

# Optimización de la Altura de Relleno Sobre una Alcantarilla Circular TMC Empleando el Método de Elementos Finitos

## Optimization of Backfill Height Over a CMP Circular Culvert Using the Finite Element Method

**Angel Sullcaray-Ichpas**

Universidad Nacional de Huancavelica, Perú

E-mail: [2017151046@unh.edu.pe](mailto:2017151046@unh.edu.pe) ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0576-7872>

**Omar Caballero-Sánchez**

Universidad Nacional de Huancavelica, Perú

E-mail: [omar.caballero@unh.edu.pe](mailto:omar.caballero@unh.edu.pe) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8126-3835>

**Anderson Luis Barreto-Goñi**

Universidad Nacional de Ingeniería, Perú

E-mail: [abarretog@uni.pe](mailto:abarretog@uni.pe) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2550-3942>

### Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo desarrollar una optimización de la altura de relleno sobre una alcantarilla circular de tubería metálica corrugada (TMC) empleando modelos de elementos finitos tridimensionales (3D), considerando la interacción suelo-estructura y el comportamiento no lineal del suelo in situ y el relleno. El modelo numérico fue validado comparando la salida del modelo con los resultados de una prueba a escala real realizado por Mai et al. (2014) en Queen's University, Ontario, Canadá. Luego, se utilizaron modelos 3D de elementos finitos para estudiar el comportamiento de la tubería circular TMC durante el proceso de relleno y bajo un camión de carga HL-93, para ello se consideró dos modelos constitutivos no lineales de suelo comúnmente utilizados, el modelo de Mohr-Coulomb (MC) y el modelo Hardening Soil (HS). En cuanto a los resultados obtenidos de la altura de relleno final sobre la tubería circular TMC analizado fueron: se obtuvo una altura de relleno final de 25 cm, con una carga viva vehicular superficial de 740.18 kN/m<sup>2</sup>, donde se observó que el ratio de la resistencia de la costura de la tubería se ubicó en un rango de diseño óptimo, por lo que fue posible optimizar la altura de relleno mínimo sobre la corona recomendada por los códigos del AASHTO y el AISI en un 16.67%.

### Palabras Clave

Método de elementos finitos, Interacción suelo-estructura, No lineal, TMC, HI-93.



## Abstract

The present research work aims to develop an optimization of the backfill height over a circular culvert made of corrugated metal pipe (CMP) using three-dimensional (3D) finite element models, considering the soil-structure interaction and the nonlinear behavior of the in-situ soil and the backfill. The numerical model was validated by comparing the output of the model with the results of a full-scale test performed by Mai et al. (2014) at Queen's University, Ontario, Canada. Then, 3D finite element models were used to study the behavior of the circular TMC pipe during the backfill process and under a HL-93 cargo truck. For this purpose, two commonly used nonlinear soil constitutive models were considered, the Mohr-Coulomb (MC) model and the Hardening Soil (HS) model. Regarding the results obtained from the final fill height on the TMC circular pipe analyzed were: a final fill height of 25 cm was obtained, with a superficial vehicular live load of 740.18 kN/m<sup>2</sup>, where it was observed that the ratio of the seam resistance of the pipe was located in an optimal design range, so it was possible to optimize the minimum fill height over the crown recommended by the AASHTO and AISI codes by 16.67%.

## Keywords

Finite element method, Soil-structure interaction, Nonlinear, CMP, HI-93.

## Zusammenfassung

Die vorliegende Forschungsarbeit zielt darauf ab, eine Optimierung der Verfüllhöhe über einem kreisförmigen Durchlass aus Wellblechrohren (TMC) mithilfe dreidimensionaler (3D) Finite-Elemente-Modelle zu entwickeln, wobei die Boden-Bauwerk-Interaktion und das nichtlineare Verhalten des anstehenden Bodens und der Verfüllung berücksichtigt werden. Das numerische Modell wurde validiert, indem die Modellausgaben mit den Ergebnissen eines von Mai et al. (2014) an der Queen's University in Ontario, Kanada, durchgeführten Großtests verglichen wurden. Anschließend wurden 3D-Finite-Elemente-Modelle verwendet, um das Verhalten des kreisförmigen TMC-Rohrs während des Verfüllvorgangs und unter einem HL-93-Muldenkipper zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden zwei häufig verwendete nichtlineare Bodenkonstitutivmodelle berücksichtigt, das Mohr-Coulomb-Modell (MC) und das Hardening-Soil-Modell (HS). Die Ergebnisse der endgültigen Füllhöhe des analysierten TMC-Rundrohrs waren: Es wurde eine endgültige Füllhöhe von 25 cm mit einer Nutzlast von 740,18 kN/m<sup>2</sup> erreicht. Dabei wurde beobachtet, dass das Verhältnis des Rohrnahtwiderstands in einem optimalen Auslegungsbereich lag, sodass es möglich war, die von den AASHTO- und AISI-Codes empfohlene Mindestfüllhöhe auf der Krone um 16,67 % zu optimieren.

## Schlüsselwörter

Finite-Elemente-Methode, Boden-Bauwerk-Interaktion, Nichtlinear, CMP, HI-93.



## 1. Introducción

En el Perú y el mundo, el sector de la construcción experimenta un crecimiento constante, enfrentando desafíos como la escasez de materias primas y el aumento de la demanda de materiales. Esto motiva a los ingenieros a desarrollar diseños innovadores y óptimos que garanticen la seguridad estructural sin comprometer la eficiencia. El objetivo es minimizar el consumo de materiales, reduciendo así el impacto ambiental y económico.

Las alcantarillas de metal corrugado (TMC) se han utilizado ampliamente como un sistema prometedor para estructuras enterradas, debido a sus ventajas en comparación con los túneles de hormigón armado convencionales (El Sawy, 2003). Desde la década de 1850, las TMC se han instalado en redes de transporte e instalaciones de suministro de agua en Europa y América del Norte para transportar el flujo de agua de arroyos o lluvias. La razón principal para el uso de tales alcantarillas es su perfil corrugado que se entrelaza con los suelos circundantes, proporcionando así un confinamiento general con una mayor capacidad (Ezzeldin y El Naggar, 2021). Su estructura flexible permite que las alcantarillas corrugadas se formen fácilmente en diferentes formas, como geometrías circulares, de arco, de elipse y de caja.

Para el diseño de las alcantarillas TMC y tuberías flexibles enterradas, actualmente en todo el mundo se utilizan varios códigos conocidos, como el Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC), el código de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y la American Iron and Steel Institute (AISI) las cuales están formulados como enfoques analíticos.

Lougheed (2008) en su investigación de tesis de maestría menciona que, no solo los momentos calculados a partir del código son conservadores, sino que para la carga viva el código calcula que los momentos en la cartela serán mayores que en la corona, pero los resultados de las pruebas indican lo contrario. Esto demuestra que, aunque hay una disminución de los momentos flectores debida a la carga superficial, el aumento del momento flector por la carga muerta del suelo es mayor. Teniendo esto en cuenta, debería



ser posible calcular la altura óptima de la cubierta para equilibrar el aumento de la rigidez y la carga muerta del suelo.

En ese sentido, el objetivo del estudio es aprovechar los modelos numéricos avanzados como es el método de elementos finitos para realizar el cálculo de una cobertura de relleno óptimo sobre las alcantarillas circulares TMC, debido a que los códigos de diseño de estas estructuras están basadas en métodos analíticos y empíricos, por lo que los diseños podrían estar sobredimensionados, elevando así la cantidad de material de relleno, y como consecuencia esto afectaría también otros aspectos, como son el costo de excavación, transporte del material, colocación, y con ello, el consumo de combustible y energía no renovable.

## 2. Estado del arte o Marco Teórico

El estudio del comportamiento de alcantarillas TMC (tubería metálica corrugada) bajo cargas de relleno y carga viva superficial empleando el método de elementos finitos, últimamente es muy estudiado por muchos autores especialmente en Europa y Norte América.

Mai et al. (2014), realizaron pruebas experimentales en dos alcantarillas de acero de 1.8 m de diámetro y 3 m de longitud, con diferentes grados de deterioro (corrosión) que fueron extraídas del campo, luego enterradas en un pozo de prueba de 8 m de largo y 8 m de ancho y probadas bajo cargas de relleno y cargas vivas en el laboratorio de Queen's University. Los resultados mostraron que, bajo pocas alturas de relleno, la relación entre el empuje y la carga aplicada tienden a ser no lineal, y las fuerzas que llegan sobre la alcantarilla debido a la carga viva aumentan significativamente a medida que disminuye la profundidad de cubierta

El Sawy (2003) realizó el análisis de dos sistemas de suelo-acero existentes (alcantarilla de Deux Rivieres y Adelaide) empleando elementos finitos tridimensionales (3D), considerando alcantarillas con propiedades isotrópicas y ortotrópicas, y utilizando el modelo de suelo lineal-elástico para el relleno, luego comparó con los resultados teóricos y



experimentales publicados. El resultado fue que los empujes calculados a partir del análisis de elementos finitos 3D de alcantarillas ortotrópicas, se comparan bien con los datos medidos experimentalmente con diferencias inferiores al 30%, mientras que la alcantarilla isotrópica mostró una sobreestimación en la alcantarilla de Deux Rivieres y subestimación en la alcantarilla de Adelaide. Se concluyó que los análisis de elementos finitos para los momentos de flexión circunferenciales en alcantarillas ortotrópicas muestran una concordancia razonable con los datos experimentales, pero que aún se requiere más investigación para evaluar la flexión en las alcantarillas, especialmente con cubiertas de suelo poco profundas y que esto puede requerir realizar análisis no lineales bajo el efecto combinado de cargas vivas y del relleno.

Lougheed (2014), llevó a cabo pruebas a gran escala de una alcantarilla de arco enterrada, corrugada y profunda de una luz de 10 m, en condiciones controladas de laboratorio. Llevó un total veintiún experimentos en la alcantarilla, midiendo su respuesta sin relleno, durante el relleno, bajo un camión con eje tándem cargado y bajo la carga de un vehículo simulado con una fuerza aplicada por un actuador. Los resultados fueron que el momento máximo aumentó de 6 a 41 kN.m/m a medida que la cubierta se reducía de 1.5 a 0.45 m y todos los resultados calculados utilizando el código canadiense sobrepredicen los valores. Los resultados del código son entre un 20% y un 880% superiores a los resultados de las pruebas. Concluyendo que no sólo los momentos calculados a partir del código son conservadores, sino que para la carga viva el código calcula que los momentos en la cartela serán mayores que en la corona, pero los resultados de las pruebas indicaron lo contrario.

