



FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
SEDE CONCEPCIÓN

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA AUTOMATIZADA PARA EL
PREDIMENSIONAMIENTO DE VIGAS DE HORMIGÓN PRETENSADO**

Tesis para Optar al Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: Dr. Ramón Mata Lemus
Estudiante: Joaquín Gabriel Aguilera Jorquera

Concepción, Marzo 2025.

© Joaquín Gabriel Aguilera Jorquera.

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra en cualquier forma, medio o procedimiento sin permiso por escrito del o los autores.

HOJA DE CALIFICACIÓN

En Concepción, Chile, el ____ de _____ de _____ los abajo firmantes dejan constancia que el(la) _____ estudiante de la carrera de _____ ha aprobado la tesis para optar al título de _____ con una nota de _____.

X

Profesor Evaluador

X

Profesor Evaluador

X

Profesor Evaluador

INDICE

HOJA DE CALIFICACIÓN	iii
AGRADECIMIENTOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
CAPITULO 1 – INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.1.2 Objetivo general.	2
1.2.2 Objetivos específicos.	2
1.3 Justificación e importancia del estudio	3
1.4 Alcance y limitaciones del estudio.....	3
1.5 Organización del documento	5
CAPITULO 2 – MARCO TEÓRICO	7
2.1 MARCO TEÓRICO	7
CAPITULO 3 – METODOLOGÍA	9
3.1 Metodología de la investigación	9
3.2 Criterios de diseño	10
3.2.1 Método de diseño estructural	10
3.2.2 Cargas de diseño	11
3.3.2.1 Cargas Permanentes.....	11
3.3.2.2 Carga Viva.....	11
3.3.3 Combinaciones de carga	12
3.3.4 Cálculo del pretensado	12
3.3.5 Límite de compresión en servicio	14
3.3.6 Límites de tracción en servicio	14

3.3.7 Resistencia nominal a la flexión.....	15
3.3.8 Resistencia nominal al corte	16
3.3.9 Pérdidas de pretensado	18
3.4 Definición del modelo estructural	18
3.4.1 Geometría de la viga	19
3.4.2 Propiedades de los materiales.....	19
3.4.3 Configuración de la sección en el modelo	20
3.4.4 Parámetros iniciales y valores de entrada	21
3.4.5 Selección del área de acero de pretensado.....	23
3.5 Cálculo de cargas aplicadas	24
3.5.1 Cargas muertas.....	24
3.5.2 Cargas vivas.....	25
3.5.3 Aplicación de cargas en SAP2000.....	26
3.6 Aplicación del pretensado	27
3.6.1 Método de la carga balanceada.....	27
3.6.2 Distribución de los tendones en la viga.....	28
3.6.3 Modelación en SAP2000	28
3.7 Configuración del análisis en SAP2000	29
3.7.1 Casos de carga	29
3.7.2 Configuración de salida de resultados.....	30
3.8 Implementación Computacional del modelo.....	31
3.8.1 Lenguaje y herramientas utilizadas	31
3.8.2 Automatización del modelo estructural	31
3.8.3 Extracción de resultados y almacenamiento de datos	34
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS	36
4.1 Herramienta desarrollada.....	36
4.2 Validación del modelo	38

4.3 Resultados del análisis estructural.....	41
4.4 Análisis conjunto de los resultados	44
4.4.1 Comparación entre flexión y corte	44
4.4.2 Identificación de configuraciones críticas	45
4.4.3 Recomendaciones para optimizaciones del diseño	46
4.5 Discusión de resultados	46
CAPITULO 5 – CONCLUSION	48
5.1 Conclusión	48
CAPITULO 6 – REFERENCIAS	51

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modo de trabajo de la herramienta computacional. Fuente: Elaboración propia	21
Figura 2: Especificaciones de carga de camión HS 20-44, Fuente: PCI, 2003	25
Figura 3: Diagrama de flujo del código desarrollado	34
Figura 4: Interfaz de entrega de parámetros de entrada	36
Figura 5: Dibujo de viga en SAP2000.....	37
Figura 6: Ejemplo de parámetros de salida	38
Figura 7: Resultados. Resistencia a la flexión. Fuente: Elaboración propia	41
Figura 8: Resultados. Resistencia al corte. Fuente: Elaboración propia	42

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cargas actuantes definidas.....	11
Tabla 2: Parámetros de entrada	22
Tabla 3: Ejemplo interfaz base de datos	23
Tabla 4: Parámetros de salida	30
Tabla 5: Procedimiento herramienta computacional	32
Tabla 6: Parámetros de entrada validación.....	39
Tabla 7: Resultados, Pang et. al(2022).....	39
Tabla 8: Parámetros de entrada validación.....	40

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi profunda gratitud a Dios, cuya guía y protección han iluminado cada paso de mi camino académico. A mi padre, Gabriel Aguilera, y a mi madre, Gricel Jorquera, les agradezco por su amor incondicional, por los valores que me inculcaron y por su apoyo constante a lo largo de todo este proceso. A mi polola, Geraldine Estrada, le doy las gracias por su compañía, amor, aliento y comprensión, especialmente en los momentos más desafiantes de este camino. De igual manera, deseo reconocer a mis amigos, que con sus palabras de ánimo y cariño, me motivaron a ser mejor, y a todos mis profesores, quienes, a través de sus enseñanzas, dedicación y consejos, me guiaron para alcanzar esta meta.

A todos ustedes, gracias por formar parte de este camino y por contribuir con su apoyo y colaboración a la realización de esta tesis.

RESUMEN

El presente trabajo se enfoca en el desarrollo de una herramienta computacional para el predimensionamiento de vigas de hormigón pretensado, integrando programación en Python con la API de SAP2000. El objetivo principal consiste en automatizar el cálculo de propiedades geométricas, fuerzas internas y áreas de acero de pretensado requeridas, conforme a criterios normativos de diseño (AASHTO LRFD y ACI 318-19). La metodología aborda la definición de secciones tipo I y secciones rectangulares en SAP2000, así como la aplicación de cargas permanentes, cargas móviles y cargas de presfuerzo. Para validar la fiabilidad del modelo, se compararon los resultados con estudios previos, observándose un margen de error aceptable en la estimación de momentos flectores y la resistencia a corte. Se evaluaron más de 360 configuraciones, permitiendo identificar tendencias relevantes en la relación entre la esbeltez de la viga (L/h) y el comportamiento estructural. Los hallazgos indican que valores de L/h bajos imponen mayores exigencias en corte, mientras que relaciones superiores a 40 tienden a estar gobernadas por flexión. Asimismo, se detectó un rango intermedio donde la viga mantiene un balance adecuado entre ambas solicitaciones. Aunque el modelo simplifica aspectos como la trayectoria de los cables (rectilíneos) y no incorpora los efectos diferidos del hormigón (fluencia y retracción), la herramienta demuestra una capacidad significativa para agilizar el diseño preliminar y brindar recomendaciones sobre geometría y pretensado. Sus resultados apuntan a optimizar el uso de materiales, reducir iteraciones manuales y servir como base para profundizar en análisis más refinados.

ABSTRACT

This study presents a computational tool for the preliminary design of prestressed concrete beams, achieved by integrating Python scripting with the SAP2000 application programming interface. The main goal is to automate the determination of geometric properties, internal forces, and required prestressing steel areas, according to design standards (AASHTO LRFD and ACI 318-19). The methodology involves defining I-shaped and rectangular beam sections in SAP2000, assigning dead loads, moving loads, and prestress forces, and comparing the resulting structural behavior against previous research. Over 360 configurations were examined, revealing key trends regarding the ratio of beam length to depth (L/h) and how it affects flexural and shear response. The findings indicate that smaller L/h ratios place higher demands on shear capacity, while ratios exceeding 40 are generally governed by flexural requirements; an intermediate range exhibits balanced performance in both criteria. Although the model assumes straight tendons and does not account for time-dependent effects of concrete (creep and shrinkage), it offers a rapid approach for identifying viable beam dimensions and prestress levels. The results reduce manual iteration in the design phase and provide a foundation for more sophisticated analyses. By systematically automating data entry, analysis, and output, the proposed tool fosters efficient material usage and supports informed decision-making in the early stages of infrastructure projects.

CAPITULO 1 – INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El hormigón pretensado es una técnica ampliamente utilizada en la construcción de puentes, edificios y estructuras industriales debido a su capacidad para soportar mayores cargas con secciones optimizadas en comparación con el hormigón armado convencional (Yepes et al., 2017). Esta tecnología introduce esfuerzos de compresión en el concreto antes de que sea sometido a cargas externas, lo que permite mejorar su resistencia a la flexión y reducir la fisuración, aumentando su durabilidad y eficiencia estructural (PCI, n.d.). Estudios han demostrado que el pretensado confiere una resistencia significativamente mayor y un mejor control de las fisuras en comparación con otros tipos de hormigón (Copeland, 2022). A pesar de sus ventajas, el diseño de vigas pretensadas sigue representando un desafío técnico, ya que requiere un equilibrio entre la resistencia estructural, la eficiencia material y los costos de construcción (AASHTO LRFD, 2017). En particular, la relación L/h (longitud de la viga sobre su altura) juega un papel crucial en el comportamiento estructural, ya que afecta directamente la distribución de esfuerzos y la demanda en flexión y corte (Tabatabai & Nabizadeh, 2019). Tradicionalmente, la selección de dimensiones y la distribución del pretensado se basan en valores empíricos, sin una evaluación sistemática de su impacto en el desempeño estructural (Hernández et al., 2010). El diseño estructural de vigas de hormigón pretensado es un proceso complejo que requiere considerar múltiples factores simultáneamente, incluyendo la distribución del pretensado, la resistencia a la flexión y al corte, y el cumplimiento de normativas como AASHTO LRFD y ACI 318-19 (ACI Committee 318, 2019). Sin embargo, los métodos tradicionales dependen de iteraciones manuales dentro de software de análisis estructural como SAP2000, lo que puede hacer que el proceso sea lento, repetitivo y propenso a errores humanos. El avance de la computación ha permitido el desarrollo de herramientas que automatizan el análisis y diseño de estructuras, reduciendo significativamente los tiempos de cálculo y aumentando la precisión en la toma de decisiones (Yepes et al., 2017). Sin embargo, en el caso de las vigas pretensadas, la mayoría de los análisis siguen dependiendo de procesos manuales, lo que limita la evaluación de múltiples alternativas de diseño de manera eficiente. Por ello,

esta investigación propone el desarrollo de una herramienta computacional automatizada que integre programación en Python con la API de SAP2000, permitiendo evaluar de forma sistemática distintos diseños de vigas pretensadas. Este modelo podrá generar geometrías de vigas, definir propiedades de materiales, aplicar cargas de diseño y extraer resultados clave sobre esfuerzos internos, resistencia y cumplimiento normativo. El desarrollo de esta metodología busca optimizar el predimensionamiento de vigas pretensadas, reducir los tiempos de análisis y facilitar la toma de decisiones en el diseño estructural. Además, puede contribuir a la reducción de costos de material y mejorar la eficiencia en la ingeniería de infraestructuras, asegurando que cada diseño cumpla con los requisitos estructurales de forma precisa y optimizada (Hernández et al., 2010).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general.

Desarrollar una herramienta automatizada para el predimensionamiento de vigas de hormigón pretensado.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Implementar un algoritmo computacional en Python capaz de calcular automáticamente las propiedades geométricas básicas, fuerzas internas y áreas de acero de pretensado requeridas para vigas tipo I según criterios normativos vigentes.
- Integrar mediante la API de SAP2000 la definición automatizada de la geometría, materiales, cargas, condiciones de apoyo y pretensado, permitiendo análisis estructurales rápidos y confiables.

- Validar la herramienta propuesta mediante comparación con resultados obtenidos a través de métodos convencionales de análisis en SAP2000 para garantizar la precisión y confiabilidad del predimensionamiento automático desarrollado.

1.3 Justificación e importancia del estudio

La automatización en ingeniería estructural mejora la eficiencia del diseño al reducir tiempos de cálculo, minimizar errores y permitir la evaluación ágil de múltiples configuraciones. En vigas pretensadas, el uso de herramientas computacionales optimiza el predimensionamiento, eliminando la dependencia de iteraciones manuales y asegurando el cumplimiento de los requisitos de diseño.

Desde el ámbito económico, esta optimización disminuye costos de material y tiempos de construcción, favoreciendo un uso más eficiente de los recursos. A nivel social, permite la construcción de más infraestructuras con presupuestos optimizados, impulsando el desarrollo urbano y la conectividad. Además, el mejor aprovechamiento de materiales contribuye a reducir el impacto ambiental al minimizar el desperdicio de hormigón y acero, disminuyendo así las emisiones de dióxido de carbono.

