ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.1392

Comparative analysis of the AASHTO and Eurocode standards for the design of cantilever walls used in the defense of the Tumbes River

Mario Rodrigo Mendoza Macedo; Joseph Paul Linaja Ayala[2]; Gilmer Challco Mamani [3]
[1,2,3]Universidad Tecnológica del Perú, Perú, *u18305479@ utp.edu.pe, c28403@utp.edu.pe*, *c23404@ utp.edu.pe*

Abstract– *The Tumbes River, located in northern Peru, faces constant challenges related to flooding and overflowing riverbanks, affecting infrastructure and adjacent communities. To mitigate these risks, cantilevered retaining walls represent a viable solution. This article analyzes and compares AASHTO and Eurocode standards for the design of these walls. Structural, safety, and economic aspects are addressed, considering design parameters, materials, and costs. The results demonstrate significant differences in structural behavior and design efficiency, providing recommendations for optimizing the use of these standards for river defense design.*

Keywords-- *Cantilever walls, structural design, AASHTO, Eurocode, defense river.*

Análisis comparativo de las normativas AASHTO y Eurocódigo para el diseño de muros en voladizo para la defensa ribereña del río Tumbes

Mario Rodrigo Mendoza Macedo; Joseph Paul Linaja Ayala[2]; Gilmer Challco Mamani [3]
[1,2,3]Universidad Tecnológica del Perú, Perú, *u18305479@ utp.edu.pe, c28403@utp.edu.pe*, *c23404@ utp.edu.pe*

Resumen– *El río Tumbes, ubicado en el norte del Perú, enfrenta desafíos constantes relacionados con inundaciones y desbordes, afectando la infraestructura y las comunidades adyacentes. Para mitigar estos riesgos, los muros de contención en voladizo representan una solución viable. En el presente artículo se analiza y compara las normativas AASHTO y Eurocódigo para el diseño de los referidos muros. Se abordan aspectos estructurales, de seguridad y económicos, considerando los parámetros de diseño, materiales y costos. Los resultados demuestran diferencias significativas en el comportamiento estructural y en la eficiencia de los diseños, proporcionando recomendaciones para optimizar el uso de estas normativas para el diseño de la defensa ribereña.*

Palabras clave: *Muros en voladizo, diseño estructural, AASHTO, Eurocódigo, defensa ribereña.*

I. Introducción

El río Tumbes es una de las principales fuentes hidrográficas de la costa norte del Perú, con una extensión de 230 km en el territorio peruano [1]. Este río es altamente vulnerable a eventos climáticos extremos como el Fenómeno El Niño, que ha causado desbordes recurrentes, conllevando a pérdidas económicas significativas [2]. Es así que se propone como una de las principales soluciones proteger los bordes del río Tumbes, para ello se cuenta con distintas soluciones de acondicionamiento de los márgenes del cauce, siendo la opción que más se destaca la implementación de muros de contención para evitar pérdidas económicas y materiales para los ciudadanos de las zonas aledañas.

Los muros de contención son estructuras diseñadas principalmente para resistir las presiones ejercidas por el suelo o agua, otorgándosele mayor resistencia estructural si estos son de concreto armado, así como una prevención ante agrietamientos y deformaciones. Además de los muros de contención, existen otras estructuras que también están orientadas a contener líquidos o evitar la erosión, como los gaviones y los diques; el primero consiste en cajas de alambre rellenas de piedras, y el segundo son barreras de tierra o concreto, dichas estructuras pueden ser efectivos en muchas situaciones, pero los muros de contención tienen la ventaja de ofrecer una mayor resistencia a la erosión directa por agua debido a su estructura más sólida y diseñada específicamente para resistir las fuerzas laterales del agua. De otra parte, los muros de contención en voladizo tienden a ocupar menos espacio con respecto a los muros de contención de concreto simple; no obstante, para grandes alturas no suelen ser tan económicas ya que no están diseñados para resistir empujes laterales considerables. En ese sentido, las características señaladas hacen que los muros de contención de concreto armado sean una opción preferente cuando se requiere un control efectivo de la erosión, empujes y agrietamientos, especialmente en áreas expuestas a fenómenos climáticos extremos como los desbordes.

Respecto al ámbito nacional, diversas tesis han surgido con el objetivo de diseñar muros de contención como defensa ribereña, abordando la problemática de la protección de áreas vulnerables frente a las crecidas y la erosión, concluyendo en que los muros en voladizos son la solución más viable.

En el ámbito internacional, los autores Jordán, Ferraz y Sobrino determinaron al realizar un análisis comparativo entre ambas normativas, que en el diseño de puentes mixtos mediante el Eurocódigo y la normativa AASHTO LRFD existen diferencias significativas en la filosofía de diseño, especialmente en la consideración de las acciones y combinaciones de carga. Mientras que el Eurocódigo tiende a establecer valores más elevados para las cargas de tráfico característico, compensa esta rigurosidad con coeficientes de combinación y mayoración más moderados en comparación con AASHTO LRFD. Esta diferencia se refleja en la cuantificación del material, donde el Eurocódigo permite diseños más optimizados y económicos, reduciendo entre un 10% y un 30% la cantidad de acero en las vigas principales en comparación con AASHTO, sin comprometer la seguridad estructural [14]

En el Perú, el diseño de dicha estructura está regulado en el Manual de Puentes emitido por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones y la Norma Técnica E.060 emitida y aprobada por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, los cuales hacen referencia ampliamente a la normativa AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), norma predominante en los Estados Unidos de América. De otra parte, el Eurocódigo es una alternativa internacional que proporciona enfoques más conservadores y detallados. El presente trabajo se enmarca en analizar las diferencias entre ambas normativas, considerando criterios estructurales, de seguridad y costos, para determinar la más adecuada en el contexto del río Tumbes.

