación precisa de rótulas plásticas es necesaria en el modelado mediante el método Pushover por las siguientes razones:

- Representación Realista del Comportamiento Estructural: Las rótulas plásticas permiten simular el comportamiento no lineal de los elementos estructurales bajo cargas extremas.
- Identificación de Puntos Críticos: Asignar correctamente las rótulas plásticas ayuda a identificar las zonas donde es más probable que ocurran fallas. Esto permite a los ingenieros diseñar refuerzos o modificaciones para mejorar la resistencia y ductilidad de la estructura.
- Evaluación de la Capacidad de Deformación: Las rótulas plásticas permiten evaluar la capacidad de deformación de la estructura antes de alcanzar un estado de colapso. Esto garantiza que la estructura pueda soportar deformaciones significativas sin perder su integridad.
- Optimización del Diseño: Con una modelación precisa, los ingenieros pueden optimizar el diseño estructural, asegurando que los materiales se utilicen de manera eficiente y que la estructura cumpla con los requisitos de seguridad y desempeño.

7 ALGORITMO DE ITERACIÓN.

El algoritmo de iteración tiene como objetivo principal desarrollar un procedimiento controlado y seguro para la demolición progresiva del Puente Metálico El Palo. Permite identificar y evaluar las condiciones estructurales de cada elemento durante su desmontaje, asegurando que la estabilidad del puente se mantenga en cada etapa y minimizando los riesgos asociados al proceso.

7.1 Función del algoritmo

- Definir la secuencia de desmontaje: Organiza un orden lógico para el retiro de elementos estructurales, asegurando que cada etapa del proceso sea evaluada antes de proceder al siguiente paso.
- Controlar el colapso: Diseña un colapso controlado para garantizar que el desmontaje sea seguro, evitando fallas inesperadas y minimizando el impacto en infraestructuras cercanas.
- Optimizar el proceso: Permite ajustes dinámicos en función de los resultados obtenidos en cada iteración, garantizando un desmontaje eficiente y seguro.

7.2 Definiciones.

- Colapso de puente: Se ejecuta mediante la degradación de la rigidez en el nodo de colapso. En el modelo, se aplica el análisis Pushover utilizando la carga de colapso correspondiente.
- Montar elemento (i): Se restituye el elemento previamente desmontado debido a que la estructura presentó inestabilidad.
- Continuar: Procedimiento que permite avanzar, ya que la estructura puede colapsar de manera progresiva.

7.3 Pasos algoritmo de iteración.

- Paso 1: Determinación de Fuerzas Sísmicas:
El proceso inicia con la determinación de las fuerzas sísmicas correspondientes al puente. En esta etapa se calculan las fuerzas que actuarían sobre el puente en caso de un sismo, considerando las condiciones específicas del lugar, como la zona sísmica, el tipo de suelo y las características estructurales del puente.
- Paso 2: Montaje del Modelo Digital
Una vez determinadas las fuerzas sísmicas, se procede al montaje del modelo digital del puente. Este modelo se utiliza para realizar los análisis de estabilidad y permite simular el comportamiento de la estructura ante los diferentes escenarios de carga. Es importante que el modelo refleje con exactitud las condiciones reales del puente, incluyendo materiales, conexiones y cualquier otro factor relevante.
- Paso 3: Parametrización y Análisis Pushover:
El siguiente paso es parametrizar el análisis Pushover para dos direcciones principales: Sismo X y Sismo Y. Esto implica definir las direcciones de aplicación de las cargas laterales, considerando las características del puente y las fuerzas sísmicas previamente determinadas. Luego, se corre el análisis Pushover para ambas direcciones, lo cual permite evaluar el comportamiento no lineal de la estructura y detectar posibles mecanismos de falla.
- Paso 4: Evaluación de Estabilidad Inicial:
Una vez completado el análisis Pushover, se evalúa si el puente es estable bajo las cargas consideradas. Si el puente es estable, se procede a la siguiente fase de desmontaje de elementos estructurales. En caso contrario, si se detecta inestabilidad, se deben complementar las medidas de apuntalamientos y contravientos para garantizar la estabilidad del puente antes de continuar.

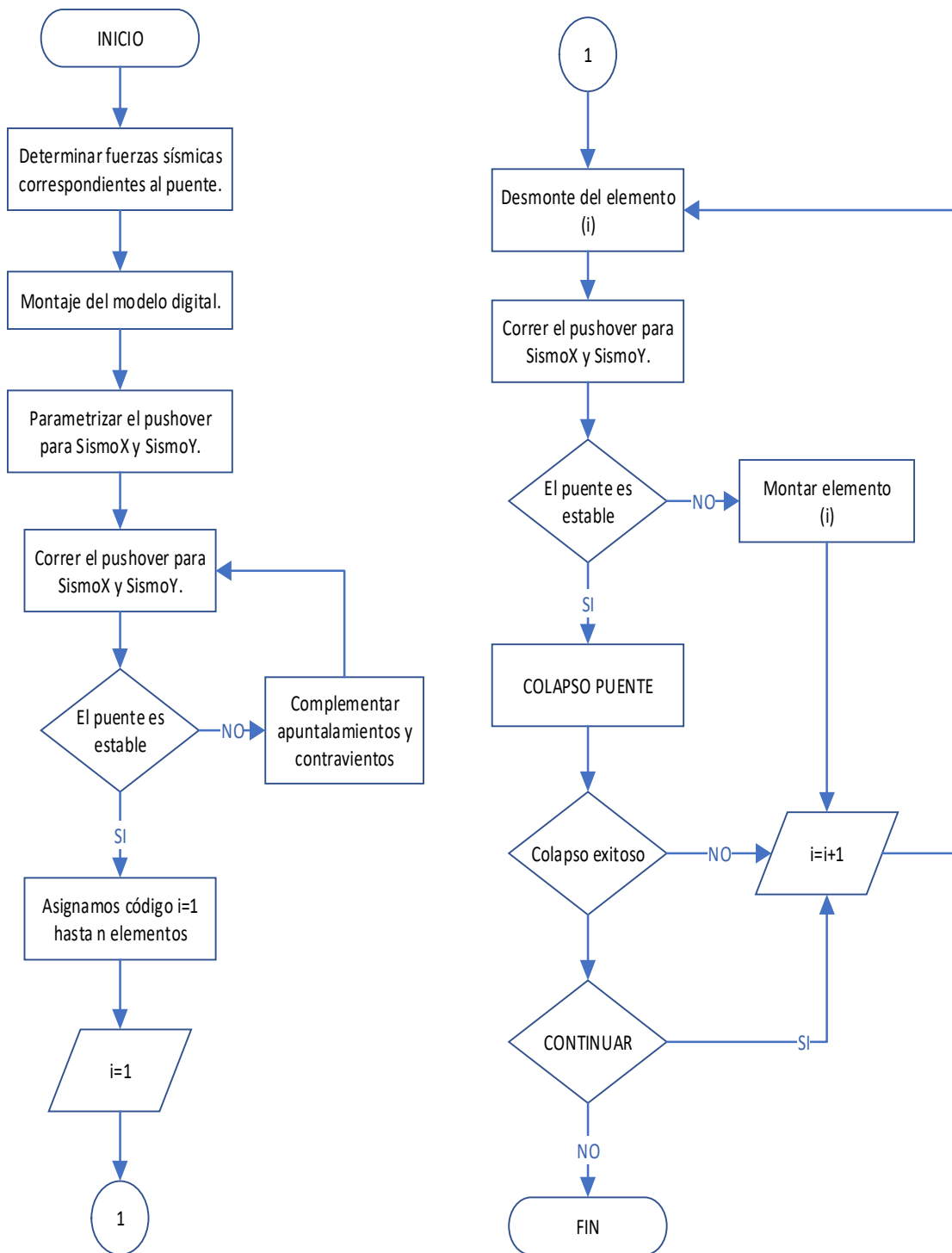
- Paso 5: Desmontaje Secuencial de Elementos:
 En esta etapa se asigna un código a cada uno de los elementos del puente para su identificación, comenzando por el primer elemento ($i = 1$). El proceso de desmontaje se lleva a cabo de manera secuencial, desmontando un elemento a la vez y evaluando la estabilidad del puente tras cada intervención. El desmontaje comienza con el elemento i , y luego se corre nuevamente el análisis Pushover para ambas direcciones (Sismo X y Sismo Y) con el fin de evaluar el efecto del desmontaje sobre la estabilidad del puente.

- Paso 6: Evaluación de Estabilidad Tras Desmontaje
 - Se verifica si el puente sigue siendo estable después de desmontar el elemento i .
 - Si el puente es estable: Se incrementa el valor de i ($i = i + 1$) y se procede a desmontar el siguiente elemento.
 - Si el puente no es estable: Se evalúa si se ha alcanzado el colapso de la estructura.

- Paso 7: Verificación del Colapso
 En caso de inestabilidad, se evalúa si el colapso ha sido exitoso. El éxito del colapso se define como la condición en la que la estructura alcanza un estado de falla controlado y previsto. Si el colapso no es exitoso, se continúa con el proceso de desmontaje de otros elementos para intentar alcanzar un colapso controlado.

- Paso 8: Fin del Proceso
 El proceso de desmontaje iterativo y análisis continúa hasta que se haya desmontado todos los elementos del puente o hasta que se alcance un colapso exitoso. El objetivo es establecer una secuencia de desmontaje que permita definir la ruta de colapso del puente, asegurando que se realice de manera controlada y minimizando riesgos imprevistos.

Figura 3. Algoritmo de iteración.



8 SIMULACIÓN DE DEMOLICIÓN PROGRESIVA.

Este capítulo detalla el proceso de calibración del modelo estructural del puente vehicular El Palo y su aplicación en la simulación del desmontaje progresivo de elementos para determinar la ruta de colapso del puente. Se incluyen los métodos empleados para calibrar las cargas adicionales, necesarios para obtener resultados representativos. Este ajuste valida el modelo y permite simular de manera confiable el comportamiento del puente durante el desmontaje, identificando la secuencia óptima de retiro de elementos y asegurando una planificación segura y eficiente del colapso controlado.

8.1 Calibración del modelo.

El desplazamiento registrado en campo ($Z_r = 285$ mm) bajo el peso propio del puente es el valor de referencia. Sin embargo, al aplicar la misma carga en el modelo digital, se obtuvo un desplazamiento menor ($Z_m = 253$ mm). Estas discrepancias pueden atribuirse a variaciones en los materiales reales y las propiedades consideradas en el modelo teórico.

Para ajustar estas diferencias, el modelo fue calibrado mediante la aplicación de cargas de empuje vertical adicionales, buscando que el desplazamiento teórico (Z_m) se aproxime al desplazamiento registrado en campo (Z_r). Este procedimiento asegura que el modelo simule de manera precisa el comportamiento estructural del puente, sirviendo como base para los análisis posteriores, incluyendo la simulación de desmontajes progresivos y colapsos controlados.

Se espera que el modelo teórico y la estructura real deben presentar el mismo desplazamiento, $Z_r = 285$ mm (Fotografía 3.), bajo el peso propio. Sin embargo, dado que existen diferencias en los materiales reales con los que fue construido el puente, es posible que el modelo teórico propuesto en este documento difiera del valor registrado en campo. Si no existieran estas diferencias, bastaría con trabajar únicamente con la carga de empuje del peso propio. Al aplicar esta carga en el modelo, se obtuvo un desplazamiento vertical negativo de $Z_m = 253$ mm (ver Imagen 8 y Tabla 10).

Fotografía 3.



PUENTE EL PALO [Fotografía], INGENIERÍA DAPA. SAS, 2024.

Imagen 8. Desplazamiento punto de control.