Este estudio es relevante porque contribuye a la modernización del diseño estructural mediante la automatización. Su aplicación optimiza el uso de materiales y reduce costos. Además, su impacto en la industria de la construcción y en el desarrollo urbano refuerza la importancia de adoptar herramientas computacionales para un diseño estructural más eficiente y responsable.

1.4 Alcance y limitaciones del estudio

El presente estudio se enfoca en el análisis y optimización del diseño de vigas de hormigón pretensado, abordando específicamente la evaluación de su comportamiento estructural en términos de resistencia a la flexión y al corte. El estudio se centra en la generación y análisis de modelos de vigas tipo I en SAP2000, considerando distintos valores de esbeltez (L/h) para evaluar su impacto en la respuesta estructural. El rango

del largo de las vigas evaluadas será desde 10 m hasta 40 m, y alturas que van desde los 60 cm hasta los 3,0 m.

La metodología empleada permite la integración de un modelo computacional con la API de SAP2000, facilitando la automatización del proceso de generación de vigas, la aplicación de cargas normativas y la extracción de resultados clave. No obstante, el estudio presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas al interpretar sus resultados. En primer lugar, la modelación de los tendones de presfuerzo se realiza con una configuración rectilínea, sin incorporar trayectorias parabólicas más representativas del comportamiento real de las vigas en servicio, lo cual, según Mohandas y Eswaramoorthi (2020), puede suponer diferencias de orden del 5% en la flecha. Además, el análisis se desarrolla bajo el supuesto de un comportamiento elástico lineal de los materiales, sin incluir los efectos diferidos del hormigón, como la fluencia y la retracción, los cuales pueden modificar la distribución de esfuerzos y provocar pérdidas de pretensado totales de un 20% a 30% (Nilson, 1987; ACI Committee 318, 2019; AASHTO LRFD, 2020) a lo largo del tiempo. Sin embargo, para no generar pérdidas de precisión dentro del modelo, se calcularon las pérdidas a través de las propiedades específicas del hormigón. De esta forma, al finalizar cada modelo y visualizar las fuerzas internas, es posible obtener pérdidas totales a través de una razón entre la fuerza aplicada y la fuerza efectiva.

Otra limitación del estudio radica en la ausencia de un análisis dinámico o sísmico, ya que el enfoque se mantiene en la evaluación estática de las vigas bajo condiciones de carga de servicio y de diseño. Asimismo, si bien la validación del modelo se realiza mediante la comparación con estudios previos y referencias normativas, no se incluyen pruebas experimentales directas que permitan corroborar empíricamente los resultados obtenidos. A pesar de estas restricciones, el modelo desarrollado proporciona una herramienta valiosa para el análisis preliminar y la optimización del proceso de diseño de vigas pretensadas, a través de la aceleración del flujo de trabajo, ofreciendo un punto de partida para futuras investigaciones y mejoras en la automatización del diseño estructural.

1.5 Organización del documento

El presente documento se estructura en cinco capítulos, cada uno de los cuales desarrolla progresivamente los aspectos teóricos, metodológicos y analíticos del estudio. En el primer capítulo se introduce el contexto general de la investigación, planteando el problema central que motiva el estudio, los objetivos que guían su desarrollo, la justificación de su importancia y las principales limitaciones que delimitan su alcance. Este capítulo proporciona una visión global del trabajo y establece las bases conceptuales sobre las cuales se construye la investigación.

En el segundo capítulo se presenta el marco teórico, donde se detallan los principios fundamentales del hormigón pretensado y su aplicación en el diseño estructural de vigas. Se describen los conceptos esenciales asociados al comportamiento mecánico del hormigón pretensado, los criterios normativos relevantes y las metodologías de diseño utilizadas en la industria. Además, se analizan estudios previos que han abordado problemáticas similares, permitiendo contextualizar el presente trabajo dentro del estado del arte.

En el tercer capítulo se expone la metodología seguida para el desarrollo del modelo computacional. Se describen en detalle los parámetros estructurales y normativos considerados, la implementación del modelo automatizado en Python, la integración con SAP2000 y el procedimiento utilizado para la extracción de resultados. Este capítulo establece el marco técnico y computacional que sustenta el análisis estructural automatizado, proporcionando una descripción clara del flujo de trabajo seguido en la investigación.

En el cuarto capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo desarrollado. Se examina el comportamiento estructural de las vigas pretensadas bajo distintas configuraciones geométricas y niveles de pretensado, identificando tendencias en términos de resistencia a la flexión y al corte. Se comparan los resultados con referencias normativas y estudios previos, evaluando el grado de cumplimiento y la precisión del modelo en relación con metodologías establecidas. La discusión de los resultados permite extraer conclusiones clave sobre la eficiencia

estructural de las vigas analizadas y la aplicabilidad del modelo en el diseño de infraestructuras.

En el quinto capítulo se presentan las conclusiones generales del estudio, resumiendo los hallazgos más relevantes y discutiendo las limitaciones del modelo desarrollado. Se proponen recomendaciones para futuras investigaciones, con énfasis en mejoras en la modelación del pretensado, la inclusión de efectos diferidos del hormigón y la expansión del modelo a otros tipos de estructuras. Este capítulo cierra el documento consolidando los aportes de la investigación y sugiriendo líneas de trabajo que podrían fortalecer la aplicación de la metodología desarrollada en contextos más amplios.

CAPITULO 2 – MARCO TEÓRICO

2.1 MARCO TEÓRICO

El hormigón pretensado es una técnica de construcción que introduce esfuerzos de compresión en el elemento de hormigón antes de su puesta en servicio, mediante el uso de tendones de acero de alta resistencia que se tensan y anclan al hormigón (Saleh & Helmy, 2017). Al comprimir previamente el hormigón, se contrarrestan las tensiones de tracción inducidas por cargas externas, reduciendo la fisuración y mejorando tanto la resistencia como la durabilidad de la estructura (Elbasha & Sennah, 2021). Esta ventaja se aprecia especialmente en elementos de gran luz, como puentes o pisos industriales, donde se busca optimizar las secciones y evitar deformaciones excesivas (Pang et al., 2022).

La metodología de diseño del hormigón pretensado se rige por normativas que establecen criterios de resistencia, servicio y durabilidad. En el contexto de puentes, las AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (AASHTO, 2020) son ampliamente aplicadas para determinar las cargas de diseño, los coeficientes de mayoración y los estados límite de resistencia y servicio. Para la edificación y obras en hormigón, el American Concrete Institute provee el código ACI 318-19 (ACI, 2019), que regula el comportamiento del pretensado en términos de tensiones admisibles, control de fisuración y requisitos de armado. En el ámbito nacional chileno, el Manual de Carreteras – Volumen 3 (MOP, 2022) adopta lineamientos coherentes con dichas especificaciones, brindando guías para el diseño de puentes de hormigón pretensado y orientando en la determinación de cargas permanentes, móviles y combinaciones de carga.

Dentro de la técnica, se distinguen dos procedimientos principales: el pretensado y el postesado. En el primero, los tendones se tensan antes del colado del hormigón, de modo que una vez endurecido este, se libera la tensión y la fuerza se transfiere al hormigón por adherencia (Saleh & Helmy, 2017). En el postesado, en cambio, los cables se tensan tras el endurecimiento del elemento, usando vainas embebidas o cables externos con anclajes especiales. Ambas modalidades permiten equilibrar parte de la carga gravitatoria con la fuerza de pretensado, reduciendo notablemente la flexión y la apertura de fisuras (Pang et al., 2022).

La principal motivación para utilizar hormigón pretensado radica en lograr elementos más ligeros y esbeltos, manteniendo la seguridad estructural y el control de deformaciones. Esto es posible gracias a que el acero de pretensado trabaja de forma activa, generando precompresión en la sección y garantizando que el hormigón se mantenga en rangos de esfuerzo favorables (ACI, 2019). Además, el control de fisuración contribuye a la protección de las armaduras internas frente a la corrosión, aumentando la vida útil del elemento. No obstante, el diseño de vigas pretensadas implica considerar las pérdidas de fuerza de pretensado a lo largo del tiempo (por relajación del acero, retracción y fluencia del hormigón), así como el refuerzo transversal para resistir el corte cuando sea necesario (Elbasha & Sennah, 2021). El control de estas variables resulta esencial para asegurar un desempeño adecuado bajo las cargas de servicio y extremas indicadas en el Manual de Carreteras – Volumen 3 (MOP, 2022) y en las guías establecidas por AASHTO (2020).

En síntesis, el hormigón pretensado aporta mejoras en el control de deformaciones y fisuras, permitiendo diseñar elementos más esbeltos y eficientes frente a solicitudes. Su correcta aplicación bajo los lineamientos de ACI 318-19 (ACI, 2019), el Manual de Carreteras (MOP, 2022) y las especificaciones AASHTO LRFD (AASHTO, 2020) garantiza la confiabilidad del sistema constructivo, lo que explica su uso generalizado en puentes, edificaciones industriales y proyectos de infraestructura que demandan altos estándares de resistencia y durabilidad (Pang et al., 2022).

CAPITULO 3 – METODOLOGÍA

3.1 Metodología de la investigación

Para desarrollar esta investigación se empleará una metodología mixta, combinando técnicas cualitativas y cuantitativas, con el fin de abordar de manera integral el estudio y diseño de vigas de hormigón pretensado.

En una primera etapa, se realizará una revisión bibliográfica, abarcando normativas nacionales e internacionales, publicaciones científicas y documentos técnicos especializados. Se revisarán principalmente documentos como el ACI 318-19, y las especificaciones AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, así como investigaciones recientes publicadas en revistas indexadas como el PCI Journal, ACI Structural Journal y Engineering Structures. Entre estas investigaciones destacan estudios sobre pérdidas de pretensado (Bonopera et al., 2020), comportamiento estructural con pretensado externo e interno (Xiang y Ji, 2022; Aparicio et al., 2022), resistencia al corte (Al-Mahaidi y Wu, 2023), efectos térmicos (Kishen y Singh, 2021), y desempeño sísmico de vigas pretensadas (Ghosh y King, 2023). El propósito será establecer un marco teórico sólido, que permita comprender los fundamentos técnicos, los métodos constructivos y las normativas aplicables al diseño estructural con pretensado.

En la siguiente etapa, se abordará el desarrollo de una herramienta de diseño simplificado mediante la utilización de la API de SAP2000. Esta herramienta tiene como objetivo agilizar la fase inicial del diseño estructural, entregando de forma rápida y eficiente una primera aproximación a las dimensiones y esfuerzos principales de las vigas pretensadas. Para ello, se implementará un algoritmo de predimensionamiento en Python, integrado con el software SAP2000 mediante su interfaz de programación (API). La herramienta generará automáticamente modelos estructurales preliminares, realizando cálculos de esfuerzos, pérdidas de pretensado y comprobaciones normativas básicas.

La etapa cuantitativa incluirá la validación y calibración de la herramienta desarrollada mediante comparación con modelos detallados realizados directamente, tanto de manera

experimental, o, en SAP2000, tomando como referencia estudios previos que emplearon métodos similares de validación (Yapar et al., 2015; Padmarajaiah y Ramaswamy, 2022).

Finalmente, se realizará un análisis de los resultados obtenidos, identificando fortalezas y limitaciones de la herramienta propuesta, así como recomendaciones específicas para mejorar futuras versiones y facilitar su implementación práctica en proyectos reales.

3.2 Criterios de diseño

3.2.1 Método de diseño estructural

El diseño estructural de las vigas de hormigón pretensado se basa en el cumplimiento de los criterios establecidos en este caso, el método de diseño por estados límite adoptado en las especificaciones AASHTO LRFD.

El diseño por estados límite (*Load and Resistance Factor Design - LRFD*) considera múltiples factores de seguridad aplicados a las cargas y a la resistencia de los materiales, lo que permite abordar de manera diferenciada las incertidumbres asociadas a las solicitaciones y capacidades estructurales. Dentro de este enfoque, se evalúan distintos estados límite:

- Estado Límite de Resistencia: Garantiza que la estructura tenga la capacidad suficiente para resistir las cargas de diseño sin fallar por flexión, corte o fatiga.
- Estado Límite de Servicio: Asegura que la estructura mantenga un desempeño adecuado bajo cargas habituales, controlando deflexiones, fisuración y tensiones en el hormigón y en el acero de pretensado.
- Estado Límite de Fatiga: Evalúa la resistencia del material ante cargas repetitivas a lo largo del tiempo, lo cual es esencial en infraestructuras sometidas a tráfico pesado.