A continuación, se presenta la ubicación de las zonas seleccionadas para la construcción de los muros de contención; asimismo, se realizó los estudios topográficos, geotécnicos,

geológicos e hidrológicos previamente, los cuales son esenciales para el diseño y evaluación de las estructuras. En la Tabla I, se detallan las coordenadas y dimensiones de los muros proyectados en las laderas de los centros poblados Ceibal y Santa María.

TABLA I
UBICACIÓN DE MUROS DE CONTENCIÓN

Zona	Largo (m)	Norte (m)*	Este (m)*
Ceibal	215.0	9592177.75	562787.15
Santa Maria	290.0	9592921.86	562616.09

* En coordenadas UTM

Con respecto a la metodología, el estudio se desarrolló el 2024, utilizando normativas vigentes y datos actualizados para diseñar muros de contención en el río Tumbes, en un área vulnerable a eventos climáticos extremos como el Fenómeno El Niño; asimismo, se incluye un análisis comparativo de costos asociados a la construcción de un metro lineal de muro de contención diseñado según las normativas AASHTO y Eurocódigo. Con este fin, se consideraron los materiales, la mano de obra y los equipos.

La hipótesis general planteada es que el uso del Eurocódigo en el diseño de muros en voladizo resulta más eficiente.

y económico que AASHTO, incrementando la seguridad y reduciendo costos a largo plazo. Adicionalmente, se planteó las hipótesis específicas siguiente: los muros bajo Eurocódigo ofrecerán mayor resistencia, menores costos de mantenimiento y una optimización en el uso de recursos.

II. METODOLOGÍA

A. Análisis y diseño estructural según AASHTO y Eurocódigo

A.1 Diseño preliminar

La normativa AASHTO no precisa ninguna recomendación respecto a la geometría inicial, sin embargo, usaremos el brindado por Das y Harmsen. En la fase de predimensionamiento del muro de contención, se definen las dimensiones iniciales como altura, base e inclinación. El objetivo es obtener un diseño preliminar que luego se verificará la seguridad estructural, en caso de que no cumpla se regresa a este paso. Se sugiere un espesor de corona entre 0.20 a 0.30 m y un diseño económico si la distancia de la punta al centro de la base es *B*/3 [3] [4].

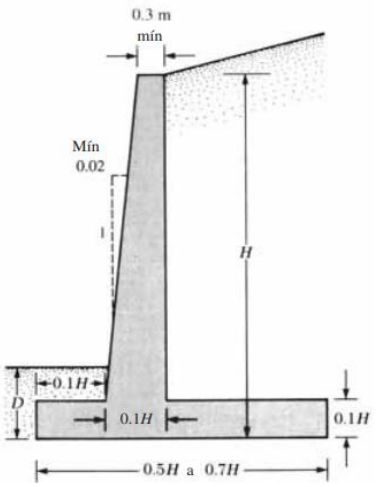

Fig. 1 Predimensionamiento del muro de contención I [3].

En lo que respecta al Eurocódigo, se empleó como referencia el predimensionamiento selectivo utilizado en España, el cual ha sido adaptado y aplicado por los estudiantes en diversos proyectos de ingeniería. Este enfoque metodológico, ampliamente reconocido en el ámbito académico, ofrece una guía precisa para el diseño inicial de estructuras, asegurando que los parámetros fundamentales sean considerados de manera eficiente desde las primeras etapas del proyecto.

Dependiendo de la altura H desde la coronación del alzado hasta la base de la zapata, se pueden adoptar los siguientes valores para la fase de predimensionamiento (ver Figura 2):

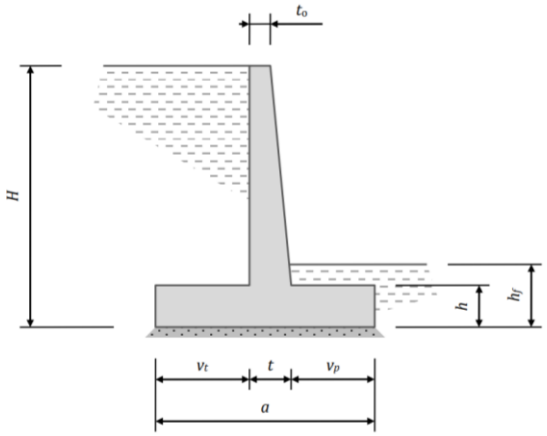

Fig. 2 Predimensionamiento del muro contención II [16].

- Ancho a de la zapata: Entre el 45% y el 60% de la altura total *H* ($0.45H \leq a \leq 0.60H$).
- Espesor t del alzado en la base: Aproximadamente una décima parte de la altura *H*.
- Espesor t_o del alzado en la coronación: Como mínimo 25 cm.
- Canto h de la zapata: Al menos la mitad del vuelo *v*, con un valor mínimo de 50 cm.

- Vuelo V_p de la puntera: Entre el 25% y el 30% del ancho a ($0.25a \leq V_p \leq 0.30a$).
- Vuelo v del talón: Aproximadamente el doble del vuelo V_p, es decir, $v \approx 2V_p$.

Profundidad h_f de la zapata: Como mínimo 100 cm.

A.2 Determinación de cargas

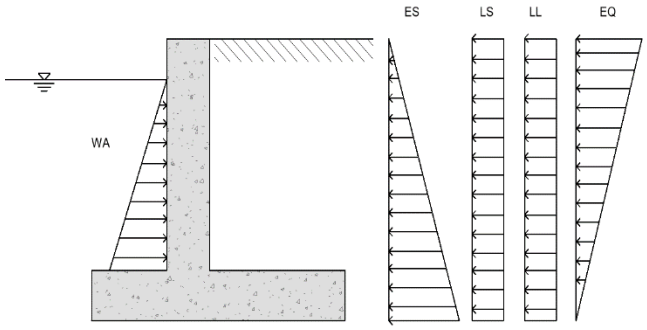

Fig. 3 Distribución de cargas horizontales en un muro en voladizo.