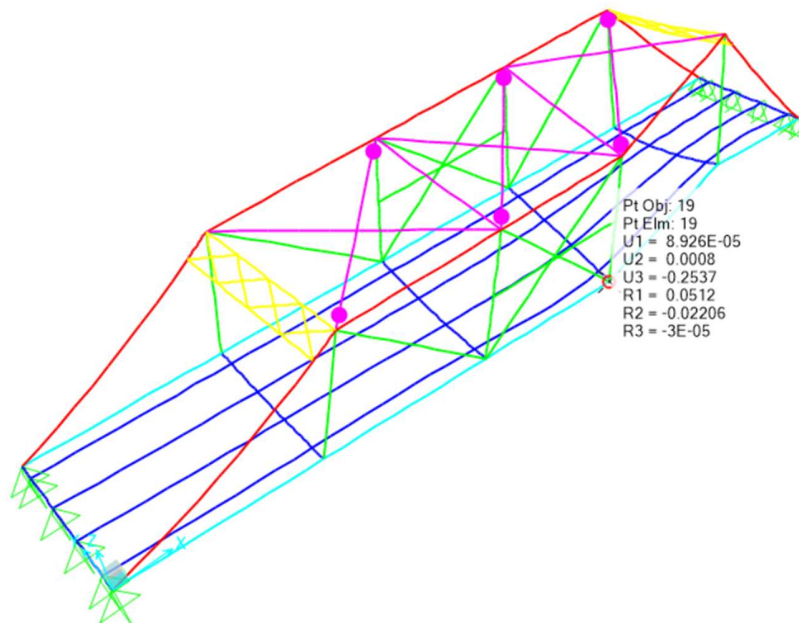
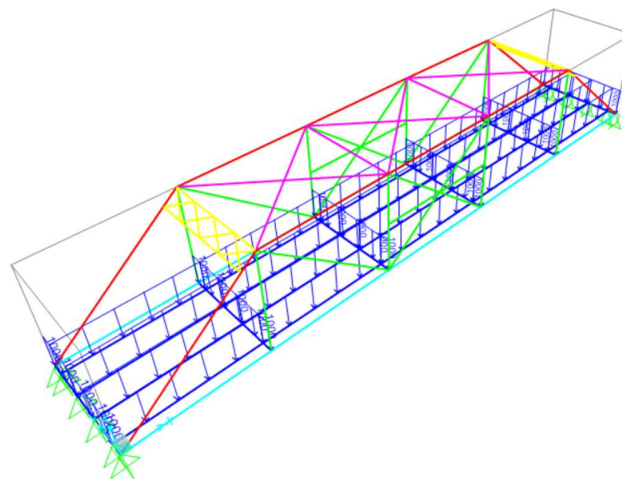


Tabla 10. Desplazamiento y rotación del punto de control.

TABLE: Joint Displacements									
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	Text	m	m	m	Radians	Radians	Radians
19	DEAD	NonStatic	Last Step	8,90E-05	0,000771	-0,253	0,0512	-0,0220	-0,00003

Iniciamos con una carga aleatoria para la primera iteración, aplicando 1000 kgf/m en las vigas longitudinales y transversales, como se muestra en la Imagen 9.

Imagen 9. Asignación de carga distribuida pushover con carga vertical 1000 kgf/m sobre las vigas longitudinales y transversales.



Al aplicar el análisis Pushover vertical con esta carga, se obtuvo un desplazamiento debido al empuje de $Z_m=1396$ mm (ver Imagen 10 y Tabla 11). Continuamos iterando hasta alcanzar un valor de Z_m aproximadamente igual o mayor a Z_r .

Imagen 10. Desplazamiento punto de control primera iteración.

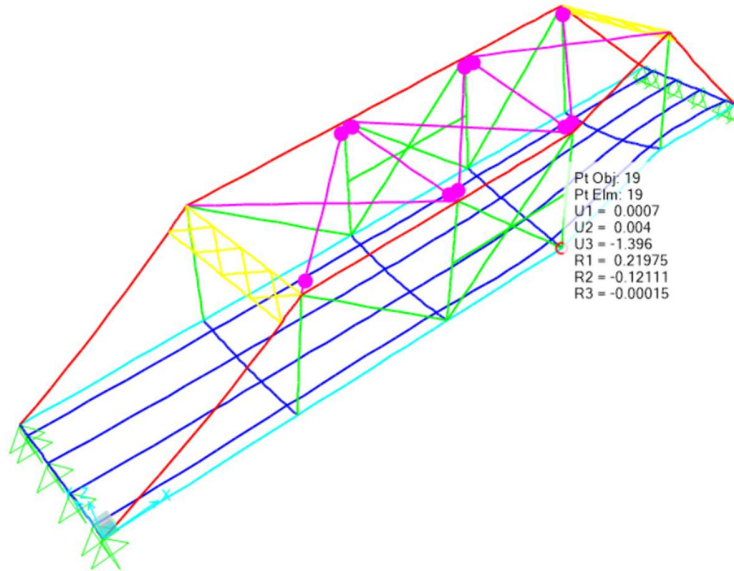


Tabla 11. Desplazamiento y rotación del punto de control.

CARGA	TABLE: Joint Displacements						
	Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3
VERTICAL	Text	Text	Text	Text	m	m	m
kgf/m	19	PUSHOVER	NonStatic	Last Step	0,000659	0,004027	-1,396022

Aplicamos varias cargas de forma aleatoria para analizar el comportamiento del desplazamiento, obteniendo así los valores de carga y desplazamiento correspondientes (ver Tabla 12). Con estos datos se realizaron diferentes tipos de regresiones para encontrar la mejor ecuación que modele con precisión este comportamiento. En primer lugar, se hizo una regresión exponencial (Gráfico 1), seguida de una regresión lineal (Gráfico 2) y, finalmente, una regresión polinómica (Gráfico 3). Cada uno de estos métodos nos permitió evaluar cómo se ajustan los datos experimentales a diferentes modelos matemáticos, proporcionando una comprensión más profunda del comportamiento estructural bajo las cargas aplicadas.

Tabla 12. Resumen de cargas vs desplazamientos.

CARGA VERTICAL	TABLE: Joint Displacements						
	Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3
kgf/m	Text	Text	Text	Text	m	m	m
25	19	PUSHOVER	NonStatic	Last Step	0,000103	0,000854	-0,282062
26	19	PUSHOVER	NonStatic	Last Step	0,000103	0,000857	-0,283197
28	19	PUSHOVER	NonStatic	Last Step	0,000104	0,000863	-0,285468
29	19	PUSHOVER	NonStatic	Last Step	0,000105	0,000867	-0,286603
50	19	PUSHOVER	NonStatic	Last Step	0,000116	0,000936	-0,310522
500	19	PUSHOVER	NonStatic	Last Step	0,000351	0,002272	-0,779813
1000	19	PUSHOVER	NonStatic	Last Step	0,000659	0,004027	-1,396022

Gráfico 1. Comportamiento exponencial.

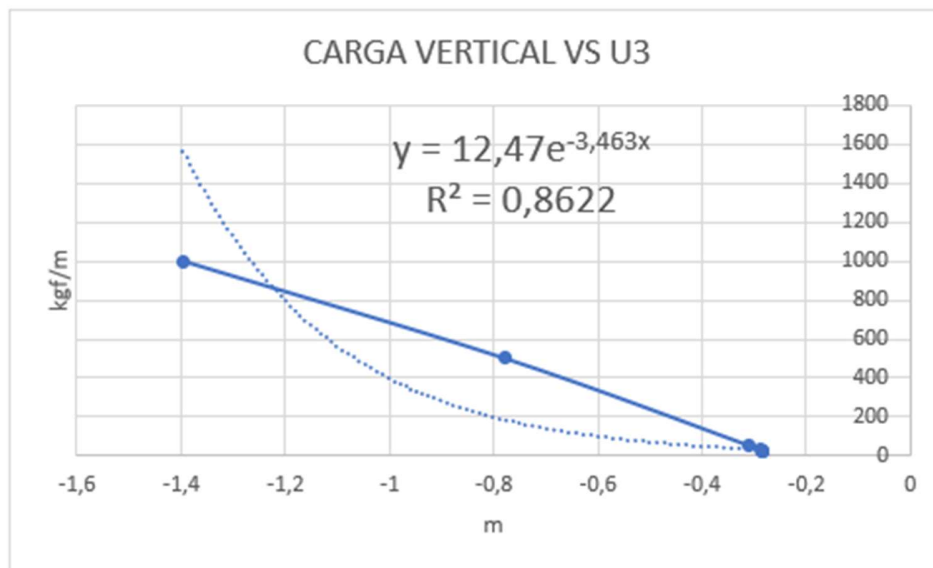


Gráfico 2. Comportamiento lineal.

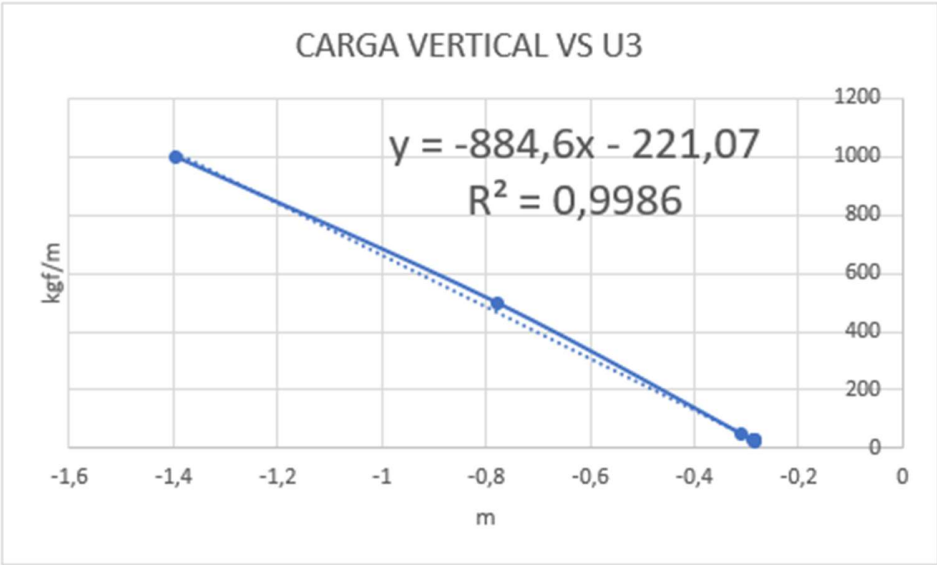
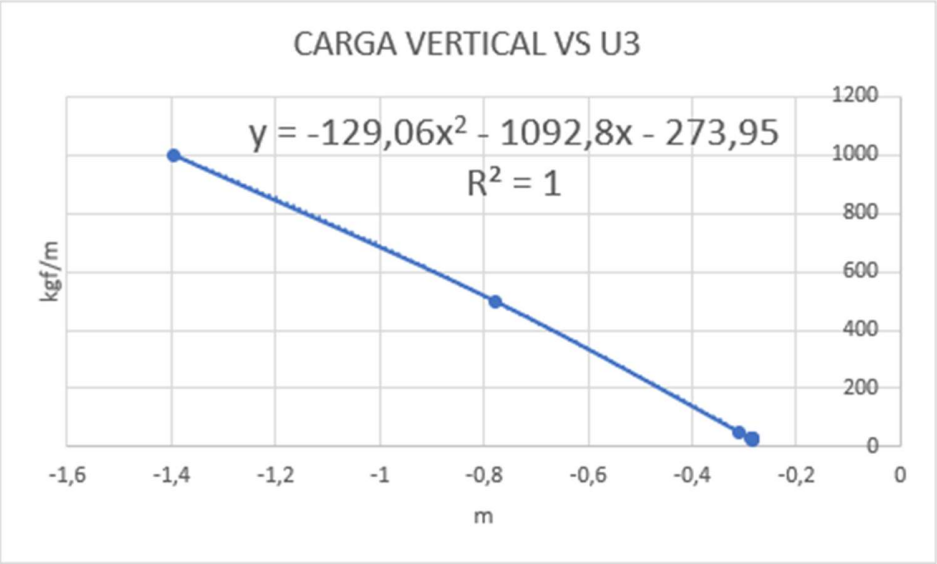


Gráfico 3. Comportamiento polinómico de grado 2.



A partir de las gráficas anteriores, podemos afirmar que la variación de carga en este Pushover de calibración generó desplazamientos con un comportamiento polinómico, resultado de la respuesta inelástica de la estructura. Por lo tanto, fue necesario realizar varias iteraciones, dado que asumir un comportamiento lineal habría introducido un error al calcular la carga de empuje adicional necesaria para la calibración.

Podemos concluir que, tras realizar diferentes regresiones (lineal, exponencial y polinómica), la que mejor describió el desplazamiento vertical en este punto fue la regresión polinómica de segundo grado, con un coeficiente de determinación (R^2) igual a 1. Este resultado garantiza que la carga de calibración aplicada proporciona la máxima confiabilidad en la representación del comportamiento estructural del puente.