### **3. Estado del Arte o Marco Teórico**

#### **3.1 Alcantarillas de metal corrugado**

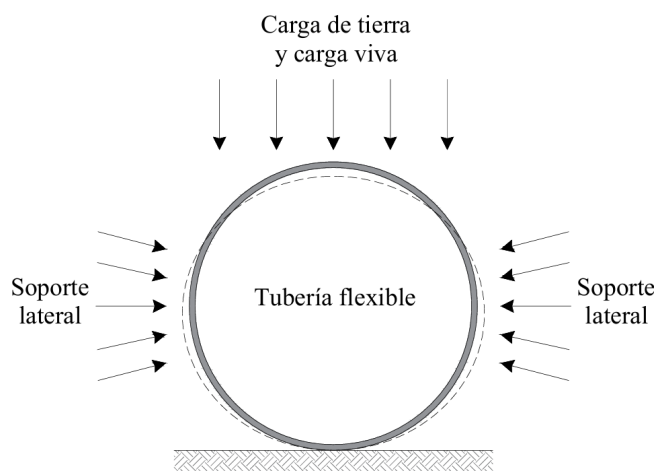
Las alcantarillas TMC son conductos de acero corrugado, reconocidos desde hace mucho tiempo por su resistencia estructural sobresaliente bajo las cargas subterráneas más pesadas, ahora se entienden como un compuesto complejo el resultado de la interacción entre el suelo y el acero (AISI, 2007).



**3.1.1 Interacción suelo-tubería:** Cualquier sistema físico en el que una estructura está en contacto directo con el suelo implica cierto grado de interacción suelo-estructura. Sin embargo, en ciertas situaciones, la relación entre la respuesta del suelo y el movimiento de la estructura (y viceversa) está más integrada que en otras (El Naggar et al, 2021). Las tuberías metálicas corrugadas flexibles enterrados sometidos a cargas de tierra y cargas vivas, por ejemplo, interactúan con el suelo circundante hasta tal punto que se comportan como estructuras compuestas (suelo-metal).

**Figura 1**

*Soporte lateral de la tubería desarrollado bajo carga*



**Nota:** Adaptado desde la referencia (Ballinger et al., 1995, p.78)

Quando las tuberías flexibles están enterradas, el relleno lateral (tierra colocada al lado de la tubería entre la zanja y la corona) proporciona una restricción lateral tal como se muestra en la figura 1, lo que permite que la tubería mantenga su forma sin el desarrollo de momentos de flexión, y que las cargas verticales se convierten en fuerza axial circunferencial en la tubería. Dado que las tuberías metálicas corrugadas suelen tener una rigidez circunferencial baja, la presencia del relleno lateral aumenta significativamente su capacidad de carga. Los rellenos laterales más densos (más rígidos) brindan más soporte que los rellenos laterales sueltos.



**3.1.2 Cargas:** La carga viva vehicular en las calzadas de los puentes o estructuras incidentales, designado HL-93, consistirá en una combinación de (AASHTO, 2017):

- Camión de diseño (anteriormente, HS20-44 Truck) o tandém de diseño.
- Carga de carril de diseño.

Para las estructuras enterradas sólo se aplican las cargas de eje del camión o del tandém, cualquiera de ellos que produzca los efectos más desfavorables.

### 3.2 Metodología LRFD para estructuras enterradas

La metodología LRFD para estructuras enterradas incluye tanto estados límite de servicio como estados límite de resistencia. Una consecuencia de los dos estados límite cuando se utiliza un método de solución integral es que puede ser necesario obtener dos soluciones independientes, una con carga de servicio y otra con carga factorizada (Katona, 2022).

**3.2.1 Estados límite de servicio:** De acuerdo al artículo 12.5.3 del AASHTO (2017), las deflexiones en las estructuras enterradas se deberán investigar para la combinación de cargas correspondiente al Estado Límite de Servicio I.

**3.2.2 Estados límite de resistencia:** Las estructuras enterradas se diseñan para la combinación de cargas de resistencia I y II. Los criterios de diseño para el metal corrugado de acuerdo a la metodología de diseño AASHTO LRFD incluyen límites de resistencia para el esfuerzo de empuje contra la fluencia del material en la compresión circunferencial, pandeo global y ruptura de la resistencia de la costura. El resumen de los criterios de diseño se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1**  
*Criterios de diseño para metal corrugado*

Criterios de diseño (Límites de resistencia)	Demanda	Capacidad
(1) Resistencia de la pared	$\sigma_{max} = \frac{N_{max}}{A}$	$f_y$ =Límite elástico (Aashto Eq. 12.7.2.3)
(2) Pandeo global	$\sigma_{max} = \frac{N_{max}}{A}$	$f_b$ =Capacidad al pandeo (Aashto Eq. 12.7.2.4)
(3) Resistencia de la costura	$\sigma_{max} = \frac{N_{max}}{A}$	$f_s$ =Resistencia de la costura (Aashto Eq. 12.7.2.5)



**Límites de rendimiento  
 (Cargas de servicio)**

(4) Deflexión admisible	$\Delta_{max} = \text{Def. calculada}$	Admisible=5% (Luces largas = 2%) (Aashto Eq. 12.5.3)
-------------------------	--	---

Donde:

$N_{max}$  = Máxima fuerza de empuje

A = Área de la sección

**3.3 Método de elementos finitos**

La formulación estática de elementos finitos basada en el trabajo virtual incremental es ideal para caracterizar problemas de estructuras enterradas porque la carga se puede aplicar en una serie de pasos que representan incrementos de presión de sobrecarga, carga de construcción temporal y cargas vivas de vehículos. En el caso de sistemas de alcantarillas y suelo, el enfoque incremental adquiere un significado más amplio que simplemente los pasos de carga incremental. Es decir, no solo la carga, sino también el sistema estructural se puede ensamblar en incrementos. Este proceso se denomina técnica de "construcción incremental" y es el análogo matemático del proceso físico de construcción del sistema de suelo en una serie de capas compactadas o elevaciones. Las predicciones estructurales de un sistema incremental son más realistas que las de un sistema monolítico equivalente. Otra ventaja de la formulación de trabajo virtual incremental es la relativa facilidad de incorporar y resolver varios modelos no lineales (Katona, 2022). La notación matricial para un sistema estructural continuo general, y el trabajo virtual incremental se puede expresarse como:

$$\int_V \delta \epsilon^T \Delta \sigma dV = \int_S \delta u^T \Delta \tau dS + \int_V \delta u^T \Delta f dV \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

$\sigma$  = Vector de esfuerzos

$\epsilon$  = Vector de deformaciones

$u$  = Vector de desplazamientos

$\tau$  = Vector de tracción superficial



$f$  = Vector de fuerzas del cuerpo

$\delta x$  = Pequeña variación virtual de cualquier vector,  $\delta$  es un operador

$\Delta x = x_{i+1} - x_i$ , Cambio incremental en cualquier vector  $x$  desde el paso de carga  $i$  hasta  $i+1$

$S$  = Superficie de las cargas de tracción en el paso de carga  $i+1$

$V$  = Volumen del sistema estructural en el paso de carga  $i+1$

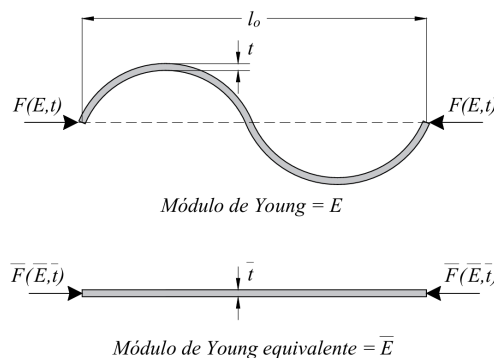
### 3.4 Formulación de la placa ortotrópica

Modelar explícitamente la geometría de las corrugas de la tubería metálica corrugada (TMC) en tres dimensiones mediante elementos de volúmenes en plaxis 3D, podría resultar engorroso. Como en este estudio el perfil de corrugación de la alcantarilla TMC (67.7 mm x 12.7 mm) es muy fino en relación con las dimensiones totales del modelo, según El Naggar et al. (2021) este enfoque requeriría un número extremadamente elevado de elementos finitos muy pequeños para describir el elemento estructural.

En este estudio se adoptó el enfoque común de modelar la tubería metálica corrugada como una tubería de pared lisa con propiedades ortotrópicas o equivalentes, ya que modelar la tubería bajo este enfoque, se compara bien con los resultados experimentales, tal como demostraron El Sawy (2003) y Lang y Su (2022) en investigaciones anteriores.

#### Figura 2

*Módulo de Young longitudinal equivalente vs módulo de Young real de la tubería metálica corrugada*



**Nota:** Adaptado desde la referencia (El Sawy, 2003, p.756)

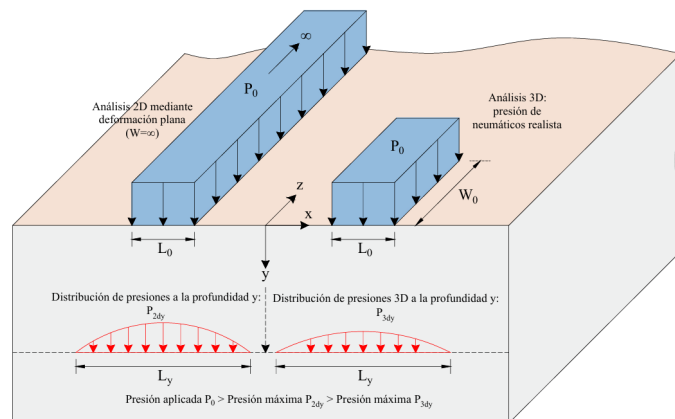


### 3.5 Modelamiento de carga viva

Mediante el análisis 2D de elementos finitos, no se puede reproducir la propagación de la carga viva a través del suelo de relleno. El Naggar et al. (2021) menciona que los modelos 2D FEM se basan en el uso de un factor de distribución de carga para determinar una carga lineal “equivalente” que se aplicaría en la superficie del suelo. Este factor se desarrolló para producir valores (generalmente) conservadores de empuje para condiciones de carga típicas (ver Fig. 3). Por el contrario, la distribución de carga en el modelo 3D FEM se tiene en cuenta explícitamente. Para superar este problema, fue necesario aplicar el análisis 3D de elementos finitos al presente problema de investigación.

