

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	Documento F-AC-DBL-007	Código 30-09-2024	Fecha Revisión C
	DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	Dependencia SUBDIRECTOR ACADEMICO	Aprobado 1(1)	Pág.

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Mayeli Fernanda Vergel Carrascal Diego Alejandro Chinchilla Jácome		
FACULTAD	Ingeniería		
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería civil		
DIRECTOR	Dr. Nelson Afanador García		
CODIRECTOR (si aplica)	Ing. Jesús Eduardo Guerrero Rodríguez		
TÍTULO DE LA TESIS	Desarrollo de un aplicativo para el diseño de muros de contención en voladizo y una cartilla de compilación de resultados obtenidos para los municipios de N.STD.		
TITULO EN INGLES	Development of an application for the design of cantilever retaining walls and a booklet compiling the results obtained for the municipalities of N.STD.		
RESUMEN			
El trabajo desarrolla un aplicativo en Python para diseñar muros de contención en voladizo, conforme al Código Colombiano de Puentes 2014. Automatiza cálculos y verificaciones estructurales, considerando condiciones geotécnicas y sísmicas. Incluye una cartilla técnica con resultados para municipios de Norte de Santander, optimizando tiempo, costos y seguridad. La herramienta, adaptable a otras regiones, facilita diseños confiables a entidades locales, cumpliendo normas y mejorando la planificación de proyectos de infraestructura.			
RESUMEN EN INGLES			
The project develops a Python application for designing cantilever retaining walls in accordance with the 2014 Colombian Bridge Code. It automates structural calculations and verifications, taking into account geotechnical and seismic conditions. It includes a technical booklet with results for municipalities in Norte de Santander, optimizing time, costs, and safety. The tool, which can be adapted to other regions, facilitates reliable designs for local entities, complying with standards and improving infrastructure project planning.			
PALABRAS CLAVES	Muros, Software, Diseño, Python, Programación, Infraestructura.		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Walls, Software, Design, Python, Programming, Infrastructure.		
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS:84	PLANOS:0	ILUSTRACIONES:27	CD-ROM:0



SC-CER102673



Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Colombia - Código postal: 546552
Línea gratuita nacional: 01 8000 121 022 - PBX: (+57) (7) 569 00 88
atencionalciudadano@ufpso.edu.co - www.ufpso.edu.co

**Desarrollo de un aplicativo para el diseño de muros de contención en voladizo y una
cartilla de compilación de resultados obtenidos para los municipios de N.STD.**

Mayeli Fernanda Vergel Carrascal

Diego Alejandro Chinchilla Jácome

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco De Paula Santander Ocaña

Ingeniería Civil

Director. Dr. Nelson Afanador García

19 de agosto de 2025

Dedicatoria

A quienes me enseñaron que el conocimiento no se trata solo de acumular respuestas, sino de aprender a formular mejores preguntas. A quiénes han creído en mí y me han apoyado a lo largo de este camino. A mi familia, especialmente mi madre y mi hermana por ser raíz y horizonte, y a quienes, con su guía y paciencia, sembraron en mí la certeza de que los sueños, con esfuerzo y constancia, se vuelven camino.

Mayeli Fernanda Vergel Carrascal

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico con todo mi corazón a mis padres y a mis hermanos, quienes durante estos cinco años de estudio han sido mi mayor apoyo y ejemplo a seguir. Gracias a sus consejos, paciencia y sacrificios he podido mantenerme firme en este camino y llegar hasta este momento tan importante en mi vida. Ellos no solo han estado presentes en lo académico, sino también en cada aspecto de mi vida, guiándome y motivándome a no rendirme.

También quiero dedicarlo a mis amigos, quienes me acompañaron en este proceso y estuvieron a mi lado en los buenos y en los momentos más difíciles. Su amistad, sus palabras de ánimo y la confianza que siempre me brindaron hicieron que este recorrido fuera más llevadero y enriquecedor.

Y, por último, pero no menos importante, a mi compañera de trabajo de grado, con quien compartí largas jornadas de trabajo, esfuerzo y aprendizaje. Gracias a su compromiso y compañía logramos enfrentar cada reto y sacar adelante este proyecto, que hoy representa el fruto de nuestra dedicación y constancia.

Diego Alejandro Chinchilla Jácome

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Dr. Nelson Afanador García por su acompañamiento constante y el esfuerzo dedicado durante el desarrollo de este proceso de investigación. Su orientación, apoyo incondicional y la claridad de sus enseñanzas fueron fundamentales para superar cada etapa de este trabajo. Su experiencia y conocimiento se convirtieron en pilares que nos guiaron y motivaron a culminar con éxito este proyecto.

También agradecemos al Ing. Jesús Eduardo Guerrero Rodríguez por la dedicación y el tiempo brindado en la parte de programación. Su compromiso y disposición hicieron posible estructurar adecuadamente la herramienta tecnológica que hoy presentamos, lo que representó un aporte significativo para consolidar nuestro proyecto.

Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, institución que nos abrió sus puertas y nos brindó una formación académica integral. Gracias a los conocimientos, recursos y valores transmitidos durante nuestra carrera, logramos culminar de manera satisfactoria esta etapa tan importante en nuestras vidas.

Mayeli Fernanda Vergel Carrascal

Diego Alejandro Chinchilla Jácome

Índice

Capítulo 1. Desarrollo de un Aplicativo para el Diseño de Muros de Contención en Voladizo y una Cartilla de Compilación de Resultados obtenidos para los Municipios de N.STD.	12
1.1 Planteamiento del Problema.....	12
1.2 Formulación del Problema	14
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo General.....	14
1.3.2 Objetivos Específicos.....	15
1.4 Justificación.....	15
1.5 Delimitaciones.....	17
1.5.1 Delimitación Operativa.....	17
1.5.2 Delimitación Conceptual	17
1.5.3 Delimitación Geográfica	17
1.5.4 Delimitación Temporal	17
Capítulo 2. Marco Referencial.....	18
2.1 Marco Histórico.....	18
2.2 Marco Contextual.....	23
2.3 Marco Conceptual	24
2.3.1 Estructura de Contención.....	24
2.3.2 Muro de Contención en Voladizo	24

2.3.3	Empuje Activo	24
2.3.4	Empuje Pasivo	25
2.3.5	Fuerza Sísmica	25
2.3.6	Análisis de Estabilidad Global.....	25
2.3.7	Estabilidad al Volcamiento	25
2.3.8	Estabilidad al Deslizamiento.....	26
2.3.9	Resistencia Ultima	26
2.3.10	Programación Informática	26
2.3.11	Lenguaje de Programación Interpretado	26
2.3.12	Python	27
2.4	Marco Teórico	27
2.5	Marco Legal	28
2.5.1	CCP-14 (Código Colombiano de Puentes)	28
2.5.2	Python Software Foundation License (PSFL)	28
Capítulo 3. Diseño Metodológico		29
3.1	Tipo de Investigación	29
3.2	Población y Muestra.....	29
3.2.1	Población.....	29
3.2.2	Muestra	30
Capítulo 4. Resultados		31

4.1	Definición de los Parámetros Técnicos y Normativos Necesarios	31
4.1.1	Redimensionamiento del Muro de Contención.....	31
4.1.2	Estados límites	34
4.1.3	Evento Extremo I	35
4.1.4	Servicio	36
4.1.5	Cálculo de cargas laterales (EH).....	36
4.1.6	Sobrecarga por Carga Viva (LS).....	45
4.1.7	Fuerza de Colisión Sobre la Barrera (CT)	46
4.1.8	Factores de Carga y Estados limites	48
4.1.9	Verificación de la Seguridad al Deslizamiento del Muro	51
4.1.10	Verificación de la Estabilidad del Muro de Contención	52
4.1.11	Esfuerzo Actuante Sobre el Suelo.....	53
4.1.12	Diseño a Flexión de la Zapata.....	53
4.1.13	Diseño del Vástago	58
4.2	Construir Aplicativo para el Diseño de Muros de Contención en Voladizo	60
4.3	Evaluación de Desempeño del Aplicativo	64
4.4	Cartilla técnica de referencia para diseño de muros en municipios de Norte de Santander	75
4.5	Manual de usuario	76
	Capítulo 5. Conclusiones	78

Capítulo 6. Recomendaciones.....	80
Referencias.....	81

Lista de Tablas

Tabla 1. Factores de resistencia para la resistencia geotécnica de cimentaciones superficiales...	35
Tabla 2. Valores del factor de sitio (F_{pga}).	42
Tabla 3. Distancia h_{eq} dependiendo de la altura del muro de contención	46
Tabla 4. Fuerzas de diseño para barandas vehiculares.	47
Tabla 5. Combinaciones y factores de carga para evaluación de estados limite.	50
Tabla 6. Factores de carga para el momento maximo del corte c-c.....	59

Lista de Figuras

Figura 1. Dimensiones aproximadas para muros de contención.....	32
Figura 2. Nomenclatura de las dimensiones de cada elemento usadas en este proyecto.....	33
Figura 3. Ángulo de inclinación del talud $i > 0$. Ángulo del vástago (β).	38
Figura 4. Valores de aceleración pico horizontal del terreno (PGA).....	41
Figura 5. Definición de la altura total H' del muro de contención.....	44
Figura 6. Esquema de distribución de fuerzas verticales, horizontales y torsionales	47
Figura 7. Combinaciones y factores de carga.	49
Figura 8. Sección de cálculo para el momento a-a del talón	54
Figura 9. Sección de cálculo para el momento b-b del talón	57
Figura 10. Sección de cálculo para el momento c-c del talón	59
Figura 11. Arquitectura del código desarrollado en Visual Studio Code	61
Figura 12. Interfaz de la aplicación desarrollada con la extensión Tkinter	62
Figura 13. Interfaz de dimensionamiento y verificaciones de estabilidad.....	63
Figura 14. Documento PDF generado por la aplicación.....	64
Figura 15. Interfaz de la aplicación desarrollada con la extensión Tkinter	65
Figura 16. Interfaz de dimensionamiento y verificaciones de estabilidad.....	66
Figura 17. Documento PDF generado por la aplicación para el primer tipo de diseño.....	67
Figura 18. Interfaz de la aplicación desarrollada con la extensión Tkinter 2 tipo de diseño.....	68
Figura 19. Interfaz de dimensionamiento y verificaciones de estabilidad para el 2 diseño.....	69
Figura 20. Documento PDF generado por la aplicación para el segundo diseño.	70
Figura 21. Interfaz de la aplicación desarrollada con la extensión Tkinter para el 3 diseño.	71
Figura 22. Interfaz de dimensionamiento y verificaciones de estabilidad para el tercer diseño. 72	

Figura 23. Documento PDF generado por la aplicación para el tercer diseño	73
Figura 24. Parámetros de entrada con la única variación en el tipo de diseño seleccionado.....	74
Figura 25. Comparativa de cantidades de obra entre los tres tipos de diseño en análisis.....	74
Figura 26. Hoja de la cartilla de diseños de muros de contención para Norte de Santander.....	76
Figura 27. Manual de Usuario del aplicativo “Wall Design”.	77

Capítulo 1. Desarrollo de un Aplicativo para el Diseño de Muros de Contención en Voladizo y una Cartilla de Compilación de Resultados obtenidos para los Municipios de N.STD.

1.1 Planteamiento del Problema

La necesidad de brindar un soporte lateral a masas de suelo mediante el uso de estructuras de contención proviene de muchos siglos atrás. Los monumentos megalíticos, son las primeras construcciones, que se presumen; fueron las primeras empleadas para la contención de tierras durante el 4000 a.C. en la costa atlántica de Europa y en el Mediterráneo Occidental. (Jara Mori, Gonzalo, 2008)

El desarrollo de las civilizaciones y la aparición de materiales como el hormigón a inicios del siglo XIX y la llegada del acero; capaz de soportar grandes esfuerzos a tracción, trajo consigo la implementación de estructuras de concreto reforzado, que han permitido construir elementos con mayores prestaciones estructurales y geométricas, como también estéticas. Estas estructuras de concreto reforzado han abatido las limitaciones presentadas durante siglos en lo que respecta a muros de contención, y han resuelto problemas relacionados a grandes alturas con estructuras más esbeltas y que permiten controlar no solo esfuerzos de compresión, sino también de flexión.

Los muros de contención son estructuras lineales y verticales construidas a modo de pared, relativamente rígida y continua, que de forma activa o pasiva brinda un efecto estabilizador en taludes escarpados de masas de suelo. Según Terzaghi, Peck y Mesri (1996) definen un muro de contención como una estructura destinada a soportar suelos que presentan pendientes mayores que su ángulo de reposo.

A pesar de la importancia de los muros de contención, el diseño de los mismos supone una serie de desafíos técnicos que requieren un análisis riguroso y preciso de diversos factores, como las propiedades del suelo, los empujes soportados y las condiciones innatas de la ubicación del proyecto. Actualmente, muchos profesionales y estudiantes de ingeniería se enfrentan a la complejidad de diseñar muros de contención empleando métodos tradicionales o softwares especializados que no siempre se adaptan de manera óptima a las necesidades del proyecto. Estas herramientas computacionales pueden presentar limitaciones en cuanto a la personalización de los parámetros de diseño y la simulación de diferentes escenarios, lo que puede incurrir en diseños conservadores y costosos, o en el peor de los casos, a fallas estructurales.

Este problema se ve agravado por la falta de una herramienta de programación específica que permita la realización de diseños más eficientes y optimizados. La carencia de un software especializado que sea integral, accesible y que facilite el cálculo, análisis y diseño de estas estructuras pone en riesgo la calidad, seguridad y viabilidad económica de los proyectos de construcción.

Por lo tanto, se plantea la necesidad de desarrollar un aplicativo informático que automatice y haga más eficiente el diseño de muros de contención en voladizo, que permita llevar a cabo análisis detallados y personalizados.

Sí bien el desarrollo de esta herramienta tiene como enfoque el análisis en los municipios de Norte de Santander; es posible modificar y adaptar distintos parámetros dentro de la programación para obtener resultados de diseño en otras zonas del país.

El desarrollo de esta herramienta aportaría significativamente a las secretarías de planeación de los distintos municipios, principalmente; a la de la provincia de Ocaña, quienes no

cuentan con este tipo de contenido guía que les permita llevar a cabo la construcción de muros de contención de una manera rápida y efectiva en zonas alejadas; debido a que no cuentan con profesionales idóneos para estos diseños.

El hecho de disponer de esta programación y de la cartilla con los datos necesarios para el diseño y construcción dependiendo de la región y de la aceleración pico efectiva del proyecto, conllevaría a la obtención de obras más confiables y más viables en términos de economía y tiempo; pues al tener esta cartilla con los diseños ya establecidos para diferentes alturas de muro, las alcaldías del sector no tendrían que incurrir en costos adicionales ni en retardos temporales para dar inicio a los proyectos, ya que el proceso para la canalización de recursos se estaría facilitando considerablemente.

1.2 Formulación del Problema

¿Cómo desarrollar una herramienta informática que optimice el diseño de muros de contención en voladizo permitiendo un análisis personalizado y eficiente de los factores estructurales, adaptable a las condiciones específicas de cada proyecto, para garantizar la estabilidad y seguridad?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Construir en Python una ventana gráfica interactiva que arroje al usuario tanto las dimensiones necesarias de la estructura para que cumpla con los factores de seguridad óptimos, como el acero de refuerzo requerido, y las cantidades de obra a emplear en el proceso.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

Definir los parámetros técnicos y normativos necesarios para el diseño de muros de contención tales como propiedades de suelo, empujes aplicados y factores de seguridad definidos en la Norma Colombiana de Diseño de Puentes para asegurar que el aplicativo cumpla con los estándares técnicos y sea seguro.

Crear una interfaz de usuario intuitiva que facilite la introducción de datos, la visualización de resultados, y la personalización de los parámetros de diseño según las necesidades específicas del proyecto; diseñando una ventana gráfica con el paquete Tkinter, una extensión de Python especializada en construir aplicaciones de interfaz gráfica de usuario (GUI) fácil de usar que permita realizar diseños eficientes y adaptados a las necesidades del usuario.

Elaborar una cartilla dinámica reuniendo y plasmando en sus páginas los resultados de los diseños obtenidos desde la programación para los diferentes municipios de Norte de Santander, esto con el fin de que dicha cartilla sirva como referencia técnica para futuros proyectos en la región

1.4 Justificación

El concreto reforzado y el acero han revolucionado el diseño de muros de contención en voladizo, permitiendo estructuras más delgadas y altas capaces de resistir esfuerzos combinados de compresión y flexión. Sin embargo, los softwares actuales para el diseño estructural a menudo carecen de la flexibilidad necesaria para personalizar parámetros clave, lo que puede resultar en diseños excesivamente conservadores, costosos o incluso inseguros (Park & Paulay, 1991)

En los municipios de Norte de Santander, donde muchas entidades del estado no cuentan con los recursos necesarios para la verificación de diseños estructurales de muros de contención, es crucial contar con una herramienta específica que permita realizar un análisis detallado y adaptable a estas condiciones locales además de que automatice y optimice el diseño de muros de contención en voladizo, permitiendo un análisis detallado y ajustado a las especificaciones estructurales necesarias para garantizar la seguridad y eficiencia de los proyectos, no sólo simplificaría el proceso de diseño, sino que también garantizaría que los muros de contención se adapten adecuadamente a las condiciones locales, optimizando tanto la seguridad como el costo de las obras.

Esta herramienta propuesta no solo sólo sería útil en esta región, sino que también podría ser adaptada para su implementación en otros departamentos del país, ampliando su utilidad y contribuyendo al desarrollo de prácticas de diseño más eficientes y estandarizadas en el campo de la ingeniería civil. Además, la creación de una cartilla que compile los resultados de los diseños realizados para los municipios de Norte de Santander ofrecerá una guía técnica, que funcionará como referencia para ingenieros y constructores en proyectos futuros. Esto garantizará que se adopten las mejores prácticas y se maximice el rendimiento estructural en cada caso.

En resumen, el desarrollo de esta herramienta proporcionara una alternativa de solución fácil de usar, integral, y accesible a realizar el proceso de diseño de forma manual, que como es bien sabido, puede ser extenso y requiere múltiples iteraciones.