8.2 Factores de seguridad.

Una de las directrices principales de este estudio fue desarrollar un procedimiento de colapso seguro y eficiente, priorizando la seguridad de los operadores y, en segundo lugar, la protección de las estructuras cercanas. Esto implica la necesidad de aplicar factores de seguridad que mantengan estos criterios en todo momento. Por lo tanto, se emplearon los factores de seguridad normativos establecidos por el código colombiano de puentes CCP-14, en su capítulo 3.4.2, "Factores de Carga para Construcción". Todas las combinaciones de carga indicadas en la Tabla 13 deben ser investigadas y modificadas según las especificaciones aquí descritas. Para las combinaciones de carga de resistencia I, III y V durante la construcción, los factores de carga para el peso de la estructura y sus componentes (DC y D) no deben ser inferiores a 1.25, salvo que el propietario indique lo contrario. Asimismo, el factor de carga para viento en la combinación de resistencia III debe mantenerse en un valor mínimo de 1.25(10) .

Tabla 13. Combinaciones y Factores de Carga.

Estado Limite de la Combinación de carga	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU	TG	SE	Use uno de estos a la vez				
										EQ	BL	IC	CT	CV
Resistencia I (a menos que se indique)	γ_p	1.75	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-	-
Resistencia II	γ_p	1.35	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-	-
Resistencia III	γ_p	-	1.00	1.40 0	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-	-
Resistencia IV	γ_p	-	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	-	-	-	-	-	-	-
Resistencia V	γ_p	1.35	1.00	0.40 0	1.0	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-	-
Evento Extremo I	γ_p	γ_{EQ}	1.00	-	-	1.00	-	-	-	1.00	-	-	-	-
Evento Extremo II	γ_p	0.50	1.00	-	-	1.00	-	-	-	-	1.00	1.00	1.00	1.00
Servicio I	1.00	1.00	1.00	0.30 0	1.0	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-	-
Servicio II	1.00	1.30	1.00	-	-	1.00	1.00/1.20	-	-	-	-	-	-	-
Servicio III	1.00	0.80	1.00	-	-	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-	-
Servicio IV	1.00	-	1.00	0.70 0	-	1.00	1.00/1.20	-	1.0	-	-	-	-	-
Fatiga I- Sólo LL, IM & CE	-	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fatiga I II- Sólo LL, IM & CE	-	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

TOMADO DE LA CCP-14 TABLA 3.4.1 PAG 3-14

La selección de los factores de seguridad, de acuerdo con el código colombiano de puentes CCP-14 (ver Tabla 14), excluye el peso propio de la carpeta de rodamiento (DW). Aunque esta carga es permanente, no fue necesario considerarla, ya que representa una descarga. Al retirar la carpeta de rodadura, se reduce aproximadamente 82 toneladas-fuerza de las cargas permanentes, lo cual resulta beneficioso para el proceso de desmontaje del puente.

Tabla 14. Combinaciones de carga.

COMBINACIONES DE CARGA													
CARGAS	PERMANENTES			TRANSITORIAS									
ESTADO LIMITE-COMBINACIÓN	DC	DD	DW	CAM	TAN	IM	CA	TA	CCA	CE	BR	LS	EQ
RESISTENCIA 1	1,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RESISTENCIA 2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RESISTENCIA 3	1,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RESISTENCIA 4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RESISTENCIA 5	1,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EVENTO EXTREMO 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
EVENTO EXTREMO 2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SERVICIO 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SERVICIO 2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SERVICIO 3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SERVICIO 4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FATIGA 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FATIGA 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

La Tabla 15 “Combinaciones de carga” presenta diferentes combinaciones de cargas estructurales utilizadas en el diseño y análisis de puentes. El propósito de la tabla es asegurar que la estructura pueda soportar diferentes escenarios de carga, garantizando su seguridad y estabilidad bajo diversas condiciones, para obtener las combinaciones de carga ver Tabla 16 y al final los estados límites de empuje horizontal y vertical ver Tabla 17.

Tabla 15. Tabla resumen de combinaciones de carga.

CARGAS		
ESTADO LIMITE-COMBINACIÓN	DC	EQ
RESISTENCIA 1	1,25	0
RESISTENCIA 2	1	0

RESISTENCIA 3	1,25	0
RESISTENCIA 4	1	0
RESISTENCIA 5	1,25	0
EVENTO EXTREMO 1	1	1
EVENTO EXTREMO 2	1	0
SERVICIO 1	1	0
SERVICIO 2	1	0
SERVICIO 3	1	0
SERVICIO 4	1	0
FATIGA 1	0	0
FATIGA 2	0	0

Tabla 16. Combinaciones de carga.

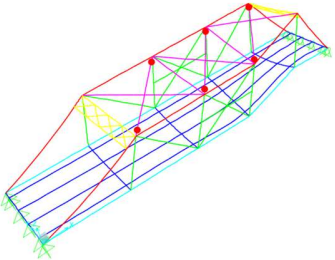
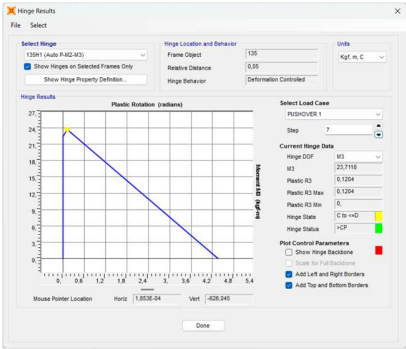
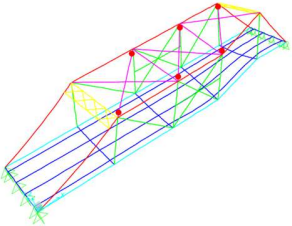
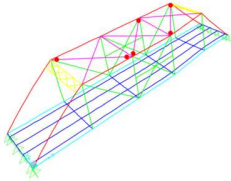
CARGAS A APLICAR		
	DC	EQ
COMBINACIÓN 1	1,25	0
COMBINACIÓN 2	1	1

Tabla 17. Empujes.

COMBINACIÓN 1		
PUSHOVER 1	1,25	DEAD
	1,25	SDEAD
COMBINACIÓN 2X		
PUSHOVER 2	1	DEAD
	1	SDEAD
	1	SX
COMBINACIÓN 2Y		
PUSHOVER 3	1	DEAD
	1	SDEAD
	1	SY

La Tabla 18 (*Imagen 11, Imagen 12, Imagen 13*) presenta la respuesta obtenida para los diferentes empujes en la estructura durante el proceso de desmontaje del puente. Esta tabla permite determinar el comportamiento de la estructura bajo distintas condiciones de carga, asegurando que cada etapa del desmontaje se realice de manera segura y controlada. En la etapa 1, se evaluará la estructura considerando tres casos de análisis (COMBINACIÓN 1, COMBINACIÓN 2X y COMBINACIÓN 2Y), como se detalla en la Tabla 17.

Tabla 18. Etapa 1, iteración 1

<p>Imagen 11. Pushover 1 – etapa 1.</p> 	<p>Gráfico 4. Plastificación del elemento 135.</p> 
<p>Imagen 12. Pushover 2 – etapa 1.</p> 	<p>Imagen 13. Pushover 3 – etapa 1.</p> 

8.3 Análisis de etapas para obtener el procedimiento de desmontaje.

Se observa que la falla siempre se presentó en los elementos de la cercha de rigidez ubicada en la parte superior del puente para todos los estados límite de verificación. La plastificación no se originó por fuerza axial, sino por flexión, comenzando a partir del paso 9/11. De manera similar, otros elementos en esta zona se plastificaron desde el paso 7/13 (Gráfico 4) en el Pushover 1. Para el Pushover 2, el proceso de plastificación tampoco se debió a fuerza axial, sino a flexión, iniciando en el paso 10/15. En el Pushover 3, se presentó de forma similar por flexión a partir del paso 10/13. Con estos resultados, concluimos en la ETAPA 1 que es necesario implementar apuntalamientos.

Tabla 19. Resumen de pushover.

ETAPA	PUSHOVER			ELEMENTOS		ESTADO	OBSERVACIÓN
	1	2	3	DES	REI		
1	133-	133-	132-	NULL		NO	Se requiere apuntalamientos
	131-	131-	131-				
	135	135	135				

En la etapa 2, se llevó a cabo un apuntalamiento utilizando un tubo cuadrado ASTM A500 de 200x200x12 para los tres casos de análisis como se muestra en las Imagen 14, Imagen 15, Imagen 16 y Imagen 17. Los elementos que anteriormente generaron plastificación en las rótulas, con el apuntalamiento, no incursionaron en el rango inelástico. El tubo empleado es similar al utilizado en la ejecución real del proyecto. Es interesante observar que, en esta primera iteración del análisis, solo se requiere un único apuntalamiento para estabilizar la estructura. Este apuntalamiento fue seleccionado mediante un método basado en la resistencia, asegurando que el elemento estructural pueda soportar las cargas aplicadas de manera efectiva. La elección de este tipo de tubo cuadrado se debe a sus excelentes propiedades mecánicas y su capacidad para proporcionar una estabilidad adicional a la estructura durante el proceso de desmontaje.

Imagen 14. Apuntalamiento.

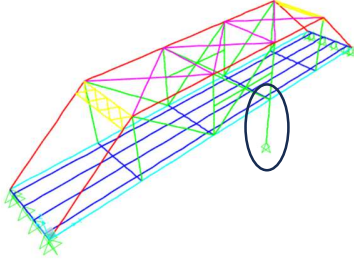


Imagen 15. Pushover 1 etapa 2.

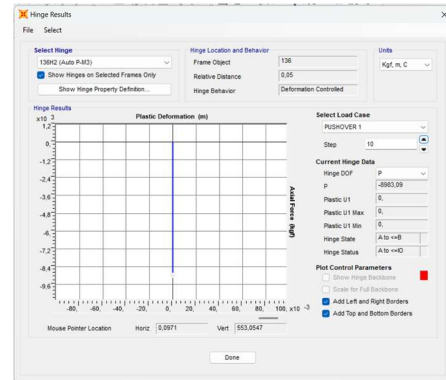


Imagen 16. Pushover 2 etapa 2.