El método LRFD ha sido seleccionado para este estudio debido a su enfoque basado en confiabilidad estructural y a su aplicación en el diseño de infraestructura de transporte. En este contexto, el código desarrollado en Python aplica estos principios al generar modelos estructurales en SAP2000, incorporando cargas factorizadas y verificando los

criterios de resistencia y servicio para determinar si una viga cumple con los requerimientos normativos.

3.2.2 Cargas de diseño

Para determinar las cargas actuantes en la viga, se sigue lo indicado en el Volumen 3 del Manual de Carreteras de Chile, el cual remite a la norma AASHTO LRFD Bridge Design Specifications para la determinación de cargas aplicadas a estructuras de puentes.

En este estudio, considerando la simplificación del modelo, se considerarán las siguientes cargas principales, presentadas en la Tabla 1:

Tabla 1: Cargas actuantes definidas

TIPO DE CARGA	SÍMBOLO	DESCRIPCION
MUERTA	DL	Representa el peso propio de la viga, determinado en función de su volumen y peso unitario del hormigón
PERMANENTE	SDL	Corresponde a los elementos no estructurales que descansan sobre la viga, como la losa, pavimento, barandas, entre otros.
VIVA	LL	Asociada a vehículos y peatones, según lo establecido en el Manual de Carreteras, considerando el modelo de carga HS20-

3.2.2.1 Cargas Permanentes

Dado que se está desarrollando una herramienta simplificada, para efectos de cálculo, las cargas permanentes se modelarán como una única carga equivalente, definida como:

$$CP = DL + SDL$$

3.2.2.2 Carga Viva

La carga viva se tratará como una única carga, sin modelarla directamente como carga móvil. En su lugar, siguiendo la simplificación propuesta por la norma AASHTO, se representará mediante dos componentes: una carga uniformemente distribuida de $640 \frac{lb_f}{ft}$ y una carga puntual, cuya magnitud y ubicación varían según el efecto a evaluar: 18,000 lbf para el cálculo de momentos y 26,000 lbf para el cálculo de fuerza cortante.

Asimismo, se recomienda ubicar la carga en la mitad del elemento para el análisis de momentos, y cerca del apoyo cuando se evalúan fuerzas cortantes.

No obstante, dado que en este caso se busca obtener ambos parámetros, la carga puntual se ubicará a un cuarto de la longitud de la viga, es decir, en un punto intermedio entre el centro del vano y el apoyo. Además, se adoptará un valor de 26.000 lbf, ya que esta opción genera la mayor sollicitación.

3.2.3 Combinaciones de carga

La norma AASHTO LRFD Bridge Design establece combinaciones de carga específicas para cada estado límite, asegurando que las estructuras cumplan con los requisitos de seguridad y desempeño. Dado que la herramienta desarrollada está orientada a la etapa inicial de diseño, su objetivo es proporcionar una estimación rápida y eficiente del comportamiento estructural. Por esta razón, se selecciona una combinación representativa para cada estado límite relevante, permitiendo evaluar de manera simplificada el diseño preliminar de las vigas pretensadas.

Las combinaciones de carga adoptadas son las siguientes:

- 1) *Resistencia* = $1.25DL + 1.75LL$
- 2) *Servicio* = $1.0DL + 1.30LL$
- 3) *Fatiga* = $1.75LL$

Estas combinaciones permiten un análisis preliminar alineado con los criterios normativos sin perder eficiencia en la fase de predimensionado.

3.2.4 Cálculo del pretensado

Para la determinación de la fuerza de pretensado aplicada a los tendones, se empleará el método de la carga balanceada. Este enfoque considera que las cargas gravitacionales

actuates sobre la estructura pueden ser parcialmente equilibradas mediante la acción del pretensado, reduciendo así los efectos de flexión en la viga.

La fuerza efectiva de pretensado se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P_e = \frac{W_b L^2}{8f}$$

Donde:

P_e : Fuerza efectiva del pretensado

W_b : Carga balanceada ($DL + LL$)

L : Longitud de la viga (m)

f : Excéntrica efectiva de los cables respecto al eje neutro (m)

Además, a partir de este método se obtiene el área de acero necesaria para resistir la carga de pretensado, la cual se determina con la siguiente ecuación:

$$A_{ps} = \frac{P_e}{fy}$$

Donde:

A_{ps} : Área de acero necesaria

fy : Esfuerzo de fluencia del acero

Es importante señalar que cada ecuación debe ser aplicada asegurando la consistencia en las unidades de medida.

3.2.5 Límite de compresión en servicio

De acuerdo con la norma AASHTO LRFD (Tabla 5.9.2.3.2a-1), el esfuerzo de compresión en el hormigón pretensado bajo el Estado Límite de Servicio después de las pérdidas no debe superar el 60% de la resistencia especificada a la compresión del concreto (f'_c). Esto se expresa como:

$$f_{t,adm} = 0.6 * f'_c = 210 \frac{kgf}{cm^2}$$

3.2.6 Límites de tracción en servicio

La *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* establece límites de tensión admisible en el hormigón pretensado en estado de servicio, con el fin de controlar la fisuración y garantizar la durabilidad de la estructura. Estos límites dependen de la zona de tracción de la sección y de las condiciones ambientales en las que se encuentra expuesta la estructura.

Para el diseño de vigas pretensadas en este estudio, se adoptan los siguientes criterios:

- Factor de modificación (λ) : Es un factor que depende del tipo de hormigón utilizado. Se define como:
 - Hormigón normal: $\lambda = 1.0$
 - Hormigón liviano con arena natural: $\lambda = 0.85$
 - Hormigón liviano sin arena natural: $\lambda = 0.75$

Para este caso, se utilizará hormigón normal, por lo tanto, no se aplicarán reducciones.

- Límite de tensión admisible: Los límites de tensión se definen en función de las condiciones de corrosión del ambiente.
 - Condiciones normales:

$$\sigma_c \leq 0.62 * \sqrt{f'_c}$$

$$f'_c = 350 \frac{kgf}{cm^2} = 34.32 MPa \rightarrow \sigma_c \leq 0.62 * \sqrt{34.32} = 3.65 MPa = 37.3 \frac{kgf}{cm^2}$$

3.2.7 Resistencia nominal a la flexión

La resistencia nominal a la flexión representa la capacidad última de la viga para resistir momentos flectores. Esta capacidad depende de la interacción entre el hormigón y el acero de pretensado, así como de la distribución de esfuerzos en la sección. Dado que el diseño se realiza mediante el método LRFD, se aplica un factor de reducción a la resistencia nominal, definido de la siguiente manera:

$$M_r = \phi M_n$$

Donde:

M_r : Resistencia de diseño a la flexión

M_n : Resistencia nominal a la flexión

ϕ : factor de reducción, 0.9

El cálculo de la resistencia nominal a la flexión se fundamenta en los principios de equilibrio de fuerzas y compatibilidad de deformaciones, en conformidad con las especificaciones de la *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Artículo 5.6.3.2*.

Para determinar la resistencia nominal, se calcula la profundidad del bloque de compresión, considerando la cantidad de acero de pretensado y la distribución de esfuerzos en la sección. La expresión utilizada es la siguiente:

$$a = \frac{0.85f'_c * b_f * A_{ps}}{f_{pu}}$$

Donde:

a : Profundidad del bloque de compresión

f'_c : Resistencia a la compresión del hormigón

b_f : ancho del ala de la sección

A_{ps} : Área de acero pretensado

f_{pu} : resistencia última del acero de pretensado

El siguiente paso es determinar el momento nominal, el cual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$M_n = A_{ps} * f_{pu} \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

Donde:

d : distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del tendón de pretensado

$\frac{a}{2}$: representa el centroide del bloque de compresión

La ecuación refleja el equilibrio de momentos en la sección, considerando la interacción entre el acero de presfuerzo y el hormigón comprimido.

3.2.8 Resistencia nominal al corte

La resistencia al corte, asegura que la viga tenga la capacidad suficiente para recibir esfuerzos cortantes generados por las cargas aplicadas. De acuerdo con la AASHTO, la resistencia al corte se denomina mediante la contribución conjunta del hormigón, el efecto del pretensado y el acero para resistir corte o, estribos.

Dado que se trata de una herramienta simplificada, no se propondrá acero de refuerzo para corte, por ende, la ecuación para obtener la resistencia nominal al corte será:

$$V_n = V_c + V_p$$

Donde:

V_n : Resistencia nominal al corte

V_c : Resistencia del hormigón a corte

V_p : Efectos del pretensado

La resistencia del hormigón a la fuerza cortante será determinada por:

$$V_c = (0.93 * \sqrt{f'_c} + 0.3f_{cg}) * b_w * d_p$$

Donde:

V_c : Resistencia del hormigón al corte

f'_c : Resistencia del hormigón a la compresión

f_{cg} : Esfuerzo promedio de compresión en la sección debido al pretensado

d_p : Distancia efectiva desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del acero de pretensado; $d_p \geq 0.8 * h$

b_w : Ancho del alma de la sección (en secciones I, t_w)

La resistencia de diseño al corte ϕV_n se obtiene de la multiplicación entre ϕ y V_n . Donde ϕ es un factor de reducción, en este caso, 0.75 según la AASHTO.

Finalmente, se verifica que la resistencia reducida ϕV_n sea superior a la solicitación última por corte (V_u) obtenida del análisis estructural.

$$\phi V_n \geq V_u$$

Si esta condición se cumple, la sección cumple satisfactoriamente con la resistencia a corte exigida por diseño.

3.2.9 Pérdidas de pretensado

Debido a que el pretensado no se mantiene constante a lo largo del tiempo, suceden pérdidas, la norma AASHTO clasifica los siguientes tipos de pérdidas:

- Pérdida total del pretensado
- Pérdidas instantáneas (anclaje, acortamiento elástico)
- Pérdidas dependientes del tiempo (fluencia, retracción y relajación de los tendones)

En este trabajo, las pérdidas se consideran globalmente mediante un factor denominado coeficiente de eficiencia del pretensado, simbolizado como R , que típicamente varía entre 0.8 y 0.9, representando una pérdida total del orden del 10% al 20%. Para la presente investigación, se adopta un factor de eficiencia del pretensado:

$$R = 85\%$$

Este valor implica asumir que la fuerza efectiva disponible al momento del análisis equivale al 85% de la fuerza inicialmente calculada analíticamente, lo que corresponde a una pérdida total aproximada del 15%.

El valor del parámetro nace a raíz del método de la carga balanceada, si bien el R es la relación que hay entre la fuerza de pretensado aplicada y la efectiva, se debe considerar como parámetro inicial para ejecutar el método en cuestión. Ahora bien, el valor es debido a su utilización frecuente en la práctica y en la formulación del método de la carga equivalente.

3.3 Definición del modelo estructural

Para el análisis estructural de la viga, se ha desarrollado un modelo que permite evaluar configuraciones de sección: sección tipo I y sección rectangular. Este modelo se

implementa en SAP2000 considerando las propiedades geométricas, definiéndose las siguientes variables

3.3.1 Geometría de la viga

El modelo permite analizar vigas con diferentes configuraciones geométricas, definiéndose las siguientes variables para cada tipo de sección

- Sección Tipo I
 - Altura total (h)[m]
 - Ancho del ala (b_f)[m]
 - Espesor del alma (t_w)[m]
 - Espesor del ala (t_f)[m]
- Sección Rectangular:
 - Altura total (h)[m]
 - Ancho total (b)[m]
- Sección Cajón:
 - Altura total (h)[m]
 - Ancho total (b_f)[m]
 - Espesor de losa superior (t_f)[m]
 - Espesor del alma (t_f)[m]

El usuario puede seleccionar cualquiera de estas configuraciones dentro del modelo, permitiendo adaptar el análisis a diferentes necesidades.

3.3.2 Propiedades de los materiales

Los materiales utilizados en el modelo estructural son hormigón y acero de pretensado, con las siguientes propiedades:

- Hormigón:
 - Resistencia a la compresión (f'_c)[kgf/cm²]

- Módulo de elasticidad (E_c)[kgf/cm^2]
- Peso específico (γ_c)[kgf/m^3]
- Acero de pretensado:
 - Resistencia última (f_{pu})[kgf/cm^2]
 - Esfuerzo de fluencia (f_y)[kgf/cm^2]
 - Módulo de elasticidad (E_s)[kgf/cm^2]

Estas propiedades se definen según la normativa aplicable para garantizar que el comportamiento de los materiales refleje adecuadamente su desempeño real.