Donde:
LS: Carga viva vehicular
LL: Sobrecarga
ES: Empuje activo
EQ: Empuje sísmico
WA: Empuje hidrostático

Carga viva de vehículo: El artículo 3.11.6.4 de la Norma AASHTO establece que se debe aplicar una carga viva adicional a los muros cuando haya una zona vehicular paralela al muro a una distancia igual a la mitad de la altura del muro en el trasdós, en presencia de una trocha. La fórmula utilizada para calcular este empuje horizontal constante del suelo es:

$$\Delta p = ka \cdot \gamma s \cdot heq \quad (1)$$

Donde:
Δp: Empuje horizontal constante del suelo (tf)
γs: Densidad del suelo (kg/m3)
ka: Coeficiente activo de empuje lateral del suelo
heq: Altura de suelo equivalente para carga vehicular (m)

Sobrecarga del terreno: En conformidad a la Norma Técnica E.020 la sobrecarga sobre el terreno adyacente al muro al ser accesible a peatones, puede ser considerada como corredor, en base a la Tabla 1 de cargas mínimas repartidas la sobrecarga por área es de 400 kg/m2.

Empuje activo: La fuerza resultante del empuje activo se calcula con el coeficiente de presión activa de tierra de Rankine.

$$\text{EH} = 0.5 \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \text{ka} \quad (2)$$

Donde:
H: Altura del suelo (m)
γ: Densidad del suelo (kg/m3)
ka: Coeficiente activo de empuje lateral del suelo

Empuje activo sísmico: El coeficiente de la aceleración sísmica horizontal se calcula en función del PGA,

En la norma AASHTO, sección 3.10, se establecen los requisitos generales para las cargas sísmicas, las cuales se aplican como fuerzas horizontales [2]. El PGA (Aceleración máxima del suelo) es determinado por Aguilar y Tarazona mediante un mapa de aceleraciones para un periodo de diseño de 475 años, conocido como el sismo de diseño, que corresponde a un evento con una probabilidad de no excedencia de este periodo.

El coeficiente kh, que representa la aceleración sísmica horizontal, está definido en el punto C11.10.7.1 de la norma. En el cálculo del empuje dinámico horizontal utilizando el método de Mononobe-Okabe, el valor de kh puede ser igual al máximo coeficiente de aceleración sísmica. La fórmula es:

$$kh = A \cdot g \quad (3)$$

Donde A es la aceleración horizontal máxima durante un sismo (PGA) y g g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²). En casos donde el muro experimente movimientos laterales aceptables (de 1.0 a 2.0 pulgadas), se considera el efecto de la deformación sobre el muro, lo que permite reducir $k\ h$ k h a la mitad ($0.5 \cdot k$h).
El valor del coeficiente de la aceleración sísmica vertical se considera 2/3 del coeficiente sísmico horizontal [15].
kv=2/3 kh (4)
El cálculo del empuje activo sísmico se realiza con el método de Mononobe – Okabe, mediante la siguiente expresión:

$$Kae = \frac{Cos^2(\emptyset - \theta_{MO})}{Cos\theta_{MO} Cos(\delta + \theta_{MO})[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta+\emptyset)\sin(\emptyset-\theta_{MO})}{Cos(\delta+\theta_{MO})}}]^2} \quad (5)$$

Donde:

$$\theta_{MO} = \tan^{-1}\left(\frac{k_h}{1-k_v}\right) \quad (6)$$

δ : ángulo de fricción entre el suelo y el muro
Una vez determinado el valor de Kae, se determina el empuje activo sísmico, tal y como se muestra a continuación:

$$\Delta Eae = 0.5\gamma H^2[Kae(1 - kv)] \quad (7)$$

Donde:
H= altura del suelo (m)
γ= densidad del suelo (kg/m3)
kv= coeficiente de aceleración vertical

Fuerzas hidrostáticas: De manera conservadora, se asume que el relleno sostenido por el muro está completamente saturado;

asimismo, se considera por separado las presiones en la cara del muro que está en contacto con el flujo de agua. En ese sentido, la presión se calcula en función del tirante máximo determinado en el estudio hidrológico y en función de la altura del suelo saturado. Se utiliza un peso específico del agua, γagua = 1000 kg/m^3.

$$WAh = 0.5 \cdot \gamma_{agua} \cdot H^2 \quad (8)$$

Donde:
H: Altura del tirante de agua (m)

Cuando se habla del empuje activo del relleno en el trasdos, debemos tener en cuenta que la saturación del suelo—debido a lluvias intensas o al flujo de agua del río que se cuela por debajo—incrementa el peso del relleno. Esto sucede porque, en condiciones de saturación, el suelo no solo aporta su propio peso, sino que se suma el efecto del agua que llena sus poros, lo que se traduce en un incremento de aproximadamente 1 ton/m³ en la densidad efectiva del material.

En ese sentido, se debe interpretar γ como la densidad del suelo en estado saturado. Es decir, en la práctica se utiliza un valor que ya integra ese "extra" de 1 ton/m³ correspondiente al peso específico del agua, lo cual garantiza que la presión ejercida sobre el muro refleje el escenario de máxima carga por saturación. Por lo tanto, la densidad efectiva a emplear en la fórmula sería: $\gamma_{efectiva}=\gamma_{suelo}+1.00 ton/m^3$, repercutiendo en la ecuación 2.

A.3 Diseño y verificación de seguridad

El proceso de diseño incluye el dimensionamiento final del muro y sus componentes, considerando aspectos como el espesor de la losa de base, el tallo del muro y el refuerzo requerido. Esto asegura resistencia y durabilidad según los estándares de AASHTO, que establece factores de seguridad específicos.

A.3.1 Verificación de estabilidad

Se evalúan las siguientes condiciones:

Deslizamiento:

En condiciones estáticas, el factor de seguridad frente al deslizamiento debe ser igual o superior a 1.50 ($FSd \geq 1.50$).
En condiciones pseudo-dinámicas, el factor de seguridad frente al deslizamiento debe ser igual o superior a 1.10 ($FSd \geq 1.10$).