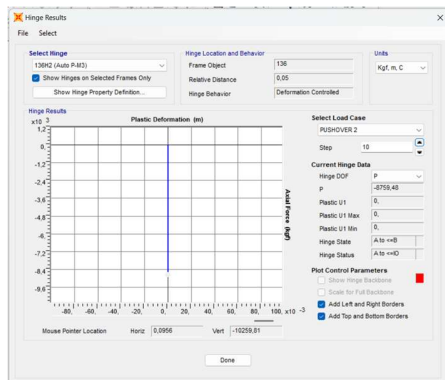
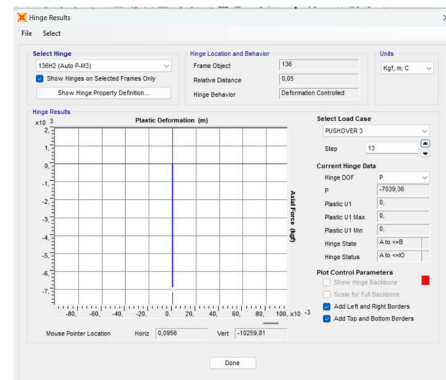
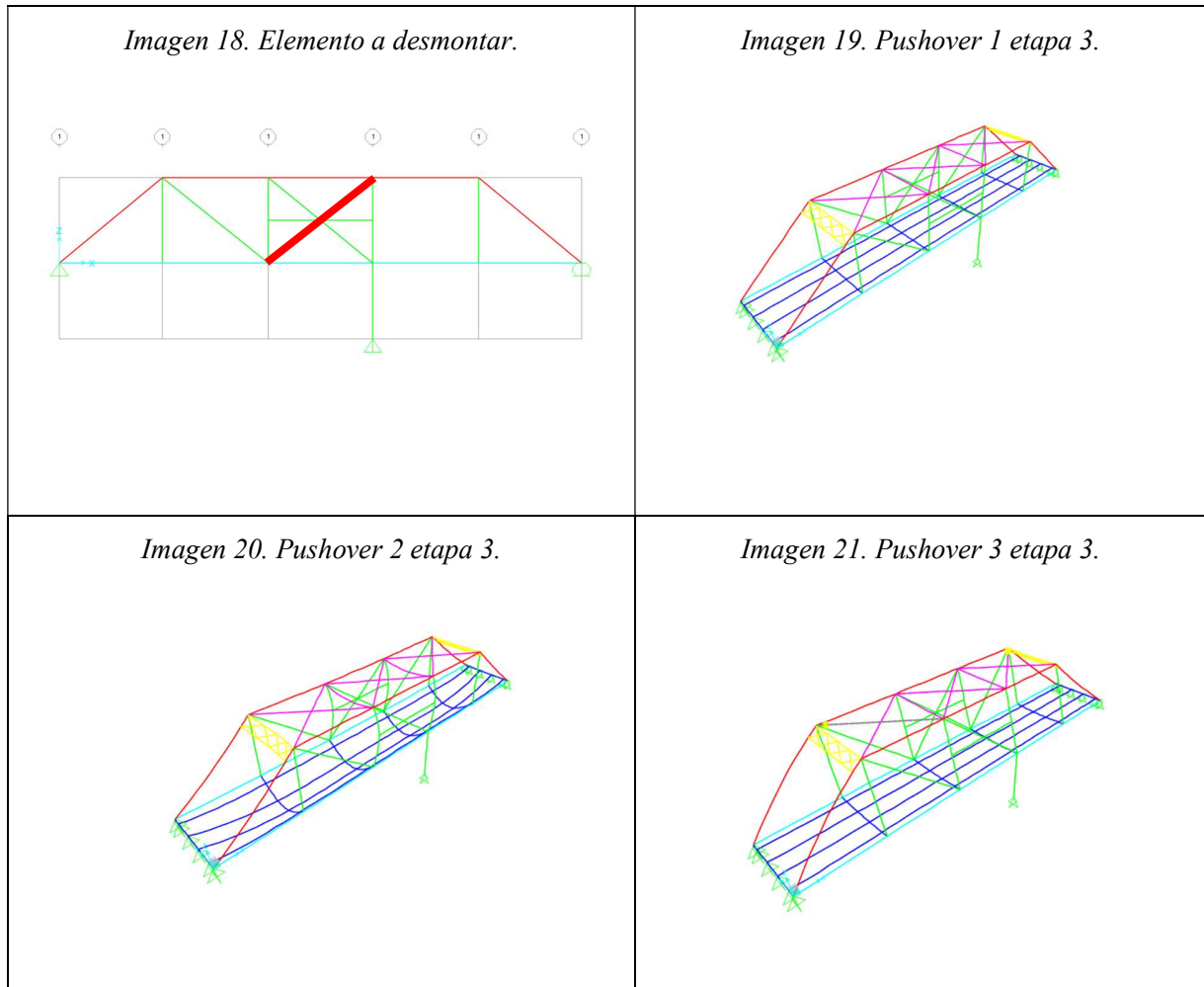


Imagen 17. Pushover 3 etapa 2.



Es importante destacar que el apuntalamiento demostró un desempeño excepcional durante el análisis Pushover en los tres estados límite evaluados. Durante el proceso de desmontaje, la empresa responsable de la actividad determinó que solo era necesario un apuntalamiento único. Sin embargo, la empresa encargada de la interventoría solicitó el apuntalamiento completo del puente mediante ocho puntales. Esta decisión requirió un considerable esfuerzo en términos de tiempo y recursos económicos, además de una serie de procesos complejos, como el corte y ensamblaje de placas, el izaje, la colocación y el bloqueo de los puntales. En la etapa 3, se realizó el proceso iterativo de desmontaje aleatorio de elementos para llevar el puente a un colapso controlado, empleando el algoritmo de desmontaje diseñado previamente en el capítulo 7,

"Algoritmo de Iteración" (ver Figura 3). En esta fase, se desmonto el elemento 125 (ver Imagen 18), ubicado en la cercha del eje 1.



El elemento 125 no presentó ningún problema de inestabilidad durante el desmontaje para los 3 estados límites (Imagen 19, Imagen 20, Imagen 21).

Durante la simulación de las Etapas 4 y 5, Tabla 20. Iteracion etapa 1 a etapa 6. La estructura no incurrió en el rango inelástico por lo tanto se mantuvo estable después del retiro de los elementos 126 y 124. Esta estabilidad permitió continuar con la siguiente etapa.

Tabla 20. Iteracion etapa 1 a etapa 6.

ETAPA	PUSHOVER			ELEMENTOS		ESTADO	OBSERVACIÓN
	1	2	3	DES	REI		
1	133-131-135	133-131-135	132-131-135	NULL		NO	
2				NULL		OK	SE INSTALO UN PUNTAL
3			132-135	125		OK	
4	133-131-135	133-131-135	135	126		OK	
5	133-135	133-131-135	135	124		OK	

En la etapa 6, se procedió al retiro del elemento 122 de la cercha principal en el eje 1 (ver Imagen 21). Durante esta misma etapa, se observó que el elemento 131 presentó fallas en los tres estados límite (ver Imagen 23, Imagen 25 y Imagen 24), lo que evidenció una inestabilidad estructural que podría derivar en un colapso (ver Tabla 21).

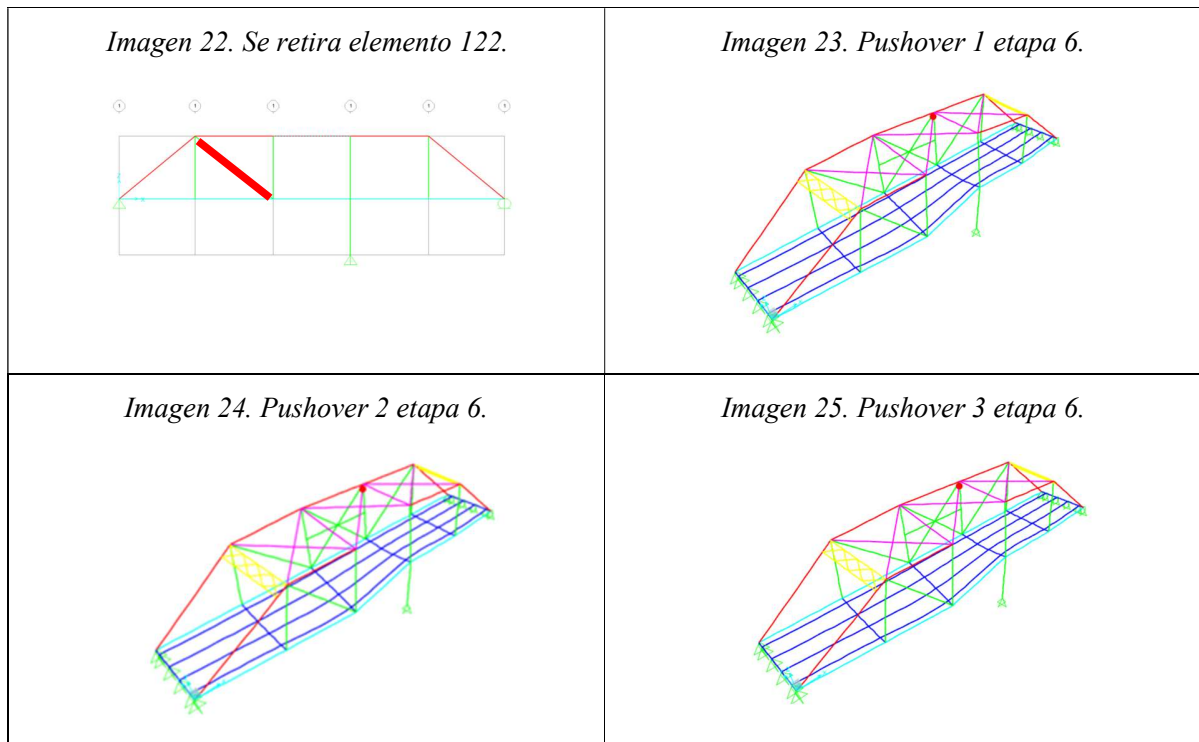


Tabla 21. Reporte de la etapa 6.

ETAPA	PUSHOVER			ELEMENTOS		ESTADO	OBSERVACIÓN
	1	2	3	DES	REI		
6	131	131	130 131	122		NO	

Se continuó con el proceso iterativo, siguiendo el algoritmo descrito en la Figura 3 del Capítulo 7, esto permitió registrar detalladamente las etapas 7-20 (Tabla 22). Durante este proceso, el algoritmo determinó si la estructura mantenía su estabilidad tras el retiro de cada componente, en caso de inestabilidad el algoritmo reinstaló el elemento retirado y procedió a evaluar el siguiente, asegurando un análisis progresivo y controlado del desmontaje.

Tabla 22. Registro etapas 7-20.

ETAPA	PUSHOVER			ELEMENTOS		ESTADO	OBSERVACIÓN
	1	2	3	DES	REI		
7		133-131-135	132 135	11	122	OK	
8		133-135 131	135	10		OK	
9	134-135 23	135 23 134	135 23	120		NO	
10	133	133-131-135	135	8	120	OK	
11		133-131-135	135	6		OK	
12			132-134	5		OK	
13			132-135	16		OK	
14			135	22		OK	
15			135	127		OK	
16			135	128		OK	
17			135	129		OK	
18				23		OK	
19			135	11		OK	
20				19		OK	

En la etapa 21 al analizar la estructura, se identificó un desplazamiento vertical de la plataforma de 8950 mm (ver Imagen 26). En la Tabla 24 indica que, aunque la armadura de la estructura no presento plastificación, la plataforma puede experimentar problemas, convirtiéndose en un posible factor de colapso. De acuerdo a los resultados obtenidos por el algoritmo de iteración se encontró en esta etapa necesario usar un puntal adicional para garantizar su estabilidad. Este resultado demuestra que se requiere correr nuevamente el algoritmo desde su inicio.

Imagen 26. Etapa 21.

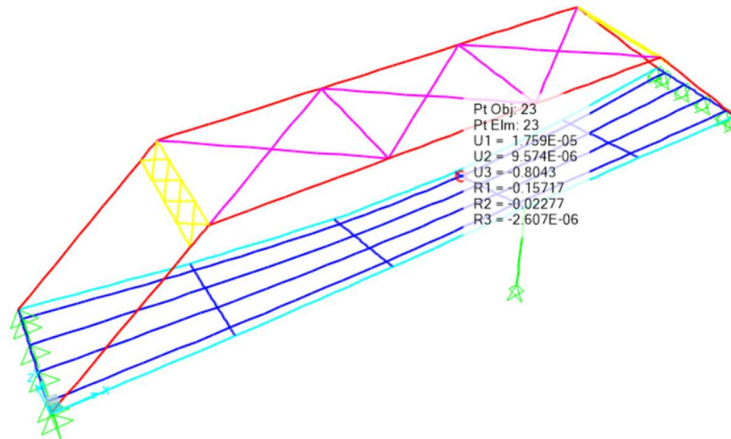


Tabla 23. Desplazamiento vertical de la plataforma.

table: joint displacements						
joint	outputcase	casetype	steptype	u1	u2	u3
text	text	text	text	m	m	m
24	pushover 1	nonstatic	max	0,000197	0,000096	0
24	pushover 1	nonstatic	min	0	0	-8,954831
24	pushover 2	nonstatic	max	0,000392	0,000073	0
24	pushover 2	nonstatic	min	0	0	-7,161951
24	pushover 3	nonstatic	max	0,000634	0,008587	0
24	pushover 3	nonstatic	min	0	0	-7,163868

Debido a que la estructura mostraba desplazamientos verticales en la plataforma del puente, fue necesario añadir un apuntalamiento adicional para garantizar su estabilidad durante el desmontaje. Al realizar estos ajustes, se generó un nuevo conjunto de datos, reflejado en la Tabla 24, que muestra el comportamiento de la estructura bajo las condiciones modificadas.

Tabla 24. Registro de desmontaje.