3.3.3 Configuración de la sección en el modelo

En esta sección se describe cómo se configura el modelo estructural en SAP2000 a través del código, considerando las diferentes secciones transversales típicas empleadas en el análisis de vigas pretensadas. En particular, se consideran tres tipos principales de secciones transversales:

- 1) Sección Tipo I
- 2) Sección Rectangular
- 3) Sección cajón

Cada tipo de sección transversal es definida mediante sus parámetros geométricos específicos, descritos previamente en la sección de parámetros iniciales. Para la creación automática de estas secciones en SAP2000, se utilizan comandos específicos del software, mediante la API integrada con el lenguaje Python. A continuación, en la figura 1, se detalla brevemente la forma en que SAP2000 recibe la información de cada sección transversal:

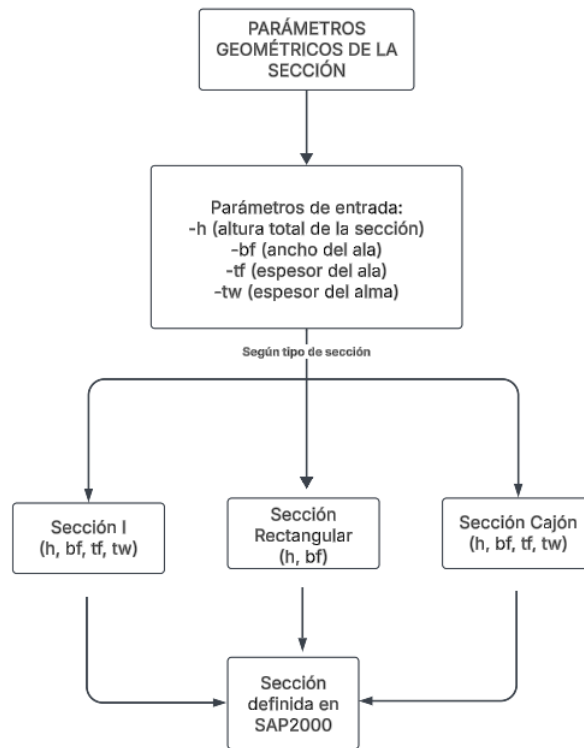


Figura 1: Modo de trabajo de la herramienta computacional. Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Parámetros iniciales y valores de entrada

El modelo estructural se desarrolla en SAP2000 mediante la creación de una viga simplemente apoyada que es sometida a un análisis de cargas y esfuerzos. Se definen distintos parámetros geométricos, materiales y condiciones de carga, los cuales permiten caracterizar el comportamiento estructural de la viga presforzada.

Para ello, se consideran tres tipos de secciones transversales: I, rectangular y cajón, cuya configuración se determina en función de los parámetros geométricos ingresados. Estos parámetros incluyen la altura total de la viga (h), el ancho del ala (b_f), el espesor del ala (t_f) y el espesor del alma (t_w), los cuales se utilizan para calcular el área de la sección, el momento de inercia y los módulos de sección.

El material utilizado es hormigón con una resistencia especificada a la compresión (f'_c), un peso unitario (γ), y, módulo de elasticidad (E_c). Mientras que el refuerzo de presfuerzo

se define mediante acero de alta resistencia, considerando su resistencia última (f_{pu}) y su módulo de elasticidad (E_s).

Las cargas aplicadas en el modelo incluyen carga muerta, carga permanente y carga viva, siguiendo las combinaciones establecidas en la normativa vigente. Además, se incorpora el pretensado mediante la inclusión de tendones, los cuales se modelan con una carga inicial que se ajusta a las pérdidas de presfuerzo estimadas.

El modelo es configurado dentro de SAP2000 a través de un código automatizado en Python, el cual establece los materiales, define la sección transversal, aplica las cargas y ejecuta el análisis estructural. De esta manera, se obtiene un marco analítico en el cual se pueden evaluar los esfuerzos internos y la respuesta estructural de la viga en distintos escenarios de carga. A continuación, en la Tabla 2, se muestra un detalle de los valores y parámetros de entrada de la herramienta. Cabe destacar, que, al tratarse de una herramienta iterativa, el valor de L y h son definidos por el usuario en rangos, es decir, se definen el largo inicial y final, y el rango del 'paso' que tendrá la herramienta, de esa misma manera, se realiza con la altura de la viga.

Tabla 2: Parámetros de entrada

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Altura total de la viga	h	m	Var.
Ancho del ala	bf	m	0.4*h
Espesor del ala	tf	m	0.2*h
Espesor del alma	tw	m	0.2*h
Peso específico del hormigón	γ	kg/m ³	2500
Longitud de la viga	L	m	Var.
Coeficiente de eficiencia del pretensado	R	-	85%
Resistencia a la compresión del hormigón	f'c	kgf/cm ²	350
Resistencia última acero pretensado	fpu	kgf/cm ²	18700
Esfuerzo de fluencia del acero de pretensado	fy	kgf/cm ²	17200
Módulo de elasticidad acero de pretensado	Es	GPa	195
Módulo de elasticidad del hormigón	Ec	kgf/cm ²	3600

Los valores adoptados en la Tabla 2 se consideran representativos para el diseño preliminar de vigas pretensadas utilizadas en puentes carreteros. Dichos valores se basan en prácticas habituales, recomendaciones normativas (AASHTO LRFD) y condiciones típicas de proyectos desarrollados en Chile.

3.3.5 Selección del área de acero de pretensado

El área de acero requerida para el pretensado se determina inicialmente mediante un cálculo analítico basado en los efectos del pretensado sobre la viga, la fuerza efectiva de pretensado necesaria y la resistencia característica del acero empleado. Sin embargo, para efectos prácticos de construcción y disponibilidad comercial, no siempre es posible utilizar exactamente el área calculada. Por esta razón, se ha desarrollado un procedimiento automatizado que permite seleccionar el área real más cercana disponible comercialmente.

Esta selección se realiza a través de una base de datos externa almacenada en formato Excel, que contiene un catálogo con distintas combinaciones de tendones disponibles. Cada opción del catálogo indica claramente el área total de acero (cm²), el diámetro del cable (mm) y el número de cables. A continuación, en la Tabla 3, se muestra un ejemplo de la interfaz de la base de datos.

Tabla 3: Ejemplo interfaz base de datos

Diámetro (mm)	Nº Cables	Área de acero (cm ²)
12	10	11,30973355
20	3	9,424777961
18	7	17,81283035
1"	7	35,46952354
32	10	80,42477193

El procedimiento de selección del área se realiza automáticamente mediante un algoritmo programado en Python que compara el área requerida (calculada previamente) con todas

las áreas disponibles en el catálogo; El catálogo abarca diámetros de cables desde media pulgada (1/2") hasta 36 cm, y, combinaciones desde 1 cables hasta 10. En total, alrededor de 200 combinaciones.

El algoritmo selecciona automáticamente aquella opción cuyo valor se acerca más al requerido por el código, minimizando así la diferencia entre ambos valores.

De esta forma, la herramienta entrega automáticamente la opción óptima de acero para la viga en estudio, facilitando la elección rápida y precisa del área real de pretensado a utilizar en SAP2000.

3.4 Cálculo de cargas aplicadas

3.4.1 Cargas muertas

Las cargas muertas incluyen aquellas cargas permanentes que actúan sobre la estructura durante toda su vida útil. Se consideran los siguientes componentes:

- **Peso propio de la viga:** Se calcula a partir del volumen de la sección transversal y la densidad del hormigón, considerando un peso específico de 2500 kg/m³. El peso propio se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$PP = \gamma_h \cdot A_g$$

Donde: *PP*: Peso propio de la viga por metro y *A_g*: Área bruta de la sección.

- **Capa de compresión (si aplica):** En el caso de vigas con losas colaborantes, se considera el peso de la capa superior de hormigón que actúa en conjunto con la viga.
- **Elementos adicionales adheridos a la viga:** En caso de que existan barandas, elementos prefabricados u otros componentes estructurales fijos, su peso se incorpora en esta categoría.

El cálculo de estas cargas se realiza en kgf/m y posteriormente se convierten a tonf/m, siendo aplicadas como cargas distribuidas sobre la longitud de la viga en SAP2000.

3.4.2 Cargas vivas

Las cargas vivas representan aquellas cargas variables a lo largo del tiempo, como el tránsito vehicular y otras solicitaciones temporales. En este estudio se considera:

- Carga de uso (W_{cuso}): Se determina en función del tránsito vehicular, considerando las cargas móviles especificadas por el Manual de Carreteras, Volumen 3, en el contexto nacional, el manual define que cada proyecto tipo puente, tendrá que ser diseñado para una carga móvil tipo camión HS 20-44 más un 20%, que, según la normativa, se traduce como un camión que posee las cargas según los ejes, como se aprecia en la Figura 2.

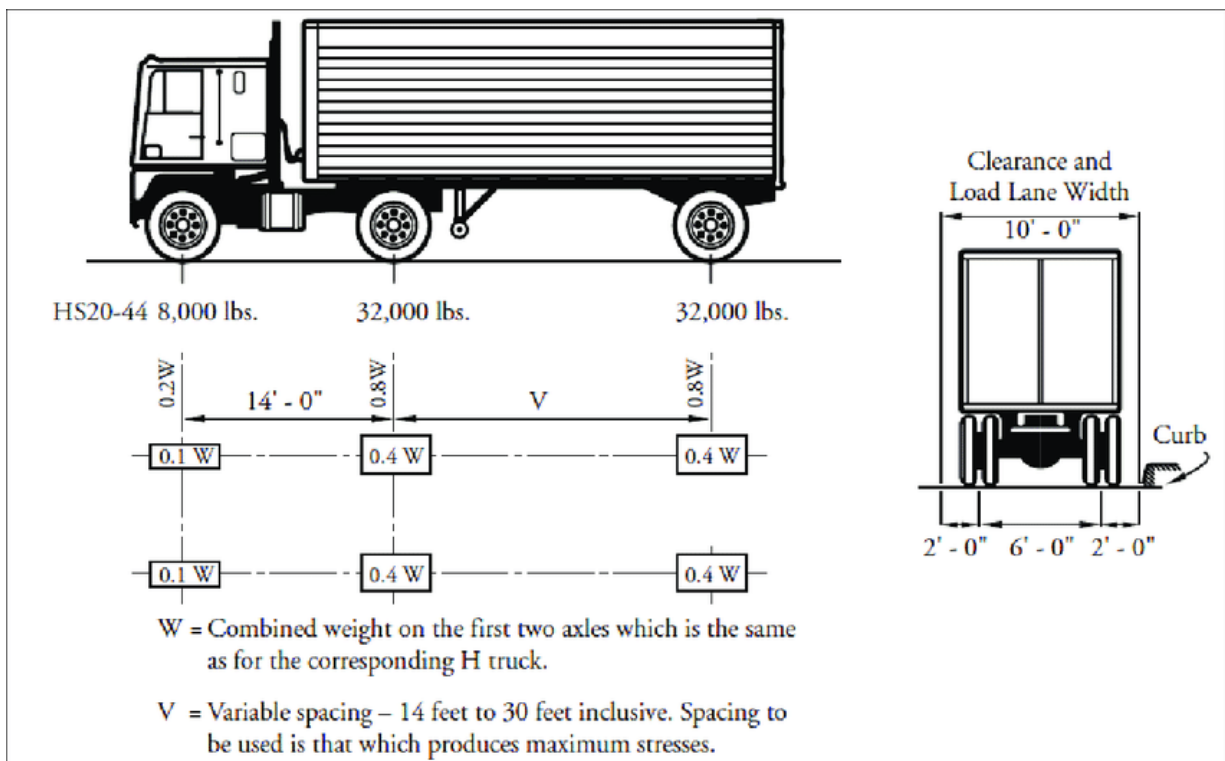


Figura 2: Especificaciones de carga de camión HS 20-44, Fuente: PCI, 2003

Como se puede observar en la figura 2, el camión posee tres puntos para posicionar las cargas, no obstante, una simplificación que ofrece la norma, es modelar la carga móvil mediante la distribución de una carga uniforme más una carga puntual ubicada en un lugar estratégico para generar más momento o más fuerza cortante. Para este caso, la carga distribuida es de 640 lbf más una carga puntual de 26000 lbf/ft, y, la carga puntual

será ubicada a un cuarto de la longitud total de la viga, con el objetivo de equilibrar la obtención de momento y fuerza cortante

La carga viva se expresa en kgf/m y luego se convierte a tonf/m para su correcta aplicación en el modelo estructural.