1.5 Delimitaciones

1.5.1 Delimitación Operativa

El proyecto se centrará en la creación de un aplicativo para diseñar muros de contención en voladizo, el cual será complementado con una cartilla que reúna los resultados obtenidos. El desarrollo del aplicativo incluirá la programación, pruebas y validación del mismo, mientras que la cartilla ofrecerá guías prácticas y ejemplos específicos para su uso en los municipios de Norte de Santander.

1.5.2 Delimitación Conceptual

El proyecto se fundamentará en los conceptos estructurales y geotécnicos claves para el diseño de muros de contención en voladizo, incluyendo la distribución de cargas, análisis de momentos flectores, fuerzas de corte, capacidad portante del suelo, presión lateral de tierras, coeficientes de seguridad, acero de refuerzo, cuantía mínima, sobrecargas, entre otros.

1.5.3 Delimitación Geográfica

Este proyecto es aplicable a los muros de contención en concreto reforzado en voladizo que se puedan construir en cualquier lugar de la geografía colombiana, enfocados en la problemática que tiene actualmente los municipios de Norte de Santander a la hora de construir muros de contención.

1.5.4 Delimitación Temporal

La presente investigación se llevará a cabo en un tiempo aproximado de seis (6) meses, distribuidos en fases de investigación, desarrollo del software, elaboración de la cartilla y validación final.

Capítulo 2. Marco Referencial

2.1 Marco Histórico

Durante las primeras etapas del diseño de muros de contención, los cálculos necesarios para garantizar la estabilidad estructural y determinar el refuerzo de acero se realizaban manualmente. Los ingenieros utilizaban las teorías de presión de tierra desarrolladas por Rankine (1857) y Coulomb (1776), quienes definieron los métodos para calcular las presiones laterales que los suelos ejercen sobre los muros.

El primer ingeniero que propuso un método formal para calcular la presión lateral del suelo sobre muros de contención y, en consecuencia, las necesidades estructurales de refuerzo, fue Charles-Augustin de Coulomb en 1776, en su obra *Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture*, formuló la primera teoría práctica para calcular la presión de tierra activa y pasiva que el suelo ejerce sobre un muro de contención (Coulomb, 1776). Esta teoría permitía calcular el empuje del suelo sobre una estructura y estimar la resistencia necesaria para que el muro pudiera soportar esas fuerzas, estableciendo las bases para calcular el empuje del suelo sobre estructuras, lo que luego llevó a estimar el refuerzo necesario en términos de resistencia del material (Fang & Daniels, 2006).

En el siglo XIX, el ingeniero británico William John Macquorn Rankine desarrolló la teoría de Coulomb introduciendo la teoría de la presión activa del suelo en condiciones específicas del suelo, lo que permitió consideraciones adicionales para el diseño de los muros de gravedad y en voladizo. La teoría de Rankine permitió calcular las presiones laterales bajo la suposición de condiciones ideales del suelo, considerando la cohesión y el tamaño específico de grano como parámetros específicos de granulometría y cohesión. Coulomb, por su parte, incluyó

nuevos factores como la fricción entre el muro y el suelo, mejorando así la adaptación de estos modelos en situaciones reales de muros de contención en voladizo.

En la etapa inicial del diseño del muro de contención, los ingenieros realizaban cálculos manuales para determinar las áreas de refuerzo de acero necesarias, basándose en esfuerzos de flexión y corte, usando modelos simplificados y tablas para el diseño estructural. Estos métodos, aunque eran prácticos, su precisión era limitada debido a suposiciones idealistas sobre las propiedades del suelo y las condiciones de carga, sin considerar las variaciones reales del sitio. No obstante, sirvieron como una base valiosa para los métodos contemporáneos de cálculo de refuerzo, que más tarde se transformaron en modelos informáticos con mayores capacidades analíticas y mejor adaptabilidad a condiciones de diseño complejas (Das, 2015).

La llegada de los primeros softwares de cálculo, tales como SAP2000 y STAAD.Pro, representó una mejora considerable en los años setenta en lo que respecta a los diseños de muros. Durante las décadas de 1970 y 1980, aparecieron los primeros programas de análisis estructural como SAP2000 y STAAD, marcando un significativo avance en el diseño de muros de contención. Aunque estos programas no estaban orientados al análisis en ingeniería geotécnica, utilizaron algoritmos de análisis matricial para descomponer la estructura en elementos finitos, permitiendo modelar el muro y calcular de manera precisa las fuerzas internas, los momentos flectores y las tensiones. Esta metodología permitió realizar un análisis detallado de cada componente del muro de contención, disminuyendo así el margen de error presente en los cálculos manuales (Computer & Structures, 2015).

El funcionamiento de estos programas comienza con la creación de un modelo en un entorno de simulación gráfica. El ingeniero establece las dimensiones, materiales, condiciones del suelo y cargas que actuarán sobre el muro. A partir de ahí, los programas distribuyen las

cargas y calculan el efecto de estas fuerzas en cada elemento del muro. Esta función fue particularmente útil para estimar presiones de tierra activas y pasivas, lo que permite la correcta distribución de fuerzas en toda la estructura (Das, 2015).

Además de distribuir las cargas, los programas también calculaban los momentos flectores, las fuerzas cortantes y otras fuerzas internas en cualquier punto del muro, identificando las secciones críticas donde era necesario el refuerzo de acero. Esta información fue fundamental para optimizar el diseño del muro, ajustando la cantidad de acero requerida según las demandas estructurales específicas de cada sección y logrando así un diseño más seguro y eficiente (Bowles, 1996).

A pesar de los avances logrando, los programas seguían teniendo algunas limitaciones en lo que respecta a la interacción estructura del suelo y la evaluación específica de su estabilidad. Los ingenieros continuaban dependiendo de métodos manuales para abordar estos elementos, ya que el software de esa época carecía de herramientas especializadas para la estructura. Sin embargo, el uso de programas como SAP2000 y STAAD Pro proporcionaron una mejora significativa en la eficiencia y la precisión del diseño estructural comparado con los métodos tradicionales (Bentley Systems, 2021).

En la década de los 90, se lanzaron aplicaciones como Geo5 y SLOPE/W, las cuales ofrecieron un enfoque más centrado en la geotecnia, logrando avances considerables respecto a los programas anteriores como SAP2000 y STAAD Pro. Estas aplicaciones se dedicaron al análisis de la estabilidad de taludes y al cálculo de las presiones del suelo, incluyendo parámetros detallados del suelo como la cohesión, el ángulo de fricción y la densidad, lo cual permitió una mejor evaluación de las condiciones del suelo (Das, 2015).

También distinguieron por tener interfaces fáciles de usar y por su capacidad para ofrecer resultados visuales a través de gráficos y diagramas, lo que ayudó a comprender los datos y a optimizar los modelos estructurales. Estas innovaciones establecieron nuevos estándares en la interacción entre el suelo y la estructura, aumentando la fiabilidad y eficacia en el diseño de muros de contención (Geo-Slope International, 2004).

La llegada del análisis de elementos finitos (FEA) a comienzos de los años 2000 supuso un avance significativo para los programas de diseño de muros. Programas como PLAXIS y FLAC se destacaron al incorporar modelos tridimensionales y técnicas avanzadas capaces de manejar las no linealidades en el comportamiento del suelo y del muro, ofreciendo una representación más precisa de la interacción entre el suelo y la estructura. Además, el FEA hizo posible calcular las tensiones internas en el muro y la redistribución de fuerzas en el terreno circundante en situaciones complejas, incluyendo eventos sísmicos (Das, 2015).

A diferencia de generaciones anteriores de software, han hecho más fácil el análisis en tiempo real, al simular los efectos de cargas cíclicas, deslizamientos o vibraciones. Poder probar distintos materiales y configuraciones de carga dentro de un solo entorno ha mejorado el diseño de las estructuras de acero, lo que ha aumentado tanto la seguridad como la eficiencia.

El diseño de muros de contención avanzó significativamente con la adopción de normativas como el CCP14 en Colombia, que define parámetros específicos para garantizar su seguridad estructural en diferentes contextos sísmicos. Estas regulaciones ofrecen directrices para calcular fuerzas, determinar el refuerzo de acero y prever el comportamiento estructural bajo diferentes condiciones de carga. Herramientas como CYPE han sido esenciales en este proceso al integrar estas normativas directamente en su software, permitiendo la automatización de cálculos y verificaciones de diseño. Esto no solo mejora la eficiencia en el desarrollo de

proyectos, sino que también garantiza que se alcancen altos estándares de seguridad y funcionalidad (CYPE Ingenieros, 2020).

De manera similar, la inclusión de esta normativa en el software de diseño ayuda a utilizar los recursos de manera óptima, creando soluciones específicas para cada tipo de proyecto. Se consideran aspectos como el tipo de suelo, las cargas sísmicas y las características de los materiales para crear propuestas que logran un equilibrio entre costos y requisitos de seguridad. Esto ha reducido considerablemente los errores humanos en los cálculos y ha aumentado la confianza en los diseños generados. En el ámbito de los muros de contención, esta transformación representa un avance hacia prácticas más precisas, eficientes y sostenibles, marcando un importante paso en la ingeniería estructural moderna (Das, 2015).

En los últimos diez años, la inteligencia artificial y la tecnología en la nube han cambiado drásticamente el diseño de muros de contención. Herramientas como SkyCiv han incorporado inteligencia artificial para realizar automáticamente cálculos de refuerzo de acero basados en datos específicos del suelo. Esto no solo hace que los procesos de diseño sean más sencillos, sino que también permite la colaboración en tiempo real entre equipos, resultando en mayor eficiencia y precisión en los proyectos. Además, la automatización contribuye a la reducción de costos y asegura que los diseños cumplan con los estándares necesarios para cada situación específica (Sharma & Goyal, 2021).

Esta incorporación de IA no solo mejora los cálculos estructurales, sino que también facilita la toma de decisiones durante todo el proceso de diseño, permitiendo ajustes rápidos y eficientes. Por la integración de estos Gracias a los avances tecnológicos, el diseño del muro de contención se ha vuelto más dinámico y preciso, lo que optimiza los resultados y permite una

mayor adaptabilidad a las diferentes condiciones del terreno y necesidades del proyecto (Sharma & Goyal, 2021).

2.2 Marco Contextual

En Colombia, el desarrollo de infraestructuras es muy importante para el desarrollo urbano, especialmente en zonas como Norte de Santander. Este lugar es conocido por su naturaleza, donde es fácil empujar la tierra y otras cosas naturales. La construcción de muros de contención es muy importante para garantizar la seguridad y mejorar la vida de los residentes. Sin embargo, la falta de herramientas tecnológicas para el desarrollo sostenible y de recursos suficientes agrava los problemas a los que se enfrenta la población día a día, por lo que es necesario implementar nuevas soluciones que los hagan más poderosos para enfrentar estos problemas.

En las zonas rurales del país, incluyendo Norte de Santander, es frecuente que falten ingenieros capacitados para diseñar y construir estructuras, como muros de contención. Esta falta de profesionales afecta la capacidad técnica de la comunidad y aumenta la dependencia de proyectos gubernamentales que muchas veces no se ajustan a las condiciones del terreno. Culturalmente, las iniciativas de infraestructura se perciben como elementos de avance y sostenibilidad, lo que resalta la necesidad de crear herramientas tecnológicas accesibles. Estas herramientas ayudarían a mejorar el acceso a servicios de construcción y fomentar un desarrollo más equitativo en estas zonas.

En Colombia, el contexto normativo se representa por documentos tales como la NSR-10 y el CCP-14, que ofrecen guías claras para el diseño y la aplicación de medidas de seguridad en infraestructuras. Sin embargo, en Norte de Santander, la implementación de estas normas

enfrenta grandes dificultades, como la falta de recursos económicos y el desconocimiento de la normativa entre los actores locales. Este proyecto pretende abordar estos problemas mediante la creación de software y hardware especializados, lo que permitirá a las autoridades locales adaptar los diseños a las regulaciones nacionales y las características de la región, promoviendo así una mayor conformidad y seguridad en las construcciones.

2.3 Marco Conceptual

2.3.1 Estructura de Contención

Una estructura de contención se define como aquella estructura continua que estabiliza una masa de terreno, ya sea en un estado activo o pasivo. Su función principal es contener un terreno que puede ser natural en ciertas circunstancias o artificial, como el caso de rellenos (Carnero López, 2016).

2.3.2 Muro de Contención en Voladizo

Son muros que tienen la funcionalidad de trabajar como losas en voladizo construidas en concreto reforzado con perfil que puede ser en “T” o en “L”. Reemplaza el muro de gravedad por una estructura más esbelta capaz de resistir esfuerzos de tracción (Segura Franco, 2011).

2.3.3 Empuje Activo

Cuando el muro se inclina respecto al suelo contenido. Con suficiente inclinación del muro, fallará una cuña triangular de suelo detrás del muro. La presión lateral para esta condición se denomina presión o empuje activo de tierra (Das, 2015).

2.3.4 Empuje Pasivo

El muro es empujado hacia el suelo retenido. Con suficiente movimiento del muro, fallará una cuña de suelo. La presión lateral para esta condición se llama presión o empuje pasivo de tierra (Das, 2015).

2.3.5 Fuerza Sísmica

Es cualquiera de las fuerzas causadas por movimientos terrestres provocados por un sismo, terremoto que provoca un conjunto de fuerzas horizontales que se aplican sobre la rasante de un edificio. Como tal, tiene una frecuencia y aceleración máxima características (Bazán y Meli, 2001).

2.3.6 Análisis de Estabilidad Global

Para revisar la estabilidad de un muro de contención, se deben hacer las siguientes verificaciones: Revisión por volteo respecto a la punta, revisión por falla de deslizamiento a lo largo de la base, revisión por falla de capacidad de carga de la base, revisión por asentamiento, revisión por estabilidad de conjunto (Das, 2015).

2.3.7 Estabilidad al Volcamiento

La estabilidad al vuelco se obtiene calculando los momentos desestabilizantes (provocados por las fuerzas que tienden a volcar el muro) y estabilizantes (debidos al peso del muro, al peso del suelo sobre el muro, al empuje activo vertical, y a las sobrecargas externas) y estudiando su estado de equilibrio. Los valores de las acciones consideradas se toman sin ponderar (Carnero López, 2016).

2.3.8 Estabilidad al Deslizamiento

Para evaluar esta estabilidad se debe comprobar que las fuerzas de rozamiento de la base del muro con el suelo superan en un valor determinado a la resultante de las fuerzas tangenciales, pues en caso contrario el muro se desplazaría horizontalmente (Carnero López, 2016).

2.3.9 Resistencia Última

Es la máxima resistencia que puede soportar un elemento estructural antes de su colapso total, representando el punto límite de capacidad de carga de un componente estructural de concreto. Esta resistencia última es el máximo esfuerzo o deformación que puede experimentar un elemento antes de producirse su falla estructural completa, considerando tanto la resistencia de los materiales como las condiciones de carga y diseño (Vallecilla Bahena, 2006).

2.3.10 Programación Informática

Es un archivo con un conjunto de instrucciones para que el ordenador haga algo. Ese algo puede ser una tarea simple como sumar dos dígitos o algo muy complejo, como la gestión que hace un sistema operativo de todas las tareas que el ordenador ejecuta en un momento determinado (Hinojosa Gutiérrez, 2015).

2.3.11 Lenguaje de Programación Interpretado

Es un lenguaje que se puede ejecutar sin necesidad de ser compilado (es decir, no necesita ser pasado por un programa especial para ser leído). Para ello, es necesario un “intérprete” que lee el código y ejecuta las instrucciones en él contenidas (Hinojosa Gutiérrez, 2015).

2.3.12 Python

Fue creado en Holanda por Guido Van Rossum en 1990, inicialmente como un pasatiempo que luego, debido a sus características fue ganando adeptos hasta extenderse rápidamente. Tres características que definen Python son: Lenguaje de propósito general, interpretado y orientado a objetos. Su filosofía se basa en una sintaxis simple y limpia, y en potentes y extensibles librerías (Cuevas Álvarez, 2016).

2.4 Marco Teórico

La teoría de empujes de tierras, desarrollada por Coulomb (1776) y Rankine (1857), establece los principios fundamentales para el cálculo de los empujes horizontales sobre muros, considerando parámetros como el peso unitario del suelo de relleno, el ángulo de fricción interna y la cohesión. Asimismo, los criterios de estabilidad deslizamiento, volcamiento y esfuerzos sobre el terreno son imprescindibles para garantizar la seguridad local de la estructura, tal como lo establecen normativas como la norma colombiana de diseño de puentes (CCP-14) y guías internacionales como la AASHTO LRFD.

En la actualidad, el uso de herramientas computacionales especializadas en el diseño de muros de contención como Geo5, CypeCAD, SAP2000 han optimizado los procesos de diseño, permitiendo cálculos precisos y reducción de tiempos en comparación con los métodos tradicionales. Sin embargo, muchas de estos softwares requieren de conocimientos avanzados, licencias costosas que limitan su acceso, o no están desarrollados bajo los lineamientos de la normativa colombiana necesaria (CCP-14) para lograr conseguir diseños óptimos y seguros.

2.5 Marco Legal

2.5.1 *CCP-14 (Código Colombiano de Puentes)*

Proporciona pautas clave para el diseño de muros de contención, incluidos aspectos de carga, interacción suelo-estructura y materiales. Estas especificaciones garantizan soluciones seguras y efectivas para condiciones locales específicas.

2.5.2 *Python Software Foundation License (PSFL)*

Esta licencia permite a los desarrolladores usar, modificar y redistribuir el código sin restricciones importantes, siempre que se acredite a la Fundación Python como titular de los derechos.

Capítulo 3. Diseño Metodológico

3.1 Tipo de Investigación

El tipo de investigación realizada es explicativa, basada en un enfoque cuantitativo. Este estudio se enfoca en el desarrollo de un software para el diseño de muros de contención en voladizo, ajustado al código colombiano de puentes. El propósito de este proyecto es automatizar los cálculos y análisis estructurales, facilitando el diseño en regiones con un acceso limitado a herramientas especializadas en el diseño de muros en voladizo. La investigación utiliza datos numéricos y cálculos automatizados mediante una programación en Python, proporcionando una herramienta eficiente y especialmente útil para proyectos en Norte de Santander, con posibilidad de adaptarse a otras zonas del país.