Volteo:

La resultante de las fuerzas actuantes sobre la estructura debe quedar dentro del tercio central de la base de apoyo, lo que implica que la excentricidad debe ser menor o igual a un tercio del ancho de la base (excentricidad ≤ $0.333B$).

Global:

Para verificar la estabilidad global se hizo uso del método de análisis por dovelas, la cual es una técnica ampliamente utilizada, este método divide el talud o la estructura en secciones, que permiten evaluar las fuerzas y momentos de forma segmentada y calcular el factor de seguridad (F.S.) contra una posible falla global.

Para reducir la vulnerabilidad de la cimentación ante fenómenos como licuefacción y erosión, se recomienda el uso de pilotes hincados o soluciones más económicas, como gaviones tipo colchón reno dado que estos ofrecen una solución eficaz para la protección contra la erosión y la estabilización del suelo. La sección 11.4 de la norma AASHTO establece que los materiales de relleno deben ser granulares y permitir un libre drenaje [5]. Los parámetros geotécnicos incluyen una densidad de suelo de relleno de 1.60 ton/m³ o 15.7 kN/m^3 y un ángulo de fricción interfaz suelo-muro de δ=2ϕ/3 [3].

El análisis de estabilidad del talud requiere un factor de seguridad mayor a 2, calculado mediante la ecuación de equilibrio límite (9):

$$F.S. = \frac{R\sum(c \cdot li + Wi \cdot cos(\beta') \cdot tan(\phi)}{\sum(Wi \cdot ai)} \quad (9)$$

Donde
F.S.: Factor de seguridad del talud
R: Radio del círculo de deslizamiento (en métodos circulares)
c: Cohesión del suelo.
l_i: Longitud de la base del i-ésimo segmento (a lo largo de la superficie de falla).
W_i: Peso del i-ésimo segmento de suelo.
β': Ángulo de inclinación de la base del i-ésimo segmento.
Φ : Ángulo de fricción interna del suelo.
a_i: Brazo de momento del peso respecto al centro de rotación (para momentos desestabilizadores).

Se calcula la resistencia al deslizamiento sumando las fuerzas de cohesión ($c*li$) y las fuerzas generadas por la fricción, que dependen del peso de cada capa (Wi), el ángulo de inclinación del talud (β'), y la fricción interna del suelo ($\tan(\phi)$). Una vez calculado se divide sobre las fuerzas que tienden a causar el deslizamiento, que son proporcionales al peso (Wi) de cada capa de suelo y al área de contacto de cada capa (ai) [3].

A.3.2 Estados límite según AASHTO

Se consideran combinaciones de carga de acuerdo a AASHTO:
Resistencia 1(condiciones normales):
1.25DC+1.50DW+1.50EH+1.35EV+1.50ES+1.75(LL+IM+PL+LS)+1.00W
Evento Extremo 1 (condiciones sísmicas):
1.00DC+1.00DW+1.00(EH+EV+ES)+1.00(LL+IM+PL+LS)+1.00WA+EQ

A.3.3 Consideraciones adicionales de estabilidad del terreno

En cuanto al Eurocódigo, la norma N° 7 proporciona directrices detalladas para evaluar las propiedades del suelo y garantizar una base sólida para la construcción de estructuras como los muros de contención. En este apartado se analizan parámetros clave como la cohesión, el ángulo de fricción y la capacidad portante del suelo. Estos parámetros son esenciales para determinar la estabilidad y la capacidad de carga del terreno, lo cual influye directamente en el diseño estructural del muro. En este caso, el módulo de balasto vertical se ha estimado

en 57 MN/m³ (equivalente a 5700.12 ton/m³) a partir de correlaciones extraídas de los ensayos SPT (Standard Penetration Test), lo que proporciona una base robusta para evaluar el comportamiento del muro bajo cargas verticales.

Las combinaciones de carga se especifican en el Eurocódigo 0 y Eurocódigo 1. Factores de combinación ($\psi 0$, $\psi 1$, $\psi 2$) ajustan las cargas variables para condiciones frecuentes, largas o extremas.

A.3.4 Estados límite según Eurocódigo:

Estados Límite Últimos (ULS): Factor de seguridad al deslizamiento y volcadura: Condición no sísmica: ≥ 1.5. Condición sísmica: ≥ 1.1.
Verificación frente al hundimiento: Se calcula el esfuerzo transmitido al sustrato (σt):

$$\sigma t = \frac{Nk}{b-(a-2e)} \quad (13)$$

σt debe ser menor a la carga admisible ($qadm$).

El diseño de acero de refuerzo parte de los estados límites, será trabajado bajo el factor de resistencia para flexión y tracción considerado para concreto armado es φ=0.90. Se utiliza la ecuación de la norma AASHTO para calcular el momento nominal (Mn) de una sección rectangular de concreto, considerando el área de acero de refuerzo (As), la resistencia del acero (fy), la distancia efectiva (d) y la profundidad de la zona comprimida (a). La fórmula incluye parámetros como la resistencia del concreto (f'c) y el ancho de la sección (b).

$$Mn = As * fy * (d - a/2) \quad (10)$$

Donde:
As = Área de acero de refuerzo (en cm²).
fy = Resistencia del acero de refuerzo (en kg/cm² o MPa).
d = Distancia efectiva desde la fibra más comprimida hasta el centro de las barras de acero (en cm).
a = Profundidad de la zona comprimida (en cm), calculada como:

$$a = \frac{As*fy}{0.85*f'c*b} \quad (11)$$

$f'c$ = Resistencia del concreto (kg/cm²)
b = Ancho de la sección (en cm).

La resistencia solicitada se cumple cuando el área de acero requerido (As) es:

$$As = \frac{Mcr}{\Phi*fy*(d-\frac{a}{2})} \quad (12)$$

Luego, para el cálculo de espaciamiento se define como el acero requerido sobre el número de barras por área de barra propuesta, verificando si la sección cumple con los requisitos de que el momento nominal sea igual con el momento crítico ($Mcr= \Phi*Mn$), el cual es el momento máximo que se espera en la estructura bajo cargas de diseño, $Mn \geq Mcr$.