3.4.3 Aplicación de cargas en SAP2000

Para la implementación de las cargas en SAP2000, se han definido los siguientes procedimientos:

- Definición de patrones de carga
 - Se crean los patrones DeadLoad, MovingLoad y PresstressLoad dentro del entorno de SAP2000.
 - Se asignan los coeficientes de carga según los estados de diseño (resistencia, servicio y fatiga).
- Aplicación de cargas
 - Carga muerta: Se introduce como una carga distribuida uniforme a lo largo del elemento.
 - Carga viva: Se descompone en cargas distribuidas y puntuales, según la posición de los ejes de los vehículos de diseño.
 - Carga de presfuerzo: Se incorpora como una carga axial en el tendón modelado dentro del software.
- Configuración de combinaciones de carga
 - Se establecen las combinaciones de carga para evaluar el comportamiento de la viga en diferentes escenarios de sollicitación.
 - Este procedimiento permite evaluar el comportamiento estructural de la viga bajo distintas condiciones de carga, asegurando que el diseño cumpla con los criterios normativos.

3.5 Aplicación del pretensado

3.5.1 Método de la carga balanceada

El método de carga balanceada se basa en la aplicación de una fuerza de pretensado en los cables de la viga con el objetivo de contrarrestar parcialmente las cargas gravitatorias, reduciendo las tensiones de flexión.

Para determinar la fuerza de pretensado requerida, se utiliza la ecuación de equilibrio de cargas:

$$P_e = \frac{W_b L^2}{8f}$$

Donde:

P_e : Fuerza total de pretensado requerida

W_b : Carga balanceada, distribuida total sobre la viga, considerando peso propio, cargas permanentes y carga viva de uso.

L : Luz de la viga (m)

f : Excentricidad efectiva de los cables respecto al eje neutro (m)

Dado que en la práctica las pérdidas de pretensado reducen la fuerza efectiva, se introduce un coeficiente de eficiencia (R) que depende de la tecnología de anclaje y las pérdidas esperadas:

$$P_{aplicada} = \frac{P_e}{R}$$

Siendo $R=0.85$ para considerar una pérdida aproximada del 15% debido a la fricción, relajación del acero y acortamiento del hormigón.

El área de acero de pretensado necesaria se obtiene a partir de la resistencia del acero:

$$A_{ps} = \frac{P_e}{f_y}$$

Donde:

A_{ps} : Area de acero requerida.

f_y : Esfuerzo de fluencia del acero de pretensado.

El método de carga balanceada permite que, al aplicar la fuerza de pretensado, la deformada de la viga se aproxime a una línea recta en condiciones de servicio, minimizando las tensiones de tracción en la fibra inferior.

3.5.2 Distribución de los tendones en la viga

La posición y distribución de los tendones dentro de la sección transversal es de suma importancia para las condiciones de servicio o de resistencia última, en este trabajo, no se asignaron distribuciones parabólicas, por el contrario, los tendones se han ubicado de forma recta, con una excentricidad definida debajo del centroide de la sección. Asimismo, la cantidad de acero de pretensado calculado, o bien, la cantidad de tendones y su sección respectiva, se escoge mediante una base de datos desarrollada internamente para los fines del presente trabajo.

3.5.3 Modelación en SAP2000

Para la representación del pretensado en SAP2000, se han seguido los siguientes pasos:

1) Definición del material del tendón:

- Se crea un material específico con las propiedades del acero de pretensado
 - Módulo de elasticidad: $E = 1,95 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
 - Coeficiente de Poisson: $\nu = 0.3$
 - Coeficiente de expansión térmica: $\alpha = 1,1 \times 10^{-5}$

2) Creación de la sección del tendón:

- Se define una sección, con el área de acero correspondiente a la selección óptima de cables.

3) Ubicación y trayectoria de los tendones:

- Se asignan los tendones a lo largo de la viga, considerando su excentricidad.
- Se modela como tendón recto.

4) Aplicación de la carga de pretensado:

- Se introduce la fuerza de presfuerzo inicial P_e como una carga en el tendón
- Se define un caso de carga especial ("PresstressLoad") que permite evaluar los efectos del pretensado de manera independiente

5) Configuración del análisis:

- Se activa la opción de pérdidas de pretensado en SAP2000 para considerar efectos como relajación del acero y fricción en los ductos.

Una vez definido el procedimiento a seguir dentro del software estructural, lo siguiente fue enlazar la herramienta diseñada con el procedimiento, es decir, agregar desde la definición del material del tendón hasta la configuración del análisis dentro del código.

3.6 Configuración del análisis en SAP2000

Para evaluar el desempeño estructural de la viga pretensada, se ha configurado el análisis en SAP2000 considerando los casos de carga relevantes, el tipo de análisis adecuado y la configuración de salida de resultados. A continuación, se detalla cada uno de estos aspectos.

3.6.1 Casos de carga

En SAP2000, los casos de carga representan las diferentes acciones a las que estará sometida la estructura. En este estudio, se han definido los siguientes casos:

- Carga muerta (Dead Load): Representa el peso propio de la estructura y las cargas permanentes adicionales (pavimento, barandas, etc.).
- Carga viva (Moving Load): Simula la carga móvil producida por un camión HS 20-44, de acuerdo con las especificaciones de la norma AASHTO LRFD.
- Carga de pretensado (Presstress Load): Representa la fuerza generada por los tendones de presfuerzo.
- Carga de resistencia (Resistencia): Combina las cargas muertas y vivas según los factores de diseño establecidos.
- Carga de servicio (Servicio): Se utiliza para evaluar las tensiones en servicio sin considerar factores de aumento de carga.
- Carga de fatiga (Fatiga): Evalúa la estructura bajo ciclos repetitivos de carga móvil.

Los factores de carga para cada caso han sido definidos según la normativa vigente y se aplican mediante combinaciones de carga en SAP2000 mediante la herramienta desarrollada.

3.6.2 Configuración de salida de resultados

Una vez definidos claramente los patrones y casos de carga en SAP2000, es necesario especificar los puntos particulares (estaciones) del elemento estructural donde el software entregará resultados para su análisis posterior. Esta configuración permite obtener fuerzas internas relevantes para la evaluación estructural, tales como se muestran en la Tabla 4:

Tabla 4: Parámetros de salida

Nombre	Símbolo
Momento Flexional	M3
Fuerza Cortante	V2
Carga Axial	P

3.7 Implementación Computacional del modelo

3.7.1 Lenguaje y herramientas utilizadas

Para el desarrollo de la herramienta computacional propuesta en esta investigación, se eligió el lenguaje de programación Python, esto, debido a la amabilidad de interfaz con el usuario, la cantidad de librerías existentes y la compatibilidad con el software estructural en cuestión.

Las bibliotecas utilizadas para el proyecto fueron:

1. Pandas: Procesamiento eficiente y ordenado de datos en formato tabular (tablas), facilitando la extracción, organización y almacenamiento automático de resultados.
2. Numpy: Cálculos numéricos de alto rendimiento, manejo de matrices y vectores, especialmente para iteraciones y procesamiento masivo de datos numéricos como dimensiones y cargas aplicadas.
3. Math: Funciones matemáticas básicas de uso frecuente en cálculos puntuales, como raíces cuadradas, potencias, funciones trigonométricas, etc.
4. Comtypes: Biblioteca esencial que permite la comunicación directa (API) entre Python y SAP2000

Finalmente se utilizó Microsoft Excel como herramienta para almacenar resultados.

3.7.2 Automatización del modelo estructural

La automatización del modelo estructural en SAP2000 mediante la interfaz API consiste en la ejecución programada desde Python de tareas que normalmente requieren intervención manual en el software. A través de comandos proporcionados por la biblioteca comtypes, es posible definir automáticamente todos los aspectos relacionados con la geometría y propiedades del modelo estructural. A continuación, en la tabla 5, se muestra en orden, el procedimiento a llevar a cabo en el código.

Tabla 5: Procedimiento herramienta computacional

Orden	Descripción
1	Ingreso de parámetros iniciales
2	Cálculo geométrico
3	Cálculo de fuerza de pretensado
4	Selección área de acero
5	Creación inicial del modelo estructural vacío
6	Definición del material estructural
7	Definición de sección transversal
8	Configuración del marco estructural
9	Aplicación de cargas sobre el modelo
10	Configuración del tendón y aplicación de pretensado
11	Configuración casos de carga
12	Ejecución del análisis
13	Extracción de resultados
14	Procesamiento, verificación y exportación

Este proceso se encadenó dentro de un ciclo iterativo, el cual permitió analizar múltiples modelos con distintos largos y alturas.

El flujo de trabajo de la herramienta comienza a partir de los parámetros de entrada. En este caso, lo primero a decidir fue la cantidad de vigas a analizar, para ello, se tomaron intervalos de largos y alturas. Para este caso, el largo mínimo a analizar fue de 10 metros, debido a que el hormigón pretensado se centra en luces grandes, mayores a 8 o 10 metros. Por otro lado, el largo máximo fue de 40 metros, que, es considerado una luz grande. Con respecto a las alturas, se sigue el mismo procedimiento que con la longitud, es decir se determina una altura inicial, final y un paso de análisis. Ahora bien, la razón de escoger 360 vigas es debido a la relación L/h , dentro de este trabajo se buscó abarcar razones de largo-altura variadas, con objetivo de extraer conclusiones determinantes de

la herramienta de análisis. Las razones de esbeltez (L/h) variaron desde 6 hasta 40, aproximadamente, conteniendo una variedad significativa dentro de las muestras.

Los parámetros anteriormente mencionados, se ingresan al código mediante un 'input', es decir, el usuario debe escribir el largo mínimo (m), largo máximo (m), salto de longitud (m), altura mínima (m), altura máxima (m), salto de altura (m).

Como observación adicional, las especificaciones del hormigón (f'_c , peso específico, etc) como las del acero (f_y , etc) son completamente modificables, y, se pueden convertir en parámetros de entrada fácilmente, sin embargo, para este trabajo se consideraron como "parámetros fijos".

Cuando aquellos parámetros de entrada están listos, lo siguiente que realiza el código es preguntar al usuario qué tipo de viga es la que analizará, dentro de las opciones está la sección rectangular, tipo I, y, cajón. Con esa información ya se procede a definir la sección dentro de la misma herramienta, luego, calcula la fuerza de pretensado necesaria para poder "contrarrestar" los efectos de las cargas actuantes sobre la estructura, posteriormente, determina el área de acero necesaria para resistir el pretensado, con el acero necesario determinado, escoge el área superior más cercana a la necesaria y procede el diseño con dichas características.

Luego de realizar los cálculos necesarios en el método de la carga equivalente, procede a diseñar el elemento estructural en cuestión, definiendo su material, sección transversal, marco estructural, aplicar las cargas actuantes sobre el modelo, configurar el tendón con la fuerza de pretensado y la respectiva área de acero, generar los casos de carga definidos y proceder a ejecutar el análisis, donde una vez realizado, la información requerida de salida, se extrae y se almacena en una base de datos dentro de una hoja de cálculo en Excel.

Adicionalmente, la herramienta trabaja de tal manera, que guarda cada proyecto en una carpeta específica, y, para evitar el consumo de recurso computacional, crea modelos en blanco en la misma ventana de SAP2000, es decir, para analizar, por ejemplo, 20 elementos, no se abrirá 20 veces el software, sino, se analizará uno, se guardará, y luego

se creará otro modelo en blanco, hasta finalizar con los análisis. A continuación, en la figura 3, se muestra el flujo de trabajo de la herramienta desarrollada.