El tipo de investigación realizada fue explicativa, utilizando un enfoque cuantitativo. Esta investigación tiene como finalidad desarrollar un programa de diseño para muros en voladizo adaptado al código colombiano de puentes. El objetivo es mejorar el diseño y análisis estructural para llevar a cabo el diseño en áreas donde el equipo especializado es limitado. El estudio utiliza datos cuantitativos y cálculos automatizados a través del programa Python, que proporciona una herramienta eficiente y reutilizable, especialmente adecuada para trabajar en Norte Santander, con capacidad de adaptación a otras regiones del país.

3.2 Población y Muestra

3.2.1 Población

La población de este estudio abarcara todo el territorio colombiano, ya que el software desarrollado puede ser aplicado a nivel nacional, permitiendo adaptarlo a las condiciones geotécnicas y sísmicas de cada región del país. Esta gran población incluye ahora a todas las

ciudades de Colombia, que buscan diseños de muros sostenibles que puedan adaptarse específicamente a las diferentes condiciones sísmicas de la ciudad.

3.2.2 Muestra

La muestra se centra en la región de Norte de Santander, ya que este es el área de estudio principal para el desarrollo y prueba inicial del aplicativo. Norte de Santander presenta características geotécnicas y sísmicas particulares que serán clave para la validación del software, donde las aceleraciones pico-efectivas específicas para la región fueron utilizadas para la creación de la cartilla de resultados, por lo que este grupo geográfico representa una muestra representativa dentro del contexto colombiano. Al realizar la investigación y las pruebas en esta muestra, se busca garantizar que el software cumpla los requisitos necesarios para su aplicación en otras regiones del país.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Definición de los Parámetros Técnicos y Normativos Necesarios

4.1.1 Redimensionamiento del Muro de Contención

Antes de realizar cálculos detallados, es fundamental realizar un predimensionamiento inicial del muro de contención, ver Figura 1. Esto permite establecer dimensiones y proporciones que aseguren un diseño eficiente y estable, basado en principios empíricos y recomendaciones prácticas

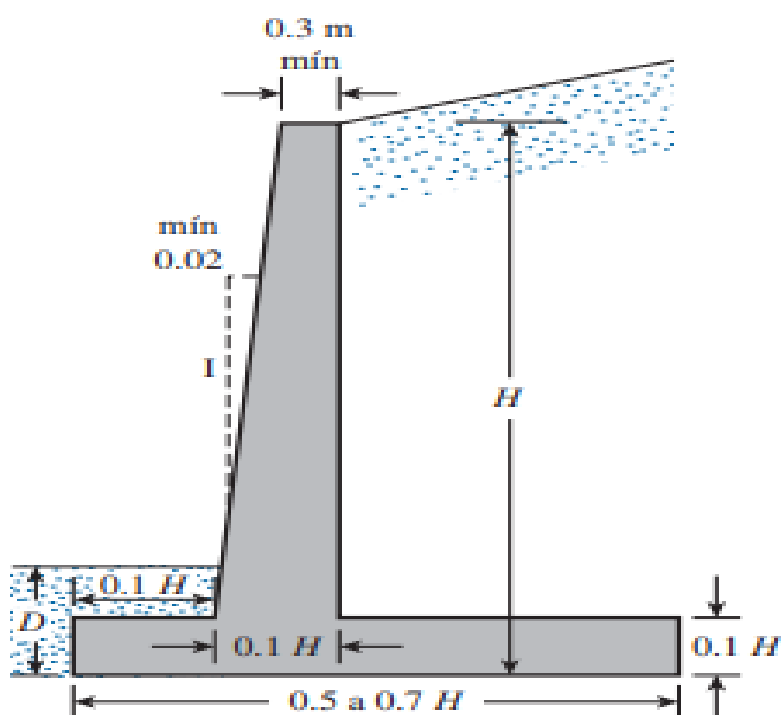
De acuerdo con Braja M. Das (2015), el diseño de muros requiere considerar relaciones básicas en función de la altura total (H). El ancho de la base (B) debe ser aproximadamente entre el 50% y el 70% de H , lo que asegura un equilibrio entre la estabilidad y la resistencia. La corona debe considerarse también entre el 10% y el 20% de H . Además, las dimensiones del talón y la puntera también deben ser considerados entre el 40% y el 60% de B para garantizar el equilibrio del sistema.

Durante esta etapa, se evalúan factores como el peso propio del muro, que actúa como una fuerza estabilizadora frente a las presiones laterales del suelo. Además, se consideran cargas adicionales como el tránsito vehicular, edificaciones cercanas, características del terreno y propiedades del suelo. Estos factores permiten establecer un diseño preliminar durante esta fase, se evalúan diversos factores que influyen en el diseño del muro, como el peso propio, las cargas adicionales y las características del terreno y el suelo. Estos factores se consideran para establecer un diseño preliminar que se refinará posteriormente mediante análisis detallados y herramientas computacionales.

El predimensionamiento entonces, además de optimizar el tiempo de diseño; también es una fase que integra las consideraciones geotécnicas y estructurales fundamentales desde una etapa inicial garantizando de esta manera, disminuir las probabilidades de reajustar costos durante la ejecución.

Figura 1

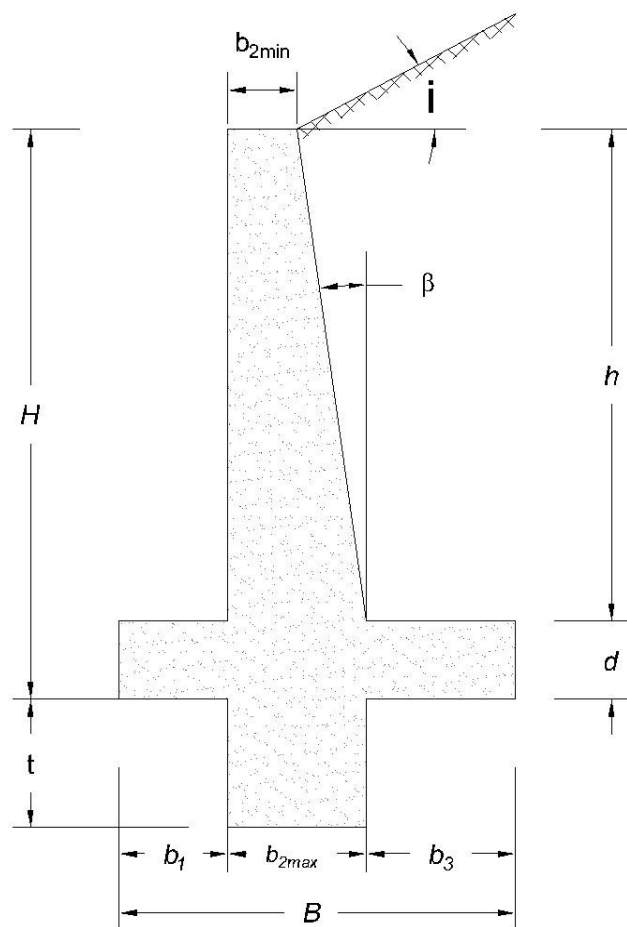
Dimensiones aproximadas para muros de contención



Nota. El gráfico muestra las proporciones para cada dimensión del muro. Fuente: (Das, 2015).

Figura 2

Nomenclatura de las dimensiones de cada elemento usadas en este proyecto.



Fuente: Autor propio

Donde:

H = Altura total del muro.

B = Base del muro.

h = Altura del vástago.

d = Altura de la zapata.

t = Profundidad del dentellón.

b_1 = Pie de la zapata.

b_3 = Talón de la zapata.

$b_{2\text{máx}}$ = Base inferior del vástago.

$b_{2\text{mín}}$ = Corona.

4.1.2 Estados límites

Para cada tipo de cimentación, los factores de resistencia en el estado límite deben determinarse según lo indicado en la normativa. No obstante, si existen datos regionales específicos o antecedentes técnicos que respalden valores más elevados, estos podrán ser considerados como referencia.

4.1.2.1. Estado Límite de Resistencia I. Cálculo de capacidad portante:

$$q_R = \varphi_b * q_n$$

Donde:

q_R = Capacidad portante mayorada del suelo

q_n = Capacidad de carga nominal del suelo

φ_n = Factor de resistencia, Se toma el valor para métodos semi-empíricos en todos los suelos, ver tabla 1.

$$\varphi_b = 0.45$$

Tabla 1

Factores de resistencia para la resistencia geotécnica de cimentaciones superficiales.

Método/Suelo/Condición		Factor de resistencia
Capacidad de carga	Método teórico (Munfakh et al., 2001), en arcilla	0.50
	Método teórico (Munfakh et al., 2001), en arena, usando CPT	0.50
	ϕ_b Método teórico (Munfakh et al., 2001), en arena, usando SPT	0.45
	Métodos Semi-empíricos (Meyerhof, 1957), todos los suelos	0.45
	Zapatas sobre roca	0.45
	Pruebas de carga con placa	0.55
Deslizamiento	ϕ_t Concreto prefabricado colocado sobre arena	0.90
	Concreto fundido in situ sobre arena	0.80
	Concreto fundido in situ o prefabricado sobre arcilla	0.85
	Suelo sobre suelo	0.90
	ϕ_{ep} Presión pasiva del suelo, componente de la resistencia al deslizamiento	0.50

Nota: Datos tomados de (INVIAS, 2014).

4.1.3 Evento Extremo I

De acuerdo con la Norma Colombiana de Diseño de Puentes (INVIAS, 2014), salvo que se especifique lo contrario, los factores de resistencia deben asumirse con un valor de 1.0 en el análisis del estado límite de evento extremo.

En la evaluación de la estabilidad global de los muros de contención bajo la influencia de cargas sísmicas, se recomienda emplear un factor de resistencia $\phi = 0.9$. Para la capacidad de carga, se establece un factor de 0.8 en muros de gravedad y semigravedad, mientras que para muros estabilizados mecánicamente se adopta un valor de 0.9 (INVIAS, 2014).

Muros de gravedad y semigravedad: $\varphi=0.8$

Muros de suelo estabilizado mecánicamente: $\varphi=0.9$.

4.1.4 Servicio

Según la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14 (INVIAS, 2014), los factores de resistencia para el estado límite de servicio deben considerarse con un valor de 1.0, excepto en los casos donde se evalúe la estabilidad global. En esta situación, si la información geotécnica disponible es limitada, el factor de resistencia debe ajustarse a 0.65. Además, este factor, aplicado a la estabilidad global, también se considera determinante en el diseño dentro del estado límite de servicio (INVIAS, 2014).

4.1.5 Cálculo de cargas laterales (EH)

4.1.5.1. Método de Coulomb. El cálculo de las presiones laterales del terreno es un aspecto esencial en el diseño de estructuras portantes, ya que determina las fuerzas que ejerce el terreno sobre el muro. Entre los modelos clásicos para este análisis se encuentra el desarrollado por Charles-Augustin de Coulomb, que se basa en suposiciones que idealizan el comportamiento del suelo, ignorando la fricción suelo-muro y otras condiciones complejas.

4.1.5.2. Presión Activa (Ea). La presión activa ocurre cuando el muro se mueve hacia afuera, permitiendo que el suelo se expanda. Según Rankine, esta presión se calcula de la siguiente manera:

$$E_a = \frac{1}{2} K_a \gamma_{relleno} H'^2$$

donde K_a representa la relación entre la presión activa ejercida por el suelo y la presión vertical, dependiendo de las condiciones geométricas y los parámetros del suelo, como el ángulo de fricción interna (ϕ) y el ángulo de inclinación del talud (i).

4.1.5.3. Talud horizontal ($i=0$). Cuando el terreno es plano, el coeficiente se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$

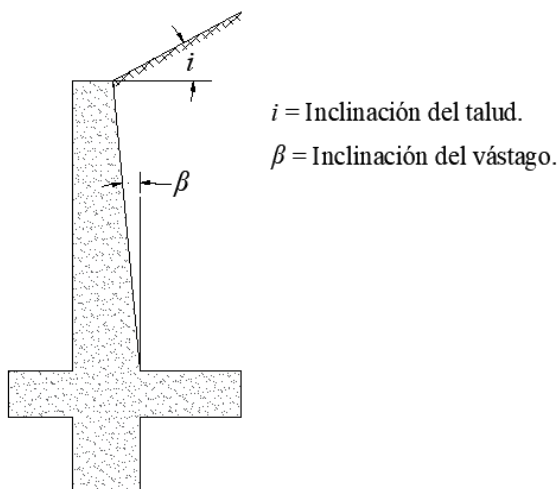
Esta fórmula asume condiciones de equilibrio límite donde el suelo alcanza su estado de falla activa sin considerar inclinaciones adicionales en el talud. Aquí, ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo, H es la altura del muro, y γ_{relleno} la densidad del suelo. El modelo supone un estado de equilibrio límite y considera que no hay cohesión en el suelo para simplificar los cálculos.

4.1.5.4. Talud inclinado ($i>0$). Según Afanador García et al. (2012), para terrenos inclinados, la presión activa (K_a) se ve influenciada por la inclinación del talud (i), la inclinación del vástago (β), el ángulo de fricción interna (ϕ), y el ángulo de fricción entre el suelo y la estructura de contención (δ), ver Figura 3. En este caso, se aplica la siguiente fórmula:

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi - \beta)}{\cos^2(\beta) * \cos(\delta + \beta) * \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi) * \sin(\phi - i)}{\cos(\delta - \beta) * \cos(i - \beta)}}\right)}$$

Figura 3

Ángulo de inclinación del talud $i > 0$. Ángulo del vástago (β).



Fuente: Autor Propio.

4.1.5.5. Empuje sísmico (EQ). Según el código colombiano de puentes, el diseño sísmico de los estribos debe realizarse de acuerdo con los Artículos 5.2 y 6.7 de la “AASHTO’s Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design”, pero con las siguientes excepciones:

El coeficiente sísmico de aceleración horizontal debe ser determinado como se especifica en el Artículo 11.6.5.2.

Las presiones laterales de tierras deben ser estimadas de acuerdo con el Artículo 11.6.5.3.

Para evaluar la seguridad contra falla estructural para diseño sísmico, el diseño estructural de los muros debe cumplir los requisitos de las secciones 5, 6, 7 y 8. La fuerza lateral total aplicada al muro debido al sismo y presión de tierra, P_{seis} , debe determinarse considerando el efecto combinado de P_{AE} y P_{IR} , donde:

$$P_{IR} = k_h(W_w + W_s)$$

Donde:

P_{AE} = Fuerza dinámica lateral debida a la presión de tierras.

P_{IR} = Fuerza horizontal debida a la fuerza sísmica de la masa del muro.

k_h = Coeficiente de aceleración sísmica horizontal.

W_w = Peso del muro.

W_s = Peso del suelo que está inmediatamente detrás del muro incluyendo el talón del muro.

Para investigar la estabilidad del muro considerando el efecto combinado P_{AE} y P_{IR} y considerando que estos no son concurrentes, de acuerdo con el artículo 11.6.5.1 los siguientes dos casos deben ser analizados:

Combinar el 100% de la presión sísmica de tierras P_{AE} con el 50% de la fuerza inercial del muro P_{IR}

Combinar el 50% de P_{AE} pero no menos que la fuerza de presión activa estática, con el 100% de la fuerza inercial P_{IR}

Para el diseño del muro debe utilizarse el resultado más conservador de estos dos análisis. Alternativamente, si es aprobado por el propietario, pueden utilizarse métodos numéricos más sofisticados para investigar la no concurrencia. Para suelos competentes que no pierden resistencia bajo la acción sísmica, en el diseño sísmico deben utilizarse los parámetros estáticos de resistencia.

4.1.5.6. Método de Mononobe-Okabe. El método Mononobe-Okabe amplía la teoría tradicional de la presión lateral de la tierra para incluir los efectos de las fuerzas dinámicas, como las causadas por los terremotos. Este método se basa en el concepto de un plano de falla que

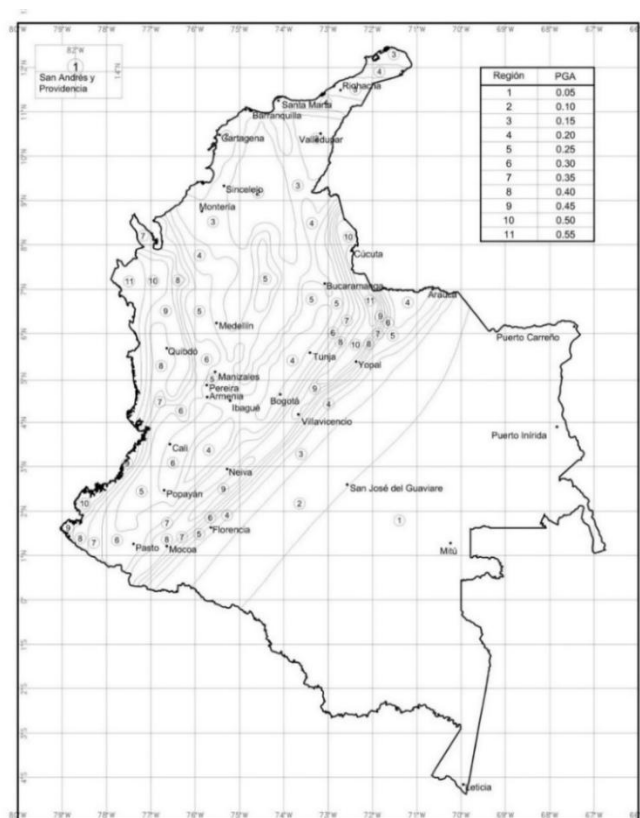
forma un ángulo definido por la horizontal y tiene en cuenta el equilibrio de las fuerzas horizontales y verticales generadas por el terreno y la velocidad sísmica.

El diseño de muros de contención en zonas sísmicas tiene en cuenta el efecto de las fuerzas dinámicas generadas por los movimientos del terreno. Este análisis utiliza los coeficientes sísmicos especificados para estimar las fuerzas adicionales de compresión que actúan sobre los muros, según lo definido en Braja Das (2015) y las recomendaciones del Código de Puentes de Colombia CCP-14 (INVIAS, 2014).