**Figura 3**

*Ilustración de aplicación de presión ejercida por la rueda en el análisis 2D y 3D*



**Nota:** Adaptado desde la referencia (Katona, 2022, p.256)

### 3.6 Validación del modelo numérico

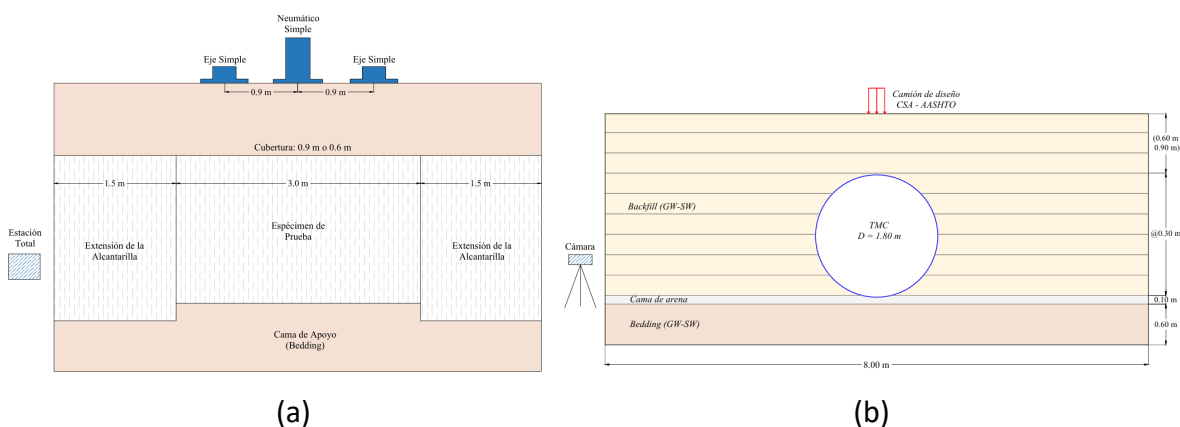
En este apartado, se presenta la validación del modelo numérico, donde la salida del modelo se compara con los resultados de los experimentos de laboratorio a escala real realizados por Mai et al. (2014) en Queen’s University. Este experimento fue seleccionado para calibrar el modelo numérico debido a la disponibilidad de datos exhaustivos y bien documentados, incluyendo geometría, propiedades de la tubería y el suelo, y metodología de prueba. Además, un experimento controlado en el laboratorio garantiza una mayor precisión en las mediciones en comparación con las pruebas realizadas en campo.



El estudio se centra en la tubería CSP2 (alcantarilla intacta), analizando su comportamiento durante el proceso de relleno y la aplicación de la carga viva superficial de camiones de diseño AASHTO y CAN-SCA. La tubería se enterró en un pozo de prueba con dimensiones de 8 x 8 x 3 metros, con una capa lateral y superior compactada al 95% de la máxima densidad seca. Posteriormente, se rellenó hasta una cobertura de 0.9 metros y se sometió a carga viva superficial. Luego, se redujo la cobertura a 0.6 metros y se repitió el proceso de carga.

**Figura 4**

(a) Configuración de la prueba en laboratorio. (b) Representación del ensayo de laboratorio para modelamiento en Plaxis 3D



**3.6.1 Propiedades de la alcantarilla de prueba:** Según la norma ASTM A653 (2001), el acero utilizado en las láminas de las alcantarillas metálicas tenía una resistencia mínima a la fluencia de 230 MPa, una resistencia mínima a la tracción de 310 MPa y un módulo de Young de 200 GPa. Las propiedades ortotrópicas de la tubería CSP2 se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 2**

*Propiedades ortotrópicas de la tubería CSP2*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Diámetro	D	1.8	m
Espesor	t	4.5	mm
Longitud de la corrugación	L	67.7	mm
Profundidad de la corrugación	h	12.70	mm
Espesor ortotrópico	t'	15.32	mm
Peso unitario ortotrópico	$\gamma'$	24.47	kN/m <sup>3</sup>
Módulo de Young	E	200	GPa



Módulo de elasticidad ortotrópico longitudinal	$E_L = E_1$	5066.25	MPa
Módulo de elasticidad ortotrópico circunferencial	$E_\theta = E_2$	63567.03	MPa
Módulo de corte ortotrópico en el plano	$G_{\theta L} = G_{12}$	6902.17	MPa
Módulo de corte longitudinal ortotrópico fuera del plano	$G_{LR} = G_{13}$	1948.56	MPa
Módulo de corte fuera del plano ortotrópico circunferencial	$G_{\theta R} = G_{23}$	24448.86	MPa
Relación de Poisson ortotrópico	$\nu'$	0	-

**Nota:** Adaptado desde la referencia (El Naggar et al., 2021)

**3.6.2 Propiedades del suelo de relleno:** Para el relleno y la cama de apoyo (Bedding), se utilizó grava arenosa bien graduada (GW-SW) o material clasificado como A-1 por el sistema de clasificación AASHTO. Ambos materiales se compactaron al 95% del Proctor estándar (es decir, el 95% de la densidad máxima seca alcanzado en la prueba Proctor estándar) utilizando un apisonador de placa vibratoria, y el espesor de la cama de apoyo fue de 0.6 m. Las propiedades para los modelos de suelo MC y HS que obtuvieron El Naggar et al. (2021) a partir del grado de compactación y la clasificación del suelo utilizado por Mai et al. (2014) en su experimento se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3**  
*Propiedades del suelo usados para el modelo MC y HS*

Parámetro	Símbolo	MC	HS	Unidad
Peso unitario	$\gamma_s$	21.9	21.9	kN/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	$E=E_{50}$	60.0	60.0	MPa
Módulo edométrico	$E_{edo}$	-	48.0	MPa
Módulo de descarga-recarga	$E_{ur}$	-	180.0	MPa
Relación de Poisson	$\nu$	0.3	0.3	-
Cohesión	$c'$	5	5	kPa
Ángulo de fricción	$\phi'$	40	40	°
Ángulo de dilatación	$\psi'$	0	0	°
Coef. de interfaz	$R_{in}$	0.67	0.67	-

**Nota:** Adaptado desde la referencia (El Naggar et al., 2021)

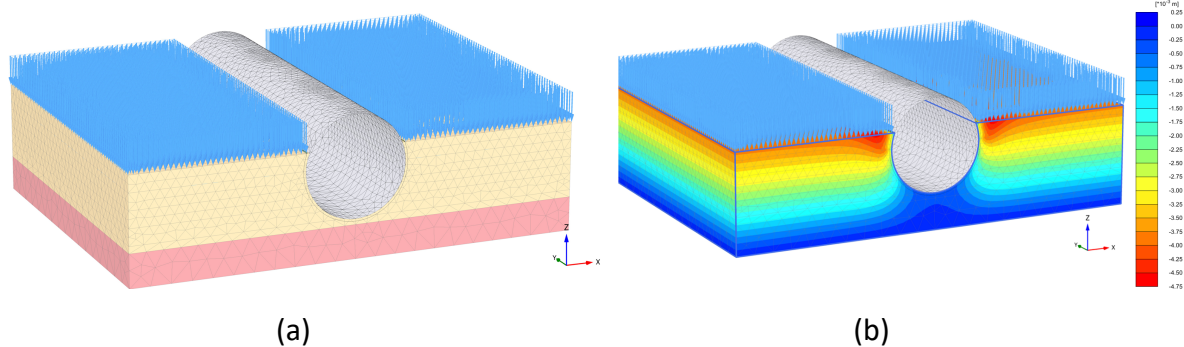
**3.6.3 Aplicación de la carga viva:** La carga viva superficial se basó en los camiones de diseño CSA CL-625 y AASHTO, considerando tolerancias dinámicas y factores de presencia múltiple.

**3.6.4 Modelamiento del experimento en Plaxis 3D:** Se representó la configuración del experimento de Mai et al. (2014) en Plaxis 3D (ver la Fig. 4 (ab)), para estudiar el comportamiento de la tubería metálica corrugada y realizar las comparaciones con los resultados experimentales.



**Figura 5**

(a) Representación del experimento de Mai et al. (2014) en Plaxis 3D. (b) Deformaciones verticales en las capas del suelo durante la aplicación de la carga de compactación.



**3.6.5 Resultados de la validación:** La calibración del modelo numérico se realizó utilizando dos modelos de suelo no lineales: Mohr-Coulomb (con y sin compactación) y Hardening Soil (con compactación). El objetivo fue evaluar la precisión de los modelos constitutivos y la importancia de considerar los efectos de compactación en el análisis de alcantarillas de TMC durante el proceso de relleno y simular el proceso constructivo real.

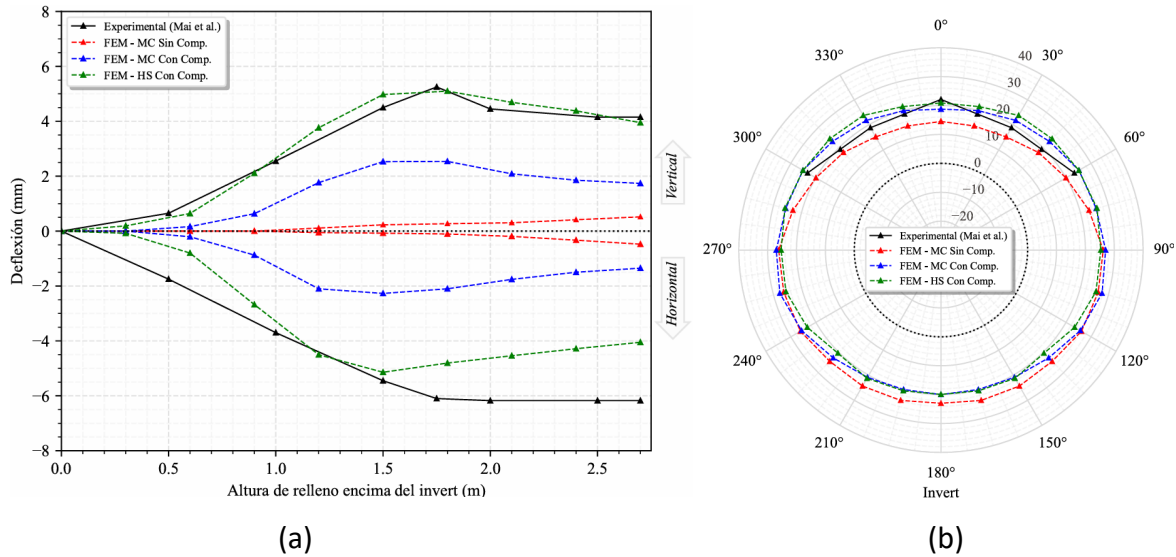
**Carga muerta**

La Fig. 6 (a) ilustra las deflexiones verticales y horizontales durante el relleno de la tubería CSP2. Aunque el modelo MC sin compactación presentó resultados significativamente inferiores a los experimentales, la inclusión de la compactación en el modelo MC mejoró notablemente la precisión, aunque aún por debajo de los valores experimentales. En contraste, el modelo HS con compactación logró replicar con mayor precisión la respuesta experimental, lo que sugiere que el endurecimiento por deformación del modelo de suelo HS fue efectivo para transferir las cargas laterales a la tubería TMC.

**Figura 6**

(a) Deflexión vertical y horizontal (cambio de diámetro) de la tubería CSP2 durante el relleno hasta una altura de relleno de 0.9 m. (b) Distribuciones del empuje circunferencial alrededor de la tubería CSP2 una vez completado el relleno hasta una altura de relleno de 0.9 m.