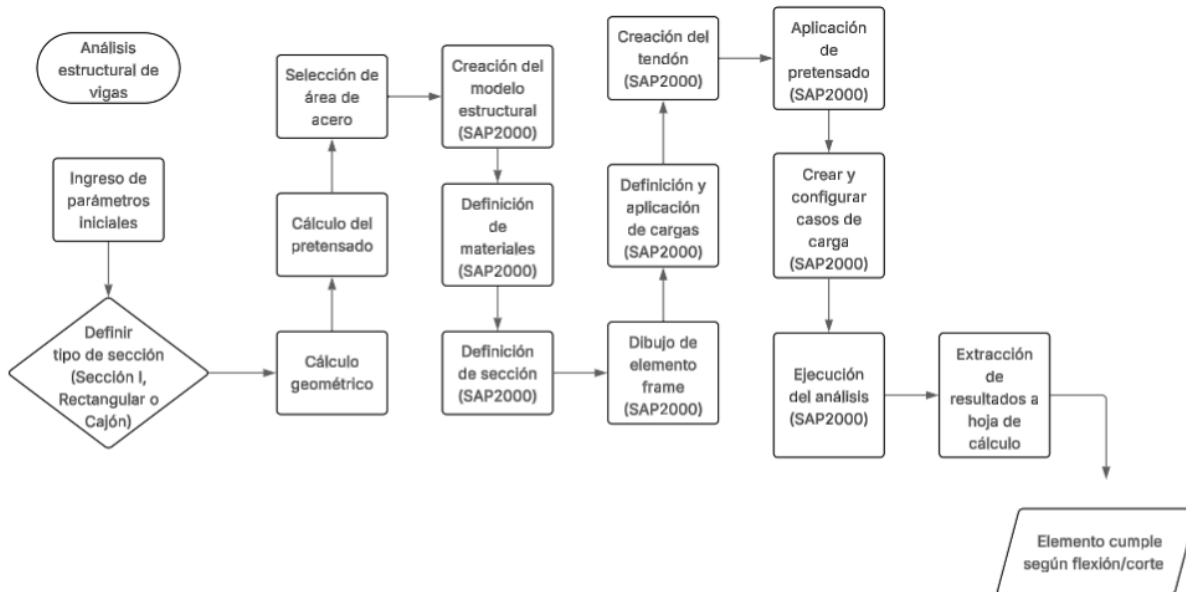


Figura 3: Diagrama de flujo del código desarrollado

3.7.3 Extracción de resultados y almacenamiento de datos

Una vez realizado el análisis estructural, los resultados generales se extraen automáticamente a una hoja de cálculo en Microsoft Excel. Esta extracción de resultados es completamente personalizable, para este caso, se configuró de tal manera de exportar los siguientes datos a la hoja de cálculo:

- Largo total de la viga
- Altura total de la sección
- Carga de Pretensado Aplicada
- Área de Acero Requerida
- Área de Acero Utilizada
- Carga Axial Mínima
- Carga Axial Máxima

- Momento Mínimo
- Momento Máximo
- Momento a la mitad de la viga
- Fuerza Cortante Máxima
- Deformación en tracción del hormigón
- Deformación en compresión del hormigón
- Momento Nominal de la Sección
- Momento Nominal de la Sección Minorado
- Fuerza Cortante Nominal de la Sección
- Fuerza Cortante Nominal de la Sección Minorada
- Razón Largo / Altura
- Razón $\phi M_n/M_u$
- Razón $\phi V_n/V_u$

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

Este capítulo presenta la herramienta desarrollada, y, analiza los resultados obtenidos a través de esta, considerando los parámetros iniciales definidos y criterios normativos establecidos previamente.

4.1 Herramienta desarrollada

El código inicia importando las librerías necesarias para comunicarse con SAP2000 y realizar cálculos numéricos y de estructuras. Luego se presentan varias funciones independientes, cada una dedicada a tareas como el cálculo de propiedades de la sección, la selección del área de acero de presfuerzo, la creación del modelo en SAP2000 y la asignación de cargas. Este enfoque modular facilita mantener y depurar cada parte del programa sin afectar las demás.

Al final, una función principal solicita al usuario rangos de dimensiones para la viga (largo y altura) y ejecuta en secuencia la creación de múltiples modelos, el análisis de cada uno y la recopilación de resultados en un único archivo de Excel. La lógica se basa en recorrer los valores especificados, construir y analizar cada modelo en la API de SAP2000 y, finalmente, exportar los datos obtenidos.

Actualmente, la herramienta funciona con la interfaz entregada por la aplicación en uso de desarrollo de código, en este caso, 'Jupyter Notebook', a continuación, en la figura 4, se muestra como se deben ingresar los parámetros de entrada, y, un ejemplo de como se analizan 4 vigas ($L=10\text{m}$, $h=1\text{m}$; $L=10\text{m}$, $h=2\text{m}$; $L=11\text{m}$, $h=1\text{m}$; $L=11\text{m}$, $h=2\text{m}$).

```
Ingrese el largo inicial de la viga (m): 10
Ingrese el largo final de la viga (m): 11
Ingrese el espaciamiento entre largos (m): 1
Ingrese la altura inicial de la viga (m): 1
Ingrese la altura final de la viga (m): 2
Ingrese el espaciamiento entre alturas (m): 1
```

Figura 4: Interfaz de entrega de parámetros de entrada

Siguiendo con el proceso del código, luego de ingresar los parámetros de entrada, solo se debe esperar a que la herramienta termine el proceso iterativo, el cual, dependerá netamente del recurso computacional disponible del usuario. Para este caso, se utilizó un computador estilo notebook con procesador 'Intel Core i5', disco duro tipo SSD, tarjeta gráfica dedicada 'NVIDIA GEFORCE GTX 1650' y, memoria RAM de 8GB, lo que se traduce en un computador de gama media alta, y, el proceso de modelado de 360 vigas duró alrededor de 2 horas.

Cuando la herramienta termine de realizar los análisis, es posible observar cada uno de los modelos hechos, debido a que, está configurada para guardar cada modelo con un formato fácil de identificar, el formato en cuestión es: 'Viga_L(longitud)_H(altura)', un ejemplo legible, para una viga de 10 metros de largo y 0.6 metros de altura es: 'Viga_L10.0_H0.6'.

A continuación, en la figura 5, se observa una viga modelada por SAP2000 mediante la herramienta desarrollada.

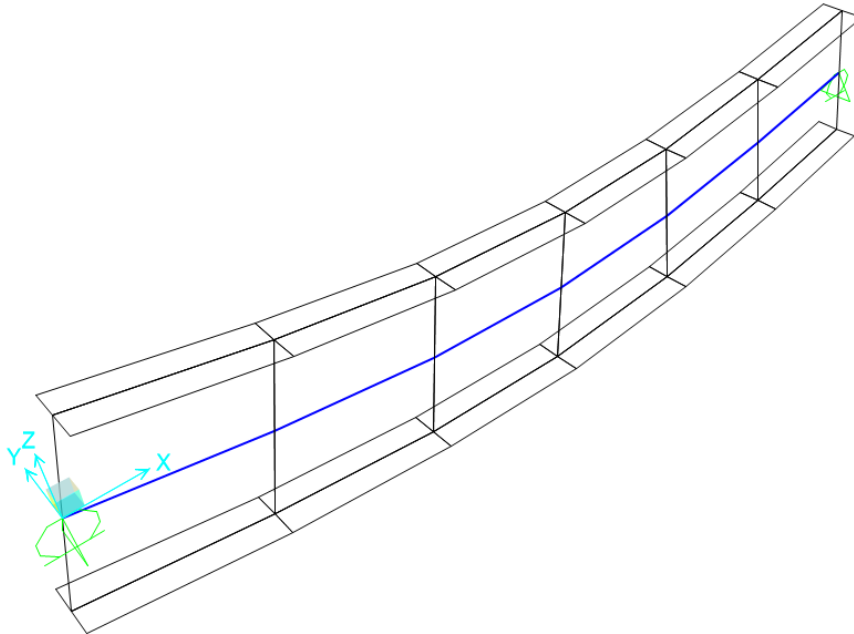


Figura 5: Dibujo de viga en SAP2000

De esta misma forma, se pueden verificar los resultados obtenidos desde SAP2000 y cómo se almacenan en Excel, a continuación, en la figura 6, se muestra el detalle de los resultados del análisis de una de las 360 vigas, en específico longitud=11 metros y altura=2 metros002E

```

--- Analizando viga con L = 11.00 m y h = 2.00 m ---
✅ Modelo existente reiniciado con un modelo en blanco.
Material 'Hormigón' configurado correctamente.
Sección I creada correctamente.

✅ Opción de acero seleccionada:
Área de acero (cm2)    6.78584
Diámetro (mm)         12
n de cables            6
Name: 105, dtype: object
Marco y patrones de carga configurados correctamente.
La longitud de L es: 11.0
El nombre del tendón es: 2
Casos de carga configurados correctamente.
📁 Modelo guardado en: C:\Users\joaco\OneDrive\Escritorio\Universidad\2024\TESIS\NUEVO ENFOQUE\MODELOS PROGRAMADOS\Viga_L11.0_H2.0.sdb
⚡ Ejecutando análisis en SAP2000...

Caso de carga: Resistencia
Axial - Mín: 0.0 kgf en 0.0 m | Máx: 0.0 kgf en 0.0 m
Cortante V2 - Mín: -69256.7709093852 kgf en 0.0 m | Máx: 58937.545909385204 kgf en 11.0 m
Momento M3 - Mín: -2.095702613587491e-11 kgf·m en 0.0 m | Máx: 177539.6389198103 kgf·m en 5.107142857142858 m
Momento en 0.5L: 175065.05598055958 kgf·m en 5.5 m

Caso de carga: Servicio
Axial - Mín: 0.0 kgf en 0.0 m | Máx: 0.0 kgf en 0.0 m
Cortante V2 - Mín: -52517.20561386199 kgf en 0.0 m | Máx: 44851.49561386199 kgf en 11.0 m
Momento M3 - Mín: 0.0 kgf·m en 0.0 m | Máx: 134812.21201114028 kgf·m en 5.107142857142858 m
Momento en 0.5L: 132985.20279566117 kgf·m en 5.5 m

Caso de carga: Fatiga
Axial - Mín: 0.0 kgf en 0.0 m | Máx: 0.0 kgf en 0.0 m
Cortante V2 - Mín: -50543.694488808025 kgf en 0.0 m | Máx: 40224.469488808056 kgf en 11.0 m
Momento M3 - Mín: -2.2212680417565013e-10 kgf·m en 11.0 m | Máx: 126798.81820776724 kgf·m en 4.517857142857142 m
Momento en 0.5L: 123669.7348037638 kgf·m en 5.5 m

Caso de carga: PrestressLoad
Axial - Mín: 118734.2854570582 kgf en 0.0 m | Máx: 118787.58556650695 kgf en 5.696428571428571 m
Cortante V2 - Mín: -14801.06113646173 kgf en 0.0 m | Máx: 14801.061136461738 kgf en 11.0 m
Momento M3 - Mín: -3.352420889820927e-11 kgf·m en 11.0 m | Máx: 40651.001137865074 kgf·m en 5.696428571428571 m
Momento en 0.5L: 40651.001137865074 kgf·m en 5.5 m

```

Figura 6: Ejemplo de parámetros de salida

4.2 Validación del modelo

En primer lugar, se comprobó si el desarrollo de la herramienta computacional era correcto y los resultados se adherían a la realidad, es decir, si el código lograba modelar correctamente una viga de hormigón pretensado y si estos resultados eran coherentes. Para ello, se hizo referencia a un estudio experimental sobre el comportamiento flexional de vigas de hormigón pretensado realizado por Pang et al. (2022). En ese sentido, se modificaron los parámetros de entrada y se realizó una comparación de resultados.

El estudio de Pang et al. (2022) evalúa numéricamente vigas de hormigón pretensado con y sin adherencia. Dado que en dicha investigación solo se utilizan tendones adheridos, en este análisis se consideran únicamente los resultados que cumplen esa

condición. A continuación, en la Tabla 6, se muestran los parámetros de entrada necesarios para configurar el modelo en el código.

Tabla 6: Parámetros de entrada validación

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Longitud de la viga	L	10	m
Altura de la viga	h	0,6	m
Resistencia a la compresión del	f _c	60	MPa
Módulo de elasticidad del	E _c	39	GPa
Resistencia a la tracción del	f _t	4,4	MPa
Resistencia a la fluencia del acero	f _y	450	MPa
Módulo de elasticidad del	E _s	200	GPa
Resistencia última del acero	f _{pu}	1840	MPa
Coef. De pretensado	R	0,75	-

Estos parámetros se modificaron y definieron dentro del script para modelar el tendón. Pang et al. (2022) utilizaron un tendón de forma parabólica, mientras que la herramienta computacional aquí propuesta considera un tendón recto; sin embargo, no deberían producirse mayores variaciones. Los resultados obtenidos por la investigación de Pang et al. (2022) para el caso de tendones adheridos se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Resultados, Pang et. al(2022)

Largo (m)	Altura (m)	Mu (kN*m)		Me (kN*m)	
		Apoyo	Mitad	Apoyo	Mitad
10	0,6	-508,2	650,7	583,6	-642,4

Dentro de la herramienta se configuró un modelo de viga rectangular se obtuvo un momento máximo de $61237.23 \text{ kgf} \cdot \text{m}$ que, en unidades del sistema internacional es $600.53 \text{ kN} \cdot \text{m}$.

A simple vista, se aprecia que los valores son semejantes al centro de la viga. Como se ha mencionado, esta herramienta está enfocada en etapas previas a la ingeniería más refinada, debido a que en las etapas previas las verificaciones deben ser expeditas y se suele tener un margen de tolerancia más extenso. Además, si se realiza una razón entre el resultado del estudio numérico y el resultado de la herramienta computacional:

$$M_u(\text{según Pang et.al}) = 650.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_u(\text{según herramienta computacional}) = 600,53 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{M_u(\text{según Pang et.al}) - M_u(\text{según herramienta computacional})}{M_u(\text{según Pang et.al})} = \frac{650.7 \text{ kN} \cdot \text{m} - 600,53 \text{ kN} \cdot \text{m}}{650.7 \text{ kN} \cdot \text{m}} = 0.07710 = 7.7\%$$

se puede ver que varía aproximadamente 8% respecto del resultado final. Es decir, el programa posee un margen de error de 8%, lo cual es tolerable gracias a lo detallado previamente.