De la tabla de recubrimiento para armaduras principales no protegidas, tabla 5.12.3-1 se extrajo que, para el hormigonado contra el suelo, se deberá usar un recubrimiento de 75 mm [1]

El diseño de estructuras de concreto expuestas a condiciones ambientales severas, como la exposición al agua y la cavitación, requiere una atención especial en cuanto a la selección de materiales y la disposición del refuerzo. Según el ACI 350, que establece directrices para estructuras en contacto con agua, se especifica que la resistencia mínima del concreto (f'c) debe ser de 280 kg/cm² o 27.44 MPa a los 28 días. Esta especificación garantiza que el concreto posea la resistencia necesaria para soportar las cargas y condiciones ambientales previstas.

Además de la resistencia mínima, el ACI 350 proporciona directrices sobre la disposición del refuerzo en estructuras expuestas a cavitación. Se indica que el refuerzo más cercano a la superficie del concreto debe colocarse paralelo a la dirección del flujo del agua. Esta disposición ayuda a minimizar los efectos de la cavitación, que puede causar daños significativos en las superficies expuestas al flujo de agua.

En cuanto al refuerzo por contracción y temperatura, para paredes de concreto con un espesor superior a 10 pulgadas (aproximadamente 254 mm), se debe colocar refuerzo en cada dirección en dos capas paralelas a las caras de la pared. Esta disposición asegura que las tensiones inducidas por cambios de temperatura y contracción sean adecuadamente soportadas, reduciendo el riesgo de fisuración y mejorando la durabilidad de la estructura. El cumplimiento de estas especificaciones es fundamental para garantizar que la estructura mantenga su integridad y resistencia, incluso bajo condiciones exigentes, asegurando su longevidad y desempeño a lo largo del tiempo.

B. Análisis estructural

La sección de métodos de análisis estructural en la norma AASHTO aborda la configuración de estructuras y la determinación de solicitaciones, considerando tanto análisis elásticos como inelásticos, además de la redistribución de cargas en casos específicos. Dependiendo de la complejidad e importancia de la estructura, se utilizan métodos de análisis con distintos niveles de sofisticación, avalados por años de uso para entender el comportamiento estructural. De forma similar, el Eurocódigo establece combinaciones de acciones para garantizar la seguridad y funcionalidad estructural.

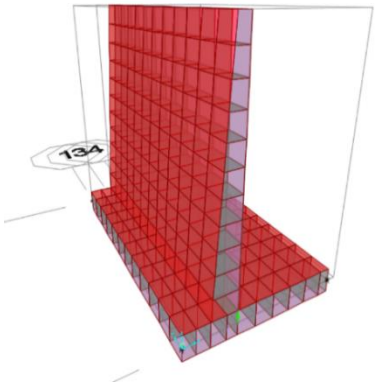

Fig. 4 Modelo del muro de contención SAP2000

El análisis por el método de elementos finitos en SAP2000 permite obtener una distribución precisa de los esfuerzos a lo largo de la estructura, lo que es fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia del diseño. Los resultados obtenidos en el modelo fueron utilizados para realizar las verificaciones de diseño. Estas verificaciones aseguran que los esfuerzos internos no superen los límites permisibles definidos por los materiales y cumplen con los criterios de seguridad de ambas normativas, tanto en condiciones con agua como sin agua.

Con base en los esfuerzos analizados (momentos flectores, fuerzas cortantes y tensiones normales), se realizaron verificaciones estructurales para ambas normativas (AASHTO y Eurocódigo). Esto incluyó combinaciones de cargas específicas y el diseño del refuerzo de acero, asegurando que los esfuerzos no superaran los límites permisibles definidos por los materiales y cumplieran los criterios de diseño de ambas normas.

A continuación, se presentan los momentos máximos obtenidos en el análisis estructural realizado bajo las normativas AASHTO y Eurocódigo. Los resultados se dividen según las condiciones de carga con y sin agua, considerando las partes críticas del muro: la pantalla y la cimentación. Estas tablas son fundamentales para comparar las exigencias estructurales de ambas normativas y determinar el diseño más eficiente y seguro.

TABLA II
MOMENTOS MÁXIMOS OBTENIDOS EN AASHTO

Partes del muro	AASHTO	
	Con agua	Sin agua
Pantalla	16.65	26.70
Cimentación	10.56	17.17

TABLA III
MOMENTOS MÁXIMOS OBTENIDOS EN EUROCÓDIGO

Partes del muro	EUROCÓDIGO	
	Con agua	Sin agua
Pantalla	21.64	25.14
Cimentación	10.59	11.69

Los resultados presentados muestran el comportamiento global de la estructura del muro de contención. Para el diseño del acero de refuerzo se segmentó el muro: El talón, que soporta las cargas más significativas, ha sido diseñado con el refuerzo más crítico para garantizar su resistencia. El alzado se ha diseñado a partir de la intersección con el talón, considerando sus condiciones específicas de manera separada. Estas diferencias reflejan las variaciones en los enfoques y factores de seguridad adoptados por cada normativa, lo cual impacta en el diseño y asignación de refuerzo en las estructuras analizadas.

En cuanto al alzado, el diseño se ha realizado a partir de la intersección del talón y el alzado. Se ha considerado este segmento de manera independiente, tomando en cuenta las condiciones específicas que afectan a esta parte del muro. Cada componente del diseño se ha evaluado de forma individual.

El AASHTO establece que se tiene: Un área de acero de 23.31 cm²/m. Se ha propuesto utilizar barras de 3/4" de diámetro, con un espaciamiento mínimo de 0.12 m. El espaciamiento real colocado es de 0.10 m. Con este espaciamiento, el área de acero colocada es de 28.50 cm²/m, superando el área calculada. Por lo tanto, el acero colocado en el talón de la cimentación será: Ø 3/4" @ 0.10 m.