La Fig. 6 (b) muestra la distribución total del empuje circunferencial alrededor de la tubería CSP2. Los modelos MC y HS con compactación mostraron una buena concordancia con los resultados experimentales, sin embargo, el modelo MC sin compactación presentó una subestimación del empuje en la corona.

### Carga viva

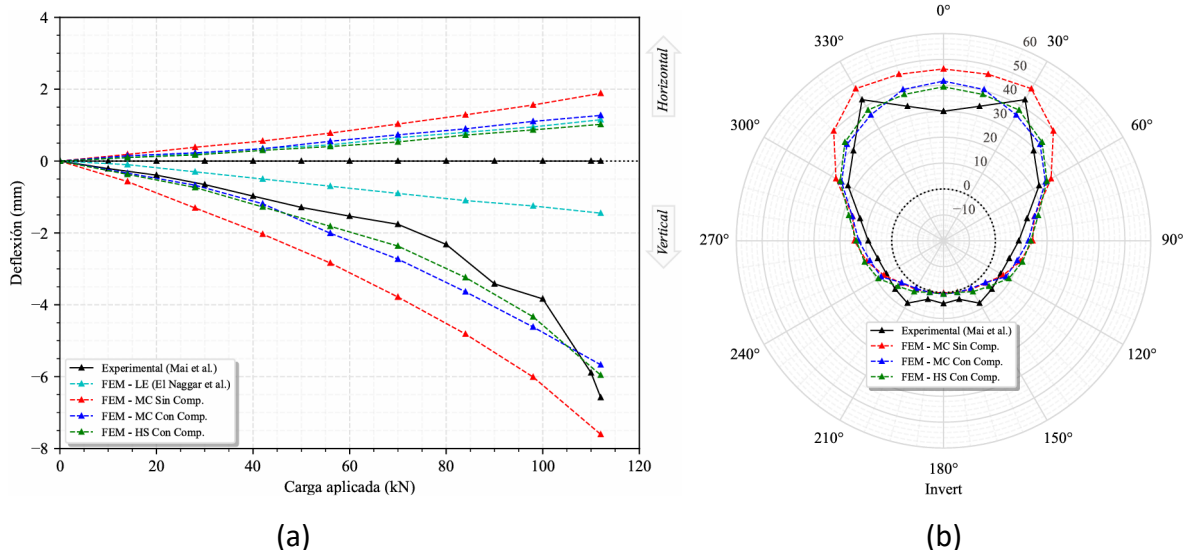
La aplicación de la carga viva del camión de diseño CSA con una altura de relleno de 0.6 m reveló una relación no lineal entre la carga aplicada y la deflexión. El modelo de elementos finitos que utiliza los modelos de suelo MC y HS con compactación logró capturar esta tendencia de manera significativa. Sin embargo, el modelo MC sin compactación sobrestimó las deflexiones, tal como se muestra en la Fig. 7 (a). Este resultado contrasta con el modelo 3D de elementos finitos de El Naggar et al. (2021), que no logró capturar la relación no lineal utilizando el modelo de suelo Lineal Elástico (LE).

La aplicación de carga viva con una altura de relleno de 0.9 m reveló diferencias significativas en la magnitud del empuje en la corona entre los modelos MC con y sin compactación. El modelo MC sin compactación sobrestimó la magnitud del empuje en un 54% con respecto al valor experimental, mientras que los modelos MC y HS con compactación mostraron una estrecha relación y coincidieron con los valores experimentales, excepto en la corona (Sullcaray y Caballero, 2024).



**Figura 7**

(a) Deflexión vertical y horizontal (cambio de diámetro) de la tubería CSP2 durante la aplicación de la carga viva CSA (112kN) con una altura de relleno de 0.6 m. (b) Máxima fuerza de empuje incremental en la tubería CSP2 durante la aplicación de la carga viva AASHTO (87.5kN) con una altura de relleno de 0.9 m.



### Conclusiones de la validación

Los resultados mostraron que el modelo de suelo Hardening Soil (HS) que incorpora los efectos de compactación, predijo con precisión razonable la respuesta estructural de la alcantarilla observada en las pruebas experimentales. Aunque el modelo de suelo Mohr-Coulomb (MC) también se aproximó a los resultados, presentó una ligera divergencia en comparación con el modelo HS, y el modelo de suelo Mohr-Coulomb (MC) sin compactación tuvo una precisión menor. En consecuencia, en este estudio se utilizarán los modelos constitutivos de suelo Hardening Soil (HS) para el suelo de relleno y Mohr-Coulomb (MC) para el suelo in situ, incluyendo en ambos modelos los efectos de compactación, con el objetivo de analizar de manera precisa y eficaz el comportamiento estructural de las alcantarillas circulares de tubería metálica corrugada (TMC) (Sullcaray y Caballero, 2024).

### 4. Materiales y métodos



#### 4.1 Caso de estudio

El lugar de estudio del presente trabajo de investigación se llevó a cabo en el lugar de ejecución del proyecto: Mejoramiento de la Carretera Huancavelica – Yauli – Pucapampa (Ruta Hv - 112) del distrito de Yauli, provincia y región de Huancavelica, específicamente en las progresivas 19+400 y 19+640, la cantera de material de relleno del sector Jatunhuaycco del C.P. Ambato y en el laboratorio de Geotecnia II de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Huancavelica.

#### 4.2 Ensayo triaxial (suelo in situ)

En el marco del estudio, se recolectaron dos muestras de suelo in situ de zanjas de excavación localizadas en el tramo de la carretera Huancavelica - Yauli - Pucapampa (Ruta Hv - 112), específicamente en las progresivas 19+400 y 19+640. Se realizaron tres muestras cilíndricas de cada suelo in situ, las cuales posteriormente se sometieron al ensayo triaxial consolidado drenado (CD). Las presiones de confinamiento fueron estimadas con la ecuación de presión lateral de tierra propuesta por Braja (2001).

#### 4.2 Ensayo triaxial (suelo de relleno)

La muestra de suelo de relleno se extrajo de la cantera Jatunhuaycco, ubicada en el centro poblado de Ambato, distrito de Yauli, que es la fuente de explotación del material para relleno en la construcción de alcantarillas en la ejecución del proyecto: Mejoramiento de la carretera Huancavelica-Yauli-Pucapampa (Ruta Hv-112). Luego se realizaron probetas cilíndricas reconstituidas en el laboratorio, las cuales fueron compactadas al 95% de la máxima densidad seca obtenida en el ensayo Proctor estándar que fue de 2.26 gr/cm<sup>3</sup>. Posteriormente las muestras fueron sometidas al ensayo triaxial consolidado drenado (CD) con esfuerzos de confinamiento de 50, 100 y 200 kPa.

#### 4.3 Modelos constitutivos

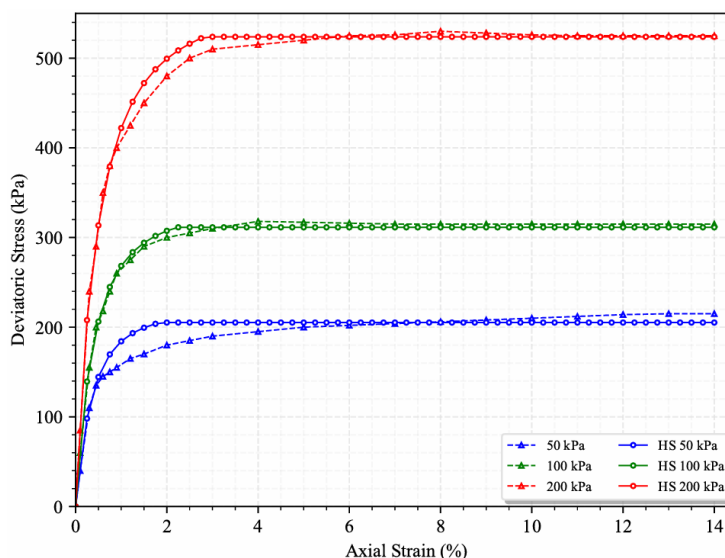
**4.3.1 Modelo de suelo Mohr-Coulomb:** A partir de los datos obtenidos en el ensayo triaxial consolidado drenado (CD) del suelo in situ de ambas progresivas, se realizó el cálculo de los principales parámetros para la calibración del modelo constitutivo de Mohr-Coulomb.



**4.3.2 Modelo de suelo Hardening Soil:** La calibración del modelo constitutivo Hardening Soil (HS) se llevó a cabo únicamente para el suelo de relleno debido a que este material tiene la función crítica de transmitir las cargas vivas hacia la alcantarilla de tubería metálica corrugada (TMC) y el suelo circundante, tal como se ha demostrado en la calibración previa del modelo numérico. Por otro lado, los esfuerzos que llegan al suelo in situ son significativamente menores, lo que hace que un modelo constitutivo elastoplástico perfecto sea suficiente para analizar este material (Sullcaray y Caballero, 2024).

**Figura 8**

*Modelo constitutivo HS del suelo de relleno*



## 5. Análisis de resultados

### 5.1 Modelado computacional

En esta sección se muestran los resultados del modelado computacional de la alcantarilla de tubería metálica corrugada (TMC) mediante el método de elementos finitos. Se considera el comportamiento no lineal del suelo in situ y el relleno mediante la aplicación de los modelos constitutivos de Mohr-Coulomb y Hardening Soil. La tubería se modela utilizando propiedades ortotrópicas, ya que modelar la geometría de las corrugas en tres dimensiones en Plaxis 3D, requeriría un número extremadamente elevado de elementos finitos muy pequeños para poder describir el elemento estructural y por consiguiente aumentar el costo computacional (Sullcaray y Caballero, 2024).

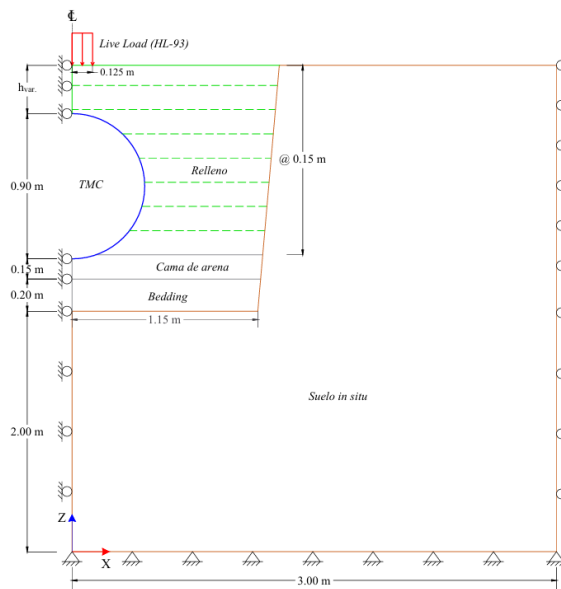


**5.1.1 Geometría del modelo:** En general, hay una diferencia notable con respecto al modelo ensayado por Mai te al. (2014) en el experimento de laboratorio, ya que se analiza la alcantarilla como una estructura enterrada en una zanja, lo que significa que los límites del modelo tanto horizontal y en la parte inferior, es un suelo in situ, el cual refleja las condiciones reales del problema en estudio.