4.1.5.7. Definición del coeficiente de aceleración pico efectiva en roca (PGA). Según el código colombiano de puentes, el coeficiente de aceleración pico efectiva en roca (PGA) varía según la ubicación geográfica y está definido en la normativa sísmica vigente, ver Figura 4. En la siguiente tabla se presentan los valores de PGA para los distintos municipios de Colombia.

Figura 4

Valores de aceleración pico horizontal del terreno (PGA).



Nota. Valores del PGA dependiendo de la región en estudio. Fuente: (Sección 3, Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14) (INVIAS, 2014).

4.1.5.8. Definición del factor de amplificación del suelo (F_{pga}). El factor de amplificación del suelo (F_{pga}) se determina a partir de la clasificación del tipo de suelo. El valor de F_{pga} se obtiene mediante interpolación de acuerdo con la normativa sísmica.

Tabla 2*Valores del factor de sitio (F_{pga})*

<i>Tipo de Perfil</i>	<i>Intensidad de los movimientos sísmicos (Véase la Nota 1)</i>				
	$PGA \leq 0.1$	$PGA = 0.2$	$PGA = 0.3$	$PGA = 0.4$	$PGA \geq 0.5$
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	0.9
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

Nota. 1. Se debe usar una interpolación lineal para valores intermedios de PGA. 2. 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. Fuente: (INVIAS, 2014).

4.1.5.9. Cálculo del Coeficiente de Empuje Horizontal Sísmico (K_h). El coeficiente de empuje horizontal sísmico para el cálculo de las fuerzas sísmicas laterales según el código colombiano de puentes (INVIAS, 2014), es el coeficiente sísmico de aceleración lateral sin reducción, que representa la aceleración horizontal total aplicada directamente en el muro de contención, antes de aplicar factores de reducción por la interacción suelo-estructura. se define como:

$$K_{h0} = PGA * F_{pga}$$

Según el código colombiano de puentes si el muro es capaz de desplazarse entre 25 mm y 50 mm o más durante el evento sísmico de diseño, el coeficiente sísmico horizontal (K_h) puede reducirse aún más hasta $0.5K_{h0}$, sin necesidad de realizar un análisis de deformaciones. Esta reducción se fundamenta en el método propuesto por Newmark (1965) y sus versiones

simplificadas, las cuales también pueden aplicarse al estudio de la estabilidad global del muro y el talud. El coeficiente sísmico horizontal K_h , se define como:

$$K_h = 0.5 \cdot K_{h0}$$

4.1.5.10. Cálculo del Coeficiente de Empuje Activo Dinámico (KAE). El coeficiente de empuje dinámico incluye efectos sísmicos y geométricos:

Ángulo sísmico (θ):

$$\theta = \text{Arctan}\left(\frac{K_h}{1 - K_v}\right)$$

Según el Código Colombiano de Puentes (INVIAS, 2014), el coeficiente sísmico de aceleración vertical (K_v) debe asumirse como cero en el cálculo de las presiones laterales del suelo, salvo en casos donde el muro pueda estar significativamente afectado por efectos de fuentes sísmicas cercanas o si se espera que aceleraciones verticales elevadas actúen simultáneamente con la aceleración horizontal (CCP-14, Artículo 3.10).

Factor de ajuste dinámico (ψ):

$$\psi = \left(1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\delta + \emptyset) \cdot \text{sen}(\emptyset - \theta - i)}{\cos(\delta + \beta + \theta) \cdot \cos(i - \beta)}} \right)^2$$

Coeficiente de empuje (K_{AE}):

$$K_{AE} = \frac{\text{Cos}^2(\emptyset - \theta - \beta)}{\psi \cdot \text{Cos}(\theta) \cdot \text{Cos}^2(\beta) \cdot \text{Cos}(\delta + \beta + \theta)}$$

Empuje activo dinámico total (E_{AE}):

El empuje activo dinámico total se expresa como:

$$E_{AE} = \frac{1}{2} \cdot K_{AE} \cdot \gamma_{relleno} \cdot H'^2 \cdot (1 - K_V)$$

Donde:

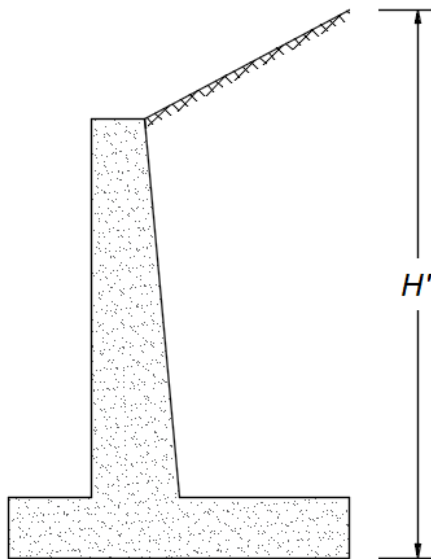
$\gamma_{relleno}$ = Peso unitario del suelo de relleno.

K_{AE} = Coeficiente de empuje activo dinámico.

H' = Altura del muro total que debe tomarse como la distancia desde el fondo del talón de la estructura de contención hasta la superficie del terreno directamente sobre el talón, ver Figura 5 (INVIAS, 2014).

Figura 5

Definición de la altura total H' del muro de contención



Fuente: Autor Propio.

4.1.6 Sobrecarga por Carga Viva (LS)

Según lo definido en el código colombiano de puentes “La sobrecarga por carga viva debe aplicarse donde se espere carga vehicular sobre la superficie del relleno detrás del muro a una distancia igual a la mitad de la altura del muro desde el respaldo del muro. Sí la sobrecarga es causada por la existencia de una carretera, la intensidad de la carga debe ser consistente con las disposiciones del Artículo 3.6.1.2. Si la sobrecarga es por causa diferente de una carretera, el propietario debe especificar y/o aprobar las sobrecargas apropiadas.” (INVIAS, 2014)

El incremento en la presión horizontal debido a la sobrecarga por carga viva se puede estimar como:

$$\Delta_p = k_a \cdot \gamma_{rell} \cdot h_{eq}$$

Donde:

Δ_p = Presión constante horizontal de suelo debida a la sobrecarga por carga viva.

γ_{rell} = Peso unitario del suelo de relleno.

k_a = Coeficiente de presión lateral de suelo.

h_{eq} = Altura equivalente de suelo para carga vehicular.

Las alturas equivalentes de suelo, para cargas de carretera sobre estribos y muros de contención se pueden tomar de la siguiente tabla. Debe usarse interpolación lineal para alturas de muro intermedias.

Tabla 3*Distancia h_{eq} dependiendo de la altura del muro de contención*

Altura del Muro de Contención (mm)	h_{eq} (m)	
	Distancia desde el respaldo del muro al borde del tráfico –	
	0.0 mm	300 mm o más
1500	1500	600
3000	1000	600
≥ 6000	600	600

Fuente: (Sección 13, Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14) (INVIAS, 2014).

La altura del muro (H) debe tomarse como la distancia entre la superficie del relleno y el fondo de la cimentación a lo largo de la superficie de presiones bajo consideración, ver Figura 2.

4.1.7 Fuerza de Colisión Sobre la Barrera (CT)

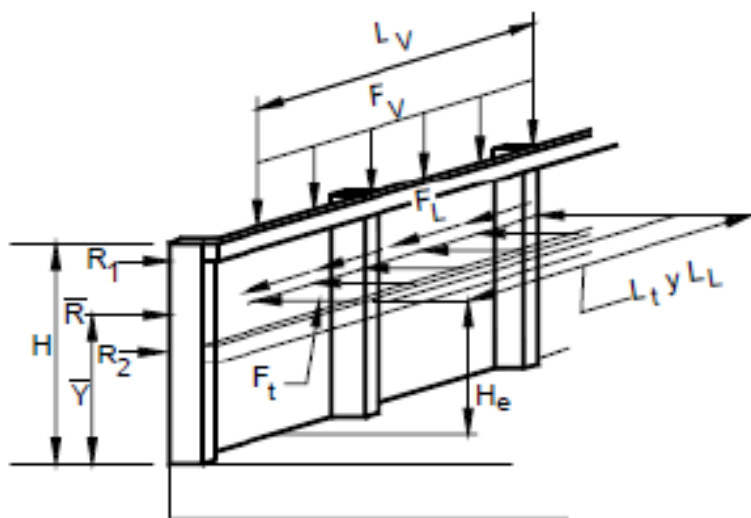
Cuando un muro de contención cuenta con una barrera expuesta a impactos de vehículos, es necesario considerar la fuerza de colisión (CT) que esta puede recibir, ver Figura 6. Esta fuerza se determina a través de la siguiente tabla, de la cual consideraremos un nivel ensayo para barandas de TL-4 (Nivel de ensayo cuatro): Este nivel de ensayo es aceptable para la mayoría de las aplicaciones en carreteras de alta velocidad, autovías, autopistas y carreteras interestatales, en las cuales el tráfico incluye camiones y vehículos pesados.

Los niveles de ensayo más elevados se aplican para evaluar y seleccionar barandas de puentes (en este caso, para muros) a utilizar en carreteras de nivel de servicio elevados o en ubicaciones que exigen un comportamiento especial. En este sentido, la elección de barandas TL-4 es la más adecuada ya que satisfacen la mayoría de los requisitos de diseño para carreteras de la red vial nacional.

Tabla 4*Fuerzas de diseño para barandas vehiculares*

Fuerzas de diseño y simbología	Niveles de Ensayo para las Barandas					
	TL-1	TL-2	TL-3	TL-4	TL-5	TL-6
Transversal F_t (N)	60.000	120.000	240.000	240.000	550.000	780.000
Longitudinal F_L (N)	20.000	40.000	80.000	80.000	183.000	260.000
Vertical descendente F_v (N)	20.000	20.000	20.000	80.000	355.000	355.000
L_t y L_L (mm)	1220	1220	1220	1070	2440	2440
L_v (mm)	5500	5500	5500	5500	12.200	12.200
H_e (min.) (mm)	460	510	610	810	1070	1420
Mínima altura del riel H (mm)	685	685	685	810	1070	2290

Fuente: Tabla tomada de (Sección 13, Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14) (INVIAS, 2014).

Figura 6*Esquema de distribución de fuerzas verticales, horizontales y torsionales en Barrera de tráfico.*

Nota. Sección 13 del CCP14 norma colombiana de diseño de puentes. Fuente: (INVIAS, 2014).

Dónde:

F_t = Fuerza transversal que se supone actuando en la parte superior de un muro de concreto.

F_L = Fuerza de fricción longitudinal a lo largo de la baranda.

F_v = Fuerza vertical que representa un vehículo apoyado sobre una baranda.

L_t = Longitud de distribución longitudinal de la fuerza de impacto F_t a lo largo de la baranda ubicada a una altura H_e por encima del tablero (mm).

L_L = Longitud de distribución longitudinal de la fuerza de fricción F_L .

L_v = Distribución longitudinal de la fuerza vertical F_v en la parte superior de la baranda (mm).

H_e = Altura efectiva de la fuerza de vuelco de un vehículo.

H = Altura del muro en mm.

4.1.7.1. Análisis de estabilidad. El objetivo de un análisis de estabilidad de un muro de contención es garantizar un movimiento seguro en diversas condiciones de carga, incluidas las fuerzas estáticas y dinámicas. Para ello, se probaron factores como el vuelco, el deslizamiento, y los esfuerzos transmitidos al terreno de fundación.

4.1.8 Factores de Carga y Estados límites

El diseño de muros de contención debe considerar los factores de carga y los estados límite de resistencia y servicio, de acuerdo con las disposiciones establecidas en la normativa

aplicable. Los estados límite incluyen tanto la estabilidad local de la estructura como el desempeño estructural y funcional del muro ante las cargas de diseño.

Para la combinación de cargas, se utilizarán coeficientes que reflejan la incertidumbre en la acción de las fuerzas actuantes y en la capacidad de los materiales. En particular, los factores de carga se aplican a efectos de gravedad, cargas laterales de suelo y fuerzas sísmicas, entre otras.

Figura 7

Combinaciones y factores de carga.

Estado Límite 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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

• Cargas permanentes

CR = fuerzas debidas al flujo plástico
 DD = fuerza de fricción negativa
 DC = peso propio de los componentes estructurales y de los accesorios no estructurales
 DW = peso propio carpeta de rodamiento y de las instalaciones
 EH = empuje horizontal del suelo
 EL = fuerzas misceláneas resultantes del proceso de construcción, incluyendo el izaje de voladizos en construcción por segmentos
 ES = sobrecarga de suelo
 EV = presión vertical del peso propio del suelo de relleno
 PS = fuerzas secundarias debidas a pretensado
 SH = fuerzas debidas a retracción

• Cargas transitorias

BL = carga de explosión
 BR = fuerza de frenado vehicular
 CE = fuerza centrífuga vehicular
 CT = fuerza de colisión vehicular
 CV = fuerza de colisión de embarcaciones
 EQ = carga sísmica
 FR = carga de fricción
 IC = carga de hielo
 IM = incremento de carga dinámica vehicular
 LL = carga viva vehicular
 LS = sobrecarga de carga viva
 PL = carga viva peatonal
 SE = fuerzas debidas a asentamiento
 TG = fuerzas debidas a gradiente de temperatura
 TU = fuerza debida a temperatura uniforme
 WA = carga de agua y presión de la corriente
 WL = carga de viento sobre la carga viva
 WS = carga de viento sobre la estructura

Fuente: Datos tomados de (Sección 3, Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14)

(INVIAS, 2014).

Los principales estados límites que se tuvieron en cuenta para las combinaciones de carga en el diseño de muros de contención son los siguientes:

4.1.8.1. Resistencia Última. Evalúa la capacidad del muro para soportar las cargas máximas sin fallar estructuralmente. Se analizan dos condiciones:

4.1.8.2. Evento extremo I. Representa condiciones sísmicas que pueden afectar la estabilidad del muro.

4.1.8.3. Evento extremo II. Incluye las condiciones por falla por colisión de barrera.

4.1.8.4. Servicio I. Permite el control en la aparición de fisuras y el comportamiento en situaciones normales de operación, garantizando que los esfuerzos en la estructura se mantengan dentro de los límites establecidos por la norma.

Los factores de carga empleados para cada estado límite se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5

Combinaciones y factores de carga para evaluación de estados límite

Estado límite	γ_{DC}	γ_{EV}	γ_{LS}	γ_{EH}	γ_{EQ}	γ_{CT}	Aplicación
Resistencia i. Caso mínimo	0.9	1	1.75	0.9	N/a	N/a	Desplazamiento y volcamiento
Resistencia i. Caso máximo	1.25	1.35	1.75	1.5	N/a	N/a	Capacidad portante y diseño del muro
Evento extremo i. Caso mínimo	0.9	1	$\gamma_{eq}=0.5$	0.9	1	N/a	Desplazamiento y volcamiento
Evento extremo i. Caso máximo	1.25	1.35	$\gamma_{eq}=0.5$	1.5	1	N/a	Capacidad portante
Evento extremo ii. Caso mínimo	0.9	1	$\gamma_{eq}=0.5$	0.9	N/a	1	Desplazamiento y volcamiento
Evento extremo ii. Caso máximo	1.25	1.35	$\gamma_{eq}=0.5$	1.5	N/a	1	Capacidad portante
Servicio i	1	1	1	1	1	N/a	Control de fisuras

Fuente: Datos tomados de (Sección 3, Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14) (INVIAS, 2014).

Donde:

Y_{DC} = Factor de carga para el peso propio de los componentes estructurales.

Y_{EV} = Factor de carga para la presión vertical del peso propio del suelo de relleno.

Y_{LS} = Factor de carga para la sobrecarga viva.

Y_{EH} = Factor de carga para el empuje horizontal del suelo.

Y_{EQ} = Factor de carga para carga sísmica.

Y_{CT} = Factor de carga para fuerza de colisión vehicular.

Estos factores permiten evaluar el diseño del muro en distintas condiciones, asegurando que se cumplan los criterios de estabilidad, seguridad y desempeño estructural.

4.1.9 Verificación de la Seguridad al Deslizamiento del Muro

Según lo establecido en la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14 (INVIAS, 2014), el análisis de la falla por deslizamiento debe llevarse a cabo para zapatas que soporten cargas horizontales.

Para evaluar la seguridad frente a esta falla, se debe considerar la resistencia mayorada contra el deslizamiento, la cual se determina con la siguiente expresión:

$$R_R = \phi \cdot R_n = \phi_\tau \cdot R_\tau + \phi_{ep} \cdot R_{ep}$$

Donde:

$R_R = \phi \cdot R_n$ = Resistencia nominal contra el deslizamiento.

ϕ_τ = Resistencia al cortante entre el suelo y la cimentación, definido en la Tabla 10.5.5.2.2-1.

R_τ = Resistencia nominal de deslizamiento en la interfaz suelo-cimentación.

ϕ_{ep} = Factor de resistencia pasiva, especificado en la Tabla 10.5.5.2.2-1.

R_{ep} = Resistencia nominal pasiva del suelo a lo largo de la vida útil de la estructura.

Si la zapata está cimentada sobre un suelo no cohesivo, la resistencia nominal al desplazamiento se obtiene mediante la ecuación:

$$R_\tau = V \cdot \tan \delta$$

4.1.10 Verificación de la Estabilidad del Muro de Contención

De acuerdo con la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14 (INVIAS, 2014), en cimentaciones sobre suelo, la ubicación de la resultante de las fuerzas de reacción (d) debe mantenerse dentro de una zona central equivalente a dos terceras partes del ancho de la base para asegurar la estabilidad al vuelco. Donde la ubicación de la resultante de las fuerzas de reacción se definirá como:

$$d = \frac{M_V - M_H}{V}$$

Donde:

d = Ubicación de la resultante de las fuerzas de reacción.

M_V = Momento debido a las cargas verticales.

M_H = Momento debido a las cargas horizontales.

V = Fuerza vertical generada por las cargas verticales.