En relación al refuerzo por contracción y temperatura se ha calculado un área de acero de 4.63 cm²/m para el refuerzo por temperatura. Se ha propuesto utilizar barras de 1/2" de diámetro, con un espaciamiento mínimo de 0.27 m. El espaciamiento real colocado es de 0.20 m, resultando en un área de acero colocada de 6.33 cm²/m por cara. Por lo tanto, el acero colocado para el refuerzo por temperatura en la cimentación será: Ø 1/2" @ 0.20 m.

Respecto al diseño realizado según el Eurocódigo se tiene: Para este diseño, se tiene un área de acero calculada de 19.61 cm²/m, con barras propuestas de 5/8" de diámetro. El espaciamiento mínimo determinado para estas barras es de 0.10 m, que coincide con el espaciamiento que se ha colocado en el diseño. Este espaciamiento colocado genera un área de acero de 19.79 cm²/m, lo que supera ligeramente el área calculada, asegurando que el refuerzo es adecuado para las demandas estructurales. La disposición final del acero quedará como Ø 5/8" @ 0.10 m.

En la cimentación, se ha calculado un área de acero necesaria de 4.59 cm²/m que debe ser superada. Se propone el uso de barras de 1/2" de diámetro, con un espaciamiento mínimo de 0.28 m. Sin embargo, el espaciamiento que se ha colocado es de 0.20 m, lo que genera un área de acero colocada de 6.33 cm²/m por cada cara de la cimentación, por lo que el acero serpa: Ø 1/2" @ 0.20 m.

El metrado de concreto se realiza calculando el área dividiendo al muro como se fue planteado en toda la tesis, en alzado y cimentación, ya que ambos predimensionamientos ha cumplido con los requisitos de estabilidad de cada norma y se tiene un diseño según cada normativa. Se procedió con el cálculo por elemento estructural, definidos los muros cada 6.00 m por junta de construcción

C. Metrados y presupuesto

El metrado de concreto se realiza calculando el área dividiendo al muro como se fue planteado en toda la tesis, en alzado y cimentación, ya que ambos predimensionamientos ha cumplido con los requisitos de estabilidad de cada norma y se tiene un diseño según cada normativa. Se procedió con el cálculo por elemento estructural, definidos los muros cada 6.00 m por junta de construcción se tiene:

$$A = \left(\frac{b_s + b_i}{2} * h + Bb * hz \right) * 6 \quad (14)$$

En cuanto al concreto entonces se tiene para el muro bajo la metodología AASHTO: A1=26.475 m^3

El muro bajo la metodología de Eurocódigo requiere: A2=25.755 m^3

El acero se cuantifico con las barras comunes de 9 m, no se consideraron empalmes debido a que se realizará el cortado cada 6 metros por junta de dilatación.

Entonces, se tiene para el muro bajo la metodología AASHTO:

En el alzado:
Zona superior Transversal: 26 barras de 1/2"
Zona inferior Transversal: 26 barras de 5/8"
Refuerzo vertical:
número de barras = Longitud total/espaciado+1 6.00/0.15+1 = 41 barras de 5/8”
Bastones, por longitud puede dividirse una barra: número de barras = (Longitud total/espaciado+1)/2 = (6.00/0.15+1)/2 = 26 barras de 3/8".
En la cimentación:
Refuerzo transversal: 36 barras de 1/2".
Refuerzo horizontal por longitud puede dividirse una barra: (6.00/0.10+1)/2 = 32 barras de 3/4”
El Metrado por zonas para el diseño basado en el Eurocódigo:
En el alzado:
Zona superior Transversal: 26 barras de 1/2"
Zona inferior Transversal: 26 barras de 5/8"
Refuerzo vertical: 6.00/0.15+1 = 41 barras de 5/8”
En la cimentación:
Refuerzo transversal: 32 barras de 1/2".
Refuerzo horizontal por longitud puede dividirse una barra: número de barras = (Longitud total/espaciado+1)/2 = (6.00/0.10+1)/2 = 32 barras de 5/8”

En este sentido la estimación del presupuesto del diseño del muro de contención, nace a partir de emplear los valores actuales de precios de materiales proporcionados por la Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO). Según el informe de costos de construcción publicado por CAPECO, el precio promedio del concreto premezclado es de aproximadamente S/ 450 por metro cúbico.

Usando los precios promedio más recientes a la fecha:
- Cemento: S/ 30.00 por bolsa (42.5 kg)
- Arena: S/ 60.00 por m^3
- Grava: S/ 80.00 por m^3
- Agua: S/ 5.00 por m^3

Además, el costo del acero de refuerzo se sitúa en alrededor de S/ 3,800 por tonelada métrica. Estos valores son esenciales para calcular el presupuesto detallado del proyecto, teniendo en cuenta los volúmenes de concreto y aceros requeridos para la construcción del muro ciclópeo, y permiten una estimación precisa de los costos asociados a los materiales. Es fundamental utilizar estos datos actualizados para asegurar que el presupuesto refleje los costos reales y permita una adecuada planificación financiera del proyecto.
Usando los precios promedio más recientes a la fecha, las varillas son de 9 metros para barras de construcción A615, son los siguientes:
3/8”: S/ 25.00 por barra
1/2": S/ 45.00 por barra
5/8”: S/ 69.00 por barra
3/4”: S/ 96.20 por barra
Estos serán usados tanto en el análisis y conforman junto a los precios unitarios de los elementos constructivos, el análisis de precios unitarios dispuestos.