**5.1.2 Condiciones de borde:** Se asignaron condiciones de borde laterales fijos (condición de Neumann) a los extremos horizontales (X-Y) del modelo para restringir cualquier deformación perpendicular en la dirección horizontal. Para la parte inferior del modelo, se asignó una condición de borde completamente fija (condición de Dirichlet) para evitar cualquier movimiento en las direcciones horizontal o vertical (Sullcaray y Caballero, 2024). Para permitir la deformación bajo la carga viva, la superficie superior del modelo se asignó para deformarse libremente en la dirección vertical, como se ilustra en la Fig. 9.

**Figura 9**

*Esquema de sección transversal vertical de la geometría del modelo 3D*

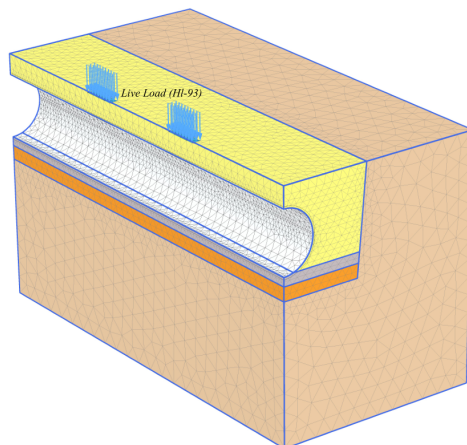


**5.1.3 Mallado:** Para el modelo, se seleccionó una configuración de mallado muy fina, con un factor de tamaño relativo de 0.5 para el suelo in situ y de 0.25 para las zonas adyacentes a la tubería, tal como se ilustra en la Fig. 10. Esto se hizo con el objetivo de obtener resultados más precisos en la zona circundante a la tubería, donde la precisión es crucial.



**Figura 10**

*Descritización del problema para el análisis con FEM*



Para discretizar los modelos, se utilizaron aproximadamente 79,045 elementos finitos y 119,449 nodos en cada uno, lo que implicó un aumento significativo en el coste computacional y el tiempo de cálculo, alcanzando un promedio de 11 horas por modelo.

**5.1.4 Propiedades de la alcantarilla TMC:** Durante la observación en campo, se identificaron dos tuberías TMC en las progresivas 19+400 y 19+640. Estas alcantarillas correspondían al modelo Minimultiplate SP MP 68, con características técnicas específicas: diámetro de 36 pulgadas y perfil de corrugación de 67 mm x 13 mm (paso x profundidad). De acuerdo con la información proporcionada por los fabricantes, el espesor comercial recomendado para tuberías de 36 pulgadas es de 2 mm (Sullcaray y Caballero, 2024).

**Tabla 4**  
*Propiedades isotrópicas de la alcantarilla TMC 36 in*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Diámetro	D	0.9	m
Espesor	t	2.00	mm
Longitud de la corrugación	L	67.7	mm
Profundidad de la corrugación	h	12.70	mm
Espesor ortotrópico	t'	15.05	mm
Peso unitario ortotrópico	$\gamma'$	10.19	kN/m <sup>3</sup>
Módulo de Young	E	210	GPa
Módulo de elasticidad ortotrópico longitudinal	$E_L = E_1$	492.81	MPa
Módulo de elasticidad ortotrópico circunferencial	$E_\theta = E_2$	27432.06	MPa
Módulo de corte ortotrópico en el plano	$G_{\theta L} = G_{12}$	2032.46	MPa
Módulo de corte longitudinal ortotrópico fuera del plano	$G_{LR} = G_{13}$	189.54	MPa
Módulo de corte fuera del plano ortotrópico circunferencial	$G_{\theta R} = G_{23}$	10550.79	MPa



Relación de Poisson ortotrópico	$v'$	0	-
---------------------------------	------	---	---

**5.1.5 Propiedades del suelo:** El modelo numérico incorporó cuatro tipos de suelo distintos: suelo in situ, suelo de apoyo (Bedding), cama de arena y suelo de relleno. Debido a las menores tensiones recibidas por parte de la carga viva, el suelo in situ se modeló utilizando el modelo de Mohr-Coulomb, lo que ayudó a reducir el coste computacional del modelo. Por otro lado, el suelo de apoyo, la cama de arena y el suelo de relleno, sujetos a mayores esfuerzos, se modelaron con el modelo de Hardening Soil, capaz de capturar comportamientos no lineales más complejos (Sullcaray y Caballero, 2024).

Debido a que no se tenían datos disponibles para la cama de arena, se tomó como referencia los resultados obtenidos por Ezzeldin et al. (2024), mediante un ensayo triaxial consolidado drenado (CD). Las propiedades de la arena se tomaron en el estado suelto, debido a que según las especificaciones del MTC (2013), debería evitarse su compactación excesiva, ya que este material sirve para realizar la nivelación de la tubería metálica y se encarga de distribuir uniformemente las cargas, y evitar la concentración de esfuerzos. Más allá de estas definiciones, la cama de arena colocado por debajo de la alcantarilla ayudaría a generar el arqueamiento positivo del suelo y hacer que parte de las presiones ejercidas por la carga viva se distribuyan al suelo de relleno lateral (Sullcaray y Caballero, 2024). Los parámetros del suelo utilizados en este estudio se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5**  
*Propiedades del suelo utilizados en el estudio*

Parámetro	Símb.	Valor					Unidad
		Suelo In situ 1	Suelo In situ 2	Suelo de Apoyo	Cama de Arena	Suelo de Relleno	
Modelo de suelo	-	MC	MC	HS	HS	HS	
Peso unitario	$\gamma_s$	17.94	17.32	21.08	16.75	21.08	kN/m <sup>3</sup>
Cohesión	$c'$	5.0	5.0	28.0	1.0	28.0	kPa
Ángulo de fricción	$\phi'$	28.0	25.0	31.0	30.0	31.0	°
Ángulo de dilatación	$\psi'$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	°
Módulo de Young	E	7624.15	5116.46	-	-	-	kPa
Relación de Poisson	$\nu$	0.30	0.30	0.20	0.20	0.20	-
Módulo secante	E <sub>50</sub>	-	-	64.20	20.00	64.20	MPa
Módulo edométrico	E <sub>edo</sub>	-	-	50.91	16.00	50.91	MPa
Módulo de descarga-recarga	E <sub>ur</sub>	-	-	182.20	60.00	182.20	MPa
Coef. de interfaz	R <sub>int.</sub>	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	-



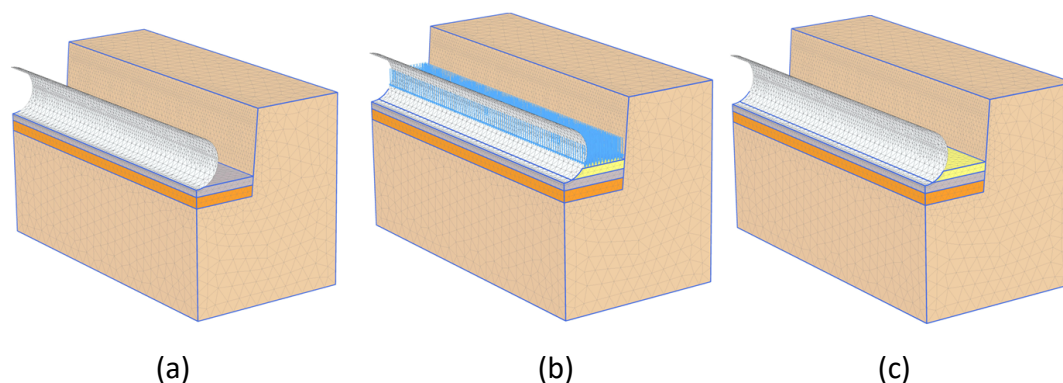
Los coeficientes de interacción se asignaron de acuerdo con las recomendaciones del manual de Plaxis (2024). Debido a la presencia de materiales granulares en el suelo, la cual no está contemplada en las recomendaciones del manual, se optó por aplicar el criterio de incertidumbre propuesto por el mismo manual. En ese sentido, se asignó un factor de reducción de 0.67, valor recomendado cuando existe alta incertidumbre del valor o existen materiales con interacciones desconocidas. Además, con el fin de garantizar la estabilidad numérica y mejorar la convergencia del modelo, se asignó necesariamente una cohesión mínima de 5 kPa al suelo in situ de ambas progresivas (Sullcaray y Caballero, 2024)..

Cabe resaltar que para el cálculo de la relación de Poisson no se utilizaron los datos de deformación volumétrica respordadas por el laboratorio por dar valores generalmente altos, en su lugar se utilizó los valores propuestos por Look (2007) en el “Handbook of geotechnical investigation and design tables”.

**5.1.6 Secuencia de modelamiento:** La secuencia de modelado para la construcción por etapas (es decir, proceso de relleno) de la alcantarilla de tubería metálica corrugada se ilustra en la Fig. 11. Aquí se realiza el análisis del caso completo, en el que se incluyen los efectos de compactación.

**Figura 11**

*El procedimiento para simular los efectos de compactación. (a) Activar la capa y aplicar la carga, (b) Retirar la carga (c) Repetir para la siguiente capa.*



La carga viva superficial estimada se basó en la carga del camión de diseño AASHTO HL-93, ya que un análisis previo reveló que el camión de diseño genera las condiciones más desfavorables en comparación con el tándem de diseño. Este análisis previo, concuerda con



los hallazgos de Katona (2022), quien había encontrado que La carga que genera los efectos más desfavorables sobre las alcantarillas enterradas es la carga del eje simple apoyado directamente sobre la corona de la tubería (Sullcaray y Caballero, 2024)..

Las cargas vivas incluyen las tolerancias dinámicas y los factores de presencia múltiples para producir una carga de servicio completa tal como especifica la norma AASHTO (2017) y se aplicaron directamente en la línea central de la corona de la tubería.

**Tabla 6**  
*Carga viva vehicular bajo diferentes alturas de relleno*

Hfill	mpf	LLF	IM	limp	LL (SW)	Q (SW)
m	-	-	%	-	kN	kPa
0.25	1.0	1.0	29.62	1.30	92.52	740.18
0.30	1.0	1.0	28.94	1.29	91.81	734.49
0.60	1.0	1.0	24.88	1.25	88.96	711.72
0.90	1.0	1.0	20.82	1.21	86.12	688.94
2.00	1.0	1.0	5.93	1.06	75.44	603.53

La carga viva HL-93 se modeló para dos alturas de relleno distintas (25 y 30 cm), de acuerdo a los valores proporcionados en la Tabla 6, donde la fuerza total aplicada se convirtió en una carga superficial uniformemente distribuida en un área igual a las huellas del neumático especificada por la AASHTO.