4.1.11 Esfuerzo Actuante Sobre el Suelo

Para evaluar la capacidad portante en el estado límite de resistencia, se deben considerar cargas y resistencias factorizadas bajo ciertas distribuciones de presión del suelo. En particular, cuando la cimentación del muro se apoya sobre suelo, el esfuerzo vertical se determina asumiendo que la presión se distribuye de manera uniforme sobre la base efectiva de apoyo.

El cálculo del esfuerzo vertical se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_v = \frac{\Sigma V}{B - 2e} \quad \text{dónde } e = \frac{b}{2} - d$$

Donde:

ΣV = Sumatoria de las fuerzas verticales aplicadas sobre la cimentación.

B = Base del muro.

e = Excentricidad de la carga vertical.

4.1.12 Diseño a Flexión de la Zapata

4.1.12.1. Diseño a Flexión del Talón (b3). Para el diseño a flexión del talón b3, ver Figura 7, el momento máximo que se presenta en la unión zapata-vástago se calcula incluyendo el peso propio de la zapata (DC) más el peso del material de relleno (EV).

4.1.12.2. Cálculo de la cuantía de acero. Para el diseño a flexión y sabiendo que $\phi = 0,90$ la cuantía de acero se calcula de la siguiente manera, habiendo calculado antes la constante K :

$$\rho = 0,0425 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{47K}{37800}} \right)$$

dónde

$$K = \frac{M_{a-a}}{b \cdot d^2}$$

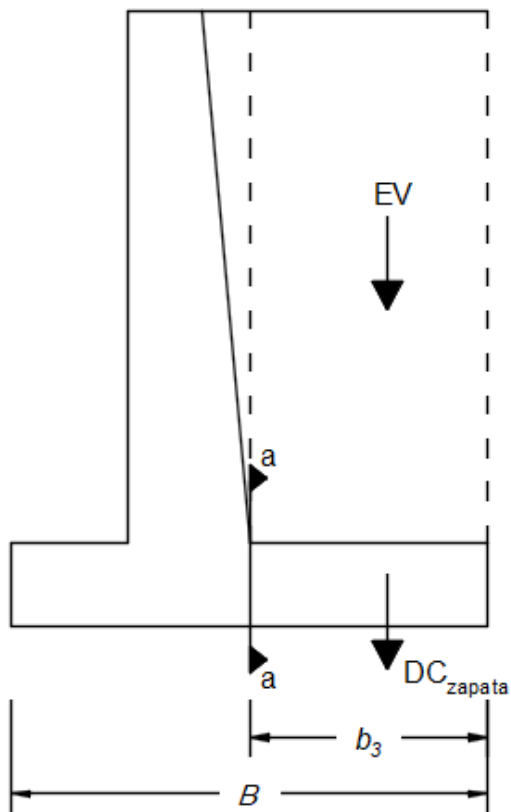
M_{a-a} = Momento evaluado en la sección a-a, ver Figura 7.

b = profundidad de la zapata.

d = Distancia asumida entre el centroide del acero de refuerzo y la fibra superior.

Figura 8

Sección de cálculo para el momento a-a del talón



Fuente: Autor Propio.

4.1.12.3. Área de Acero Requerido. Teniendo el valor de la cuantía ρ y las dimensiones de la sección b y d , se tiene:

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d$$

4.1.12.4. Refuerzo Mínimo de la Zapata. De acuerdo a la norma colombiana de diseño de puentes (CCP-14), sección 5. Núm. 5.7.3.3.2; la cantidad de refuerzo debe ser el adecuado para desarrollar una resistencia mayorada a flexión (M_{cr}) igual al menor de lo estipulado a continuación:

1,33 veces el momento requerido por la combinación de carga aplicable.

El valor de M_{cr} calculado por la siguiente ecuación:

$$M_{cr} = \gamma_3 [\gamma_1^2 f_R S_c] \quad (5.7.3.3.2-1)$$

Dónde:

S_c = Módulo de sección para la fibra extrema de la sección compuesta donde el esfuerzo de tracción es causado por las cargas externas. Se calcula cómo: $\frac{bh^2}{6}$

γ_1 = Factor de variación de fisuración por flexión igual a 1,6.

γ_3 = Factor para acero A706 grado 60, igual a 0,75.

f_R = Módulo de rotura del concreto, de acuerdo a la sección 5.4.2.6 se calcula:

$$f_R = 0,62 \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)}$$

4.1.12.5. Verificación del cortante en el plano a-a. Se debe calcular la máxima fuerza cortante en la sección a-a, ver Figura 7. Tomando los valores de mayoración del estado límite de resistencia I, en su caso máximo, ver Tabla 6.

$$V_{a-a} = 1,35EV + 1,25DC$$

Esta fuerza cortante debe compararse con la fuerza cortante resistida por el concreto dónde debe cumplirse la condición de $V_c > V_{a-a}$.

$$V_c = 0,083\beta\sqrt{f'_c}b_vd_v ; (5.8.3.3-3)$$

Donde:

V_c = Esfuerzo cortante resistido por el concreto.

β = Factor que indica la capacidad del concreto agrietado diagonalmente de transmitir tracción y cortante.

f'_c = Resistencia a compresión del concreto.

b_v = Ancho efectivo.

d_v = Profundidad efectiva de cortante.

4.1.12.6. Diseño a flexión del pie. Para el diseño del pie b1, se calcula el momento en la zarpa delantera en la sección b-b y se considera la acción del esfuerzo máximo sobre el suelo (evento extremo, caso máximo), ver Figura 9.

$$M_{b-b} = \sigma_{m\acute{a}x} \cdot b_1 \cdot \bar{y}b_1$$

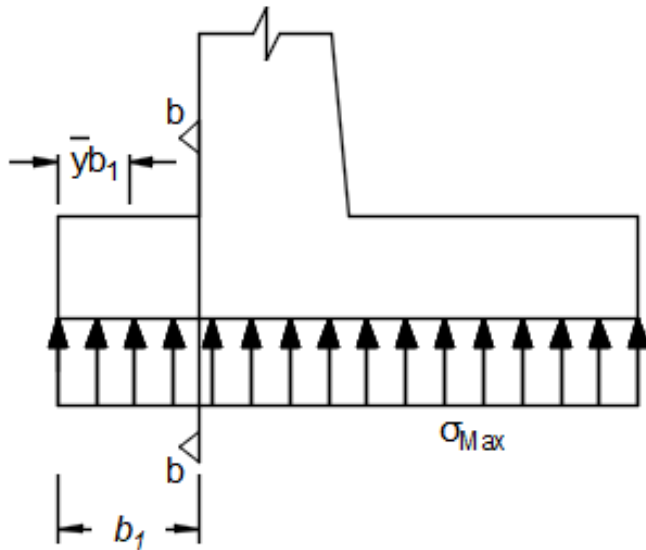
$\sigma_{m\acute{a}x}$ = Esfuerzo máximo sobre el suelo.

b_1 = Dimensión del pie

$\bar{y}b_1$ = Centroide del pie con respecto a la sección b-b.

Figura 9

Sección de cálculo para el momento b-b del talón



Fuente: Autor Propio.

Posteriormente se calcula la armadura mínima, la cuantía, al área de acero requerida con las ecuaciones usadas anteriormente para el diseño del talón.

4.1.12.7. Armadura por retracción de fraguado y temperatura de la zapata. De acuerdo a la sección 5.10.8 del CCP-14, el refuerzo por temperatura debe garantizarse en las superficies propensas a variaciones diarias de temperatura. El rea de refuerzo requerida se calcula:

$$A_s = \frac{750bh}{2(b+h)f_y} ; \left(\frac{mm^2}{m} \right)$$

Dónde b y h son dimensiones del pie de la zapata y f_y la resistencia del acero en MPa.

En esta misma sección del código colombiano de puentes se establecen unos criterios de separación máxima las cuales no deben exceder:

3 veces el espesor del elemento estructural (en este caso, la zapata del muro).

0,30m para muros o zapatas con alturas superiores a 0.45m.

4.1.13 Diseño del Vástago

4.1.13.1. Armadura del vástago. Este refuerzo a flexión va ubicado principalmente en la fibra a tracción de la sección, es decir, la cara en dónde se está conteniendo el relleno. Sobre el vástago actúan el empuje activo del relleno y la sobrecarga por carga viva, en una altura “ h ”, ver Figura 10.

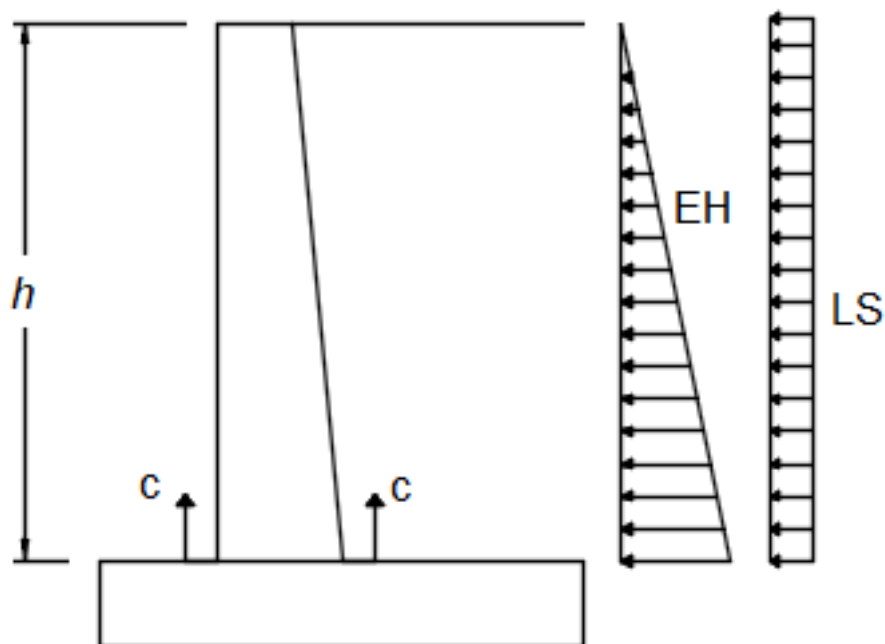
$$EH_{c-c} = \frac{\gamma K_a h^2}{2} \text{ (Empuje activo)}$$

$$LS = \Delta_p h$$

Dónde Δ_p es la fuerza horizontal sobre el muro, debida a la sobrecarga por carga viva.

Figura 10

Sección de cálculo para el momento c-c del talón



Fuente: Autor Propio.

La armadura en la cara interna del vástago se determina para los estados límite de resistencia I o de evento extremo II, el mayor.

Tabla 6

Factores de carga para el momento máximo del corte c-c

Estado limite	γ_{DC}	γ_{EV}	γ_{LS}	γ_{EH}	γ_{EQ}	γ_{CT}
Resistencia i. Caso máximo	1.25	1.35	1.75	1.5	N/a	N/a
Evento extremo i. Caso máximo	1.25	1.35	$\gamma_{eq}=0.5$	1.5	1	N/a
Evento extremo ii. Caso máximo	1.25	1.35	$\gamma_{eq}=0.5$	1.5	N/a	1

Fuente: Autor Propio.

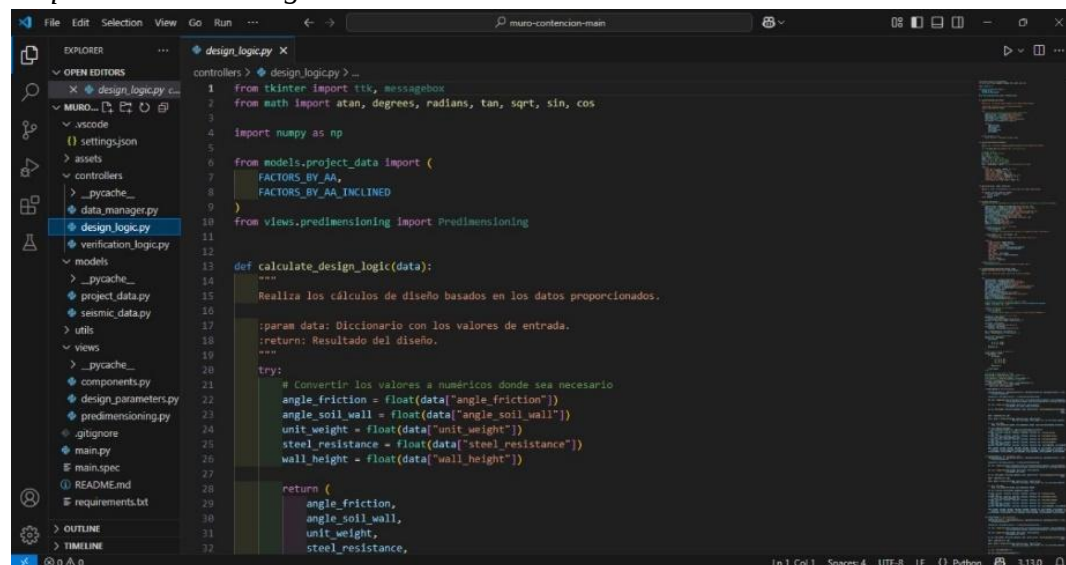
El mayor momento rige y se emplea para los cálculos de cuantía de acero, área de acero requerida, armadura mínima, armadura por retracción y temperatura y verificación por cortante empleando las mismas fórmulas usadas en los anteriores procedimientos.

4.2 Construir Aplicativo para el Diseño de Muros de Contención en Voladizo

El aplicativo de escritorio para el diseño de muros de contención en voladizo contempla tres escenarios distintos de carga: El primer tipo de diseño está orientado a muros que deben contener un talud inclinado, situación frecuente en cortes de terreno o laderas naturales, donde las presiones laterales del suelo varían en función del ángulo de inclinación. El segundo tipo de diseño corresponde a muros que soportan un talud horizontal, es decir, aquellos construidos contra terrenos nivelados, donde la presión del suelo es más uniforme y predecible. Finalmente, el tercer tipo de diseño está destinado a muros que deben resistir, además del empuje del suelo, una sobrecarga adicional proveniente del tránsito vehicular sobre una vía cercana o adyacente al muro, lo cual implica considerar esfuerzos adicionales en la estructura. Este aplicativo fue programado usando el lenguaje de programación Python y fue ejecutado en el editor de código fuente “Visual Studio Code”, ver Figura 11. La arquitectura del código está estructurada en 6 carpetas dónde cada una tiene unas funciones asignadas diferentes; esto, con el objetivo de crear un espacio de trabajo organizado, claro y eficiente.

Figura 11

Arquitectura del código desarrollado en Visual Studio Code



Fuente: Autor Propio.

La extensión de Python empleada en nuestra programación fue “Tkinter”, ver Figura 12. Esta herramienta nos permitió crear interfaces gráficas interactivas con el usuario, en dónde este, para iniciar con el diseño de un muro de contención en la aplicación debe ingresar en cada casilla los parámetros de diseño necesarios tales como datos geotécnicos, resistencias de materiales, altura requerida a contener y la ubicación dónde se desea diseñar el muro de contención. Este último dato es importante para que el programa pueda definir en función de una base de datos previamente suministrada al código, el nivel de amenaza sísmica del municipio o ciudad en cuestión. De esta manera y con los parámetros indicados, el programa procederá a realizar los análisis estáticos y dinámicos pertinentes para arrojar propuestas de dimensionamiento.

Figura 12

Interfaz de la aplicación desarrollada con la extensión Tkinter

PARÁMETROS DE DISEÑO

Angulo de fricción interna del relleno (ϕ) °

Ángulo de fricción suelo-muro (δ) °

Peso unitario del relleno (γ_{rell}) T/m³

Capacidad portante del suelo (qN) KN/m²

Resistencia del concreto ($f'c$) MPa

Resistencia del acero (f_y) MPa

Altura de muro (H) m

Ángulo de inclinación del relleno (β) °

Ubicación del proyecto

Coefficiente de aceleración pico efectiva en roca PGA

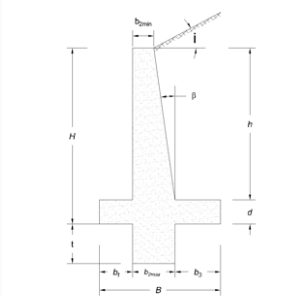
Tipo de suelo

Fuente: Autor Propio.

La aplicación cuenta con una segunda interfaz, ver Figura 13, en dónde se mostrará gráficamente el dimensionamiento propuesto para el muro, junto al cumplimiento de las verificaciones locales tales como deslizamiento, volcamiento y esfuerzos en el terreno. En este sentido, el usuario podrá analizar y definir a su criterio la utilización de las dimensiones propuestas por el programa, o en caso contrario, ingresar manualmente otras dimensiones las cuales deben asemejarse a las ya arrojadas por el programa, y este a su vez, volverá a hacer el cálculo del cumplimiento o no de las nuevas dimensiones ingresadas. Habiendo asegurado ya el total cumplimiento de las verificaciones de estabilidad, el programa habilitará el botón “Calcular diseño” en dónde se asegura que las dimensiones cumplen con la normativa y se está trabajando un diseño seguro.

Figura 13

Interfaz de dimensionamiento y verificaciones de estabilidad.