Con el modelo validado, se procede a introducir los parámetros de entrada definidos en la metodología. Se realizó el análisis estructural de 360 vigas de hormigón pretensada. Con la geometría mostrada en la Tabla 8:

Tabla 8: Parámetros de entrada validación

Parámetro	Valor	Unidad
Largo inicial	10,0	m
Largo final	40,0	m
Paso	1,0	m
Altura inicial	0,6	m
Altura final	3,0	m
Paso	0,2	m

En cuanto a las vigas, todas fueron de sección tipo I, modeladas con un tendón recto, utilizando una carga viva móvil correspondiente a un camión HS 20-44, y, se utilizaron los parámetros definidos en la metodología.

4.3 Resultados del análisis estructural

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la herramienta automatizada desarrollada para el predimensionamiento de vigas de hormigón pretensado. Se analizaron las fuerzas internas principales, como momentos flectores, fuerzas cortantes y esfuerzos axiales, obtenidos para las diferentes configuraciones de vigas y niveles de pretensado. Se modelaron alrededor de 360 vigas de hormigón pretensado. Para facilitar la visualización de resultados, se presentan valores en función de la razón Largo/Altura. La Figura 7 representa el ratio entre la capacidad flexional y la demanda de la misma.

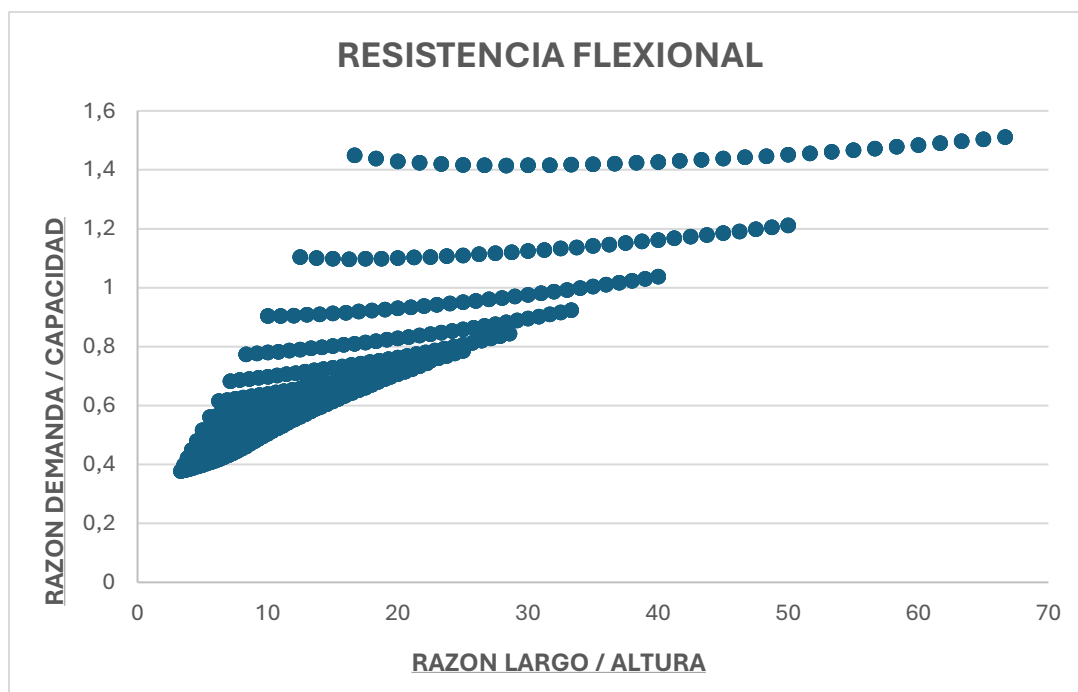


Figura 7: Resultados. Resistencia a la flexión. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3, la relación $\frac{M_u}{\phi M_n}$ indica que tan cerca está la demanda de momento respecto a la capacidad de la viga. En esto, la Figura muestra que:

Para las relaciones L/h bajas (menores a 20), la mayoría de los valores están por debajo de 1, lo que indica que las vigas tienen una capacidad flexional suficiente, mientras que, a medida que L/h aumenta, el ratio $\frac{M_u}{\phi M_n}$ crece, lo que sugiere que las vigas están más exigidas en flexión. Por otro lado, para vigas con una razón de largo-altura entre 40 y 50, están en su mayoría fuera del límite de la capacidad flexional. Por último, las vigas que sobrepasan una razón largo – altura igual a 50, están todas fuera de rango, es decir no cumplen con la capacidad flexional requerida para resistir el momento máximo aplicado por los casos de carga.

Por otro lado, la Figura 4, representa la situación símil, con respecto a la capacidad cortante del elemento estructural.

A continuación, en la Figura 8, se utilizó un ratio $\frac{V_u}{\phi V_n}$ y la relación L / h para referenciar las vigas.

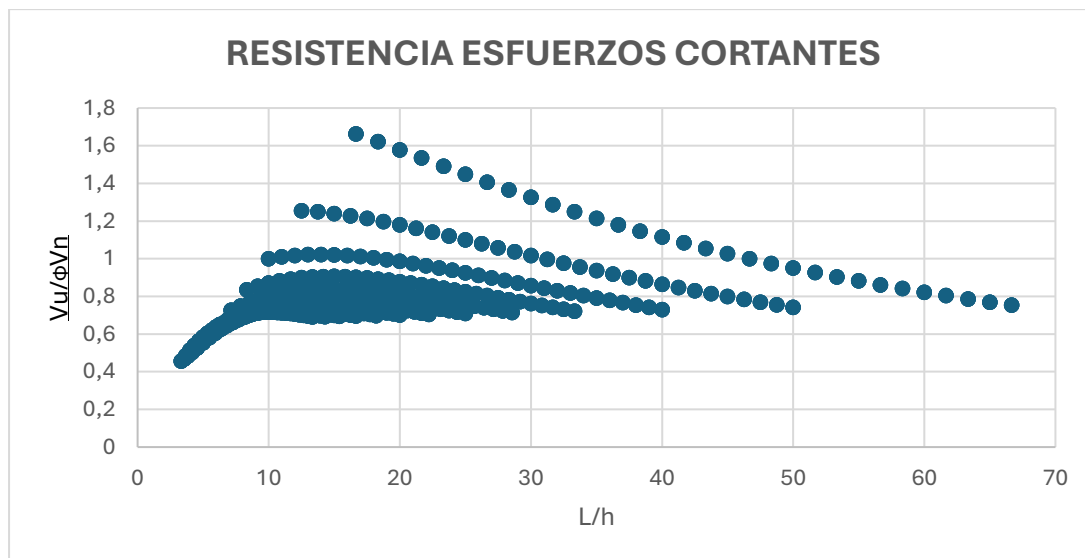


Figura 8: Resultados. Resistencia al corte. Fuente: Elaboración propia

Para evaluar el desempeño de las vigas en términos de resistencia al corte, se analizó la relación entre la demanda cortante (V_u) la capacidad nominal de corte reducida por el factor de resistencia (ϕV_n). La Figura 4 presenta los valores obtenidos en función de la razón L/h , permitiendo identificar tendencias y posibles deficiencias en el diseño estructural de las vigas estudiadas.

Se observa que para vigas con baja relación L/h (menores a 10-15), el ratio $\frac{V_u}{\phi V_n}$ aumenta rápidamente, alcanzando valores cercanos o superiores a 1. Esto sugiere que estas vigas están más exigidas en términos de resistencia al corte esto se explica porque, en vigas con baja relación L/h el momento flector no alcanza a desarrollarse completamente y la transferencia de carga se realiza por esfuerzos de corte a través del alma de la viga (Kani, 1996), además, al ser corta la distancia entre la carga y el apoyo, se reduce la capacidad del hormigón para distribuir las tensiones aumentando el riesgo de fisuración característico de la falla por corte, lo que compromete su desempeño estructural si no se considera un refuerzo transversal adecuado.

Las normativas de diseño reconocen este comportamiento. Por ejemplo, ACI 318 y AASHTO recomiendan, en vigas más robustas, emplear modelos que representen el flujo real de cargas dentro del hormigón, considerando zonas de compresión diagonal y refuerzos que actúen como elementos de tracción.

A medida que la razón L/h crece, el ratio se estabiliza y tiende a descender, lo que indica que las vigas más esbeltas presentan una mayor reserva de capacidad en corte. Esto se debe a que el momento flector crece proporcionalmente al cuadrado de la luz, mientras que el corte solo aumenta de manera lineal. Por lo tanto, en este rango, el esfuerzo dominante pasa a ser flexión, y la resistencia a corte suele ser suficiente con el refuerzo mínimo exigido por la norma. En esos casos, el comportamiento estructural es más predecible, cumpliéndose las hipótesis fundamentales de la resistencia a la flexión, como la distribución lineal de tensiones.

Para vigas con L/h intermedios (15-30), se observa una mayor dispersión de valores, con algunos casos en los que el ratio supera 1.0, lo que implica que ciertas configuraciones pueden estar en un rango crítico en términos de esfuerzo cortante. Para $L/h > 40$, la

tendencia del ratio es decreciente, con valores que se estabilizan por debajo de 1, lo que sugiere que las vigas más esbeltas no presentan problemas en resistencia al corte y tienen una capacidad suficiente para resistir las demandas impuestas. Este comportamiento también se ha observado en vigas pretensadas de hormigón, donde además del efecto geométrico, el pretensado mejora la resistencia al corte al comprimir longitudinalmente la viga, lo que reduce la formación de fisuras diagonales. En casos donde los cables están curvados, también se genera una componente vertical de fuerza que contrarresta parte del corte externo (ACI Committee 318, 2019)

Finalmente, Los resultados obtenidos en este análisis de corte deben ser evaluados en conjunto con la resistencia a la flexión, donde se observó que las vigas más esbeltas estaban más exigidas en términos de flexión, mientras que en este análisis las vigas más robustas (bajo L/h) presentan los valores más críticos en corte.

Este comportamiento sugiere que existe un punto de equilibrio en la relación L/h , onde la capacidad estructural de la viga se distribuye de manera más eficiente entre flexión y corte. Para lograr un diseño óptimo, se recomienda que la selección de la geometría y el nivel de pretensado consideren ambas solicitaciones de manera conjunta, asegurando que la viga no se vea gobernada excesivamente por una de ellas.

4.4 Análisis conjunto de los resultados

4.4.1 Comparación entre flexión y corte

La comparación de los resultados de flexión y corte permite identificar tendencias clave en el diseño de las vigas pretensadas analizadas. A partir de las Figuras 3 y 4, se observa que:

1. Las vigas con baja relación L/h ($L/h < 15$) presentan valores altos de la relación $\frac{V_u}{\phi V_n}$, lo que indica que la resistencia al corte es el criterio más exigente en estas configuraciones

2. Las vigas con alta relación L/h ($L/h > 40$) muestran mayores exigencias en flexión, con valores elevados de $\frac{M_u}{\phi M_n}$, lo que sugiere que el dimensionamiento de estas vigas está gobernado por flexión
3. Para relaciones intermedias ($15 \leq L/h \leq 40$), la relación entre flexión y corte es más equilibrada, con valores que tienden a mantenerse dentro del rango aceptable.

Estos resultados sugieren que el diseño de las vigas no está dominado por una única sollicitación, sino que varía en función de la esbeltez relativa de la sección. Las vigas más robustas están más exigidas en corte, mientras que las más esbeltas están gobernadas por flexión.

4.4.2 Identificación de configuraciones críticas

Las vigas pueden clasificarse en tres categorías principales según su desempeño. En primer lugar, las vigas controladas por corte se caracterizan por una relación L/h menor a 15. Estas vigas presentan altos valores de $\frac{V_u}{\phi V_n}$ y, en algunos casos, pueden superar el límite (1.0). Debido a su comportamiento, son las configuraciones más críticas en términos de resistencia cortante, lo que sugiere la necesidad de implementar refuerzos transversales.

En segundo lugar, se encuentran las vigas balanceadas cuya relación L/h se encuentra entre 15 y 40. Estas vigas muestran una relación estable entre flexión y corte, con valores cercanos a 1 en ambos criterios. Esta configuración se considera las vigas más óptimas, debido a que no presentan problemas de sobredimensionamiento ni exceso de demanda.