### 5.2 Altura de relleno de 30 cm

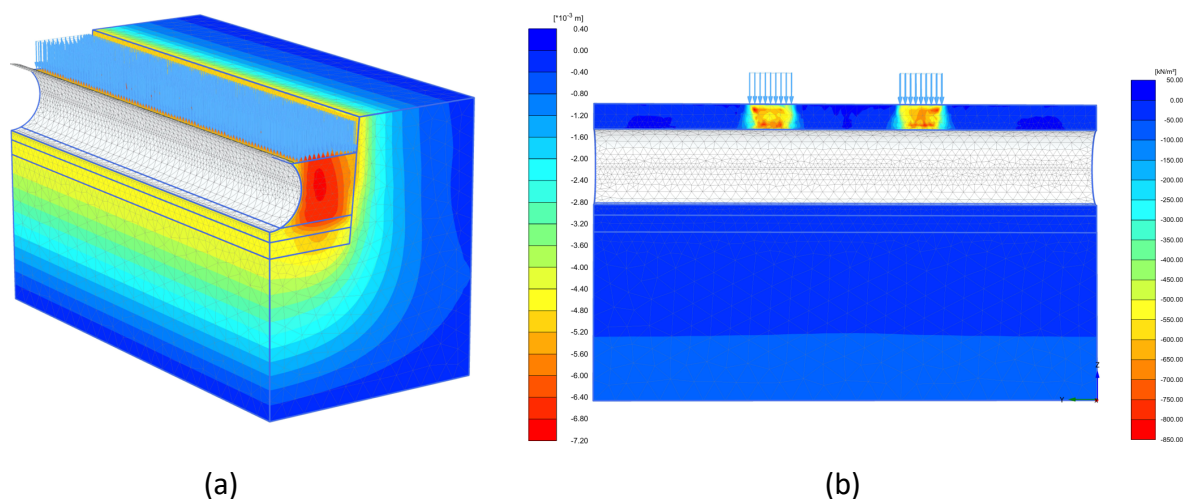
De acuerdo con las recomendaciones conjuntas de la norma AASHTO (2017) y el AISI (2007) se establece una altura de relleno mínima de 30 cm sobre la corona de las alcantarillas TMC con una luz menor a 3 m. Tomando este valor como referencia, se realiza un modelado detallado mediante el método de elementos finitos (MEF) para evaluar el comportamiento estructural de la tubería bajo esta altura de relleno y explorar su posible optimización, lo que constituye el objetivo principal de esta investigación (Sullcaray y Caballero, 2024).



En la fase 4 se inició con la compactación del relleno lateral y superior, la carga superficial en las capas laterales fue mayor que en las capas por encima de la corona, esto se realizó siguiendo las recomendaciones del Manual de Carretera del MTC (2013), que menciona que las capas por encima de la corona no se compactarán excesivamente hasta llegar por lo menos a una altura de relleno de 30 cm sobre la corona.

**Figura 12**

*(a) Deformaciones verticales en las capas inferiores durante la aplicación de la carga de compactación en la capa 5 (Alc. TMC prog. 19+400). (b) Esfuerzos verticales en el suelo durante la aplicación de la carga viva (Alc. TMC prog. 19+400).*

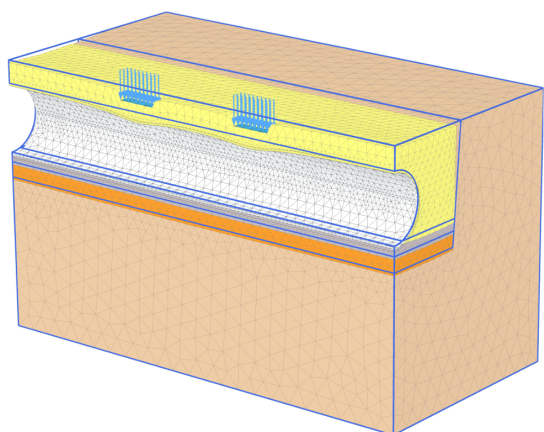


Durante la aplicación de la carga viva, los esfuerzos verticales en la capa de relleno por encima de corona de la alcantarilla fueron significativos, alrededor de 800 kN/m<sup>2</sup>, y la mayoría de estos esfuerzos fueron descargados hacia la tubería por la poca altura de relleno sobre esta (ver Fig. 12b).

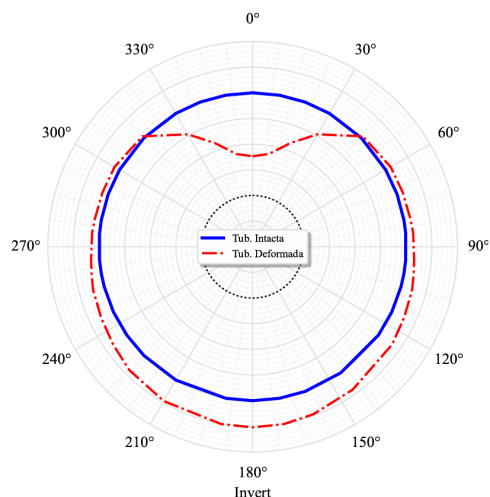
**Figura 13**

*Deformada de la tubería después de la aplicación de la carga viva (Alc. TMC prog. 19+400).*





(a)

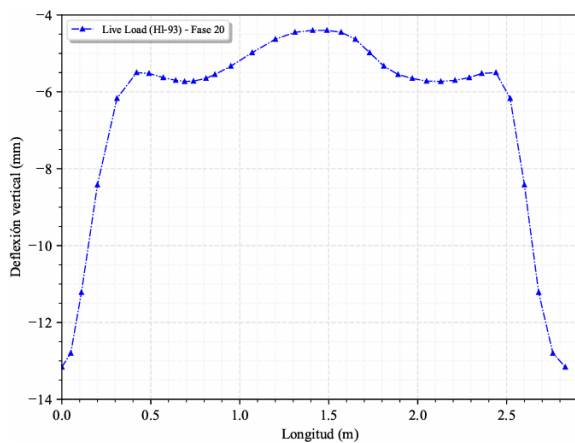


(b)

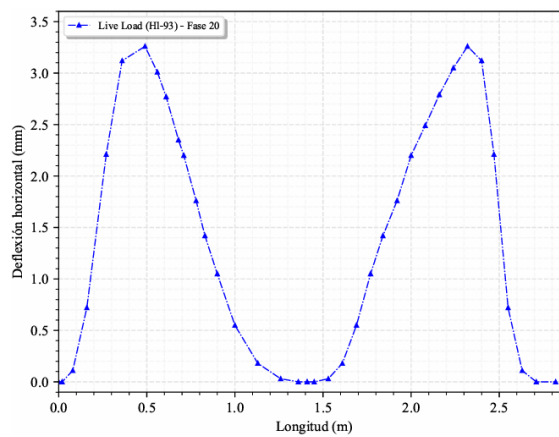
Las figuras 14(a) y (b) ilustran las deflexiones verticales y horizontales de la tubería tras la aplicación de la carga viva. Los resultados muestran que la deflexión vertical máxima alcanzó 13 mm en la corona, mientras que la deflexión horizontal máxima fue de 3 mm, registrada a 0,25 m del eje de la tubería.

**Figura 14**

(a) Deflexión vertical de la tubería bajo carga viva (CMP prog. 19+400). (b) Deflexión horizontal de la tubería bajo carga viva (CMP prog. 19+400).



(a)



(b)

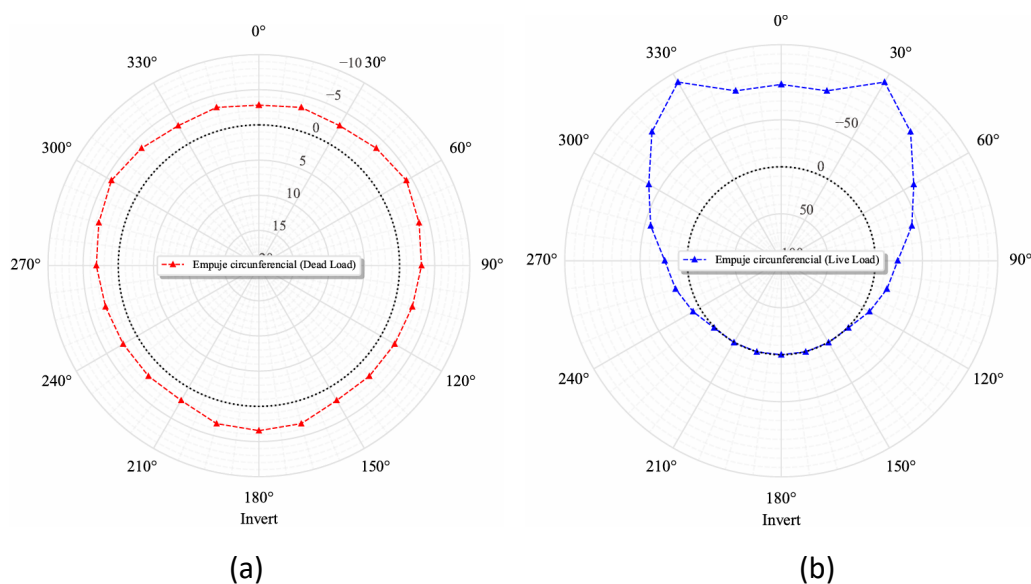
Como se observa en la Figura (15)(a), el empuje circunferencial ejercido por el relleno sobre la tubería fue de 4.22 kN/m y se localizó en el hombro de la tubería. Los empujes circunferenciales sobre la tubería tras la aplicación de la carga viva (camión de



transporte H1-93) se ilustran en la Figura (16)(b). La magnitud máxima del empuje registrado fue de 119.5 kN/m y se concentró principalmente en el hombro de la tubería, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Mai et al. (2014) en su estudio experimental.

**Figura 15**

(a) Deflexión vertical de la tubería bajo carga viva (CMP prog. 19+400). (b) Deflexión horizontal de la tubería bajo carga viva (CMP prog. 19+400).



**Tabla 7**

Resumen de la evaluación LRFD (Alc. TMC prog. 19+400).