DESPLAZAMIENTO				
ESTADO LÍMITE	CASO	FX (KN)	RR (KN)	CUMPLE
RESISTENCIA 1	MÁXIMO	33.57	41.28	SI
	MÍNIMO	20.14	30.65	SI
EVENTO EXTREMO I	MÁXIMO	38.69	41.28	SI
	MÍNIMO	25.26	30.65	SI
EVENTO EXTREMO II	MÁXIMO	33.57	41.28	SI
	MÍNIMO	20.14	30.65	SI
SERVICIO 1		22.38	32.08	SI

VOLCAMIENTO				
ESTADO LÍMITE	CASO	e (m)	e _{max} (m)	CUMPLE
RESISTENCIA 1	MÁXIMO	0.28	0.47	SI
	MÍNIMO	0.21	0.47	SI
EVENTO EXTREMO I	MÁXIMO	0.36	0.47	SI
	MÍNIMO	0.31	0.47	SI
EVENTO EXTREMO II	MÁXIMO	0.28	0.47	SI
	MÍNIMO	0.21	0.47	SI
SERVICIO 1		0.24	0.47	SI

PRESIÓN				
ESTADO LÍMITE	CASO	α _v (KN/m²)	σ _{max} (KN/m²)	CUMPLE
RESISTENCIA 1	MÁXIMO	75.38	112.5	SI
	MÍNIMO	47.26	112.5	SI
EVENTO EXTREMO I	MÁXIMO	93.12	200.0	SI
	MÍNIMO	59.37	200.0	SI
EVENTO EXTREMO II	MÁXIMO	75.38	200.0	SI
	MÍNIMO	47.26	200.0	SI
SERVICIO 1		52.83	162.5	SI

Base del muro (B) m

Pie (b1) m

Talón (b3) m

Base corona (b2min) m

Base máxima (b2max) m

Altura de zapata (d) m

Llave (t) m

Pantalla (h) m

Inclinación de vástago (β) °

[Ingresar Manualmente](#)

[Calcular Vista](#)

[Exportar PDF](#)

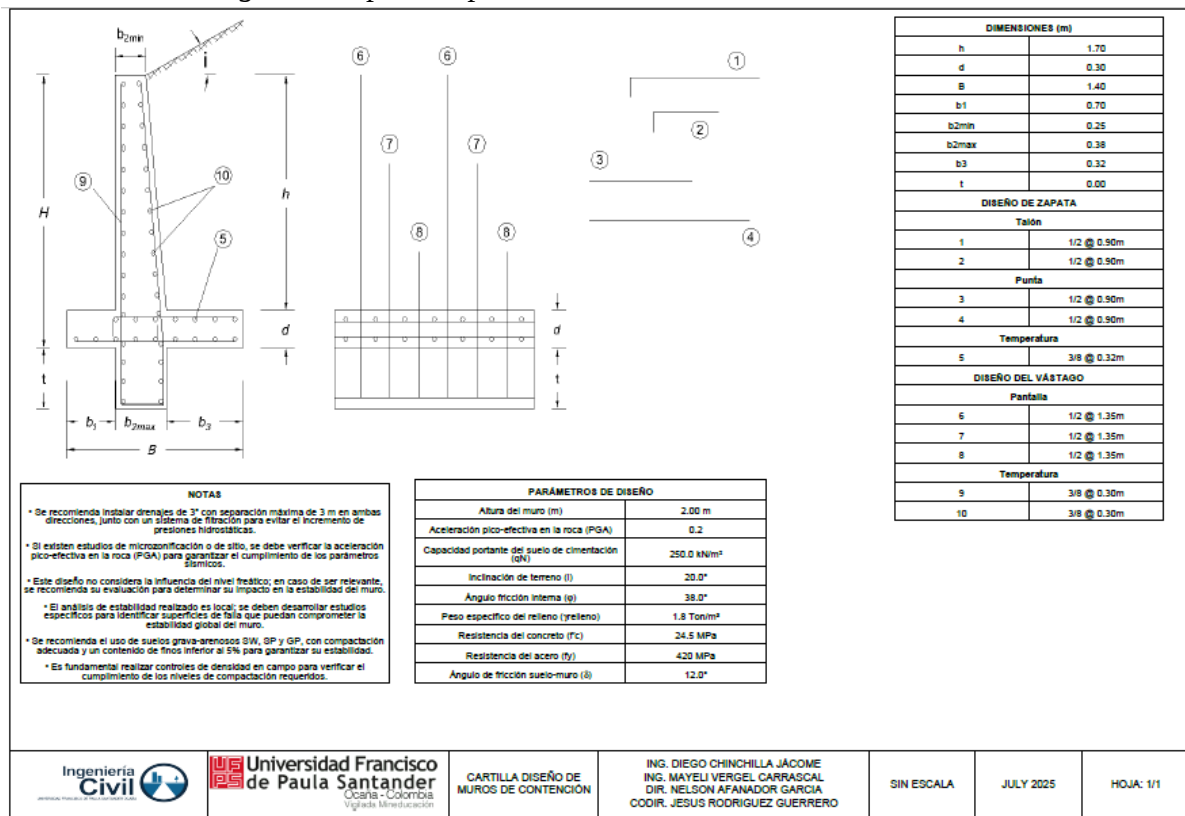
[Cerrar](#)

Fuente: Autor Propio.

La última interfaz de la aplicación es la del diseño estructural, ver Figura 13; en esta, el programa calcula (en base a las dimensiones anteriormente verificadas) las cuantías mínimas y áreas de refuerzo de diseño para soportar los esfuerzos demandados de pesos propios y fuerzas externas. La aplicación permite descargar un PDF con el resumen del diseño dónde el usuario podrá obtener los parámetros de diseño ingresados, las dimensiones y el refuerzo propuesto con sus separaciones y despieces.

Figura 14

Documento PDF generado por la aplicación



Fuente: Autor Propio.

4.3 Evaluación de Desempeño del Aplicativo

Se realizó una evaluación de los resultados arrojados del proyecto mediante una comparativa entre los tres tipos de diseños propuestos. Para garantizar la consistencia del análisis se mantuvieron los mismos parámetros de entrada con la única variación en el tipo de diseño seleccionado, ver Figura 24. La veracidad de los resultados de los diseños analizados a continuación puede verificarse en las memorias de cálculo.

En el primero diseño se analizó un muro de contención con talud horizontal, que solo soportara las cargas por el empuje de tierras, ver Figura 15. Como resultado el aplicativo generó un predimensionamiento automático del muro, ver Figura 16, y el refuerzo estructural requerido

para garantizar la estabilidad frente a las solicitaciones evaluadas, ver Figura 17. El aplicativo también arrojó que el diseño cumplió con las verificaciones de estabilidad ante volcamiento, deslizamiento y esfuerzos admisibles del suelo en los cuatro estados límite establecidos por el CCP-14.

Figura 15

Interfaz de la aplicación desarrollada con la extensión Tkinter para el primer tipo de diseño.

PARÁMETROS DE DISEÑO

Angulo de fricción interna del relleno (ϕ)	38	°
Ángulo de fricción suelo-muro (δ)	12	°
Peso unitario del relleno (γ_{rell})	1.8	T/m ³
Capacidad portante del suelo (q_N)	330	KN/m ²
Resistencia del concreto (f_c)	24.5	MPa
Resistencia del acero (f_y)	420	MPa
Altura de muro (H)	4.5	m
Ángulo de inclinación del relleno (i)	0	°
Ubicación del proyecto	Cucutilla	
Coefficiente de aceleración pico efectiva en roca PGA	0.35	
Tipo de suelo	C	

Calcular Diseño Nuevo Diseño Salir

Nota. En la interfaz puede observarse un diseño con un talud sin inclinación y sin considerar sobrecargas por presencia de vías. Fuente: Autor Propio.

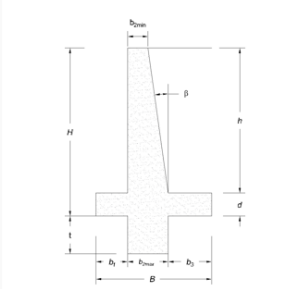
A continuación, se presenta una figura que ilustra la interfaz de dimensionamiento y las verificaciones de estabilidad correspondientes al primer tipo de diseño en muros de contención. Esta sección del aplicativo permite visualizar en tiempo real los resultados de las

comprobaciones de vuelco, deslizamiento y capacidad portante, facilitando un diseño seguro y eficiente.

Figura 16

Interfaz de dimensionamiento y verificaciones de estabilidad para el primer tipo de diseño.

Cálculo de Muros - Predimensionamiento



ESTADO LÍMITE	CASO	FX (KN)	RR (KN)	CUMPLE
RESISTENCIA 1	MÁXIMO	62.74	131.05	SI
	MÍNIMO	37.65	97.1	SI
EVENTO EXTREMO I	MÁXIMO	102.57	131.05	SI
	MÍNIMO	77.48	97.1	SI
EVENTO EXTREMO II	MÁXIMO	62.74	131.05	SI
	MÍNIMO	37.65	97.1	SI
SERVICIO 1		41.83	101.54	SI

ESTADO LÍMITE	CASO	e (m)	e _{max} (m)	CUMPLE
RESISTENCIA 1	MÁXIMO	0.27	0.72	SI
	MÍNIMO	0.19	0.72	SI
EVENTO EXTREMO I	MÁXIMO	0.63	0.72	SI
	MÍNIMO	0.67	0.72	SI
EVENTO EXTREMO II	MÁXIMO	0.27	0.72	SI
	MÍNIMO	0.19	0.72	SI
SERVICIO 1		0.23	0.72	SI

ESTADO LÍMITE	CASO	α _v (KN/m²)	σ _{max} (KN/m²)	CUMPLE
RESISTENCIA 1	MÁXIMO	124.94	148.5	SI
	MÍNIMO	83.2	148.5	SI
EVENTO EXTREMO I	MÁXIMO	224.9	264.0	SI
	MÍNIMO	180.6	264.0	SI
EVENTO EXTREMO II	MÁXIMO	124.94	264.0	SI
	MÍNIMO	83.2	264.0	SI
SERVICIO 1		91.29	214.5	SI

Base del muro (B) m
 Pie (b1) m
 Talón (b3) m
 Base corona (b2min) m
 Base máxima (b2max) m
 Altura de zapata (d) m
 Llave (t) m
 Pantalla (h) m
 Inclinación de vástago (β) °

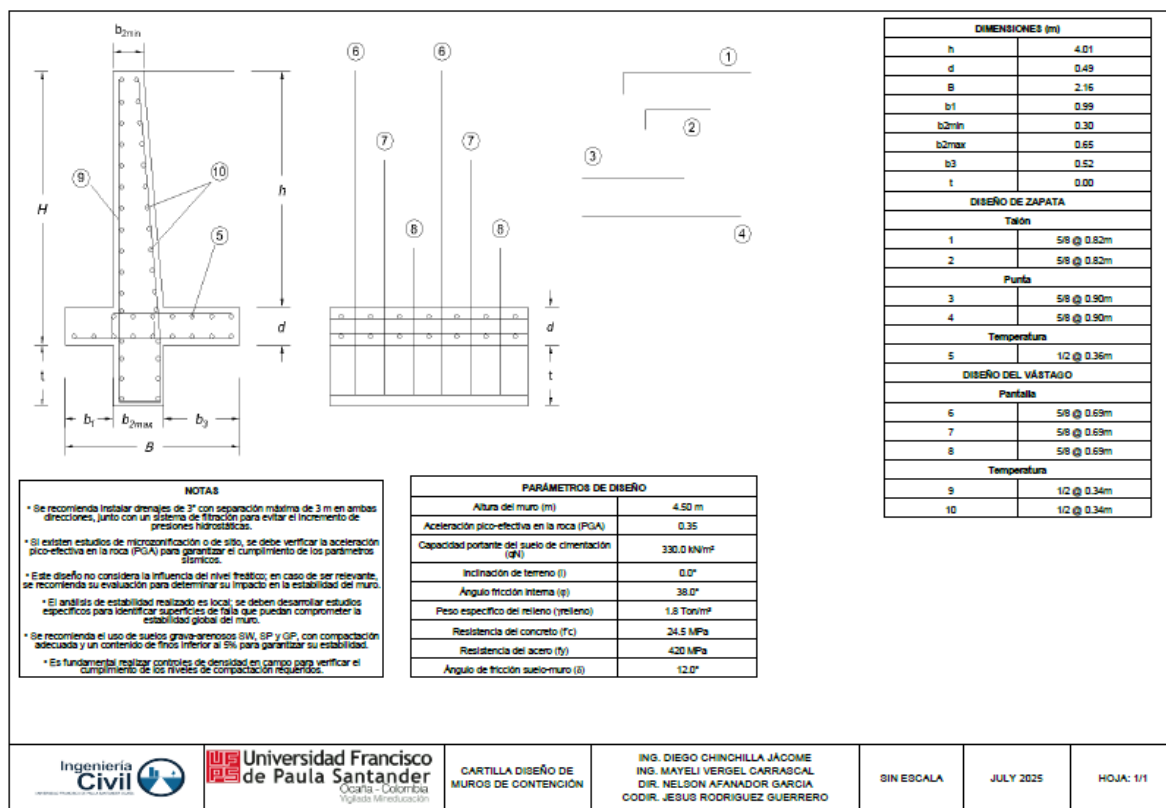
Ingresar Manualmente Calcular Vista
 Exportar PDF Cerrar

Fuente: Autor Propio.

La interfaz final, ver Figura 17, consiste en la opción de exportar un PDF con el resultado del diseño estructural y las dimensiones que previamente cumplieron con las verificaciones de estabilidad local. En este PDF observamos el despiece de aceros con la respectiva numeración para asegurar al usuario una mejor comprensión al momento de analizar los resultados. Se plasma mediante tablas las dimensiones de cada parte del muro, el diámetro del acero a flexión y de temperatura a usar con sus distintas separaciones. También se agregó un apartado de “NOTAS” donde se realizan ciertas acotaciones, limitaciones del programa y recomendaciones constructivas.

Figura 17

Documento PDF generado por la aplicación para el primer tipo de diseño.

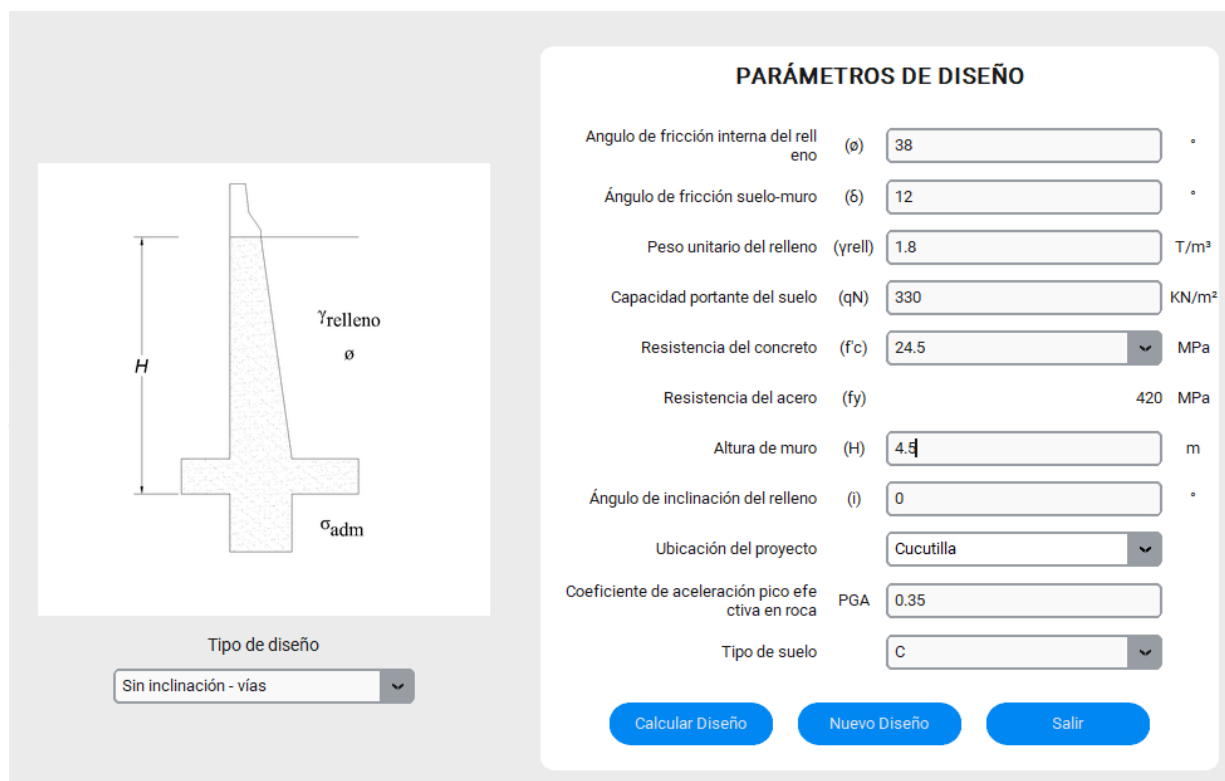


Fuente: Autor Propio.

El segundo tipo de diseño se trata de un muro de contención que soporta la sobrecarga causada por una vía, incluyendo adicionalmente la carga asociada a una barrera de tráfico tipo TL-4, ver Figura 18. Con los datos ingresados en esta interfaz, el aplicativo posteriormente generó un predimensionamiento automático del muro, así como la propuesta de refuerzo estructural considerando los efectos combinados del empuje de tierras y las cargas adicionales inducidas por el tránsito vehicular y la barrera, ver Figura 20. Al igual que en el caso anterior, el diseño obtenido superó satisfactoriamente las verificaciones de estabilidad frente a volcamiento, deslizamiento y presión sobre el terreno en los cuatro estados límite, ver Figura 19, demostrando así la capacidad del aplicativo para dimensionar muros sometidos a sollicitaciones complejas y alineados con las disposiciones normativas vigentes.

Figura 18

Interfaz de la aplicación desarrollada con la extensión Tkinter para el segundo tipo de diseño.



The interface consists of two main parts: a diagram on the left and a parameter input form on the right.

Diagram: A cross-section of a retaining wall. The wall has a vertical stem and a base. The height of the wall is labeled H . The fill material behind the wall is labeled γ_{relleno} and ϕ . The base of the wall is labeled σ_{adm} .

Form: PARÁMETROS DE DISEÑO

Parámetro	Valor	Unidad
Angulo de fricción interna del relleno (ϕ)	38	°
Ángulo de fricción suelo-muro (δ)	12	°
Peso unitario del relleno (γ_{rell})	1.8	T/m³
Capacidad portante del suelo (qN)	330	KN/m²
Resistencia del concreto ($f'c$)	24.5	MPa
Resistencia del acero (f_y)	420	MPa
Altura de muro (H)	4.5	m
Ángulo de inclinación del relleno (i)	0	°
Ubicación del proyecto	Cucutilla	
Coefficiente de aceleración pico efectiva en roca (PGA)	0.35	
Tipo de suelo	C	

Buttons: **Calcular Diseño**, **Nuevo Diseño**, **Salir**

Below the diagram, there is a dropdown menu labeled "Tipo de diseño" with the selected option "Sin inclinación - vías".