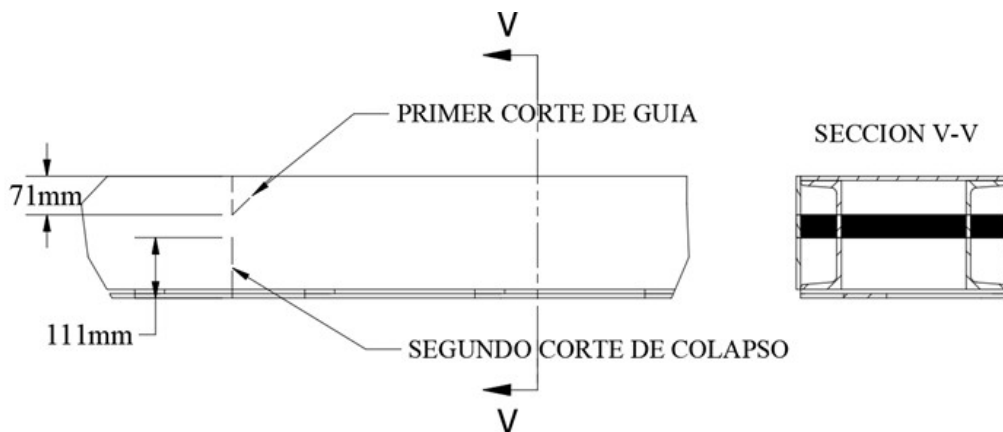
ETAPA	PUSHOVER			ELEMENTOS		ESTADO	OBSERVACIÓN
	1	2	3	DES	REI		
1	133-131-135	133-131-135	132-131-135	NULL		NO	
2				PT1		OK	se instala puntal uno
				PT2		OK	se instala puntal dos
3			132-135	125		OK	
4			132-135	126		OK	
5	133	133-131-135	135	124		OK	
6			135	11		OK	
7		133	135	10		OK	
8			135	8		OK	
9			135	6		OK	
10				5		OK	
11				16		OK	
12				22		OK	
13				127		OK	
14				128		OK	
15				129		OK	
16				23		OK	
17			88	11		OK	
18			88	19		OK	
19			88	17		OK	
20				21		OK	
21				135		OK	
22				134		OK	
23				28		OK	
24				131		OK	
25				130		OK	
26				29		OK	
27				133		OK	
28				132		OK	
29				cer u1		OK	cercha de rigidez 1
30				cer u2		OK	cercha de rigidez 2
31				cer eje 1		OK	colapso cercha eje 1
32				cer eje 2		OK	colapso cercha eje 2

8.4 Colapso controlado de las cerchas principales.

En este procedimiento, se realizó un análisis Pushover, complementado con una carga puntual aplicada (ver Imagen 28) en el punto de instalación del diferencial de cadena (ver Imagen 29). Este diferencial dirige la trayectoria del colapso durante el corte parcial de los nudos estructurales (ver Imagen 31).

La estrategia consistió en reducir la rigidez en los nudos 3H1 y 1H1 (Imagen 29) mediante una degradación controlada (Imagen 27). Esto indujo un colapso predecible de la estructura, permitiendo que la cercha del eje 1 colapsara hacia el interior del puente. La pérdida de rigidez en puntos específicos permitió que la estructura respondiera de manera controlada a las cargas aplicadas.

Imagen 27. Degradación de sección



La carga establecida de 500 kgf en el software (ver Imagen 28), corresponde al uso de un equipo de sacrificio, conocido como diferencial de cadena (ver Imagen 30), el cual será sometido a tensión durante el procedimiento. Este equipo no requiere permanecer intacto, ya que su función principal es absorber las tensiones y guiar el colapso de la estructura (ver Imagen 31). Su propósito es garantizar que el colapso siga la trayectoria planificada, minimizando riesgos y optimizando tanto la seguridad del personal como la preservación de las secciones restantes de la estructura.

Imagen 28. Valor carga de empuje.

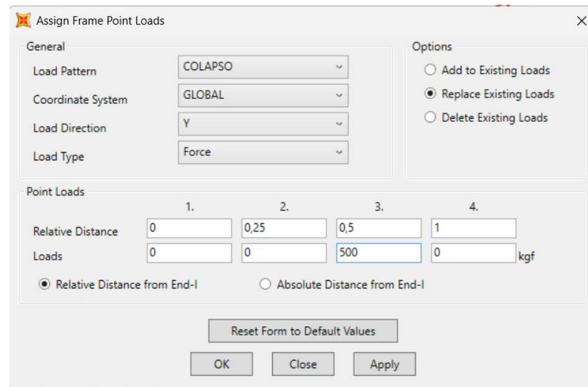


Imagen 29. Nudos 3H1, 1H1.



Imagen 30. Diferencial de cadena.

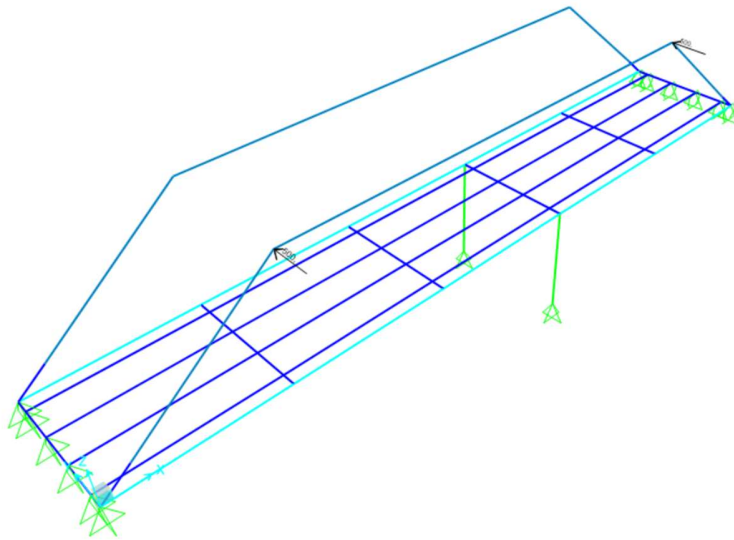


TOMADO DE TRUPER. (S.F.). TECLE INDUSTRIAL 3 TONELADAS [FOTOGRAFÍA].

8.4.1 Degradación de la sección para generar las rotulas de colapso.

Se realizó la degradación de la sección a través de unos cortes que se hicieron directamente en la geometría del elemento fibra superior (ver Imagen 27), de esta manera hubo una reducción del área bruta garantizando una rotula plástica de menor resistencia.

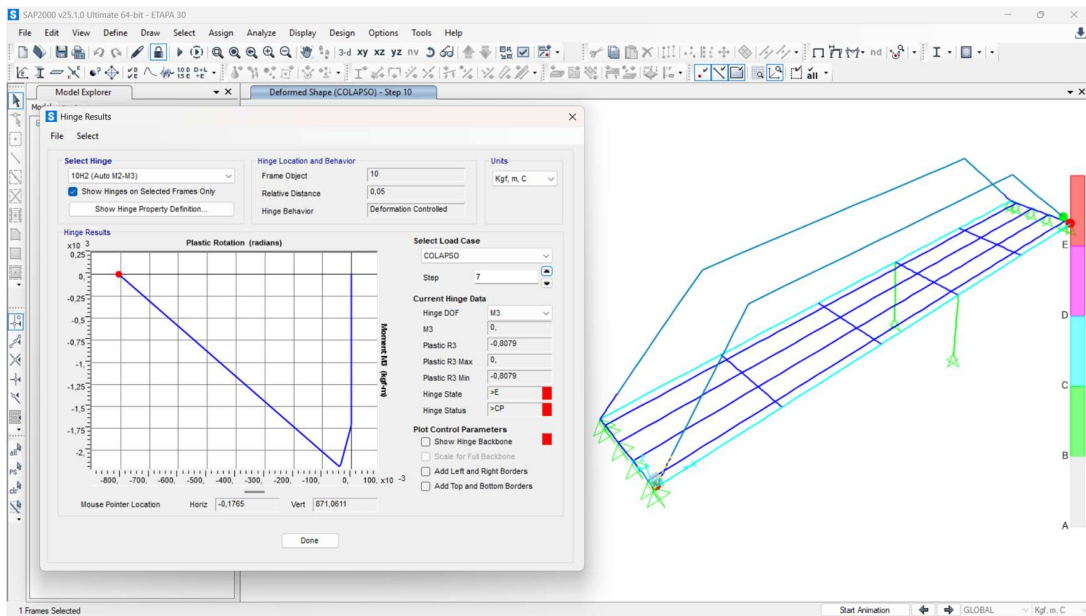
Imagen 31. Dirección de la carga de colapso.



8.4.2 Secuencia de colapso de la cercha principal del eje 1.

Se planteó un colapso controlado del elemento restante de la cercha (fibra superior) del eje 1, asegurando que el fallo ocurriera de manera planificada sin afectar la estructura del puente ver (Imagen 32). Podemos observar que el colapso de la cercha del eje 1, con las cargas de empuje de 500 kgf, fue suficiente para un desbaste de sección, sin afectar la estructura restante. Este resultado subraya la efectividad del método de colapso controlado y la importancia de aplicar las cargas de manera precisa para evitar daños colaterales.

Imagen 32. Pushover step 7.



8.4.3 Secuencia de colapso de la cercha principal del eje 2.

En la Imagen 33 se señalan los puntos donde se aplicaron las cargas destinadas a controlar la trayectoria de colapso mediante los diferenciales en la fibra superior de la cercha principal del eje XZ2. La Imagen 34 muestra el estado de las rótulas y la gráfica Momento-Curvatura, que evidencia cómo la carga aplicada por los diferenciales provocó la falla estructural. Esto permitió que la estructura se articulase en la dirección prevista, controlando el colapso de manera efectiva.

Imagen 33. Cargas de colapso cercha 2.

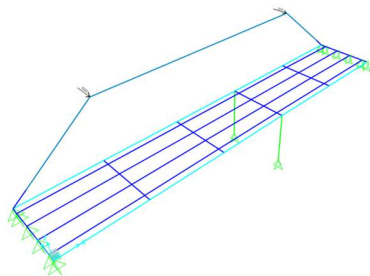
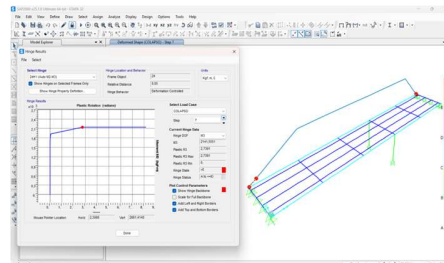


Imagen 34. Pushover step 9.



9 RESULTADOS.

9.1 Procedimiento de colapso teórico por pushover.

En las Tabla 25 y 26, se encuentra el registro del colapso controlado de la primera iteración. Al llegar a la etapa 21, la modelación indicó la necesidad de realizar un apuntalamiento adicional en el eje 2 del puente para garantizar la seguridad del personal y de las estructuras aledañas. Este apuntalamiento adicional es crucial para cumplir con el objetivo de generar una ruta de colapso controlado. La implementación de este apuntalamiento adicional asegura que la estructura mantenga su estabilidad durante el proceso de desmontaje, minimizando el riesgo de un colapso no controlado.

Tabla 25. Resumen primera iteración – parte 1.

ETAPA	PUSHOVER			ELEMENTOS		ESTADO	OBSERVACIÓN
	1	2	3	DES	REI		
1	133- 131- 135	133- 131- 135	132- 131- 135	NULL		NO	
2				NULL		OK	Se instalo un puntal
3			132- 135	125		OK	
4	133- 131- 135	133- 131- 135	135	126		OK	
5	133- 135	133- 131- 135	135	124		OK	
6	131	131	130 131	122		NO	
7		133- 131- 135	132 135	11	122	OK	
8		133- 135 131	135	10		OK	
9	134- 135 23	135 23 134	135 23	120		NO	
10	133	133- 131- 135	135	8	120	OK	

Tabla 26. Resumen primera iteración – parte 2.

ETAPA	PUSHOVER			ELEMENTOS		ESTADO	OBSERVACIÓN
	1	2	3	DES	REI		
11		133- 131- 135	135	6		OK	
12			132- 134	5		OK	
13			132- 135	16		OK	
14			135	22		OK	
15			135	127		OK	
16			135	128		OK	
17			135	129		OK	
18				23		OK	
19			135	11		OK	
20				19		OK	
21				21		NO	La lectura en el nudo 24 nos arroja una flecha de 8,94 m; por lo tanto, la plataforma requiere un puntal adicional. Este se considerará para el desmontaje desde el comienzo del diseño de la ruta de colapso.

9.2 Ruta definitiva de colapso controlada.

Según la Tabla 27, en la etapa 1, los elementos 133, 131 y 135 aparecen en rojo, indicando que superaron el límite de plastificación y fallaron estructuralmente. Esto evidencia que la estructura es inestable bajo su propio peso y requiere apuntalamiento.

En simulaciones previas, la etapa 21 Tabla 26 mostró que un único puntal no era suficiente, debido a que la plataforma presentó inestabilidad con riesgo de colapso. Por ello, en esta nueva iteración se utilizaron dos apuntalamientos. En esta configuración, el desmontaje progresivo de elementos fue exitoso, sin presentar inestabilidad, lo que permitió llevar a la estructura a las etapas 31 y 32, logrando el colapso controlado de las dos cerchas principales.