Criterio de diseño	Dead load kN/m	Live Load kN/m	Factored demand kN/m	Factored capacity kN/m	Ratio
R. wall	4.22	115.28	210.38	452.18	0.47
R. buckling	4.22	115.28	210.38	570.54	0.37
R. seam	4.22	115.28	210.38	302.96	0.69
Deflection (mm)	-	-	8.76	45.00	0.19

### 5.3 Altura de relleno de 25 cm

Luego de evaluar la capacidad estructural de la alcantarilla TMC, se determina que es posible realizar una optimización de la altura de relleno sobre la corona, para ello es necesario modelar la alcantarilla bajo alturas de relleno menores a 30 cm y evaluar su

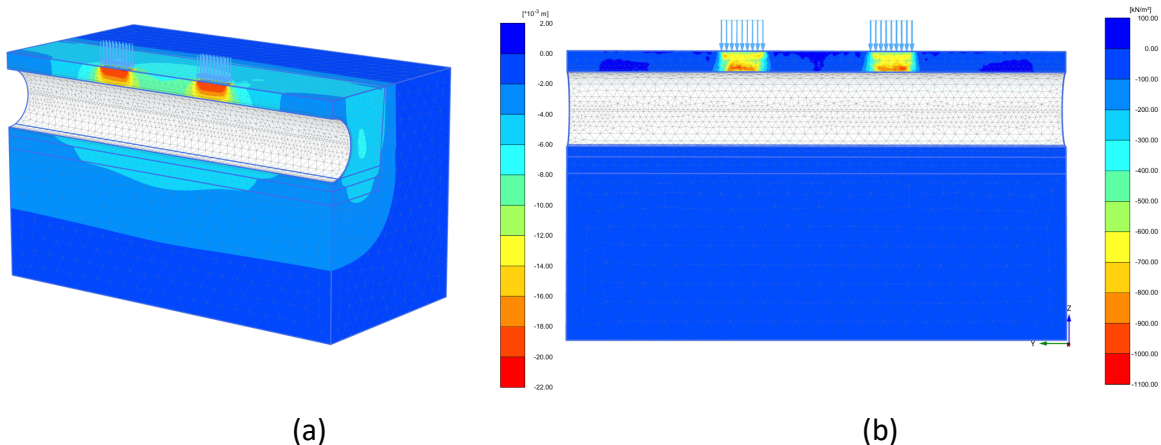


comportamiento estructural. En esta sección, se modela la alcantarilla con una altura de relleno de 25 cm por encima de la corona para evaluar su comportamiento estructural y explorar su posible optimización.

Durante la aplicación de la carga viva sobre la tubería metálica corrugada, se registró un desplazamiento total de malla de 20.42 mm. Este desplazamiento se produjo directamente en el suelo de relleno bajo los neumáticos, como se muestra en la Figura (16)(a). La Figura (16)(b) muestra que, durante la aplicación de la carga viva, las tensiones verticales en la capa de relleno sobre la corona de la alcantarilla alcanzaron valores de aproximadamente 1012 kN/m<sup>2</sup>. Además, se observa un aumento significativo en la magnitud de las tensiones al reducir la altura del relleno de 30 cm a 25 cm.

**Figura 16**

(a) Desplazamiento vertical de la malla con una altura de relleno de 25 cm (CMP prog. 19+400). (b) Fuerzas verticales sobre el suelo durante la aplicación de la carga viva (CMP prog. 19+400).

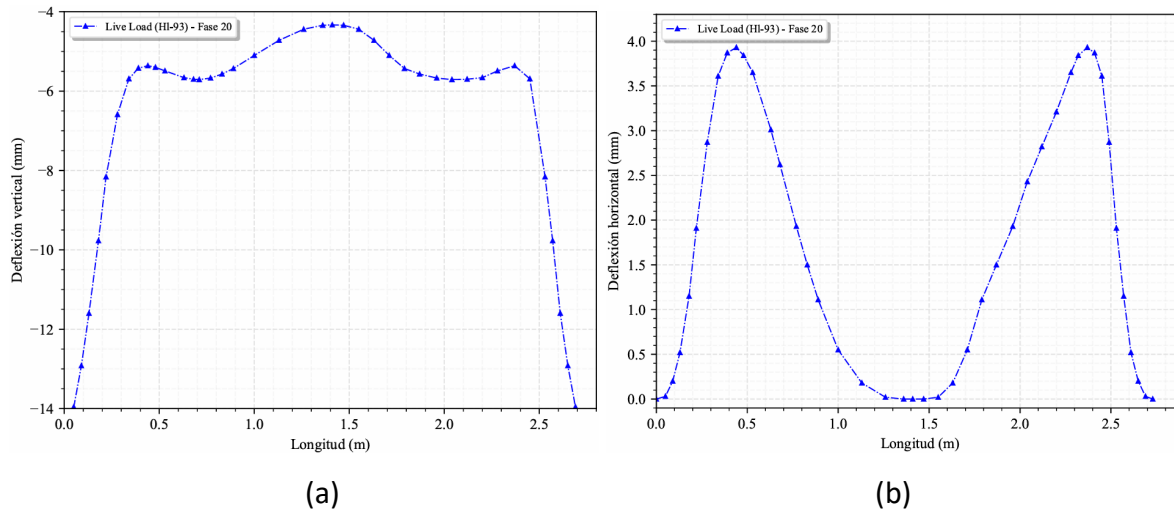


Las figuras (17)(a) y (17)(b) muestran las deflexiones horizontales y verticales de la tubería tras la aplicación de la carga viva. Los resultados indican que la deflexión vertical máxima alcanzó 14.54 mm en la corona, mientras que la deflexión horizontal máxima fue de 3.93 mm, registrada a 0.275 m del eje de la tubería.



**Figura 17**

(a) Deflexión vertical de la tubería bajo carga viva (CMP prog. 19+400). (b) Deflexión horizontal de la tubería bajo carga viva (CMP prog. 19+400).



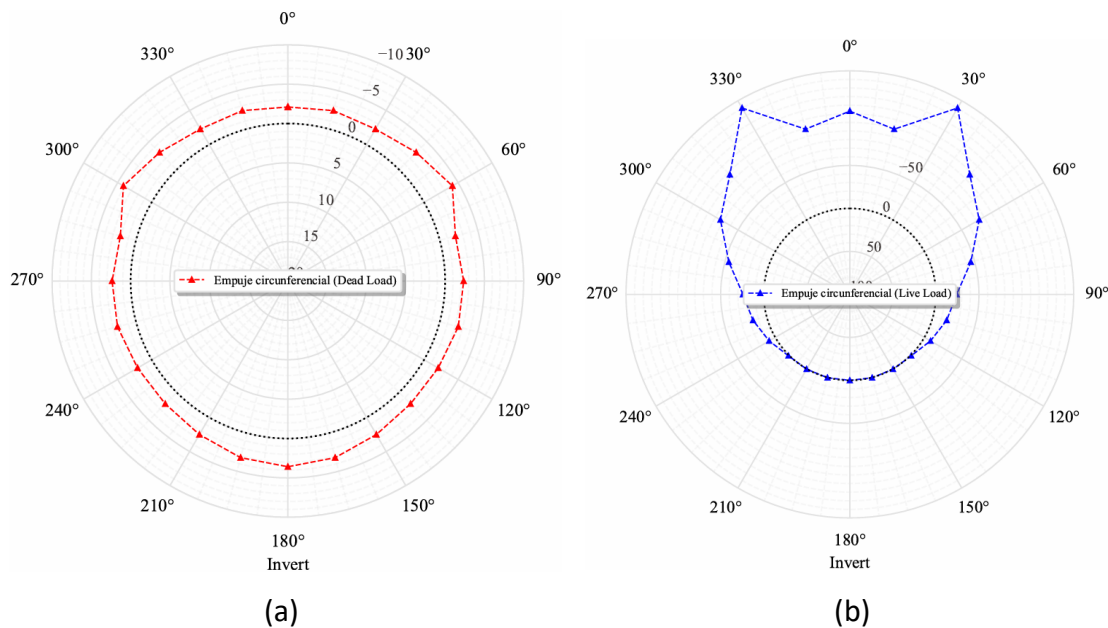
Como se ilustra en la Figura (18)(a), el empuje circunferencial ejercido por el relleno sobre la tubería alcanzó un valor de 4.16 kN/m, concentrado en el hombro de la tubería. Reducir la altura del relleno en tan solo 5 cm no produjo una disminución significativa en la magnitud del empuje, lo que sugiere que este parámetro es relativamente insensible a pequeñas variaciones en la altura del relleno.

Los empujes circunferenciales sobre la tubería tras la aplicación de la carga de diseño del camión H1-93 se ilustran en la Figura (18)(b). La magnitud máxima del empuje registrado fue de 150.3 kN/m y se concentró principalmente en el hombro de la tubería. Reducir la altura del relleno de 30 a 25 cm resultó en un aumento notable en la magnitud del empuje circunferencial inducido por la carga viva, que varió hasta aproximadamente 30.8 kN/m.

**Figura 18**

(a) Deflexión vertical de la tubería bajo carga viva (CMP prog. 19+400). (b) Deflexión horizontal de la tubería bajo carga viva (CMP prog. 19+400).





Después de evaluar el ratio demanda/capacidad de la alcantarilla CMP, se observó que la relación de resistencia de la costura alcanzó un rango de diseño óptimo, mientras que los demás ratios se mantuvieron por debajo del 60 %. En la alcantarilla CMP, en la progresiva 19+640, la relación de la costura también fue del 88 %, mientras que las demás relaciones se mantuvieron por debajo del 60 %, como se muestra en la Tabla 8.

**Tabla 8**  
 Resumen de la evaluación LRFD (Alc. TMC prog. 19+400).

Design criteria	Dead load Kn/N	Live Load kN/m	Factored demand kN/m	Factored capacity kN/m	Ratio
R. pared	4.16	145.8	263.7	452.18	0.58
R. pandeo	4.16	145.8	263.7	570.54	0.46
R. costura	4.16	145.8	263.7	302.96	0.87
Deflection (mm)	-	-	10.21	45.00	0.23

**Tabla 9**  
 Resumen de la evaluación LRFD (Alc. TMC prog. 19+640).

Design criteria	Dead load Kn/N	Live Load kN/m	Factored demand kN/m	Factored capacity kN/m	Ratio
R. pared	4.32	147.2	266.4	452.18	0.59
R. pandeo	4.32	147.2	266.4	570.54	0.47
R. costura	4.32	147.2	266.4	302.96	0.88



Deflection (mm)	-	-	11.62	45.00	0.26
-----------------	---	---	-------	-------	------

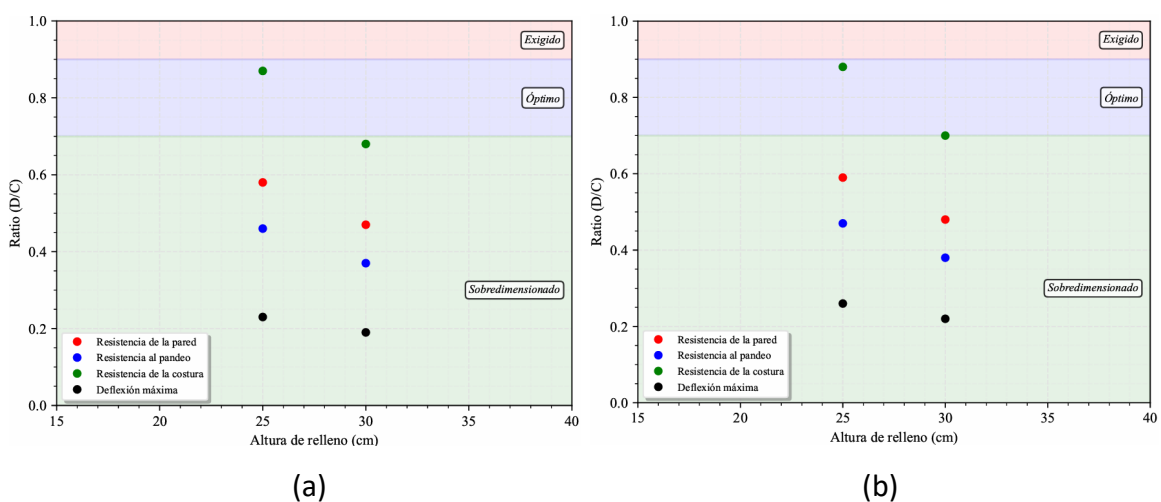
En la alcantarilla TMC de la progresiva 19+640, el ratio de la costura igualmente se situó en 88%, mientras que los demás ratios permanecieron por debajo del 60%, tal como se muestra en la Tabla 9.