Fuente: Autor Propio.

Esta sección del aplicativo permite visualizar en tiempo real los resultados de las comprobaciones de vuelco, deslizamiento y capacidad portante.

Figura 19

Interfaz de dimensionamiento y verificaciones de estabilidad para el segundo tipo de diseño.

Base del muro (B) m

Pie (b1) m

Talón (b3) m

Base corona (b2min) m

Base máxima (b2max) m

Altura de zapata (d) m

Llave (t) m

Pantalla (h) m

Inclinación de vástago (β) °

ESTADO LÍMITE	CASO	FX (KN)	RR (KN)	CUMPLE
RESISTENCIA 1	MÁXIMO	82.12	189.82	SI
	MÍNIMO	57.28	140.28	SI
EVENTO EXTREMO I	MÁXIMO	122.5	189.82	SI
	MÍNIMO	97.66	140.28	SI
EVENTO EXTREMO II	MÁXIMO	105.09	189.82	SI
	MÍNIMO	80.25	140.28	SI
SERVICIO 1		52.84	146.09	SI

ESTADO LÍMITE	CASO	e (m)	e _{max} (m)	CUMPLE
RESISTENCIA 1	MÁXIMO	0.23	1.03	SI
	MÍNIMO	0.22	1.03	SI
EVENTO EXTREMO I	MÁXIMO	0.45	1.03	SI
	MÍNIMO	0.52	1.03	SI
EVENTO EXTREMO II	MÁXIMO	0.79	1.03	SI
	MÍNIMO	0.98	1.03	SI
SERVICIO 1		0.17	1.03	SI

ESTADO LÍMITE	CASO	α _v (KN/m²)	α _{max} (KN/m²)	CUMPLE
RESISTENCIA 1	MÁXIMO	112.29	148.5	SI
	MÍNIMO	81.65	148.5	SI
EVENTO EXTREMO I	MÁXIMO	134.75	264.0	SI
	MÍNIMO	105.43	264.0	SI
EVENTO EXTREMO II	MÁXIMO	195.03	264.0	SI
	MÍNIMO	190.51	264.0	SI
SERVICIO 1		82.05	214.5	SI

[Ingresar Manualmente](#) [Calcular Vista](#)

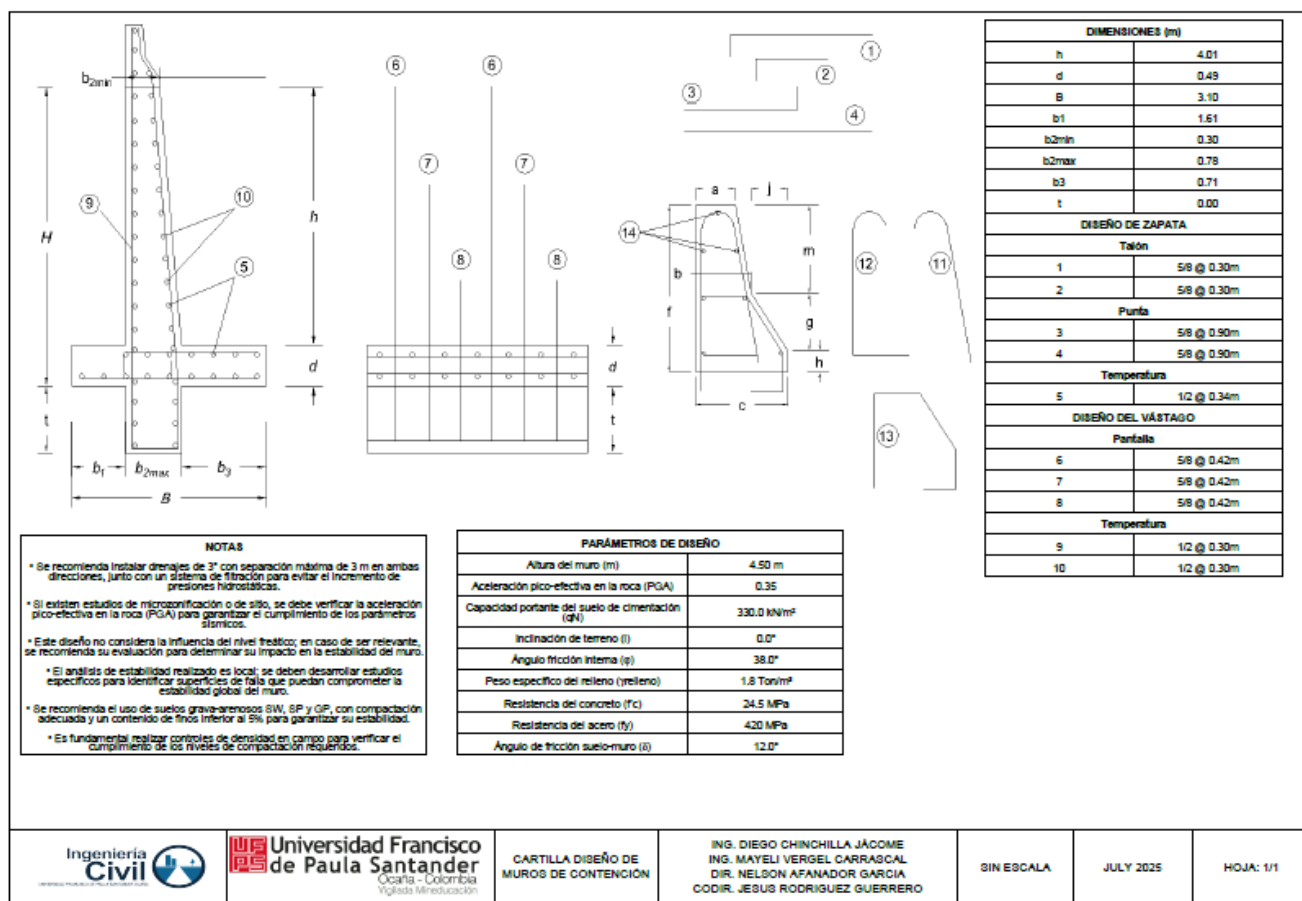
[Exportar PDF](#) [Cerrar](#)

Fuente: Autor Propio.

A continuación, se muestra una figura correspondiente a un archivo en formato PDF que contiene el despiece de acero del muro de contención en voladizo, junto con los resultados finales del diseño estructural. En este documento se detallan las cantidades, diámetros y disposición de las barras de refuerzo, así como los resultados obtenidos de dimensionamiento, permitiendo una visualización clara y precisa de la solución estructural propuesta.

Figura 20

Documento PDF generado por la aplicación para el segundo diseño.



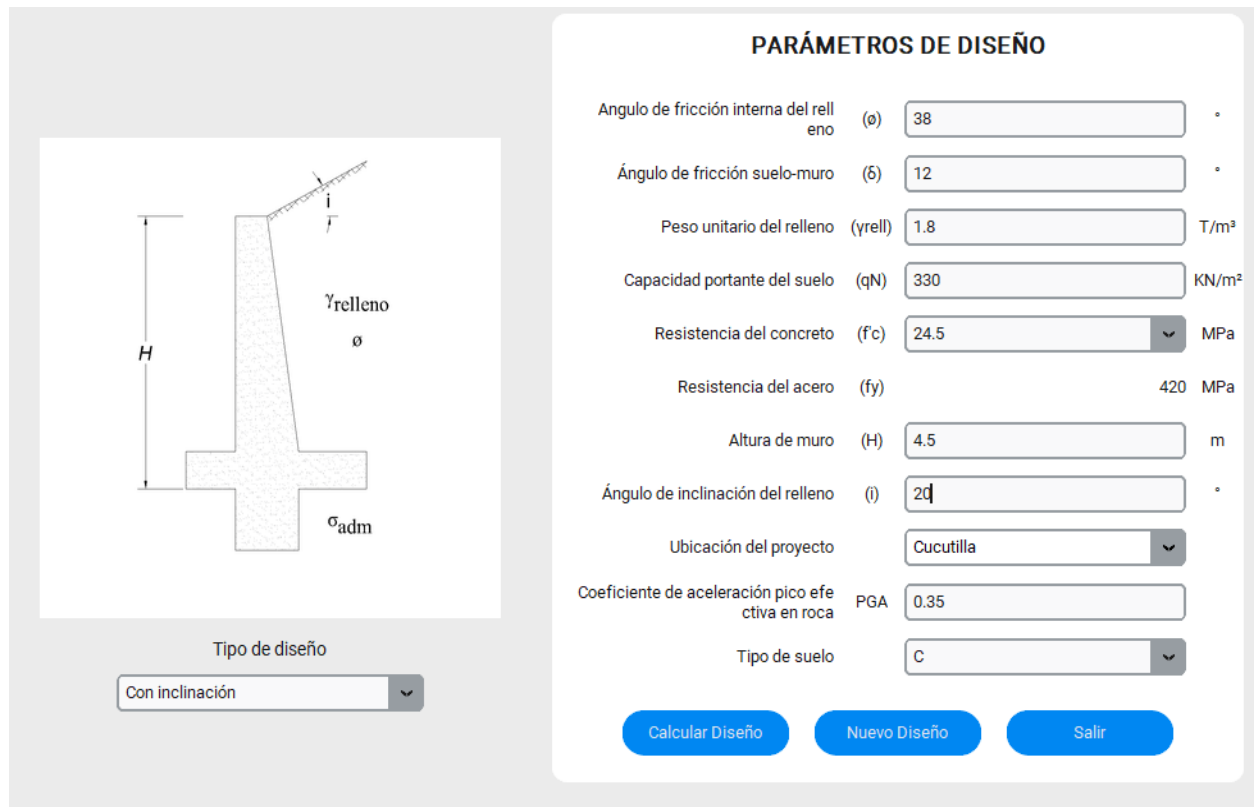
Fuente: Autor Propio.

El tercer diseño correspondió a un muro de contención con un talud que tiene una inclinación de 20°, lo cual representa un escenario más desafiante debido al comportamiento del terreno, ver Figura 21. El programa generó una propuesta de predimensionamiento del muro adaptada a la inclinación del talud, calculando tanto las dimensiones necesarias, ver Figura 23, como el refuerzo estructural que garantiza la estabilidad del sistema. Al igual que en los casos anteriores, el diseño resultante fue sometido a las verificaciones de volcamiento, deslizamiento y esfuerzo admisible del suelo ante los estados límite establecidos en el CCP14, ver Figura 22. El

aplicativo demostró cumplir con todos los requisitos establecidos por la normativa, validando su utilidad para el análisis y diseño de muros en condiciones topográficas no horizontales.

Figura 21

Interfaz de la aplicación desarrollada con la extensión Tkinter para el tercer diseño.



PARÁMETROS DE DISEÑO

Ángulo de fricción interna del relleno	(ϕ)	38	°
Ángulo de fricción suelo-muro	(δ)	12	°
Peso unitario del relleno	(γ_{rell})	1.8	T/m ³
Capacidad portante del suelo	(q_N)	330	KN/m ²
Resistencia del concreto	(f_c)	24.5	MPa
Resistencia del acero	(f_y)	420	MPa
Altura de muro	(H)	4.5	m
Ángulo de inclinación del relleno	(i)	20	°
Ubicación del proyecto		Cucutilla	
Coeficiente de aceleración pico efectiva en roca	PGA	0.35	
Tipo de suelo		C	

Tipo de diseño:

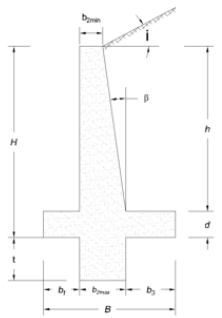
Calcular Diseño Nuevo Diseño Salir

Fuente: Autor Propio.

A continuación, se presenta una figura que ilustra la interfaz de dimensionamiento y el cumplimiento o no de las verificaciones de estabilidad correspondientes al segundo tipo de diseño en muros de contención.

Figura 22

Interfaz de dimensionamiento y verificaciones de estabilidad para el tercer diseño.



Base del muro (B) m

Pie (b1) m

Talón (b3) m

Base corona (b2min) m

Base máxima (b2max) m

Altura de zapata (d) m

Llave (t) m

Pantalla (h) m

Inclinación de vástago (β) °

DESPLAZAMIENTO

ESTADO LÍMITE	CASO	FX (KN)	RR (KN)	CUMPLE
RESISTENCIA 1	MÁXIMO	150.75	198.47	SI
	MÍNIMO	90.45	151.9	SI
EVENTO EXTREMO I	MÁXIMO	196.33	198.47	SI
	MÍNIMO	136.03	151.9	SI
EVENTO EXTREMO II	MÁXIMO	150.75	198.47	SI
	MÍNIMO	90.45	151.9	SI
SERVICIO 1		100.5	156.77	SI

VOLCAMIENTO

ESTADO LÍMITE	CASO	e (m)	e _{max} (m)	CUMPLE
RESISTENCIA 1	MÁXIMO	0.51	1.05	SI
	MÍNIMO	0.34	1.05	SI
EVENTO EXTREMO I	MÁXIMO	0.86	1.05	SI
	MÍNIMO	0.8	1.05	SI
EVENTO EXTREMO II	MÁXIMO	0.51	1.05	SI
	MÍNIMO	0.34	1.05	SI
SERVICIO 1		0.42	1.05	SI

PRESIÓN

ESTADO LÍMITE	CASO	α _v (KN/m ²)	σ _{max} (KN/m ²)	CUMPLE
RESISTENCIA 1	MÁXIMO	131.27	148.5	SI
	MÍNIMO	83.04	148.5	SI
EVENTO EXTREMO I	MÁXIMO	195.53	264.0	SI
	MÍNIMO	132.32	264.0	SI
EVENTO EXTREMO II	MÁXIMO	131.27	264.0	SI
	MÍNIMO	83.04	264.0	SI
SERVICIO 1		92.16	214.5	SI

[Ingresar Manualmente](#) [Calcular Vista](#)

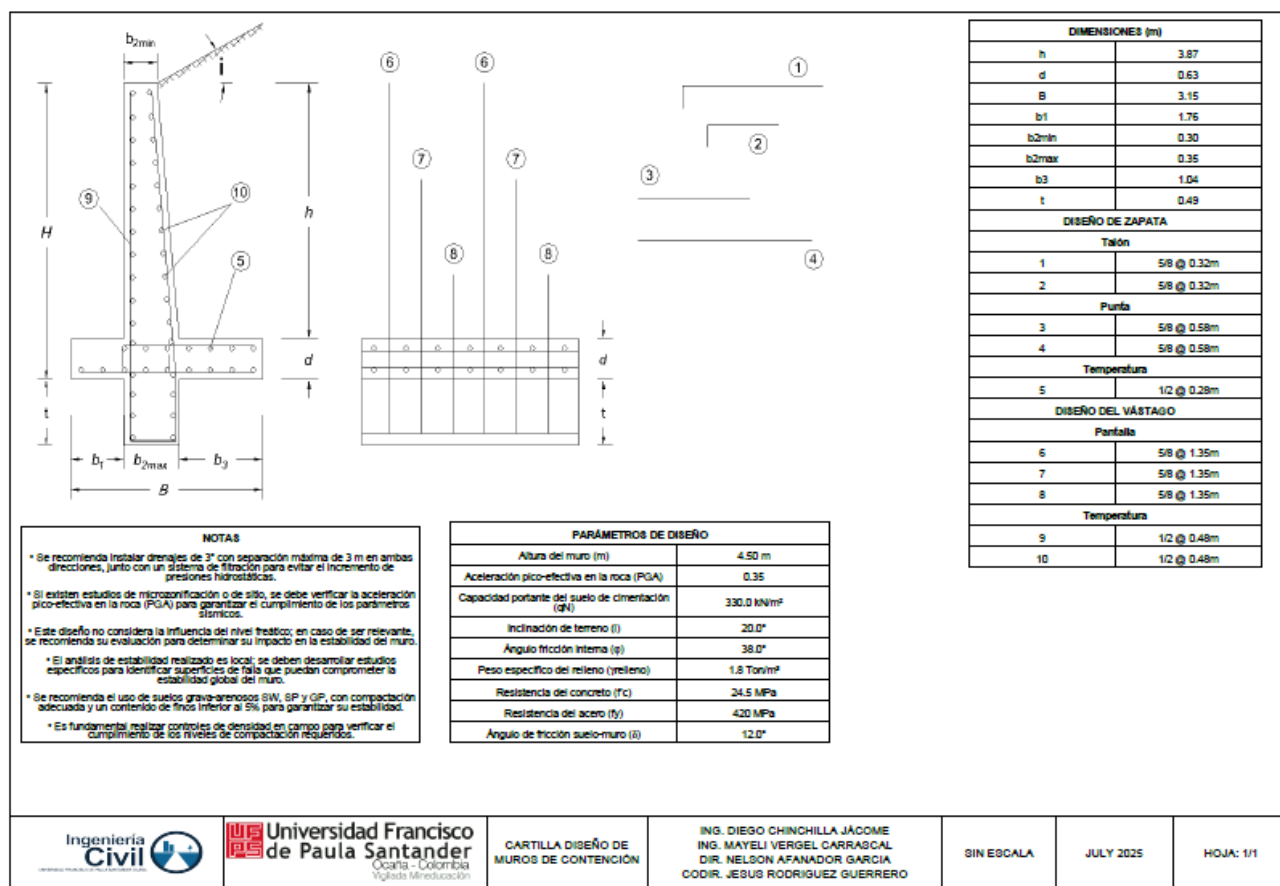
[Exportar PDF](#) [Cerrar](#)

Fuente: Autor Propio.

A continuación, se presenta una figura del PDF que muestra el despiece de acero del muro y los resultados finales del diseño, incluyendo la distribución de refuerzos y las verificaciones de estabilidad.

Figura 23

Documento PDF generado por la aplicación para el tercer diseño



Fuente: Autor Propio.

Se realizó un análisis comparativo entre los tres tipos de diseños observados anteriormente, con el objetivo de evaluar las diferencias en cuanto a los volúmenes de concreto y las cantidades de acero requeridas en cada caso. Este estudio permitió observar cómo varían las exigencias estructurales dependiendo de las condiciones de carga, como la presencia de un talud inclinado, un terreno horizontal o una sobrecarga vehicular. Los resultados evidencian que los diseños sometidos a mayores cargas externas, como en el caso del muro con sobrecarga de vía, tienden a requerir mayores volúmenes de concreto, mientras que los muros que retienen un talud horizontal presentan menores demandas en comparación, ver Figura 25.