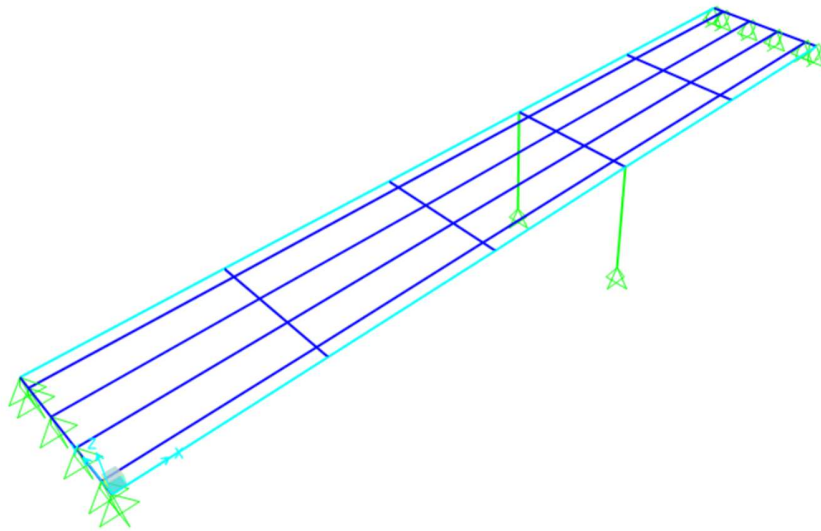
Tabla 27. Registro de ruta de colapso definitiva

REGISTRO DE COLAPSO CONTROLADO							
ETAPA	PUSHOVER			ELEMENTOS		ESTADO	OBSERVACIÓN
	1	2	3	DES	REI		
1	133-131-135	133-131-135	132-131-135	NULL		NO	
2				PT1		OK	se instala puntal uno
				PT2		OK	se instala puntal dos
3			132-135	125		OK	
4			132-135	126		OK	
5	133	133-131-135	135	124		OK	
6			135	11		OK	
7		133	135	10		OK	
8			135	8		OK	
9			135	6		OK	
10				5		OK	
11				16		OK	
12				22		OK	
13				127		OK	
14				128		OK	
15				129		OK	
16				23		OK	
17			88	11		OK	
18			88	19		OK	
19			88	17		OK	
20				21		OK	
21				135		OK	
22				134		OK	
23				28		OK	
24				131		OK	
25				130		OK	
26				29		OK	
27				133		OK	
28				132		OK	
29				CER U1		OK	CERCHA DE RIGIDEZ 1
30				CER M2		OK	CERCHA DE RIGIDEZ 2
31				CER EJE 1		OK	COLAPSO CERCHA EJE 1
32				CER EJE 2		OK	COLAPSO CERCHA EJE 2

El desmonte de la estructura de soporte (plataforma, Imagen 35) de la carpeta de rodadura no requiere un análisis más profundo, ya que no representa ningún riesgo para los técnicos ni para

las estructuras adyacentes. Este procedimiento se puede llevar a cabo de manera segura y eficiente, asegurando que no haya interrupciones en las operaciones circundantes. Además, la simplicidad del desmonte permite una rápida ejecución, minimizando el tiempo de inactividad y optimizando el uso de los recursos disponibles. La evaluación previa ha confirmado que las condiciones estructurales son estables, lo que facilita un proceso de desmonte sin complicaciones.

Imagen 35. Plataforma.



10 ANÁLISIS y COMPARACIÓN DEL MODELO TEÓRICO VS. EL PRÁCTICO.

La Fotografía 4 se observó una falla significativa en uno de los elementos principales del puente, específicamente en una de sus diagonales. Esta falla desencadenó una serie de alteraciones estructurales adicionales, como el desplazamiento evidente en la fibra inferior. Este desplazamiento sugirió que la carga y las tensiones habían superado los límites de capacidad del material, ocasionando deformaciones que afectaban la estabilidad global del puente.

Además, se identificaron otras patologías estructurales que agravaban el deterioro; estas, en conjunto con la falla inicial y el desplazamiento registrado, llevaron a la decisión de proceder con

el desmontaje de la estructura. Este deterioro, sumado a que el puente había llegado al final de su vida útil, permitió concluir que su recuperación era inviable.

En este capítulo compararemos el procedimiento obtenido a través de una metodología de Pushover con el procedimiento que se empleó en el desmontaje del puente en campo, el cual se encuentra registrado como “INF-534-PUENTE EL PALO DEMOLICIÓN 30012024”.

Fotografía 4



PUENTE EL PALO [FOTOGRAFÍA], INGENIERÍA DAPA. SAS, 2024

10.1 Procedimiento de desmontaje realizado en campo.

En las Imagen 36 y Imagen 37 se describe el procedimiento realizado en campo para el desmontaje del puente, mientras que las Tabla 27 y Tabla 28 registran la numeración y el orden de los elementos retirados. Este registro documenta el progreso y permitió consignar cada etapa del desmontaje hecho en el campo.

Imagen 36. Procedimiento de desmontaje utilizado en campo vigas.

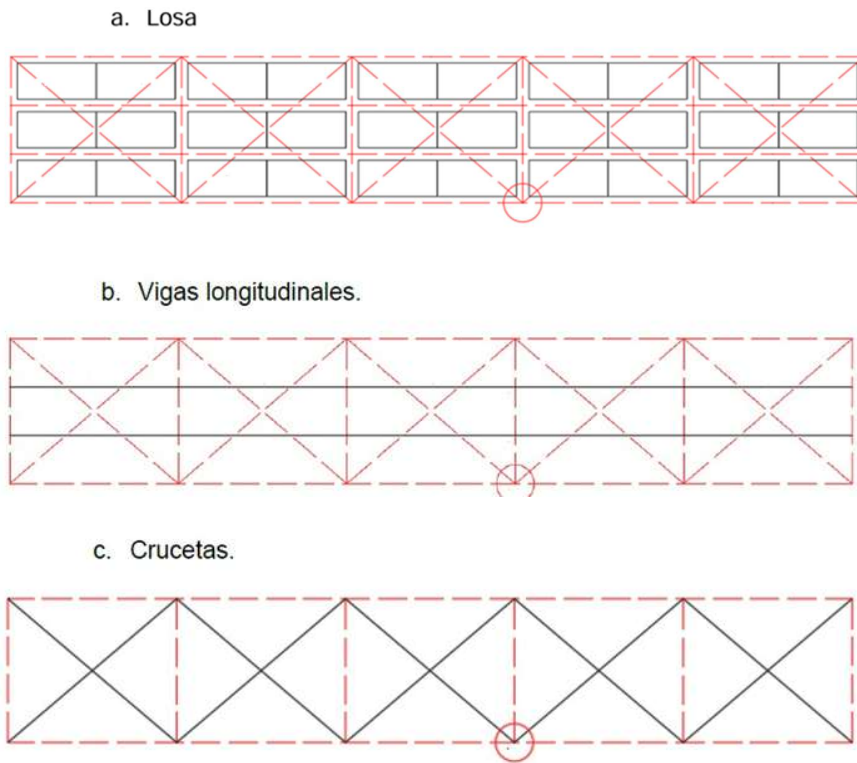


Imagen 37. Procedimiento de desmontaje utilizado en campo cerchas.

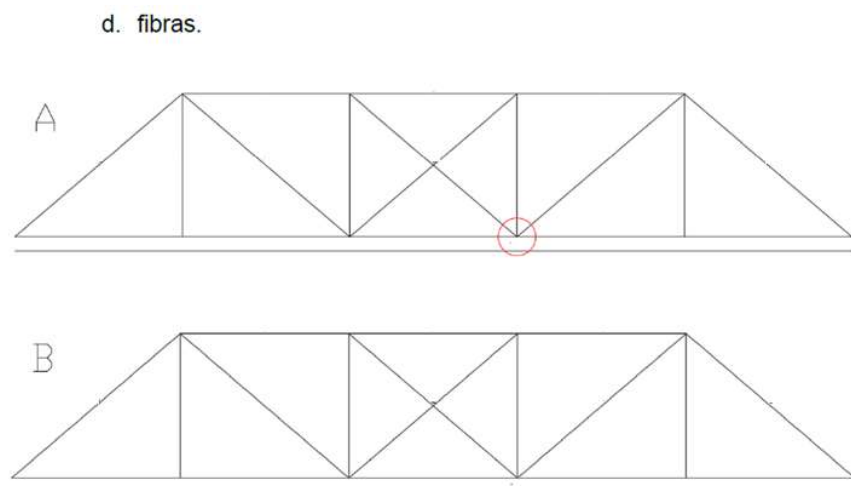


Tabla 28. Resumen de desmontaje parte 1.

PROCEDIMIENTO UTILIZADO EN CAMPO		
ETAPA	ELEMENTO	OBSERVACIÓN
1	se instala puntal 1	
2	se instala puntal 2	
3	se instala puntal 3	
4	se instala puntal 4	
5	se instala puntal 5	sugeridos por interventoría
6	se instala puntal 6	sugeridos por interventoría
7	se instala puntal 7	sugeridos por interventoría
8	se instala puntal 8	sugeridos por interventoría
9	se desmonta viga longitudinal 1	
10	se desmonta viga longitudinal 2	
11	se desmonta viga longitudinal 3	
12	se desmonta viga longitudinal 4	
13	se desmonta viga longitudinal 5	
14	se desmonta viga longitudinal 6	
15	se desmonta viga longitudinal 7	
16	se desmonta viga longitudinal 8	
17	se desmonta viga longitudinal 9	
18	se desmonta viga longitudinal 10	
19	se desinstala cruceta 1 plataforma	
20	se desinstala cruceta 2 plataforma	
21	se desinstala cruceta 3 plataforma	
22	se desinstala cruceta 4 plataforma	
23	se desinstala cruceta 5 plataforma	
24	se desinstala celosía 1	cercha eje 1

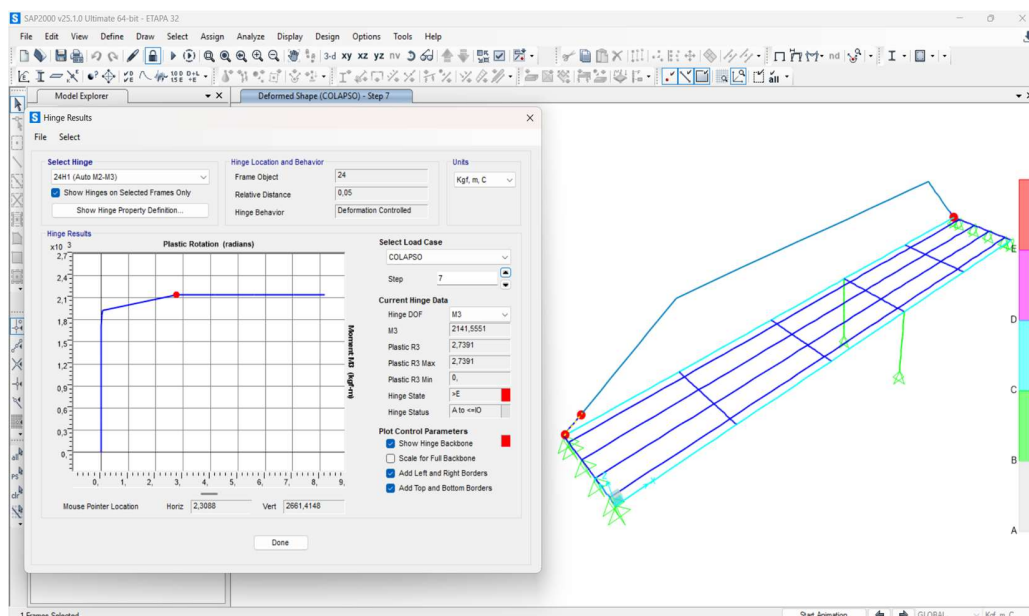
Tabla 29. Resumen de desmontaje parte 2.