### 5.3 Altura de relleno óptimo

Según los análisis realizados en la sección anterior, la respuesta estructural de la alcantarilla TMC bajo una altura de relleno de 0.25 m se considera como un diseño óptimo, tal como se muestra en la Fig. (19) (a). La resistencia de la costura es un factor determinante en las alcantarillas TMC con costuras longitudinales apernadas, tal como mencionó Bakht (1980) en su investigación. Adicionalmente, Katona (2022) señala que la presencia de juntas atornilladas longitudinales en alcantarillas de metal corrugado puede reducir la capacidad de resistencia de la costura por debajo del límite elástico del material. En ausencia de datos experimentales, se recomienda especificar la capacidad de resistencia de la costura como un 67% de la resistencia al límite elástico del material, según criterios establecidos.

**Figura 19**

(a) Evaluación de ratios (Alc. TMC prog. 19+400). (b) Evaluación de ratios (Alc. TMC prog. 19+640).



Los resultados indican que el cambio del suelo in situ no tuvo un impacto significativo en la capacidad estructural de la tubería, ya que los ratios obtenidos fueron muy similares, tal como se ilustra en la Fig. (19) (b). Esto confirma la hipótesis de que el suelo in situ no está sometido a esfuerzos significativos, ya que el suelo de relleno asume el papel principal en la disipación de los esfuerzos generados por la carga viva superficial.

## 6. Conclusiones

El método de elementos finitos ha demostrado ser efectivo en una proporción significativa para optimizar la altura de relleno sobre alcantarillas TMC. Los resultados demuestran que después de realizar el análisis del sistema alcantarilla – TMC, se pudo optimizar la altura de relleno mínima de 30 cm recomendada por las normas AASHTO y AISI, a una altura mínima de 25 cm realizando una optimización del 16.67% con respecto a la altura mínima, donde el ratio de demanda/capacidad de la resistencia de la costura se situó en 87% para la alcantarilla de la progresiva 19+400 y en 88% para la alcantarilla de la progresiva 19+640, considerándose como diseños óptimos.

El análisis de la resistencia reveló que el ratio más alto corresponde a la resistencia de la costura, concordando con los hallazgos de Bakht (1980), quien encontró que las fallas frecuentemente ocurren en las costuras, ya que según Katona (2022) las juntas atornilladas longitudinales reducen la capacidad de resistencia de la costura por debajo del límite elástico.

Los parámetros más importantes a considerar en el análisis de alcantarillas TMC mediante el método de elementos finitos, son las cargas superficiales aplicadas a las capas de relleno para simular el efecto de la compactación en la tubería, estos valores se encontraron entre 10 a 30 kPa. Estos resultados concordaron con las investigaciones realizadas por Ezzeldin et al. (2024) en una alcantarilla flexible tipo arco, quienes demostraron a través de un ensayo de laboratorio que la presión lateral registrada por la celda de presión total de tierra (PT1), fue aproximadamente 25 kPa para la primera capa de relleno, seguida de ligero aumentos para las capas superiores, alcanzando un valor máximo



de 35.9 kPa, concluyendo que el valor de la presión superficial recomendado por la literatura para simular la compactación mediante modelación numérica oscila entre 10 y 30 kPa.

El cambio de rigidez del suelo in situ no tuvo un impacto significativo en la capacidad estructural de la tubería, ya que los ratios obtenidos fueron muy similares. Los resultados obtenidos en la alcantarilla TMC ubicada en la progresiva 19+640 muestran que las fuerzas de empuje total fueron 1.5 kN/m superiores a las registradas en la alcantarilla de la progresiva 19+400. Además, las deflexiones máximas (cambio de diámetro) en la alcantarilla TMC de la progresiva 19+640 fueron 1.40 mm mayores que las de la progresiva 19+400 y los ratios de capacidad en ambas alcantarillas fueron muy similares, solo con una diferencia de 1%. Estos hallazgos corroboraron la hipótesis de que el suelo in situ no está sometido a esfuerzos significativos durante la aplicación de la carga, ya que el suelo de relleno juega un papel fundamental en la disipación de los esfuerzos generados por la carga viva superficial (camión de carga HL-93).

## 7. Contribuciones y futuras investigaciones

Este estudio proporciona un modelo numérico para el análisis de alcantarillas circulares enterradas y recomienda a los ingenieros involucrados en el diseño de alcantarillas de metal corrugado a realizar el diseño utilizando métodos numéricos avanzados como el método de elementos finitos (MEF), evitando así sobreestimar las alturas de relleno en estas estructuras mediante ecuaciones basadas en enfoques empíricos, ya que el costo de las alcantarillas de metal corrugado (TMC) influye significativamente en el costo total de un proyecto, ya que estas estructuras representan aproximadamente el 9% del costo directo en un proyecto vial.

Utilizando el modelo numérico propuesto en este estudio, se sugiere realizar investigaciones adicionales para determinar la altura óptima de relleno sobre la alcantarilla de metal corrugado (TMC) en función de su diámetro y geometría (circular, arqueada y elíptica) mediante la realización de pruebas a escala real del material de relleno (pruebas



triaxiales a escala real). Esto permitirá una representación más precisa del comportamiento real del suelo, ya que las pruebas triaxiales convencionales no consideran materiales con tamaños de malla superiores a 4. Dado que el 50 % del material de relleno estudiado en este estudio tenía un tamaño de grano mayor, es probable que una prueba a escala real revele parámetros elásticos más altos que los obtenidos en este estudio.

#### **8. Declaración de contribución de autoría: CREdiT**

Angel Sullcaray-Ichpas, Omar Caballero-Sánchez, Anderson Barreto-Goñi: Conceptualización, Metodología. Angel Sullcaray-Ichpas: Redacción, borrador original. Angel Sullcaray-Ichpas, Anderson Barreto-Goñi, Omar Caballero-Sánchez: Resultados, Discusión. Omar Caballero-Sánchez: Supervisión. Angel Sullcaray-Ichpas, Omar Caballero-Sánchez: Redacción, Conclusiones y Revisión de estilo.

#### **9. Agradecimientos**

Los autores agradecen a los revisores por tomarse el tiempo y el esfuerzo necesario para revisar este trabajo.

#### **10. Declaración de conflicto de intereses**

No se declara ningún conflicto de interés.

#### **11. Disponibilidad de los datos**

Los datos están disponibles en el siguiente enlace o Los datos estarán disponibles previa solicitud.

#### **12. Observación**

Este artículo es un resumen de la tesis de pregrado que previamente fue publicada en el repositorio de la Universidad Nacional de Huancavelica.



## Referencias

1. Aagah, O., & Aryannejad, S. (2014). *Dynamic analysis of soil-steel composite railway bridges: FE-modeling in Plaxis*. KTH Real Institute of Technology. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A761372&dswid=7198>
2. American Association of State Highway and Transportation Officials. (AASHTO, 2017). *Bridge design specifications LRFD (pp. 1506-1610)*.
3. American Iron and Steel Institute. (AISI, 2007). *Handbook of steel drainage highway construction products*.
4. American Society for Testing and Materials A653. (ASTM, 2001). *Standard specification*
5. Bakht, B. (1980). *Live load testing of soil-steel structures, sdr-80-4*. Ministry of Transportation & Communications.
6. Ballinger, C.A., & Drake P.G. (1995). *Culvert repair practices manual*. Volume I.
7. Bentley (2024). *Material models manual 3d (Plaxis 3D)*. [https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb\\_article\\_view&sysparm\\_article=KB0107989](https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article_view&sysparm_article=KB0107989)
8. Braja, M.D. (2007). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. IEEE. Thomson Editores, (pp. 379-417).
9. El Naggar, H., Campbell, A., & Ezzeldin, I. (2021). *Effect of the employed material model on the predicted behavior of corrugated metal pipes*. Transportation Research Record, 2675(10): 1364-1372. <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/03611981211016461>
10. El Sawy, K.M. (2003). *Three-dimensional modeling of soil-steel culverts under the effect of truckloads*. Thin-Wlled, 747-76. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823103000223>
11. Ezzeldin, I., & El Naggar, H. (2021). *Three-dimensional finite element modeling of corrugated metal pipes*. Transportation Geotechnics, 27(100467):10. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779824005145>
12. Ezzeldin, I., El Naggar, H., & Newhook, J. (2024). *Stresses induced in a buried corrugated metal arch culvert due to backfilling compaction efforts*. Tunneling and Underground



- Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 154(106096): 14.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779824005145>
13. Katona, M.G. (2022). *Culvert analysis and design solution methods and formulations*. CANDE, Highway Research Project NCHRP 15-28 (pp. 1-289).
14. Lang, K., & Sun, M. (2022). *Equivalent orthotropic model for corrugated plates based on simplified constitutive relation*. *Heliyon*, 8(11).  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240584402202552X>
15. Loughheed, A.C. (2008). *Limit states testing of a buried deep-corrugated large-span box culvert*. Queen's University.  
[https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/thesescanada/vol2/002/MR46238.PDF?oclc\\_number=704028888](https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/thesescanada/vol2/002/MR46238.PDF?oclc_number=704028888)
16. Look, B.G. (2007). *Handbook of geotechnical investigation and design tables*. Taylor & Francis, 53-64.
17. Mai, V.T., Hault, I.D., & Moore, I.D. (2014). *Effect of deterioration on the performance of corrugated steel culverts*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(2): 04013007.  
[https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001021](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001021)
18. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2013). *Especificaciones técnicas generales para construcción*.
19. Sullcaray, A., Caballero, O. (2024). *Optimización de la altura de relleno con material seleccionado sobre una alcantarilla TMC empleando el método de elementos finitos*.