TABLA IV
RESUMEN DE PRECIOS UNITARIOS POR MATERIAL PARA CONCRETO

PARTIDA	CANT.	PARCIAL	TOTAL (S/.)
CONCRETO PARA MURO MÉTODO AASHTO			**11,589.75**
ALZADO	13.52	450	6,084.00
Bolsa de cemento	11.33	30	339.81
Arena	0.58	60	34.8
Grava	0.94	80	74.8
Agua	0.12	5	0.6
			6,084.00
CIMENTACIÓN	12.96	450	5,832.00
Bolsa de cemento	11.33	30	339.81
Arena	0.58	60	34.8
Grava	0.94	80	74.8
Agua	0.12	5	0.6
			5,832.00
CONCRETO PARA MURO: MÉTODO EUROCÓDIGO			**11,592.00**
ALZADO	13.52	450	6,084.00
Bolsa de cemento	11.33	30	339.81
Arena	0.58	60	34.8
Grava	0.94	80	74.8
Agua	0.12	5	0.6
			6,084.00
CIMENTACIÓN	12.24	450	5,508.00
Bolsa de cemento	11.33	30	339.81
Arena	0.58	60	34.8
Grava	0.94	80	74.8
Agua	0.12	5	0.6
			5,508.00

La siguiente tabla detalla los costos asociados al acero de refuerzo necesario para los muros de contención diseñados bajo los métodos AASHTO y Eurocódigo. Se presentan las cantidades de acero requeridas para el alzado y la cimentación, junto con los costos parciales y totales, permitiendo identificar diferencias significativas entre ambos métodos de diseño.

TABLA V
RESUMEN DE PRECIOS UNITARIOS POR MATERIAL PARA ACEROS DE REFUERZO

PARTIDA	REFUERZO	DIAM. (pulg.)	CANT.¨ (*)	PRECIO PARCIAL	PRECIO TOTAL (S/.)
ACERO DE REFUERZO PARA MURO MÉTODO AASHTO					
ALZADO	Transversal Superior	1/2"	26	45	1170
	Transversal Inferior	5/8"	26	69	1794
	Refuerzo vertical	5/8"	41	69	2829
				TOTAL (S/)	**6,443.00**
	Bastones	3/8"	26	25	650
CIMENTACIÓN	Transversal Superior	1/2"	18	45	810
	Transversal Inferior	1/2"	18	45	810
	Horizontal Superior	3/4"	16	96.2	1539
	Horizontal Inferior	3/4"	16	96.2	1539
				TOTAL (S/)	**4,698.00**
ACERO DE REFUERZO PARA MURO MÉTODO EUROCÓDIGO					
ALZADO	Transversal Superior	1/2"	26	45	1170
	Transversal Inferior	5/8"	26	69	1794
	Refuerzo vertical	5/8"	41	69	2829
				TOTAL (S/)	**5,793.00**
CIMENTACIÓN	Transversal Superior	1/2"	16	45	720
	Transversal Inferior	1/2"	16	45	720
	Horizontal Superior	5/8"	16	69	1104
	Horizontal Inferior	5/8"	16	69	1104
				TOTAL (S/)	**3,648.00**

*La cantidad y costos de acero se expresan en base a tonelada métrica considerando varillas de 9 metros de longitud (longitud convencional vendida en el Perú).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. *Comportamiento estructural*

El diseño bajo la normativa AASHTO muestra mayor flexibilidad en los criterios de seguridad, priorizando el cumplimiento de factores de seguridad mínimos. Por otro lado, el Eurocódigo adopta un enfoque más conservador, con mayores requerimientos en la verificación de estabilidad global y diseño sísmico. Esto resulta en muros con dimensiones ligeramente superiores y mayor cantidad de refuerzo.

AASHTO Eurocódigo

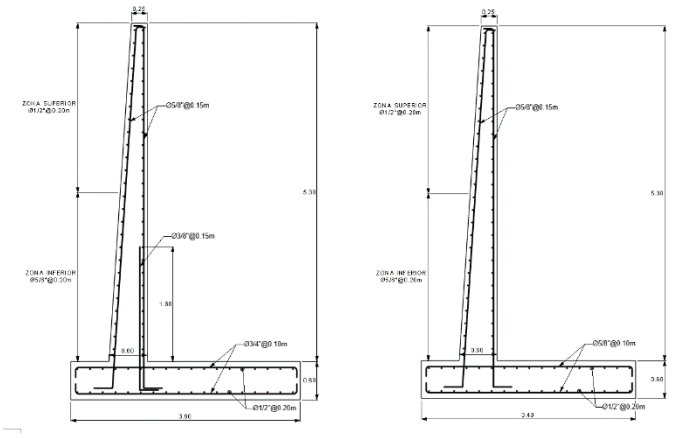

Fig. 5 Distribución de aceros y dimensiones para ambos métodos.

El diseño de acero de refuerzo para los muros en voladizo se ha realizado tomando en cuenta las cargas generadas por el terreno activo, así como las exigencias estructurales bajo las normativas AASHTO y Eurocódigo. El refuerzo vertical está diseñado para resistir los momentos flectores, los cuales alcanzan su valor máximo en la base de la pantalla y disminuyen a medida que se asciende. Adicionalmente, el refuerzo transversal se encarga de controlar las tensiones causadas por la contracción del concreto. La siguiente tabla compara la cantidad y disposición del acero requerido para cada parte del muro según ambas normativas, basándose en la envolvente de diseño obtenida a partir del análisis estructural.

TABLA VI
COMPARATIVA DE CUANTÍAS DE ACERO

Parte del muro	Variable	AASHTO	Eurocódigo
Pantalla	Cuantía de acero vertical (flexión)	5/8" @0.15m	5/8" @0.15m
	Cuantía de acero transversal (contracción)	5/8" @0.20m (INF) 1/2" @0.20m (SUP)	5/8" @0.20m (INF) 1/2" @0.20m (SUP)
	Balancines (flexión)	3/8" @0.20m	No presenta
Cimentación	Cuantía de acero longitudinal (flexión)	3/4" @0.20m	5/8" @0.20m
	Cuantía de acero transversal (contracción)	1/2" @0.20m	1/2" @0.20m

B. *Costos de construcción*

El análisis comparativo de costos revela que el diseño basado en la normativa AASHTO es más económico en términos iniciales debido a la optimización de materiales. Sin embargo, el Eurocódigo presenta ventajas a largo plazo, con menores costos de mantenimiento debido a su enfoque conservador y durabilidad estructural.