Por último, las vigas controladas por flexión tienen una relación L/h mayor a 40. Este tipo de vigas presenta valores altos de $\frac{M_u}{\phi M_n}$, lo que indica que la flexión es el valor más crítico, y, en casos que supera el límite del ratio, esto se traduce en una viga que no cumple con los requisitos para resistir la flexión, para corregirlo, es necesario agregar más acero pretensado, o bien, distribuyendo de mejor manera los tendones.

4.4.3 Recomendaciones para optimizaciones del diseño

A partir de los resultados obtenidos, se pueden proponer estrategias para optimizar el diseño de las vigas de hormigón pretensado y así lograr un mejor equilibrio entre flexión y corte. Por ejemplo, para vigas con baja relación L/h , se debe incrementar o implementar acero transversal o bien, reducir el ancho del alma para aumentar el equilibrio entre flexión y corte. Para vigas con alta relación se debe aumentar la cantidad de tendones o mejorar su distribución, otra opción es aumentar el ancho del ala, de esa forma aumentaría la inercia y reduciría esfuerzos. Mientras que, para las vigas con una intermedia relación L/h se recomienda mantener esta configuración ya que presenta una buena distribución de esfuerzos.

4.5 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en el análisis estructural han permitido evaluar el comportamiento de las vigas en términos de resistencia a la flexión y corte. En esta sección, se comparan estos hallazgos con la investigación previa en cuestión y se discuten los principales factores que influyen en la precisión y aplicabilidad del modelo.

Para validar la coherencia de los resultados, se contrastaron los valores obtenidos con los reportados en el estudio previo, en particular la investigación hecha por Pang et. al. (2022) que permite establecer paralelismos con el presente trabajo.

Uno de los principales puntos de comparación es la capacidad flexional. Los resultados muestran que las vigas más esbeltas ($L / h > 40$) presentan valores altos de la relación de $\frac{M_u}{\phi M_n}$, lo que sugiere que su diseño está condicionado por flexión. Este comportamiento es similar al reportado en el estudio previo, donde se indica que la capacidad flexional se vuelve más crítica en vigas con mayor esbeltez debido a la disminución de la inercia y a la mayor longitud efectiva de la zona comprimida de hormigón.

Otro aspecto relevante es la resistencia al corte. Se observa que las vigas de baja relación L / h (<15) tienen valores de la relación $\frac{V_u}{\phi V_n}$, lo que indica que la resistencia al corte es el criterio de diseño más exigente en estas configuraciones. Estos resultados sugieren la importancia del refuerzo transversal en vigas más robustas, donde los esfuerzos cortantes alcanzan valores significativos antes de que la flexión se vuelva crítica. Además, la distribución de esfuerzos es un factor clave, esto se debe a la distribución de los tendones, la cual tiene un impacto directo en la distribución de esfuerzos y en la eficiencia del pretensado.

A pesar de los buenos resultados obtenidos, el modelo automatizado presenta algunas limitaciones a considerar. Los tendones fueron modelados en línea recta, lo que implica una distribución uniforme de los esfuerzos en los tendones. Esta simplificación puede generar discrepancias entre los resultados de la herramienta computacional y los valores reales observados en la práctica. Asimismo, no se incorporaron los efectos de fluencia y retracción en el modelo computacional, lo que impide capturar la variación de esfuerzos a largo plazo y podría generar desviaciones respecto a la realidad.

CAPITULO 5 – CONCLUSION

5.1 Conclusión

Este trabajo se enfocó en desarrollar una herramienta computacional para el predimensionamiento de vigas de hormigón pretensado, integrando programación en Python con el software SAP2000 a través de su API. A lo largo del proceso, se definieron los fundamentos teóricos, se revisaron metodologías de diseño basadas en normativas vigentes y se diseñó un modelo capaz de analizar múltiples configuraciones de manera rápida.

La validación del modelo se llevó a cabo mediante la comparación con un estudio previo y análisis experimental. Los resultados obtenidos mostraron coherencia con las referencias experimentales y se mantuvieron dentro de márgenes de error aceptables para la fase de predimensionamiento. Se evaluaron más de 360 configuraciones distintas, lo que permitió observar tendencias en la resistencia a flexión y corte. Una observación importante fue la relación directa entre la razón L/h y el tipo de exigencia estructural; con L/h superior a 40, el comportamiento está dominado por la flexión; con L/h menor a 15, el corte se vuelve crítico; y entre 20 y 35 se logra un equilibrio que reduce la sobredimensión en uno u otro aspecto.

En la práctica, la herramienta aporta agilidad a la etapa inicial del diseño, disminuyendo el número de iteraciones manuales y ofreciendo información rápida sobre la viabilidad de diversas alternativas. Su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos en cortos plazos facilita la búsqueda de opciones óptimas y contribuye a un uso más eficiente de los recursos en proyectos reales. Aun así, el modelo presenta algunas restricciones. Por ejemplo, la representación de los tendones asume una disposición rectilínea, lo que puede diferir de lo planteado en estudios experimentales con cables parabólicos. Tampoco se incluyeron efectos diferidos del hormigón (fluencia y retracción), que pueden modificar la distribución de esfuerzos a lo largo del tiempo.

Por otro lado, las vigas con relación de esbeltez mayor que 15 y menor que 40 muestran un comportamiento balanceado en cuanto a demandas de flexión y corte, con una buena distribución de esfuerzos. Esto permite evitar el sobredimensionamiento en corte sin

comprometer la resistencia a flexión. En cambio, las vigas con una relación de esbeltez mayor presentan altos valores de $M_u / (\phi M_n)$, lo que indica que la flexión pasa a ser el factor de control y podría requerir un incremento en el área de acero pretensado o ajustes en la disposición de los tendones.

Estos resultados confirman la importancia de ajustar la geometría de la viga en función del tipo de solicitación predominante, asegurando un diseño más eficiente y económico. El modelo desarrollado permitió verificar que la mayoría de las configuraciones analizadas cumplen con los criterios de la norma AASHTO LRFD Bridge Design, Manual de Carreteras, Volumen 3, y del ACI 318-19. No obstante, se identificaron algunas excepciones, por ejemplo, en vigas de baja esbeltez se observó la carencia de refuerzo transversal (estribos), mientras que en vigas más esbeltas se detectaron valores que superan la unidad en la verificación flexional, lo cual indica la necesidad de revisar el área o la distribución de los tendones.

Estos resultados sugieren que la herramienta computacional propuesta para el diseño de vigas de hormigón pretensado es válida para la evaluación preliminar de su cumplimiento normativo, optimizando el proceso de diseño sin la necesidad de iteraciones manuales extensas. A partir de lo anterior, se desprenden diversas oportunidades para perfeccionar la precisión del análisis y ampliar el rango de aplicación en la ingeniería estructural.

Actualmente, el modelo considera únicamente tendones rectilíneos en la sección, lo cual simplifica la representación del pretensado. En diseños avanzados, los tendones suelen presentar trayectorias parabólicas que permiten optimizar la distribución de esfuerzos, por lo que se recomienda incorporar esta opción. Además, evaluar la configuración de tendones (centrados, excéntricos, multicapas) ayudaría a determinar el impacto en la resistencia a flexión y corte. Por otra parte, el modelo no considera los efectos diferidos del hormigón, como la fluencia y la retracción, que inciden en la distribución de esfuerzos a lo largo del tiempo. Incluir correcciones que contemplen la variabilidad del módulo de elasticidad del hormigón permitiría acercar los resultados a situaciones más reales. Asimismo, se sugiere ampliar la aplicación a vigas de edificación sometidas a cargas sísmicas o de torsión (por ejemplo, en secciones cajón), e incluso evaluar la factibilidad de combinar el pretensado con elementos metálicos para analizar estructuras mixtas.

El modelo desarrollado demuestra posibilita una evaluación rápida de múltiples configuraciones estructurales. Su integración con SAP2000, aunada a la facilidad de adaptación a distintos parámetros de diseño, convierte esta herramienta en un recurso valioso para optimizar el dimensionamiento de vigas tanto en puentes como en estructuras de gran envergadura. Entre sus beneficios destacan la automatización del proceso de análisis, la validación de resultados coherentes con metodologías establecidas por normas internacionales.

Uno de los principales aportes de esta metodología es la capacidad de evaluar en poco tiempo un alto número de alternativas, lo que permite al ingeniero seleccionar configuraciones óptimas y evitar sobredimensionamientos que encarecen las obras sin ofrecer ventajas, además, el uso de un software conocido, como SAP2000, ofrece la posibilidad de contrastar de forma confiable los resultados y agiliza la toma de decisiones en etapas tempranas de proyectos de gran relevancia.

Esto, en definitiva, representa un avance notable en el diseño estructural de vigas pretensadas. En líneas generales, la herramienta se consideró útil y práctica para el predimensionamiento, al acelerar la evaluación de diversas alternativas y disminuir la dependencia de iteraciones manuales.

CAPITULO 6 – REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2020). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (9th ed.). Washington, D.C.: AASHTO.
- American Concrete Institute (ACI). (2019). ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, MI: ACI.
- Pang, X., Xie, J., Li, J., & Zhang, W. (2022). Analysis of prestressed concrete beams under flexural loading: Experimental study and numerical modeling. *Journal of Structural Engineering*, 148(12), 04022185.
- Aparicio, A. C., Ramos, G., & Casas, J. R. (2022). Testing of externally prestressed concrete beams. *Engineering Structures*, 24, 73-84.
- Padmarajaiah, S. K., & Ramaswamy, A. (2022). A finite element assessment of flexural strength of prestressed concrete beams with fiber reinforcement. *Cement and Concrete Composites*.
- Yapar, O., Basu, P. K., & Nordendale, N. (2015). Accurate finite element modeling of pretensioned prestressed concrete beams. *Engineering Structures*, 101, 163-178.
- Rodrigues da Silva, A., & Souza Rosa, J. P. (2020). Nonlinear numerical analysis of prestressed concrete beams and slabs. *Engineering Structures*, 223.
- Kralovanec, J., Moravcik, M., & Jost, J. (2021). Analysis of prestressing in precast prestressed concrete beams. *Sciendo*.
- Maroliya, M. K. (2012). Comparative study of flexural behavior of reinforced concrete beam and prestressed concrete beam. *International Journal of Engineering Research and Applications*.
- Jiang, C., Sun, H., & Shi, Y. (2018). Numerical modeling of prestressed concrete bridge girders subjected to combined loading effects. *Journal of Bridge Engineering*, 23(5), 04018015.
- Mohamed, A., & Tait, M. J. (2019). Shear behavior of prestressed concrete beams with and without shear reinforcement. *Engineering Structures*, 182, 143-156.

- Zhou, Y., Wu, H., & Chen, Y. (2020). Evaluation of the long-term behavior of prestressed concrete beams under sustained loading. *Construction and Building Materials*, 247, 118487.
- Elbasha, E., & Sennah, K. (2021). Optimized design of prestressed concrete bridge girders under serviceability and strength limit states. *Journal of Bridge Engineering*, 26(3), 04021006.
- Saleh, M. M., & Helmy, H. A. (2017). Effect of prestressing level on the behavior of prestressed concrete beams. *Structures*, 12, 33-45.
- Pinho, R., Campos, E., & Carvalho, E. (2016). Assessment of prestressed concrete beams subjected to progressive collapse conditions. *Engineering Failure Analysis*, 59, 490-506.
- Dolan, C. W., Hamilton, H. R., & Abdel-Mohti, A. (2015). Prestressed concrete beams with fiber-reinforced polymer tendons: A review of performance and design considerations. *Journal of Composites for Construction*, 19(4), 04014077.
- Sánchez-Aparicio, L. J., Riveiro, B., & Ramos, L. F. (2020). Assessment of structural integrity of prestressed concrete bridges using advanced numerical simulations. *Advances in Engineering Software*, 145, 102789.
- AASHTO. (2020). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (9th ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ACI. (2019). ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute.
- Elbasha, E., & Sennah, K. (2021). Optimized design of prestressed concrete bridge girders under serviceability and strength limit states. *Journal of Bridge Engineering*, 26(3), 04021006.
- Manual de Carreteras – Volumen 3 (MOP). (2022). Instrucciones y criterios de diseño para puentes y otras estructuras. Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Pang, X., Xie, J., Li, J., & Zhang, W. (2022). Analysis of prestressed concrete beams under flexural loading: Experimental study and numerical modeling. *Journal of Structural Engineering*, 148(12), 04022185.
- Saleh, M. M., & Helmy, H. A. (2017). Effect of prestressing level on the behavior of prestressed concrete beams. *Structures*, 12, 33–45.

- Kani, G. N. J. (1966). Basic facts concerning shear failure. ACI Journal Proceedings, 63(6), 675–692.