PROCEDIMIENTO UTILIZADO EN CAMPO		
ETAPA	ELEMENTO	OBSERVACIÓN
25	se desísta celosía 2	cercha eje 1
26	se desísta celosía 3	cercha eje 1
27	se desísta celosía 4	cercha eje 1
28	se desísta celosía 5	cercha eje 1
29	se desísta celosía 6	cercha eje 1
30	se desísta celosía 7	cercha eje 1
31	se desísta celosía 8	cercha eje 1
32	se desísta celosía 9	cercha eje 2
33	se desísta celosía 10	cercha eje 2
34	se desísta celosía 11	cercha eje 2
35	se desísta celosía 12	cercha eje 2
36	se desísta celosía 13	cercha eje 2
37	se desísta celosía 14	cercha eje 2
38	se desísta celosía 15	cercha eje 2
39	se desísta celosía 16	cercha eje 2
40	se desísta celosías superiores 1	
41	se desísta celosías superiores 2	
42	se desísta celosías superiores 3	
43	se desísta celosías superiores 4	
44	se desísta celosías superiores 5	
45	se desísta celosías superiores 6	
46	se desísta celosías superiores 7	
47	se desísta celosías superiores 8	
48	se desísta celosías superiores 9	
49	se desísta celosías superiores 10	
50	se desísta cercha rigidez 1	
51	se desísta cercha rigidez 2	
52	se colapsa cercha eje 1	
53	se colapsa cercha eje 2	

10.2 Análisis.

El análisis del procedimiento de demolición controlada del Puente Metálico El Palo, mediante un enfoque no lineal y la técnica de Pushover, demuestra la eficacia de esta metodología para anticipar comportamientos estructurales críticos. Este método simula la respuesta de la estructura ante cargas incrementales, identificando el proceso de degradación de los elementos y diseñando una secuencia de desmontaje segura. La Imagen 38 muestra cómo la estructura colapsó de forma controlada al aplicar cargas dirigidas que generaron la falla en los nudos seleccionados para este propósito.

Imagen 38. Colapso de cercha principal eje XZ1.



La Tabla 16, que presentan las combinaciones de carga y los factores de seguridad utilizados, constituyen una base sólida para el desarrollo de un modelo realista y seguro. La Tabla 17 muestra cómo se combinan las cargas permanentes y transitorias, proporcionando una visión clara de las exigencias a las que se someterá la estructura en cada etapa del desmontaje. Asimismo, los empujes especificados en la Tabla 19 ayudan a definir con precisión los niveles de fuerza necesarios para la progresiva liberación de los elementos estructurales sin riesgo de colapsos imprevistos.

Los resultados del análisis Pushover, detallados en la Tabla 25 y Tabla 26, indican que la estructura experimenta la formación de rótulas plásticas en puntos específicos a medida que se

incrementan las cargas. Esta plastificación permite controlar la redistribución de esfuerzos y minimizar el riesgo de colapso incontrolado, lo que es esencial en un procedimiento de demolición controlada. La disposición estratégica de los apuntalamientos en la estructura —como se ilustra en la Tabla 19— asegura que las cargas no superen la resistencia residual de los elementos de soporte, promoviendo una secuencia de desmontaje gradual y predecible.

La Tabla 26 evidencia los desplazamientos verticales alcanzados durante el proceso de desmontaje, resaltando la importancia de ajustes iterativos en el modelo de Pushover. La incorporación de estos desplazamientos en el análisis ayuda a captar mejor el comportamiento inelástico de la estructura, particularmente en áreas sometidas a mayor tensión. Los valores de desplazamiento permiten observar cómo se desarrollan deformaciones progresivas, y estos datos son fundamentales para garantizar que el procedimiento de desmontaje se mantenga bajo condiciones de estabilidad en cada fase.

La metodología Pushover aplicada en este estudio permite controlar los puntos de falla y mejorar la seguridad de los trabajadores y el entorno. La estructura modular del análisis no lineal facilita la adaptación a distintas secuencias de desmontaje, maximizando la flexibilidad y eficiencia del proceso en función de las condiciones de carga y resistencia. Además, el uso de apuntalamientos diseñados específicamente para las necesidades estructurales del puente asegura la estabilidad de los elementos, evitando desplazamientos no deseados y manteniendo el control de la estructura durante todas las etapas de desmontaje.

En resumen, el análisis Pushover proporciona una base sólida para la planificación detallada y la ejecución segura de demoliciones controladas, permitiendo la optimización del proceso y la adaptación a situaciones estructurales complejas. Las tablas incluidas en el estudio respaldan la precisión de este método, mostrando cómo la simulación detallada y los factores de seguridad adecuados contribuyen a un procedimiento de demolición que cumple con los estándares de seguridad y eficiencia en la ingeniería de infraestructuras complejas.

Al comparar los resultados de los dos procedimientos de colapso, se observa que el método basado en experiencia, sin soporte numérico detallado, involucró un número significativamente mayor de actividades en el campo. La implementación del procedimiento en campo incluyó la instalación de seis puntales adicionales, un proceso que tomó aproximadamente dos días por puntal. Esta adición, junto con el resto de las actividades, representa un incremento importante en

costos y tiempo, sin contar las implicaciones logísticas y de recursos necesarios para cumplir con esta carga extra de trabajo. Además, el procedimiento en campo se dividió en 21 etapas adicionales (ver Tabla 28, Tabla 29), lo que duplicó el número de actividades en comparación con el modelo teórico, extendiendo el tiempo de ejecución y aumentando los costos del procedimiento de desmontaje.

El procedimiento utilizado en campo se basó principalmente en la experiencia, recurriendo a un enfoque de ensayo y error, sin demeritar el alto nivel de conocimiento requerido en este tipo de estructuras. Este método dependía del entendimiento del comportamiento de los elementos estructurales bajo sus cargas y su comportamiento durante el desmontaje. Aunque eficaz, este enfoque carece de la precisión que proporciona un análisis numérico, resultando en mayor incertidumbre y en una planificación menos predecible.

Las etapas adicionales observadas en el procedimiento en campo se relacionan directamente con la falta de un análisis numérico detallado, como el que ofrece la técnica de Pushover. La ausencia de un análisis estructural profundo impone la necesidad de aplicar medidas precautorias adicionales, destinadas a proteger tanto al personal encargado del corte como a las estructuras cercanas al puente. La incertidumbre inherente al proceso de prueba y error exige la implementación de pasos adicionales para mitigar riesgos, aunque esto prolongue la duración y eleve los costos de la demolición.

Además, este proyecto se desarrolló bajo un contexto de urgencia manifiesta, lo que demandó una solución rápida y efectiva para mitigar el impacto social y económico de la suspensión de la vía, dada su relevancia para el tráfico local. Esta situación limitó la posibilidad de realizar una modelación estructural detallada, que habría requerido tiempo y recursos adicionales. Aunque un análisis estructural tradicional aporta información valiosa, su aplicación en situaciones de emergencia es limitada, ya que no necesariamente arrojaría resultados precisos en el corto plazo necesario para actuar en estos casos.

Comparando ambos métodos, la metodología basada en el análisis de desempeño, como el análisis Pushover (ver Tabla 25, Tabla 26), demostró una menor incertidumbre en los resultados al contar con soporte numérico sobre el comportamiento de la estructura durante el desmontaje progresivo. Esta modelación permite anticipar las reacciones de la estructura con mayor precisión,

minimizando la necesidad de actividades adicionales y garantizando una planificación más eficiente y segura.

Uno de los aspectos más destacados de la modelación por medio de Pushover fue la capacidad de explorar múltiples alternativas de desmontaje progresivo de los elementos, lo que ofrece flexibilidad en la elección de rutas de desmontaje óptimas y permite seleccionar la secuencia más efectiva para cumplir con los objetivos. La capacidad de proyectar el comportamiento estructural de cada componente bajo distintas condiciones de desmontaje no solo incrementa la seguridad del personal y la protección de las estructuras cercanas, sino que también optimiza el tiempo y los recursos requeridos en el proceso.

Imagen 39 Comparación procedimiento Pushover vs en campo.

REGISTRO EN PORCENTAJE DE AVANCE DE DESMONTAJE		
PUSHOVER AVANCE	VS ETAPA	EN CAMPO AVANCE
%		%
3%	1	2%
6%	2	4%
9%	3	6%
13%	4	8%
16%	5	9%
19%	6	11%
22%	7	13%
25%	8	15%
28%	9	17%
31%	10	19%
34%	11	21%
38%	12	23%
41%	13	25%
44%	14	26%
47%	15	28%
50%	16	30%
53%	17	32%
56%	18	34%
59%	19	36%
63%	20	38%
66%	21	40%
69%	22	42%
72%	23	43%
75%	24	45%
78%	25	47%
81%	26	49%
84%	27	51%
88%	28	53%
91%	29	55%
94%	30	57%
97%	31	58%
100%	32	60%
100%	33	62%
100%	34	64%
100%	35	66%
100%	36	68%
100%	37	70%
100%	38	72%
100%	39	74%
100%	40	75%
100%	41	77%
100%	42	79%
100%	43	81%
100%	44	83%
100%	45	85%
100%	46	87%
100%	47	89%
100%	48	91%
100%	49	92%
100%	50	94%
100%	51	96%
100%	52	98%
100%	53	100%

En la imagen 39, que muestra una comparación gráfica del acumulado porcentual de etapas, podemos ver más claramente que el desmontaje del Puente El Palo realizado en el campo requirió 53 etapas de desmontaje progresivo, mientras que la ruta de colapso controlado generada a través de la metodología de plastificación pushover solo necesitó 32 etapas. El colapso a través de la metodología analítica representó solo un 66% de las actividades necesarias para desmontar este puente. Claramente, esto implica una optimización en términos de costos y tiempo, sin contar la reducción de incertidumbre ante un colapso incontrolado.

11 CONCLUSIONES.

El presente estudio logró desarrollar y validar un procedimiento de demolición controlada aplicando un análisis no lineal mediante la técnica de Pushover al Puente Metálico El Palo en Caloto, Cauca. Esta investigación ha demostrado que el uso del análisis no lineal es fundamental para comprender el comportamiento estructural ante cargas incrementales, identificando puntos críticos de falla y optimizando la secuencia de desmontaje. Este enfoque, al proyectar la respuesta estructural y las posibles zonas de formación de rótulas plásticas, permite una planificación detallada que minimiza los riesgos de colapso no controlado y mejora la seguridad en el proceso.

Se concluye que el análisis de Pushover no solo es efectivo en el diseño de procedimientos de colapso controlado, sino que también ofrece flexibilidad en el desarrollo de múltiples alternativas de secuencia de desmontaje, adaptándose a distintas condiciones estructurales y requisitos de seguridad. Las simulaciones realizadas en este estudio permitieron evaluar el comportamiento de la estructura en diferentes escenarios, lo que facilitó la selección de la ruta óptima para el desmontaje progresivo y minimizó la exposición al riesgo de los trabajadores y las infraestructuras cercanas.

Un aspecto destacado de este estudio es la aplicabilidad de este enfoque en la práctica. La implementación del análisis no lineal para una demolición controlada demostró ser una alternativa viable y más segura que los métodos empíricos o basados en la experiencia. A través de la modelación numérica, se consiguió una reducción significativa en la incertidumbre del proceso, lo

que permite no solo planificar con mayor precisión sino también optimizar los recursos, tales como el tiempo y los costos asociados a la demolición. Esto, a su vez, contribuye a prácticas más sostenibles, ya que facilita la reutilización de materiales y la implementación de medidas de seguridad más efectivas.

El desarrollo de este proyecto proporciona un gran aporte en el campo de la ingeniería estructural aplicada a la demolición de puentes, especialmente para aquellos que presentan condiciones de deterioro avanzado o que han sido modificados sin cumplir con las normativas técnicas. La aplicación del análisis no lineal a través de Pushover permite visualizar la respuesta de estructuras complejas bajo condiciones de desmontaje, lo cual es particularmente útil en puentes que requieren un alto nivel de precisión y control.

Este trabajo valida la importancia de aplicar herramientas avanzadas de análisis estructural para lograr demoliciones controladas que cumplan con altos estándares de seguridad y eficiencia. La metodología presentada aquí puede ser replicable y adaptable a futuros proyectos de demolición en estructuras similares, especialmente en entornos urbanos o en casos de infraestructura crítica. Se recomienda que en investigaciones futuras se continúe explorando la automatización de este procedimiento, lo cual podría lograrse mediante algoritmos optimizados que permitan una ejecución más rápida y precisa del proceso de demolición.