Figura 24

Parámetros de entrada con la única variación en el tipo de diseño seleccionado

PARÁMETROS DE DISEÑO	
<i>Altura del muro (H)</i>	4,5
<i>Aceleración pico-efectiva en la roca (PGA)</i>	0,35
<i>Capacidad portante del suelo de cimentación (q_N)</i>	330 kN/m ²
<i>Inclinación de terreno (i)</i>	0°
<i>Ángulo fricción interna (ϕ)</i>	38°
<i>Peso específico del relleno ($\gamma_{relleno}$)</i>	1,8 Ton/m ³
<i>Resistencia del concreto (f'_c)</i>	24,5 MPa
<i>Resistencia del acero (f_y)</i>	420 MPa
<i>Ángulo de fricción suelo-muro (δ)</i>	12°
<i>Coefficiente de fricción interna del suelo (μ)</i>	0,5

Nota. En la tabla se pueden observar los parámetros de diseño empleados para cada tipo de diseño, se usaron los mismos datos numéricos tales como altura del muro, ángulo de fricción interna, peso específico del relleno, PGA, etc. Con la única variación del valor del ángulo de inclinación del terreno (i) que solo aplica para el caso del diseño con talud inclinado. Fuente: Autor Propio.

Figura 25

Comparativa de cantidades de obra entre los tres tipos de diseño en análisis.

Tipo de diseño	Volumen de concreto (m³/m)	Peso del acero (Kg/m)
Muro con talud horizontal.	3,66	144,61
Muro con barrera de tráfico.	4,67	242,82
Muro con talud inclinado.	3,47	357,22

Fuente: Autor Propio.

4.4 Cartilla técnica de referencia para diseño de muros en municipios de Norte de Santander

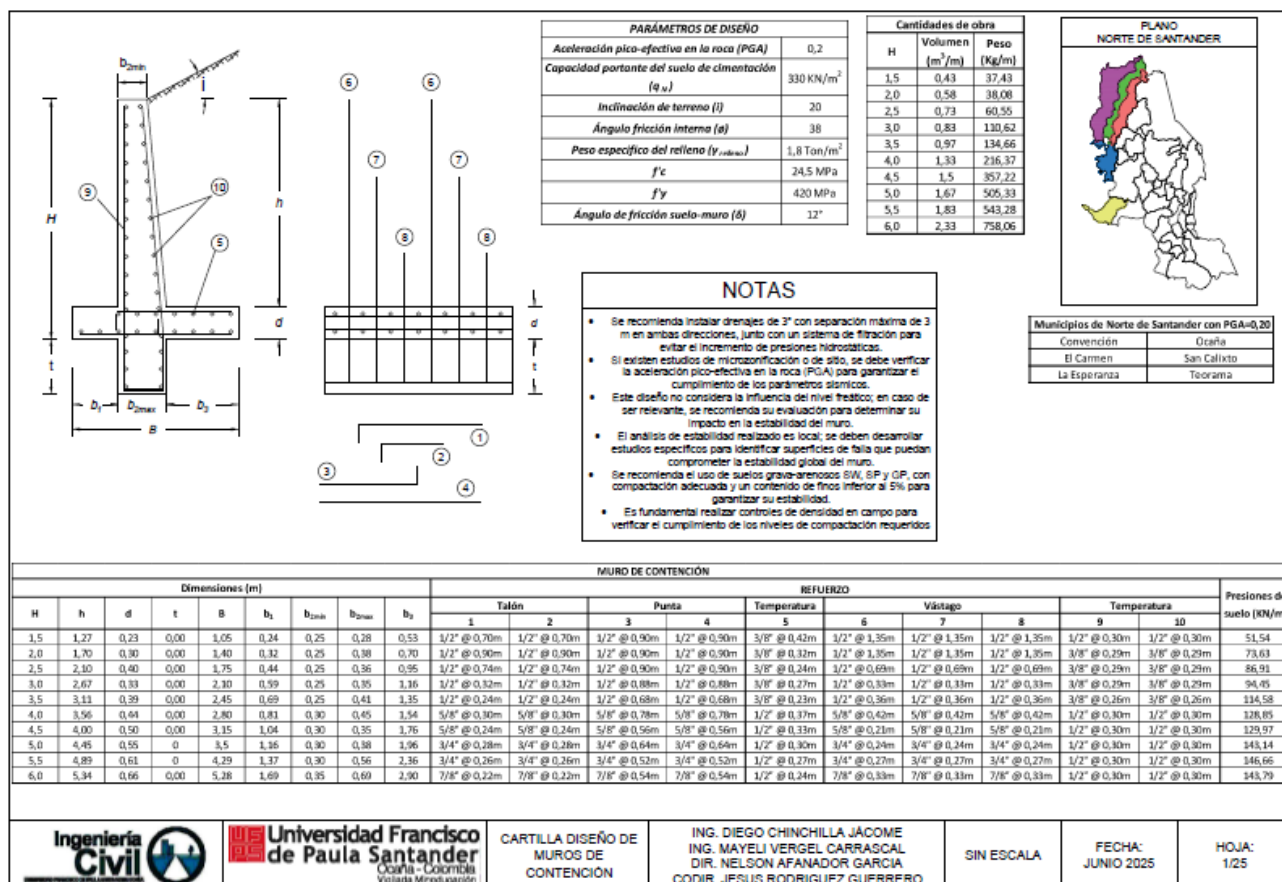
Como complemento al desarrollo del aplicativo “Wall Design”, se elaboró una cartilla técnica orientada a servir como guía práctica para el diseño preliminar de muros de contención en voladizo enfocada en los municipios de norte de Santander, ver Figura 26. Esta cartilla se elaboró a partir de los resultados obtenidos para los tres tipos de diseños contemplados por el aplicativo.

Esta cartilla se realizó con la finalidad de ofrecer una herramienta accesible para estudiantes, profesionales y entidades municipales que deseen tener un dimensionamiento y refuerzo requerido en función de la altura y la amenaza sísmica para los muros de contención

Cada diseño de la cartilla presenta y dimensionamiento y el refuerzo propuesto cumpliendo con las verificaciones solicitadas en el CCP14. Esto permite que el usuario pueda contar con un documento de referencia útil como un insumo técnico de apoyo de procesos de diseño de muros en Norte de Santander.

Figura 26

Hoja de la cartilla de diseños de muros de contención para Norte de Santander.



Fuente: Autor Propio.

4.5 Manual de usuario

Con el fin de facilitar el uso adecuado del aplicativo “Wall Design” por parte de estudiantes y profesionales interesados por el diseño de muros de contención en voladizo, se elaboró un manual de usuario que actúa como guía práctica para utilización del software, orientado para explicar de forma clara cada uno de los procesos involucrados en el manejo de la aplicación.

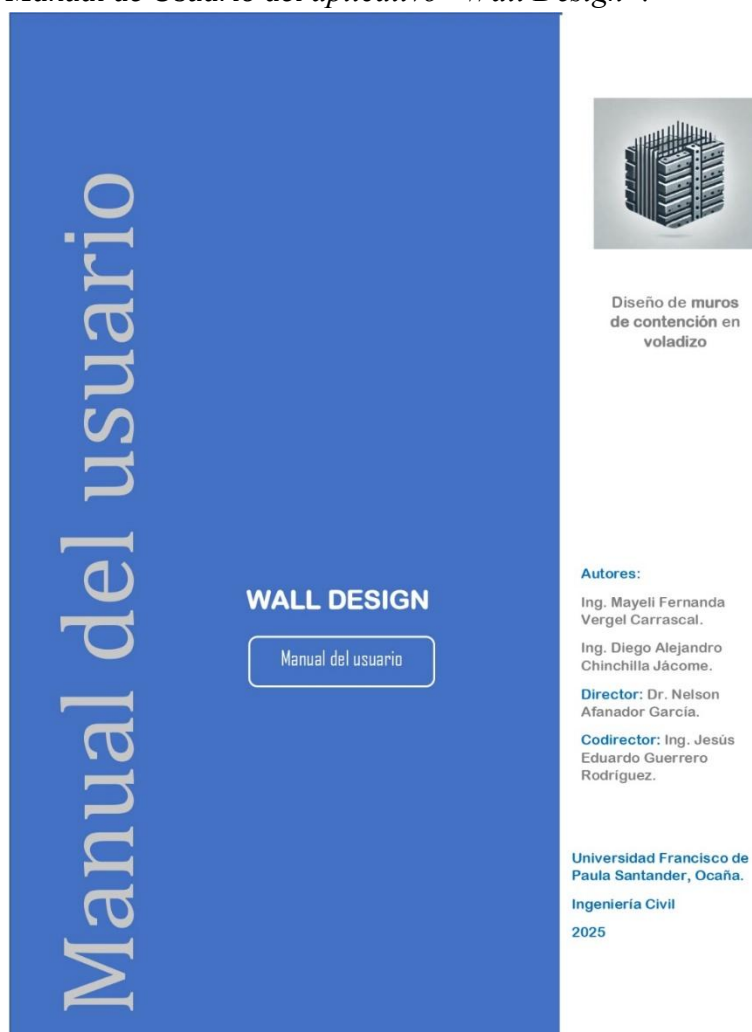
El manual inicia con una introducción general al propósito del aplicativo, seguida de una descripción detallada de cada interfaz, los campos de entrada requeridos y las funcionalidades de

los botones disponibles. Este presenta imágenes ilustrativas y ejemplos que permiten al lector identificar visualmente cada componente del entorno gráfico, facilitando así la navegación y comprensión del sistema.

Además del paso a paso para el ingreso de datos y la interpretación de los resultados obtenidos, el manual incluye recomendaciones prácticas para asegurar la coherencia en el diseño, así como advertencias sobre errores comunes que pueden presentarse durante el uso del aplicativo.

Figura 27

Manual de Usuario del aplicativo “Wall Design”.



Fuente: Autor Propio.

Capítulo 5. Conclusiones

Este proceso de diseñar muros de contención considerando 3 escenarios (Muros de contención para taludes horizontales, muros de contención para taludes inclinados, y muros de contención con barrera de tráfico para vías, cada uno con sus requerimientos específicos) fue llevado a cabo mediante el desarrollo de un software de escritorio el cual promovió la automatización de estos procesos; obteniendo como resultado, una herramienta que brinda fácil y rápidamente unas propuestas de dimensionamiento y de diseño estructural personalizadas de acuerdo a las variables inicialmente ingresadas en la interfaz principal. Los resultados de estos diseños no sólo pueden visualizarse mediante el programa, sino que también fueron recopilados en una cartilla que servirá como guía de fácil acceso para la consulta de quién la desee utilizar.

Por medio de la elaboración de este proyecto de investigación pudimos concluir lo siguiente:

- El uso del software permite realizar el diseño estructural de muros de contención en voladizo de manera rápida y sencilla gracias a las interfaces creadas con la extensión Tkinter, ya que la rutina incorporada en el código de programación contempla todos los fundamentos de la ingeniería estructural y geotécnica incluyendo el análisis estático, análisis dinámico, diseño en concreto, cálculo de empujes activos y pasivos, verificaciones de estabilidad local, entre otros.
- Según los resultados obtenidos, y cómo se puede observar en la cartilla, a medida que aumenta la altura del muro, las secciones de concreto también incrementan proporcionalmente. Del mismo modo, la cantidad de acero de refuerzo se incrementa en relación directa con la altura del elemento estructural. Esto es debido a que, al aumentar la altura del muro, aumentan las acciones sísmicas y por lo tanto se aumentan las secciones transversales y la

cantidad de acero. Estos comportamientos coinciden plenamente con los principios teóricos del análisis y diseño estructural de muros de contención.

- El programa desarrollado está en la capacidad de proporcionar un primer acercamiento a las dimensiones geométricas del muro. Si bien estas dimensiones no siempre cumplirán con todos los criterios de estabilidad local, sirven como una guía inicial para que el usuario complete manualmente el análisis, ajustando el diseño hasta satisfacer los requisitos de estabilidad por deslizamiento, volcamiento y esfuerzos transmitidos al terreno.
- Los diseños y las dimensiones para muros de contención con talud inclinado fueron más críticos al deslizamiento, los muros con talud horizontal a los esfuerzos del terreno, y los muros con barrera de tráfico fueron críticos al volcamiento.
- El procedimiento empleado para el desarrollo de este proyecto de investigación fue basado en los lineamientos estipulados por el CCP-14, empleando el método de diseño LRFD, razón por la cual, tanto la programación del software como la cartilla se encuentran completamente actualizadas de acuerdo a la normatividad actual vigente.

Capítulo 6. Recomendaciones

Se recomienda a profesionales y estudiantes de ingeniería civil profundizar en el aprendizaje de la programación de softwares, ya que el dominio de estas herramientas no solo mejora la comprensión de procesos técnicos y analíticos, sino que también permite desarrollar soluciones personalizadas, automatizar cálculos complejos y optimizar tiempos en los proyectos.

Realizar un software de diseño de estructuras de contención dónde se incluyan análisis de estabilidad de taludes para tener mayor certeza sobre las superficies de falla en laderas y de esta manera, velar por una estabilidad global en el elemento de contención; de esta manera se estarían logrando diseños más seguros.

Considerar la existencia de nivel freático en los diseños, y junto a ello, las afectaciones y consideraciones que habría que tener en cuenta con esta solicitud.

Se recomienda no modificar el código ni las funciones desarrolladas en el mismo para evitar dañar o alterar su funcionamiento y la veracidad de los cálculos.

Este software desarrollado puede optimizarse y hacerse más eficiente al calibrar las relaciones de dimensionamiento de acuerdo a distintas capacidades portantes del suelo de fundación, esto con el fin de no llegar a incurrir en sobredimensionamientos. También puede considerarse incluirse gráficas de diseño como momentos flectores y cortantes de diseño.

Referencias

- Afanador García, N., Sanjuán Prada, Y., & Medina Cáceres, D. (2012). Diseño sísmico de muros de contención en gravedad y voladizo. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(20), 97–104. <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/1965/5565>
- Bazán, E., & Meli, R. (2001). *Diseño sísmico de edificios*. Limusa.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design* (5.ª ed.). McGraw-Hill.
- Capítulo 3: Muros de contención. (s.f.). En *Cartilla guía para la evaluación de cantidades y ejecución de presupuestos para la construcción de obras de la red terciaria y férrea* (pp. 1–3). INVIAS.
- Carnero López, M. (2016). *Estructuras de contención de tierras* (1.ª ed.). Delta Publicaciones. <https://elibro-net.sibdigital.ufpso.edu.co/es/lc/ufpso/titulos/227372>
- Coulomb, C.-A. (1776). *Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture*. Académie Royale des Sciences.
- Criado, D., Pacheco, W., & Afanador, N. (2020). Vulnerabilidad sísmica de centros poblados: estudio de caso. *Ingenio UFPSO*, 17(1), 44–55. <https://revistas.ufps.edu.co/index.php/ingenio/article/view/2441>
- CSI (Computer & Structures, Inc.). (2016). *STAAD.Pro help*. <https://www.csiamerica.com/>
- Cuevas Álvarez, A. (2016). *Python 3: Curso práctico*. RA-MA Editorial. <https://elibro-net.sibdigital.ufpso.edu.co/es/lc/ufpso/titulos/106404>
- CYPE Ingenieros. (2020). *CYPECAD: Manual de usuario*. <https://www.cype.com>

- Das, B. M. (2015). *Principles of foundation engineering* (8.^a ed.). Cengage Learning.
- Fang, H.-Y., & Daniels, J. D. (2006). *Design and construction of earth retaining structures*. Wiley.
- García, N. A. (2016). A polynomial chaos expansion approach to the analysis of uncertainty in viscoelastic structural elements. *DYNA*, 83(199), 172–182.
- García, N. A., Alvarez, K. F., & Calderon, F. (2019, noviembre). A numerical model of the behavior of the resistance to compression in prisms of solid masonry. *Journal of Physics: Conference Series*, 1386(1), 012131. IOP Publishing.
- García, N. A., Gómez, G. G., & Serna, C. N. (2021, mayo). Reinforced concrete beams subjected to three-point bending using finite element method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1938(1), 012008. IOP Publishing
- García, N. A., Gómez, G. G., & Serna, C. N. (2021, julio). Polinomial chaos expansion applied to limit state functions. *Journal of Physics: Conference Series*, 1981(1), 012010. IOP Publishing
- García, N. A., Sanchez, C. N., & Serna, C. N. (2020, septiembre). Evaluation of uncertainty in determining the physical properties of concrete using Bootstrap. *Journal of Physics: Conference Series*, 1645(1), 012008. IOP Publishing.
- Gutiérrez Gómez, J. S., & Rodríguez Pineda, C. E. (2015) *Diseño de muros de contención bajo carga sísmica en suelos homogéneos cohesivos y friccionantes mediante un aplicativo computacional*. *Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y*

- Tecnológica de Colombia*, 24(2), 35–45. <http://repositorio.uptc.edu.co/items/83b7c2b6-1c2b-4e0d-9751-095e6bd47dfc>
- Hinojosa Gutiérrez, Á. (2015). *Python paso a paso*. RA-MA Editorial. <https://elibro-net.sibdigital.ufpso.edu.co/es/lc/ufpso/titulos/10721>
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2014). *Código Colombiano de Puentes CCP-14*. República de Colombia.
- Jara Mori, G. A. (2008). *Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos al diseño de estructuras de contención de tierras y su interacción con el terreno, para su empleo en obras de infraestructura viaria* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/1169/1/GONZALO_ANDRES_JARA_MORI.pdf
- Park, R., & Paulay, T. (1991). *Reinforced concrete structures*. John Wiley & Sons.
- Segura Franco, J. I. (2011). *Estructuras de concreto I* (7.^a ed.). Ayala Ávila & Cía. Ltda.
- Sharma, D., & Goyal, A. (2021). Application of AI in structural and geotechnical engineering: A review. *Structures*, 33, 126–138. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.05.017>