TABLA VII
COMPARATIVA DE COSTOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Parte del muro	Variable	AASHTO	Eurocódigo
Pantalla	Costo concreto	S/ 6,084	S/ 6,084
	Costo acero de refuerzo	S/ 6,443	S/ 5,793
Cimentación	Costo concreto	S/ 5,832	S/ 5,508
	Costo acero de refuerzo	S/ 4,698	S/ 3,648

Al analizar en detalle los costos de los materiales de construcción, se observa que el acero de refuerzo bajo el diseño AASHTO presenta un costo aproximado un 10% mayor en el alzado y un 22% mayor en la cimentación respecto al diseño basado en Eurocódigo. Además, en términos de cuantía de acero, el diseño AASHTO requiere alrededor de un 44% más de área de refuerzo en la cimentación que el diseño Eurocódigo. Estas diferencias reflejan que, aunque el costo de concreto es similar en ambos métodos, el Eurocódigo ofrece un diseño más eficiente en el uso de acero, impactando significativamente en el presupuesto global del proyecto.

C. Análisis de sostenibilidad

El Eurocódigo se destaca en sostenibilidad al promover un uso eficiente de materiales y considerar escenarios de carga extremos, lo que reduce el riesgo de fallas en condiciones severas.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La normativa AASHTO resulta ser más adecuada para proyectos con restricciones presupuestarias inmediatas, ya que sus criterios de diseño tienden a optimizar los materiales y recursos en términos de costos iniciales. Sin embargo, esta optimización puede comprometer algunos aspectos de la durabilidad y seguridad a largo plazo. En proyectos donde el presupuesto es limitado, como en ciertas infraestructuras de uso temporal o a corto plazo, AASHTO es una opción viable debido a sus menores costos iniciales.

Por otro lado, el Eurocódigo es ideal para proyectos donde la seguridad y la durabilidad estructural a largo plazo son prioritarias. Sus criterios más conservadores garantizan que la estructura pueda resistir cargas extremas y eventos sísmicos, lo que lo hace especialmente adecuado para proyectos en zonas de alta sismicidad. La robustez y fiabilidad de los diseños basados en el Eurocódigo aseguran que los muros de contención mantendrán su funcionalidad y resistencia a lo largo del tiempo, lo que es un factor clave en proyectos con alto valor o infraestructura crítica.

Las diferencias entre AASHTO y el Eurocódigo son evidentes en los factores de carga y criterios de diseño. El Eurocódigo tiende a aplicar factores de carga más altos y, por ende, sus diseños son más conservadores, lo que genera estructuras más resistentes, pero también más costosas en términos de materiales, sobre todo en el caso del refuerzo de acero. Sin embargo, esta diferencia de costos iniciales se ve compensada en el largo plazo con menores costos de mantenimiento, menores riesgos de falla estructural y una mayor durabilidad.

Dado que el Eurocódigo presenta un enfoque más conservador y resiliente, especialmente en términos sísmicos, es recomendable su aplicación en diseños ubicados en zonas de alta sismicidad, como lo es el área del río Tumbes. El uso de esta normativa puede reducir el riesgo de fallos estructurales durante eventos sísmicos, lo cual es esencial en una región propensa a terremotos.

Si bien tanto la normativa AASHTO como el Eurocódigo proporcionan lineamientos sólidos para el diseño de muros de contención, los resultados obtenidos evidencian oportunidades de mejora específicas. En el contexto de obras ribereñas expuestas a eventos extremos, como las crecidas asociadas al Fenómeno El Niño. Asimismo, el Eurocódigo podría beneficiarse de una simplificación de sus combinaciones de carga para contextos de infraestructura básica, donde la optimización de recursos es crítica. Futuras investigaciones podrían enfocarse en desarrollar un marco normativo híbrido que combine la robustez del Eurocódigo en la evaluación sísmica con la flexibilidad económica de AASHTO, adaptado específicamente a zonas de alta vulnerabilidad climática como la cuenca del río Tumbes.

REFERENCIAS

[1] Autoridad Nacional del Agua, “Diagnostico de cultura del agua Cuenca Río Tumbes,” accesado: 01, 27, 2024 [Online], disponible en: https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/72/ANA0000666.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[2] Ministerio del Ambiente, “El fenómeno El Niño en el Perú,” accesado: 01, 27, 2024 [Online], disponible en: https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/07/Dossier-El-Ni%C3%B1o-Final_web.pdf.

[3] B. M. Das, “Principles of Geotechnical Engineering,” Cengage Learning, 2019.

[4] T. Harmsen, “Diseño de estructuras de concreto armado,” Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 2017.

[5] AASHTO, “LRFD Bridge Design Specifications,” American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020.

[6] Eurocode 7, “Geotechnical design - Part 1: General rules,” European Committee for Standardization, 2004.

[7] M. King, "Comparative analysis of seismic design codes," Journal of Structural Engineering, vol. 45, pp. 120-135, 2021.

[8] Autoridad Nacional del Agua, Plan de gestión de recursos hídricos de cuenca Tumbes, actualizado al 2023.

[9] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, "Manual de Puentes," Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, Lima, Perú, 2016.

[10] F. de Borja Varona Moya, J. A. López Juárez, y L. Bañón Blázquez, Apuntes de Hormigón Armado: Adaptados a la Instrucción EHE-08. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante.

[11] American Concrete Institute, "Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures (ACI 350.3-06)", ACI 350.3-06, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2006.

[12]Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. "E.060 Concreto Armado." Normas Técnicas Peruanas, 2009.

[13] EDIC, Ingeniería Básica CH La Mina: Bases de Diseño Estructural, 1st ed. EDIC, 2012.

[14] F. J. Jordán, R. Ferraz, and J. A. Sobrino, "Análisis comparativo del diseño de un puente mixto mediante Eurocódigo y AASHTO LRFD," Hormigón y Acero, vol. 65, no. 271, pp. 63-70, 2014, doi: 10.1016/S0439-5689(14)50007-1.

[15] U.S. Army Corps of Engineers, "Manual of Retaining Wall Structures", U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C., USA, 1997.