12 RECOMENDACIONES.

- Explorar la automatización del proceso de demolición controlada: Se recomienda investigar la implementación de algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje para automatizar el proceso de demolición controlada. Estos algoritmos podrían optimizar la secuencia de desmontaje y ajustar dinámicamente el proceso en función de las condiciones estructurales observadas en tiempo real, aumentando la precisión y reduciendo el riesgo.

- Desarrollar estudios comparativos con otros métodos de demolición: Para validar aún más la efectividad del análisis no lineal mediante Pushover, se recomienda realizar estudios comparativos entre este enfoque y otros métodos convencionales de demolición, como la demolición mecánica y el uso de explosivos. Estos estudios podrían centrarse en factores como la seguridad, eficiencia, tiempo de ejecución y costos, proporcionando una base de datos sólida que oriente la elección del método de demolición en distintos contextos.
- Evaluar el impacto de la variabilidad de los materiales en el análisis no lineal: Dado que la degradación y el desgaste de los materiales afectan significativamente el comportamiento estructural, se sugiere incluir variabilidad en los parámetros de los materiales en futuras simulaciones. Esto permitiría una evaluación más precisa del comportamiento de estructuras envejecidas o modificadas sin los estándares normativos actuales.
- Implementar la metodología en estructuras con condiciones ambientales y cargas extremas: Se recomienda aplicar la técnica de análisis no lineal en estructuras que se encuentren en entornos expuestos a factores como humedad extrema, corrosión, o alta carga de tráfico. Esto ayudaría a verificar la adaptabilidad de la técnica en contextos complejos y proporcionar mejores prácticas para la demolición de puentes en situaciones extremas.
- Establecer lineamientos normativos para el análisis no lineal en demoliciones controladas: Dado que el análisis no lineal se ha demostrado como una herramienta eficaz para la planificación de demoliciones, se recomienda trabajar en la creación de normas y lineamientos específicos que regulen su uso en proyectos de demolición. Estas normativas podrían facilitar la estandarización del proceso y asegurar que las demoliciones controladas cumplan con criterios mínimos de seguridad y eficiencia.
- Promover la reutilización de materiales mediante técnicas de reciclaje: El proceso de demolición controlada permite la recuperación de materiales estructurales, como el acero,

para su posterior reciclaje. Se recomienda integrar en el proceso de demolición evaluaciones de la calidad de los materiales recuperados y establecer protocolos para su reutilización segura en proyectos futuros, contribuyendo así a la sostenibilidad y economía circular en el sector de la construcción.

- Estas recomendaciones buscan no solo optimizar y adaptar la metodología de análisis no lineal a través de Pushover en diversos contextos y condiciones estructurales, sino también establecer una práctica de demolición controlada más segura, sostenible y adaptable a futuras innovaciones tecnológicas en el campo de la ingeniería estructural.

13 GLOSARIO DE TÉRMINOS ESPECIALES.

Escombros: Residuo resultante de las actividades de construcción, reparación, demolición y/o mejoras locativas de las obras civiles o de otras actividades conexas.

Impacto ambiental: Cualquier alteración en el sistema ambiental biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al proyecto.

Plan de Gestión de Residuos: Instrumento de gestión que contiene la información de la obra y de las actividades que se deben realizar para garantizar la gestión de los RCD generados.

Residuos de Construcción y Demolición (RCD): Residuos sólidos provenientes de las actividades de excavación, construcción, demolición, reparaciones o mejoras locativas de obras civiles o de otras actividades conexas.

Análisis no lineal: Un análisis no lineal es aquel en donde la proporcionalidad entre las fuerzas y los desplazamientos (tensiones – deformaciones) ya no es lineal (no es una línea recta). Esto es debido a que la rigidez no es constante.

Plastificación: la plastificación ocurre en la sección ocurre como un cambio en la estructura molecular de la sección dando origen a una degradación del material por lo que antes era una sección continua da origen a una articulación o rotula plástica.

Rotula plástica: Las rótulas plásticas se pueden definir como mecanismos localizados en zonas específicas de los elementos estructurales que permiten la disipación de energía, logrando así la redistribución de acciones y junto a esto un mejor comportamiento global de la estructura.

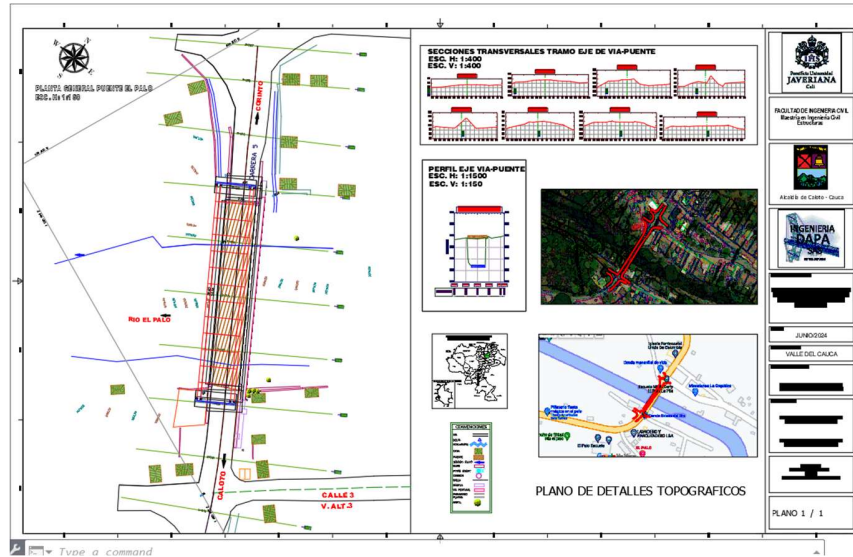
14 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. AASHTO LRFD 2014.
2. Rathi SO, Khandve P V. Demolition of Buildings-An Overview. Vol. 1, International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD). 2014.
3. Rezaei N, Garber D. Study of bridge demolition dot survey and available standard specifications. *Avances in Civil Engineering*. 2019;2019.
4. Francia BB, Marcelo J, Sosa Altamiza B, Paul E. BELLAVISTA-PIURA TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL PRESENTADA POR.
5. González J, Díaz MB, Rodríguez R. Nota técnica: Código de ejecución segura y sostenible de demolición y desmantelamiento. Vol. 62, *Materiales de Construcción*. 2012. p. 115–29.
6. Park H, Suk CG, Noh YS. 강재 절단용 장약용기를 이용한 철골 교량 발파해체 시공사례 Case Study on the Explosive Demolition of Steel Truss Bridge using Charge Container for Cutting Structural Steel. Vol. 36. 2018.
7. Scholarsarchive B, Roper EA. Chloride Concentration and Blow-Through Analysis for Concrete Bridge Decks Rehabilitated Using Hydro-Demolition [Internet]. 2018. Available from: <https://scholarsarchive.byu.edu/etd>
8. Chakkarapani G, Prasad P, Srivastava AKL. Seismic Fragility Assessment for Steel Buildings with Different Performance Levels. *Civil Engineering and Architecture*. 2022 May 1;10(3):1152–62.
9. Fema. Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures FEMA 440 FEMA nehrp. 2005.
10. Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14. Instituto Nacional de Vías (INVIAS); 2014.

15 ANEXOS.

15.1 Plano topográfico.

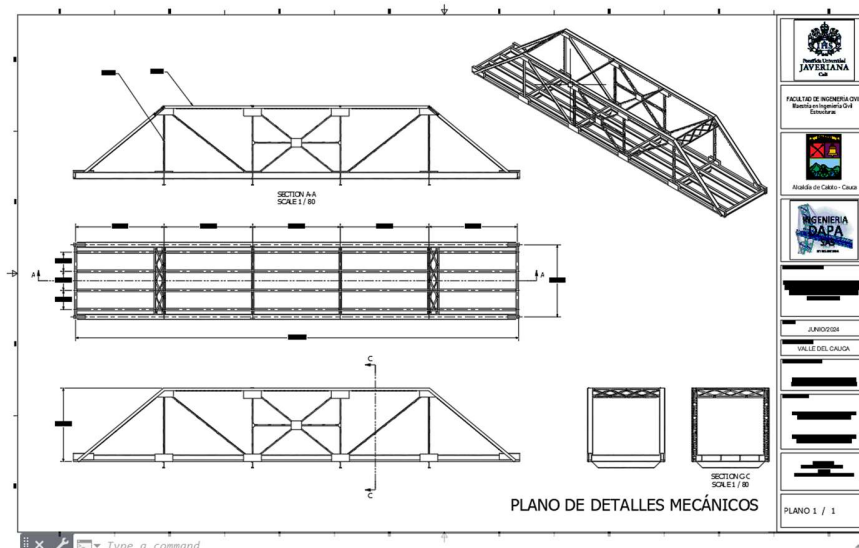
Archivo: D-001 TOPOGRAFÍA SEBASTIÁN PANTOJA Y DAVID PANTOJA.dwg



PLANO TOPOGRÁFICO [IMAGEN], INGENIERÍA DAPA. SAS, 2024.

15.2 Plano mecánico.

Archivo: D-002 PLANO MECÁNICO SEBASTIÁN PANTOJA Y DAVID PANTOJA.dwg



PLANO MECÁNICO [IMAGEN], INGENIERÍA DAPA. SAS, 2024.

15.3 Documento de autorización alcaldía de Caloto.



SECRETARIA DE INFRAESTRUCTURA Y MEDIO AMBIENTE
Nueva Segovia de San Esteban de Caloto Cauca
Ciudad Confederada

A QUIEN PUEDA INTERESAR

Por medio de la presente, la Alcaldía del Municipio de Caloto Departamento del Cauca a través de la **SECRETARIA DE INFRAESTRUCTURA Y MEDIO AMBIENTE**, representada Arquitecto Andrés Felipe Daza Rueda, **AUTORIZA**, a la empresa **INGENIERIA DAPA SAS**. Identificada con **Nit. No. 901267768-2**, a utilizar toda la información obtenida durante el proyecto demolición del puente vehicular el palo en el corredor Santander de Quilichao - Caloto - Corinto, en el departamento del Cauca; para fines de aplicaciones académicas y científicas en estudios de investigación y o publicaciones.

Esta autorización incluye, pero no se limita a, la recopilación, análisis y publicación de datos, siempre y cuando se respeten las normativas éticas y legales vigentes.

Agradecemos su colaboración y quedamos a su disposición para cualquier consulta adicional.

Para constancia se firma a los Dieciocho (18) días del mes de septiembre de 2024.

Atentamente,


ARQ. ANDRÉS FELIPE DAZA RUEDA
Secretario de infraestructura y Medio Ambiente
Alcaldía municipal de Caloto – Cauca.
Teléfono 3148051995
Email: infraestructura@caloto-cauca.gov.co

CODIGO POSTAL 101970

Calle 12 # 4-67 2^{do} Piso, teléfono 092 8258336 37 39
E-mail: infraestructura@caloto-cauca.gov.co

Página 1 de 1

15.4 Documento de autorización INGIENERIA DAPA S.A.S.

	SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD PROCEDIMIENTO DE ESTUDIOS Y DISEÑOS		
	VERSIÓN: 08	FECHA: 20/10/2024	PÁGINA 1 DE 1

AUTORIZACIÓN.

Municipio de Cali departamento del cauca.
20 de octubre del año 2024.

Dirigido a:

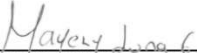
Pontificia Universidad Javeriana Cali
Facultad de Ingeniería y Ciencias.

Por medio de la presente, **INGENIERÍA DAPA SAS. NIT 901267768**, autoriza a los ingenieros **Sebastián Pantoja García.**, identificado con la C.C. No .1002956258 y **David Fernando Pantoja Pachajoa** identificado con la C.C. No .73239649, a utilizar toda la información obtenida durante el proyecto demolición del puente vehicular el palo en el corredor Santander de Quilichao - Caloto - Corinto, en el departamento del Cauca; para fines de aplicaciones académicas y científicas en estudios de investigación y o publicaciones.

Esta autorización incluye, pero no se limita a, la recopilación, análisis y publicación de datos, siempre y cuando se respeten las normativas éticas y legales vigentes.

Agradecemos su colaboración y quedamos a su disposición para cualquier consulta adicional.

Atentamente,



R. L. MAYELY LUNA GONZALEZ
CEDULA DE CIUDADANÍA: 1061710636

**CONTACTO: Whatsapp 3177956931 - 3052371462 EMAIL: dapaingenierias@gmail.com
NIT: 901267768-2**